

MEMORANDO

14 OCT 2015

1.2.

Bogotá, D.C.,

**PARA:** CLAUDIA VICTORIA GONZALEZ HERNANDEZ  
Subdirectora de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales

**DE:** CLAUDIA LORENA LÓPEZ SALAZAR  
Jefe Oficina Asesora Jurídica

**ASUNTO:** Observaciones jurídicas a los términos de referencia para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del Cesar. COR 7406-00-2015. Respuesta al memorando 2015042305-3 del 13 de agosto de 2015.

Cordial saludo,

De conformidad con el asunto y una vez realizado el análisis jurídico del documento denominado, "*Términos de referencia para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y modelos numéricos para la zona de influencia de los proyectos mineros del centro del Cesar*" del año 2015, la Oficina Asesora Jurídica de esta entidad se permite hacer las siguientes consideraciones:

El contenido de documento es eminentemente técnico; Si bien es cierto se hace referencia a la solicitud de realización de un análisis técnico, esta Oficina se pronunciará solamente sobre los aspectos jurídicos que se deben tener en cuenta, de conformidad con el marco legal vigente.

Desde el punto de vista jurídico, la justificación y alcance hacen referencia al marco normativo aplicable a los términos en estudio, el cual se centra en lo previsto en el artículo 2.2.2.3.9.1 del Decreto 1076 que prevé lo siguiente:

**Control y seguimiento.** Los proyectos, obras o actividades sujetos a licencia ambiental o plan de manejo ambiental, serán objeto de control y seguimiento por parte de las autoridades ambientales, con el propósito de:

(...)

4. *Revisar los impactos acumulativos generados por los proyectos, obras o actividades sujetos a licencia ambiental y localizados en una misma área de acuerdo con los estudios que para el efecto exija a sus titulares e imponer a cada uno de los proyectos las restricciones ambientales que considere pertinentes con el fin de disminuir el impacto ambiental del área.* (Subrayado fuera del texto original)

De la transcripción del numeral del artículo citado en la justificación del documento objeto de análisis, se tiene que no se transcribió el **contenido integral** del numeral en comento. En ese sentido y atendiendo a la redacción completa del párrafo del numeral 4° del artículo en mención, es necesario tener en cuenta el aparte que hace referencia a la imposición individual de restricciones ambientales que se consideren con el objeto de disminuir el impacto ambiental del área y no de manera conjunta, como sería el caso de la expedición de unos términos de referencia que hacen mención a un área geográfica en especial.

De lo anterior se tienen dos consideraciones a saber:

1. La justificación jurídica del documento *"Términos de referencia para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y modelos numéricos para la zona de influencia de los proyectos mineros del centro del Cesar"* fundamentada en el artículo 2.2.2.3.9.1. del Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015, sobre control y seguimiento en los proyectos obras o actividades sujetas a licencia o plan de manejo ambiental, resulta insuficiente en la medida que no se tuvo en cuenta el contenido íntegro del numeral. En ese orden de ideas, desde el punto de vista jurídico resulta conveniente ajustar la justificación normativa que propenda por la validez del documento, incluyendo el texto completo del numeral 4 del artículo *sub-examine*, procurando tomar las medidas necesarias de disminución de impactos frente a cada uno de los usuarios que tienen un instrumento de manejo y control ambiental dentro del departamento del Cesar en la cual se pretende adelantar la implementación del MHC.
2. Teniendo en cuenta el título del documento que hace mención a los términos de referencia, la justificación, debería estar de acuerdo a lo previsto en artículo 2.2.2.3.3.2 del Decreto 1076 de 2015, sobre términos de referencia en donde se establece la generalidad que debe tener este documento para la elaboración y ejecución de estudios ambientales, los cuales deben ser presentados ante la autoridad ambiental competente. Más si se tiene en cuenta que la denominación del documento es "términos de referencia" y en ese sentido

su justificación debería estar basada en el artículo antes enunciado. No obstante lo anterior, debe tenerse en cuenta que la definición de términos de referencia hace alusión a lineamientos generales y bajo ese punto de vista, al regular una situación sobre una determinada área y no ser generales, se debe analizar la posibilidad de buscar otra denominación al documento que no sea términos de referencia con el objeto de que no vaya a adolecer de vicios posteriores al momento de su adopción.

Teniendo en cuenta lo previsto en las anteriores consideraciones, desde el punto de vista jurídico se considera conveniente ajustar la justificación con fundamento en el artículo 2.2.2.3.9.1, sobre **estudios ambientales**, en el entendido de citar la norma de manera integral, y justificar el contenido del documento, sobre la necesidad de la Autoridad Ambiental de revisar los impactos acumulativos y además de tomar las medidas o lo correctivos pertinentes frente a cada titular de un proyecto, obra o actividad.. Partiendo de ese supuesto en el segundo escenario, sobre la justificación de conformidad con artículo 2.2.2.3.3.2., sobre los **términos de referencia**, se debe tener en cuenta que éstos son lineamientos generales y bajo esa óptica, el documento objeto de análisis está enfocado a establecer un modelo hidrogeológico conceptual en un área específica del Cesar. Así las cosas puede existir un vicio por cuanto el documento denominado "términos de referencia" y que es objeto de estudio, no tiene como característica principal la generalidad.

En razón de ello se considera pertinente evaluar otros mecanismos para la expedición del documento con el objeto de adecuarlo a las normas jurídicas vigentes y que no esté propenso de adolecer vicios de procedimiento en el momento de su publicación.

Una de las alternativas que jurídicamente se considera viable para la adopción del procedimiento contenido en el documento para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y el modelo numérico para la zona de influencia de los proyectos mineros del centro del Cesar, es la expedición de un acto administrativo de orden particular, por cada uno de los usuarios del área de influencia del centro del Cesar mediante el cual se impongan las condiciones para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual, que serán objeto de seguimiento por parte de la autoridad en pronunciamientos posteriores. De esta manera se garantiza que por cada proyecto, haya un pronunciamiento de la Autoridad tendiente a dar cumplimiento a lo previsto en el artículo 2.2.2.3.9.1 sobre la revisión de impactos acumulativos en una misma área y la imposición las restricciones ambientales necesarias a que hubiese lugar, para disminuir el impacto ambiental y se garantiza la legalidad de la implementación del MHC.

No obstante lo anterior, para cumplir con la finalidad requerida por esta autoridad mediante el documento denominado "términos de referencia para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual en el centro del Cesar", la Oficina Asesora Jurídica está en disposición de reunirse con la Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales al igual que con la Subdirección de Seguimiento y Control de esta entidad, con el objeto de definir conjuntamente la manera a través de la cual se pueda implementar el contenido del Modelo en el área prevista.

Quedamos atentos a cualquier observación e inquietud que tenga sobre el particular.

Cordialmente,

  
**CLAUDIA LORENA LÓPEZ SALAZAR**  
Jefe Oficina Asesora Jurídica

Elaboró: JAGP  
Fecha: 19/09/2015

Adjunto: Documento Términos de referencia en treinta (30) folios.



**MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE**  
**AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES**

**TERMINOS DE REFERENCIA**  
**PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL**  
**Y MODELO NUMÉRICO PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DE LOS PROYECTOS**  
**MINEROS DEL CENTRO DEL CESAR**

Comentario [JG1]: Los términos de referencia son lineamientos generales. Por intermedio de este documento se busca establecer reglas generales para una determinada área geográfica. El contenido del documento no es acorde con la generalidad de los términos de referencia previstos en la ley.

