

.....

# Impacto de la minería subterránea en acuíferos: perspectivas en el contexto colombiano

Impact of the underground mining on aquifers:  
perspectives in the Colombian context

Anibal J. Pérez (IC, MSc., Ph.D)\*

## RESUMEN

En esta investigación se estudia el impacto de la minería subterránea en el recurso hídrico y algunas de las implicaciones conceptuales en el contexto colombiano. En particular, se estudian las implicaciones del uso de diferentes aproximaciones conceptuales en la modelación numérica de estos impactos. Se propone un protocolo de modelación útil para la simulación del impacto de la extracción continua de agua desde los túneles y los cambios (geo)químicos inducidos en la superficie y la subsuperficie. Este protocolo está enfocado principalmente en el análisis conceptuales hidrogeológicos relacionados con cambios en las direcciones de flujo y el comportamiento regional de los niveles freáticos comúnmente forzados por las prácticas mineras. Un protocolo de este tipo representa el punto de partida para la construcción de sistemas de soporte de decisiones que nos permitan el diseño de sistemas de monitoreo y seguimiento, así como el diseño de alternativas de mitigación y remediación.

Para completar el estudio de las implicaciones del uso de diferentes aproximaciones teóricas para representar conceptualmente el acuífero asociado a una explotación minera se usa un medio fracturado creado sintéticamente.

Los resultados muestran la gran relevancia que tiene el uso de una aproximación conceptual que incluya una caracterización geométrica detallada de las fracturas de tal manera que el modelo sea capaz de representar la respuesta real del acuífero. Los resultados también muestran las grandes diferencias entre el uso de una aproximación de fracturas discretas y el uso de un modelo de medio poroso equivalente, lo cual puede llegar a afectar el diseño de medidas de mitigación y control.

---

\* [anibperez@uan.edu.co](mailto:anibperez@uan.edu.co) Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil, Universidad Antonio Nariño, Bogotá (Colombia). Líder de Grupo en Ecología, Recursos Naturales, Desarrollo Sostenible e Ingeniería Ambiental (GRESIA)



**Palabras clave:** Aproximaciones conceptuales hidrogeológicas, minería subterránea, modelos numéricos, efectos ambientales

## ABSTRACT

In this work the environmental impact of underground mining on water resources and its conceptual implications in Colombian are studied; in particular the implications of conceptual approaches to numerical modeling of the quantification of these impacts on water resources are subject to a comprehensive review. A model protocol is proposed to simulate the impact of water extraction from tunnels and geochemical changes on subsurface and surface water. This protocol is mainly focused on conceptual hydrological set ups that include the analysis of changes in groundwater flow paths, the induced connection of hydrogeological units previously disconnected and regional groundwater drawdown. The protocol proposed represents the starting point towards the construction of a decision support system based on the adequate quantification of the impacts that would allow us to design suitable monitoring and follow-up systems as well as mitigation and remediation alternatives.

The implications of different conceptual models on numerical modeling are further studied using typical assumptions on theoretical approaches widely used in the Colombia context. The latter is performed by comparing a synthetic case of fractured media to a homogeneous porous media. Results showed the relevance of using a conceptual approach that accounts for a comprehensive geometrical characterization of the fractured system in order to simulate the actual response of the aquifer. Results also show important differences between the discrete fracture and the equivalent porous media approach that may affect the appropriate design of control and mitigation measures.

**Key words:** hydrogeological conceptual approaches, underground mining, numerical modeling, environmental impacts.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente complejidad de los problemas ambientales ha generado un interés particular en la evaluación cuantitativa del efecto de las actividades económicas en los recursos naturales. En particular, los efectos de la minería subterránea en las fuentes de aguas superficiales y subsuperficiales representan una enorme preocupación tanto en el ámbito mundial, como en el regional y local, debido al auge de las actividades relacionadas con la explotación de minerales.

Los impactos de la minería subterránea en los acuíferos son diversos y varían de acuerdo con las diferentes etapas de evolución de la explo-

tación. En particular, los efectos pueden ser de tipo geomorfológico, geomecánico, hidráulico, hidrológico y de calidad del agua, este último generalmente asociado a procesos físico-químicos.

Desafortunadamente, en la mayoría de los casos estos impactos son descritos exclusivamente de forma cualitativa, lo cual no permite hacer un diagnóstico real de la situación. En ese sentido, es urgente la implementación de una metodología que permita una evaluación mas completa de las dinámicas ambientales asociadas a las regiones en las que se presentan actividades de minería subterránea. Esta metodología debe incluir aspectos cualitativos y cuantitativos.

Los modelos numéricos constituyen una herramienta fundamental en la búsqueda de un entendimiento más profundo de las dinámicas ambientales asociada a las actividades mineras, y en particular a la minería subterránea. Para la implementación de esta herramienta es primordial la definición de un modelo conceptual con suficiente información de campo y documental que permita caracterizar las estructuras geológicas desde el punto de vista físico-químico e hidráulico.

En Colombia se han venido desarrollando actividades de explotación minera subterránea por décadas, sin embargo los esfuerzos por realizar una caracterización hidrogeológica detallada en la mayoría de los casos no han sido suficientes, lo que ha derivado en información fragmentada y difusa. En ese sentido, una metodología para la construcción de un modelo numérico representa una importante contribución no solo en la búsqueda de una evaluación cuantitativa de los impactos de la minería sino que permite identificar las necesidades de información para obtener una evaluación ambiental más confiable.

Aunque en el pasado se han presentado algunos esfuerzos por simular el comportamiento de algunas variables hídricas sobre todo en el marco de proyecto de consultorías, no está disponible un marco metodológico que permita definir las variables que se deben tener en cuenta en la construcción de un modelo numérico para evaluar los impactos de la minería subterránea en el componente hidrogeológico.

En este trabajo se pretende: (i) presentar una serie de parámetros que permitan desarrollar un análisis del impacto ambiental de la minería subterránea en el componente hidrogeológico, (ii) construir el protocolo de modelación como insumo para la construcción de un modelo numérico que permita evaluar cuantitativamente el impacto de las actividades asociadas con la minería subterránea, usando una aproximación basada en la física. Adicionalmente, en esta investigación se hace un análisis de las consideraciones teóricas relevantes en la construcción de un modelo de este tipo en el contexto colombiano. Para realizar este análisis de manera cuantitativa

se llevan a cabo simulaciones comparativas de dos aproximaciones conceptuales usadas en la construcción de modelos numéricos en áreas asociadas a minería.

