



Title: Modelación de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea. (Report)

Pub: *Ingeniería de Recursos Naturales*

Detail: María Mercedes Gutiérrez Enríquez, Jhon Jairo Márquez Molina, Materón Muñoz. Hernán and Hernán Rojas Palacios. 1. (Jan 2004): p38(12). (5637 words)

Abstract:

Se presenta un modelo de simulación hidrogeológica para el acuífero comprendido en la zona plana de los municipios de Tuluá, San Pedro y Buga (Valle del Cauca--Colombia). Inicialmente se partió de un modelo conceptual ajustado a las características y condiciones del acuífero, construido con base en información real tomada de campo. La modelación se realizó mediante la utilización del programa Visual Modflow, el cual utiliza el método de diferencia finita, consiguiendo un buen ajuste en la diferencia entre los niveles piezométricos medidos y calculados, y a su vez un bajo error de calibración. Los mapas de isopiezas obtenidos como uno de los resultados de los escenarios propuestos, permitieron observar una marcada dirección este--oeste y la incidencia de los niveles de bombeo sobre las direcciones y descensos del nivel piezométrico.

De esta manera, los mapas generados como resultado de la modelación se convierten en una herramienta valiosa para la planificación del aprovechamiento sostenible de las aguas subterráneas y el inicio para el estudio de la contaminación de este recurso, principalmente.

PALABRAS CLAVES

Aguas subterráneas, simulación

Appear an included understood model of hydrogeology simulation for the water-bearing one in the flat zone of the municipalities of Tuluá, San Pedro and Buga (Valle del Cauca) Colombia). Initially it was left from a conceptual model fit to the characteristics and conditions of the water-bearing one, constructed with base in real information taken from field. The modeling was made by means of the use of the Visual Modflow program, which uses the method of finite difference, obtaining a good adjustment in the difference between the measured and calculated piezometric levels, and as well a low error of calibration. The maps of isopimetric obtained like one of the results of the proposed scenes, allowed to observe a noticeable direction west -east and the incidence of the levels of pumping on the directions and reductions of the piezometric level. This way, the generated maps as result of the modeling the planning of the sustainable advantage of groundwaters and the beginning for the study of the contamination of this resource become a valuable tool for, mainly.

KEYWORDS

ground-water, simulation

Texto Completo: COPYRIGHT 2004 Universidad del Valle

1. INTRODUCCIÓN

La zona plana del Valle del Cauca limitada por los ríos Cauca, Tuluá y Guadalajara, junto con la línea de piedemonte, en un área aproximada de 289.7 [Km.sup.2], se caracteriza por ser una región, donde el aprovechamiento del agua subterránea, juega un papel importante en el desarrollo de la actividad agrícola e

industrial.

Geológicamente la zona de estudio se caracteriza por presentar dos tipos de depósitos cuaternarios; los más predominantes son los materiales aluviales (Qd) comunes a lo largo del curso del río Cauca, consistentes en depósitos clásticos gruesos a muy gruesos, de gravas estratificadas y relativamente bien seleccionadas, gravas arenosas y arenas con unidades locales de limos. El segundo tipo de depósito son los conos aluviales (Qca) generalmente complejos, están compuestos por gravas y gravas arenosas con capas delgadas de arena. La que la convierte a su vez en una zona potencial para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. La ubicación de esta se puede

[FIGURA 1 OMITIR]

2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

2.1. Construcción del modelo hidrogeológico tridimensional

JPEGF

Con base en los datos recopilados y en la revisión bibliográfica realizada, sobre la correspondiente estratigrafía y estudios geofísicos de la zona de estudio, se realizó la definición de unidades con propiedades hidrogeológicas similares, agrupándolas en unidades localmente definidas y georeferenciadas, para tal caso se revisaron 139 pozos con columnas estratigráficas y registros eléctricos disponibles, Este modelo permitió identificar más fácilmente las diferentes características, en cuanto a la definición de la forma de cada uno de los estratos, generar un modelo en 3D de la zona de estudio con diferentes vistas, igualmente permitió la construcción de diferentes cortes en toda la zona de estudio y generar mapas de elevación de los materiales que limitan las diferentes unidades del modelo conceptual. En las Figuras 2, 3, 4, se muestra la diferenciación de estratos desde diferentes ángulos, en donde se distinguen por medio de una escala de grises los materiales acuíferos de los no acuíferos.

