

IAHR

AIPH

**XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

**MODELACIÓN DE ACUÍFEROS PARA EL APROVECHAMIENTO
SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA – CASO DE ESTUDIO: VALLE
DEL CAUCA (COLOMBIA)**

Hernán Rojas Palacios

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, e-mail: hrojasp@palmira.unal.edu.co

María Mercedes Gutiérrez Enríquez

Ingeniera Agrícola. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del ambiente: EIDENAR. Universidad del Valle Cali Colombia, e-mail: mariamer17@hotmail.com

Jhon Jairo Márquez Molina

Ingeniera Agrícola. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del ambiente: EIDENAR. Universidad del Valle Cali Colombia, e-mail: jojamar25@hotmail.com

Hernán Materón Muñoz

Profesor Titular, Director de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente; EIDENAR . Universidad del Valle Cali –Colombia, e-mail: hmateron@univalle.edu.co

RESUMEN

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 diferencias finitas, 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 de los niveles piezométricos.

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

ABSTRACT

A hydro-geological simulation model was used for the aquifer located in the plane extending over the municipalities of Tuluá, San Pedro and Buga (State of Valle del Cauca, Colombia). Initially a conceptual model adjusted to the aquifer characteristics and conditions was used. It was constructed with real information obtained from field. Modeling was done with the Visual Modflow program, which uses the method of finite difference, obtaining good adjustment for the difference between the measured piezometric levels and the calculated ones. At the same it yielded a low calibration error. The maps of isopimetric obtained as a result of the proposed scenes, showed a sharp tendency east - west and the effect of pumping levels on the direction and the drop of the piezometric level.

In this way, the maps obtained as result of modeling become a valuable tool for planning sustainable ground-water use and particularly, for the study of pollution of this water resource.

KEY WORDS: ground-water, simulation

I. 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 Km², 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, gravas arenosas y arenas con unidades locales de limos. El segundo tipo son los conos aluviales (Qca) generalmente complejos, 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 la zona se puede apreciar en la Figura 1.

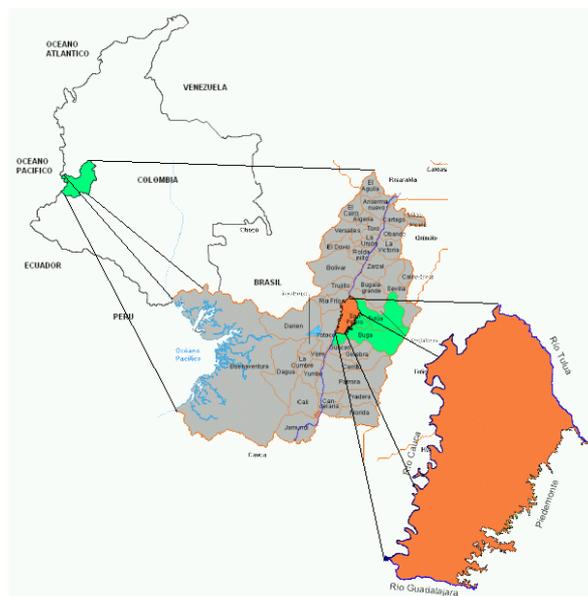


Figura 1. Localización de la zona de estudio

II. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

i. Construcción del Modelo Hidrogeológico Tridimensional

Con base en los datos recopilados y en la revisión bibliográfica correspondiente a la 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 este proceso se revisaron 139 pozos que presentaban columnas estratigráficas y/o registros eléctricos. Este modelo permitió identificar más fácilmente las características que definen los estratos y generar un modelo en 3D de la zona de estudio. De igual manera fue posible realizar una serie de cortes a través de la zona y generar mapas de elevación de los materiales que limitan las unidades del modelo conceptual definido. En la Figura 2 se muestra la diferenciación de estratos observada desde uno de los ángulos.