## 2. IMPACTO DE LA ACTIVIDAD MINERA EN EL COMPONENTE HIDROGEOLÓGICO

A pesar de que el componente hidrogeológico tiene una gran importancia tanto en la operación de minas subterráneas como en el ambiente, en muy pocos estudios en Colombia se desarrolla una caracterización hidrogeológica de las estructuras asociadas a las formaciones mineras. Consecuentemente, en la mayoría de los casos no se cuenta con información suficiente para la construcción de un modelo numérico adecuado lo que ha derivado en la inexistencia de herramientas confiables de este tipo. Esta escasez de modelos numéricos impide a su vez la definición eficaz de los requerimientos de información para





la construcción de un modelo numérico confiable. Este ciclo sin fin representa uno de los mayores obstáculos en el camino hacia el desarrollo de sistema de soporte de decisiones basados en modelos numéricos validados.

Con el fin de analizar el marco conceptual hidrogeológico es importante determinar los factores relevantes particulares relacionados con la geología local, incluyendo propiedades hidráulicas de las formaciones, el tipo de explotación, y las características geométricas de fracturas en el área de estudio. En ese sentido, debido a que comúnmente se encuentra una escasez evidente de información primaria, ésta debe ser complementada con información secundaria, metodologías empíricas y estimaciones. El análisis conceptual hidrogeológico del área de estudio en este tipo de problemas se debe enfocar en los posibles impactos derivados de la actividad minera subterránea en el componente subsuperficial.

Tradicionalmente, los aspectos que son objeto de estudio en el contexto de explotación minera subterránea están relacionados con la alteración de las trayectorias de flujo subterráneo y las implicaciones en el componente geoquímico. También, eventualmente con el flujo de agua entre unidades hidrogeológicas antes desconectadas, o entre la superficie y la subsuperficie.

Otros impactos de la minería subterránea están relacionados con el drenaje de agua desde las formaciones permeables vecinas hacia el interior de las excavaciones ([1], [2]). Este efecto puede extenderse a través de muchos kilómetros, dependiendo de la profundidad de las excavaciones, y derivar en el abatimiento del nivel freático a nivel local y regional. Los factores que controlan el grado de afectación son la estructura regional de los acuíferos, la litología del área de explotación, la permeabilidad, la distribución de niveles freáticos locales y regionales y las características generales de los abatimientos (P.ej. radio de influencia, tipo de acuífero, entre otros).

Las dinámicas hídricas superficiales también son afectadas por cambios de la distribución de presiones inducida por las excavaciones mineras. Algunos de esos efectos son la formación de sumideros, pozos y vaguadas, así como la entrada



directa de agua desde la superficie al interior de la mina. Éste último factor puede también afectar considerablemente los patrones de flujo y la calidad del agua superficial.

El bombeo permanente de caudales considerablemente altos desde los túneles hasta la superficie durante un prolongado período de tiempo puede afectar algunos aspectos del ciclo hidrológico. Particularmente, esta actividad puede acelerar las respuestas hidrológicas de la cuenca y disminuir los niveles de estiaje del río, ya que abate de manera sostenida el nivel freático, en algunos casos desconectando los cuerpos superficiales de la tabla de agua. Por otra parte, la evolución de los túneles aumenta indirectamente la conductividad hidráulica de la formación rocosa al incrementar la densidad de fracturas, lo que puede a largo plazo derivar en la interconexión del acuífero local con acuíferos regionales retrasando los procesos de recarga y descarga hacia y desde el acuífero local, y por ende disminuyendo la cantidad de agua superficial disponible en la zona.



En el desarrollo de la explotación de una mina subterránea se construyen túneles, que no existían previamente, lo que genera el flujo de agua subterránea (o flujo directo desde cuerpos superficiales) hacia estos túneles. La química del agua subterránea puede ser inestable, con lo cual el contacto con rocas frescas recientemente expuestas por la excavación de los túneles puede resultar en reacciones que cambian la calidad de esta agua subterránea [2], P.ej. cuando agua subterránea atraviesa una roca altamente mineralizada en un área minera puede arrastrar consigo altas concentraciones de metales que luego descarga en otros acuíferos o en cuerpos de agua superficiales. La magnitud del impacto derivado de esta dinámica dependerá del tratamiento del agua y de la localización de la descarga.

Las tasas de flujo subterráneas también son afectadas por el desagüe de las minas subterráneas ya que éste actúa como un drenaje y abate el nivel freático. Cuando las minas subterráneas se extienden hasta zonas saturadas, el agua extraída crea un gradiente hidráulico que induce agua

al interior de la mina, lo que resulta en abatimiento del nivel freático local y muchas veces también regional, dependiendo de la profundidad de la excavación. El abatimiento del nivel freático inducido por el desagüe de las minas puede derivar en la ocurrencia del fenómeno de subsidencia, el cual, según algunos autores (P.ej. [2], [3]) , es una consecuencia inevitable de la minería subterránea que puede presentarse de forma localizada o regional, de manera inmediata o a largo plazo.

La subsidencia a su vez causa la proliferación de fracturas e induce el aumento de la apertura y la longitud de las fracturas existentes, aumentando el flujo vertical. Esto puede conllevar al aumento de la permeabilidad de las formaciones rocosas, especialmente si las fracturas se prolongan hasta la superficie, lo que conduce al incremento de la recarga en el área de la mina, forzando así también el incremento del caudal de desagüe y por ende el abatimiento del nivel freático. Esto conlleva a la consideración de un proceso cíclico de impactos derivados de la explotación subterránea.

### **3. PROTOCOLO DE MODELACIÓN DEL IMPACTO DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA EN LA HIDROLOGÍA SUBSUPERFICIAL**

Para el caso particular del impacto de la minería subterránea en las dinámicas hídricas se recomienda el uso de un modelo numérico basado en la física. El fin último de un modelo de este tipo es conocer las relaciones entre las variables de interés (i.e. alturas piezométricas y concentraciones de contaminantes) lo suficientemente bien de tal manera que se puedan evaluar alternativas de control y mitigación de los posibles impactos. Sin embargo, este objetivo está condicionado por la disponibilidad de información.

La construcción de un modelo numérico consta de diferentes fases. La primera de estas fases es la definición del propósito del modelo, en la cual se definen las preguntas que se formularán al modelo y el alcance de este. Esto último permitirá determinar la mejor manera de responderlas.

En ese sentido, esta fase del modelo nos permite definir el tipo de modelo que necesito para abordar la problemática tratada (i.e. interpretativo, genérico o predictivo).