[FIGURA 2 OMITIR]

[FIGURA 3 OMITIR]

[FIGURA 4 OMITIR]

2.2. IDENTIFICACIÓN DE UNIDADES

Para realizar este procedimiento se agruparon las unidades geofísicas en acuíferas y no acuíferas; dentro de las unidades acuíferas se ubicaron los estratos de Grava, Arena, Grava y Arena, Arena Fina, Arena Limosa y Arena Arcillosa, estos dos últimos se tomaron en cuenta por ser materiales compuestos por un porcentaje mayor al 50% de Arena. El otro grupo identificado fue el de las unidades no acuíferas, entre las que se identificaron materiales como

[FIGURA 5 OMITIR]

En general se puede decir que la región de estudio al igual que todo el departamento del Valle geográfico del Río Cauca registra una amplia estratificación del suelo; es muy común encontrar la presencia de capas de mínimo espesor dentro de otras capas, lo cual generó una difícil interpretación.

2.3. Diferenciación de las unidades del modelo

Una vez identificadas las diferentes unidades en la zona de estudio, se decide trabajar un modelo constituido por tres capas, representando las unidades A, B y C, diferenciándolas a su vez por diferentes mallas que

limitan los materiales geológicos de las zonas. El proceso utilizado para diferenciar cada una de las unidades se describe a continuación.

La primera unidad o unidad A, está diferenciada por la topografía de la zona de estudio y la parte superior de la unidad B perteneciente a la misma zona, para diferenciar esta unidad se elaboraron las mallas de elevación para ambos límites, siendo la malla 1 la correspondiente a la topografía y la malla 2 a la parte superior de la unidad B.

JPEGF

Para la construcción de la malla 1 se tomaron los datos de elevación correspondientes a la ubicación de los pozos, para ello se contó con información de 139 puntos. La malla presenta una elevación mínima de 920.165 m.s.n.m. y una elevación máxima de 1015.150 m.s.n.m. la zona de interés muestra un gran porcentaje de forma plana, siendo esta una característica regional, presentando además algunas elevaciones no muy pronunciadas en la zona centro en el municipio de San Pedro.

Para la construcción de la malla 2, se elaboraron diferentes planos del relieve de la capa de arcilla identificada en los modelos 3D tal como se muestra en la Figura 6 y los diferentes cortes hechos al mismo, esta información permitió encontrar en la región las diferentes elevaciones de la parte superior de la unidad B, con base a esto se obtuvo un plano para toda la zona de estudio y tres más correspondientes a los diferentes municipios, con el objetivo de tener una mayor aproximación a las diferentes valores de elevación de dicha malla.

[FIGURA 6 OMITIR]

JPEGF

Finalmente al unir ambas mallas se define la unidad A para el modelo, caracterizada por tener un espesor máximo de 180.00 m en el municipio de San Pedro y un mínimo espesor de 52.93 m en el municipio de Buga, la zona presenta un espesor promedio de 111.41 m, la cual es una cifra muy a aproximada a las citadas por estudios anteriores que definen para la zona de estudio un espesor promedio de 100 m para la unidad A.

La segunda unidad o unidad B, se encuentra diferenciada por las mallas 2 y 3, como se mencionó anteriormente la malla 2 es la correspondiente al relieve de la parte superior de esta unidad y la malla 3 es la correspondiente a la parte inferior de la misma. Para la construcción de esta se realizaron planos del espesor del estrato arcilloso localizado en la zona de estudio, al igual que para la malla 2 se realizó un plano a escala para toda la zona y uno para cada uno de los municipios.

La figura 7, muestra los diferentes espesores que presenta el estrato arcilloso en la zona de estudio, se puede observar que en general se presenta un espesor promedio de 75 m, representativo para casi toda la zona en general.

JPEGF

Una vez establecido el comportamiento del espesor de la unidad B, se encontró para cada uno de los pozos de muestreo su correspondiente cota en la malla 3, realizando además interpolaciones para los pozos en los que no se tenía información alguna con el fin de realizar el modelo de elevación para dicha malla. en la zona de estudio donde se encontró una elevación mínima de 724.559 m.s.n.m. y una elevación máxima de 868.188 m.s.n.m. La unión de las mallas 2 y 3 define la unidad B para el modelo, donde esta se caracteriza por tener un máximo espesor de 87.46 m y uno mínimo en 9.59 m ambos en el municipio de San Pedro, la zona presenta un espesor promedio de 31.63 m. Cabe anotar que para la elaboración de esta malla se contó solo con la información de 35 pozos que captan agua de la unidad A y C y que pasan de manera total toda la

unidad B, el resto de la información se obtuvo de la interpolación de la malla elaborada de los datos de estos pozos.

JPEGF

La tercera unidad o unidad C, se encuentra definida por las mallas 3 y 4, la malla 4 esta constituida por todos los pozos que se localizan en un rango de profundidad de 150 m a 250 m, a pesar de contar con cierta cantidad de datos, las características mas relevantes de la unidad C no se encuentran representadas en su totalidad, debido a que la información que permite establecer esta capa permeable es inexistente en la zona de estudio y en la mayoría de los puntos de muestreo se realizaron interpolaciones para encontrar la elevación de la malla 4.