**BOGOTÁ D.C.**  
**2015**

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE .....                                            | 4  |
| MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....                                    | 8  |
| 1. ÁREA DE ESTUDIO Y BASE DE DATOS .....                                 | 11 |
| 1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                                | 11 |
| 1.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE .....                              | 11 |
| 1.3 BASE DE DATOS .....                                                  | 13 |
| 2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....                | 14 |
| 2.1 COMPONENTE GEOLÓGICO/ GEOFÍSICO .....                                | 14 |
| 2.2 COMPONENTE HIDROLÓGICO.....                                          | 16 |
| 2.3 COMPONENTE HIDRÁULICO .....                                          | 17 |
| 2.4 COMPONENTE HIDROQUÍMICO .....                                        | 18 |
| 3. RESULTADOS DEL MHC .....                                              | 18 |
| 4. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO REGIONAL DE AGUAS<br>SUBTERRÁNEAS ..... | 20 |
| 5. ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN .....                                    | 21 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                        | 22 |
| ANEXO I.....                                                             | 24 |





## LISTA DE ACRÓNIMOS

**ANLA:** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

**MADS:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**MCH:** Modelo Hidrogeológico Conceptual

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

## JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

El Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC, se constituye en el soporte de la gestión y el análisis de los datos e información sobre el estado y uso de los recursos naturales, como en la herramienta óptima para la toma de decisiones referentes a las prioridades ambientales y de desarrollo económico a nivel nacional y regional. De conformidad con lo anterior, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, en el marco del control y seguimiento a los proyectos, obras y actividades sujetos a licencia ambiental y con el fin de contribuir al suministro de información regional al SIAC, ha identificado la necesidad de realizar análisis integrales y comparables del estado y tendencias de los recursos naturales a nivel regional orientados a la identificación de impactos acumulativos.

Dicho propósito se enmarca en lo establecido en el artículo 2.2.2.3.9.1 del decreto 1076 de 2015<sup>1</sup>, por el cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, donde se establece que es deber de la autoridad ambiental, “Revisar los impactos acumulativos generados por los proyectos, obras o actividades sujetos a licencia ambiental y localizados en una misma área de acuerdo con los estudios que para el efecto exija de sus titulares”.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta diferentes estudios hidrogeológicos independientes<sup>2</sup> como los realizados por las empresas mineras presentes en el centro del Cesar<sup>3</sup>, en los que se concluye de manera generalizada que la actividad minera afecta y afectará en alguna medida la dinámica de las aguas subterráneas, se considera necesario y pertinente analizar estos impactos desde una óptica regional, y no por proyecto como se hace actualmente, de manera que se involucre en el análisis de la calidad ambiental del recurso, el efecto acumulativo que tienen todos los proyectos del sector, así como los demás usuarios del recurso hídrico subterráneo de la región. De manera general los impactos asociados a la actividad minera que se identifican en dichos estudios están relacionados con la alteración de los niveles piezométricos, cambios en las direcciones de flujo de las aguas subterráneas y pérdidas de caudal de algunas fuentes de agua superficial.

**Comentario (JG2):** La facultad no está dada para expedir términos de referencia. En ese sentido, el documento no podría denominarse con la palabra términos, pues se corre el riesgo de crear un vicio de procedimiento en su expedición de conformidad con lo previsto en el artículo 2.2.2.3.3.2 del Decreto 1076 sobre términos de referencia.

Se transcribe una parcialidad del artículo y de su totalidad. Bajo ese entendido el fundamento carece de validez por cuanto no se tuvo en cuenta la integralidad del documento.

<sup>1</sup> Que incluye lo establecido en el Decreto 2041 de 2014, decreto por el cual por medio del cual se reglamenta el Título VII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.

<sup>2</sup> (CORPOCESAR - Universidad del Magdalena, 2010); (IDEAM - CORPOCESAR, 2006); (IDEAM - CORPOCESAR, 2009).

<sup>3</sup> (C.I. Norcarbón S.A.; SGI Ltda; K2 Ingeniería, 2011); (C.I. PRODECO - Antea Group, 2014); (Drummond Ltd - Hidrogeocol S.A., 2013); (Hidrogeocol Ltda. - C.I. Colombian Natural Resources. I.S.A.S., 2011); (Hidrogeocol Ltda. - Vale Coal Colombia LTD., 2013); (K2 Ingeniería, SGI Ltda, C.I. Norcarbón S.A., 2011); (SGI Ltda. - C.I. Prodeco S.A., 2008).



**(6) MINAMBIENTE**

Para efectuar un análisis como el mencionado anteriormente, es necesario partir de la comprensión del sistema hidrogeológico de la región para poder así evaluar los impactos que en el suceden. Se hace necesario entonces la construcción de un Modelo Hidrogeológico Conceptual (en adelante MHC) de la región que incluya la definición de un modelo geológico/geofísico, un modelo hidrológico, un modelo hidráulico y un modelo hidrogeoquímico.

En ese sentido, para la región central del Cesar se requiere de una revisión minuciosa de la información disponible para validar datos y para unificar conceptos, sobre todo para la definición de las unidades geológicas e hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas.

Los MHC que han entregado las empresas en cumplimiento a sus obligaciones de licencia ambiental presentan algunas diferencias conceptuales que no permiten articular de manera inmediata dichos modelos. Estas diferencias obedecen por un lado, al hecho que en las obligaciones impuestas a las empresas se han definido alcances diferentes para los estudios hidrogeológicos y por otro lado, a que no se ha contado con un instrumento metodológico que permita a los usuarios ceñirse a un procedimiento específico para este tipo de estudios.

Por otro lado, así como se presentan diferencias conceptuales en los MHC, se presentan diferencias en los modelos numéricos de flujo de agua subterránea, lo que supone incertidumbres frente a las simulaciones efectuadas.

Con lo anterior se justifica la necesidad de construir un solo MHC de la región que permita no solo entender la dinámica de las aguas subterráneas en la zona, sino además diseñar la red de monitoreo de aguas subterráneas y construir el modelo numérico para simular el flujo de aguas subterráneas con el menor nivel de incertidumbre posible.

De ese modo, el presente documento establece los Términos de Referencia para la construcción del MHC de la región central del departamento del Cesar a partir de información secundaria disponible y de información primaria que sea relevante levantar en campo. Una vez definido el MHC se debe proponer una red de monitoreo de aguas subterráneas cuyo principal objetivo es el seguimiento de los niveles piezométricos y de la calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de importancia en la región. Adicionalmente, en el Anexo 1 se presentan los Términos de Referencia para la construcción del Modelo Numérico que permita simular los flujos de las aguas subterráneas para diferentes escenarios de tiempo y de intervención, y el cual será definido a partir del MHC.

Estos Términos de Referencia serán aplicados por las empresas que actualmente realizan explotación de carbón en el centro del Cesar y cuya actividad es objeto de



evaluación o seguimiento ambiental por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe efectuar un solo MHC de la región y un solo modelo numérico, de cuya construcción y análisis participarán conjuntamente todas las empresas mineras mencionadas.

