

Primera aproximación al modelamiento numérico de flujo de
aguas subterráneas para el Embalse Amaní, municipio de
Norcasia (Caldas)

Sebastián Kilby Retrepo
Juan Sebastián Lozano Acosta



Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad EAFIT
Medellín

Noviembre de 2019

Primera aproximación al modelamiento numérico de flujo de
aguas subterráneas para el Embalse Amaní, municipio de
Norcasia (Caldas)

Sebastián Kilby Retrepo
Juan Sebastián Lozano Acosta

Proyecto de grado con el fin de cumplir con los requisitos parciales para optar
al grado de Geólogo

Asesora:
Marcela Jaramillo Uribe (PhD)
majaram9@eafit.edu.co

Coasesor:
Juan Camilo Múnera (PhD)
jmunera@cta.org.co



Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad EAFIT
Medellín
Noviembre de 2019

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 2019

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros Padres por el esfuerzo y acompañamiento durante todo nuestro proceso universitario, sin ellos no habiéremos podido concluir este ciclo. A familiares y amigos por el apoyo incondicional brindado.

A nuestra asesora de proyecto de grado Marcela Jaramillo por su compromiso, apoyo y determinación para llevar a cabo este proceso.

A Juan Camilo Múnica en calidad de coasesor por su acompañamiento y suministrar la información necesaria para este proyecto.

A Harol Cetre por brindarnos parte de su tiempo para contribuir al aprendizaje del software.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	5
1. Introducción	9
2. Generalidades.....	11
2.1 Pregunta de investigación.....	11
2.2 Hipótesis.....	11
2.3 Objetivo general	11
2.4 Objetivos específicos	11
3. Metodología.....	12
3.1 Recopilación y análisis de información secundaria.....	12
3.2 Trabajo de campo.....	13
3.3 Actualización del modelo hidrogeológico conceptual.....	14
3.4 Construcción del modelo numérico.....	14
3.5 Análisis de sensibilidad.....	14
4. Zona de estudio	15
4.1 Localización	15
4.2 Geología	16
4.3 Geomorfología.....	1
5. Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual	1
5.1 Unidad hidrogeológica 1 (UHG-1).....	5
5.2 Unidad hidrogeológica 2 (UHG-2).....	5

5.3	Unidad hidrogeológica 3 (UHG 3)	5
6.	Modelo Numérico	6
6.1	Capa 1 Embalse	8
6.2	Capa 2 Depósitos Aluviales	9
6.3	Capa 3 Perfiles de Meteorización	9
6.4	Capa 4 Basamento Rocoso	9
7.	Resultados	11
8.	Discusión	15
9.	Conclusiones	17
10.	Bibliografía	18
11.	Anexos	20
	Anexo 1	20
	Anexo 2	20
	Anexo 3	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de trabajo.....	12
Figura 2. Localización general del Área de estudio. Elaboración propia.	15
Figura 3. Mapa Geológico del área de estudio. Modificado de U.T. Río La Miel, 2016. ...	16
Figura 4. Mapa de unidades geomorfológicas. Modificado de U.T. Río La Miel, 2016.	1
Figura 5. Mapa unidades Hidrogeológicas CTA, 2019.....	3
Figura 6. Mapa de las unidades hidrogeológicas actualizadas y corte hidrogeológico A-A'. Elaboración propia.	4
Figura 7. Flujograma para construir el modelo numérico.....	10
Figura 8. Mapa de Unidades Hidrogeológicas. Elaboración propia.	11
Figura 9. Mapa de isopiezas y líneas de flujo. Elaboración Propia.....	12
Figura 10. Mapa de Puntos para el análisis de sensibilidad.	13
Figura 11. Resultados análisis de sensibilidad. A aumento recarga. B disminución recarga. C aumento nivel Embalse. D disminución nivel Embalse. E aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-3. F disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-3. G aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-2. I disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-2. J aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-1. K disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-1.	14

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Edad, descripción y datos obtenidos en campo para las diferentes unidades geológicas.....	1
Tabla 2. Unidades geomorfológicas (SGC, 2015).....	1
Tabla 3. Clasificación de la conductividad hidráulica (Fuente: Singhal & Gupta, 2010)	8

1. Introducción

Según el grupo Banco Mundial (2017), el recurso hídrico se encuentra bajo una presión sin precedentes en la mayoría de los países. La población mundial crece con rapidez y se estima que, de seguir las prácticas actuales, el mundo enfrentará un déficit del 40% entre la demanda prevista y el agua disponible en 2030. En Colombia, desde 2010, se ha venido desarrollando la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) que según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013), se define como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”.

La GIRH integra el componente superficial y subterráneo para representar el agua en un contexto de ciclo hidrológico, en donde se debe plasmar las diferentes unidades acuíferas en un MHC (IDEAM, 2013). Es por esto que empresas como ISAGEN están integrando esfuerzos para llevar a cabo dicha gestión. En el periodo 2017-2018 el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) realizó un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual (MHC) del Embalse Amaní, propiedad de ISAGEN, en el municipio de Norcasia departamento de Caldas.

Para Sezen et al. (2019) el modelado hidrológico permite estimar variables como la recarga, necesaria para el presente ejercicio académico, donde se propone actualizar el modelo hidrogeológico conceptual y generar una primera aproximación al modelamiento numérico de flujo de aguas subterráneas para el Embalse Amaní. La zona de estudio se encuentra en la cuenca hidrográfica del río La Miel que, a su vez, está en el flanco oriental de la Cordillera Central, al nororiente del departamento de Caldas (Unión Temporal Río La Miel, 2016). Al este de la cuenca, se localiza el acuífero Río Grande de La Magdalena que hace parte de la provincia hidrogeológica Valle Medio del Magdalena PM1 (ENA, 2018). En este sector afloran rocas ígneas y metamórficas de edad Paleozóica, sobre los cuales suprayacen rocas sedimentarias Terciarias de las formaciones San Antonio y Mesa, y sedimentos Cuaternarios que constituyen las unidades con mayor potencial hidrogeológico

(Corpocaldas, 2016). Las rocas cristalinas presentan un grado de fracturamiento y perfiles de meteorización que generan una permeabilidad secundaria. Sin embargo, en el presente ejercicio académico se modela el medio poroso relacionado a los perfiles de meteorización y a los depósitos aluviales, en un área de 100 km² aguas arriba del Embalse Amaní.

El modelo conceptual según IDEAM (2013) es el resultado de la integración de información geológica, hidrológica e hidráulica para representar la dinámica de flujo en la zona de estudio, este varía dependiendo de la cantidad y calidad de información recolectada. Pueden ser flujos regionales, intermedios o locales. Para esto se definen las unidades hidrogeológicas y se determina su geometría. Estas pueden ser definidas a partir de su porosidad, permeabilidad y litología, las cuales permiten almacenar y transmitir agua. A partir de este modelo conceptual se puede construir el modelo numérico.

Un modelo numérico según Sánchez, (2017), consiste en la representación en un sistema computarizado del medio físico (real) que, mediante las operaciones adecuadas, calcular los niveles piezómetros y el flujo hídrico dentro de un área determinada. Según Betancur y Palacio (2009), los métodos numéricos más utilizados para modelar sistemas naturales son diferencias finitas y elementos finitos. Estos modelos combinan la ecuación de balance de masa y la Ley de Darcy para describir el flujo de aguas subterráneas. En el presente trabajo se utiliza el método de diferencias finitas en donde el área de estudio es dividida en celdas estructuradas de igual tamaño.

El principal alcance de este trabajo de grado es actualizar el modelo hidrogeológico conceptual, con base en nueva información recopilada en campo y realizar una primera aproximación al modelamiento numérico de flujo de aguas subterráneas para el Embalse Amaní.

2. Generalidades

2.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es la dinámica de flujo de agua subterránea en cuanto a líneas de flujo y niveles piezométricos para la zona aledaña al Embalse Amaní?

¿Cuál es la variable que tiene mayor influencia en la dinámica de flujo de aguas subterráneas?

2.2 Hipótesis

La dinámica de flujo de aguas subterráneas tiene una dirección preferencial hacia el Embalse Amaní y los depósitos aluviales son la unidad que mayor influencia tiene en la dinámica de flujo.

2.3 Objetivo general

Actualizar el modelo hidrogeológico conceptual y realizar una primera aproximación al modelamiento numérico de flujo de aguas subterráneas para el Embalse Amaní.

2.4 Objetivos específicos

1. Recopilar y analizar información secundaria, datos geológicos, estructurales, hidrogeológicos, geomorfológicos y los modelos conceptuales hidrológicos que se tienen del área de estudio.
2. Realizar una campaña de campo para levantar información primaria de los perfiles de meteorización como insumo para el modelo conceptual y numérico.
3. Actualizar la geometría del modelo conceptual teniendo en cuenta las características de los perfiles de meteorización.
4. Construir un modelo numérico utilizando el software Modelmuse para realizar una primera aproximación al flujo de aguas subterráneas.
5. Evaluar la sensibilidad del modelo numérico frente a las variables de conductividad hidráulica, recarga y altura de las cabezas piezométricas.

3. Metodología

La metodología para realizar el presente trabajo se dividió en 5 etapas: recopilación y análisis de información secundaria, trabajo de campo, ajuste de parámetros del modelo hidrogeológico, construcción del modelo numérico y análisis de sensibilidad del modelo numérico. Toda esta metodología está representada de forma gráfica en la Figura 1.

