

Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela)

A conceptual hydrogeological model for the assessment of groundwater resources in the river motatán floodplain (Venezuela)

Mejías D. Jesús E.¹, Jégat N. Hervé J.², Mora M. Luis E.² y Linares S. Miguel A.³

Recibido: abril, 2008 / Aceptado: marzo, 2010

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero ubicado en la planicie aluvial del río Motatán, localizada al occidente del país, en la costa oriental del lago de Maracaibo, con superficie aproximada de 1.462 km². El modelo permitió obtener las reservas permanentes y, posteriormente, se usó para la obtención del modelo matemático, con el que se podrán modelar escenarios de explotación. El agua subterránea es fundamental para el desarrollo de los sistemas de producción agrícola vegetal y animal, agroindustrial y petrolero que se dan en la planicie. En la construcción del modelo se aplicaron técnicas geoestadísticas para el estudio de variables espaciales, en este caso particular, espesores litológicos y niveles piezométricos. Las reservas permanentes calculadas son de aproximadamente 17 millardos de m³, tomándose un valor promedio de porosidad efectiva del 20 %, debido a escasez de ensayos de bombeo que permitieran calcular un valor real.

Palabras clave: Acuífero; modelo conceptual; reservas; geoestadística; río Motatán.

Abstract

The objective of the present study is the elaboration of a conceptual hydrogeological model of the river Motatán aquifer, located on the eastern shore of the Maracaibo Lake. The groundwater resources were assessed through this conceptual which later was used to build a mathematical model in order to simulate various extraction scenarios. The agricultural and industrial development of the river Motatán floodplain is based on the use of groundwater resources. Geostatistical techniques were used to elaborate the hydrogeological parameters maps, particularly for the layers thickness and the piezometric levels. The permanent water resources reserves were estimated in about 17 billions of cubic meters, using an average value of 20 % for the specific yield due to the availability of very few pumping tests to assess a more realistic value of this parameter.

Key words: Aquifer; conceptual model; groundwater reserves; geostatistic; Motatán river floodplain.

1 Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario 'Rafael Rangel', Departamento de Ingeniería. Trujillo-Venezuela. Correo electrónico: jmejias@ula.ve

2 Universidad de Los Andes. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida-Venezuela. Correo electrónico: hjegat@ula.ve; luismora@ula.ve

3 Avenida Urdaneta. Municipio Libertador. Mérida-Venezuela. Correo electrónico: miguel_linares79@hotmail.com

1. Introducción

La planicie aluvial del río Motatán representa una superficie de gran valor agrícola y pecuario, y ahora petrolero, para los estados Trujillo y Zulia; esta zona cuenta con grandes asentamientos campesinos que no disponen en su totalidad de los beneficios que les reporta un sistema de riego. Las fuentes de agua superficiales allí existentes, la representa principalmente el río Motatán, el cual abastece el sistema de riego el Cenizo; el resto de la planicie basa su desarrollo creciente en la extracción de agua del acuífero. Es por esta razón que la búsqueda e investigación de los recursos de aguas subterráneas para la evaluación de sus reservas, su explotación y su conservación es de vital importancia para el desarrollo económico de la región.

Las aguas subterráneas representan entonces una fuente de agua suplementaria, generalmente de mejor calidad que las aguas superficiales. Aunado a la escasez de fuentes de agua dulce de fácil acceso, hacen de su localización y monitoreo una actividad de vital importancia en el mundo actual. Es aquí donde los modelos conceptuales, en principio, y matemáticos calibrados, resultan ser fundamentales, ya que constituyen la herramienta básica a través de la cual se puede evaluar y predecir el comportamiento de los niveles de agua de tan importantes reservorios de agua dulce.

2. Descripción del área bajo estudio

2.1 Ubicación y extensión

La planicie aluvial del río Motatán se localiza al occidente del país, en la costa oriental del lago de Maracaibo. El área conforma una unidad que territorialmente corresponde a dos entidades federales: Trujillo y Zulia. Administrativamente, pertenece a los municipios la Ceiba, Andrés Bello, parte de los municipios Miranda, Sucre y Bolívar de Trujillo y, parte del municipio Baralt del Zulia y se enmarca entre los $09^{\circ} 16' 00''$ y $09^{\circ} 43' 15''$ latitud Norte y $70^{\circ} 38' 27''$ y $71^{\circ} 03' 26''$ longitud Este, con una superficie aproximada de 1.462 km²; hidrográficamente se corresponde con la margen derecha-izquierda del río Motatán (Figura 1).

2.2 Topografía

La altitud del área de estudio varía de 0 a 50 msnm con pendientes inferiores al 5%, disminuyendo en dirección este-oeste, con promedios que oscilan entre 0,1 y 0,3%, y en dirección norte-sur posee pendientes promedio de 0,7%.