Una vez el propósito del modelo es definido, se siguen una serie de pasos que se discuten a continuación:

### 3.1 Modelo conceptual

Para construir un modelo conceptual hidrogeológico de una área asociada a una explotación minera subterránea se debe: (a) definir el dominio de estudio y las fronteras del modelo; (b) caracterizar las unidades hidrogeológicas de tal manera que podamos definir propiedades hidráulicas de los materiales y estimativos de recarga; y (c) describir el sistema de flujo a través de la definición de áreas de recarga y descarga, y las posibles conexiones con cuerpos superficiales y otros acuíferos.

#### 3.1.1 Definición del área de estudio y las fronteras del modelo

Para definir el área de estudio y las fronteras del modelo en este tipo de estudios hidrogeológicos se recomienda asumir toda la extensión de la cuenca hidrogeológica en la cual se encuentra inmersa el área de explotación ya que las dinámicas de flujo subterráneo son de carácter regional, y las actividades locales pueden por ende tener impactos a este nivel. La definición de la cuenca hidrogeológica representa un reto en la mayoría de estudios en nuestro país ya que no se cuenta con la información suficiente. En ese sentido, comúnmente se escoge la cuenca hidrográfica coincidente con la hidrogeológica y se define esta última como la unidad de estudio, sin embargo, esta suposición puede introducir inconsistencias importantes en la mayoría de casos.

Para la definición de la cuenca hidrogeológica es recomendable el uso de líneas sísmicas, las cuales nos ayudan a definir cambios de *facies* en grandes extensiones. Alternativamente, se puede usar el conocimiento experto de geólogos en la definición de las fronteras del área de estudio.

Para definir el límite en profundidad de la unidad de estudio se debe tener en cuenta la profundidad de las excavaciones introducidas por la explotación minera y la profundidad del material rocoso en el cual se está realizando la explotación. En Colombia la profundidad de la unidad de estudio puede ser de unos cuantos metros hasta miles de metros.

#### 3.1.2 Caracterización de las Unidades Hidroestratigráficas

La caracterización hidráulica de flujo subterráneo en una formación rocosa alterada por actividades de explotación minera profunda es sin lugar a dudas uno de los problemas más complejos en el campo de la hidrogeología, ya que se requiere una gran cantidad de información que permita obtener un conocimiento preciso del ambiente minero en el cual se desarrollan las actividades. Uno de los principales problemas es la descripción de la heterogeneidad y la anisotropía de las formaciones. De hecho, en formaciones altamente alteradas por actividades mineras, el flujo vertical tiene una gran importancia contrario a la mayoría de los estudios, y por tanto requiere la adecuada definición de la conductividad hidráulica en este sentido, lo que implica una descripción tridimensional del modelo conceptual [4].

Desafortunadamente, la explotación desarrollada en Colombia (y en la mayoría de lugares del mundo) comenzó mucho antes del desarrollo de métodos modernos de exploración hidrogeológica. Consecuentemente, existe una escasez notable de información confiable relacionada con las formaciones antes de que los procesos de alteración introducidos por las actividades de explotación tuvieran lugar. En ese sentido, para caracterizar la formación rocosa asociada a explotaciones mineras se usan aproximaciones simplificadas existentes en la literatura y enfocadas exclusivamente al estado actual.

Las dinámicas asociadas a aguas subterráneas en formaciones rocosas fracturadas son complejas, por ende para escoger la metodología adecuada y las suposiciones de la manera más acertadamente posible se deben analizar algunas



características y analizar si estas son comunes a clasificaciones típicas de acuíferos. En principio, todos los acuíferos en roca fracturada pueden ser considerados como un *continuum* entre el medio poroso y las fracturas las cuales son asumidas como un “sistema de tuberías” donde el agua fluye a altas velocidades.

En la literatura se pueden distinguir varios tipos de aproximaciones conceptuales a acuíferos en roca fracturada (e.g. [5]). Por una parte tenemos acuíferos donde las fracturas no existen o no tienen mucha relevancia en el flujo, dentro de estos se encuentran: (i) *acuíferos en medio poroso homogéneo*, en el cual el agua fluye a través de los espacios entre los granos de arena, y (ii) *acuíferos en medio poroso heterogéneo*, en el cual la variación sistemática del tamaño de los granos genera zonas de flujo preferencial. Por otra parte, tenemos otro grupo de acuíferos en los cuales las fracturas representan un factor determinante en el modelo conceptual ya que controlan el flujo, estos incluyen (iii) *medios porosos puramente fracturados*, lo que implica que el agua fluye solo a través del “sistema de tuberías” conformado por las fracturas y que el medio poroso en medio de éstas es impermeable y no tiene porosidad; y (iv) *medio poroso fracturado* en el cual se considera que la matriz entre las fracturas, considerada impermeable en el tipo de acuífero anterior, es capaz de almacenar agua y puede contribuir de manera significativa en el flujo, en general son fracturas inmersas en una matriz porosa conductiva.

Los acuíferos en roca fracturada asociados a la explotación minera están comprendidos por una red de fracturas que atraviesan una matriz rocosa. Por esta razón, para construir un modelo conceptual en estos casos típicamente se requiere información acerca de la naturaleza de las fracturas y de la matriz en la que están inmersas las fracturas. En términos generales, las fracturas pueden ser caracterizadas a través de tres dimensiones principales: *apertura*, *longitud* y *ancho*, así como también a través de su localización, y la naturaleza de las paredes de fractura (i.e. rugosidad superficial de la fractura). Por otra parte, el medio poroso en el cual se encuentran

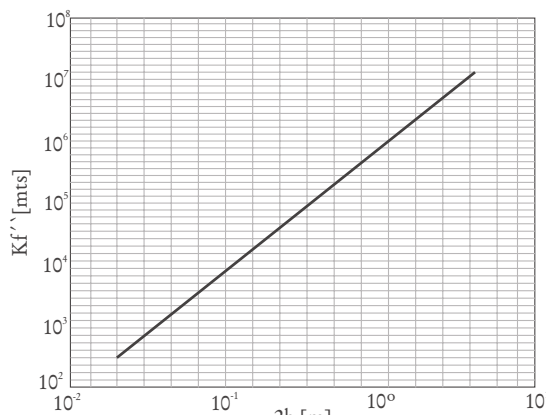
inmersas las fracturas es descrito a través de la distribución de los espacios porosos. En el caso de las fracturas, lo que se quiere es establecer su conductividad hidráulica  $K_f$ . En el caso del medio poroso, se requieren tanto la porosidad  $n$  como la conductividad hidráulica  $K_m$  [5].

