

Impacto potencial de la minería subterránea de carbón en los acuíferos del municipio de Suesca, Cundinamarca: modelo numérico

Potential impact of underground coal mining in the aquifers of the municipality of Suesca, Cundinamarca: a numerical model

Marlyn Adriana García Gutiérrez^{*}, Natalia Viviana Hernández Perdomo^{**} y Douglas Quintero^{***}

Cómo citar

García Gutiérrez, M. A., Hernández Perdomo, N. V., & Quintero, D. (2020). Impacto potencial de la minería subterránea de carbón en los acuíferos del municipio de Suesca, Cundinamarca: modelo numérico. *Ingeciencia*, 5, 125-142.

* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: mgarciag3@ucentral.edu.co
** Ingeniera Ambiental, Universidad Central. Correo: nhernandezp@ucentral.edu.co
*** Geólogo, Msc. en Hidrogeología, profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: dqinteror@ucentral.edu.co

Resumen

El municipio de Suesca, Cundinamarca, de vocación minera, pero con un nivel técnico muy rudimentario, enfrenta hace décadas un problema por la mala disposición de los drenajes ácidos de mina (DAM). Este trabajo evalúa la trayectoria de los DAM desde una mina abandonada hacia los acuíferos del municipio, mediante un modelo numérico y el *software* Modflow. En primer lugar, se hizo el reconocimiento de los sistemas acuíferos para determinar la calidad del agua subterránea y los parámetros hidráulicos, con base en la información de los pozos y manantiales. Luego se definió el modelo numérico en términos de las propiedades hidrogeológicas, limitado a un área de 16,94 km² y a tres capas, según las unidades identificadas por un perfil estratigráfico. Se demuestra que los sulfatos resultantes de la oxidación de la pirita en superficie tienen la capacidad de percolar hacia el subsuelo a través de mecanismos advectivos y dispersivos. Así, en un período de 20 años superan los 100 m de profundidad y más de 60 m de longitud, lo cual altera negativamente la calidad de las aguas subterráneas.

Palabras clave: acuíferos, drenaje ácido de minas (DAM), hidrogeología, modelo numérico, pirita.

Abstract

The municipality of Suesca, Cundinamarca has faced for decades a problem associated with the poor disposal of the Acid Mine Drainage (AMD's). This has been a territory with a mining vocation. However, its level of technicality is very rudimentary. Therefore, this work evaluates, through a numerical model, the trajectory of the DAM from an abandoned mine to the aquifers of the municipality, using the Modflow software. It was started from the recognition of the aquifer systems, to achieve the determination of the quality of the underground water and the hydraulic parameters, based on information provided by wells and springs. Finally, the numerical model was defined in terms of the hydrogeological properties, delimited by an area of 16.94 km² and made up of three layers according to the units identified by a stratigraphic profile. The results show that the sulfates resulting from the oxidation of Pyrite on the surface, have the ability to percolate towards the subsoil through advective and dispersive mechanisms. Thus, in a period of 20 years they exceed 100 m in depth and more than 60 m longitudinally, negatively altering the quality of groundwater.

Keywords: acid mine drainage (AMD), aquifers, hydrogeological, numerical model, pyrite.

1. Introducción

Las aguas subterráneas (AS) tienen gran importancia ambiental porque prestan servicios ecosistémicos relacionados con la preservación de las cuencas hidrográficas y son parte fundamental del gran ciclo hidrológico (USGS, 2019). En Cundinamarca, esta situación se presenta en la cuenca alta del río Bogotá y otras zonas de interés, que constituyen el área de estudio de este trabajo.

Existen múltiples fuentes de contaminación de las AS en esta región, entre las cuales las más comunes son los agroquímicos y la disposición de residuos sólidos ordinarios, pero también se han identificado las provenientes de actividades mineras, con características variadas y muy persistentes. La contaminación en superficie del terreno es la forma más común como ingresan estas sustancias a las AS. Particularmente, los vertidos de drenajes ácidos mineros (DAM) con remanentes de sulfatos y metales pesados atraviesan el suelo y la zona no saturada (ZNS) del acuífero, de manera que se bioacumula y compromete las posibilidades de mitigación (Moradell & Renau-Pruñonosa, 2019).

Esta problemática, junto con el acelerado crecimiento poblacional y al auge de la actividad minera en la región de Cundinamarca, causan graves impactos que limitan la oferta ambiental debido a la alteración en las trayectorias de flujo, las variaciones geoquímicas y las conexiones hidrogeológicas (Pérez, 2013).

A pesar de esto, en Colombia no se han hecho grandes esfuerzos por estudiar su comportamiento. De ahí que los mayores aportes de información se encuentren en el ámbito internacional. En Alemania, por ejemplo, el modelado de los acuíferos afectados por descargas de minas de lignito demostró serias afectaciones por la oxidación de la piritita (Lenk & Wisotzky, 2011). Asimismo, resulta relevante la investigación de la Agencia de Consultores Australianos de Aguas Subterráneas y Ambientales, en la cual se describen las características hidrogeológicas del área de influencia de las minas, al tiempo que se evalúa el impacto de un proyecto minero a partir de un modelo numérico que identifica la conexión del acuífero con sistemas superficiales (Australasian Groundwater & Environmental [AGE], 2015). Por último, una investigación de la Universidad de Kentucky afirma que las operaciones mineras inducen movimientos en el suelo, alteran la conductividad hidráulica, disminuyen la carga hidráulica y modifican la trayectoria normal del agua. Este estudio también cuantificó las afectaciones aplicando un modelado hidrogeológico pre- y posminería de un caso de estudio real (Bode-Jiménez, 2017).

Aunque las condiciones hidrogeológicas de las investigaciones reseñadas difieren bastante de la zona de estudio de este trabajo, son una referencia importante para construir modelos numéricos, pues en este proceso es necesario contemplar varios escenarios para poner a prueba la capacidad del modelado (Muniruzzaman *et al.*, 2018). En ese orden de ideas, y enfatizando el contexto de los países suramericanos con abundantes recursos hídricos, se destaca la transfrontericidad de acuíferos que se extienden bajo dos o más países, de manera que tanto las extracciones como su mala gestión pueden agotar sus reservas o contaminarlas (González, 2013). Esto mismo sucede con los límites hidrogeológicos de esta investigación, los cuales se extienden en cinco municipios circundantes a Suesca.