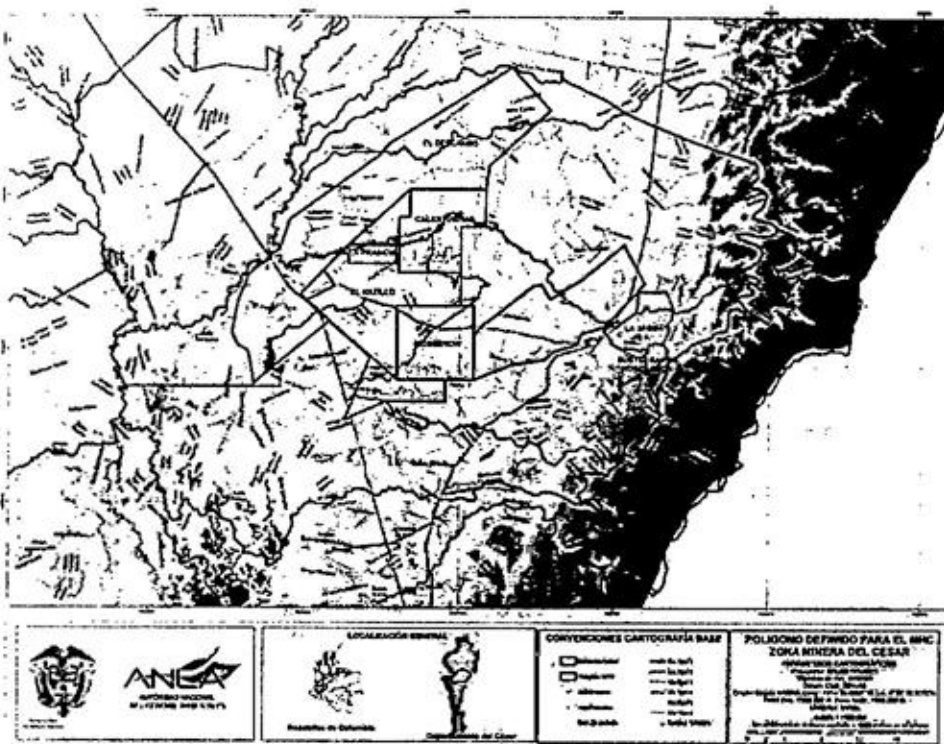
El área de estudio sobre el cual se desarrollará el MHC corresponde al polígono definido por los siguientes límites y que se presenta a manera de referencia en la Figura 1 Figura 4:

Límite norte: parte de la intersección del caño Maracas con la cota 600 en la serranía del Perijá, siguiendo una línea recta en dirección nor-oeste hasta el nacimiento del caño Las Tres Vueltas, sigue el cauce del caño las Tres Vueltas hasta la intersección con el caño las Blancas; desde este punto sigue el cauce hasta la desembocadura en el Caño Pérez y de este hasta su desembocadura en el río Sicarare. Sigue el cauce del río Sicarare hasta su desembocadura en el río Cesar.

Límite Oriental: parte desde la intersección de la cota 600 en la serranía del Perijá con el caño Maracas; desde este punto seguir en dirección sur la cota 600 hasta su intersección con la quebrada la Mochila.

Límite Sur: parte de la intersección de la cota 600 con la quebrada Mochila, sigue el curso de la quebrada Mochila en dirección oeste incluyendo los tramos denominados quebrada Similoa, arroyo Jobito y caño Platanal hasta la desembocadura de este último en el Río Cesar.

Límite Occidental: parte desde la desembocadura del caño Platanal en el río Cesar, siguiendo el cauce de este último aguas arriba hasta su encuentro con el río Sicarare.



**Figura 1. Polígono para la construcción del MHC**

Es de aclarar que el polígono presentado corresponde a una aproximación del área de influencia del sector minero y no todos sus límites están definidos por fronteras hidráulicas o hidrogeológicas. Precisamente la construcción del MHC permitirá identificar con mayor precisión esos límites o fronteras que deben ser tenidas en cuenta para la construcción del modelo numérico.

Para la construcción de estos Términos de Referencia se tuvieron en cuenta aspectos conceptuales y metodológicos de las siguientes referencias nacionales:

- Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (MADS, 2014).
- Marco conceptual y metodológico para las Evaluaciones Regionales del Agua (IDEAM, 2011).

 **MINAMBIENTE**

- Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua (IDEAM, 2013).
- Aguas subterráneas en Colombia, una visión general (IDEAM, 2013a).

Adicionalmente se consultaron referencias internacionales que establecen lineamientos específicos para la construcción de MHC y de modelos numéricos de flujo de aguas subterráneas:

- Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (Servicio de Evaluación Ambiental de Chile, 2012).
- ASTM D5979 Guide for Conceptualization and Characterization of Groundwater Systems (ASTM, 2008).
- ASTM D5447 Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Site-Specific Problem (ASTM, 2010).
- ASTM D5718 Guide for Documenting a Ground-Water Flow Model Application. (ASTM, 2013).

## CONSIDERACIONES GENERALES

El MHC y el modelo numérico deben realizarse con información de alto nivel científico y técnico y acorde con las metodologías definidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (en adelante MADS), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y por lo establecido en los presentes términos de referencia.

Adicionalmente:

- La información cartográfica debe estar acorde con lo establecido en la Resolución 1415 de 2012 expedida por el MADS, o aquella que la modifique, sustituya o derogue.
- En el momento en que la autoridad competente proponga y adopte diferentes metodologías, protocolos y lineamientos que se establezcan para la elaboración de Estudios Ambientales, el usuario debe acogerlos e implementarlos de acuerdo al régimen de transición establecido en cada uno de ellos.

## MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El MHC es "...una representación descriptiva y gráfica de un sistema acuífero que incorpora una interpretación de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y su

interrelación con sistemas asociados (ríos, lagos, ecosistemas, mar), de tal manera que se reducen el problema físico y el dominio del acuífero a una versión simplificada de la realidad. Un modelo hidrogeológico conceptual es dinámico ya que se construye a partir de variables temporales como las climatológicas, hidrológicas e hidráulicas y por lo tanto a medida que se disponga de información nueva o se reevalúe la existente, éste deberá ser ajustado\* (MADS, 2014).

El MHC integra la evaluación geológica-geofísica, la evaluación hidrológica, evaluación hidrogeoquímica y evaluación hidráulica e hidrodinámica. En términos generales se construye a partir de los dominios, parámetros y variables que se presentan en la Figura 2

Con formato: Fuente: 12 pto

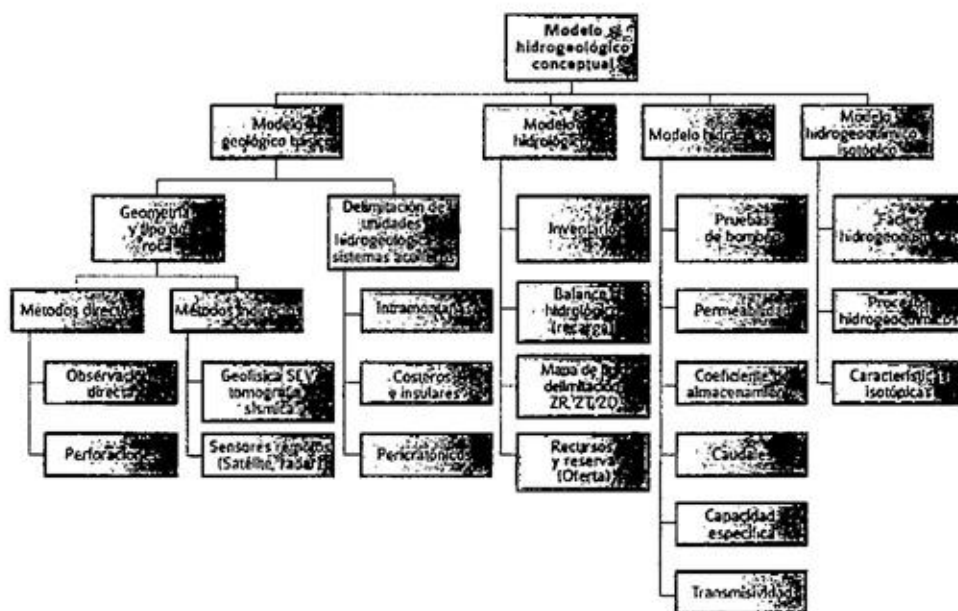


Figura 2. Modelo Hidrogeológico Conceptual (IDEAM, 2013)

Teniendo en cuenta que actualmente se cuenta con información primaria levantada por los proyectos mineros y por CORPOCESAR para los diferentes componentes del MHC, su construcción debe partir de una revisión de la información disponible que involucre la validación de la misma, es decir, se debe desechar aquella información que no sea útil o de la que se desconozca su confiabilidad técnica.