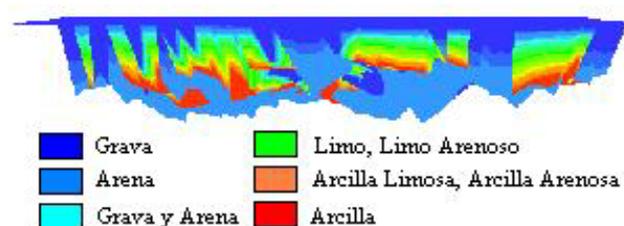


Figura 2. Modelo 3D zona de estudio – vista este, margen línea de piedemonte.

ii. Identificación de Unidades

Para realizar este procedimiento se agruparon las unidades geofísicas en acuíferas y no acuíferas; distinguiendo dentro de las unidades acuíferas los estratos de Grava, Arena, Grava y Arena, Arena Fina, Arena Limosa y Arena Arcillosa, para los dos últimos solo se tomaron los 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 Arcilla, Arcilla con Grava y Arena, Arcilla Limosa y Arcilla Arenosa, para estos últimos se tubo en cuenta que el porcentaje de arcilla fuera superior al 50%. De la misma manera se identificaron otros dos materiales correspondientes a Conglomerados y Limos ubicados en algunos sectores de la zona de estudio, pero que no fueron utilizadas como capas por ser estratos demasiado delgados y no ocupar un área importante a escala regional. En la Figura 3, se muestran dos vistas en planta para los materiales que son mas representativos de la zona de estudio.

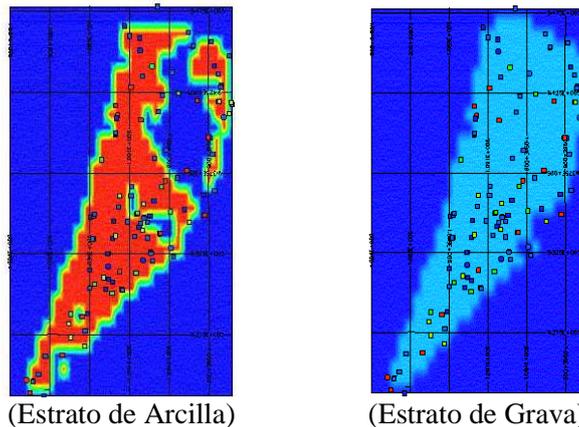


Figura 3. Vista en planta de las principales capas identificadas en la zona de estudio.

En general se puede decir que esta región al igual que todo el departamento del valle geográfico del Río Cauca registra una amplia estratificación del suelo, siendo muy común encontrar la presencia de capas intercaladas muy delgadas, lo cual genera dificultad en la interpretación.

iii. Diferenciación de las Unidades del Modelo

Una vez identificadas las unidades para la zona de estudio, se decide trabajar con un modelo de tres capas, que representan las unidades A, B y C. Estas capas son formadas por mallas (superficie de elevación) que limitan los materiales geológicos de la zona.

La primera unidad o unidad A está diferenciada por la malla 1 correspondiente a la topografía del terreno y la malla 2 como la parte superior de la unidad B. Esta ultima se elaboró con base a diferentes planos del relieve de la capa de arcilla realizados para cada municipio, el modelo 3D y los diferentes cortes hechos al mismo.

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.

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. Las unidades del modelo quedaron definidas como se muestra en la Figura 4.

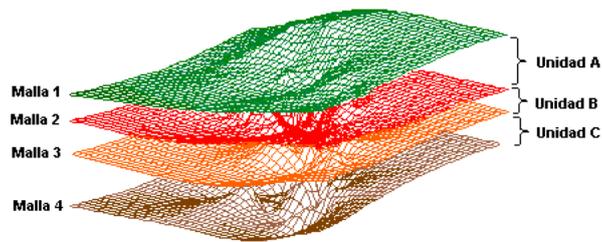


Figura 4. Esquema de las mallas y unidades geológicas.

iv. Análisis Hidrogeológico

Con base en los valores de Conductividad Hidráulica obtenidos para cada pozo por medio de análisis de pruebas de bombeo, se obtuvo un mapa de isoconductividad hidráulica utilizando un modelo de elevación, 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 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 cálculo de los respectivos valores de Almacenamiento Específico.