2.3 Fisiografía

La cuenca hidrográfica se caracteriza por poseer una topografía joven en el área montañosa y planicies aluviales, después de que los ríos emergen del frente montañoso. El nivel más viejo se extiende a más de 2.000 msnm, en las terrazas de Tuñame. La topografía es abrupta o casi plana, con pocas planicies que se inclinan

fundamentalmente de la erosión de las rocas que constituyen las formaciones Betijoque e Isnotú, y de los conos y terrazas pleistocenas (Vergara, 1977, citado por MARNR, 1992).

Según investigaciones de Araujo y Rodríguez (2002), la geología regional y local, así como la litología de las formaciones geológicas piedemontinas relacionadas con el área de estudio, es como se expresa a continuación:

- *Geología regional*

La unidad fisiográfica que enmarca la planicie aluvial del área en estudio se corresponde con la depresión tectónica de la cuenca del lago de Maracaibo, cuyos orígenes se relacionan con el levantamiento post-eoceno de la sierra de Perijá y la cordillera andina venezolana.

Durante amplios y diversos períodos erosivos y deposicionales, esta cuenca ha recibido los aportes de más de 1.000 m de espesor, con edades que oscilan desde el Cretáceo, con afloramientos que se ubican hacia los límites noreste y sureste de la cuenca, hasta el Cuaternario Reciente, cuyos aluviones cubren actualmente gran parte de la misma.

- *Geología local*

La actual planicie aluvial que conforma la totalidad del área en estudio tiene su origen en procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos que, desde el Oligoceno hasta nuestros días, han contribuido al relleno progresivo de esa cuenca de subsistencia.

Los aportes sedimentarios provienen principalmente del piedemonte terciario y cuaternario constituido por las formaciones Betijoque, Isnotú y Palmar, y las terrazas y conos del Pleistoceno; así como de las diversas formaciones que atraviesa el río Motatán, entre las que destacan: Sierra Nevada, los Torres, Mucuchachí, Cogollo, Apón, la Luna, Isnotú, Betijoque y Aluviones Cuaternarios.

2.5 Geomorfología

Según Buitrago y Rangel (1988), la zona de estudio corresponde a la región fisiográfica de la depresión del lago de Maracaibo; se ubica sobre un paisaje de planicie aluvial con pendientes menores del 3%, que tienden a disminuir a medida que se avanza hacia el litoral lacustrino. Se distingue, dentro de este paisaje de planicie, una franja paralela a la costa suroccidental del lago de Maracaibo, con un ancho aproximado de 2.000 m denominada margen cenagosa y cuyas pendientes son las de menor valor en el área.

Desde el punto de vista geomorfológico, la dinámica fluvial en la planicie se expresa a través de procesos deposicionales de alta selección granulométrica que originan en el paisaje diversas posiciones geomorfológicas. Esta selección granulométrica actúa depositando los materiales como arenas y limos, cerca de los ejes de aporte, hacia las zonas más elevadas del terreno, mientras que los materiales con alta proporción de limos y arcillas se depositan en las zonas intermedias y más bajas, respectivamente. Existiendo pre-

sencia de depósitos por explayamiento y depósitos por desborde, cada uno con posiciones geomorfológicas características.

2.6 Suelos

Con base en lo expuesto por Leotaud y Moreno (1980) y Buitrago y Rangel (1988, citados por Araujo y Rodríguez, 2002), los suelos del área, predominantemente, presentan texturas medias y pesadas. Corpoandes-Ecosa (1975) señalan que, por el Sistema de la Séptima Aproximación, los suelos existentes pertenecen a los órdenes entisoles e inceptisoles, desarrollados sobre acumulaciones aluviales recientes. El primero de estos órdenes se asocia con suelos muy jóvenes, sin desarrollo de un perfil con horizontes típicos, mientras que los suelos correspondientes al segundo orden mencionado tienen el comienzo de un horizonte típico.

Por otra parte, los bajos contenidos de materia orgánica (CO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) presentes en algunos sectores, le dan características de baja fertilidad natural, con pocos nutrientes; requieren de dosis controladas de fertilizantes para un mejor aprovechamiento, así como un adecuado manejo de los suelos que permita la recuperación de los mismos.

2.7 Hidrografía

Según información tomada de Mejías (2005), la red hidrográfica del área de estudio está constituida por ríos que presentan un régimen de tipo permanente y

otros de régimen intermitente o esporádico que se comportan torrencialmente en los períodos de máxima precipitación. Entre los principales cursos de agua de la zona destacan los ríos Motatán y la Vichú, y entre los cursos menores, los caños Carrillo, Palmira, el Albarical y Mimbocito, tal como se muestra en la figura 2.