En la literatura, se han propuesto algunos métodos para hallar la conductividad hidráulica a través de una o más características geométricas que pueden ser medidas. Dentro de los métodos más populares se encuentra la ecuación propuesta por [6] y [7] en la cual se expresa el valor de  $K_f$  para una simple fractura planar en términos de la apertura como:

$$K_f = 4b^2 \rho g / 12\mu \quad \text{Eq. 1}$$

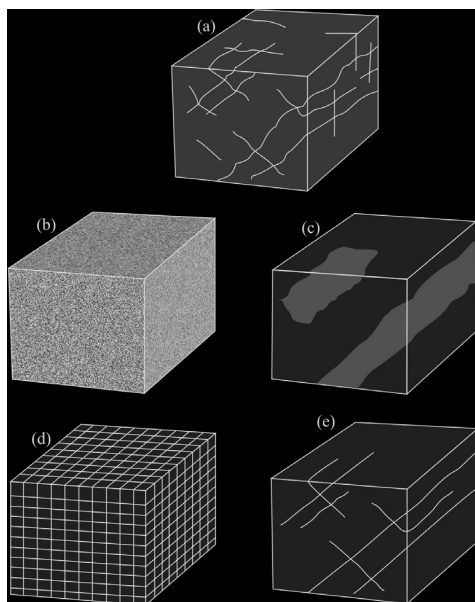
donde  $b$  es la apertura de la fractura;  $\rho$  es la densidad del agua ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ );  $\mu$  es la viscosidad cinemática del agua ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$ ), y  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ). Resultados de  $K_f$  para diferentes aperturas se presenta en la Figura 8.

Figura 1. Valores de Conductividad hidráulica  $K_f$  como una función de la apertura de las fracturas



En casos reales no se tiene una fractura sino un conjunto de fracturas inmersas en un medio poroso. Para construir el modelo conceptual para este tipo de problemas existen diferentes aproximaciones en la literatura. En la Figura 2 se describen diferentes aproximaciones conceptuales usadas comúnmente en acuíferos en roca fracturada.

**Figura 2.** Diferentes aproximaciones para acuíferos en roca fracturada:



(a) Red de fracturas real; (b) Medio poroso equivalente usando parámetros hidráulicos uniformes; (c) Medio poroso equivalente en el cual las zonas de alta densidad de fracturas se expresa con regiones de conductividad mas alta; (d) Modelo de porosidad doble; y (e) Modelo de fracturas discretas en el cual las fracturas mayores son modeladas explícitamente (Fuente: Cook, 2003)

### 3.1.2.1 Modelo de Porosidad doble

Esta metodología es usada en casos donde la matriz rocosa que contiene la red de fracturas tiene una conductividad hidráulica significativa. Este tipo de metodología puede ser de gran utilidad en secuencias sedimentarias fracturadas tales como areniscas o en arcillas fracturadas. La implementación de este método requiere definir una ecuación de flujo para la matriz rocosa permeable y otra para el sistema de fracturas, además de la definición de una función de transferencia (o de acoplamiento) que me permita definir el movimiento del agua entre un medio y el otro.

Esta metodología requiere la definición de muchas variables lo cual incrementa su complejidad. Este nivel de complejidad lo hace adecuado sólo en casos en los que el área de estudio es relativamente simple. Por otra parte, este método es

el mas adecuado en casos donde la distribución de presiones cambia con el tiempo (i.e. Transitorios), pero requiere el uso de modelos numéricos avanzados (P.ej. *FRAC3D*, *HydroGeosphere*).

### 3.1.2.2 Sistemas discretos de fracturas

Esta metodología permite una caracterización explícita de cada fractura a través de sus propiedades específicas. Cada fractura es simulada discretamente utilizando la conductividad hidráulica definida anteriormente. La matriz donde se encuentran inmersas las fracturas es considerada impermeable. La mayor limitación de este método pasa por la necesidad de caracterizar de manera detallada la geometría de las fracturas. Por esta razón, este método es adecuado en estudios a mediana o pequeña escala.

### 3.1.2.3 Medio Poroso Equivalente

En esta aproximación las fracturas no son evaluadas individualmente, sino que la heterogeneidad del sistema de roca fracturado (incluyendo matriz rocosa y sistema de fracturas) es representado usando un *medio poroso equivalente*. Es decir, tanto la porosidad primaria y secundaria como la distribución de conductividad hidráulica son remplazadas por un medio poroso homogéneo.

Este método representa la mejor alternativa cuando existen limitaciones en la colección de datos primarios, ya que tiene menores requerimientos de información que los anteriores métodos. Dada la sencillez de éste método es uno de los más usados en casos reales. Para implementarlo se requiere la escogencia de un set de ecuaciones para determinar conductividad hidráulica equivalente.

Para estimar la conductividad del medio poroso equivalente, [8] extendió la Eq. 1 de tal manera que permitiera definir una conductividad hidráulica equivalente  $K_{eq}$  para toda la formación, asumiendo un sistema de fracturas idénticas, paralelas y con el mismo espaciamiento, inmerso en una matriz porosa homogénea e isotrópica de conductividad hidráulica  $K_m$  y la expresó de la siguiente manera:

$$K_{eq} = (b/B) K_f + K_m \quad Eq. 2$$



Donde B es el espaciamiento entre fracturas. La conductividad hidráulica equivalente es calculada entonces en la dirección de las fracturas. Adicionalmente, la porosidad del sistema se puede expresar como [9]:

$$\eta = 2 (b/B) \quad \text{Eq. 3}$$

Claramente los valores de apertura, porosidad y conductividad hidráulica representan sólo una aproximación de las condiciones observadas en campo.

En muchos casos reales asociados a la explotación minera existen diversos factores que no nos permiten asumir fracturas idénticas, paralelas y con el mismo espaciamiento. En particular, la meteorización, la heterogeneidad de las formaciones y la diferencia de espesor de las unidades litológicas suprayacentes pueden introducir una importante variabilidad en la densidad de las fracturas.

Un factor que juega un papel de mucha importancia en este análisis es la profundidad. Algunos resultados experimentales [7] muestran una reducción en el grado de fracturación cuando la profundidad se incrementa, asociada principalmente a la disminución de la apertura de las fracturas. Esta reducción deriva muchas veces en la disminución de la porosidad de las fracturas y por ende en la disminución de la permeabilidad del sistema fractura/matriz porosa (o rocosa).

