

LA MODELACION NUMERICA COMO HERRAMIENTA PARA LA EXPLORACION HIDROGEOLÓGICA Y CONSTRUCCION DE MODELOS CONCEPTUALES (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño)

EXPLORATION AND HYDROGEOLOGICAL CONCEPTUAL MODELS THROUGH NUMERICAL MODELING (Study case: Bajo Cauca Antioqueño)

TERESITA BETANCUR

Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Docente, terebetanv@udea.edu.co

CARLOS PALACIO

Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Docente, cpalacio@udea.edu.co

Recibido para revisar diciembre 12 de 2008, aceptado agosto 25 de 2009, versión final septiembre 25 de 2009

RESUMEN: Además de constituir una herramienta de simulación, los modelos numéricos en hidrogeología ofrecen un camino para avanzar en el entendimiento de sistemas acuíferos. Los modelos numéricos pueden tener carácter exploratorio y así, pueden acompañar la tarea de construcción de un modelo conceptual desde el momento en que se inicia la recolección de información, en el curso de su interpretación, y cada vez que se obtienen nuevos datos o se aplican nuevos análisis para la validación de un sistema hidrogeológico.

El ejercicio de modelación numérica propuesto para el sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño, tiene carácter exploratorio. La información recopilada desde el año 2003, fue sucesivamente incorporada en tareas de modelación numérica nutriendo el modelo conceptual regional con el que hoy se cuenta. En este trabajo, se emprendió la tarea de modelación numérica con el propósito de ayudar, a interpretar la información y la dinámica de flujo subterráneo del Bajo Cauca antioqueño.

PALABRAS CLAVE: Modelación numérica, Modelo hidrogeológico conceptual, Exploración hidrogeológica

ABSTRACT: Numerical models in hydrogeology offer a way to advance the understanding of aquifer systems besides being a simulation tool. Numerical models can have an exploratory nature, and as a tool for exploration, may accompany the task of building a conceptual hydrogeology model.

The “Bajo Cauca antioqueño” is a Colombia region where groundwater is a strategic resource. The hydrogeology exploration and numerical modeling proposed for the aquifer system of the “Bajo Cauca antioqueño” has an exploratory nature and the purpose of helping to interpret the data and groundwater flow dynamics, of the information collected since 2003.

KEY WORDS: Numerical model, Conceptual hydrogeology model, Hydrogeology exploration.

1. INTRODUCCION

Los modelos numéricos proporcionan una estructura para sistematizar la información de

campo, para responder preguntas sobre el funcionamiento de un acuífero, y pueden ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional [1].

El marco conceptual común a todo análisis hidrológico es la división sistémica de los procesos hidrológicos en un número de almacenamientos interconectados por flujos hídricos [2]. El flujo de las aguas subterráneas se estudia a partir de las leyes de la hidrodinámica, donde la porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento son los parámetros principales a considerar, siendo la ley de Darcy la base teórica que permitió el desarrollo analítico de esta disciplina en el siglo XIX. En el medio natural las posibles entradas de agua al sistema acuífero (la recarga) se dan por el aporte de fuentes superficiales, o a partir de la infiltración del agua lluvia y su posterior percolación. Las salidas se dan mediante el flujo subterráneo que aflora en manantiales, que constituye el caudal base de fuentes superficiales o que descarga al océano. Entre los almacenamientos o componentes del sistema acuífero se dan procesos de flujo vertical, por ejemplo el goteo, u horizontal como el flujo lateral entre unidades hidrogeológicas vecinas que mueven el agua [3 – 4]. El acuífero es un sistema abierto que intercambia materia y energía con el entorno.

El resultado de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada es un modelo conceptual: una representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de un bloque diagrama o una sección transversal; comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las superficies freáticas y piezométricas y por lo tanto las condiciones de flujo subterráneo [1]. Además, se requiere identificar zonas y procesos de recarga y evaluación de reservas. El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. La simplificación es necesaria porque una reconstrucción completa del sistema es imposible, un modelo conceptual es la idea básica o construida de cómo operan los sistemas y procesos [5].

Hay que señalar que un modelo hidrogeológico contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas y la prueba de su validez solo se

logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas y luego de que se construya un modelo numérico y se comparen los resultados de la simulación con las observaciones de campo.

Con respecto a la certidumbre de los modelos conceptuales el termino SORPRESA se refiere a la situación en la cual la colección de nueva información invalida un modelo conceptual original. La sorpresa puede surgir a causa de la revisión de la teoría científica o como consecuencia de la nueva información que se obtenga sobre un sitio particular. Según la referencia [5]. La sorpresa ocurre en 20-30% de los casos estudiados, indicando esto que no es fácil construir un modelo hidrogeológico apropiado. Dada la incertidumbre inherente al conocimiento de la naturaleza de los medios subterráneos para los que se cuenta con información cuantitativa pero también cualitativa, es posible incluso tener varios modelos conceptuales para un mismo sistema [6].