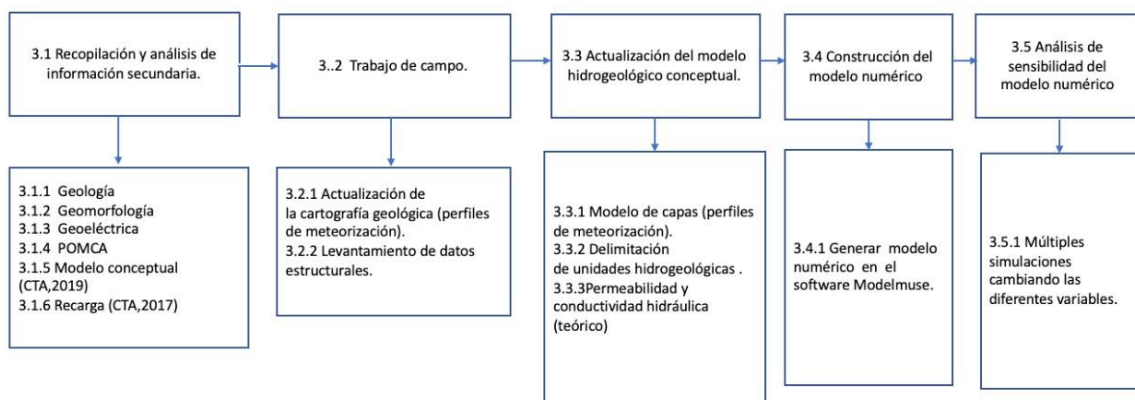


Figura 1. Metodología de trabajo.

3.1 Recopilación y análisis de información secundaria.

Esta primera etapa consistió en la recopilación de la información de diferentes fuentes como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), Corporación Autónoma Regional de Caldas (CorpoCaldas), artículos sobre la modelación numérica del flujo de aguas subterráneas y Cursos virtuales para el modelamiento de aguas subterráneas.

Se utilizó como información base los siguientes documentos y bases de datos: el mapa geológico y mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 188 (escala 1:100.000), La Dorada, realizado por el Servicio Geológico Colombiano (1970); información SIG (GDB) a escala 1:100.000; y modelo de tanques y modelo hidrogeológico conceptual realizado en la plataforma Gomodelr por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia.

Los principales documentos analizados fueron:

1. La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). Betancur. T. y Palacio. C. (2009).
2. Hidráulica de aguas subterráneas. María Victoria Vélez (1999).
3. Modelo conceptual de aguas subterráneas en la cuenca del río La Miel y su relación con los caudales del embalse. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA (2019).
4. Modelmuse - a graphical user interface for Modflow-2005 and Phast. Richard B. Winston (2009) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
5. Actualización Pomca río La Miel Tomo II. Unión temporal (U.T.) Río La Miel (2016).

3.2 Trabajo de campo.

Durante esta etapa se realizó una salida de campo del 17 al 21 de septiembre del 2018 enfocada a adquirir información estructural y corroborar las unidades geológicas reportadas en la información secundaria. Para esto se realizaron recorridos por las principales vías que atraviesan la cuenca del río La Miel. Se validaron y corrigieron los contactos litológicos descritos en la plancha 188 La Dorada (escala 1:100.000); se describieron los perfiles de meteorización con el objetivo de identificar capas que pudieran almacenar o transmitir agua y fueron clasificados según lo propuesto por Deerre & Patton (1971); y se tomaron datos estructurales en diaclasas, fallas y foliaciones. Los parámetros recopilados para cada una de las estructuras fueron: rumbo, buzamiento, longitud, espaciamiento, abertura, rugosidad, relleno y humedad de la estructura.

3.3 Actualización del modelo hidrogeológico conceptual.

Durante esta etapa se analizó e integró la información recopilada en campo y la información secundaria para delimitar las unidades hidrogeológicas. La conductividad hidráulica fue asignada por medio de tablas teóricas según Singhal & Gupta (2010) y Bear (1979; en Sen (2014)); para esto se tuvieron en cuenta los datos reportados para suelos y rocas que fueran similares a los observados en campo. Para este ejercicio académico se restringió la zona de estudio a 100 km² aguas arriba del Embalse Amaní.

3.4 Construcción del modelo numérico.

Una vez finalizada la etapa anterior se procedió a cargar toda la información en el software ModelMuse, diseñado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), versión 4.1.0.0, de uso libre, que puede ser descargada de la página del USGS. Este software emplea el algoritmo Modflow para describir el flujo de aguas subterráneas, combinando la ecuación de balance de masa y la Ley de Darcy, utilizando el método de diferencias finitas.

El modelo representa un área de 100 km² aguas arriba del Embalse Amaní y se construyó una malla estructurada de celdas de 100x100 metros para un modelo de 4 capas. Como condición de frontera en la zona norte y oriental está limitado por la cuenca hidrográfica del río Miel, hacia el sur por el Río La Miel y al occidente se limitó por la presencia de unidades hidrogeológicas impermeables.

3.5 Análisis de sensibilidad

Luego de diferentes simulaciones y ajustes obtuvimos un modelo base. Se seleccionaron 10 puntos de observación del nivel del agua para realizar un análisis de sensibilidad. Este consistió en aumentar y disminuir los valores de recarga, columna de agua del embalse y la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas en intervalos de 10, 20 y 30% para cada una de las variables. Los resultados de las diferentes simulaciones fueron comparados con el modelo base para así encontrar la variable que generara mayor variación en el resultado.

4. Zona de estudio

4.1 Localización

La zona de estudio hace parte de la cuenca del río La Miel en el departamento de Caldas, municipios: Norcasia y Samaná, bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corporacaldas). Abarca las litologías descritas en la plancha 188 (escala 1:100.000), del municipio de La Dorada, realizado por el SGC (1970). Como se puede observar en la Figura 2 tiene un área de 100 km² y comprende 9 km al este de la presa, 17 km al sur y 4 km al norte, aguas arriba de la presa Amaní la cual hace parte de la central hidroeléctrica Miel I.

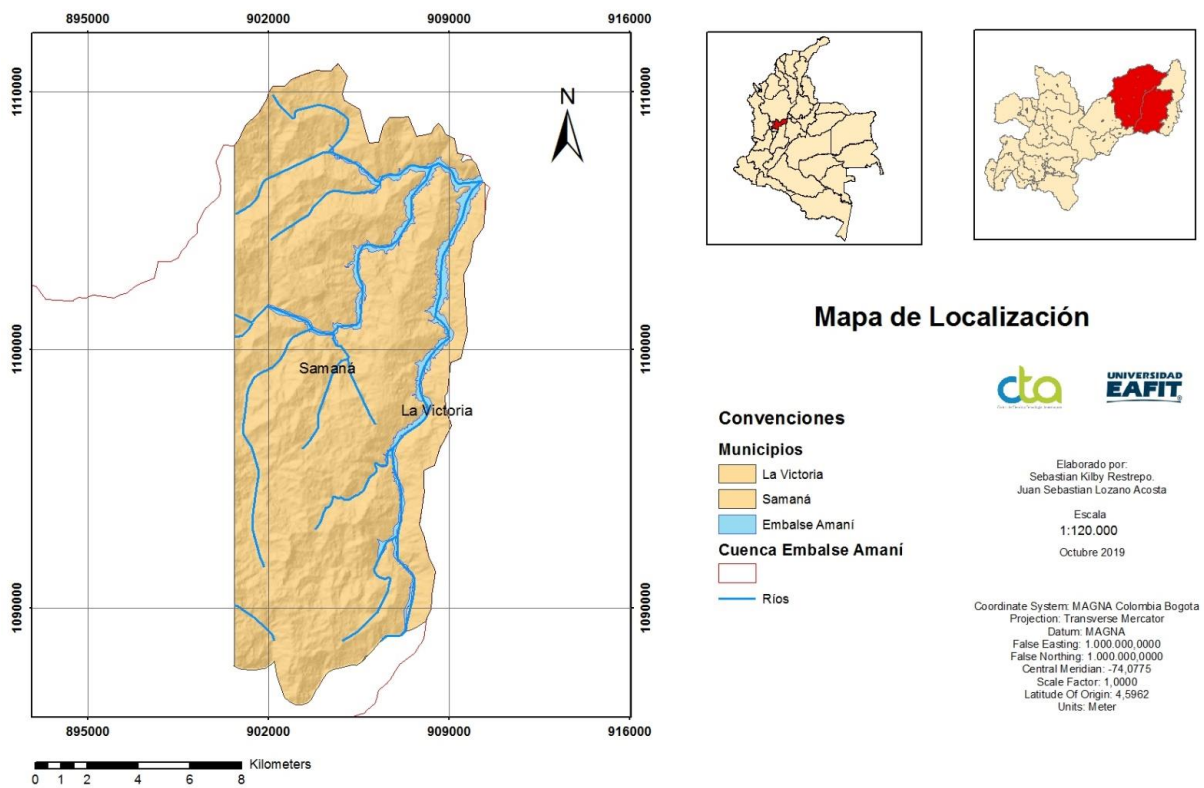


Figura 2. Localización general del Área de estudio. Elaboración propia.

4.2 Geología

Regionalmente, en la zona afloran rocas desde el Triásico inferior hasta el Cuaternario. Según Restrepo & Toussaint (1988), en la zona se presentaron una serie de eventos tectónicos que se pueden evidenciar en la dinámica de las rocas metamórficas, a diferencia de las unidades sedimentarias del Terciario en donde estos eventos son poco representativos (Ríos, 2012). Los lineamientos estructurales se encuentran en dirección preferencial NS a NNE, asociados a las fallas El Edén y Palestina.

En la zona de estudio las principales unidades litológicas son (Figura 3): i) Esquistos Cuarzosericíticos (TRes) que se encuentran a lo largo y ancho del área sin una distribución preferencial ocupando un área de 70 km², ii) Esquistos Verdes (TRev) localizados en el centro y este de la zona con un área de 17 km², iii) Intrusivos Néisicos (TRin) al noroeste de la zona con un área de 2 km² y iv) aluviones recientes (Qar) localizados en las inmediaciones del Embalse con un área de 1.5 km². Para cada de una de estas unidades se encuentra una descripción general y los datos obtenidos en campo en la Tabla 1.

