
LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN LOS ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS DOS CASOS DE ESTUDIO EN AMÉRICA LATINA

•

Quiroz Mauricio ¹
Escobar John ²
Martinez Daniel ³
Betancur Teresita⁴
Massone Hector ⁵

•

Recibido: 16/08/2007

Aceptado: 27/08/2007

Resumen

En los estudios de aguas subterráneas, se genera y recopila gran cantidad de datos, que necesariamente deben ser procesados y analizados de manera conjunta, buscando encontrar relaciones y/o patrones con los que se definen modelos conceptuales y numéricos adecuados para explicar de forma coherente el funcionamiento hidrogeológico de una zona específica. Acorde con lo anterior, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se plantean como una de las herramientas básicas del hidrogeólogo, ya que permiten de una manera fácil y dinámica, almacenar, analizar y visualizar datos e información, así como el análisis de su comportamiento en las dimensiones espacial y temporal. No obstante, la utilización de los SIG en los proyectos hidrogeológicos se ha limitado, en muchos casos, a la elaboración de

¹ Geólogo, especialista en Sistemas de Información Geográfica y aspirante a doctor en Ciencias Geológicas. Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, U.N.MDP, Casilla de Correo 722, (7600), Mar del Plata, Argentina. T.E. +54 223 4754060, FAX +54 223 4753150. e-mail: qlondono@mdp.edu.ar

² Ing. de Petróleos, magíster en Ingeniería Medio Ambiente y Desarrollo y aspirante a doctor en Ingeniería. Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108, oficina 20-249, Medellín, Colombia. T.E. +57 4 2105596, FAX: +574 2638282 e-mail: jfescob@yahoo.com

³ Geólogo, doctor en Ciencias Geológicas. CONICET y Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, U.N.MDP, Casilla de Correo 722, (7600), Mar del Plata, Argentina. T.E. +54 223 4754060, FAX +54 223 4753150. e-mail: demarti@mdp.edu.ar

⁴ Geóloga, Msc. en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y aspirante a doctora en Ingeniería. Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108, oficina 20-249, Medellín, Colombia. T.E. +57 4 2105596, FAX: +574 2638282 e-mail: ptebv787@udea.edu.co

⁵ Geólogo, doctor en Ciencias Geológicas. Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, U.N.MDP, Casilla de Correo 722, (7600), Mar del Plata, Argentina. T.E. +54 223 4754060, FAX +54 223 4753150. e-mail: hmassone@mdp.edu.ar

la cartografía de las diferentes unidades hidrogeológicas incluidas dentro del área de estudio y la ubicación de diferentes mediciones y parámetros relacionados con el recurso hídrico subterráneo, en detrimento de sus capacidades para el análisis de fenómenos espaciales complejos en los cuales intervienen múltiples variables. El presente trabajo presenta dos ejemplos de aplicación en Latinoamérica en los que los sistemas de información geográfica han ayudado en la modelación y preprocesamiento de los fenómenos y variables involucradas, además de la tradicional identificación de las características esenciales de los acuíferos.

Palabras clave

Sistemas de información geográfica, modelación hidrogeológica, aguas subterráneas, aplicaciones SIG

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AS A SUPPORTING TOOL IN HYDRO-GEOLOGICAL STUDIES. TWO CASE STUDIES IN LATIN AMERICA

Abstract

In underground water studies, a big amount of data is generated and compiled: these data should be jointly processed, correlated, and analyzed in order to look for relations and /or patterns through which appropriate conceptual and numerical models are defined for explaining, in a coherent way, hydro-geological functioning in a specific zone.

Geographic Information Systems (GIS) must be considered as one of the basic tools of hydro-geologists, because they allow storing, analyzing, and visualizing data and information in an easy and dynamic way, as well as the analysis of their behavior in both spatial and temporal dimensions. However, in many cases, the use of GIS in hydro-geological projects has been limited to both the elaboration of cartography of different hydro-geological units included in the study area and to the location of different measurements and parameters related to underground water resources, without taking advantage of their capabilities for the analysis of complex multivariate spatial phenomena.

The present research presents two GIS application examples in Latin America which have helped in the modeling and pre-processing of the phenomena and the involved variables, in addition to the traditional identification of different essential characteristics of aquifers.