JPEGF

La construcción de esta malla se determinó únicamente con el fin de elaborar el modelo conceptual para este trabajo, considerando que por déficit de información esta profundidad debía asumirse con algún criterio. Por lo tanto, es importante resaltar que para un estudio futuro debería realizarse una caracterización más profunda y real.

La Figura 8, muestra la unión de las diferentes mallas establecidas, las cuales dividen las unidades predominantes en la zona de estudio.

[FIGURA 8 OMITIR]

2.4. Análisis hidrogeológico

JPEGF

Con base en los valores de Conductividad Hidráulica obtenidos para cada pozo por medio de análisis de pruebas de bombeo, se obtuvo el mapa de isoconductividad hidráulica como se puede observa en la Figura 9, los rangos para este parámetro se definieron de 0 a 10, de 10 a 20, de 20 a 40 y >40 m/día, con los cuales se establecieron 4 zonas de variación. Los rangos se escogieron de tal manera que la proporción no fuera ni muy fragmentada ni muy amplia y que a su vez permitieran un calculo de promedios de la manera más aproximada posible.

[FIGURA 9 OMITIR]

Para tener una mayor precisión en la definición de las zonas para cada rango de conductividad hidráulica introducidas al mapa del modelo se realizó una digitalización sobre el plano de Isoconductividad hidráulica, extrayendo las coordenadas de una serie de puntos que conforman cada línea de división de las zonas; de modo que al introducir estos valores se logaran trazar las mismas líneas sobre el mapa base, alcanzando de esta forma una mayor precisión en la asignación de los valores de este parámetro.

Los valores de Coeficiente de Almacenamiento son los únicos valores que se conocen por medio del Informe CVC No. 77-16 y son los utilizados como base para el calculo de los respectivos valores de Almacenamiento Específico.

Para los mapas de Isocoficiente de almacenamiento e isoalmacenamiento específico se siguió el mismo procedimiento realizado en el mapa de Isoconductividad Hidráulica, a pesar que para estos parámetros no se contaba con un gran volumen de información, lo cual dificulta tener un mejor descripción del comportamiento de estos parámetros.

JPEGF

Los valores establecidos para cada región específica en los mapas mencionados anteriormente se determinaron mediante promedios aritméticos entre los rangos que delimitan cada zona, ya que no son rangos muy amplios y como se había mencionado anteriormente no se cuenta con la información suficiente. Las tablas 1 y 2 muestran los diferentes rangos y valores de para cada uno de los parámetros antes mencionados.

Los ríos y afluentes aportan agua al sistema de agua subterránea o drenaje de agua dependiendo del gradiente hidráulico entre el sistema y el régimen de agua subterránea, para nuestro caso esta situación se presenta en los ríos Tuluá y Guadalajara, esta interconexión del acuífero-afluente es representada a través de una conductancia ocurrida en una dimensión.

La conductancia del lecho de los ríos, es obtenida mediante la identificación del tipo de material del cual esta conformado, asociando al tipo de material un valor de conductividad hidráulica característico de dicho material. Una vez realizada esta información se determinan una conductancia de 2665 [m.sup.2]/día para el Río Tuluá y 1334 m²/día para el Río Guadalajara.

JPEGF

2.5. Análisis hidrológico

Para la realización de la evaluación hidrológica es necesario identificar los aspectos que inciden en esta, considerando que en el caso del estudio de aguas subterráneas se deben evaluar los parámetros de interacción de la hidrología superficial con la hidrología subterránea.

Para esta zona de estudio particular, la elaboración de un balance hídrico de aguas subterráneas no puede ser desarrollado de la manera más aproximada, teniendo en cuenta que esta es una zona plana y no cuenta con los registros necesarios para determinar valores precisos, como bien podría efectuarse en la situación de una cuenca hidrográfica.

Para efectos del balance se escogió el año hidrológico correspondiente al periodo comprendido entre mayo de 1997 y abril de 1998, ya que este contaba con la información completa de los niveles piezométricos de los pozos y con base a un análisis de distribución de precipitación se determinó que se trata de un año seco.

El cálculo de los parámetros necesarios para la realización del balance hídrico de la zona de estudio se realizó principalmente con base en la información suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2003), la cual cuenta con los registros de las estaciones climatológicas escogidas para la zona.