En cuanto al contexto nacional, se debe señalar que el sector minero ha crecido exponencialmente (Romero, 2016), pero el industrial, en su afán de generar ganancias, ignora las consecuencias medioambientales. Por esta razón ha sido necesario caracterizar el

potencial contaminante del DAM y los residuos generados *in situ*. En ese sentido, en la publicación de Pérez (2013) se analizan las direcciones de flujo, los niveles freáticos y los cambios geoquímicos. Por su parte, Guerrero (2014) analiza la insostenibilidad intrínseca de esta actividad, de la cual se habla poco y se mantienen licencias a cambio del “desarrollo” regional. Sin embargo, Guerrero (2014) plantea la posibilidad de hacerla sostenible mediante la aplicación de modelos matemáticos.

Para finalizar, en la región se destaca la investigación de Villamil *et al.* (2018) en Guachetá (Cundinamarca), municipio que se caracteriza por desarrollar pequeña minería carente de tecnología y sin planes de manejo ambiental. El estudio evidencia que el agua de mina con elevadas concentraciones de hierro y sulfato es vertida directamente a los ríos, lo cual afecta el agua, el suelo y su productividad agrícola (Villamil *et al.*, 2018).

En este sentido, los problemas ambientales reportados, los vacíos de información y las percepciones superficiales sobre el medio ambiente hacen necesario evaluar el impacto de esta actividad en la calidad de los acuíferos del municipio de Suesca. Con este propósito, en este trabajo se aplicó la herramienta de modelado Modflow para responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo afecta a los acuíferos el vertimiento de los DAM? Específicamente, en el artículo se identifican y caracterizan los sistemas acuíferos, así como las unidades hidrogeológicas del área de influencia, para definir un modelo numérico de flujo en los acuíferos. Los resultados constituyen una contribución de la academia que sienta las bases para realizar estudios posteriores e incentivar el uso responsable de los acuíferos.

2. Materiales y métodos

2.1 Determinación del área de influencia

El área de influencia indirecta del estudio se encuentra en el oeste de Suesca y parte de municipios circundantes, ya que los límites político-administrativos no coinciden con los de las formaciones del subsuelo y requieren un análisis conjunto. Partiendo de esto, se estableció un área a modelar de 16,94 km² (figura 1), determinada por el sinclinal de Checua y la falla de Cucunubá, que limita con la zona de disposición de estériles de la mina San Cayetano. Igualmente, se identifica la dinámica del área que abarca superficialmente la Formación Labor y Tierna, escogida por su gran importancia hidrogeológica.

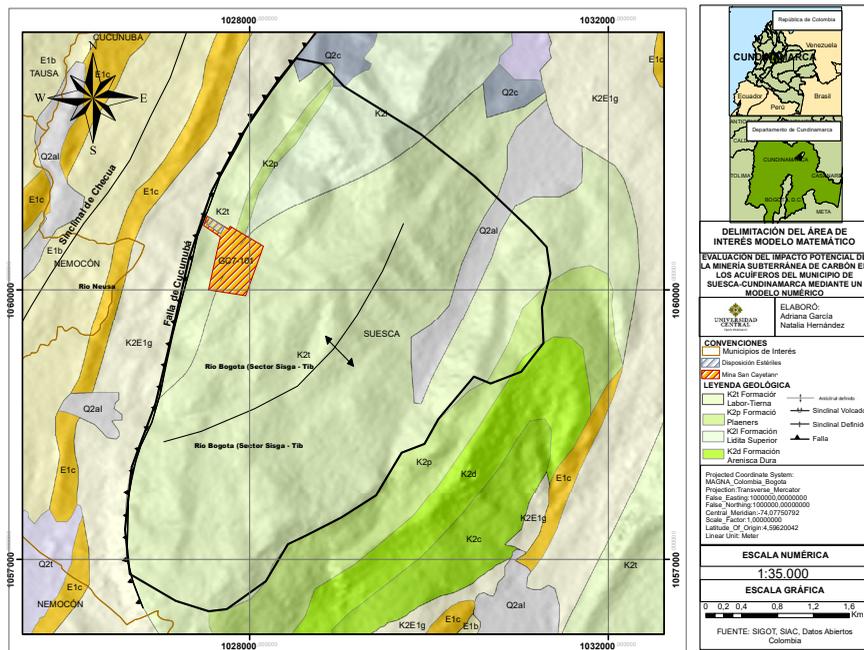


Figura 1. Mapa de ubicación del área de interés en el modelo numérico. Fuente: elaboración propia con base en Plancha 209 SGC.

2.2 Hidrogeología

El área de mayor cobertura hidrogeológica corresponde a depósitos arcillosos, lo cual es evidente en los acuitardos Bogotá y Guaduas, los cuales, a pesar de almacenar el recurso, no lo transportan. Además, dadas las propiedades de sus sedimentos y rocas, son considerados de muy baja productividad. Por el contrario, las zonas de recarga corresponden al grupo Guadalupe y Cacho, unidades en las que la permeabilidad secundaria de sus materiales permite el flujo (figura 2). Al norte de Nemocón aflora el Acuífero de Depósitos Aluviales y Lacustres, en zonas de baja pendiente, cuya descarga se da artificialmente por aljibes con caudales máximos de 2L/s (Ingeominas, 1993).

Un área importante del Acuífero Cacho se despliega en los municipios de Nemocón y Cucunubá, entre las formaciones Bogotá y Guaduas. Se trata de un acuitardo regional con agua de muy baja calidad debido a la presencia de rocas arcillosas. Por su parte, el Acuífero Guadalupe, uno de los más importantes en cuanto a su potencial hídrico, integra las formaciones Plaeners, Labor y Tierna y Arenisca Dura, y se caracteriza por tener un grado de fracturamiento medio en la cuenca alta del río Bogotá (Hincapié & Huguett, 2003). En general, los análisis hidroquímicos concluyen que en los manantiales de la cuenca los iones HCO_3^- , Na^+ y Cl^- tienen concentraciones de entre 4,86 mg/L y 4,37 mg/L.