Partiendo del sistema de ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo del agua subterránea, teniendo en cuenta que las soluciones analíticas sólo pueden aplicarse a sistemas homogéneos y muy sencillos, se superpone al dominio hidrogeológico de análisis un sistema de nodos, y siguiendo los protocolos de la modelación numérica, se puede lograr para un caso de interés obtener un modelo numérico que represente la hidrodinámica del medio acuífero considerado. De los métodos numéricos que se pueden utilizar para modelar sistemas naturales son las diferencias finitas, los elementos finitos y los volúmenes finitos, los procedimientos mas usados actualmente para resolver problemas de hidrogeología.

La combinación matemática entre las ecuaciones de balance de masas y la ley de Darcy, da lugar a la expresión (1) que describe el flujo del agua subterránea.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot (K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot (K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde K_i representa la conductividad hidráulica del medio en la dirección i , $\partial h/\partial l$, el gradiente hidráulico, S_s el coeficiente el

almacenamiento específico, $\delta h/\delta t$ la variación en la carga piezométrica en el tiempo y W los aportes o salidas de agua ocasionados por efectos externos al sistema acuífero.

Cuando el problema del flujo no varía en el tiempo $-\delta h/\delta t=0$ se dice que el sistema está en condiciones estacionarias o permanentes, de otra manera se habla de estado transitorio. La simulación de flujo en estado transitorio supone una discretización temporal de cabezas en intervalos de tiempo (periodos de stress) durante los cuales las fronteras permanecen invariables. La ecuación (1) junto con una serie de condiciones para cabezas piezométricas o flujo en las fronteras, y a las condiciones iniciales, constituyen una representación matemática de las condiciones de flujo de agua subterránea. La solución de la ecuación proporciona los valores de cabezas en función del espacio y el tiempo, $h(x,y,z,t)$. Exposiciones detalladas acerca de la modelación numérica del flujo subterráneo pueden consultarse en los textos [1 – 7].

La modelación numérica adelantada para el sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño, tiene carácter exploratorio. La información recopilada desde el año 2003, fue sucesivamente incorporada en tareas de modelación numérica nutriendo el modelo conceptual regional con el que hoy se cuenta. En la medida en que se logren implementar redes de monitoreo que permitan obtener la información necesaria para completar el modelo conceptual, será posible, partiendo del actual modelo numérico, aumentar el nivel de confianza en los resultados de la calibración y empezar a utilizarlo como herramienta de simulación que apoye la toma de decisiones en relación con el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

Hacia los años 70s el Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS, abordó la idea de escribir un modelo que se ajustara a las necesidades de los escenarios hidrogeológicos. El concepto de MODFLOW (modular finite-difference ground-water flow model) surgió en 1981 para diseñar un modelo modular de aguas subterráneas que pudiera compilarse en varias plataformas sin muchas modificaciones. La primera versión de MODFLOW fue publicada en 1983 y estaba codificada en FORTRAN66,

posteriormente cuando fue reescrita, hacia 1987, en FORTRAN77 el MODFLOW empezó a ser ampliamente difundido y utilizado [8]. Nuevos ajustes con nuevos módulos, potencialidades y programas de codificación dieron origen a las versiones MODFLOW96 y MODFLOW2000 con las que actualmente se trabaja en todo el mundo. El MODFLOW es un modelo en diferencias finitas que permite simular flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones. Groundwater Vistas, GV, es un ambiente de modelación para aguas subterráneas que acopla un sistema de diseño de modelos con herramientas de procesamiento gráfico. GV es una interfase para flujo y transporte en tres dimensiones e integra MODFLOW, MODPATH y MT3D. La interfase gráfica de MODFLOW conocida como Groundwater Vistas fue producida y es comercializada por Environmental Simulation Inc. [9]

2. METODOLOGIA

El conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de una región representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico que involucre como elementos básicos la definición de la geometría de las unidades hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas, la determinación de las redes de flujo, la estimación de la recarga y la evaluación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas (figura 1). Los datos de que se disponga y la información que de ellos pueda extraerse representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita obtener como resultado el modelo deseado.

La evaluación de la recarga, normalmente mediante métodos de balance hídrico y la determinación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas también hacen parte de la representación del sistema hidrogeológico.

Todos los elementos del modelo conceptual se deben representar a través de DTMs y para su construcción se deben utilizar, apoyados

en las potencialidades de los Sistemas de Información geográfica (SIG), técnicas de modelación espacial adecuadas, la geoestadística, , logra representar superficies con claro sentido físico desde el punto de vista litológico, estructural y en consecuencia hidrogeológico.

Un modelo numérico implementado con el propósito de ayudar a entender la hidrodinámica del sistema acuífero, debe permitir al momento de alcanzar la calibración en estado estacionario representar y explicar la hidrodinámica del sistema acuífero. Una vez definido este objetivo se procede al diseño e implementación de la modelación numérica.

Para la implementación de un modelo numérico, se tienen en cuenta la extensión del área a modelar, el nivel de detalle de la información disponible y la escala de trabajo a la cual se desea construir el modelo hidrogeológico conceptual; para así definir, inicialmente, el número de capas y el espaciamiento nodal que arrojará un número de celdas adecuado y a la vez razonable, en términos de la magnitud de memoria computacional a ocupar y del tiempo de ejecución de cada corrida del modelo.