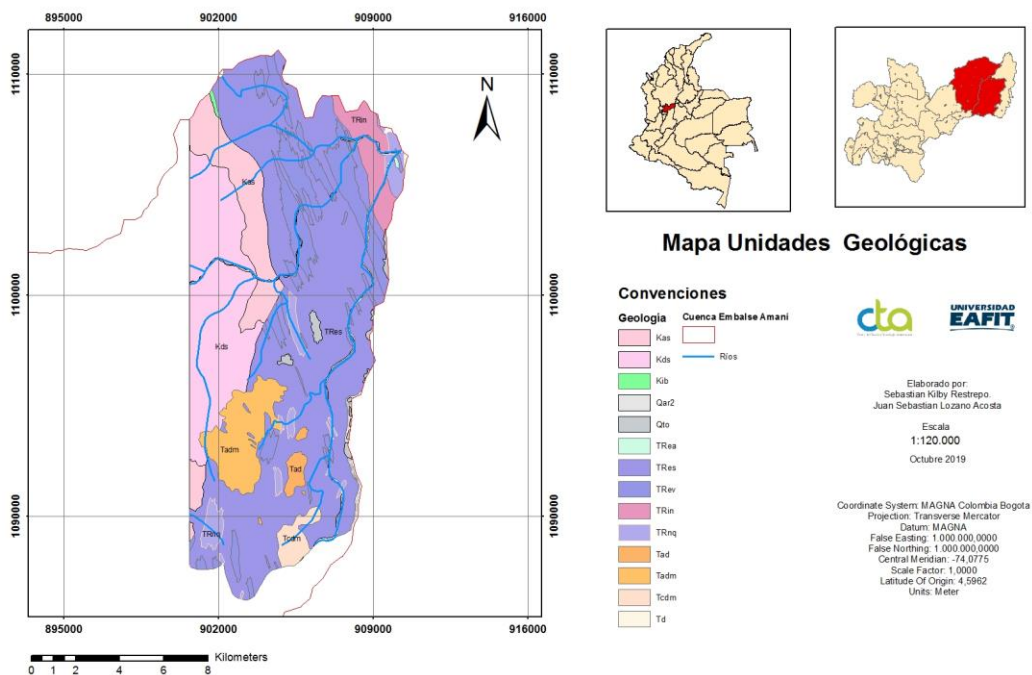


Figura 3. Mapa Geológico del área de estudio. Modificado de U.T. Río La Miel, 2016.

Tabla 1. Edad, descripción y datos obtenidos en campo para las diferentes unidades geológicas.

Unidad Geológica/ Edad	Fuente	Descripción	Datos campo
Aluviones Recientes (Qar) / Cuaternario.	Unión Temporal Río La Miel, (2016).	Depósitos superficiales no consolidados que forman terrenos relativamente planos en los valles de los cauces principales, compuestos por material grueso, desde cantos hasta bloques subangulares a subredondeados embebidos en una arcillo-arenosa.	No se realizó descripción de campo, debido a que el acceso en campo no fue posible.
Depósitos Piroclásticos y Glaciofluviales (Qto) / Cuaternario.	Monsalve (2018). (POMCA, 2017),	Compuesto por una sucesión de 6 m de espesor de depósitos de corriente piroclástica (PDC) compuesto por fragmentos de pumitas porfíricas (30-40%) embebidas en una matriz fina rica en cristales (60-70%) y depósitos de caída piroclástica compuesto por pumitas con tamaños hasta 9 cm de diámetro y fragmentos de roca volcánica alterada.	Limo arcillosos a limo arenosos de coloraciones pardo rojizos a amarillosos y espesores variables entre 10 y 15 m, sin embargo, se comparó con la perforación PZ-7 localizada en el alineamiento del trasvase Río Manso, el suelo tiene un espesor superior a 30 m.
Pórfido del Morro (Tadm) / Terciario.	Loaiza, (2012). Unión Temporal Río La Miel, (2016).	Se clasifica como una roca ígnea con textura porfírica e inequigranular, cuyos fenocristales están representados principalmente por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita, en una matriz afanítica de color gris claro a oscuro.	No se realizó descripción de campo, debido a que no se encontró afloramiento. (acceso)
Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tad) / Terciario.	CTA, (2019). González, (1990).	Compuestos por biotitas subhedrales embebidos en una matriz afanítica vítrea los cuales intruyen a los esquistos sericíticos (TRes) y cuarcitas (TRnq) del Complejo Cajamarca.	No se realizó descripción de campo, no se encontraba en la zona de estudio.

Unidad Geológica/ Edad	Fuente	Descripción	Datos campo
Stock La Miel (Tcdm) / Terciario.	González, (1990).	Esta unidad aflora sobre el río La Miel al norte de La Victoria. Es un cuerpo rectangular, alargado en sentido N-S con una terminación irregular hacia el noreste. Esta unidad intruye los esquistos sericíticos (TRes) formando una débil aureola de contacto y está cubierto por sedimentos de la Formación Mesa.	No se realizó descripción de campo, debido a que no se encontró afloramiento en campo. (acceso)
Alaskita de Samaná (Kas) / Cretácico.	(González, 1990). (Unión Temporal Río La Miel, 2016).	Compuesta por rocas masivas de grano medio a grueso, inequigranular, ocasionalmente con estructura foliada por efectos dinámicos hacia el borde occidental, a lo largo de la Falla Palestina; Granito de feldespato alcalino de color gris claro a crema. Presentan una textura holocristalina, predomina el cuarzo y las plagioclasas con esporádicas micas biotíticas.	No se realizó descripción de campo, debido a que no se encontró afloramiento en campo. (acceso)
Intrusivos Néisicos (TRin) Y Anfibolitas (TRa) / Triásico.	(González, 1990). (Unión Temporal Río La Miel, 2016).	Estructura néisica variando a esquistosa y masiva, el tamaño de grano varía de fino a grueso y muestran deformación; cerca de los contactos pueden observarse cornubianitas producidas por efectos térmicos originados por la intrusión.	El horizonte IC se encuentra en las partes más altas como la vía hacia la vereda La Samaria, vía San Diego-Las Delicias y San Diego-vereda Planes presentando textura de composición arenosa a limo arcillosa. El horizonte III-A de roca fresca corresponde a rocas masivas a diaclasadas, en dirección preferencial NE/SE.
Cuarcitas Biotíticas-Feldespática (TRnq) / Triásico.	González, (1990). Borrero, (1983). Deere & Patton, (1971). (Unión Temporal Río La Miel, 2016).	Esta unidad está compuesta por cuerpos de cuarcitas biotíticas con intercalaciones concordantes dentro de los esquistos, estos lentes tienen espesores de hasta 3 m cuyos contactos con las rocas adyacentes son gradacionales, se encuentra en contacto fallado con la unidad Esquistos cuarzo-sericíticos, Cuarzo filita grafitosa y Esquistos aluminico. En algunos sectores	Los afloramientos de esta unidad se caracterizan por rocas diaclasadas a moderadamente diaclasadas, de textura granoblástica. Adicionalmente se observaron zonas altamente meteorizadas en donde predomina el horizonte IC; en la carretera que conduce desde Pensilvania hacia Samaná, tiene textura limo-arenoso a arena fina, con coloración gris y zonas blancas y

Unidad Geológica/ Edad	Fuente	Descripción	Datos campo
Esquistos Verdes o Actinolíticos (TRev) / Triásico.	Toussaint, (1999). Deere & Patton, (1971).	Rocas finogranulares esquistosas a masivas de color gris verdoso oscuro a negro, foliación bien definida.	Esta unidad presenta meteorización moderada a alta que conforman suelos compuestos por los horizontes IA, IB, IC y IIA en la vía Norcasia – Berlín.
Esquistos Cuarzosericíticos (TRes) / Triásico.	Toussaint, (1999). Deere & Patton (1971).(Unión Temporal Río La Miel, 2016).	Esquistos cuarzosericíticos, esquistos micáceos, filitas y algunas pizarras. Su contacto principal es fallado con la unidad Cuarcita y Cuarcita biotítica - feldespática.	Los afloramientos sobre esta unidad presentan perfiles de meteorización poco constantes. Siguiendo con la propuesta de Deere & Patton (1971). Los horizontes IIA Y IIB de roca meteorizada y transición a saprolito superan los 7 m de espesor en la carretera Samaná-Pensilvania.

4.3 Geomorfología

En el área de estudio se encuentran tres unidades genéticas del relieve: el ambiente Denudativo, el Fluvial y el Estructural. El denudativo está definido por la acción de los procesos de meteorización y erosión, el fluvial lo conforman las geformas creadas por los procesos erosivos de las corrientes superficiales y la acumulación de los sedimentos que estas transportan, y el estructural es originado por la dinámica de los esfuerzos de la tierra representados en las fallas. En la Figura 4 se muestra el mapa geomorfológico escala 1:100.000 adaptado del SGC y en la Tabla 2 se presenta la descripción detallada de las diferentes unidades geomorfológicas (SGC, 2015).

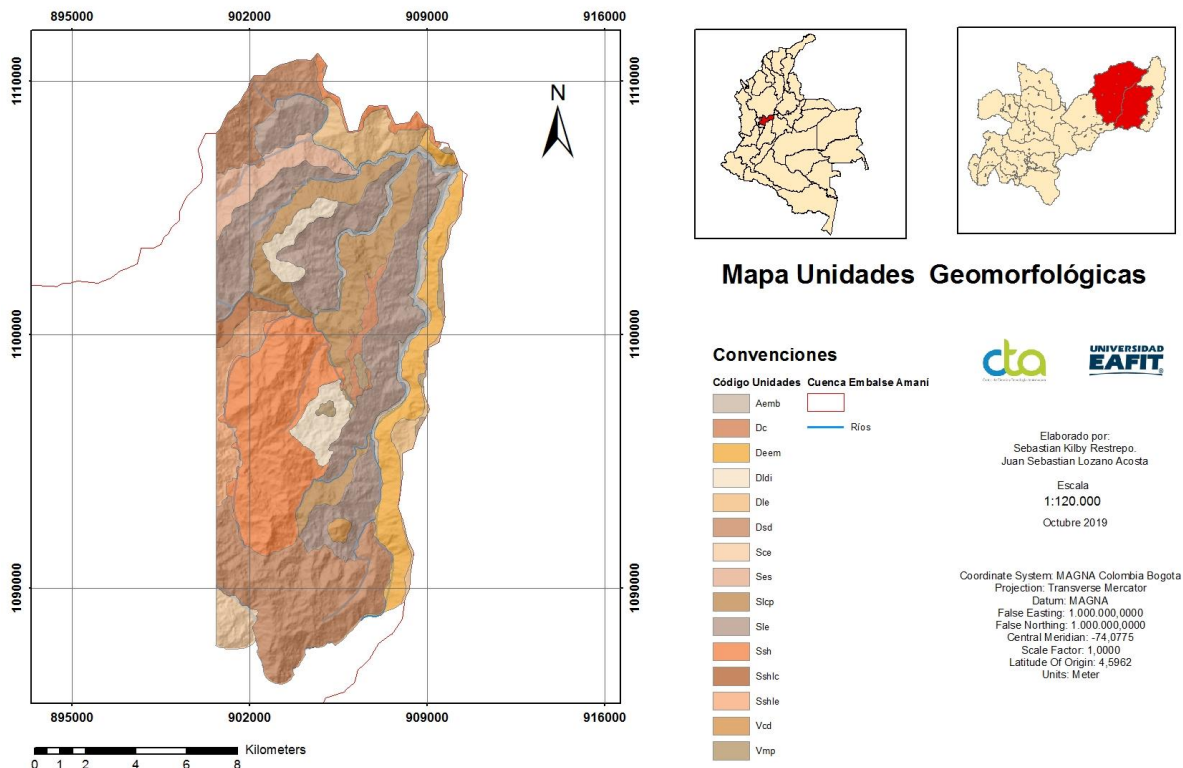


Figura 4. Mapa de unidades geomorfológicas. Modificado de U.T. Río La Miel, 2016.