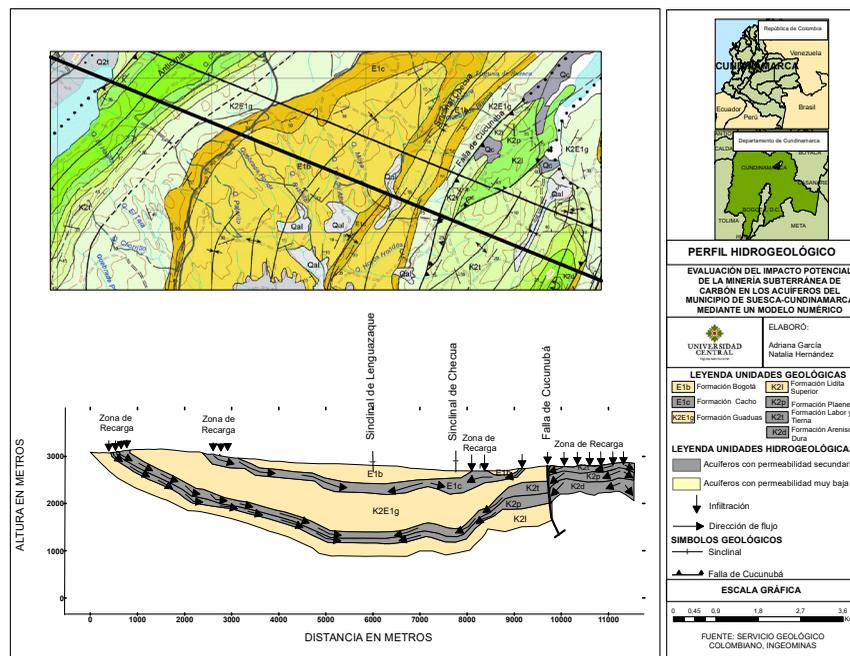


Figura 2. Perfil hidrogeológico área de influencia indirecta.

Fuente: elaboración propia con base en Plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003).

Asimismo, un análisis de veinte pozos del acuífero Guadalupe evidenció que predomina un ambiente con aproximadamente $12,15 \text{ mg/L}$ de Mn^{+2} , Fe^{+2} , SO_4^{-2} y Mg^{+2} , además de Ca^{+2} con $29\,166 \text{ mg/L}$ (Castrillón *et al.*, 2001). Según la normativa ambiental, concerniente y vigente, estos valores deberían ser iguales o menores a $0,043 \text{ mg/L}$ para el manganeso, 2 mg/L para el hierro, 1200 mg/L para los sulfatos y $0,002 \text{ mg/L}$ para el calcio. Así pues, las concentraciones superan considerablemente los límites máximos permisibles, con excepción de los sulfatos.

Esto supone, desde luego, una serie de afectaciones ambientales y sanitarias. Por una parte, el hierro y el manganeso, compuestos comunes del medio, representan un problema en las AS al estar ligados a inconvenientes operacionales y estéticos. Por otra, en concentraciones como las mencionadas, el hierro puede causar afectaciones a la salud como depresión, fallas respiratorias y problemas cardiacos. De manera similar, el manganeso afecta el tracto respiratorio y el cerebro. Ahora bien, en relación con las afectaciones ambientales de estos dos compuestos, se identifican las incrustaciones en tuberías, aumento de la turbiedad del agua y, por ende, la acentuación de riesgos microbiológicos (Burbano & Sánchez, s. f.).

Respecto a las concentraciones de sulfato identificadas, cabe señalar que si bien no superan los límites permisibles, si se superara dicha concentración, sus afectaciones a la salud generarían principalmente un efecto laxante y, consecuentemente, deshidratación severa. También cabe mencionar que los límites máximos permisibles establecidos en Colombia son muy elevados en comparación con otros países, como Costa Rica, donde los valores máximos para sulfatos son del orden de 25 mg/L , dado que es la concentración que asegura una calidad aceptable para el consumo (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017).

Por último, las concentraciones de magnesio y calcio, asociadas a la dureza del agua, no representan efectos directos sobre la salud, aunque algunos estudios han sugerido, por una parte, enfermedades cardiovasculares en poblaciones asentadas en áreas donde el consumo de aguas blandas es mayor, y, por otra, la facilidad que tienen para disolver metales y producir intoxicación. Naturalmente, y tal como lo muestran los valores obtenidos, el calcio se encuentra en las aguas en cantidades mucho mayores que el magnesio.

2.3 Minería de carbón en Suesca

En el oeste de Suesca se ubica el sinclinal de Checua-Lenguazaque sobre la formación Guaduas, constituida por una serie de niveles, entre los cuales se destacan Ktg2 y Ktg3 debido a la presencia de mantos de carbón. En consecuencia, se han otorgado concesiones para la extracción de carbón (CAR, 2014) (figura 3, tonalidades naranja). Las reservas son turba, lignito y bituminoso (Ministerio de Minas y Energía, 2012).

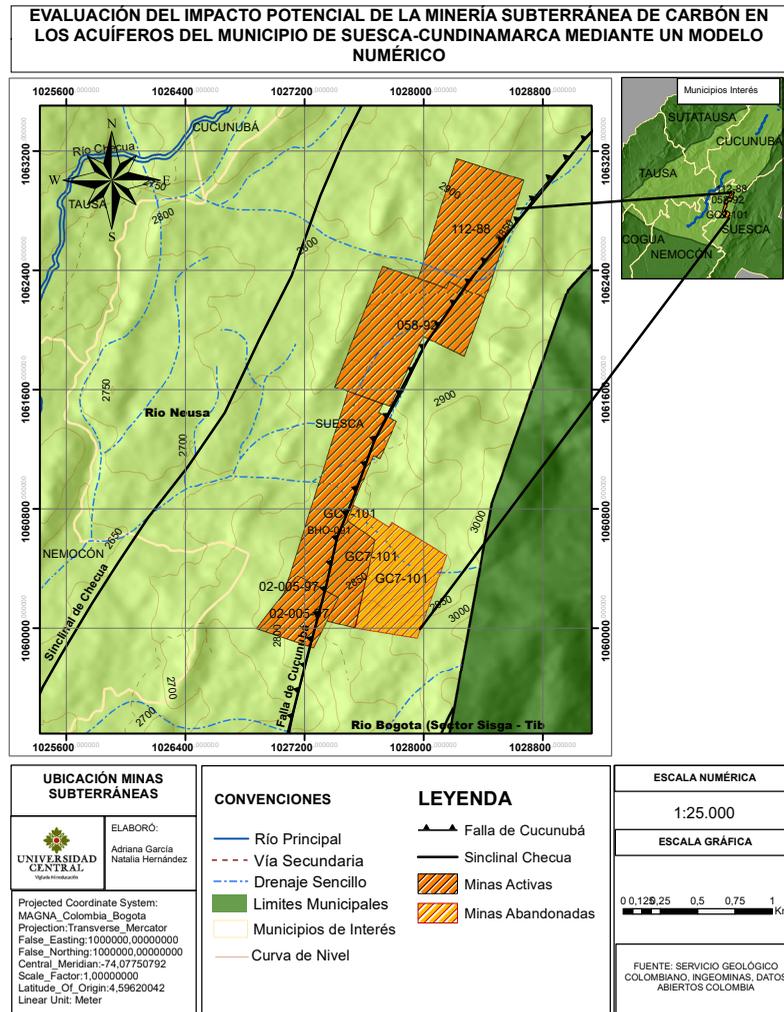
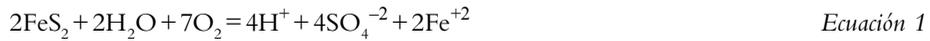
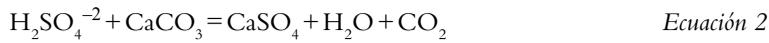