Los presentes términos de referencia desarrollan cada uno de los componentes del MHC para ser abordados en el estudio. Toda la información de campo, datos brutos y procesados, informes y demás información pertinente se debe anexar al informe final. El documento del MHC debe contener como mínimo la información detallada a continuación.



## 1. ÁREA DE ESTUDIO Y BASE DE DATOS

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para el polígono definido previamente, se debe presentar de manera esquemática la localización geográfica y político-administrativa (departamental, municipal y corregimental), que permita dimensionar y ubicar todos los proyectos mineros del centro del Cesar en el entorno geográfico, en un mapa georreferenciado en coordenadas planas (*datum magna sirgas*) a escala 1:25.000 o más detallada, que permita la adecuada lectura de la información, cumpliendo con los estándares de cartografía base del IGAC, así como con los catálogos de objetos.

El mapa de localización debe incluir, además del área intervenida y a intervenir por los proyectos mineros licenciados, los siguientes aspectos de información básica:

- Curvas de nivel.
- Hidrografía.
- Accidentes geográficos.
- Asentamientos humanos.
- Equipamientos colectivos.

En la medida en que sea posible se deben identificar otros proyectos, obras o actividades que tengan uso actual o potencial del recurso hidrogeológico.

### 1.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Se debe recolectar y analizar la información de los diferentes estudios hidrogeológicos disponibles, mapas, tablas, reportes y estudios de campo y de laboratorio. Se deben revisar los métodos de levantamiento de información y de aseguramiento de la calidad para seleccionar la información confiable de utilidad para los propósitos del estudio. La información que se levante en este paso se debe organizar para incluirla en la base de datos geográfica (GDB) de la ANLA. La información a identificar de fuentes secundarias o de estudios previos puede ser la siguiente:

Topografía y sensores remotos:

- (a) Topografía disponible
- (b) Fotografías aéreas
- (c) Imágenes satelitales
- (d) Modelos digitales de elevación del terreno
- (e) Otros

Geomorfología:

- (a) Mapas de geología o geomorfología de superficie

 **MINAMBIENTE**

- (b) Otra cartografía geológica temática pertinente
- (c) Mapas de cuencas y cuerpos de agua superficial
- Geología:
  - (a) Mapas y perfiles geológicos
  - (b) Litología, registros de pozos, columnas estratigráficas.
- Geofísica:
  - (a) Datos de estudios geoelectrónicos, sísmicos u otra técnica geofísica y su interpretación en columnas y perfiles.
  - (b) Registros geofísicos de pozos
- Clima:
  - (a) Datos de precipitación, temperatura, humedad, vientos y evaporación
- Vegetación:
  - (a) Mapas de coberturas de la tierra
  - (b) Análisis de densidad de coberturas especiales
  - (b) Mapa de uso del suelo
  - (c) Información de agricultura local: especies, calendarios de cosecha, usos consuntivos.
- Suelos:
  - (a) Propiedades físicas de los suelos (textura, estructura, densidad aparente, densidad real, porosidad, infiltración, capacidad de campo), propiedades químicas de los suelos (Ca, Mg, Na, K, CIC, RAS, pH)
  - (b) Mapa de suelos
- Hidrología:
  - (a) Inventario de puntos de agua subterránea que contemple la siguiente información: identificación (ver sección 1.4), georeferenciación, nivelación, tipo de punto, niveles estáticos y dinámicos, medidos históricamente, profundidad, unidad hidrogeológica captada, caudal y régimen de explotación, tipo de uso.
  - (b) Datos de cabezas hidráulicas
  - (c) Pruebas hidráulicas en pozos
  - (d) Propiedades hidráulicas determinadas en laboratorio
  - (e) Modelaciones previas, mapas hidrogeológicos
- Hidrogeoquímica:
  - (a) Resultados monitoreos aguas subterráneas
  - (b) Resultados monitoreos aguas superficiales
  - (c) Composición de rocas y suelos
- Aspectos antropogénicos:
  - (a) Mapas temáticos disponibles
  - (b) Mapas de uso del suelo y de coberturas
  - (c) Mapas de vías y límites políticos

**(19) MINAMBIENTE**

**1.3 BASE DE DATOS**

Para la administración de la información se empleará el modelo de almacenamiento de datos geográficos de la ANLA la cual contempla los campos hidrogeológicos respectivos que deben ser registrados en su totalidad.

Para los puntos de agua subterránea se debe tener en cuenta la identificación alfanumérica que se propone a continuación:

Identificador punto de agua subterránea: AAB001-CCC

Las dos primeras letras corresponden al identificador del tipo de punto: AJ corresponde a aljibes, MT a manantiales, PC a pozos profundos (sean de captación para consumo o de despresurización) y PZ a piezómetros.

Las dos siguientes letras corresponden a la unidad geológica captada por el punto de agua, se tienen las siguientes opciones preliminares: Llanura aluvial, QA; Aluviones recientes, QR; Abanicos aluviales, QV; Terrazas, QT; Depósitos Fluviolacustres, QF; Formación Cuesta, CT; Formación La Luna, LL y Formación Los Cuervos, CV.

Los tres números que siguen corresponden al consecutivo que se otorgue a cada punto. Este consecutivo debe iniciar en 001 y será independiente por cada tipo de punto de agua subterránea, es decir, el consecutivo usado para manantiales es diferente para aljibes, pozos y piezómetros y así para cada uno. A manera de ejemplo se presentan los siguientes identificadores:

|             |             |
|-------------|-------------|
| Aljibe:     | AJQA001     |
| Manantial:  | MTQT001     |
| Pozo :      | PCCT001-LFR |
| Piezómetro: | PZCV001-LFR |

Las tres letras que se colocan al final de los piezómetros corresponden a un identificador del proyecto minero al que corresponden: Calenturitas, CLT; La Francia, LFR; El Hatillo, EHT; El Descanso, EDS; Rincon Hondo, RHD; La Divisa, LDS; La Jagua, PLJ. Este mismo criterio se aplicará para los pozos de despresurización y pozos de captación pertenecientes a las empresas mineras (no debe ser empleado para los pozos de captación de terceros).

Los documentos, informes y demás soportes que no se puedan cargar a la GDB de la ANLA, se deben mantener disponibles dentro de la información anexa del proyecto.

## 2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

### 2.1 COMPONENTE GEOLÓGICO/ GEOFÍSICO

#### Geología

En esta evaluación se parte de la revisión y análisis de la cartografía geológica existente (a escala regional); así como de la interpretación de información indirecta como fotografías aéreas, imágenes satelitales o de radar, entre otros, y de información de campo disponible como la caracterización litológica, mineralógica, estratigráfica, estructural, y la definición de la porosidad primaria o secundaria de cada una de las unidades identificadas.