Por su caudal y extensión, el río Motatán es el más importante de la zona; nace en los páramos andinos a más de 4.000 msnm. Atraviesa toda la planicie aluvial del área de estudio en sentido este-oeste para desembocar en el lago de Maracaibo, donde ha formado un extenso delta de acumulación progresiva. Este río de flujo permanente ha sido canalizado en sus últimos 13 km de recorrido por la planicie, aunque aún ocasiona problemas de inundación en los períodos de máxima precipitación, afectando zonas de cultivo adyacentes a su cauce.

El río la Vichú nace en el piedemonte, donde concentra la mayor parte de su cuenca de captación, por la unión de las quebradas la Vichú y San Alejo. Durante los períodos de máxima precipitación, este río se comporta torrencialmente, presentando procesos de erosión y arrastre de gran cantidad de sedimentos hacia las zonas bajas de la planicie al sur del río Motatán. Los caños Carrillo, Palmira, el Albarical y Mimbocito nacen en la planicie aluvial, son caños secundarios intermitentes que se alimentan exclusivamente de las aguas de drenaje y permanecen con mínimo caudal la mayor parte del año.

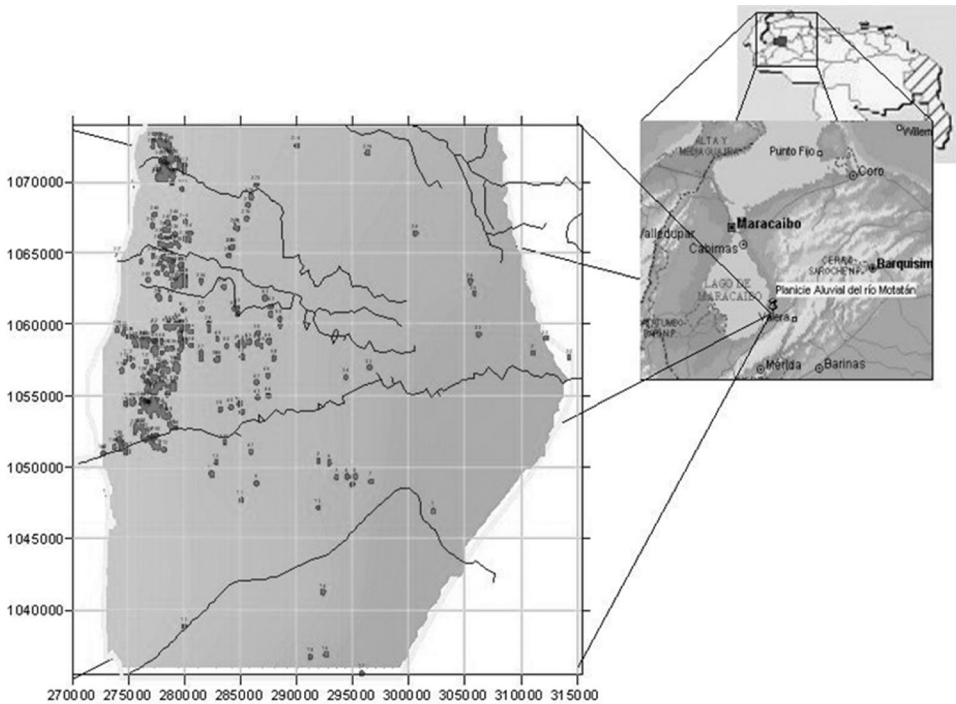


Figura 2. Red hidrográfica de la planicie aluvial del río Motán (vista W-E)

3. Metodología aplicada para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual

3.1 Procesamiento de la información litológica

La descripciones litológicas de los diferentes pozos perforados obtenidas durante la recopilación de información básica de SHT (1994, citado por GISA, 1997), carecía de uniformidad, en algunos pozos muy detallada, en otros muy general. Por ello fue necesario uniformizar criterios, ya que en gran número de oportunidades no era posible comparar y correlacionar ciertas capas de un pozo a

otro. Esto se logró realizando una visualización de los pozos a través de la elaboración de secciones transversales y paneles de correlación que permitían corroborar la descripción litológica de un pozo con respecto a los pozos adyacentes.

3.2 Elaboración de secciones transversales y paneles de correlación

Con la información correspondiente a la localización espacial de los pozos (coordenadas UTM) y la utilización del software Ground Water for Windows (GWW), se elaboraron secciones transversales con el propósito de visualizar e identificar la

secuencia vertical de las capas que componen el área de estudio (Figura 3).

Posteriormente, la unión de varias de estas secciones transversales en ciertos puntos definidos previamente, facilitaron la creación de paneles de correlación de una determinada zona del área de estudio; estos paneles de correlación permitieron obtener una idea del comportamiento de las distintas secuencias litológicas, ya no sólo a lo largo de una línea o sección sino a través de todo un bloque diagramático en tres dimensiones del área seleccionada (Figura 4).