Antes de iniciar el ejercicio de ajuste de fronteras y parámetros para correr el modelo en estado permanente, se practican pruebas de análisis de sensibilidad que permitan definir las condiciones iniciales y establecer los criterios de convergencia con los que se ejecutará el programa. Luego, aplicando fundamentalmente el método de ensayo y error y, con ocasionales exploraciones mediante módulos de calibración automática, se busca la solución que reproduzca condiciones hidrológicamente lógicas y ajustadas lo mejor posible a las condiciones de campo. La modelación numérica de del flujo subterráneo sugiere ideas al hidrogeólogo en relación con la hidrodinámica del sistema, a las posibles interacciones entre unidades hidrogeológicas, y entre unidades hidrogeológicas y aguas. Una vez lograda la calibración del modelo en estado permanente se realiza un nuevo análisis de sensibilidad de parámetros para cuantificar el peso de la incertidumbre asociada a la información disponible. La historia de los repetidos ensayos y resultados debe consignarse en un diario de modelación en el que se registra para cada

intento: fecha, propósito, condiciones del modelo, condiciones de la simulación y resultados.

La modelación en estado estacionario, adelantada desde las fases iniciales de construcción de un modelo hidrogeológico, se traduce sin lugar a dudas en el mejor modelo conceptual que con la información disponible pueda obtenerse. De ahí en adelante, la calibración en estado transitorio y la utilización de la modelación con propósitos de simulación, irán allanando el camino en términos de una mayor certidumbre en los resultados que se logren.

3. MODELOS CONCEPTUAL Y NUMERICO DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

La subregión nombrada como Bajo Cauca antioqueño se localiza en límites con el departamento de Córdoba. Después de descender de alturas que superan los 2500 metros, el Bajo Cauca se abre en una inmensa planicie aluvial entre 50 y 150 metros sobre el nivel del mar y es cruzada por el río Cauca en sentido sur-norte y luego en sentido oeste-este, el Cauca después de atravesar casi todo el territorio nacional alcanza en esta localidad caudales de 1.200 m³/seg. Las cuencas de los ríos Man y Nechí, representan dos importantes subsistemas hidrológicos. Son mas de 200.000 los pobladores que habitan los 3.273 km² de este cálido y húmedo dominio geográfico, en el que se registra una temperatura promedio anual de 28°C y donde con un régimen hidrológico unimodal se presenta una larga temporada de lluvias entre abril y noviembre y un período seco entre diciembre y marzo, con valores de precipitación anual entre 2500, al noroeste, y 4000 mm al suroriente.

Modelo conceptual: El sistema acuífero del Baja Cauca antioqueño, está conformado por tres unidades hidrogeológicas: Un acuífero libre, denominado informalmente unidad hidrogeológica U₁₂₃, un acuitardo U₄ y un acuífero confinado U₅.