De este análisis se debe plantear la unificación de unidades geológicas y se debe generar la cartografía geológica de superficie del área de estudio, cuya escala debe tener el mayor nivel de detalle posible, de conformidad con el alcance de la información disponible y con los lineamientos del Servicio Geológico Colombiano.

Los depósitos de material de excavación minera (botaderos) deben ser identificados y analizados y deben ser tenidos en cuenta para la construcción del MHC como un depósito antropogénico con características hidrogeológicas particulares.

#### Geofísica

A través de la aplicación de métodos geofísicos puede obtenerse información del subsuelo, la cual ayuda a identificar estructuras, fallas, estratificaciones, unidades hidrogeológicas, profundidad del basamento, condiciones de salinidad del agua, etc. Esta información al ser evaluada en conjunto con la cartografía geológica de superficie, la posición de los niveles freáticos y columnas estratigráficas de pozos, permite establecer un modelo geológico - geofísico (profundidad, espesor, continuidad lateral de unidades de interés hidrogeológico), información base para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.

Para este análisis se deben analizar y reprocesar todos los datos de campo disponibles en los diferentes estudios hidrogeológicos y geofísicos que incluyan Sondeos Eléctricos Verticales, Sísmica u otro método geofísico que haya sido efectuado en el área de estudio.

El componente geológico/geofísico debe definir la geometría de las unidades geológicas, espesor total y saturado, continuidad y extensión lateral, identificar las discontinuidades geomorfológicas y estructurales (fallas, zonas fracturadas, karst), identificar depósitos secos - saturados, propiedades de las formaciones (arenas -

 **MINAMBIENTE**

arcillas), porosidad y estructura del subsuelo. Se debe presentar el modelo geológico tridimensional describiendo la geometría de las unidades geológicas y sus perfiles.

Las unidades geológicas deben clasificarse a partir de sus atributos geológicos, hidráulicos, hidrológicos e hidroquímicos (secciones 2.2 – 2.4) y podrán ser combinadas en unidades o capas de características relativamente uniformes como acuíferos o capas confinantes, isotrópicas o anisotrópicas, homogéneas o heterogéneas, confinadas o libres. Como resultado, se definirán las unidades hidrogeológicas del área de estudio.

Del mismo modo se debe clasificar el medio fracturado en virtud de su respuesta hidráulica: acuíferos o unidades confinantes (barreras). Para efectos de los presentes términos de referencia, por acuífero en medio fracturado se entenderá aquel en el que el flujo de agua subterránea se da primordialmente a través de fracturas que no hayan sido ocasionadas o estimuladas por disolución de la roca. Por fractura se entenderá de manera indistinta cualquier fisura en la roca que cause o no desplazamiento por estrés mecánico e incluye fallas, diaclasas y contactos. Para la caracterización de los acuíferos en medio fracturado se pueden emplear tres aproximaciones cuya elección debe ser justificada: modelos continuos, discretos y de doble porosidad.

**Modelos Continuos:** estos modelos asumen que el acuífero en medio fracturado se aproxima a un medio poroso en cierta escala de trabajo. En esta aproximación las propiedades de las fracturas individuales no son relevantes frente a las propiedades regionales o de grandes volúmenes de material acuífero. Lo anterior implica que las ecuaciones que gobiernan el flujo en medio poroso se mantienen, dada la escala del problema y que en esa escala las propiedades de las fracturas individuales dejan de ser importantes. Se debe tener en cuenta que este modelo no se puede aplicar en aquellos medios donde el flujo se da por fracturas discretas muy espaciadas.

**Modelos Discretos:** estos modelos asumen que la mayor parte del agua subterránea fluye a través de fracturas discretas y que las propiedades hidráulicas de la matriz son despreciables, es decir aplica en condiciones donde se presenta un contraste fuerte entre las conductividades hidráulicas de la matriz y la de las fracturas. En este modelo se requiere de la medición de las características hidráulicas de fracturas para caracterizar el flujo de agua subterránea.

**Modelos de doble porosidad:** como su nombre lo indica esta aproximación es una combinación de las dos anteriores y para ello caracteriza el flujo de agua subterránea tanto en la matriz como en las fracturas. Este modelo es útil en aquellos casos donde la matriz es relativamente permeable y a la vez se presentan zonas discretas de mayor conductividad.



El documento debe reconocer las limitaciones de la información geológica/geofísica disponible y debe evaluarse la calidad de la misma. En caso de prescindir de datos disponibles por inconsistencia o incertidumbre, debe ser aclarado.

## 2.2 COMPONENTE HIDROLÓGICO

**Balance hídrico.** Para el análisis hidrológico debe recolectarse información de registros históricos de las variables hidroclimáticas (precipitación, temperatura, evaporación, humedad, caudal, etc.). A partir de estas variables debe determinarse la recarga de los acuíferos empleando un balance hídrico.

**Clasificación cuerpos de agua superficial.** Se deben clasificar los cuerpos de agua superficial en virtud de su conexión hidráulica con los acuíferos entre aquellos que aportan a la recarga de los acuíferos y los que son alimentados por los acuíferos (flujo base). Se deben presentar y analizar las mediciones existentes de la conductancia (equivalente de la conductividad hidráulica en el lecho de los cuerpos de agua). Debe plantearse un programa de medición de la conductancia para aquellos cuerpos de agua superficial que no cuenten con información y que sean relevantes para el estudio, y para completar la clasificación de los mismos bajo el criterio de conexión hidráulica con los acuíferos.

**Inventario de puntos de agua subterránea.** Se debe validar el inventario de puntos de agua subterránea existente. Para cada punto se debe identificar: georeferenciación, profundidad, nivel estático, unidad hidrogeológica captada, caudal de extracción, usos del agua, pH, conductividad eléctrica, temperatura y estado (en uso, inactivo, desmantelado). En caso de desconocer la unidad hidrogeológica captada se debe plantear un programa que permita esa identificación en un número representativo de puntos (que representen al menos el 80% de la captación de aguas subterráneas de la zona). Para todos los piezómetros o pozos de observación se debe determinar dicha información.

**Sistemas de flujo subterráneo.** A partir de la información piezométrica se deben construir los mapas piezométricos para cada unidad hidrogeológica, se deben clasificar en sistemas de flujo locales, intermedios y regionales, y se deben identificar las respectivas zonas de recarga, tránsito y descarga. Se debe tener en cuenta que para la construcción de los mapas piezométricos se debe garantizar que los niveles hayan sido medidos en puntos que cumplan las siguientes condiciones:

- Que se conozca el acuífero captado (ubicación de filtros, profundidad total).
- Que cuenten con nivelación topográfica a cabeza de pozo, o a nivel del terreno que permita determinar la cota del agua subterránea (cota del terreno menos la profundidad del nivel freático).



- Que los pozos tengan una distribución espacial apropiada para poder correlacionar la información y construir líneas piezométricas.
- Que se cuente con condiciones técnicas en campo para la toma de niveles.
- Que sea posible obtener niveles estáticos (sin bombeo y sin interferencia de pozos cercanos en aprovechamiento).

### 2.3 COMPONENTE HIDRÁULICO

Se debe revisar y evaluar la información de campo (datos no procesados) de pruebas de bombeo y Slug test que se hayan efectuado en el área de estudio. Se debe seleccionar aquella información de pruebas de bombeo de larga duración (preferiblemente mayores a 12 horas), que en lo posible cuenten con prueba de recuperación y de las que se conozca el diseño del pozo bombeado (profundidad, posición de los filtros, unidad captada). Las pruebas de bombeo cortas o de las que se desconozca la unidad hidrogeológica captada y profundidad deben ser omitidas del análisis. Igualmente deben omitirse pruebas efectuadas en pozos que capten simultáneamente de dos o más unidades hidrogeológicas.