3.3 Elaboración de la base de datos

Basándose en la información obtenida de las secciones transversales y los bloques diagramáticos se pudo construir una

base de datos de forma tal que pudiese ser utilizada en los distintos programas que se emplearon en la creación del modelo (Surfer 8.0, Variowin y Visual ModFlow 3.0). El cuadro 1 muestra parte de esta base de datos donde:

- Id.P Identificación o número del pozo.
- X Coordenadas UTM en la dirección este
- Y Coordenadas UTM en la dirección norte
- Z Cota del terreno
- BC1, BC2, BC3, BC4, BC5, BC6, BC7 Cotas de profundidad de la base de cada una de las capas definidas.

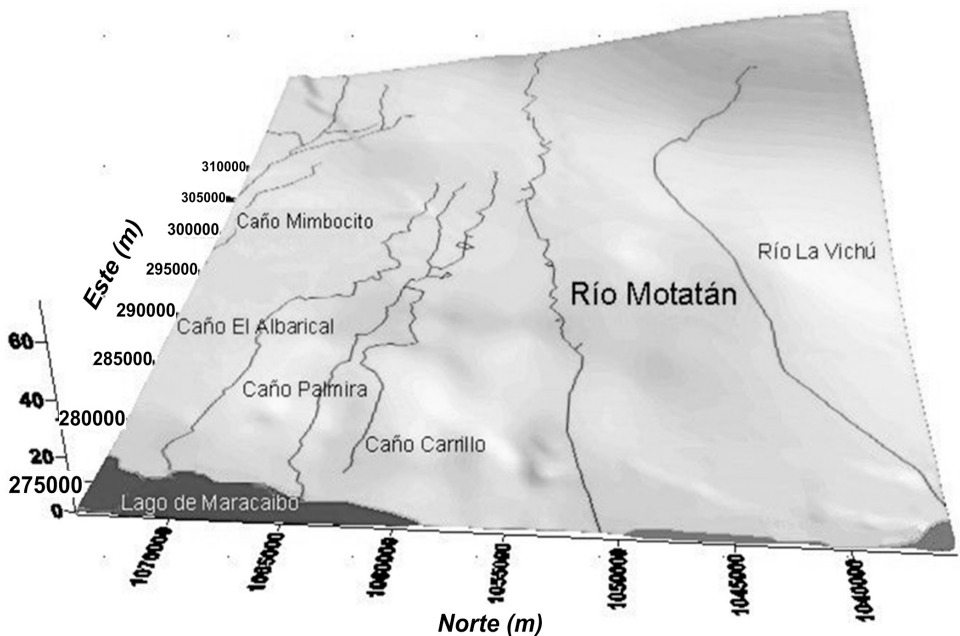


Figura 3. Sección transversal

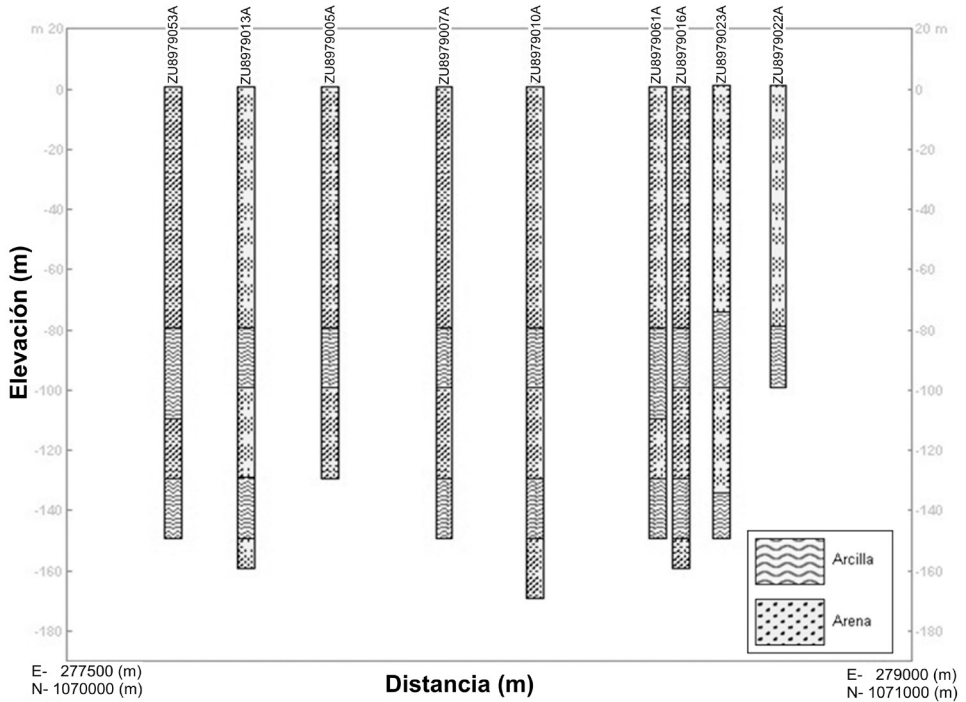


Figura 4. Bloque diagramático en 3D

Cuadro 1. Base de datos

Id.P	X	Y	Z	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5	BC6	BC7
1	302223	1046939	48,83	40,83	29,83	23,83	3,83	-6,17	-16,17	-46,17
2	291961	1050435	17,97	9,97	-19,03	-25,03	-58,03	-67,03	-82,03	-92,03
3	293572	1049289	21,55	13,55	-15,45	-21,45	-54,45	-63,45	-78,45	-88,45
4	294487	1049346	22,65	14,65	-14,35	-20,35	-53,35	-62,35	-77,35	-87,35
5	292937	1050307	18,82	10,82	-18,18	-24,18	-57,18	-66,18	-81,18	-91,18
6	295250	1049342	24,36	16,36	-12,64	-18,64	-51,64	-60,64	-75,64	-85,64
7	296651	1048996	26,65	18,65	-10,35	-16,35	-49,35	-58,35	-73,35	-83,35

3.4 Elaboración de mapas de contorno para las bases de cada una de las capas

3.4.1 Análisis estructural de la variable

A partir de la base de datos creada, y con la utilización del software Surfer 8.0, fue posible la creación y visualización de los

mapas de contorno de cada una de las bases de las capas que conformaban la secuencia litológica, y la construcción y visualización del modelo hidrogeológico en tres dimensiones. Para la elaboración de los mismos fueron aplicadas las técnicas geoestadísticas necesarias para la obten-