Figura 3. Ubicación de las minas subterráneas de carbón.
Fuente: elaboración propia con base en Plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003) y expedientes CAR.

Desde la puesta en marcha de la extracción de carbón se tiene contacto con depósitos de AS. El agua se contamina por la disolución de compuestos solubles de las rocas y tiene cambios de pH a causa de la oxidación de la pirita (FeS_2) alojada en los mantos de carbón. Cuando se oxida, la pirita forma sulfatos y libera metales pesados (Espinosa *et al.*, 2010). Los sulfuros reaccionan (ecuación 1) cuando entran en contacto con agua y oxígeno.



En este punto, el agua cuenta con una carga contaminante, de manera que el ion ferroso puede oxidarse y formar ion férrico o precipitar como hidróxido férrico. La reacción completa de la pirita está determinada por el tiempo. En este sentido, debido a que los DAM generados requieren evacuación del área de explotación, la mayoría de los concesionados realiza desagüe, decantación y neutralización química de aguas ácidas. La reacción resultante se especifica en la ecuación 2.



Sin embargo, dicho tratamiento no es el común denominador de todos los títulos mineros. Se detectó que, en la fase final, se separa el carbón de los estériles que contienen remanentes de pirita, óxido de silicio, alúmina y contenidos de azufre (Jiménez, 2015) y se depositan directamente sobre la cobertura vegetal, lo cual altera la calidad de los acuíferos.

2.4 Zonas de interés ambiental

Según los Informes de Seguimiento y Control, se hace evidente el hecho preocupante de que todas las minas se encuentran en el área de Reserva Forestal Protectora Productora (RFPP) de la cuenca alta del río Bogotá (CAR, 2006). Es decir, todos los títulos evaluados realizan sus actividades de forma ilegal, de manera que se ha exigido realizar su cierre definitivo. La mina San Cayetano (GC7-101) es un claro ejemplo, pues se encuentra abandonada y se espera el cumplimiento del Plan de Desmantelamiento y Abandono, que restituya las afectaciones ambientales generadas por la explotación.

2.5 Migración del modelo

Se desarrolló el modelo y la definición de la geometría de la mina San Cayetano empleando el paquete MT3DMS, con el cual se conoció la trayectoria de las partículas contaminantes a través de los acuíferos. Además se definió la grilla con el método *enclosed cells*. Esta zona se extiende a lo largo de las formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. Igualmente, se configuró un arreglo de 67 filas y 54 columnas acotado por celdas activas de 100 m x 100 m (figura 4) precisas para la adecuada visualización del modelo a escala local. Aun así, la representación de la mina se discretiza en celdas de menor tamaño (20 m x 20 m) para obtener mayor detalle de la pluma contaminante.

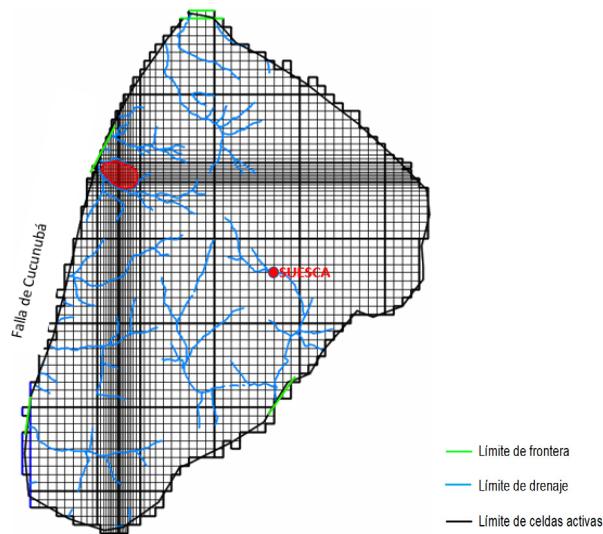


Figura 4. Dimensiones del modelo en Modflow.
Fuente: elaboración propia.

El declive generado por el anticlinal de Guachancia direcciona el flujo de AS hacia la falla de Cucunubá, considerada la barrera que limita el paso del contaminante hacia las formaciones aledañas. Los drenajes de las quebradas son el límite de frontera del polígono de interés.

Una vez definida la grilla, se ingresaron los datos hidrogeológicos de los tres acuíferos (tabla 1). Para mayor precisión, Labor y Tierna se discretizó en tres capas, Pleaners en dos y Arenisca Dura mantuvo su profundidad, representada por celdas inactivas.

Tabla 1. Parámetros hidrogeológicos de las formaciones que se modelan

	Formación	Profundidad total (m)	Discretización (m)	Conductividad hidráulica K (m/día)	Recarga (mm/año)	Transmisividad (m ² /día)
Grupo Guadalupe	Labor y Tierna	177	C1: 59	1X10 ⁻⁴	435	De 0 a 30
			C2: 59	1X10 ⁻⁵		
			C3: 59	1X10 ⁻⁶		
	Pleaners	187	C1: 93,1	1X10 ⁻⁷	359	De 1,5 a 10
			C2: 93,1	1X10 ⁻⁸		
	Arenisca dura	227	227	1X10 ⁻⁸	246	De 20 a 30

Fuente: adaptada de Ingeominas (1993).

Además, se tuvo en cuenta la evapotranspiración con 839 mm/año (Ingeominas, 1993). La transmisividad también se contempló para cada formación. Pese a que no es el objetivo principal de esta investigación, se tomó un dato hipotético de 1200 mg/L de sulfatos, asumiendo el peor escenario de acuerdo con los límites máximos permisibles contemplados

en la Resolución 0631 de 2015 para la extracción de carbón de piedra y lignito, a fin de establecer las características de la pluma contaminante. Finalmente, y para entender mejor el potencial del DAM, se definieron dos escenarios de evaluación de impactos en el flujo, dirección y alcance del contaminante, en una escala temporal de cinco y veinte años.