La ecuación general de balance de aguas subterráneas cuenta con una serie de parámetros de difícil medición, que para el caso particular son desconocidos, por ejemplo el caudal subterráneo saliente y el caudal subterráneo aportado por los ríos. La base de cálculo del balance hídrico se realizó con referencia a la ecuación (1) (Custodio, 1996):

JPEGF

$$P + [O.sub.se] + [O.sub.te] + E - [O.sub.ss] - [O.sub.ts] - [DELTA]S = [\epsilon]$$

En donde:

Aportación pluviométrica (P)

+ Caudal superficial entrante ([Q.sub.se])

+ Caudal subterráneo entrante ([Q.sub.te])

- Evapotranspiración real (E)
 - Caudal superficial saliente ([Q.sub.ss])
 - Caudal subterráneo saliente ([Q.sub.ts])
 - Variación en el almacenamiento (final--inicial) (DS)
- = Cero (en realidad = e, error de balance)

Con base al desarrollo de la ecuación (1), se dedujo por diferencia el valor de infiltración, siendo este el mismo que se tomó como recarga del acuífero dentro del modelo.

$$P - [E.sub.total] - ET + [O.sub.se] - [DELTA]S = 0 \quad (2)$$

En donde:

JPEGF

Aportación pluviométrica (P)

Caudal superficial entrante (caudales asignados para riego) ([Q.sub.se])

Caudal subterráneo entrante (infiltración) ([Q.sub.te])

Evapotranspiración real (ET)

Caudal superficial saliente (escorrentía superficial) ([Q.sub.ss])

Variación en el almacenamiento (final--inicial) (DS) Escurrimiento total ([Q.sub.te] + [Q.sub.ss]) ([E.sub.total])

Una vez recopilada y analizada la información de carácter hidrológica se establece que para el año hidrológico el aporte pluviométrico es de 1083.67 mm/ año, la evapotranspiración es de 811.04 mm/año, el aporte de riego es de 722.11 mm/año y la variación en el almacenamiento es 299.78 mm/año, lo cual arroja una infiltración de 478.32 mm/año, de los cuales un 10% es considerado como escorrentía superficial, es decir 47.83 mm/ año, dando como resultado una infiltración o recarga para el acuífero de 430.5 mm/año para la zona de estudio.

JPEGF

3. MODELO CONCEPTUAL

El principal objetivo de esta parte del estudio es definir el modelo conceptual que mejor represente el comportamiento hidrogeológico en la zona de estudio con base a los antecedentes y análisis hidrologicos e hidrogeológicos recopilados en las etapas anteriores.

3.1. Límites del sistema

La zona de estudio cuenta con un área aproximada de 29000 ha, delimitada hacia el extremo norte por el río Tuluá, al extremo sur por el río Guadalajara, hacia el occidente por el río Cauca y al oriente por la línea de piedemonte.

3.2. Tipos de condiciones de contorno

La zona específica del área de estudio se caracteriza por presentar dos tipos de depósitos cuaternarios; los más predominantes son los materiales aluviales (Qd) comunes a lo largo del curso del río Cauca, consistentes en depósitos clásticos gruesos a muy gruesos, de gravas estratificadas y relativamente bien seleccionadas, gravas arenosas y arenas con unidades locales de limos.

El análisis geológico y el realizado mediante los ensayos de bombeo permitieron determinar que los acuíferos existentes en la zona están definidos en tres unidades de tipo confinado. Como se muestra en la Figura 10.

[FIGURA 10 OMITIR]

3.3. Dimensionalidad

Para la zona de estudio se propuso un modelo en tres dimensiones, el cual se caracteriza por estar subdividido en tres diferentes capas ó unidades de espesor variable, cuyos límites quedan definidos de la siguiente manera; para la capa 1 por la superficie del terreno y la superficie superior de la capa 2, la capa 2 se define por la superficie superior e inferior del estrato de arcilla localizado en el análisis geológico y finalmente la capa 3 se define por la superficie inferior del estrato arcilloso y la malla de elevaciones formada por los pozos de mayor profundidad, cada una de estas capas representa las unidades localizadas en el área de estudio, la discretización de los aproximadamente 289.7 [Km.sup.2] del área de estudio se realizó mediante una malla uniforme y rectangular de 155 filas y 115 columnas, cada celda posee una superficie de 40000 [m.sup.2] (200 m x 200 m) teniendo un espesor variable en función de la profundidad estimada del acuífero en cada punto. El modelo posee un total de 53475 celdas, por cada capa posee 17825, de las cuales 7240 son celdas activas y 10585 son inactivas. Este tamaño de celdas se escogió con base a la precisión deseada, teniendo en cuenta que la zona de estudio presenta una gran densidad de puntos de bombeo.

JPEGF

3.4. Mecanismos de recarga y descarga

Para la zona de estudio se han definido dos tipos de recarga, la principal de ellas es la causada por efectos de la precipitación y los caudales asignados para fines de riego, la segunda es la aportada por los ríos Guadalajara y Tuluá.