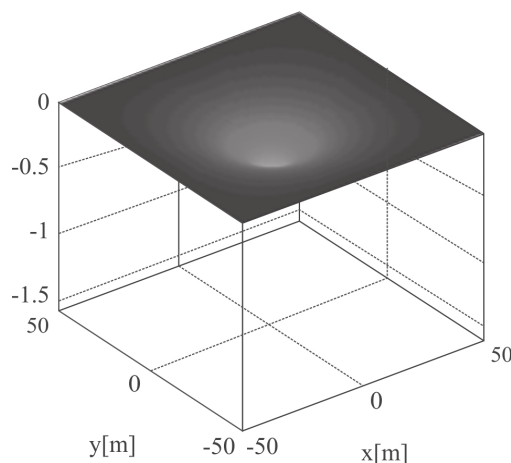
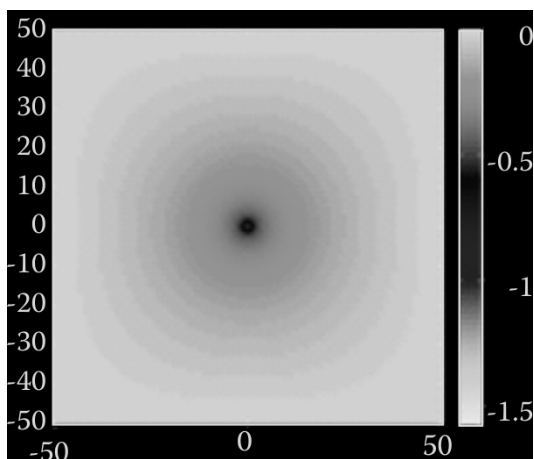
### Efecto de los túneles en la caracterización de las Unidades

Otro factor que debe ser considerado en este análisis conceptual es la presencia de túneles excavados durante la explotación subterránea. Estos túneles además de incrementar la fracturación de las áreas aledañas debido al incremento de esfuerzos mecánicos, aumentan el gradiente hidráulico afectando las líneas de flujo en las áreas donde son construidos.

Por una parte, sin las labores de extracción de agua, la red de túneles actuaría aumentando la conductividad hidráulica del sistema roca-fracturas, ya que los túneles representan caminos de flujo preferencial donde la conductividad hidráulica es muy alta. Este es el caso concreto de los túneles que se encuentran inundados, o de las minas en estado de abandono. Por otra parte durante la explotación, el bombeo permanente de agua desde los túneles hacia la superficie se puede interpretar conceptualmente como pozos de extracción de agua. Esta consideración implica una disminución local de presiones en el área de influencia de los túneles que genera un abatimiento del nivel freático a nivel regional.

Para analizar las dinámicas asociadas al impacto de la red de túneles en las líneas de flujo subterráneo es necesario un modelo numérico que calcule la distribución de presiones de manera

**Figura 3.** Simulación numérica esquemática de un túnel para analizar el efecto de la extracción de agua y la disminución local de las cabezas hidráulicas.



transitoria y que considere la geometría detallada de los túneles teniendo en cuenta los dos escenarios discutidos anteriormente. En el contexto del segundo escenario, existe un efecto de la extracción de agua a nivel local y regional tal como el que se ilustra en la Figura 3.

En esta figura se muestra la disminución de presiones en los alrededores del “túnel de extracción”. La variación se representa en círculos concéntricos alrededor del eje del túnel. En la realidad se tiene comúnmente más de un túnel y puede que los radios de influencia entre un túnel y otro generen interferencia entre ellos.

### 3.1.3 Balances Hídricos

Los balances hídricos representan el punto de partida para entender el sistema de flujo y determinar la recarga de este tipo de acuíferos. [3] plantearon una ecuación similar a la expresada en la Eq. 4 para describir el balance de agua subterránea. La ecuación original fue simplificada para tener en cuenta las consideraciones particulares del caso de explotación minera:

$$Q_p = Q_{cp} + Q_{en} - Q_t \pm Q_i \quad \text{Eq. 4}$$

donde  $Q_p$ : cantidad de agua bombeada desde la mina hasta la superficie;  $Q_{cp}$ : es el agua operacional que se bombea al interior de la mina;  $Q_{en}$ : es la recarga proveniente de la formación rocosa que se puede definir como:

$$Q_{en} = Q_i + Q_{aq} \quad \text{Eq. 5}$$

donde  $Q_i$  es el agua infiltrada por precipitación, y  $Q_{aq}$  es la cantidad de agua recargada desde acuíferos vecinos.  $Q_t$  es la cantidad de agua extraída de la mina conjuntamente con la producción mineral. Finalmente, el término  $Q_i$  hace referencia a pérdidas o ganancias de agua de cualquier otro tipo. Como podemos observar la determinación de todas las variables en esta ecuación es una tarea muy difícil, por esta razón en la mayoría de los casos debemos acudir a algunas simplificaciones. Una suposición común es asumir que el agua bombeada a la superficie ( $Q_p$ ) es igual a la suma de las entradas de agua a la mina. Combinando Eq. 4 y 5, esta suposición se puede expresar como:

$$Q_p = Q_{cp} + Q_i + Q_{aq} \quad \text{Eq. 6}$$

Esta aproximación nos permite remover dos incógnitas disminuyendo la complejidad del problema. Para determinar la recarga  $Q_i$  necesitamos medir el agua bombeada desde la mina hacia la superficie ( $Q_p$ ) y desde la superficie a la mina ( $Q_{cp}$ ), adicionalmente debemos estimar la recarga proveniente de otros acuíferos ( $Q_{aq}$ ). Este último parámetro resulta difícil de estimar para cada mina en particular sin una adecuada caracterización de las formaciones, sin embargo, si se escoge un dominio lo suficientemente grande se podría asumir que no existe conexión con acuíferos vecinos. Para analizar la validez de esta suposición es necesario desarrollar algunas actividades de monitoreo que incluyen la localización de piezómetros en las fronteras del modelo. Estos piezómetros nos permitirán validar la condición de no flujo en las fronteras del modelo, o estimar una condición de frontera tipo Neuman (flujo definido en la frontera).

Adicionalmente, se deben definir zonas de recarga y valores de recarga. Así como también lugares de descarga de contaminantes. Idealmente, esto se debe hacer usando técnicas basadas en análisis isotópicos, sin embargo, en la práctica en nuestro medio esto no es muy común debido a los altos costos y a la poca disponibilidad de los equipos de análisis. Una manera simplificada de hacerlo es superponiendo mapas de pendiente, cobertura, geológicos y precipitación de tal manera que nos permita encontrar zonas asociadas a recarga.