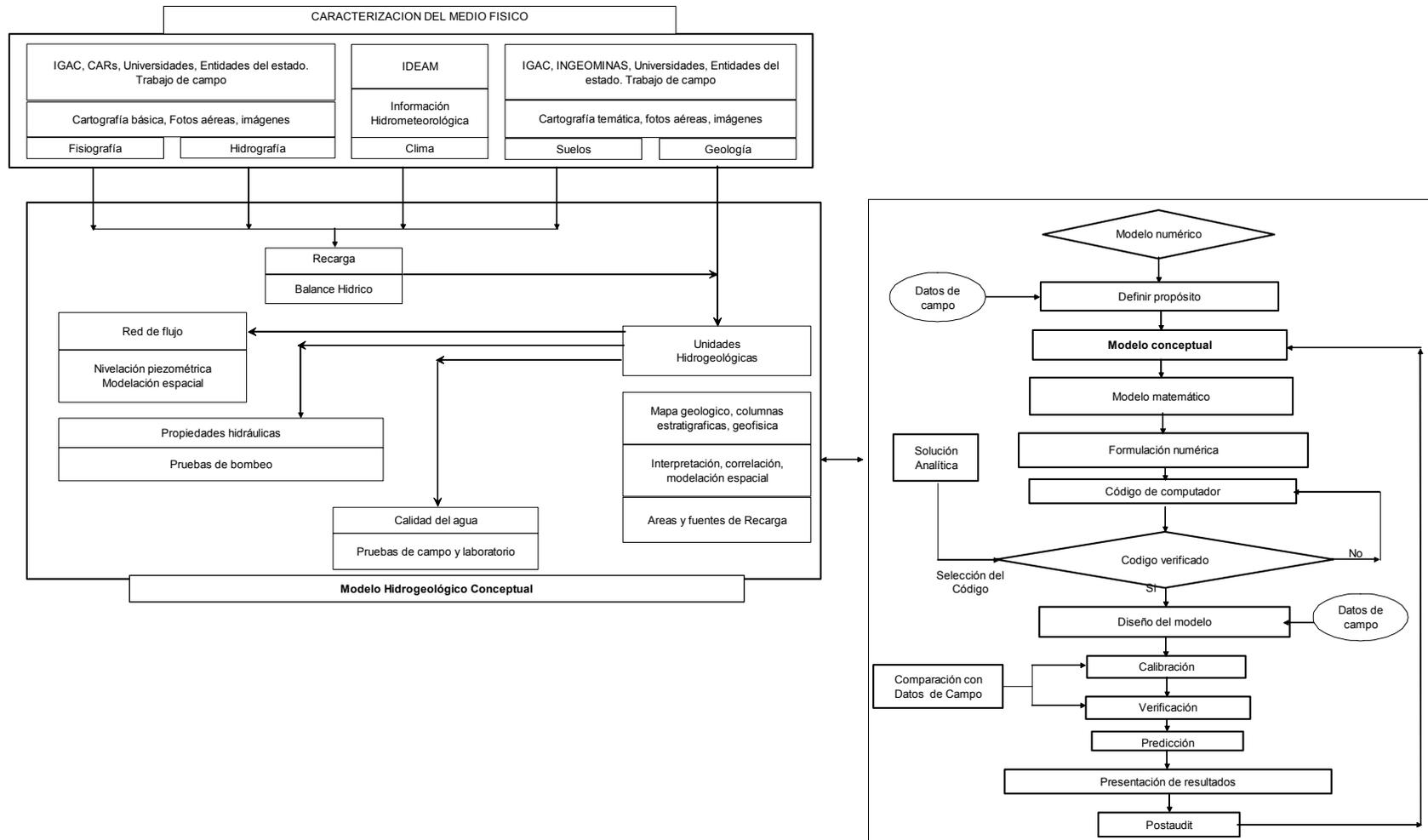


Figura 1. Esquema metodológico para la construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales incluyendo técnicas de modelación numérica

Figure 1. Methodology scheme to the hydrogeological conceptual model including numerical modeling techniques

Las actividades de exploración hidrogeológica realizadas hasta ahora han permitido recopilar un volumen importante de información acerca del acuífero libre y del acuitardo, pero se cuentan con pocos puntos de acceso al acuífero confinado, razón por la cual el conocimiento que de él se tiene es limitado y su modelación tiene el carácter de preliminar (figura 2).

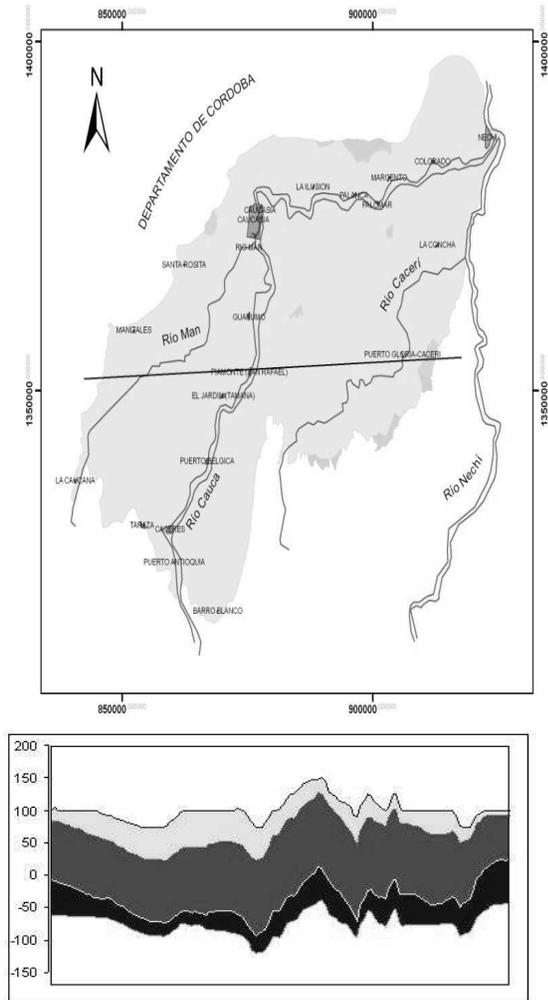


Figura 2. Mapa hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño

Figure 2. Hydrogeological map of the Bajo Cauca antioqueño

El acuífero libre está formado por un conjunto estratigráfico que consta de una delgada capa de suelo, depósitos aluviales recientes y el saprolito poco consolidado de las rocas sedimentarias del Terciario del Miembro Superior de la Formación Cerrito; con espesores que varían entre 10 y 90 metros, su

extensión abarca toda la planicie, registra valores de conductividad hidráulica entre 1 y 5 m/día. La unidad hidrogeológica U4, Miembro Medio de la Formación, con conductividades que no sobrepasan 0.1 m/día tiene el carácter de acuitardo; los espesores de U4 varían entre 100 y cero metros en sitios donde la unidad desaparece al norte cerca de los afloramientos de U5. El acuífero confinado, Miembro Inferior de Cerrito está formado por intercalaciones de arenisca, arcillolitas y areniscas conglomeráticas, sus espesores varían entre 10 y mas de 100 metros; esta unidad poco explorada y explotada, podría constituir una importante reserva de agua subterránea para la región.