Key Words

Geographic Information System, Hydro-geological Modeling, underground water, GIS application

INTRODUCCIÓN

La hidrogeología es la disciplina que se ocupa del estudio de las aguas subterráneas y de las características de los medios en los cuales ellas se almacenan y circulan. La investigación hidrogeológica básica se realiza mediante la aplicación de técnicas convencionales que permiten determinar las condiciones geométricas e hidráulicas de un acuífero, y plasmarlas en un modelo conceptual del sistema. Mediante la utilización de herramientas avanzadas para el procesamiento y modelación de información geoespacial, entre ellas los sistemas de información geográfica -SIG-, se logra una mejor aproximación al entendimiento de los sistemas acuíferos y a la validación de los modelos conceptuales.

El continuo avance de los sistemas de información geográfica permite que ellos cumplan una función central en la modelación hidrogeológica en lo referente al preprocesamiento de los datos y postprocesamiento de los resultados, en acciones que incluyen la compilación de los parámetros del modelo, la determinación de la geometría del sistema, la modelación de la variación de recarga con el tiempo, la calibración a partir de los datos de campo, la creación de modelos digitales de terreno -DTM- a partir de nivelaciones freáticas y piezométricas para la determinación de sistemas de flujo y el despliegue más claro de los resultados del modelo para operarlos con otros datos espaciales.

Desafortunadamente, es común observar cómo los SIG se han utilizado, en el ámbito hidrogeológico, solo con el objetivo de presentar de manera clara la información final obtenida en diferentes estudios y, en pocas ocasiones, se ha utilizado su potencial para el cruce de algunas capas de información. Esto limita el concepto general de un SIG, pues éstos fueron concebidos para ser elementos de apoyo en el análisis de fenómenos espaciales complejos y, por tanto, deben aportar no

solo en la edición final de los resultados cartográficos sino también, colaborar activamente en la búsqueda de los objetivos planteados, inclusive más allá del proyecto por el cual fueron originados. Podría decirse que en muchos de los proyectos hidrogeológicos y, por ende, en las acciones de los gestores de esta temática, se está perdiendo una valiosa posibilidad para integrar datos, información y métodos, que pueden ayudar a mejorar la comprensión de los sistemas hidrogeológicos a diferentes escalas.

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.

Si bien los SIG poseen una serie de facilidades que pueden utilizarse en los estudios hidrogeológicos, la integración completa de ellos y un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas puede ser difícil y requiere de la inversión de mucho tiempo; para lograrlo es necesario conocer bien la estructura de datos, estar familiarizado con los formatos de entrada de datos y salida de resultados y poseer cierto nivel de conocimientos en programación. En general, pueden plantearse tres tipos de integración (Watkins et al, 1996):

1. Modelos ligados (GIS linked). En este tipo el SIG y el modelo son básicamente autónomos, pero están unidos por uno o varios programas de interfaz, los cuales cumplen la función principal de convertir los datos desde el SIG a un formato que pueda ser leído por el modelo y luego reformatear las salidas para ingresarlas a la base de datos del SIG.
2. Modelos integrados (GIS Integrated). En este tipo el usuario interactúa solo con el SIG o con el modelo de aguas subterráneas en forma transparente. En los modelos integrados

se utilizan programas para transferir y reformatear datos en forma similar al caso anterior, pero ellos están ocultos al usuario y por lo general solo se requiere de una base de datos.

3. Modelos embebidos (GIS Embedded). En este caso se utilizan las capacidades de modelamiento del SIG y no se requiere conversión de datos, ya que el usuario interactúa directamente con el SIG y con el modelo. Existen por lo menos dos tipos de modelos de aguas subterráneas en un SIG con estructura de datos raster: uno plantea modificaciones al SIG fuente, de manera que crea funciones para flujo y transporte de aguas subterráneas, y el otro propone una serie de macros que ejecutan sucesivas iteraciones de cálculos mediante álgebra de mapas, semejantes al método de diferencias finitas de bloque central.