En la definición de una aproximación conceptual (modelo conceptual) es necesario definir las condiciones de frontera del área de estudio. En ese sentido, se deben monitorear a través de piezómetros las divisorias que se definieron como límites del modelo. En particular, se deben localizar piezómetros a lo largo de estas divisorias de tal manera que se definan ya sean condiciones de frontera tipo I (Cabeza hidráulica especificada o Dirichlet) o de tipo II (Flujo especificado o Neumann). Idealmente, este monitoreo se debe hacer de manera permanente ya que debido a los cambios en los regímenes hidráulicos y de calidad del agua inducidos por la explotación

minera, el modelo numérico debe ser calculado de manera transitoria, y no estacionario como típicamente se hace en otros tipos de modelos.

Aunque el análisis conceptual nos permite entender de manera general dinámicas hídricas en el componente hidrogeológico, y la influencia de algunas actividades relacionadas con la explotación minera en el área de estudio, éste no permite evaluar de manera cuantitativa los impactos reales de esta actividad. En ese sentido, la única forma de lograr una mejor caracterización de la hidrogeología regional y del impacto de las actividades derivadas de la minería subterránea en la región es la construcción de un modelo numérico.

Debido a la naturaleza transitoria del modelo se requiere la definición de una condición inicial, la cual representa la distribución de presiones y concentraciones dentro del área de estudio antes de comenzar la actividad minera, así como también la distribución de densidades de fractura en toda la extensión del área de estudio.

### 3.2 Definición del modelo computacional

En el contexto de las aguas subterráneas el software mas usado es MODFLOW, el cual está basado en un esquema de diferencias finitas en el que el dominio es discretizado como una grilla rectangular. MODFLOW tiene algunos problemas para la simulación de flujos en medios con doble-porosidad que incluyan flujo preferencial a lo largo de las fracturas. En ese sentido, MODFLOW solo es capaz de simular el modelo conceptual que asume la formación como un medio poroso equivalente.

Como alternativa a MODFLOW, para simular flujo en roca fracturada han surgido algunos códigos computacionales tales como FEFLOW, FRACTRAN, NETFLO, SWIFT y FRAC3DVS, entre otros. Dentro de estos el que mas ha evolucionado es FRAC3DVS ya que en la actualidad se encuentra contenido en un esquema mas completo, basado en elementos finitos, que incluye generación aleatoria de fracturas, modelamiento de flujo y transporte en la superficie y subsuperficie de manera acoplada. Este esquema de

modelación es conocido como HydroGeoSphere [10]. Una ventaja adicional de éste software es que el esquema de elementos finitos y el generador de la grilla que está disponible se adapta más a la complejidad geométrica de acuíferos en roca fracturada.

### 3.3 Diseño del modelo

El diseño del modelo consiste en la construcción de un dominio discretizado representado por un arreglo de nodos que conforman la estructura numérica o malla en la cual se resolverá espacialmente las ecuaciones de flujo y transporte que describen la distribución de presiones, y por ende el movimiento del agua y los conataminantes en la subsuperficie. La dimensión de la malla está determinada por la extensión del dominio y por el esquema numérico usado: diferencias finitas o elementos finitos. La definición de este esquema esta a su vez relacionada a la escogencia del código computacional.

Es claro que un modelo numérico para ser confiable debe contar con una importante base de datos de parámetros de entrada, ya que *un modelo es tan bueno como sus datos de entrada*. Para evaluar de manera cuantitativa la confiabilidad del modelo se debe calibrar y validar los resultados de las simulaciones del modelo. Estos procesos se realizan mediante la comparación de los datos simulados por el modelo con los datos medidos en campo.

### 3.4 Calibración del modelo

El propósito de la calibración del modelo es establecer que el modelo puede reproducir las mediciones de campo, P.ej. alturas piezométricas o concentraciones, así como también estimar los valores de los parámetros del modelo basados en mediciones. Estos valores calibrados son obtenidos mediante la modificación sistemática de los valores de los parámetros hasta que los datos de salida medidos y simulados son similares. Para establecer hasta que punto estos valores deben ser similares se usa el  $\chi^2$ -test [11, 12] que tiene en cuenta la incertidumbre de las mediciones y los errores epistémicos intrínsecos del modelo



(i.e. errores en la definición de las condiciones de frontera o en las condiciones iniciales).

### 3.5 Validación del modelo

El propósito de la validación es establecer una mayor confianza en el modelo mediante el uso del set de parámetros calibrados para reproducir un segundo grupo de datos de campo. Muchos esquemas han sido propuestos en la literatura para evaluar la habilidad predictiva del modelo [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Un esquema jerárquico denominado el *split-sample test* presentado por [16] es el más usado de los esquemas. Básicamente, en este esquema se divide la información de campo disponible para evaluar la correspondencia del modelo en dos sets de datos que difieren ampliamente el uno del otro debido al aumento de la explotación y al cambio en los regímenes de recarga. Uno de estos sets es usado para calibrar el modelo, y el segundo para validar el modelo.

### 3.6 Simulación del problema

Una vez que el modelo es calibrado y validado, se realiza la simulación de las dinámicas asociadas a la explotación minera considerando las variables relevantes para este tipo de modelos, los cuales se discuten en la siguiente sección, y usando los parámetros definidos durante el proceso de calibración del modelo. Esta simulación tiene el propósito de evaluar el impacto de la actividad minera subterránea en el acuífero asociado. En este punto, se pueden simular también diferentes escenarios de operación así como alternativas de mitigación de los impactos.

## 4. HACIA LA SIMULACIÓN DEL IMPACTO DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS

### 4.1 Aproximaciones conceptuales

Con el fin de realizar un análisis comparativo entre las aproximaciones conceptuales usadas para simular el impacto de la minería subterránea en acuíferos se plantea el uso de dos metodologías:

- (i) modelo simplificado usando medio poroso y
- (ii) modelo detallado usando fracturas discretas.

#### 4.1.1 Modelo simplificado usando medio poroso equivalente

Típicamente, para describir el acuífero conformado por la roca fracturada y el sistema de túneles se ha planteado el uso de diferentes aproximaciones teóricas. En nuestro país muy poco se ha hecho para simular este tipo de casos, sin embargo la aproximación más usada asume el sistema de roca fracturada y túneles como un *medio poroso equivalente*.