Con variaciones del orden de cinco metros, la posición de la superficie freática del acuífero libre, U_{123} , mantiene entre invierno y verano una configuración semejante. El flujo subterráneo tendría importantes divisorias entre los ríos Man y Cauca y entre los ríos Cauca y Cacerí, definiéndose áreas donde el agua fluiría desde altos freáticas localizados entre 90 y 140 metros hacia las grandes corrientes superficiales a las cuales aportaría caudal base. También desde el norte en límites con el departamento de Córdoba el flujo subterráneo se daría hacia el río Cauca. Al occidente en la vertiente izquierda del río Man sólo se logra dibujar de manera aproximada un flujo hacia el cauce y tal vez en algunos sitios en sentido opuesto.

Para la zona de estudio: en primer lugar se tiene una recarga distribuida a lo largo y ancho de la planicie ocasionada por la infiltración directa del agua lluvia, este proceso se da sobre el acuífero libre y puntualmente sobre las unidades hidrogeológicas U4 y U5. En segundo lugar, se produciría recarga a través de la interacción hidráulica que existe entre el acuífero libre y los principales cuerpos de agua superficial como son los ríos Cauca y Man y desde algunas ciénagas y jagüeyes. Finalmente, se daría recarga lateral indirecta desde la roca metamórfica encajante del sistema tanto hacia el acuífero libre como hacia el acuífero confinado. Acerca de la procedencia del agua que satura la unidad U4, la cual, teniendo

regionalmente carácter de acuitardo, constituye fuente de agua local para algunos moradores de la región, ella se daría a través de la conexión vertical con las unidades U_{123} desde la que se produciría goteo y U_5 desde la cual podría haber ascensos ocasionados por efecto de flujo pistón.

Modelo Numérico: Una evaluación exhaustiva de la información recopilada, interpretada y empleada para la construcción del modelo geométrico, una mejor comprensión de la dinámica de flujo en el acuífero libre, la puesta a prueba de las hipótesis relacionadas con las conexiones hidráulicas entre las tres unidades hidrogeológicas y los procesos de recarga y la definición de unas condiciones mínimas para la modelación en estado transitorio, fue lograda mediante la modelación numérica en estado estacionario para el sistema hidrogeológico del Bajo Cauca. Adicionalmente, el grado de confianza alcanzado en la calibración permite afirmar que con algunos esfuerzos adicionales en la toma de información, se lograría un refinamiento en el modelo que permitiría utilizarlo con propósitos de simulación.

Para los 3.273 km² que comprenden la extensión del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño se consideró que una celda cuadrada de 200 metros de lado sería adecuada para adelantar la modelación numérica. La malla sobrepuesta, con un origen de coordenadas en el punto 1.314.900N y 838.900W, consta de 425 filas y 452 columnas, el espesor corresponde al espesor medio de la capa modelada en el punto con las coordenadas asignadas al nodo ubicado en el centro de cada celda.

Para la simulación en estado permanente se tomaron valores promedio en el año de cabezas piezométricas, recarga y explotación.

El sistema hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño está limitado por fronteras impermeables **-No Flow-**, de cabeza constante **-Constant Head-**, ríos **-River-** y flujo dependiente de la cabeza (flujo distante) **-General Head Boundary o GHB-**. Los valores de recarga y la conductividad hidráulica constituyen parámetros para la calibración.

El acuífero libre posee como fronteras (figura 3) de no flujo las divisorias regionales de agua

subterránea que permanecen tanto en época de invierno como de verano. Este límite No Flow se aproxima a las divisorias superficiales con las cuencas de los ríos San Jorge (hacia el norte y oeste del área de estudio) y Cacerí (al suroriente).

El contacto del sistema hidrogeológico con rocas paleozoicas, con porosidad secundaria, hacia el sur y hacia el oriente se trató de representar inicialmente con fronteras distantes tipo GHB; pero el cambio en el gradiente topográfico y piezométrico, que se presenta en la zona de contacto entre los dos ambientes geológicos y la falta de información básica suficiente que permitiera refinar la malla de modelación en ese sector, no posibilitaron la aplicación de esta opción. Finalmente, queriendo evaluar la posibilidad de valides de la hipótesis conceptual de una posible recarga lateral desde las formaciones geológicas del Paleozoico hacia el sistema acuífero sedimentario, se extendió el límite del modelo 1,5 kilómetros hacia esta unidad geológica y se le asignó, durante la calibración, unas condiciones de conductividad hidráulica que permitieran algún flujo de agua.