Los datos así seleccionados deben ser reprocesados e interpretados por un profesional idóneo para obtener valores representativos de la conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y la capacidad específica para cada unidad hidrogeológica.

A partir de esos resultados se deben efectuar mapas de las propiedades hidráulicas para cada unidad hidrogeológica y se debe analizar su isotropía/anisotropía y homogeneidad/heterogeneidad.

Se deben clasificar las unidades hidrogeológicas con respecto a su respuesta hidrológica, es decir, establecer si constituyen acuíferos o unidades confinantes a partir de su conductividad hidráulica, espesor saturado y continuidad. Se clasificarán los acuíferos en libres, confinados o semiconfinados a partir de su coeficiente de almacenamiento.

El documento debe identificar necesidades de información de parámetros hidráulicos en el área de estudio y se debe proponer un programa de pruebas de bombeo que dé respuesta a dichas necesidades. El programa podrá ser implementado con posterioridad a la radicación del MHC para lo cual se tendrá un plazo de un año para su ejecución. El MHC debe ser actualizado cuando se cuente con los resultados respectivos.

## 2.4 COMPONENTE HIDROQUÍMICO

Las características químicas del agua subterránea están condicionadas o controladas por la litología y mineralogía de los sedimentos y rocas por las que circula. Esta interacción imprime una "marca" o "huella" al agua subterránea, que permite validar un sistema preliminar de flujo y determinar zonas de recarga, a través de análisis de iones principales y trazas, y de los llamados trazadores físicos como la temperatura, el pH y la conductividad.

Para determinar las características hidroquímicas de cada unidad hidrogeológica del área de estudio se debe efectuar inicialmente una revisión de los datos de monitoreos existentes. Se deben seleccionar las muestras que cumplan un porcentaje de error analítico (o error de electroneutralidad) igual o inferior al 10% a partir del balance iónico y que hayan sido tomadas por laboratorios debidamente acreditados por el IDEAM.

Los resultados deben presentarse empleando diagramas Piper y Stiff que permitan clasificar el tipo de agua subterránea y se deben analizar los cambios que presenta el agua subterránea en su tránsito por los sistemas de flujo.

Igualmente se deben construir mapas de isoconcentraciones de iones, pH y conductividad eléctrica para cada unidad hidrogeológica. Se debe analizar esta información frente a los sistemas de flujo identificados en la sección 2.2.

Adicionalmente se deben analizar las fuentes naturales y antropogénicas de sustancias químicas al sistema acuífero desde la atmósfera, vegetación, fuentes de agua superficial, desde los materiales rocosos, desde los botaderos de material de excavación y desde el suelo.

## 3. RESULTADOS DEL MHC

Se debe presentar para cada unidad hidrogeológica, de manera tabulada y resumida, los atributos numéricos o descriptivos de espesor total y saturado, porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad específica, continuidad lateral, isotropía/anisotropía, homogeneidad/heterogeneidad, litología y clasificación en acuíferos libres, semiconfinados, confinados o unidades confinantes.

Asimismo se debe presentar la clasificación de los rasgos estructurales, particularmente el medio fracturado, en acuíferos o unidades confinantes (barreras). En caso de conocerse características particulares como rumbo y buzamiento, densidad de fracturas y porosidad del medio fracturado se deben relacionar estos atributos.

 **MINAMBIENTE**

Se deben presentar los atributos numéricos o descriptivos representativos del área de estudio, de los cuerpos de agua superficial que incluyan caudales, lámina de agua promedio, ancho, conductancia y clasificación de acuerdo a su conexión hidráulica con las aguas subterráneas entre aquellos que aportan a la recarga de los acuíferos y los que son alimentados por los acuíferos.

Se deben describir de manera resumida las áreas de recarga y determinar el tipo, cantidad y distribución de la recarga superficial y subsuperficial. Se debe presentar la recarga estimada de la infiltración directa por precipitación, infiltración proveniente de cuerpos de agua superficial, infiltración proveniente de actividades de riego, goteo o drenaje inter acuíferos, flujos a través de los límites naturales o fijados por el área de estudio, y fuentes antropogénicas que se consideren relevantes. Evaluar la incertidumbre asociada a los datos presentados.

Se deben describir de manera resumida las áreas de descarga y determinar el tipo, cantidad y distribución de las descargas superficiales y subsuperficiales. Se debe estimar la descarga derivada de manantiales, pozos, aljibes, cuerpos de agua superficial, evapotranspiración, goteo o drenaje inter acuíferos, flujos a través de los límites naturales o fijados por área de estudio, y fuentes antropogénicas que se consideren relevantes. Evaluar la incertidumbre asociada a los datos presentados. Las áreas de recarga y descarga deben ser presentadas en un mapa a escala 1:25.000.

Se deben presentar los mapas piezométricos y de direcciones de flujo actual del agua subterránea para cada unidad hidrogeológica y se deben presentar los perfiles que identifiquen de manera representativa, los espesores y continuidad lateral de dichas unidades. Se podrá emplear bloque diagrama que represente tridimensionalmente el sistema acuífero.

A partir de la información levantada, procesada e interpretada para la construcción del MHC se deben definir los límites y fronteras del área de estudio para la construcción del modelo numérico (Anexo I), considerando los rasgos estructurales, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos.

Finalmente se debe efectuar la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación empleando cualquiera de los métodos descritos en el documento *"Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación"* del MADS.<sup>2</sup> Se deben presentar los respectivos mapas que soporten el análisis y su resultado.

#### 4. PROPUESTA DE RED DE MONITOREO REGIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

A partir de los resultados del MHC, de la distribución espacial y en profundidad de los puntos de agua subterránea, se debe evaluar la pertinencia de los puntos que son objeto de monitoreo actual por parte de las compañías mineras desde un punto de vista regional. Dicha evaluación se debe efectuar bajo el criterio de la representatividad espacial de los monitoreos para cada unidad hidrogeológica de interés, entendidas como aquellas que presentan un uso actual potencial para el suministro de agua en la región para cualquier uso.

Se deben identificar necesidades de monitoreo en zonas que actualmente no son objeto de monitoreo para todas las unidades hidrogeológicas de interés y a partir de este análisis se debe proponer el diseño de la red de monitoreo regional que complemente los puntos que en la actualidad son monitoreados por las empresas mineras.

Se debe tener en cuenta que:

- El diseño de la red regional no debe eliminar los puntos que en la actualidad son objeto de monitoreo por parte de las compañías mineras.
- Los puntos de monitoreo que se propongan deben considerar las unidades hidrogeológicas de interés.
- El diseño de la red implica la identificación, ubicación y diseño preliminar de los pozos (cuando se considere la construcción de nuevos pozos de observación o piezómetros).
- Si para la red se contemplan puntos existentes como pozos o aljibes, se debe garantizar que estos puntos cuenten con nivelación topográfica, se conozca el diseño de la estructura, que capten de una sola unidad hidrogeológica, que permitan la accesibilidad del personal (permiso de ingreso al sitio) y de la toma de la muestra (la bomba no debe obstruir la toma de la muestra) y que sea posible suspender el bombeo del punto durante al menos 12 horas consecutivas.
- Se deben seguir los lineamientos que establezca el IDEAM para el diseño de redes de monitoreo para aguas subterráneas y lo establecido en las Normas Técnicas Colombianas NTC 5539, NTC 3948, NTC ISO 5667-11 y NTC-ISO 5667-1.
- Debe efectuarse un proceso de revisión previo a la implementación de la red donde se involucre a la ANLA y a CORPOCESAR.