Para este fin se considera que la conductividad hidráulica de la matriz  $K_m$  es muy pequeña y por ende la conductividad hidráulica equivalente  $K_{eq}$  es función exclusivamente de la apertura de las fracturas y del espaciamiento de estas. Otra suposición asociada a esta aproximación es que debido al alto grado de intervención normalmente asociado a la formación rocosa durante el proceso de construcción de túneles y a la explotación minera en general, la cual se desarrolla hasta niveles considerables de profundidad, se asume que la densidad de las fracturas es aproximadamente igual para toda la profundidad.

Para describir el movimiento de agua en la sub-superficie en un medio homogéneo podemos usar la ecuación típica de flujo subterráneo, que para un medio poroso saturado se puede escribir en 3-D como:

$$S_s (\partial h / \partial t) - \nabla q = q_i - q_o \quad \text{Eq. 7}$$

Donde  $h$  es la cabeza hidráulica total definida como la suma de la cabeza de posición  $z$  y la cabeza de presión,  $\psi$ . Donde  $q$  es la tasa de flujo de agua subterránea (o velocidad darciana).  $q_i$  y  $q_o$  son términos de entrada y salida de agua al elemento siendo considerado.  $S_s$  es el coeficiente de almacenamiento.

Para el caso del medio poroso equivalente, con los valores de conductividad hidráulica equivalente calculados como es expresado en la ecuación 2, se puede utilizar la ecuación de Darcy para calcular la tasa flujo de agua subterránea  $q_{me}$  asociada al ambiente hidrogeológico de la mina. Esta ecuación se puede expresar como:

$$q_{me} = K_{eq} \nabla h \quad \text{Eq. 8}$$

Donde  $\nabla h$  es el gradiente hidráulico. La velocidad promedio de flujo  $v$ , se puede calcular a partir de  $q_{me}$  como:

$$q_{me} / \eta = v \quad \text{Eq. 9}$$

La condición hidráulica del medio poroso equivalente conformado por el sistema roca-fracturas ha sido considerada por muchos autores como muy buena (i.e Bear, 1972), sin embargo en los pocos estudios realizados en Colombia se asume que la conductividad del sistema es despreciable. Teniendo en cuenta consideraciones teóricas, la conductividad hidráulica  $K_{eq}$  del medio poroso equivalente depende en gran medida del grado de fracturación de la roca y varía de 80 m/d en roca altamente fracturada hasta 0.8 m/d en roca con algunas fracturas [19].

#### 4.1.2 Modelo detallado usando fracturas discretas

Este modelo propone la caracterización explícita de cada fractura a través de sus propiedades específicas. Cada fractura es simulada discretamente utilizando una conductividad hidráulica asociada mientras la matriz es considerada impermeable. Como se mencionó anteriormente la mayor limitación de este método pasa por la necesidad de caracterizar de manera detallada la geometría de las fracturas. En ese sentido, en este trabajo se propone el uso de aproximaciones estadísticas para generar las fracturas:

- Se propone que las coordenadas iniciales en X y Y de las fracturas ( $x_0, y_0$ ) siguen una distribución gaussiana de acuerdo a:

$$P(x) = 1 / (\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad \text{Eq. 10}$$

Con  $\mu = L_i/2$  y  $\sigma = L_i/4$ , donde  $L_i$  representa la longitud total en cada dirección.

- Se propone que la orientación de las fracturas también sigue una distribución gaussiana, con la dirección principal predominante de las fracturas en grados representada por  $\mu$  y su desviación estándar  $\sigma$  también expresada en grados.

- La longitud de las fracturas sigue una distribución log-normal de acuerdo a:

$$P(x) = 1 / (\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-(\ln x - \mu)^2/(2\sigma^2)} \quad \text{Eq. 11}$$

Donde  $\mu$  es la longitud esperada de las fracturas expresada en metros.

- La apertura de las fracturas sigue una distribución exponencial que puede ser expresada como:

$$P(x) = P_0 e^{-\lambda x} \quad \text{Eq. 12}$$

Donde valores grandes de  $\lambda$  derivan en pequeños valores de aperturas, mientras valores pequeños favorecen aperturas más grandes.

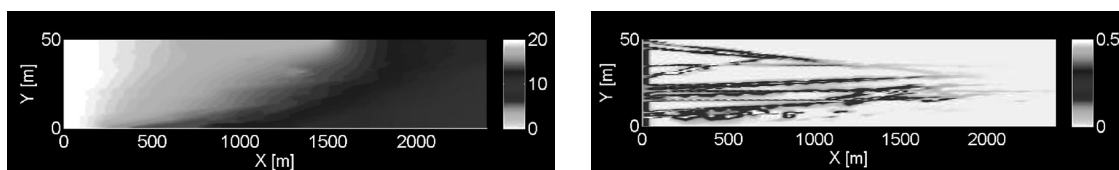
#### 4.2 Simulación numérica

Para entender las diferencias en las aproximaciones conceptuales, en esta sección se desarrolla un estudio de las simulaciones numéricas usando dos modelos conceptuales. Las simulaciones se hacen sobre un caso sintético representado en un acuífero fracturado de 2400 m de largo y 50 m de profundidad. Se establece un gradiente ambiente que se usa para todas las simulaciones de  $I=0.02$  m/m de tal manera que se induce un flujo constante desde la frontera izquierda hacia la frontera derecha del dominio.

Con el fin de analizar el impacto de las diferentes aproximaciones conceptuales en el movimiento de los contaminantes, se impone una condición de frontera Dirichlet en la frontera izquierda del dominio, el valor de la concentración del contaminante conservativo se asume constante igual a 100 mg/l. Utilizando esta configuración se construyeron dos casos que varían fundamentalmente en la forma como se representa el sistema roca/medio poroso-fracturas.

En un primer caso se asumen fracturas discretas inmersas en un medio poroso/roca, para este fin se generaron las fracturas de acuerdo al modelo planteado en la sección 4.1.2. Una vez el sistema de fracturas es generado, se simula el flujo y transporte de contaminantes por 140 horas usando el modelo Hydrogeosphere [11]. Los resultados de flujo y transporte de contaminantes se muestran en la figura 4.