Para los mapas de Isocoeficiente de almacenamiento e isoalmacenamiento específico se siguió el mismo procedimiento realizado en el mapa de Isoconductividad Hidráulica. Las tablas 1 y 2 muestran los diferentes rangos y valores de para cada uno de los parámetros antes mencionados.

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 ⁻¹)
$2.5 \times 10^{-5} - 4.5 \times 10^{-5}$	3.5×10^{-5}
$4.5 \times 10^{-5} - 6.5 \times 10^{-5}$	5.5×10^{-5}
$>6.5 \times 10^{-5}$	7.5×10^{-5}

La conductancia del lecho de los ríos Tuluá y Guadalajara, 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 m²/día para el Río Tuluá y 1334 m²/día para el Río Guadalajara.

v. Análisis Hidrológico

Para efectos del balance hídrico 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.

La ecuación general de balance de aguas subterráneas cuenta con una serie de parámetros de difícil medición, que para el caso 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):

$$P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S = \varepsilon \quad (1)$$

En donde:

Aportación pluviométrica (P)

+ Caudal superficial entrante (Q_{se})

+ Caudal subterráneo entrante (Q_{te})

- Evapotranspiración real (E)

- Caudal superficial saliente (Q_{ss})

- Caudal subterráneo saliente (Q_{ts})

- Variación en el almacenamiento (final – inicial) (ΔS) = Cero (en realidad = ε , 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.

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.

III. 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 hidrológicos e hidrogeológicos recopilados en las etapas anteriores.

i. 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.

ii. 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, cada una de estas capas representa las unidades localizadas en el área de estudio, la discretización de los aproximadamente 289.7 Km² del área se realizó mediante una malla uniforme y rectangular de 155 filas y 115 columnas, cada celda posee una superficie de 40000 m² (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 y a la gran densidad de puntos de bombeo.

iii. Mecanismos de Recarga y Descarga

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.

iv. Condiciones de Frontera

El área simulada está acotada al norte por la margen izquierda del río Tuluá, definido como de frontera de río, por tanto, de potencial variable en el tiempo. 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. 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.

v. Patrones de Variabilidad Espacial de los Parámetros

Las capas se consideraron individualmente como medios isotrópicos. Los valores iniciales de entrada para las capas del modelo se muestran en la Tabla 3.

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

Capa	Kx (m/día)	Ky (m/día)	Kz (m/día)	Ss (1/m)	Sy (m/m)	Por Eff	Por Tot
Z1	7	7	7	3.5×10^{-5}	0.21		
1	Z2	12	12	5.5×10^{-5}	0.26	0.15	0.25
	Z3	24	24	7.5×10^{-5}	0.27		
	Z4	50	50	7.5×10^{-5}	0.27		
2	Ar	0.001	0.001	1×10^{-5}	0.02	0.02	0.45
	Me	5	5	5.5×10^{-5}	0.25	0.10	0.40
3	50	50	50	7.5×10^{-5}	0.27	0.25	0.30

$K_{x,y,z}$ = Conductividad Hidráulica sobre el eje

S_y = Coeficiente de almacenamiento

Por Tot = Porosidad Total

S_s = Almacenamiento específico

Por Eff = Porosidad Efectiva

Z = Zonas diferenciadas en el modelo

vi. 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 un comportamiento del sistema subterráneo en régimen casi permanente o estático, con un sentido de flujo en dirección este - oeste.

IV. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

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, 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.

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

ii. 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 5). 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.