Las descargas en el modelo están definidas por el río Cauca que actúa como receptor, debido a topografía del terreno y los caudales extraídos de los pozos de bombeo. Estos caudales, fueron sometidos a un proceso de ajuste, que permitió expresarlos en caudales diarios, considerando los períodos de bombeo otorgados para cada uno de ellos.

3.5. Condiciones de frontera

El área simulada está acotada al norte por la margen izquierda del río Tuluá, siendo las celdas que componen dicho límite consideradas como condición de frontera de río, por tanto, de potencial variable en el tiempo. Conceptualmente se considera como una zona de recarga del área de estudio. El borde sur está definido por el río Guadalajara que al igual que el río Tuluá es también tomado como condición de frontera de río. Las dimensiones de profundidad y espejo de agua con respecto a la superficie se definieron de la siguiente:

Río Tuluá: Espejo de agua a 0.5 m y profundidad a 1.2 m

Río Guadalajara: Espejo de agua a 0.5 m y profundidad a 1.0 m

Los bordes oriental y occidental están delimitados por el río Cauca y la línea de piedemonte respectivamente. La línea de piedemonte está definida como una zona impermeable a la cual se le asignó la condición de muro, El río Cauca debido a sus amplias dimensiones se definió como frontera de cabeza constante, a una

profundidad de 2.5 m con respecto a la superficie.

3.6. Patrones de variabilidad espacial de los parámetros

JPEGF

En la zona de estudio los parámetros hidráulicos presentan una variación espacial entre capas característica de cada una de ellas según sus propiedades hidrogeológicas y en casos específicos a través del análisis geológico, en el cual se hizo relación con el material conocido y los parámetros establecidos en literatura referente. Las capas se consideraron individualmente como medios isotrópicos. Los valores iniciales de entrada (INPUT) para las capas del modelo se muestran en la Tabla 3.

3.7. Variabilidad temporal

Con base a la evaluación de los mapas de niveles piezométricos elaborados para los años que contaban con registros suficientes, se pudo determinar que la variación de su comportamiento no es significativa, lo que indica que el comportamiento del sistema subterráneo está en régimen casi permanente o estático, con un sentido de flujo en dirección este--oeste.

3.8. Esquema del modelo conceptual

El esquema del modelo conceptual se representa de una forma general en la Figura 11. En esta se observa el modelo estructurado en 3 capas de espesor variable, con sus respectivas fuentes de recarga y descarga.

[FIGURA 11 OMITIR]

JPEGF

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para conseguir un buen ajuste del modelo propuesto es necesario realizar un análisis de cuales son las variables que representan la mayor alteración del porcentaje de error al realizarse algunas variaciones, de esta manera es posible catalogar cuales son los factores que deben ser ajustados con mayor sensibilidad.

El análisis de sensibilidad es el inicio del proceso de calibración, ya que partiendo de este se definen los parámetros que tendrán mayor impacto sobre la aproximación del modelo y los resultados obtenidos de la simulación.

4.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó a través del método de ensayo y error, partiendo de la variación del parámetro de conductividad hidráulica, considerando que esta es citada como una de las más sensibles (Vassolo, 2001). Las variaciones se realizaron de manera independiente dentro de los rangos establecidos en la definición del modelo, obteniéndose como resultado, que este parámetro tiene una importancia moderada en el cambio del porcentaje de error de calibración.

Al igual que para la conductividad hidráulica, se realizaron variaciones sobre los valores de conductancia de los ríos, notando que estos representan un valor sensible para el modelo hasta cierto rango, después de este las variaciones en el porcentaje de error son casi imperceptibles.

Finalmente se realizó la variación en el valor de recarga, considerando que este fue un valor calculado con cierta dificultad debido a la escasez de datos y las características de la zona. Los rangos en los que se realizaron las variaciones partieron de la observación de los valores piezométricos calculados, es decir, de la

subestimación o sobreestimación de los mismos, encontrando que para este modelo, el parámetro de recarga presenta el parámetro más sensible y por lo tanto el de mayor impacto en la variación del porcentaje de error.

JPEGF

Las variaciones en los demás parámetros hidráulicos y tamaño de las celdas, no presentaron variaciones significativas.

4.2.. Calibración del modelo

La calibración del modelo se realizó en régimen estacionario para el período correspondiente al año 1998. Para el proceso de calibración se utilizaron 12 pozos de observación distribuidos de forma homogénea sobre la zona (Figura 12). Durante el proceso de calibración los parámetros ajustados fueron la conductividad hidráulica, recarga y conductancia de los ríos. Con los datos iniciales generados en la construcción del modelo, se alcanzó un error de 12.59%, lo cual para casos de modelación es un porcentaje aceptable.