ción de semivariogramas experimentales y el posterior ajuste de alguno de los modelos teóricos.

Para la obtención de los semivariogramas experimentales se utilizó el software Variowin, el cual permite la visualización y el análisis estructural de la variable (Figura 5).

3.4.2 Definición de la malla del modelo

Para la interpolación de la malla fueron asignados los siguientes parámetros a la geometría del mallado o del 'Grid':

X Mínimo: 272713
 X Máximo: 314326
 Espaciamiento de X: 420.333333333333
 Y Mínimo: 1035542

Y Máximo: 1074246

Espaciamiento de Y: 420.69565217391

El programa asigna las coordenadas límite a través de la base de datos y asigna el número de filas y columnas así como el espaciamiento de X e Y. Todos estos parámetros pueden ser ajustados de acuerdo a las necesidades del estudio.

3.4.3 Obtención de mapas a través del kriging

A partir de los semivariogramas ajustados se obtuvieron los mapas de contorno y de superficie en 3D, del terreno y las bases de cada una de las capas definidas a través de la aplicación de las ecuaciones del kriging ordinario (Ecuación 1).

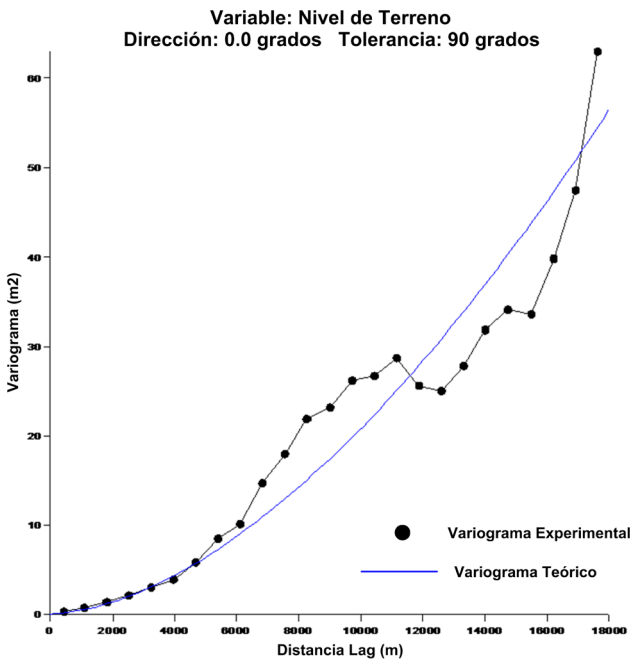


Figura 5. Semivariograma experimental y teórico ajustado del terreno

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z_i \tag{1}$$

3.4.4 Blanqueo de mapas

La interpolación crea una malla rectangular, pero no siempre el área de estudio ha de ser así, por lo tanto, es necesaria la aplicación de una técnica conocida como blanqueo de mapas, la cual consiste en delimitar mediante un polígono, la zona de estudio para, posteriormente, eliminar o simplemente blanquear las zonas que no sean de interés, ya sea ésta dentro o fuera del polígono creado. En las figuras 6 y 7 se muestra como ejemplo, el mapa de contornos y de superficie en 3D, respectivamente, generado para la superficie del terreno.