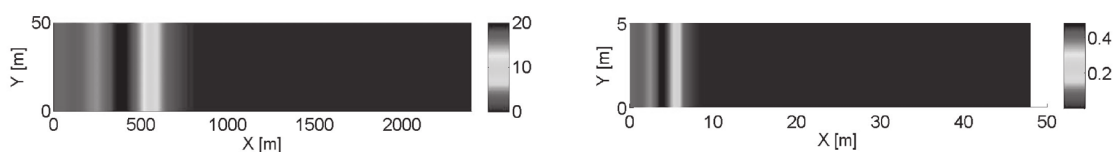
**Figura 4.** Simulación numérica de un sistema fracturado usando fracturas discretas



a. Distribución de presiones  $h$  (m)

b. Distribución de concentraciones en  $\text{Kg/m}^3$

**Figura 5.** Simulación numérica de un sistema fracturado usando medio poroso equivalente



a. Distribución de presiones  $h$  (m)

b. Distribución de concentraciones en  $\text{Kg/m}^3$

Para el segundo caso se usa la aproximación de medio poroso equivalente. Para este fin se asume la densidad promedio de fracturas para todo el dominio, y la apertura de fractura se define como una constante. En la figura 5 se muestran los resultados de esta simulación.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis conceptual hidrogeológico del área de estudio asociada a explotaciones mineras subterráneas se debe enfocar en los posibles impactos derivados de la actividad minera en el componente subsuperficial. Estos impactos están principalmente relacionados con la alteración de las trayectorias de flujo subterráneo y del componente geoquímico, la inducción de la conexión de unidades hidrogeológicas antes desconectadas, el abatimiento regional del nivel freático debido a la extracción sostenida de agua desde los túneles, que deriva en la ocurrencia de subsidencia. Finalmente, la extracción de grandes caudales de agua desde túneles de excavación puede afectar el ciclo hidrológico, en particular puede desconectar los cuerpos superficiales de la tabla de agua poniendo en riesgo los caudales de estiaje.

A pesar de ser de amplio conocimiento que las formaciones rocosas fracturadas pueden presen-

tar valores muy altos de conductividad (entre 0.8 y 80 m/d de acuerdo a [20]), en el contexto colombiano seguimos asumiendo conductividades despreciables en nuestros modelos conceptuales asociados a la explotación minera. Esto último afecta la evaluación de los impactos minimizando artificialmente los efectos regionales de la extracción de agua desde túneles.

Un protocolo de modelación como el expuesto en esta investigación representa un importante aporte en el marco de la evaluación cuantitativa de impactos ambientales de la minería subterránea, ya que permite unificar una metodología para la simulación del impacto de la minería en las dinámicas hídricas. Esto contribuye al fortalecimiento institucional y al diseño de medidas de seguimiento, control y mitigación basado en modelos numéricos. Los cuales a su vez viabilizan la construcción de sistemas de toma de decisiones basados en esquemas numéricos robustos.

A partir del análisis numérico resulta importante resaltar el gran impacto de la aproximación conceptual usada para representar el medio fracturado. En particular, es importante tener una caracterización detallada de la distribución de las fracturas ya que la aproximación de medio poroso equivalente elimina la presencia de caminos preferenciales que suelen controlar las diná-



micas de flujo en medios fracturados de común ocurrencia en áreas asociadas a la explotación minera subterránea. En ese sentido, técnicas estadísticas pueden ser de gran ayuda para evaluar la incertidumbre asociada a la simulación numérica. En todo caso, una campaña de campo es necesaria para caracterizar las características geométricas de las fracturas.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1] Stokes, J., and R. Thunvik. "Investigations of Ground-Water Flow in Rock Around Repositories for Nuclear Waste." KBS Teknisk Rapport 47 (1978).
- 2] Blodgett, Steve. "Subsidence Impacts at the Molycorp Molybdenum Mine Questa, New Mexico." (2002).
- 3] Rapantova, N., Grmela, A., Vojtek, D., Halir, J., & Michalek, B. Ground water flow modeling applications in mining hydrogeology. *Mine Water and the Environment*, 26(4), 264-270, 2007
- 4] Cidu R, Frau F. "Influence of fine particles on the concentration of trace elements in river waters". In: Bullen TD, Wang Y (eds) *Proc, WRI-12*, July 31-Aug 5, 2007. Kunming/Taylor & Francis, PR China/London, pp 1471-1474
- 5] Cook, P.G. A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. Adelaide (AU). Pp. 100, 2003.
- 6] Snow, D. T. Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 1968
- 7] Snow, David T. "The frequency and apertures of fractures in rock." *International journal of Rock mechanics and Mining sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 7. No. 1. Pergamon, 1970.
- 8] De Marsily, Ghislain, Ghislain De Marsily, and Ghislain de Marsily. *Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers*. Vol. 440. San Diego, California: Academic Press, 1986.
- 9] McKay, L. D., J. A. Cherry, and R. W. Gillham, *Field experiments in a fractured clay till*, 1, Hydraulic conductivity and fracture aperture, *Water Resour. Res.*, 29(4), 1149-1162, 1993a.
- 10] Therrien, R., R. McLaren, E. A. Sudicky, and S. Panday, *HydroGeoSphere, A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully-Integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport*, Groundwater Simul. Group, Waterloo, Ont., Canada, 2006.
- 11] Cochran, William G. "The  $\chi^2$  test of goodness of fit." *The Annals of Mathematical Statistics* (1952): 315-345.
- 12] A.J. Pérez, R. Abrahão, J. Causapé, O.A. Cirpka, C.M. Bürger, Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture, *Journal of Hydrology*, Volume 409, Issues 3-4, 9 November 2011, Pages 663-681
- 13] Refsgaard, Jens Christian. "Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models." *Journal of Hydrology* 198.1-4 (1997): 69-97.
- 14] Ebel, Brian A., and Keith Loague. "Physics-based hydrologic-response simulation: Seeing through the fog of equifinality." *Hydrological Processes* 20.13 (2006): 2887-2900.
- 15] Kirchner, James W. "Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology." *Water Resources Research* 42.3 (2006).
- 16] Klemeš, Vit. "Operational testing of hydrological simulation models." *Hydrological Sciences Journal* 31.1 (1986): 13-24.
- 17] Klemeš, V. "Hydrological and engineering relevance of flood frequency analysis." *Hydrologic Frequency Modeling*. Springer Netherlands, 1987. 1-18.
- 18] Loague, Keith, and Joel E. VanderKwaak. "Physics-based hydrologic response simulation: Platinum bridge, 1958 Edsel, or useful tool." *Hydrological Processes* 18.15 (2004): 2949-2956.
- 19] Bear, Jacob. *Dynamics of fluids in porous media*. Courier Dover Publications, 1972.