Tabla 2. Unidades geomorfológicas (SGC, 2015).

Unidad Geomorfológica	Unidad genética de Relieve	Descripción de las Geformas	Ubicación
Cima (Dc)	Denudativa	Compuesta por una superficie amplia convexa a plana, en franjas alargadas que bordean algunas divisorias de agua. Su morfología es alomada y alargada con pendientes planas a inclinadas con anchos entre 200 a 800 metros, limitadas por laderas cuya inclinación puede ser moderada a escarpada de longitud corta a larga	Localizada hacia la parte nororiental del casco urbano del Municipio de Samaná, sobre el sector Alejandro Gutiérrez, en la vereda Alto de San Juan, en la vía Norcasia – Florencia y vereda Carrizales.
Lomeríos disecados (Dldi)	Denudativa	Caracterizada por prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas redondeadas y amplias laderas cortas a moderadamente largas, forma recta, cóncava y convexa, pendientes muy inclinadas a muy abruptas, con índice de relieve bajo.	Localizados al oriente del área de estudio hacia los municipios de Pradera y La Dorada; al noroccidente del municipio de Norcasia en el sector Corozales; al suroccidente en el sector los Pomos y La Cristalina y al suroccidente del municipio de Samaná en el sector Albania Baja.
Cerro estructural (Sce)	Estructural	Caracterizada por presentar relieve aislado de morfología montañosa a colinada, con laderas de longitud corta a moderadamente larga, de forma cóncava a irregular y pendientes muy abruptas a escarpadas.	Localizado al nororiente del casco urbano del municipio de Samaná en el sector el Vergel y en las veredas El Diamante y Finca Nueva
Espolón (Ses)	Estructural	Saliente de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, desarrollados sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias y limitado por drenajes paralelos a subparalelos. Con laderas de longitudes variables, con pendientes que se ven reducidas de	Localizado en una pequeña franja al noroccidente del área de estudio cerca a la vereda la Tulia.

Unidad Geomorfológica	Unidad genética de Relieve	Descripción de las Geformas	Ubicación
Ladera contrapendiente (Slcp)	Estructural	<p>abruptas a inclinadas por intensos procesos denudativos.</p> <p>Caracterizada por una superficie en declive, de morfología regular a irregular, longitud larga a extremadamente larga con pendientes escarpadas a muy escarpadas, conformando planos de estratificación dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Los materiales presentan intercalación de rocas duras y blandas.</p>	Localizada al norte en el sector El Bosque, al oriente en los sectores de Alejandro Gutiérrez y la Maravilla.
Ladera estructural (Sle)		Caracterizada por laderas con estratos a favor de la pendiente del terreno, pendientes suavemente inclinadas a escarpadas, longitud larga a extremadamente larga, superficie en declive, morfología regular a irregular y drenaje subparalelo.	Localizada en varios sectores del Municipio de Samaná, al nororiente en los sectores Cañaveral y Embalse Amaní, al norte en el sector Montessori, Alegrías limitado por el río San Antonio, donde alcanza una altura de 1100 msnm.
Criptodomo (Vcd)	Volcánico	Caracterizado por ser una estructura en forma de cúpula o domo subredondeado compuesto por laderas irregulares a convexas, longitudes moderadas y pendientes ligeras a fuertemente escarpadas.	Localizado en el municipio de Pensilvania, en el sector denominado cerro El Morron.
Manto de piroclastos (Vmp)		Geomorfológicamente presenta planos amplios de pendientes inclinadas, localmente aterrazados, de morfología suavemente ondulada. Su origen está asociado con depósitos piroclásticos de caída o el emplazamiento de corrientes de densidad piroclástica en zonas amplias y no encañonadas.	Se encuentra distribuida en varias zonas del área de estudio como el corregimiento de San Diego, en los sectores El Abejorro, El Jardín y Encimadas al occidente del casco urbano del municipio de Samaná

5. Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual

Según lo propuesto por Vélez (1999), un modelo hidrogeológico conceptual consiste en representar de forma gráfica la interacción entre los flujos de agua en función de diferentes variables que permiten la definición de las unidades hidrogeológicas. Esto a partir de la geometría y características hidráulicas que facilitan o impiden el flujo del agua. Además, se tiene en cuenta características como la pendiente, geología, geomorfología, cobertura del suelo, entre otros.

El área se divide en unidades hidrogeológicas según su capacidad de almacenar y dejar circular el agua a través de ellas en acuíferos, acuícludos, acuitardos y acuífugos. A su vez, los acuíferos se pueden clasificar en no confinados y confinados; los no confinados son aquellos en los que la superficie de agua está en contacto directo con la atmósfera y los acuíferos confinados son aquellos en los que el agua está bajo una presión mayor a la atmosférica, para que esto ocurra debe existir una capa sello, es decir, la formación permeable está limitada por capas impermeables.

Desde el punto de vista geológico, la zona de interés está dominada por la presencia de rocas ígneas y metamórficas, las cuales representan un 90% del área. Estas rocas, por sus propiedades intrínsecas tienen permeabilidades primarias muy bajas a nulas; no obstante, durante la etapa de campo se evidenció que a través de sus fracturas y el desarrollo de diferentes perfiles de meteorización pueden circular agua. También hay presencia de depósitos piroclásticos y aluviales, los cuales representan un 10% de la zona de estudio, y presentan condiciones para almacenar y transmitir agua.

Hidrogeológicamente, las unidades geológicas identificadas en la zona fueron descritas en función de su capacidad de almacenar y dejar circular el agua a través de ella, de acuerdo con los conceptos propuestos por Vélez (1999). Para el presente ejercicio académico se toma como punto de partida el modelo hidrogeológico construido por el CTA (2019), el cual está conformado por 4 unidades hidrogeológicas (UHG), dos de ellas representan el medio poroso y las otras dos medios fracturados, estas son (Figura 5):

- UHG-1: compuestos por depósitos aluviales y rocas sedimentarias del Grupo Honda y la Formación Mesa. El Grupo Honda está compuesto de conglomerados, areniscas y, en menor proporción, de arcillolitas. La Formación Mesa consta de la intercalación de conglomerados, arenas tobáceas y pequeñas capas de lutitas blancas.
- UHG-2-. corresponde a los depósitos de vertiente, depósitos piroclásticos pumíticos provenientes del Volcán El Escondido y suelos residuales de las diferentes unidades geológicas aflorantes. Están compuestos principalmente por niveles de pómez con tamaños variables entre lapilli y cenizas con presencia de bloques de hasta 20 cm de granodioritas.
- UHG-3: Está asociada con la unidad geológica Esquistos Cuarzo Sericíticos y Esquistos Verdes, los cuales ocupan cerca del 42% del área del proyecto. Esta unidad conforma un macizo rocoso fracturado con permeabilidad primaria nula, donde los planos de esquistosidad y diaclasas favorecen la acumulación y circulación de fluidos en las zonas donde estos se encuentren ligeramente abiertos y/o con rellenos de material poroso o de fácil disolución que le imprimen una abertura hidráulica efectiva y proporciona una permeabilidad secundaria de baja a media.
- UHG-4: corresponde a aquellas unidades geológicas fracturadas a poco fracturadas con planos de discontinuidad en su mayoría cerrados y/o pocos continuos, que caracterizan a la unidad de Cuarcitas, Intrusivo Néisico de Samaná, Complejo Ígneo de Samaná, Alaskita de Samaná y los stocks de Florencia, El Hatillo, El Moro y Guadalupe. De acuerdo con el inventario de puntos de aguas, sobre la unidad Complejo Ígneo de Samaná y Stock de Florencia se tienen manantiales que brotan a través de sistemas de fracturas localizados dentro del horizonte IIA-IIB de meteorización. Dichas fracturas actúan como conductos de recarga y descarga de fluidos de manera localizada.

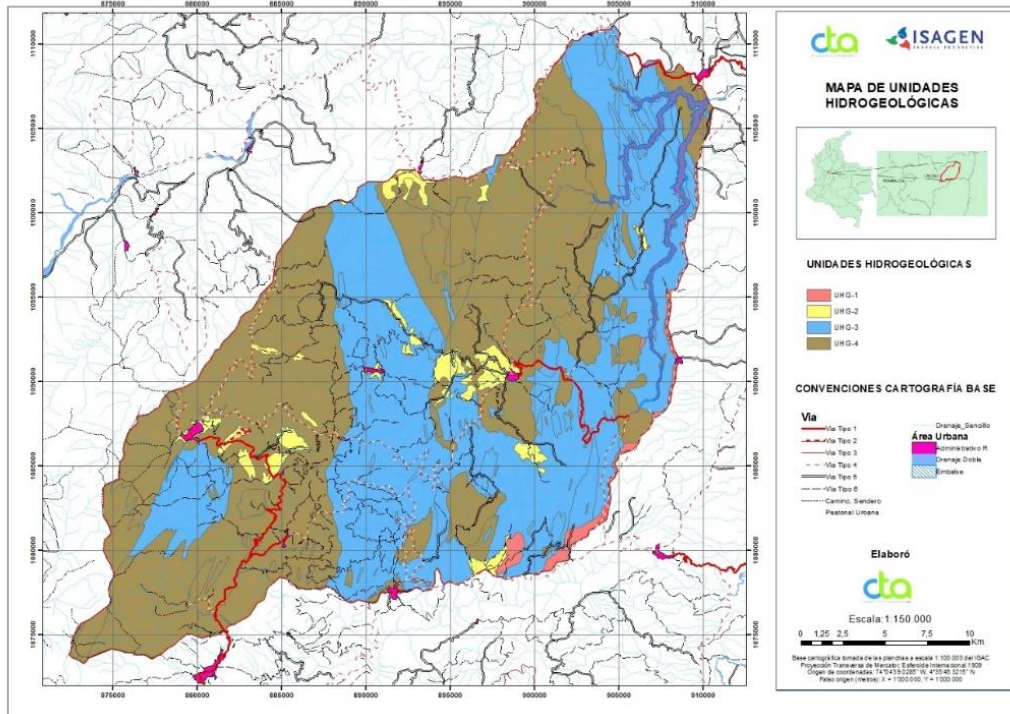


Figura 5. Mapa unidades Hidrogeológicas CTA, 2019.