3.5 Modelo hidrogeológico conceptual

Con el mismo proceso que se usó para generar el mapa de contorno y superficie en 3D del terreno, se elaboraron los correspondientes a cada una de las bases de las capas del acuífero. Luego cada uno de estos mapas fue importado al software Visual ModFlow 3.0, así como los parámetros que definen la geometría de la malla para generar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.

En la figura 8 se muestra el modelo conceptual obtenido para el acuífero en estudio, generado en el programa mencionado; el color verde, indica los límites

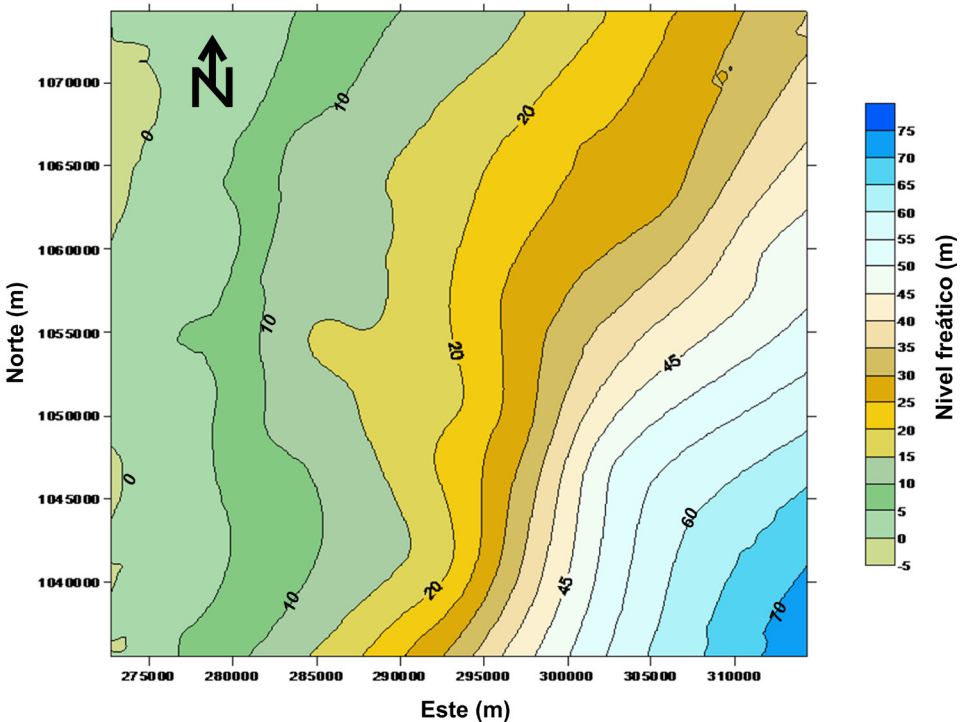


Figura 6. Mapa de contornos de la superficie del terreno

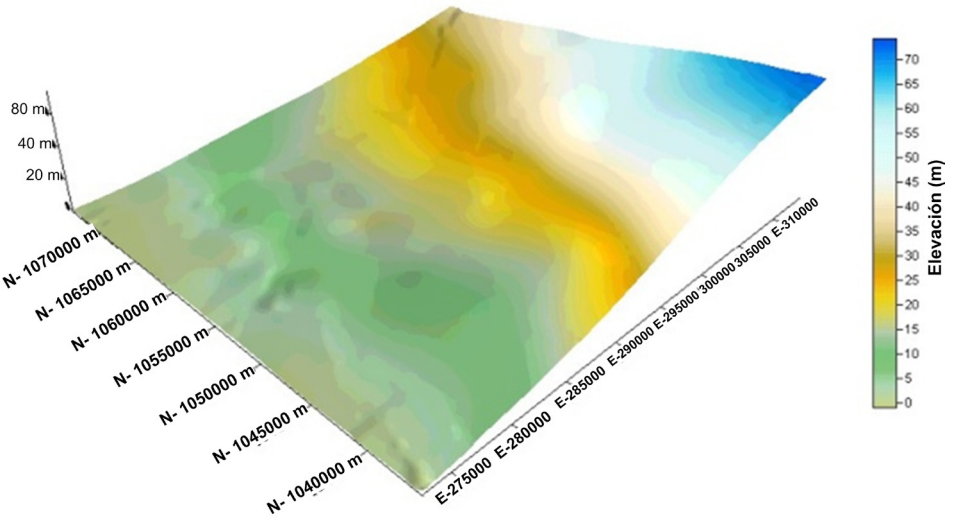


Figura 7. Superficie en 3D de la superficie del terreno

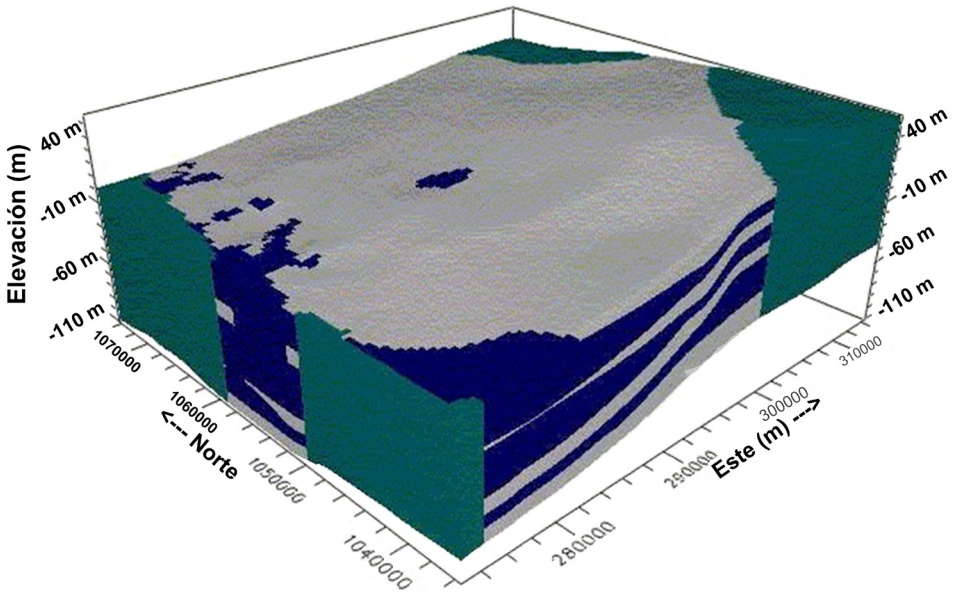


Figura 8. Modelo hidrogeológico conceptual en 3D

del acuífero; el azul, las zonas o capas permeables y el gris las impermeables, respectivamente.

4. Cálculo de reservas permanentes

4.1 Elaboración de un mapa piezométrico