3. Resultados y discusión

El agua de los manantiales se considera poco mineralizada, pues su concentración está por debajo de los niveles máximos permisibles establecidos por la Resolución 631 de 2015 para la actividad minera. No obstante, las condiciones del AS refieren un máximo de contenido en Fe^{+2} que se excede hasta superar los 12 mg/L, lo cual está relacionado, por una parte, con el DAM y su impacto negativo sobre los acuíferos debido a la capacidad que tiene para transportar y almacenar metales pesados. Por otra, se debe a las malas prácticas de extracción y manejo de desechos.

El modelo presentó un porcentaje de discrepancia de 0,00, lo cual indica que los valores obtenidos en el balance hídrico (tabla 2) convergen de acuerdo con los datos de entrada. Los niveles piezométricos no fueron determinantes al establecer la trayectoria de la pluma contaminante. En vista de la ausencia de datos reales de piezómetros, se estableció la capa de Labor y Tierna como punto más susceptible de acuerdo con su elevación y condiciones de permeabilidad. Así, se identificó que los pozos de medición de AS suelen ser escasos en el área de estudio, lo que puede generar incertidumbre y hace imposible calibrar el modelo. Es decir, se identifica una deficiencia en los puntos de monitoreo y protección ambiental de las AS.

Tabla 2. Balance hídrico del modelo numérico

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	347511168.0000	RECHARGE =	0.2202
TOTAL IN =	347511168.0000	TOTAL IN =	0.2202
OUT:		OUT:	
---		---	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	314351840.0000	DRAINS =	0.1992
ET =	33157370.0000	ET =	2.1014E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	347509216.0000	TOTAL OUT =	0.2202
IN - OUT =	1952.0000	IN - OUT =	1.2517E-06
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fuente: elaboración propia en Modflow.

De ahí se infiere que el balance hídrico es una herramienta muy útil, pues resume las condiciones de los volúmenes del fluido (tabla 2). Esto evidencia la importancia de usar este modelo, que relaciona la infiltración del DAM con el comportamiento del recurso hídrico, y de esta manera cumple la finalidad de caracterizar los acuíferos de la zona de estudio.

En la figura 5 se observa en superficie la influencia de los ríos y la topografía, que controlan el grado de afectación de los acuíferos, junto con el grado de permeabilidad, la distribución de niveles freáticos y las características generales de los abatimientos (Pérez, 2013), en relación directa con la altura de la fuente de contaminación (Mina San Cayetano). Además de los valores de gradientes hidráulicos predominantes en el norte y con dirección de flujo hacia el occidente de Suesca, donde se encontró una influencia en el flujo vertical determinado por la gran actividad minera presente en la zona, que en este sentido implica una variación en la conductividad hidráulica.

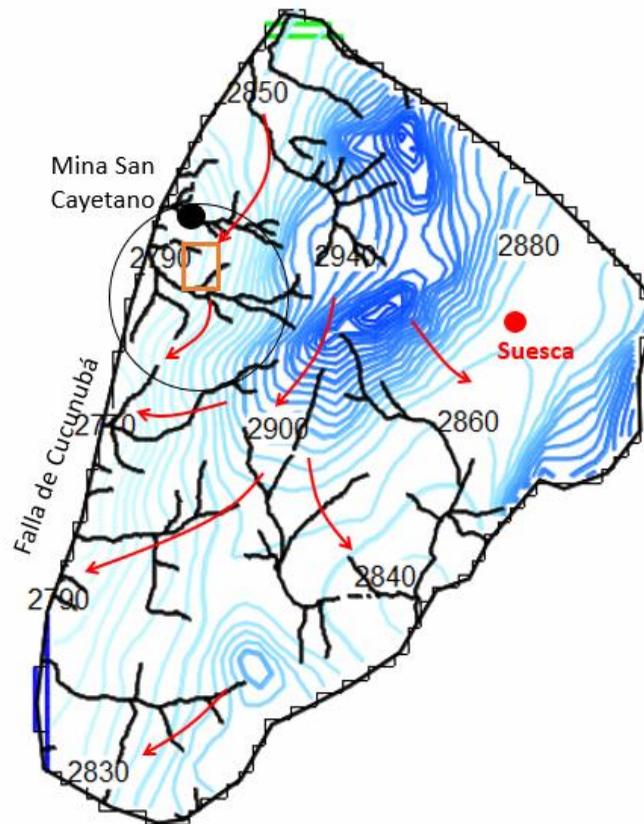


Figura 5. Mapa de flujo en relación con las curvas equipotenciales.

Fuente: elaboración propia en Modflow.

Así pues, relacionado con las estructuras geológicas determinantes (figura 6), se destaca la falla de Cucunubá, que al ser de cabalgamiento se comporta como una barrera al flujo de las AS, al tiempo que pone en contacto rocas permeables de la Formación Labor y Tierna y Lidita Superior con rocas semipermeables de la Formación Guaduas, de muy baja capacidad de almacenamiento y transmisión de AS.