Existe una extensa lista de referencias de aplicaciones mejoradas de los SIG en el modelamiento hidrogeológico cuya revisión exhaustiva puede exceder la extensión razonable de este artículo, por tanto, se referencian solo algunos de los avances registrados por la literatura especializada en los dos últimos años, las cuales pueden agruparse con fines ilustrativos en los siguientes ejes temáticos:

1. Aplicaciones tradicionales en las cuales los SIG ejercen un rol de intermediario en la producción de “datos de entrada”; algunos ejemplos son:
 - El modelo basado en SIG para estimar la recarga y fronteras en el nivel de mesoescala en un área de 14.000 km² compuesta por 14 cuencas superficiales en el suroeste de Nevada - EUA (Minor et al, 2007).
 - El uso combinado de la teledetección y los SIG en la determinación de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en Cape Western -Sudáfrica. (Münch et al, 2007).
2. Los modelos integrados en los cuales el SIG es un interlocutor del modelo numérico; en ellos resaltan:
 - El usos de los SIG y los sensores remotos en la identificación de las condiciones y parámetros asociados a las aguas subterráneas en Eritrea (Solomon et al, 2006).
 - El desarrollo de indicadores espaciales explícitos de recarga y descarga de aguas subterráneas como estrategia de mitigación de la salinidad en el sudeste australiano (Tweed et al, 2007).
 - La delimitación y zonificación del potencial de aguas subterráneas utilizando SIG y sensores remotos en el piedemonte himalayo - India (Israel et al, 2006).
 - El modelo predictivo para evaluar opciones de gestión de las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca del Indo - Pakistán (Sawars et al, 2006)
 - El modelo numérico de flujo utilizando datos de elevación de la Misión Topográfica Radar de Trayectos Cortos (SRTM, de su sigla en ingles) y elementos analíticos para la región de los lagos de Wisconsin (Fredrick et al, 2007)
3. Los modelos embebidos que permiten una integración más fácil de los datos con la simulación en el nivel de preprocesamiento e incluso de modelamiento, ya sea usando diferencias finitas o elementos analíticos; ejemplos de esto son:
 - El Groundwater Analysis, el cual es un sistema de procesamiento basado en diferencias finitas que provee una interfaz con funciones asociadas a las aguas subterráneas, asiste en la preparación de datos y desarrolla algunos análisis básicos (Maidment et al, 2005).

- El sistema basado en elementos analíticos ArcAEM (Silavisesrith et al, 2005) que combina el SIG ArcGIS con el simulador del flujo SPLIT (Jankovic, 2003) y la herramienta de calibración OSTRICH (Matott, 2004).

En Suramérica existe, también, una serie de experiencias en la aplicación de los SIG en los proyectos de evaluación hidrogeológica, pero en este informe se detallaran solamente las del Centro de Geología de Costas y del Cuaternario (CGCyC) de la Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina) y del Grupo de Hidrogeología adscrito al Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) de la Universidad de Antioquia (Colombia), grupos estos que desde el año 2006 realizan un proceso de acercamiento que les permite compartir experiencias y aprender acerca de los diferentes avances y competencias desarrollados. Con este objetivo se hace aquí una exposición de los trabajos piloto desarrollados por ambos grupos y los escenarios de cooperación y aprendizaje mutuo en el campo de los sistemas de información geográfica que plantea esta relación sinérgica.

DATOS Y MÉTODOS

Cuando se aborda el tema de un estudio hidrogeológico, este nos remite al concepto de modelo el cual puede concebirse, en su definición más simple, como una representación simplificada de la apariencia u operación de un sistema u objeto del mundo real.

Debe tenerse en cuenta que un modelo hidrogeológico tiene mínimo tres componentes: un modelo conceptual, una modelación computacional y un modelo consolidado. El modelo **conceptual** hace referencia al concepto que el hidrogeólogo tiene de un sistema acuífero. Un programa de **modelación computacional** resuelve las ecuaciones, y tiene como propósito

general simular una variedad de sistemas específicos variando los datos de entrada. Y un **modelo** consolidado es la aplicación de un programa de modelamiento computacional para simular un sistema específico. Así, un modelo incorpora el programa de modelamiento y los datos de entrada requeridos para representar un sistema. El modelador procura por tanto incorporar los aspectos más importantes del modelo conceptual de modo que el modelo resultante proporcione información útil sobre el sistema (Reilly et al, 2004).