La elaboración del mapa piezométrico aporta un dato dimensional muy importante para el cálculo de las reservas y de sus variaciones, ya que permite identificar a escala regional o local las características del movimiento de las aguas subterráneas y permite definir la zona permeable saturada. Se utilizó para la

elaboración del mapa los niveles obtenidos de la campaña de medición efectuada en el mes de agosto de 1999. Fueron utilizadas para la elaboración de este mapa (Figura 9) las mismas técnicas geoestadísticas con las cuales se obtuvieron los mapas de cada una de las superficies de las capas del modelo.

4.2 Cálculo de volúmenes

A través del software Surfer 8.0 es posible calcular el volumen total de las capas definidas como permeables definidas en el modelo hidrogeológico numérico; en estricto orden de ocurrencia, estas serían la capa 2, la capa 4 y la capa 6.

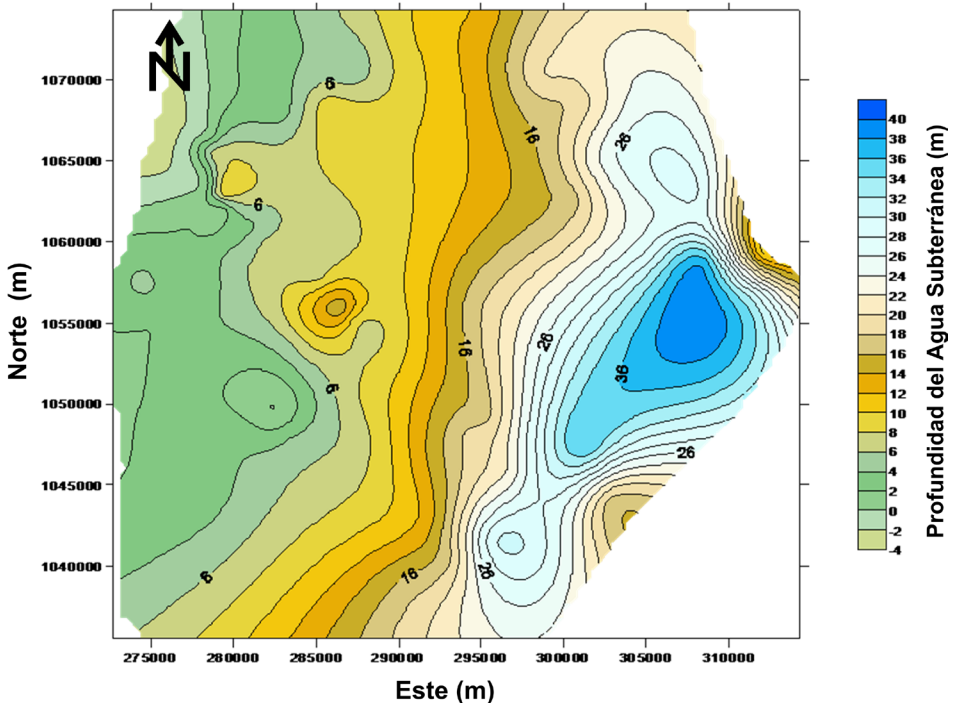


Figura 9. Mapa de contornos de los niveles piezométricos

Volumen Total Permeable = $8,869563 \times 10^{10} \text{ m}^3$

Con la utilización del mapa piezométrico es posible identificar zonas no saturadas en la capa 2. El software Surfer 8.0 permite calcular los volúmenes donde las capas permeables no están saturadas, es decir, que se encuentran por encima del nivel freático.