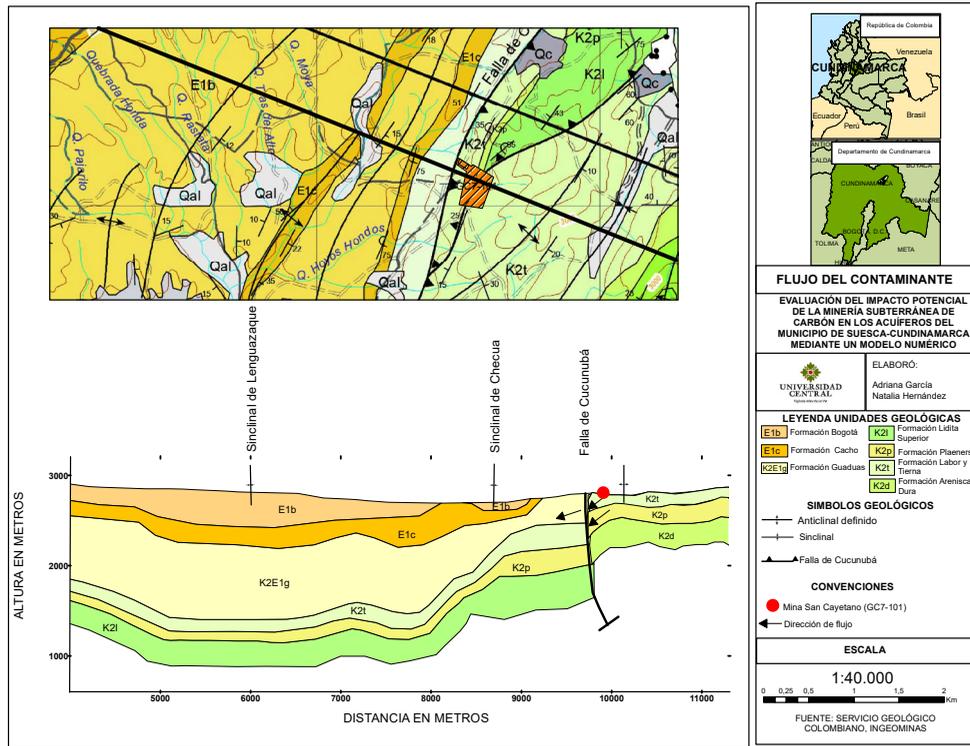


Figura 6. Perfil del flujo del contaminante.

Fuente: elaboración propia con base en plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003).

También se observa la presencia de un anticlinal definido que, por gravedad, posibilita que el contaminante siga una trayectoria determinada. A esto se suma que los estériles se depositan directamente sobre el suelo, en contacto con la Formación Lidita Superior, atravesando la zona no saturada hasta llegar a los acuíferos. Este comportamiento puede favorecer la atenuación de ciertos contaminantes. Sin embargo, como se especifica en la teoría, no representa una protección eficaz, sino que, por el contrario, dada su baja velocidad de transporte, hace que el contaminante quede en solución o se bioacumule, como se deduce de los numerosos casos que afectan a gran cantidad de acuíferos (Moradell & Renau-Pruñonosa, 2019).

En concordancia con la dirección de flujo del contaminante se encuentra la Formación Guaduas, con una profundidad aproximada de 1000 m, en la cual se establecen dos mantos importantes de reservas de carbón y se han realizado perforaciones con dinamita, las cuales han generado fracturas que producen un aumento local de la conductividad hidráulica. Así, se da vía libre al paso de contaminantes a través de dicha formación.

En síntesis, existe una modificación antrópica de la conductividad hidráulica que podría promover el aumento del flujo y la modificación de las propiedades geológicas y químicas de los acuíferos. Esta problemática se debería tratar en estudios posteriores, pues en realidad no se presenta una fractura, sino un conjunto de fracturas inmersas en un medio poroso (Pérez, 2013). Por lo tanto, adquiere más relevancia que las minas abandonadas sigan un plan de desmantelamiento adecuado, pues, con el paso del tiempo, este orificio en el suelo modificará la conductividad, que adquirirá valores aún más elevados.

De igual forma, los potenciales hidráulicos son decisivos en la dirección de flujo del AS que siguen un comportamiento radial. En la figura 7, representado por la línea azul oscura, se identifica el nivel freático, que se ve alterado por acción clara del DAM. En este caso, se distingue un tipo de minería que suprayace el nivel freático, lo cual incentiva el aumento de la permeabilidad, sobre todo cuando las fracturas se extienden hasta la superficie e inducen una nueva recarga y aumentan el nivel freático.

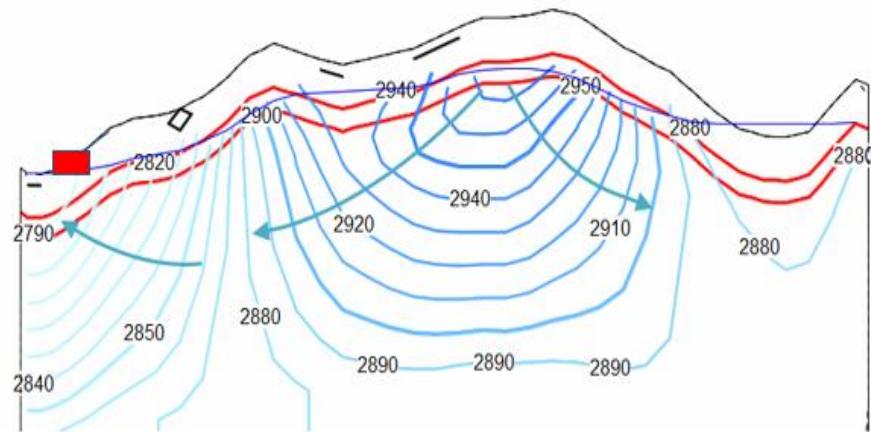


Figura 7. Vista en perfil de las curvas equipotenciales y líneas de flujo.
Fuente: elaboración propia en Modflow.

No obstante, según las profundidades de explotación, que pueden alcanzar los 670 m, se incluyen drenajes por bombeo que evitan la inundación de la mina. Como evidenció el estudio realizado en el municipio próximo de Guachetá, estos drenajes, con alto contenido de hierro y sulfatos, se vierten a las fuentes naturales sin ningún tipo de tratamiento previo (Villamil *et al.*, 2018), como sucede en la mayoría de minas concesionadas en Suesca. De la misma manera, en la hidrogeología analizada se encontró que se generan aguas ácidas que, una vez son drenadas, afectan el nivel freático y los caudales que en condiciones naturales fluyen hacia manantiales.

Ahora veamos que, cuando se habla de un contaminante no conservativo, puede haber afectación por procesos redox (Romero, 2016) e influencia de precipitaciones o alteraciones en las formaciones hidrogeológicas, como lo sugieren estudios que han sido contrastados en campo y en los cuales se estableció la eficiencia de las medidas de mitigación para una mina subterránea (Ninanya, 2015).

3.1 Escenario α cinco años

En la figura 8 se aprecia el área en rojo donde se ubican los desechos de minería y se presenta la pluma contaminante. La intensidad de los colores fue asignada de acuerdo con la concentración de 0 a 1 200 mg/L. De acuerdo con los resultados, es posible afirmar que al cabo de cinco años la pluma en superficie se extiende aproximadamente 62 metros

en dirección de la falla de Cucunubá, es decir, en la misma dirección del flujo de agua. Asimismo, se observa un ensanchamiento de la pluma como efecto de la dispersión transversal con concentraciones hacia el norte de 400 mg/L, aproximadamente, y hacia el sur con concentraciones cercanas a 160 mg/L.