[FIGURA 12 OMITIR]

El modelo se consideró calibrado cuando la diferencia entre los niveles observados en campo y los calculados por Visual Modflow alcanzaron un error medio de 0.58 metros y un error de 4.51 %, como se muestra en la Figura 13, en el cual los niveles calculados son muy aproximados a los tomados en campo para los pozos de referencia y la evaluación de escenarios puede hacerse con una mejor referencia.

JPEGF

[FIGURA 13 OMITIR]

Los datos iniciales introducidos al modelo y los finales después de la calibración son mostrados en la tabla 4.

5. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Realizada la calibración del modelo, es posible evaluar el efecto que causan las variaciones en los niveles de bombeo y los cambios climáticos en la zona, lo cual permite hacer observaciones importantes sobre el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo y la base para implementar estrategias de manejo y protección de acuíferos.

5.1. Variación en la recarga

Para realizar las variaciones en la recarga, en la cual se indican cambios en las condiciones climáticas principalmente, no se disponía de información completa, por lo tanto se realizaron variaciones porcentuales con respecto al año calibrado partiendo del análisis de los cambios porcentuales de la precipitación con respecto al año más seco, de modo que las variaciones no se realizaran de forma arbitraria sino bajo un patrón real del comportamiento de un parámetro determinante en la recarga. Con respecto al año mas seco (1992), el porcentaje de disminución de la precipitación correspondió a un 15.38%, por lo cual se tomaron disminuciones de 10% y 20% en la recarga para simular el cambio de este factor para períodos críticos.

Los valores definidos para los porcentajes establecidos de acuerdo a lo anterior fueron 416.15 mm/año y 378.8 mm/año, respectivamente.

5.2. Variación de la explotación

Además de los cambios en el parámetro de recarga, se plantea hacer una comparación de posibles variaciones en el régimen de explotación. Estos cambios corresponden a un incremento porcentual del número de pozos

en funcionamiento, lo cual permite observar la variación de los niveles piezométricos con respecto a los pozos de observación durante el escenario normal, es decir, un escenario bajo las condiciones de calibración y con el funcionamiento de los pozos que bombean durante todo el año.

Los incrementos en el número de pozos en funcionamiento se definen con porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100%, siendo este ultimo un estado muy crítico de explotación.

Los cambios en el número de pozos en funcionamiento son combinados con la variación de la recarga para realizar un análisis de escenarios más bajo condiciones climáticas extremas en las que los regímenes de explotación pueden generar grandes impactos.

JPEGF

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la simulación de los diferentes escenarios, se aprecia cual es el comportamiento que presentan las líneas piezométricas y direcciones de flujo bajo diferentes condiciones, permitiendo realizar un análisis de la influencia que pueden tener los niveles de explotación sobre los acuíferos y principalmente como debe ser su manejo para condiciones en las cuales el estado del acuífero es crítico.

El escenario expuesto como normal, permite hacer comparaciones del cambio en los niveles piezométricos y de la variación en los regímenes de explotación, lo cual se convierte en una herramienta para la planificación y el manejo del recurso hídrico subterráneo. Considerando que en la actualidad, la planificación sobre este recurso, no esta incluida dentro de los planes de ordenamiento territorial de los municipios correspondiente a la zona de estudio.

La generación de estos mapas, tal como se observa en la Figura 14, muestran como resultado que las principales fuentes de recarga son los ríos Tuluá y Guadalajara, los cuales limitan la zona en los extremos norte y sur respectivamente.

[FIGURA 14 OMITIR]

Los mapas de líneas piezométricas, al igual que las direcciones de flujo, muestran el comportamiento de los niveles piezométrico sobre la zona de estudio, permitiendo hacer una caracterización de la zona según los niveles encontrados y a su vez realizar comparaciones de los descensos y abatimientos causados por el aumento en el número de pozos de bombeo. Como muestra de los resultados obtenidos bajo condiciones normales de recarga y un nivel de bombeo alto se muestra la Figura 15.

6.1. ESCENARIOS CRÍTICOS

Los resultados obtenidos para escenarios de condiciones más críticas, permiten definir mas claramente como se ve afectado el modelo Hidrogeológico y en si, un acuífero, cuando las condiciones climáticas son alteradas, principalmente cuando se presentan periodos de sequía y la necesidad de aumentar el grado de extracción de agua, considerando que para el caso particular se trata de una zona dedicada principalmente a cultivos de caña de azúcar.