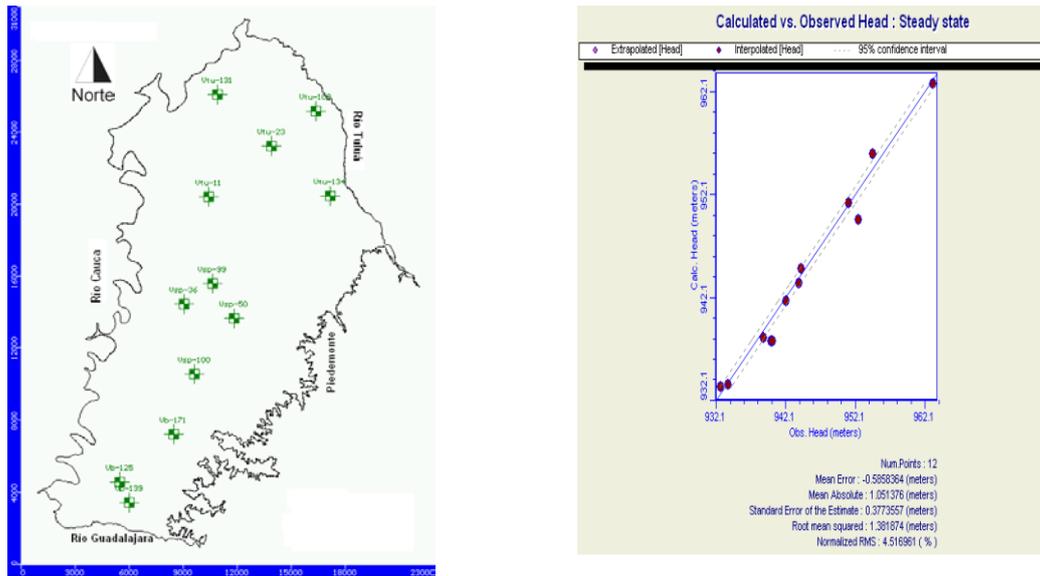


Figura 5. Distribución de los pozos de observación y gráfico de calibración del modelo

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 medio cuadrado de 4.51%, como se muestra en la Figura 5.

V. 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.

i. Variación en la Recarga

Para realizar las variaciones en la recarga, en la cual se indican cambios en las condiciones climáticas principalmente, 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. 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.

ii. 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. 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.

VI. 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 6, muestran que las principales fuentes de recarga son los ríos Tuluá y Guadalajara, los cuales limitan la zona en los extremos norte y sur respectivamente. Como zona de descarga se encuentra el río Cauca, quien en el escenario más crítico de explotación presenta un ligero comportamiento de recarga sobre algunas zonas de mayor demanda. En general las direcciones de flujo se dirigen en sentido este – oeste, con desviaciones hacia el área central de la zona en la que se presenta la mayor densidad de pozos de bombeo.