En este sentido, el desarrollo de actividades de evaluación y caracterización hidrogeológica para una región exige la captura, integración, actualización, depuración y análisis de una gran cantidad de datos e información de tipo geológico, geofísico, hidroquímico, climatológico e hidrológico, y en estas tareas se requiere la valoración y correlación de estas temáticas en forma simultánea; por lo tanto, el éxito de estas actividades dependerá de la calidad y cantidad de variables analizadas, así como de la forma en que éstas sean manipuladas. Por otra parte, la utilización de programas de simulación numérica requiere de información georreferenciada, tanto para obtener las condiciones de contorno como para la calibración de los modelos.

El primer paso para entender el funcionamiento hidrogeológico de un acuífero consiste en la generación de un modelo conceptual que asocie los diferentes factores que intervienen en el ciclo hidrológico con la naturaleza del medio subterráneo. Los SIG son medios adecuados para organizar datos de temáticas distintas, localizarlos en el espacio, relacionarlos entre sí y obtener información precisa que pueda visualizarse o cuantificarse de manera sencilla, lo que los convierte en una buena herramienta para generar modelos hidrogeológicos. Para que el SIG cumpla adecuadamente con este objetivo, el mismo debe obedecer a una

estructuración previa que elimine la redundancia e incoherencia en los datos, de tal forma que se constituya en sistema para el análisis, planeación y apoyo a la toma de decisiones permitiendo la integración de datos recolectados de diversas fuentes con los métodos de análisis propios de la disciplina. El buen diseño del SIG estará reflejado en una base de datos capaz de satisfacer de manera ágil y confiable los requerimientos de los diferentes usuarios.

Experiencia cuenca del río Quequén – Argentina-

El grupo de Hidrogeología del Centro de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata, consciente de la necesidad de entender que el comportamiento hidrológico superficial y subterráneo, cuantificando y determinando sus relaciones, vulnerabilidad, amenaza y calidad, es factor clave que puede potenciar un desarrollo social y económico adecuado para la región, ha realizado desde el año 2000 proyectos de investigación tendientes a mejorar el conocimiento del recurso hídrico en la llanura pampeana. Durante dichos proyectos se han identificado tres problemas fundamentales. El primero, más frecuente en este tipo de proyectos, es ocasionado por la escasez de información hidrogeológica adecuada que permita evaluar la evolución de los acuíferos y vislumbrar claves para su mejor entendimiento. El segundo, la diversidad de formatos en los cuales se encuentran la información climatológica de la región, lo que hace difícil su análisis, validación y procesamiento. Estos datos son suministrados por personal de las diferentes propiedades, los cuales incorporan la toma de estos registros en sus actividades cotidianas. El último de los obstáculos es la obtención y unificación de información ya existente que se encuentra dispersa en diferentes instituciones públicas y privadas de la zona.

Características generales del área de estudio

Los aproximadamente 10.000 km² que comprenden la cuenca del río Quequén Grande, están destinados en su totalidad a la actividad agrícola y ganadera, por lo que la región es reconocida como una de las zonas más productivas de la llanura pampeana argentina. Dichas actividades se ven estrechamente relacionadas con la disponibilidad y calidad del recurso hídrico tanto en forma superficial como subterránea (Kruse, 1993; Campo de Ferreras et al, 2002). El uso del agua subterránea es más común debido a su amplia distribución y a su fácil acceso, creando una gran dependencia a este recurso. Esto se evidencia fuertemente durante las etapas de inundación y sequías que periódica e históricamente se presentan, produciendo, en ambos casos, efectos negativos para el sector agrícola y desarrollo de la región.