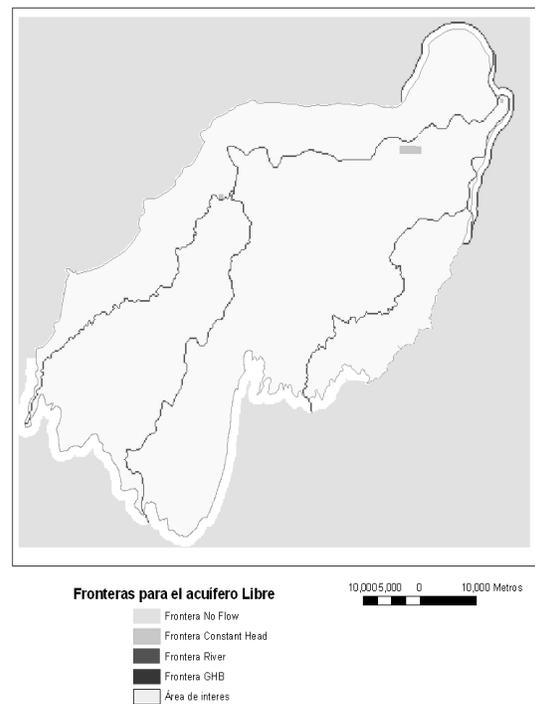


Figura 3 Condiciones de frontera para la unidad hidrogeológica U_{123} . [10]
Figure 3 Boundary conditions to aquifer U_{123} . [10]

Luego si, como frontera GHB, se representó la salida de agua subterránea que se estaría produciendo en la zona de confluencia de los ríos Cauca y Nechi donde se empieza a configurar la Depresión Momposina.

Tres humedales, los más significativos en la región, fueron asumidos como fronteras Constant Head y, los ríos Cauca, Man, Nechí y Cacerí se representaron como fronteras tipo River.

La unidad hidrogeológica U4 con flujos laterales muy lentos que podrían salir hacia el norte está limitada por fronteras GHB.

Finalmente, más allá del área objeto de estudio los tránsitos de agua subterránea desde el acuífero confinado, U5, también fueron definidos como fronteras GHB.

Los valores de recarga aplicados inicialmente al modelo se tomaron de las condiciones promedio del balance hídrico por unidad de suelo. En cuanto a las propiedades hidráulicas, se tomaron como referencia las obtenidas al conceptualizar el modelo, ambos parámetros fueron ajustados durante la calibración.

El proceso de calibración en estado permanente se inició partiendo de unas condiciones iniciales (o semillas) y un criterio de convergencia, establecidos con base en los resultados obtenidos a partir de una serie de ejecuciones preliminares del modelo. Con estas se buscó que no se generaran resultados inconsistentes o que se presentaran situaciones que llevaran a que una o varias celdas, dentro del área activa del modelo, se conviertan en fronteras de no flujo como consecuencia de una pérdida total en el contenido de agua causado por el hecho de que en alguna iteración la cabeza piezométrica en una celda quede por debajo de la base de una capa acuífera. Para el caso de los acuíferos del Bajo Cauca, como ya se ha señalado, las superficies que limitan bases y techos de los estratos hacia el sur registran cambios bruscos en la pendiente a causa de los efectos tectónicos asociados al límite entre dos dominios geológicos. Teniendo en cuenta la imposibilidad de refinar la malla y, en algunos casos de ajustar la geometría más allá de unos límites razonables, se toleró la ocurrencia de unas pocas celdas secas en áreas

donde, efectivamente, la unidad hidrogeológica no existe y fue inferida con el fin de garantizar la continuidad lateral del modelo.

Las condiciones iniciales adoptadas para la modelación en estado permanente asumen cabezas próximas, un poco por encima, a la superficie. Para el criterio de convergencia se escogió un valor de cambio máximo de cabeza por celda, entre iteraciones sucesivas, de 0,001m.

Mediante la calibración en estado permanente se pretendió, realizando una serie de ajustes, definir el valor de diferentes parámetros del modelo, de manera que se lograra reproducir, dentro de un margen de tolerancia aceptable, las condiciones de cabezas piezométricas promedio medidas para el acuífero libre y describir una interacción lógica entre las tres unidades hidrogeológicas.

En el caso del Bajo Cauca la calibración de fronteras se dio para las condiciones River y GHB. Después de repetidos ajustes se logró, asignando los valores de conductancia, que con pequeños cambios sólo afecten las cabezas cerca de la frontera y no en el área de real potencial hidrogeológico.

Mediante sucesivos ajustes en los valores de conductividad hidráulica para las distintas unidades hidrogeológicas y ajustes a las condiciones de recarga se buscó una mejor respuesta del sistema durante los intentos de calibración del modelo. Si bien no se contó con información suficiente para calibrar las unidades hidrogeológicas U4 y U5, la conexión vertical del sistema obligó a involucrar sus parámetros en la calibración. Bajo estas consideraciones y después de varias ejecuciones, según consta en el diario de modelación [10] se logró reproducir de una manera general las tendencias promedio de la superficie freática media. Luego de realizado el análisis de sensibilidad se practicaron algunos ajustes adicionales.

Con los datos para 52 puntos de observación, y graficando valores de cabezas observadas vs cabezas calculadas (figura 4), se encontró que con la calibración realizada se tenía un error absoluto de 3.97m., un error medio de -1.68m., y una desviación de 4.49m. El ajuste lineal de

la gráfica de niveles observados, N_o , vs calculados, N_c , se comporta según la relación $N_c=1,03N_o+0,07$, con $R=0.95$. Los valores de calibración para la conductividad horizontal K_h y para la conductividad vertical K_v y para la recarga, resultaron consistentes con el modelo conceptual.