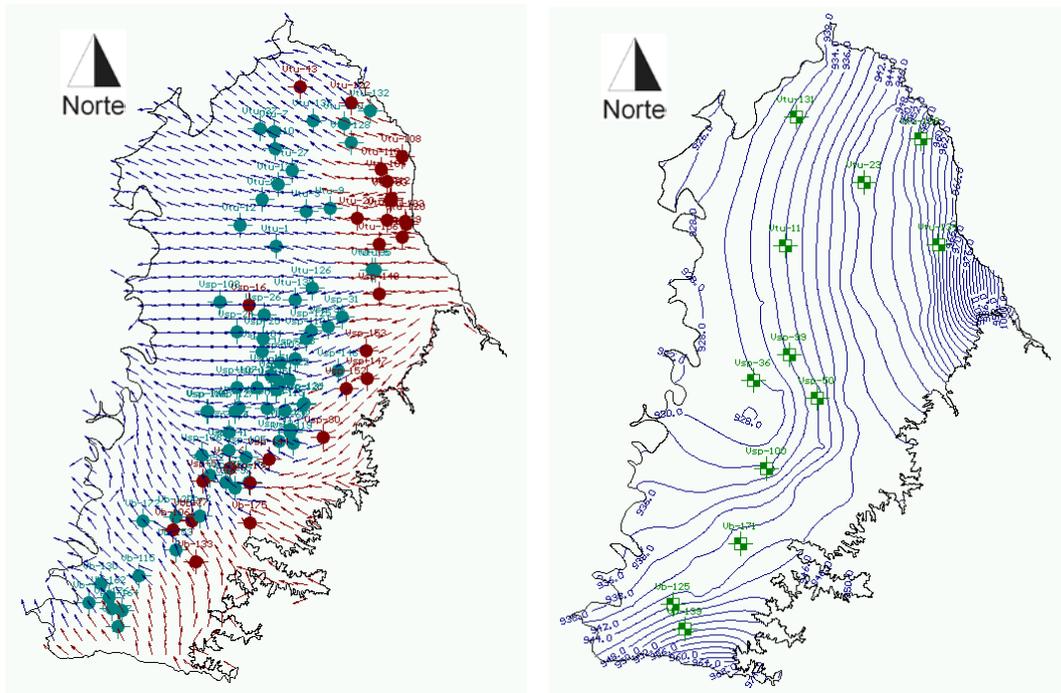


Figura 6. Mapa de direcciones de flujo y líneas piezométricas (Escenario normal)

Los mapas de líneas piezométricas, al igual que las direcciones de flujo, muestran el comportamiento de los niveles piezométricos 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.

i. 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 aumento en 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.

Las direcciones de flujo para estos escenarios en los cuales 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, se presenta una 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 y áreas críticas se pueden apreciar en la Figura 7.

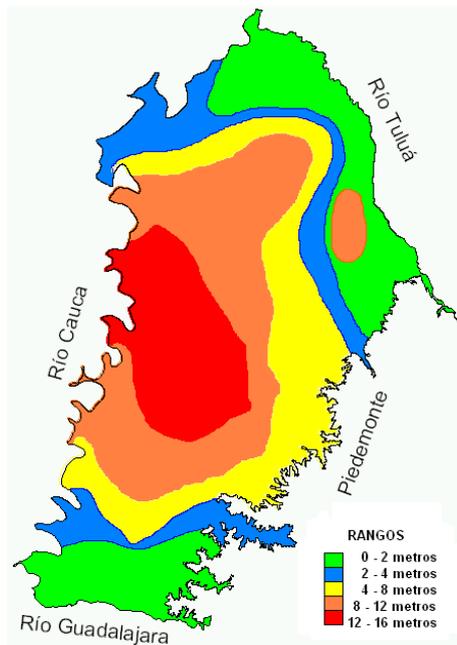


Figura 7. Mapa de niveles de descenso

ii. Cortes

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 8), lo cual de ser estudiado con mayor detalle y confirmado, ya que este representaría 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 9.

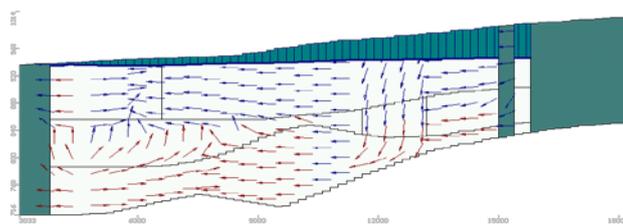


Figura 8. Comportamiento de las líneas de flujo

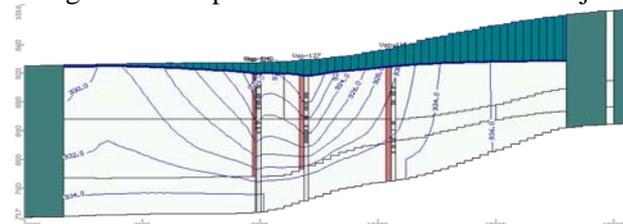


Figura 9. Comportamiento de las líneas piezométricas

VI. CONCLUSIONES

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 (ríos 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.

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.

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.