De acuerdo con la información encontrada en el modelo conceptual construido por el CTA se tiene que el flujo sub-superficial se mueve en dirección del gradiente de la topografía y, eventualmente, puede aflorar en superficie como puntos de agua. Adicionalmente, la circulación vertical es menor y está en función del fracturamiento de la unidad infrayacente.

Tomando como referencia la información anterior y los datos obtenidos en campo se actualiza el modelo hidrogeológico conceptual en 3 UHG representando los depósitos aluviales, los perfiles de meteorización, y el basamento rocoso. Estas unidades se observan en la Figura 6 y serán descritas a continuación.

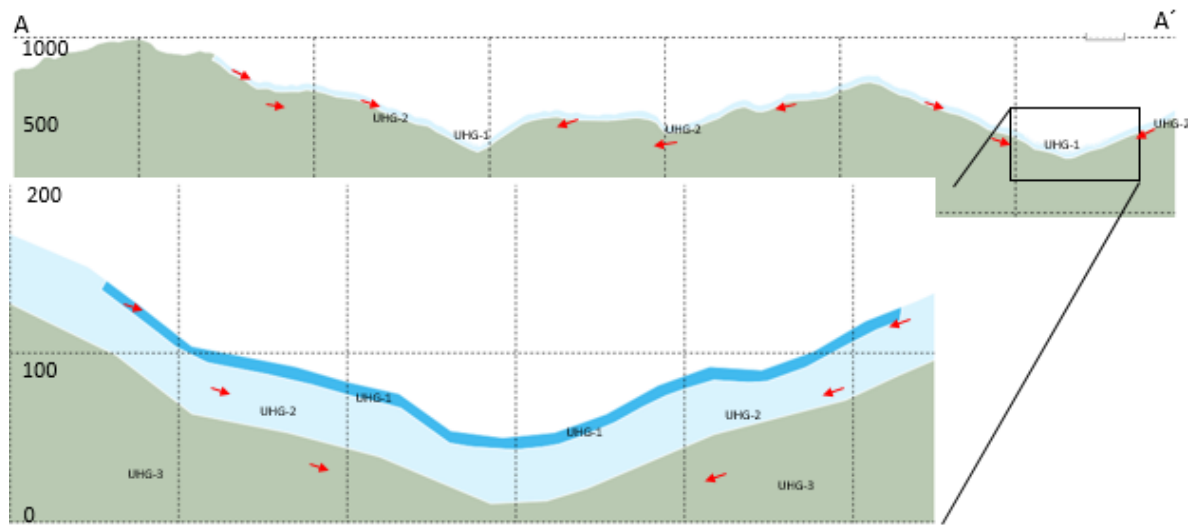
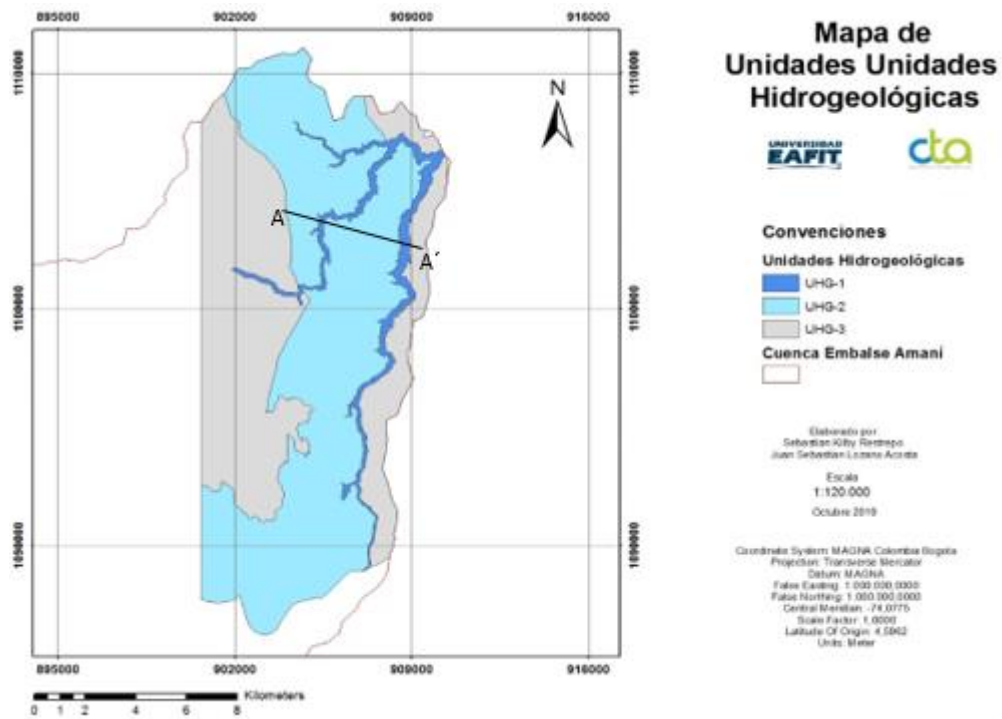


Figura 6. Mapa de las unidades hidrogeológicas actualizadas y corte hidrogeológico A-A'. Elaboración propia.

5.1 Unidad hidrogeológica 1 (UHG-1)

Corresponde a los depósitos aluviales asociados al río La Miel y el río Moro, tienen un espesor que varían entre 8 y 10 metros, están compuestos de material grueso subangular a subredondeado, clasto soportado y embebido en una matriz arcillo-arenosa. Esta unidad hidrogeológica representa el 8% del área de estudio y su relieve está caracterizado por geoformas con un relieve suavizado a moderadamente inclinado. Esta unidad, por las condiciones físicas de su litología, presenta variaciones en su porosidad y permeabilidad primaria.

5.2 Unidad hidrogeológica 2 (UHG-2)

Corresponde a los depósitos piroclásticos pumíticos y los perfiles de meteorización de las rocas ígneas y metamórficas. Ambas litologías a nivel regional presentan un comportamiento homogéneo debido a la extensión de estos perfiles. Los depósitos piroclásticos alcanzan espesores de hasta 30 m (Monsalve, 2018). De acuerdo a la perforación P51 elaborada en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río La Miel, se identificó un depósito con espesor superior a 10 m compuesto por cenizas volcánicas de textura limo-arcillosas a arcillosas con humedad moderada, lapilli compuesto por fragmentos de pumitas muy meteorizadas embebidos en una matriz limo-arcillosa a arcillosa (POMCA, 2017). Los perfiles de meteorización IC-IB derivado de las diferentes unidades geológicas aflorantes en la cuenca se caracterizan por tener suelos limo arcillosos a limo arenosos de coloraciones pardo rojizos y espesores variables entre 2 y 20 m (CTA, 2019). Esta unidad hidrogeológica ocupa el 90% del área de estudio, geomorfológicamente desarrolla laderas onduladas y conos – lóbulos coluviales con pendientes ligeramente inclinadas. De acuerdo con los ensayos de clasificación elaborados en el POMCA (2017) estos suelos en su mayoría se clasifican como SC, arenas arcillosas de baja plasticidad y permeabilidad primaria moderada.

5.3 Unidad hidrogeológica 3 (UHG 3)

Corresponde a la unidad geológica Esquistos Cuarzo Sericíticos, Esquistos Verdes, unidad de Cuarzitas, Intrusivo Néisico de Samaná, Complejo Ígneo de Samaná, Alaskita de

Samaná y los stocks de Florencia, El Hatillo, El Moro y Guadalupe los cuales representan el basamento del área de estudio. Esta unidad se encuentra a profundidades superiores a los 30 metros asumiendo que a partir de este punto no se desarrollaron perfiles de meteorización. Para este ejercicio académico se le asignó un espesor de 500 m debido a la gran extensión superficial del modelo y la poca profundidad que representa el medio poroso.

6. Modelo Numérico

Un modelo numérico según Sánchez, (2017), consiste en la representación en un sistema computarizado del medio físico (real) que, mediante las operaciones adecuadas, calcular la evolución de los niveles y el flujo hídrico dentro del área de estudio para un tiempo determinado.

El servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) en la década de los 70 decide escribir un modelo que se podía ajustar a diferentes escenarios hidrogeológicos y es allí donde surge el concepto MODFLOW (modular finite-difference ground-water flow model). La primera versión de este fue publicada en 1981 y codificada en FORTRAN66. El método de diferencias finitas asigna un valor constante para cada una de las celas teniendo en cuenta una geometría y datos de entrada. En la actualidad el USGS cuenta con una interfaz gráfica llamada Modelmuse que permite realizar la modelación de aguas subterráneas en 3 dimensiones, este trabajo utiliza la versión 4.1.0.0 de libre descarga en la página del USGS. El software calcula la variación en la superficie piezométrica a partir de un instante inicial. Estas variaciones, según Betancur (2009), son calculadas mediante las ecuaciones diferenciales parciales que son el resultado de combinar las ecuaciones de balance de masas y la Ley de Darcy, dicha combinación da como resultado la Ecuación 1 que rige el flujo del agua subterránea.