Dado el limitado conocimiento que se tiene de las propiedades hidráulicas de U4 y del acuífero confinado, se les asignó un único valor de conductividad horizontal y vertical por capa: 1m/día y 0,012m/día para el acuitardo y 12m/día y 1.2m/día para el acuífero confinado.

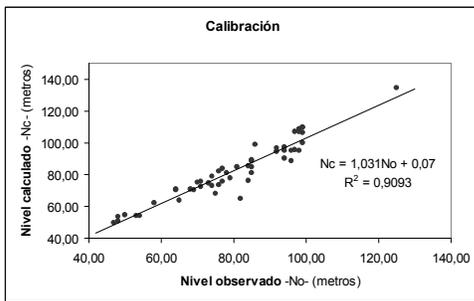


Figura 4. Calibración en estado permanente. Niveles freáticos observados vs. modelados
Figure 4. Stead state Calibration. Measure levels vs. modeling levels

Los datos de conductividad hidráulica horizontal y vertical, recarga y caudales de extracción, fueron sometidos a análisis de sensibilidad con el propósito de cuantificar los efectos de la incertidumbre asociada con esa información. En cada caso los valores de cada parámetro para el modelo calibrado fueron multiplicados sucesivamente por 0,5, 0.75, 1, 1,5, 2.0 (figura 5).

En el acuífero libre el residual promedio no sufre, en ningún caso, ya sea considerando conductividades horizontales o verticales, variaciones superiores a 1 m. En relación con las unidades hidrogeológicas U4 y U5, la reducción en la conductividad horizontal del acuífero confinado (K_{x3}) o en la conductividad vertical de la capa confinante (K_{z2}) ocasionan variaciones en el residual promedio de hasta 2 unidades.

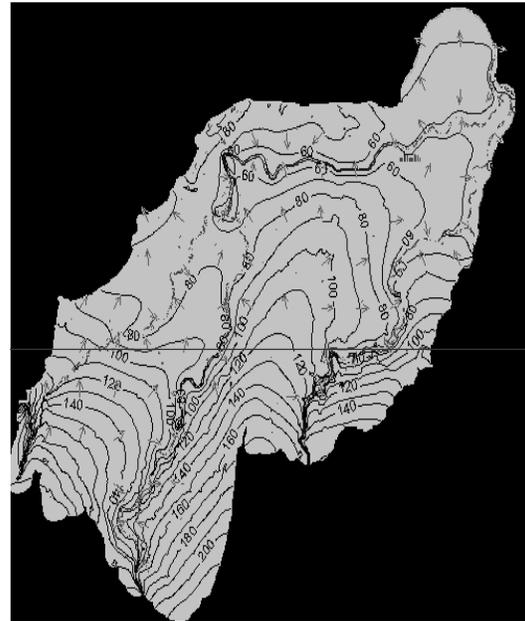
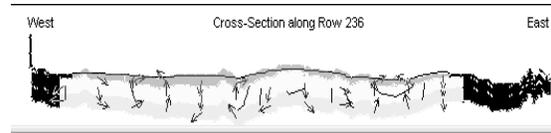


Figura 5 Direcciones de flujo subterráneo obtenidas en GV durante la modelación numérica
Figure 5 Groundwater Flow directions according with GV modeling

En lo que a la recarga respecta los mayores efectos de la incertidumbre se asocian a franja central del área de estudio; un aumento del 50% en esa magnitud produce variaciones importantes en la configuración de la superficie freática; esta situación ya había sido detectada durante el procedimiento de calibración y podría estar asociada hacia el sur a la vecindad de la región donde se configuran cambios sensibles en gradientes topográficos y freáticos. Como se anotó antes, durante la discusión acerca de la calibración, los cambios en los valores de conductancia para las fronteras GHB y River no afectan los valores de cabezas piezométricas dentro del área de interés de este modelo. Situación semejante se presenta con los caudales de explotación, no se detectan cambios significativos en la configuración de la superficie freática, bien, si las extracciones se reducen a la mitad o si se duplican.

Es importante señalar que a pesar de las limitaciones ya señaladas en relación con la calidad de la información disponible para la aplicación del modelo, los resultados del análisis de sensibilidad proporcionan una confianza satisfactoria en relación a la calibración.

Posibles interacciones y dinámica de las unidades hidroestratigráficas. Con el modelo numérico se logró reproducir con un grado de confianza aceptable la hidrodinámica del acuífero libre. En relación con las unidades hidrogeológicas U4 y U5, si bien se modelaron como medios homogéneos, asignándoles valores de conductividad teóricos (correspondientes con su carácter de acuitardo -U4- y acuífero en medio conglomerático con intercalaciones de areniscas y arcillolitas -U5-) sistemática y consistentemente se observó (figura 5) la ocurrencia de flujos verticales ascendentes desde U5 hacia U4 y descendentes desde U₁₂₃; esta situación está en consonancia con las hipótesis de goteo y flujo pistón formuladas para explicar la saturación de U4. También se identificaron, para el acuífero confinado, flujos desde la frontera con la unidad metamórfica del Paleozoico lo cual va en dirección a confirmar la recarga lateral desde zonas altas y alejadas de la zona de estudio.