Volumen Total

Permeable Saturado = $8.673707 \times 10^{10} \text{ m}^3$

A partir de la tabla de porosidades totales y eficaces de diversos materiales, según Johnson (1967; Davis, 1969; Schoeller, 1962 y Ward, 1967; citados por Linares, 2003), la porosidad eficaz media correspondiente al tipo de material que se encuentra en el área de estudio (Roca Sedimentaria Suelta-Aluviones) es del 20%. Este valor se ha asumido como una estimación representativa de la porosidad eficaz para el cálculo de las reservas permanentes.

Con base al valor de porosidad efectiva asumido se tiene:

Volumen de Reservas

Permanentes = $1.734741 \times 10^{10} \text{ m}^3$

El volumen de reservas permanentes vendría a representar entonces, el volumen de agua libre almacenado en la capa acuífera que pudiese ser extraído, limitado en la base por el substrato impermeable y en el techo por la superficie piezométrica.

5. Conclusiones

Los procedimientos empleados en el análisis geoestadístico, validados en el estudio de otros acuíferos, resultaron apropiados para realizar el análisis estructural de las diferentes variables estudiadas y el de su comportamiento espacial.

Existe consistencia en los valores obtenidos del procesamiento de las variables: superficie del terreno, capas y niveles piezométricos, en las zonas del acuífero donde existe información básica, en cantidad y calidad, referente a topografía, litología, ubicación de filtros y niveles observados.

El uso adecuado de los programas de computación utilizados: Ground Water for Windows (GWW), Variowin, Surfer 8.0 Visual ModFlow 3.0, permitió la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero en estudio.

El volumen de reservas permanentes, que representa el volumen de agua libre almacenado en la capa acuífera que pudiese ser extraído, limitado en la base por el substrato impermeable y en el techo por la superficie piezométrica o freática, se obtuvo a partir del modelo hidrogeológico conceptual de acuífero, y se determinó su magnitud en $1,734741 \times 10^{10} \text{ m}^3$.

6. Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes (ULA), Ve-

nezuela, por el financiamiento de este trabajo en el proyecto NURR-C-287-00-02-C.

7. Referencias citadas

- ARAUJO, L. y N. RODRÍGUEZ. 2002. *Análisis espacial de la salinidad de las aguas subterráneas del acuífero ubicado en la planicie aluvial del río Motatán, estado Trujillo*. Tesis de pregrado. Departamento de Ingeniería. Núcleo Universitario 'Rafael Rangel'. Universidad de Los Andes. Trujillo-Venezuela.
- BUITRAGO, J. y O. RANGEL. 1988. *Clasificación de tierras con fines agrícolas en la planicie aluvial del río Motatán*. Trujillo-Venezuela.
- CORPOANDES-ECOSA. 1975. *Estudio hidrológico y edafológico semidetallado planicie aluvial Cáus-Pocó*. Estado Trujillo-Venezuela.
- GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE SUELOS Y AGUAS (GISA). 1997. *Informe técnico de aforamiento de pozos. Proyecto 3D La Ceiba*. Grupo de Investigación de Suelos y Aguas. Núcleo Universitario 'Rafael Rangel'. Universidad de Los Andes. Trujillo-Venezuela.
- LINARES, M. 2003. *Evaluación de la disponibilidad del recurso agua subterránea en el acuífero de la planicie aluvial del río Motatán*. Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 112 p. (Inédito).
- MARNR. 1992. *Plan de uso y evaluación del embalse Agua Viva, estado Trujillo*. Serie de Informes Técnicos-DGI/IT/450. (Elaboró: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial). Mérida, Venezuela. 364 pp. + anexos.
- MEJÍAS, J. 2005. *Evaluación integral de la disponibilidad de agua subterránea en la planicie aluvial del río Motatán. Estado Trujillo*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Vicerrectorado Académico. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado de Magister Scientiae, 171 p. (Inédito).
- RODRÍGUEZ, R. 1986. *Simulación del comportamiento del acuífero de la cuenca baja del río Motatán*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Vicerrectorado Académico. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado de Magister Scientiae, 115 p. (Inédito).