La implementación de la red y el monitoreo debe iniciar a más tardar un año después de la radicación del MHC.

## 5. ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN

En la medida en que nueva información sea recolectada, el modelo conceptual debe ser redefinido y actualizado. Anualmente se presentarán versiones actualizadas del mismo.

Si se considera pertinente se debe contemplar la recolección de información de campo adicional requerida para llenar los vacíos de información identificados.



## BIBLIOGRAFÍA

ASTM. ASTM D5979 Guide for Conceptualization and Characterization of Groundwater Systems. 2008.

ASTM. ASTM D5447-04 Standard Guide for Application of a Groundwater Flow Model to a Site-Specific Problem. 2010.

ASTM. ASTM D5718 Guide for Documenting a Ground-Water Flow Model Application. 2013.

COLOMBIA. C.I. NORCARBÓN S.A.; SGI Ltda; K2 Ingeniería. Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el área de explotación minera Cerrolargo. Bogotá. 2011.

COLOMBIA. C.I. PRODECO - Antea Group. Estudio técnico respuesta al Auto No.1327 del 3 de mayo de 2012, modificado por el Auto No. 995 del 11 de abril de 2013 de la ANLA. Bogotá. 2014.

COLOMBIA. CORPOCESAR - UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA. Formulación del modelo hidrogeológico e hidrológico, conceptual y numérico, en el área donde se ubican proyectos de explotación de carbón, tanto actuales como futuros, en la parte central del valle del río Cesar. Valledupar. 2010.

COLOMBIA. DRUMMOND Ltd - HIDROGEOCOL S.A. Actualización del modelo numérico hidrogeológico de los proyectos mineros de la zona sur Fase I Rincón Hondo y Pribbenow - Cesar (Colombia). Bogotá. 2013.

COLOMBIA. Hidrogeocol Ltda. - C.I. Colombian Natural Resources. I.S.A.S. Actualización modelo numérico hidrogeológico de la mina La Francia. Corregimiento La Loma. Departamento del Cesar. Bogotá. 2011.

COLOMBIA. Hidrogeocol Ltda. - Vale Coal Colombia LTD. Actualización del modelo numérico hidrogeológico en las áreas de influencia directa e indirecta del proyecto carbonífero El Hatillo - Las Cuevas 2012. Corregimiento La Loma. Departamento del Cesar. Bogotá. 2013.

COLOMBIA. IDEAM - CORPOCESAR. Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las ecorregiones de los valles de los ríos Cesar y Magdalena, departamento del Cesar. Bogotá. 2006.

COLOMBIA. IDEAM - CORPOCESAR. Evaluación del potencial del agua subterránea en los municipios de Curumani, Pailitas, Ramalameque, Pelaya, La Gloria, Gamarra, Aguachica, Río de Oro, San Martín y San Alberto, departamento del Cesar. Bogotá. 2009.





COLOMBIA. IDEAM. Marco conceptual y metodológico para las Evaluaciones Regionales del Agua. Bogotá D.C. 2011.

COLOMBIA. IDEAM. Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. Bogotá D.C. 2013.

COLOMBIA. IDEAM. Aguas subterráneas en Colombia: una visión general. Bogotá D.C. 2013a.

K2 Ingeniería, SGI Ltda, C.I. Norcarbón S.A. Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el área de explotación minera Cerrolargo. Bogotá. 2011.

COLOMBIA. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – MADS. Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá. 2014.

COLOMBIA. Servicio de Evaluación Ambiental. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Santiago de Chile: Servicio de Evaluación Ambiental - Gobierno de Chile. 2012.

COLOMBIA. SGI Ltda. - C.I. Prodeco S.A. Actualización del modelo hidrológico matemático para el área de influencia del proyecto de explotación minera Calenturitas, dando cumplimiento a los requerimientos establecidos en el Auto 1805 del 6 de junio de 2008 emitido por el MAVDT. Bogotá. 2008.



## ANEXO I

### TÉRMINOS DE REFERENCIA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

 **MINAMBIENTE**

El presente anexo tiene como fin establecer los lineamientos para la presentación de los resultados de la construcción, calibración y validación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas que se estructure a partir del MHC para la zona de estudio. Este documento NO pretende ser una guía conceptual ni metodológica para la modelación del flujo de aguas subterráneas y para ello se recomienda revisar la bibliografía especializada en el tema.

Los límites y condiciones de frontera del modelo numérico deben ser definidos a partir de los resultados del MHC.

#### DEFINICIONES<sup>4</sup>

- **Modelo matemático:** ecuaciones matemáticas que representan el sistema físico y las suposiciones que se requieren para simplificarlo.
- **Modelo de flujo de aguas subterráneas:** aplicación de un modelo matemático para representar un sistema específico de flujo de aguas subterráneas.
- **Condición de frontera:** expresión matemática del estado físico del sistema que restringe las ecuaciones del modelo.
- **Calibración:** proceso sistemático de refinar el modelo ajustando las propiedades hidráulicas, condiciones de frontera y/o el dominio hidrogeológico hasta alcanzar el nivel deseado de correspondencia entre valores simulados y valores observados.
- **Validación:** uso del conjunto de parámetros y condiciones de frontera de un modelo calibrado para aproximarlos aceptablemente a nuevos datos medidos en campo. No se debe confundir la validación del modelo numérico con la validación del código o software empleado la cual se efectúa para comparar el código usado con otras soluciones analíticas o códigos disponibles.
- **Sensibilidad:** grado en el cual el resultado de un modelo es afectado por cambios en la información ingresada (input) del dominio hidrogeológico, las condiciones de frontera y/o las propiedades hidráulicas.

#### OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN

Determinar las direcciones de flujo y las modificaciones en los niveles piezométricos de las unidades hidrogeológicas de interés en la zona de estudio en el corto, mediano y largo plazo (dos, cinco y 20 años respectivamente), y determinar período de estabilización de niveles bajo condiciones de operación minera actual y proyectada (es

<sup>4</sup> Adaptado de ASTM D5447-04. 2010

decir, incluyendo proyecciones de frente minero y de retrolleado de pit si aplica). Igualmente se deben calcular las pérdidas de caudal de los cuerpos de agua superficial producto de las modificaciones en los gradientes hidráulicos por los pits mineros. Se debe dar prioridad a la calibración del modelo en zonas de interés (áreas de influencia directa de los proyectos mineros) y a la simulación del flujo regional con énfasis en las áreas mineras.

## **COMPONENTES DEL DOCUMENTO DEL MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA DE ESTUDIO**

### **1. INTRODUCCIÓN**

- 1.1. **Objetivos de la modelación:** definir el propósito y las metas del estudio. Mencionar predicciones hechas por el modelo. Dentro de los objetivos se debe dar prioridad a la calibración del modelo en zonas de interés (áreas de influencia directa de los proyectos mineros) y a la simulación del flujo regional con énfasis en las áreas mineras.
- 1.2. **Aplicabilidad del modelo:** Describir como el modelo satisface el propósito y las metas del estudio.
- 1.3. **Descripción general del área.** Descripción relevante de la topografía, geología, hidrología y uso del suelo regional. Se debe presentar el mapa con la identificación del área de estudio definida.