Ecuación 1. Combinación balance de masas y Ley de Darcy

$$\frac{\partial}{\partial x} * \left(Kx * \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} * \left(Ky * \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} * \left(Kz \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \right) - W = Ss * \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Donde, S_s =Coeficiente de almacenamiento; $\frac{\partial h}{\partial t}$ = Variación a la carga piezométrica en el tiempo (si el modelo es estático el valor es 0); W = Aportes o salidas externas al modelo; $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ = Gradiente hidráulico; K_x, K_y, K_z = Conductividad hidráulica en sus respectivas direcciones.

Modelmuse permite realizar modelaciones en estado transitorio y estacionario, el estado transitorio nos permite observar cómo es el comportamiento del modelo para diferentes periodos, mientras que en el estacionario se puede observar un intervalo de tiempo.

Para llevar a cabo la simulación es necesario introducir unas variables de entrada que son:

- Geometría de las formaciones.
- Modelo de elevación digital (DEM).
- Recarga.
- Conductividad hidráulica.
- Forma de la superficie piezométrica en el instante inicial.
- Opcionalmente: Caudales de bombeo o inyección y red de drenaje.

La geometría y espesores fueron asignados de acuerdo a lo descrito en las UHG. La topografía fue asignada mediante un modelo de elevación digital (DEM) en formato .grd, todas las capas siguen la forma de la topografía. La recarga fue calculada por el CTA (2019) por medio de un modelo hidrológico de tanques para toda la cuenca del Embalse Amaní, esta tendrá un valor de 0.0038 m/día para toda nuestra área de estudio. Los valores de conductividad fueron asignados por medio de tablas teóricas según Singhal & Gupta (2010), quienes establecen una relación entre la litología y esta variable (Tabla 3). La superficie piezométrica fue asignada con la geometría del embalse a una cota de 550 m.s.n.m. que para este caso será constante. En la zona de estudio no se tiene información de pozos y para este ejercicio académico la interacción río acuífero no será simulada, es por lo que no se incluye la red de drenaje.

Tabla 3. Clasificación de la conductividad hidráulica (Fuente: Singhal & Gupta, 2010)

Conductividad Hidráulica K (m/s)	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³
Permeabilidad k (Darcy) (m/día)	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
Valores relativos	Muy alto			Alto		Moderado			Bajo			Muy bajo		
Materiales representativos														
Depósitos no consolidados														
Gravas														
Arenas														
Arena limo-arcillosa														
Arcillas (fracturadas)														
Rocas														
Lutitas y limolitas (no fracturadas)														
Lutitas y limolitas (fracturadas)														
Areniscas														
Areniscas (fracturadas)														
Calizas y dolomitas														
Calizas cársticas y dolomitas														
Basaltos														
Basaltos fracturados vesiculares														
Rocas cristalinas														
Rocas masivas cristalinas														

De acuerdo al alcance e información recopilada este será un modelo estacionario. La discretización temporal está en días y las unidades de medida son m. Como la geometría de las capas presenta un comportamiento homogéneo y no se tiene en cuenta el medio fracturado, se utiliza el método de diferencias finitas, en donde el área de estudio será dividida en celdas estructuradas de 100x100 metros, los valores asignados serán constantes para cada una. Esta malla tiene un origen de coordenadas planas en la esquina superior izquierda de 900.782N y 111.036W con el sistema de coordenadas MAGNA - Colombia - Bogotá, consta de 97 columnas y 224 filas. Este modelo numérico representa un área de 100 Km² aguas arriba del Embalse Amaní. Como condición de frontera en la zona norte y oriental está limitado por la cuenca hidrográfica del río Miel y hacia el sur y occidente se limitó por la presencia de unidades hidrogeológicas impermeables. El modelo está dividido en 4 capas que se explican a continuación, es importante aclarar que para cada capa el área de estudio debe estar totalmente representada para evitar superposición de valores.

6.1 Capa 1 Embalse

Esta capa está definida a partir de la topografía, tiene un espesor de 5m. Se construye con el objetivo de representar conceptualmente el embalse, donde su espesor no representa la

columna de agua, este será asignada como cabeza constante (CHD) a una altura de 550 m.s.n.m. definida por el polígono que representa el espejo de agua del embalse. El área restante representa los perfiles de meteorización de la UHG-2.

6.2 Capa 2 Depósitos Aluviales

Esta capa está definida a partir de la base de la capa 1, tiene un espesor de 10 m. Esta representa la UHG-1 a la cual se le asignó un valor teórico de conductividad hidráulica $K_x=5$ m/día, $K_y=K_x$ y $K_z=10$ m/día. El área restante representa los perfiles de meteorización de la UHG-2. Según IDEAM (2013) esta unidad es catalogada como “Según IDEAM (2013) esta unidad es catalogada como “Formaciones permeables ($K > 10^{-1}$ m/día) formando importantes acuíferos de relativamente alta permeabilidad y productividad.”

6.3 Capa 3 Perfiles de Meteorización

Esta capa está definida a partir de la base de la capa 2, tiene un espesor de 30 m. Esta representa la UHG-2 a la cual se le asignó un valor teórico de conductividad hidráulica $K_x=0.86$ m/día, $K_y=K_x$ y $K_z=K_x/10$ m/día. Este polígono en profundidad representa toda el área de estudio debido a que se asumen un comportamiento homogéneo a partir de los 12 m. Según IDEAM (2013) esta unidad es catalogada como “Formaciones semipermeables K entre 10^{-1} m/día y 10^{-4} m/día) que forman acuíferos menos productivos y acuitardos.”

6.4 Capa 4 Basamento Rocoso

Esta capa está definida a partir de la base de la capa 3, tiene un espesor de 500 m el cual fue asignado debido a la extensión superficial del modelo y la poca profundidad que representa el medio poroso. Esta representa la UHG-3 a la cual se le asignó un valor teórico de conductividad hidráulica $K_x=0.000086$ m/día, $K_y=K_x$ y $K_z=K_x/10$ m/día. Este polígono en profundidad representa toda el área de estudio. Según IDEAM (2013) esta unidad es catalogada como “Formaciones impermeables (acuicludos y acuífugos) ($K < 10^{-4}$ m/día).

El proceso de construcción del modelo numérico será representado en el siguiente flujograma Figura 7.

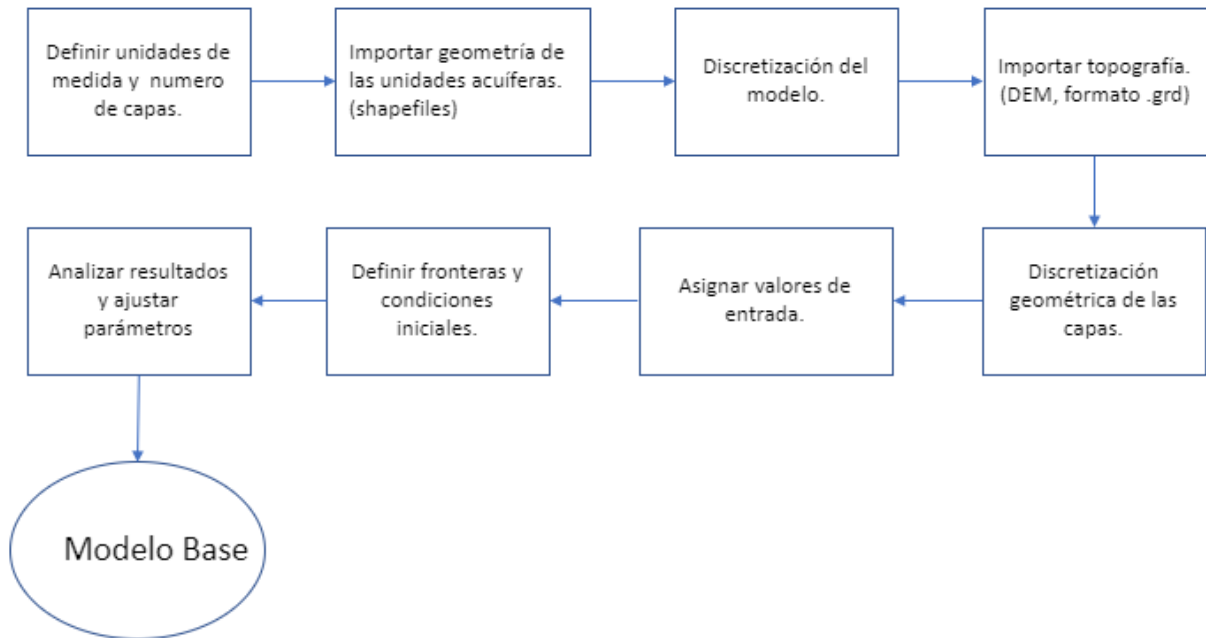


Figura 7. Flujograma para construir el modelo numérico.

Una vez se obtuvo el modelo base se procedió a realizar un análisis de sensibilidad, Este consistió en variar uno a uno las variables de recarga, conductividad hidráulica y nivel del embalse, en un 5%, aumentando y disminuyendo para comparar los resultados de altura piezométricas de cada simulación con los del modelo base, esta tabla se puede encontrar en Anexo 1. Para esto a lo largo del área de estudio se distribuyeron 10 puntos de observación (HOB) donde fueron registradas estas variaciones.

7. Resultados

Los resultados obtenidos para el modelo conceptual serán plasmados en la Figura 8 en donde se pueden observar las UHG y las direcciones de flujo.