4. DISCUSIÓN

La modelación numérica puede ser utilizada durante la fase de exploración hidrogeológica como una herramienta que ayuda a interpretar la información y a entender el modelo conceptual que se está construyendo, contribuyendo en la cuantificación de la incertidumbre inherente a la conceptualización misma, en la medida en que, normalmente, mediante la calibración en estado permanente los modelos exploratorios proporcionan una aproximación razonable a la representación que se tiene del sistema hidrogeológico que se esté estudiando.

Se emprendió en esta investigación la tarea de modelación numérica, con el propósito de

ayudar a interpretar la información y la dinámica de flujo subterráneo, para la elaboración del modelo conceptual del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño. Simular posibles escenarios y evaluar las probables respuestas del sistema, deberá hacer parte de una actividad futura a realizar una vez se completen las tareas de evaluación que proporcionen un mejor conocimiento del acuífero confinado y se empiece a disponer de información histórica que permita reducir la incertidumbre en la calibración en estado transitorio del acuífero libre.

Para la calibración del modelo, en estado permanente, en la unidad hidrogeológica U₁₂₃, se utilizó una amplia gama de alternativas en la variación de los valores de conductividad hidráulica, partiendo de los valores obtenidos a partir de la realización de pruebas hidráulicas y asumiendo datos teóricos de acuerdo a las propiedades texturales del medio. Las magnitudes con las que se logró la calibración variaron en magnitud pero mantuvieron las tendencias de distribución espacial del modelo conceptual.

A pesar del limitado conocimiento que se tiene del acuitardo -U4- y del acuífero confinado -U5- se considera significativo el resultado obtenido en términos de las tendencias generales de flujo que una y otra vez, durante los repetidos intentos de calibración, ponía de manifiesto la conexión vertical entre las unidades hidrogeológicas y el ingreso de agua al acuífero confinado desde las fronteras del sistema.

Estos resultados juegan a favor de la línea de pensamiento que considera a la modelación numérica como una posibilidad a implementar antes de que se tenga un modelo conceptual concebido y validado a partir de muchos años de monitoreo. Un modelo construido con información escasa es útil en la medida en que proporciona una estructura para sistematizar la información de campo y para responder preguntas sobre el funcionamiento de un acuífero, pueden llamar la atención del modelador en relación con la ocurrencia de fenómenos que no hayan sido considerados

antes y pueden ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional.

Finalmente, la modelación numérica en hidrogeología se ha convertido en una labor frecuente, tanto, que al menos en lo concerniente al flujo representa casi una actividad rutinaria si se reconoce el valor de los modelos exploratorios. No obstante en este campo hay muchos retos por afrontar y limitaciones por vencer: la cantidad y calidad de la información a partir de la cual se obtienen los modelos conceptuales o con la que se busca la validación nunca es suficiente; así la confianza en la calibración y los márgenes de incertidumbre siempre estarán presentes con nuevos requerimientos. A futuro la modelación numérica tendrá que enfrentar grandes desafíos: la incertidumbre y la sorpresa asociados a la conceptualización del modelo, la calibración automática, la incertidumbre en la simulación, el problema inverso [3, 5, 6]. La modelación iterativa en la que continuamente se monitorea y revisa el modelo ajustando nuevos datos, proporciona la mejor oportunidad para evitar errores incluyendo errores de conceptualización.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Antioquia, al Grupo GIGA, a CORANTIOQUIA y a Jim Rumberger de ESI Inc, por habernos facilitado la licencia del Groundwater Vistas V. 4.2.

REFERENCIAS

- [1] ANDERSON, M. P. AND WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego. 1992.
- [2] FALKENMARK Y CHAPMAN, Hidrología comparada. Comité Nacional Español para el Programa Hidrológico Internacional. España, 1993.
- [3] CUSTODIO, E.; LLAMAS, R. Y SAHUQUILLO, A. Retos de la hidrología subterránea. Ingeniería del agua, Vol. 7, No 1, marzo de 2000, 23- 36. 2000.
- [4] MARSILY, L., Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers. San Diego: Academic Press. 1986.
- [5] BREDEHOEFT, J. The conceptualization model problem—surprise. Hydrogeology journal, 13:37–46.
- [6] CARRERA, J., ALCOLEA, A., MEDINA, A, HIDALGO, J. Y SLOOTEN, L., Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeology journal 13:206–222. 2005.
- [7] WANG, H.F. Y ANDERSON, M.P. Introduction to groundwater modeling. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1982.
- [8] HARBAUGH, A.W. Y MCDONALD, M.G. User's Documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Open-File Report 96-485, 1996.
- [9] RUMBAUGH, J.O., RUMBAUGH, D.B. Command Reference for Groundwater Vistas. Version 4. Environmental Simulations, 2004.
- [10] BETANCUR, T. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: Bajo Cauca antioqueño. Tesis Doctoral. Universidad de Antioquia, Medellín. 2008.