JPEGF

Las direcciones de flujo para estos escenarios en los cuales se disminuye el valor de recarga y se aumenta progresivamente el nivel de explotación, indican la marcada desviación del flujo hacia las áreas de mayor demanda y como la zona de descarga se convierte en una fuente de recarga, indicando la alteración del comportamiento normal del sistema.

Los niveles de descenso, analizados de los mapas de líneas piezométricas alcanzan rangos muy críticos, llegando hasta valores que oscilan entre 12 y 16 metros de profundidad, en el caso más crítico de recarga y extracción. Estos rangos se pueden apreciar en la Figura 16.

[FIGURA 15 OMITIR]

[FIGURA 16 OMITIR]

6.2. CORTES

JPEGF

Considerando la importancia de haber construido un modelo tridimensional de tres capas, se realizaron cortes transversales que permiten analizar el comportamiento del flujo y los niveles piezométricos al interior del sistema acuífero, encontrando que a través de la zona definida como discontinua se puede apreciar un intercambio del agua contenida en la unidad A y la unidad C (Figura 17), lo cual de ser estudiado con mayor detalle y confirmado, representa una conexión de vital importancia en la formación del sistema acuífero.

Además de lo anterior, es posible observar los niveles de abatimiento ocasionados por la extracción de los pozos de bombeo localizados en la zona. Figura 18.

[FIGURA 17 OMITIR]

[FIGURA 18 OMITIR]

7. CONCLUSIONES

JPEGF

La construcción de un modelo conceptual y la simulación de varios escenarios, permite estudiar el comportamiento hidráulico de los acuíferos y establecer criterios para la planificación del aprovechamiento sostenible del agua subterránea.

Para los diferentes escenarios simulados, se encontró, que las líneas piezométricas decrecen en sentido este--oeste. Las líneas de menor altura, se encuentran muy cercanas al río Cauca, y en un área central de la zona de estudio, en donde se presenta la mayor densidad de pozos de bombeo.

Las direcciones de flujo, para los diferentes escenarios, permitieron determinar las zonas de recarga (río Tuluá y Guadalajara) y descarga (río Cauca). Observando las desviaciones causadas por la influencia de las áreas de mayor demanda.

Dado el conocimiento hidrogeológico del entorno y la deficiencia de algunos datos y criterios importantes para la construcción del modelo, los resultados alcanzados podrían considerarse una aproximación,. Permitiendo diagnosticar las deficiencias existentes en el conocimiento básico para realizar una modelación más próxima a la realidad.

El desarrollo de nuevas técnicas para la interpretación de la hidrogeología de la zona de estudio y la elaboración de modelos en tres dimensiones permiten visualizar el posible comportamiento de los diferentes estratos encontrados; lo que permitió realizar una mejor conceptualización de las principales características geológicas de la zona.

* Recibido: Enero 2004

* Aceptado Febrero 2004

REFERENCIAS

Anderson, M.P., and W.W. Woessner. 1992, APPLIED GROUNDWATER MODELING, Academic Press.

Angel, C. Hidrogeología de la Isla de San Andrés. IV seminario Colombiano de Hidrogeología. Octubre, 1993. Cartagena, Colombia.

JPEGF

Cooley, R.L. and R.L. Naff. 1990. Regression Modeling of Ground-Water Flow, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Hidrogeología del Valle del río Cauca entre Buga y Cartago. 1977. Informe CVC No. 77 - 16. Colombia

Custodio E. And Llamas M.R. 1996. Hidrología Subterránea Tomo I y II. Segunda edición. Ediciones Omega. Barcelona, España.

Guiger N. y Franz T. 1997 Waterloo Hydrogeologic. User's Manual for Visual Modflow.

Hill, M.C. 1998. Methods and Guidelines for Effective Model Calibration, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations.

Vassolo, S. 2001. Aplicación de Modelos Numéricos en Aguas Subterráneas. Universidad Nacional del Colombia. Bogotá, Colombia.

AUTORES

María Mercedes Gutiérrez Enríquez Ingeniera Agrícola--Universidad del Valle--Universidad Nacional de Colombia 2003--Grupo de investigación en Aguas Subterráneas EIDENAR. Email: mariamer17@hotmail.com Telf: 333 82 10

JPEGF

Jhon Jairo Márquez Molina. Ingeniero Agrícola--Universidad del Valle--Universidad Nacional de Colombia 2003--Grupo de investigación en Aguas Subterráneas EIDENAR. Email: jojamar25@hotmail.com Telf: 657 05 81

Materón Muñoz. Hernán; Ms.C. Profesor Titular, Director de la Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente, EIDENAR Universidad del Valle eldenar@univalle.edu.co

Hernán Rojas Palacios, Ingeniero Agrícola M.Sc. Recursos Hídricos Universidad del Valle-Universidad Nacional de Colombia 1974 Universidad Nacional de Colombia 1983. Profesor Asociado D.E Telf: 271 7000 Ext: 5268 Palmira--Colombia Email: hrojas@palmira.unal.edu.co

María Mercedes Gutiérrez Enríquez

Ingeniera Agrícola

Universidad del Valle,

EIDENAR

Jhon Jairo Márquez Molina;

Ingeniero Agrícola.