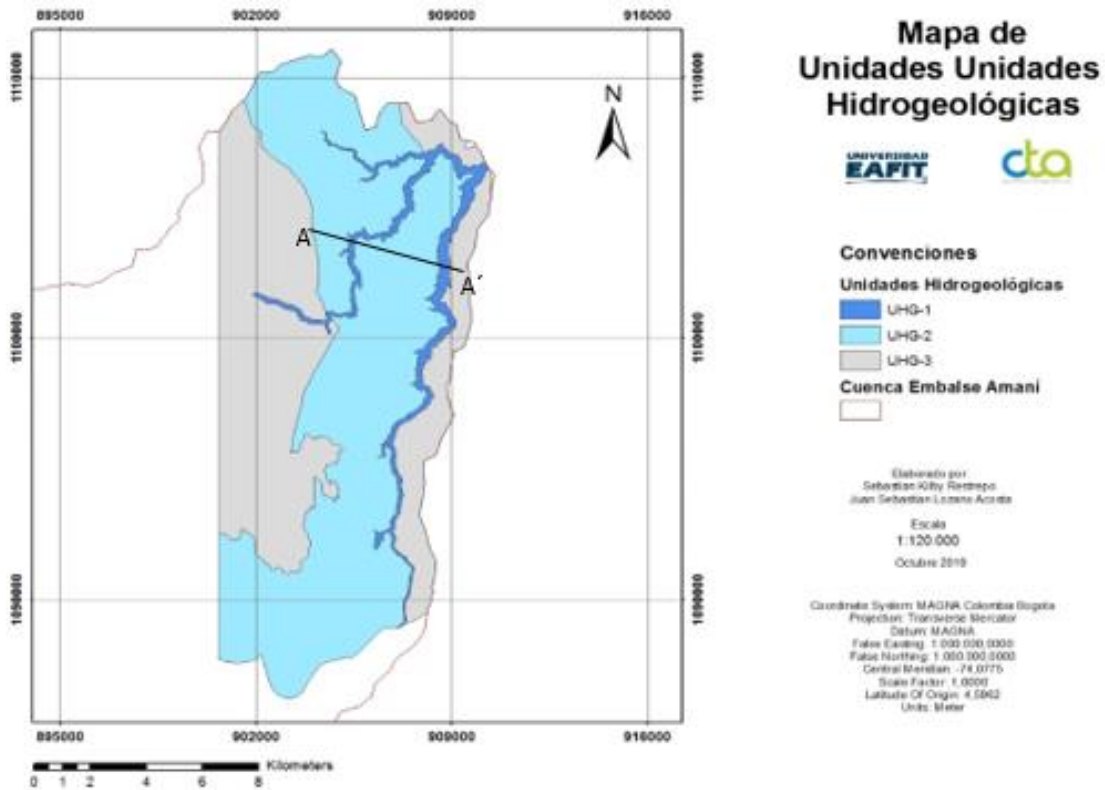


Figura 8. Mapa de Unidades Hidrogeológicas. Elaboración propia.

Al realizar los ajustes de los parámetros luego de diferentes simulaciones, se logra representar las alturas piezométricas para toda la zona de estudio. A partir de estas se genera el mapa de isopiezas (Figura 9) donde se muestran las direcciones de flujo que tiene una tendencia NE hacia la zona del Embalse Amaní. Los resultados obtenidos en esta simulación son tomados como el Modelo Base.

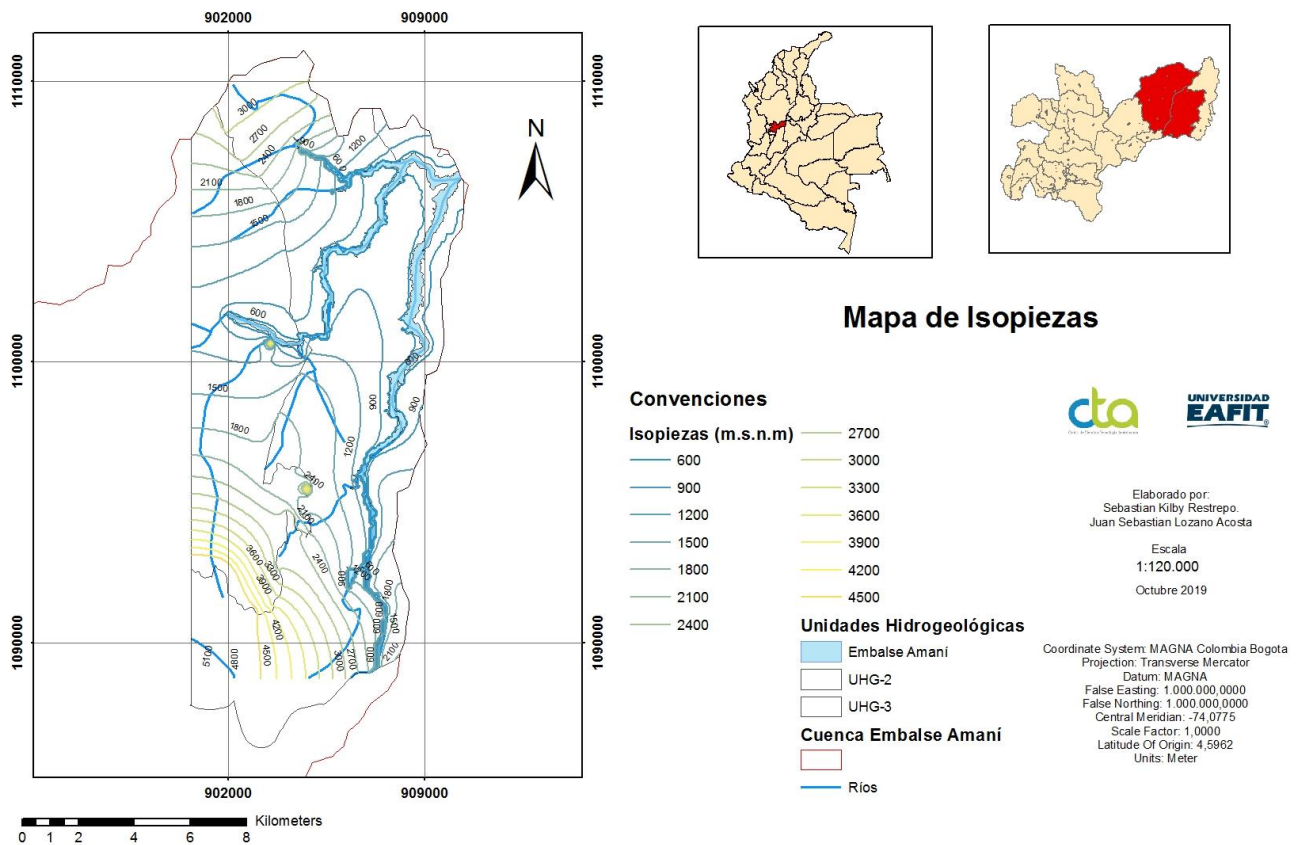


Figura 9. Mapa de isopiezas y líneas de flujo. Elaboración Propia.

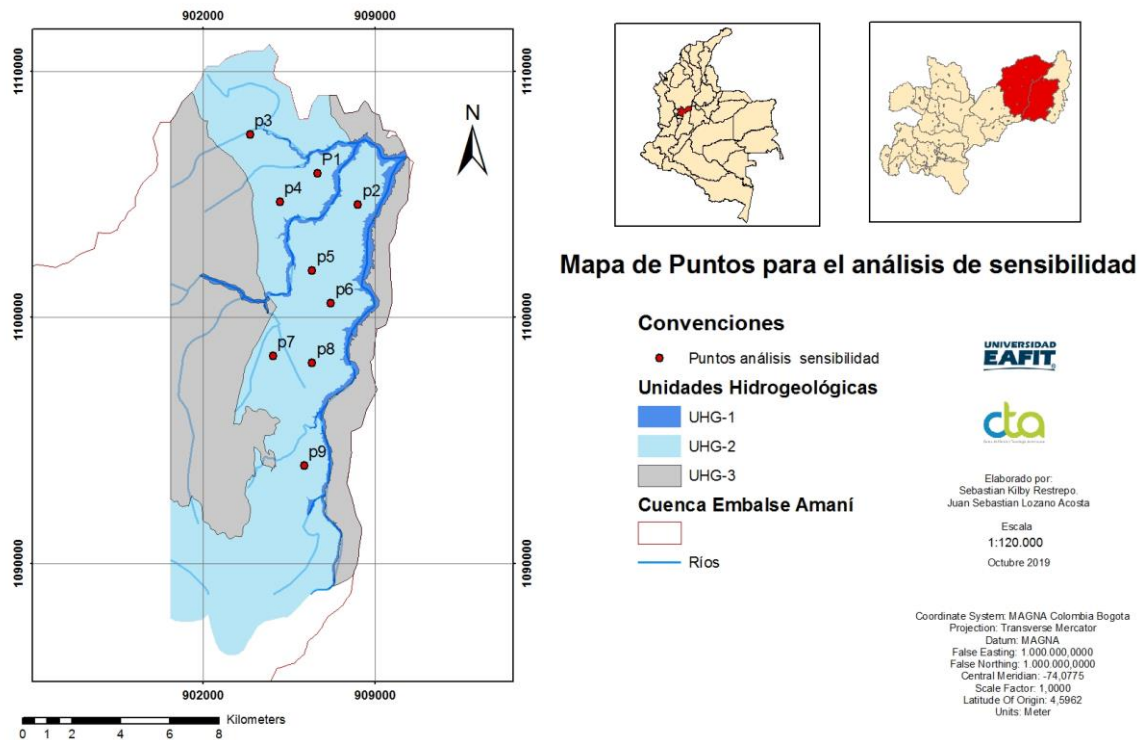


Figura 10. Mapa de Puntos para el análisis de sensibilidad.

Los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad (Figura 10) permiten determinar que:

- Al variar la recarga un 5% las alturas de niveles piezométricos presentan una relación directamente proporcional. Cabe resaltar que cuando se aumentó la recarga el Root Mean Square Residual (RMSR) fue del 11,9% y cuando se disminuyó esta fue del 18,32%.
- Al variar el nivel del embalse un 5% las alturas de niveles piezométricos presentan una relación directamente proporcional. Cabe resaltar que cuando se aumentó el nivel del embalse el RMSR fue del 28,19%% y cuando se disminuyó esta fue del 32,33%.
- Al variar la conductividad hidráulica en la UHG-3 un 5% las alturas de niveles piezométricos presentan una tendencia a la baja. Cabe resaltar que cuando se aumentó el nivel del embalse el RMSR fue del 4,8% y cuando se disminuyó esta fue del 4,18%.