Aunque la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece que si dicha concentración de sulfatos eventualmente es vertida a un cuerpo de agua superficial, a pesar de no exceder el límite máximo permisible, si a futuro aumenta, limita la capacidad para su uso doméstico, ya que genera efectos intestinales adversos y en el ambiente disminuye la capacidad de infiltración del suelo.

Ahora bien, en profundidad, se puede apreciar que la pluma se ha extendido 80 metros hacia la segunda capa discretizada de la Formación Labor y Tierna. La pluma tiene una tendencia a extenderse hacia la falla de Cucunubá con menor intensidad que en superficie.

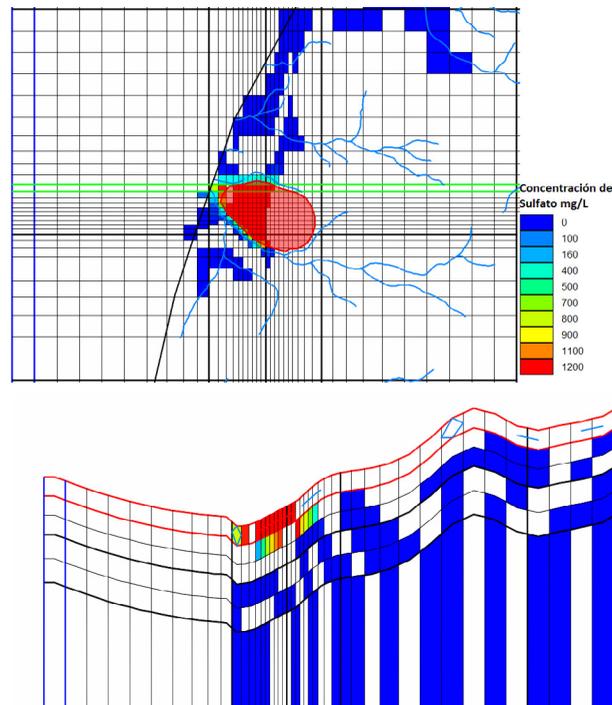


Figura 8. Vista en planta y perfil de la pluma contaminante de DAM al cabo de cinco años de la inyección continua.

Fuente: elaboración propia en Modflow.

3.2 Escenario a veinte años

En el planteamiento futuro del comportamiento de la pluma veinte años después, se pone en evidencia un escenario que advierte una condición alarmante en términos de alcance y concentración del contaminante. Como se ha descrito, debido a que la formación Labor y Tierna (K2t) tienen la conductividad hidráulica más alta (1×10^{-4} m/día) y a su capacidad específica, los sulfatos percolarían a través de la primera capa discretizada, de manera que superarían los 110 m de profundidad (figura 9).

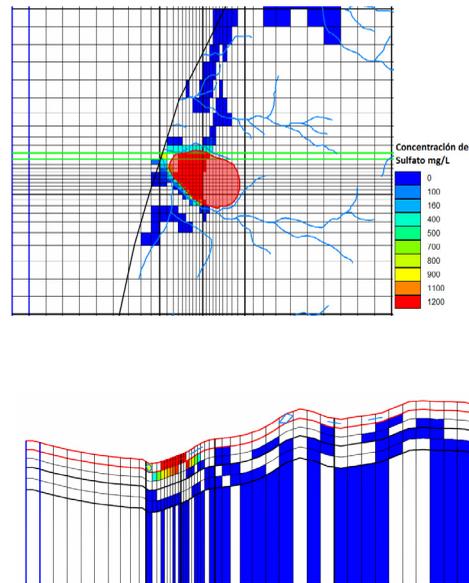


Figura 9. Vista en planta y perfil de la pluma contaminante de sulfato en superficie al cabo de veinte años.

Fuente: elaboración propia en Modflow.

Por tanto, a causa del alcance longitudinal del contaminante, este se proyecta como un escenario de afectación inminente a los cuerpos de AS y superficiales, pues, como se evidencia en la vista en perfil (figura 9), la concentración máxima de sulfatos se hace cada vez más densa al entrar en contacto con la ventana de agua o nivel freático. Adicionalmente, aunque las tonalidades amarillo y verde en esta segunda capa (K2t) indican disminución de la concentración, su dispersión aumenta en menores proporciones en el sentido de la falla de Cucunubá al cabo de veinte años, lo cual limita el uso del recurso no solo a nivel del subsuelo, pues se aprecia una interacción continua de las quebradas con la pluma contaminante. Específicamente, se presenta una contaminación directa de sulfatos de 400 mg/L, que, aunque no excede el valor máximo (1200 mg/L) establecido por la Resolución 0631 de 2015 del Minambiente, sobrepasa la barrera de los 200 mg/L, que como ya se mencionó es el umbral en el que las afectaciones ambientales y sanitarias se manifiestan.

Estos resultados permiten tener una aproximación muy significativa de los sistemas acuíferos estudiados, así como de la respuesta hidrogeológica frente a dicho comportamiento en el tiempo. A pesar de ello, y coincidiendo con Bode-Jiménez (2017), el modelo se basa en una problemática real. Sin embargo, muchos aspectos se modificaron en términos de estructuración del modelo de acuerdo con la escasa información disponible. En cualquier caso, se afirma que los DAM segregan sustancias nocivas para el medio hídrico y edáfico.

Asimismo, se reafirma el planteamiento de Pérez (2013), según el cual a causa de las perforaciones se generan cambios en el sentido del flujo de AS y aumento del riesgo de subsidencia. Pero no solo esto. Si bien Suesca cuenta con un sistema de acueducto que provee a la población, el transporte y la homogeneización de los sulfatos en altas concentraciones en los acuíferos del municipio significan un impacto negativo sobre estos, ya que la remoción del agente contaminante requiere tratamiento terciario, y si se recurriera a ellos como fuente de abastecimiento, sería una alternativa inviable.

4. Conclusiones

Fue posible caracterizar la geometría y geología, así como identificar las unidades hidrogeológicas regionales que comprende el municipio de Suesca. Esta información resultó sumamente útil para el reconocimiento de los materiales que predominan y la dirección del transporte de contaminantes en las AS. Así, se llegó a la conclusión de que los acuíferos de mayor interés son el grupo Guadalupe y Formación Cacho debido a su productividad en términos de conductividad hidráulica, por lo que son consideradas zonas de recarga y, a su vez, están más expuestas a los contaminantes almacenados en superficie.