### **2. MODELO CONCEPTUAL**

Describir concisamente los resultados del MHC del área de estudio incluyendo:

- 2.1. **Descripción del sistema acuífero.** Presentar la interpretación de las características geológicas e hidrológicas del sistema acuífero. Presentar mapas de perfiles, estructurales y superficies piezométricas.
- 2.2. **Límites hidrogeológicos.** Describir límites hidrogeológicos presentes y su categorización hidráulica dentro del sistema (cabeza constante, Neuman, no flujo, tipo Cauchy, superficie libre, etc.).
- 2.3. **Propiedades hidráulicas.** Describir las propiedades para cada unidad hidrogeológica del sistema acuífero: conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento específico, porosidad. Si estos parámetros cambian

especialmente (medio heterogéneo) se debe presentar el mapa de interpretación respectivo.

- 2.4. Presentar la ubicación la magnitud de entradas y salidas de agua puntuales y la variabilidad o distribución de entradas y salidas de áreas de recarga y descarga.
- 2.5. **Balance hídrico.** Presentar el balance hídrico del sistema e interpretar como el agua entra, se mueve a través y sale del sistema acuífero.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO

Describir el código usado y el criterio de selección para la representación del flujo de aguas subterráneas. Presentar las suposiciones implícitas del código usado, limitaciones y ecuaciones que resuelve:

- 3.1. **Suposiciones.** Describir las suposiciones implícitas del código y justificar su uso de acuerdo a los objetivos del estudio.
- 3.2. **Limitaciones.** Describir las limitaciones del código de acuerdo a los objetivos del estudio.
- 3.3. **Solución.** Describir la(s) técnica(s) de solución usadas por el código, ecuaciones, parámetros y variables.
- 3.4. **Efectos en el modelo.** Describir como las suposiciones y limitaciones del código afectan positivamente y negativamente los resultados del modelo.

### 4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Describir las suposiciones hechas para simplificar el MHC y como esto se ajusta a los objetivos de la modelación. Los límites y condiciones de frontera del modelo numérico deben ser definidos a partir de los resultados del MHC (es decir, los límites no serán necesariamente los mismos definidos para el MHC).

- 4.1. **Dominio del modelo.** Presentar el área de estudio del modelo numérico como una capa superpuesta sobre un plano topográfico. El dominio o área de modelación será definido por las zonas donde ocurren los procesos que se quieren analizar. Los límites del dominio activo de modelación deben abarcar estas zonas y trazarse de acuerdo al conocimiento confiable del comportamiento hidráulico del sistema, de tal forma que los límites puedan ser representados mediante condiciones de borde conocidas o simples de establecer. Al momento de definir dicho dominio, se deben clasificar los límites en base a la siguiente

distinción: Límite superior o techo, Límite inferior o piso y Límites laterales o contactos laterales.

- 4.2. **Definición de la grilla, discretización horizontal y vertical.** Describir la malla empleada, número de celdas, tamaño de celdas y justificación de la discretización horizontal y vertical de acuerdo a los elementos hidrogeológicos del dominio. En caso de emplear un código basado en diferencias finitas la discretización vertical debe evitar el secado de celdas, lo que las inactiva de la simulación.
- 4.3. **Régimen de modelación.** Se debe efectuar, en la medida de lo posible, una modelación en régimen permanente simulando las condiciones del área de modelación antes de la intervención minera. Igualmente se deben hacer corridas en régimen transitorio donde se incluyan las intervenciones mineras. Para simulaciones en régimen transitorio es necesario definir una condición inicial y especificar el respectivo período de estabilización requerido.
- 4.4. **Resolución temporal y horizonte de modelación.** Las simulaciones de los niveles piezométricos de las unidades hidrogeológicas de interés se efectuarán para escenarios de corto, mediano y largo plazo (inicialmente definidos como dos, cinco y 20 años respectivamente). Se debe determinar el tiempo aproximado de estabilización de niveles bajo condiciones de operación minera actual y proyectadas (es decir, incluyendo proyecciones de frente minero y de retrolleado de pit si aplica). Para cada escenario se debe describir y justificar el intervalo de tiempo (time step) empleado para la modelación y su discretización en eventos de estrés.
- 4.5. **Entradas y salidas.** Presentar entradas y salidas del sistema, sus caudales y describir como son incorporadas en el modelo.
- 4.6. **Condiciones de Frontera:** Presentar en mapa las condiciones de frontera establecidas en el modelo, su descripción, clasificación y asignación de valores numéricos.
- 4.7. **Parametrización.** Presentar la selección de cualquier parámetro numérico usado en la solución. Los rangos de valores estimados para dichos parámetros deben basarse en los resultados del MHC.
- 4.8. **Datos observados de niveles piezométricos.** Las observaciones para el modelo de flujo corresponden a los niveles piezométricos, asociados a cada pozo de observación y a la piezometría, dada por la superficie generada por el conjunto de niveles piezométricos. Para la construcción del modelo numérico se deben seleccionar aquellos pozos de observación representativos basados en su distribución espacial y la calidad y cantidad de información disponible para cada



pozo. Algunos criterios que deberían cumplir los pozos que sean seleccionados como pozos de observación son:

- Estar presentes dentro del dominio activo.
- Presentar registros lo más completos posible dentro del periodo de calibración.
- Tener una cota o elevación del nivel de terreno confiable.
- Conocer la profundidad de su lectura para poder relacionar a un layer en el modelo con un nivel de confiabilidad adecuado.
- Presentar niveles de agua subterránea consistentes con la piezometría y el funcionamiento del acuífero.

## 5. CALIBRACIÓN

- 5.1. Describir los análisis usados para la calibración del modelo y presentar los resultados respectivos comparando los valores simulados con valores observados de cabezas hidráulicas. Se deben describir los parámetros utilizados para la calibración y los valores finales adoptados. Para el presente estudio se considera que el modelo está calibrado cuando el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) sea igual o menor al 10% de la diferencia máxima de niveles piezométricos observada en la zona. Se debe presentar y hacer análisis de valores residuales y presentar sus resultados en un mapa del área modelada.
- 5.2. Análisis de sensibilidad. Se deben presentar los objetivos del análisis de sensibilidad, describir los procedimientos usados, los resultados del análisis y sus efectos en el modelo. El análisis se debe enfocar en parámetros críticos del modelo como las conductividades hidráulicas, constantes, tasas de recarga. Se debe justificar el rango de sensibilidad basado en la precisión de los datos.
- 5.3. Validación del modelo. En la medida en que sea posible se debe efectuar la validación del modelo numérico, para ello se deben describir los objetivos de la validación y presentar los resultados respectivos. En caso de que el número de observaciones no sea suficiente para efectuar una validación confiable, se deben utilizar todos los datos para la calibración (prescindir de la validación), pero sujeto a la realización de un acabado análisis de sensibilidad para estimar la incertidumbre de las predicciones.

## 6. SIMULACIONES PREDICTIVAS

Sólo una vez que el modelo se encuentra calibrado y validado (en caso de ser posible), se considera que éste tiene una capacidad predictiva adecuada. De este modo se debe hacer la descripción de cada simulación predictiva de acuerdo a los horizontes de tiempo definidos previamente. Justificar y explicar los cambios realizados para permitir



que el modelo calibrado simule dichas predicciones. Presentar resultados en forma gráfica.

#### 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Resumir el proyecto modelado y establecer las conclusiones relacionadas con los objetivos del estudio. Describir incertidumbres inherentes al modelo y sus efectos en las conclusiones derivadas del modelo.

#### 8. REFERENCIAS

Incluir toda referencia de origen de datos para construir el modelo, códigos de computador y procedimientos usados como parte del proyecto de modelación.