- Al variar la conductividad hidráulica en la UHG-2 un 5% las alturas de niveles piezométricos presentan una tendencia a la baja. Cabe resaltar que cuando se aumentó el nivel del embalse el RMSR fue del 17,1% y cuando se disminuyó esta fue del 12,11%.
- Al variar la conductividad hidráulica en la UHG-1 un 5% las alturas de niveles piezométricos presentan una tendencia a la baja. Cabe resaltar que cuando se aumentó el nivel del embalse el RMSR fue del 4,54% y cuando se disminuyó esta fue del 4.58%.

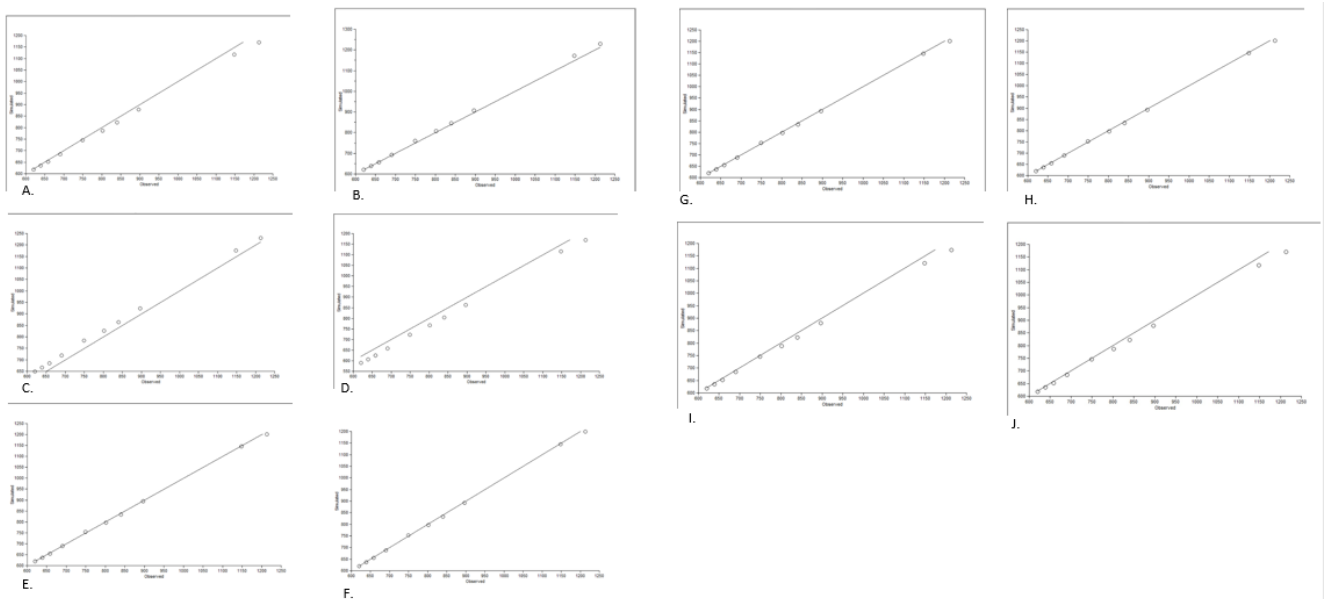


Figura 11. Resultados análisis de sensibilidad. A aumento recarga. B disminución recarga. C aumento nivel Embalse. D disminución nivel Embalse. E aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-3. F disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-3. G aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-2. I disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-2. J aumento en la conductividad hidráulica para la UHG-1. K disminución en la conductividad hidráulica para la UHG-1.

8. Discusión

El presente ejercicio académico quiere entender como es la dinámica de flujo de agua subterránea a través de las diferentes unidades hidrogeológicas que se encuentran cerca al Embalse Amaní. Es por esto que se plantea la actualización de un modelo hidrogeológico conceptual y la primera aproximación de un modelo numérico.

El modelo hidrogeológico conceptual representa la dinámica de flujo de agua subterráneas y el modelo numérico valida y cuantifica los valores de las alturas piezométricas a lo largo de la zona de estudio.

A la hora de realizar estos modelos es de vital importancia estimar variables, tales como, recarga, conductividad hidráulica y geometría de las capas (Sanchez, 2017). La porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento son los principales factores a considerar teniendo en cuenta la ley de Darcy (Betancur y Palacio, 2009).

En el proceso constructivo del modelo conceptual cabe resaltar que a pesar de que se encuentran litologías con alto potencial hidrogeológico, la escala de trabajo hace que estas sean integradas con unidades de bajo potencial.

Para el modelo numérico es necesario representar en cada una de las capas el 100% del área de estudio, de lo contrario las celdas de las áreas no asignadas a una capa tomaran valores que no corresponden al modelo físico. La relación entre la extensión superficial y el espesor total debe ser tomado en cuenta como un factor que influye en la convergencia del modelo. (asesoría presencial, Marcela Jaramillo- Juan Camilo Múnera- Harol Cetre)

El análisis de sensibilidad refleja que el modelo es más susceptible a las fluctuaciones del nivel de embalse, adicionalmente se encontró una relación directamente proporcional que sugiere la existencia de una interacción entra las aguas superficiales y subterráneas que aportan al flujo base del embalse, La recarga al igual que el anterior presenta una relación directamente proporcional que concuerda con lo esperado

inicialmente donde a mayor disponibilidad de agua las alturas piezométricas aumenten, esto se ve influenciado por las propiedades litológicas de la zona. En cuanto a la variación en las conductividades hidráulicas todas presentaron la misma tendencia y no fue posible establecer una correlación entre esta variable y la altura piezométricas, se esperaba que al incrementar la conductividad hidráulica la capacidad del suelo para almacenar agua fuera mayor y tuviera un efecto directo sobre alturas piezométricas.

Los resultados obtenidos en el mapa de isopiezas y líneas de flujo (Figura 9) para el modelo numérico apoyan el MHC propuesto (Figura 8) en donde ambos modelos muestran una dinámica de flujo de aguas subterráneas con tendencia preferencial NE en dirección del Embalse Amaní. Esta tendencia soporta lo planteado por el CTA, 2019 en donde los flujos de aguas subterráneas aportan a la dinámica del flujo base del embalse, no obstante, este aporte no pudo ser cuantificado debido los alcances del presente trabajo en donde se modela únicamente el medio poroso que representa una profundidad máxima de 50 m. Este ejercicio académico sirve como punto de partida para entender y posteriormente construir un modelo conceptual regional y numérico en donde finalmente se pueda cuantificar el aporte que tiene el flujo de aguas subterráneas al Embalse.

9. Conclusiones

- La actualización del MHC y la construcción de modelo numérico permitió establecer que la dinámica de flujo de aguas subterráneas para el Embalse Amani tiene una tendencia NE. Esto sugiere una interacción entre las aguas superficiales y subterráneas que estarían aportando al flujo base del embalse.
- A pesar de que una unidad litológica presente un potencial hidrogeológico bueno, pero no tiene continuidad lateral y además se encuentra limitada por otra litología que presenta bajo potencial hidrogeológico, a escala regional el comportamiento de ambas unidades será el de la unidad con mayor extensión y podrá ser incluidas dentro de la misma unidad hidrogeológica.
- El análisis de sensibilidad realizado en el modelo numérico construido permite inferir que la variable de mayor peso es el nivel del Embalse. Para este modelo se interpreta que por la diferencia entre espesores (540 m) y área de estudio (100 km²) la conductividad hidráulica no juega un papel tan importante como se había planteado al inicio del ejercicio académico.
- Para construir un modelo numérico en el software Modelmuse es necesario representar en cada una de las capas el 100% del área de estudio, de lo contrario las celdas de las áreas no asignadas a una capa tomaran valores que no corresponden al modelo físico, realizando operaciones inadecuadas para asignar valores exponenciales a celdas que no fueron discretizadas.
- Aplicar una recarga homogénea a toda el área de estudio no es el método adecuado ya que no representa correctamente como se distribuye espacialmente esta variable, se recomienda sectorizar esta variable para cada microcuenca de la zona de estudio.
- Al realizar el análisis de sensibilidad se pudo observar que la respuesta del modelo no es proporcional si se aumenta o disminuye una misma variable en el mismo orden de magnitud. Este análisis demostró que el modelo es más susceptible a la disminución de la recarga que a los aumentos en esta.

10. Bibliografía

- Banco Mundial. (25 de 8 de 2019). *Banco Mundial.org*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement>
- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelacion numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). *Dyna, Año 76, Nro 160*, pp 39-49.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA). (2019). *Modelo conceptual de aguas subterráneas en la cuenca del Rio La Miel y su relación con los caudales del Embalse*. Medellín.
- Deere, D., & Patton, F. (1971). *Slope stability in residual soils*. Puerto Rico: En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Pág. 87-170.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M., & Nogueira Pressinotti, M. (2012). Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero, 123 (3)*, pp 294-265.
- IDEAM. (2013). *Aguas Subterráneas en Colombia: Una Visión General*. Bodotá D.C.: ISBN: 978-958-8067-60-5.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM 452.
- INGEOMINAS. (1970). *Memoria explicativa plancha 132 Yolombó- 148 San Carlos- 168 Argelia (Aquitania)- 188 La Dorada- 117 Amalfi escala 1:100.000*. Bogotá D.C. .
- Jaramillo U., M., Veléz U., J. I., & Veléz O., M. V. (2004). Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques.
- Sánchez San Román, F. J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea*. Createspace Independet Pub.
- Sezen, C., Bezak, N., Bai, Y., & Sraj, M. (2019). Hidrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models. *Journal of Hydrology* 576, pp 98-110.

- SGC. (2015). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico.
- Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Berlin: ISBN: 978-90-481-8798-0.
- Unión Temporal Río La Miel. (2016). *Actualización POMCA Rio La Miel TOMO II*. Medellín.
- USGS, & Winston, R. (2009). *ModelMuse- A Graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST*. Virginia: U.S. Geological Survey Techniques and Methods.
- Veléz Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

11. Anexos

Anexo 1

Análisis de sensibilidad (Carpeta Anexos – Archivo Excel).

Anexo 2

Modelo numérico (Carpeta Anexos- Archivo Modelmuse).

Anexo 3

Mapas geológicos, geomorfológicos, de localización, unidades hidrogeológicas, alturas piezométricas, isopiezas y líneas de flujo (Carpeta Anexos – Figuras-JPG)