Con base en la información disponible —muy limitada—, se puede afirmar que la calidad del agua en los pozos y manantiales es mala y no apta para el consumo, pues su contenido de hierro es elevado (>12 mg/L). Se modeló la trayectoria de una concentración supuesta de sulfato, que si bien puede parecer en principio un valor excesivo (1200 mg/L), es importante asumir las peores condiciones, en términos de impactos ambientales, para asegurar que a futuro se tomen las decisiones más adecuadas.

Además, se definió un modelo numérico que determinó el transporte del contaminante mediante mecanismos que siguen la trayectoria de flujo. Su gradiente de concentración disminuye con respecto al alcance longitudinal. Dado el bajo nivel de discrepancia, no fue necesario calibrar el modelo, sabiendo que, además, no hay un registro de información de controles piezométricos. En este orden de ideas, con el escenario proyectado a veinte años, se espera que el DAM percole longitudinalmente a través de los 110 m de profundidad desde la superficie de Labor y Tierna, y que se aproxime a la falla de Cucunubá, homogeneizando con el nivel freático. Así, el potencial de aprovechamiento sería limitado, incluso para el sector industrial.

Por último, es indispensable agregar, a modo de recomendación, que en este escenario posterior a la extracción urge la necesidad de contar con estudios que den continuidad a esta investigación, en términos de cuantificar y evaluar la tasa de infiltración de los desechos de minería, dado el crecimiento extensivo de esta actividad, no solo en la región, sino en todo el mundo. En consecuencia, Colombia debe dejar de lado el modelo de economía extractivista y replantear la idea de desarrollo, pues está comprometiendo seriamente recursos naturales tan importantes como las AS.

Referencias

- Australasian Groundwater & Environmental [AGE]. (2015). *Groundwater Impact Assessment* [No. G1606]. Byolong Coal Project EIS.
- Bode-Jimenez, G. (2017). *Assessment of potential impacts to subsurface bodies of water due to underground coal mining* [Tesis de Maestría, Universidad de Kentucky]. Repositorio UKY. <https://bit.ly/3ajCCf3>
- Bolaños-Alfaro, J., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

- Burbano, L., & Sánchez, L. (s. f.). Remoción de hierro y manganeso por oxidación-filtración para agua potable. En *Seminario internacional: Visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua* (pp. 1-16). Universidad del Valle. <http://bvspser.paho.org/texcom/cd050704/burbano.pdf>
- Castrillón, F. J., Aravena, R., Manzano, M., & Quiroz, M. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca alta del río Bogotá-Colombia* [Conferencia]. VIII Congreso Colombiano de Geología, V Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Manizales, Colombia. <https://bit.ly/3OObGDn>
- Corporación Autónoma Regional [CAR]. (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá*. CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>
- Corporación Autónoma Regional [CAR]. (2014). *Aguas subterráneas minería-hidrocarburos*. CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b45211d94bff.pdf>
- Environmental Protection Agency [EPA]. (s. f.). Sulfate in drinking water. <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/sulfate.html>
- Espinosa Rodríguez, M., Arteaga Balderas, E., Zambrano Cárdenas, R. M., & González Torres, L. (2010). Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina La Guitarra. *Ingenierías*, 13(49), 63-69. http://eprints.uanl.mx/10440/1/49_Cinetica.pdf
- González del Solar, N. (2013). Las aguas subterráneas en la dimensión internacional: Notas jurídicas sobre el acuífero Guaraní. *Derecho y Ciencias Sociales*, 9, 42-52. <https://revistas.unlp.edu.ar/dcs/article/view/735>
- Guerrero M. (2014). Minería de carbón en la sabana de Bogotá: ¿Podría ser sostenible? *IIEC*, 3(2), 11-16. <https://bit.ly/3ahAGDN>
- Hincapié, G., & Huguett, A. (2003). Atlas de aguas subterráneas de Colombia. Hidrogeología de las Planchas 5-01, 5-02, 5-03, 5-04, 5-06, 5-09, 5-13, 5-14. Instituto Colombiano de Geología y Minería. <https://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=13053>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería [Ingeominas]. (1993). Proyecto estudio hidrogeológico cuantitativo en la sabana de Bogotá. <https://bit.ly/3R-hDilZ>
- Jiménez Ballesteros, L. M. (2015). *Evaluación del aprovechamiento de estériles de carbón mediante integración de materiales orgánicos en suelos de zonas afectadas por la minería en el municipio de Guachetá* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://bit.ly/3RsfFh>
- Lenk, S., & Wisotzky, F. (2011). Chemical modelling of the groundwater composition in aquifers affected by lignite mine dumps discharge (surface mine Inden, Germany). *Environmental Earth Sciences*, 62, 581-591. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0549-8>
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). *La cadena del carbón*. Unidad de Planeación Minero Energética. http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf
- Montoya, D., & Reyes, G. (2003). *Geología de la Plancha 209 Zipaquirá*. Ingeominas.

- Moradell, I., & Renau-Pruñonosa, A. (2019). Contaminación de aguas subterráneas: Algunos ejemplos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(1), 3-17. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/356261/448193>
- Muniruzzaman, M, Karlsson, T, & Kauppila, P. (2018). Prediction of the drainage water quality from mine wastes with reactive transport modelling. *Geological Survey of Finland*. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/12_2018.pdf
- Ninanya de la Cruz, H. D. (2015). *Análisis numérico de flujo subterráneo: Caso mina subterránea de Vazante – Brasil* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. <https://bit.ly/3yI1KWd>
- Pérez, A. J. (2013). Impacto de la minería subterránea en acuíferos: Perspectivas en el contexto colombiano. *IngeUAN - Tendencias en la Ingeniería*, 3(6), 7-21. <http://revistas.uan.edu.co/index.php/ingean/article/view/355>
- Resolución 0631 de 2015. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites y máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial*, n.º 49.486. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>
- Romero Pérez, J. (2016). *Evaluación de la oxidación química en el tratamiento del drenaje ácido producto de la actividad minera carbonífera* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://bit.ly/3OSr4yC>
- United States Geological Survey [USGS]. (2019, octubre 12). El ciclo del agua. <https://on.doi.gov/3uumtu1>
- Villamil Forigua, W. R., Castellanos Lizcano, E., & Pérez Sandoval, E. F. (2018). Aguas residuales de la mina de carbón “La Mana” del municipio de Guachetá, Cundinamarca. *Revista Nacional de Ingeniería*, 1, 1-7. <http://agenf.org/ojs/index.php/RNI/article/view/272>