Universidad del Valle,

EIDENAR

Materón Muñoz. Hernán; Ms.C.

Profesor Titular, Director de la

Escuela de Recursos Naturales y

del Ambiente; EIDENAR

Universidad del Valle

Cali-Colombia.

Hernán Rojas Palacios, Ms.C.

Ingeniero Agrícola

Profesor Asociado

Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira

Tabla 1. Rangos y valores de coeficiente de almacenamiento.

Zonas definidas por rangos	Valores de coeficiente de almacenamiento
-------------------------------	---

0.0004-0.0012	0.0008
0.0013-0.002	0.0016
0.0021-0.0028	0.0024
0.0029-0.003	0.0029

Tabla 2. Rangos y valores de almacenamiento específico.

Zonas definidas por rangos	Valores de almacenamiento específico ([m.sup.1])
-------------------------------	--

2.5 x [10.sup.-5] - 4.5 x [10.sup.-5]	3.5 x [10.sup.-5]
4.5 x [10.sup.-5] - 6.5 x [10.sup.-5]	5.5 x [10.sup.-5]
>6.5 x [10.sup.-5]	7.5 x [10.sup.-5]

Tabla 3. Matriz de ordenamiento de parámetros de entrada iniciales.

Kx	Ky	Kz	Sy	Por
----	----	----	----	-----

Capa	(m/día)	(m/día)	(m/día)	Ss (l/m)	(m/m)	Eff
1						
Z1	7	7	7	35 x [10.sup.2]	0.21	0.15
Z2	12	12	12	55 x [10.sup.2]	0.26	
Z3	24	24	24	75 x [10.sup.2]	0.27	
Z4	50	50	50			

2						
Ar	0.001	0.001	0.001	1 x [10.sup.-2]	0.02	0.02
Me	5	5	5	55 x [10.sup.2]	0.25	0.10
3	50	50	50	75 x [10.sup.2]	0.27	0.25

Capa Por
Tot

1	
Z1	
Z2	0.25
Z3	
Z4	

2	
Ar	0.45
Me	0.40
3	0.30

[K.sub.x,y,z] = Conductividad Hidráulica sobre el eje

[S.sub.s] = Almacenamiento específico

[S.sub.y] = Coeficiente de almacenamiento

Por Eff = Porosidad Efectiva

Por Tot = Porosidad Total

Z = Zonas diferenciadas en el modelo

Tabla 4. Matriz de ordenamiento de parámetros finales.

Capa	Kx (m/día)	Ky (m/día)	Kz (m/día)	Ss (l/m)	Sy (m/m)
1					
Z1	10	10	10	35 x [10.sup.-2]	0.21
Z2	24	24	24	55 x [10.sup.-2]	0.26
Z3	21	21	21	75 x [10.sup.-2]	0.27
Z4	60	60	60		

2					
Ai	0.001	0.001	0.001	1 x [10.sup.-2]	0.02
Me	5	5	5	55 x [10.sup.-2]	0.25
3	70	70	70	75 x [10.sup.-2]	0.27

Capa Por Por
Eff Tot

1

Z1
Z2 0.15 025
Z3
Z4

2
Ai 0.02 0.45
Me 0.10 0.40
3 025 030

Conductanciam/día)

Río Tuluá 2665
Río Guadalajara 2334

Recarga (mm)
4735

[K.sub.x,y,z] = Conductividad Hidráulica sobre el eje
[S.sub.s] = Almacenamiento específico
[S.sub.y] = Coeficiente de almacenamiento
Por Eff= Porosidad Efectiva
Por Tot= Porosidad Total
Z = Zonas diferenciadas en el modelo

Citación De la Fuente

Gutiérrez Enríquez, María Mercedes, et al. "Modelacion de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea." *Ingeniería de Recursos Naturales* 1 (2004): 38+. *Informe Académico*. Web. 21 Sept. 2010.

Document URL

<http://find.galegroup.com/gtx/infomark.do?&contentSet=IAC-Documents&type=retrieve&tabID=T002&prodId=IFME&docId=A227461647&source=gale&srcprod=IFME&userGroupName=univalle&version=1.0>

Número de Documento:A227461647

- [Contact Us](#)
- [Copyright](#)
- [Terms of use](#)
- [Privacy policy](#)