Aplicación de los SIG en el proyecto

El primer paso en la elaboración de este SIG consistió en la recopilación de datos e información relacionada con el recurso hídrico en la zona. Esta se realizó, inicialmente, agrupando información generada y/o recopilada por los distintos grupos de investigación vinculados al Centro de Geología de Costas y del Cuaternario (CGCyC) de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). Seguidamente se visitaron las instituciones gubernamentales con jurisdicción en la zona (Comité de Cuenca del Río Quequén, Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas, INTA e intendencias de los partidos que conforman la cuenca). Se visitaron, además, diferentes parcelas de la zona en las cuales se han recopilado datos diarios de precipitación, durante décadas. En algunos casos excepcionales datos de presión, humedad, dirección del viento y temperaturas máxima y mínima fueron obtenidos.

Luego de resumir los datos se procedió a clasificarla según los distintos parámetros, precipitación, temperaturas máximas y mínimas, presión, humedad, dirección del viento, heladas, caudales superficiales, análisis fisicoquímicos tanto de agua superficial como subterránea, captaciones de agua subterránea, perfiles de pozo, columnas estratigráficas, niveles freáticos, contenido isotópico del agua y material fotográfico. En cuanto a material cartográfico se analizaron: cartografía básica, mapas políticos, hidrográficos, edáficos, geológicos e hidrogeológicos, imágenes de satélite de diferente resolución espacio temporal y fotomosaicos.

Con todos estos datos se procedió al diseño de la base de datos. Para esto se elaboró inicialmente un modelo conceptual (figura 1), el cual consta de una Base de Datos Geográfica (BDG) o GEODATABASE, con topología de punto, en la cual cada lugar de muestreo es tomado como una estación, con diferentes campos de información. Esta BDG se vincula a una base cartográfica obtenida a partir del modelo conceptual; se generó un modelo entidad relación (MER) utilizando el programa Power Designer V6.1. Este modelo presenta en forma esquemática las tablas, atributos y relaciones entre de los distintos datos.

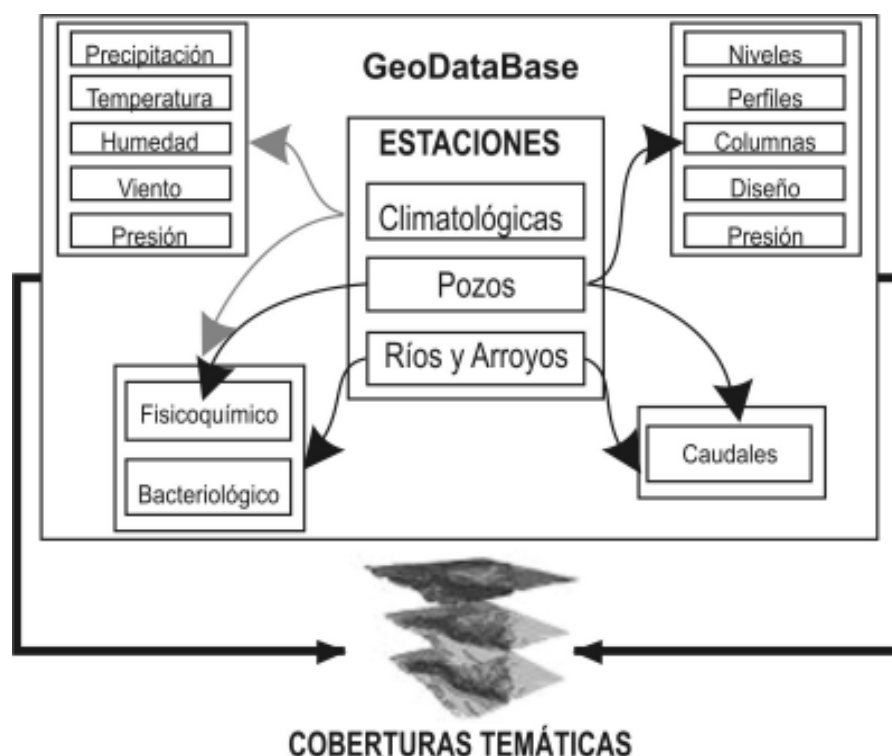


Figura 1. Modelo conceptual del SIG

Después de comprobar que todas las relaciones, entidades y campos se relacionaran correctamente, evitando la redundancia y logrando una normalización adecuada de los campos se generó un modelo físico (figura 2), en el que se construyen las estructuras en que se almacena-

rán los datos en el sistema. Este último modelo además de proveer la información descrita en el MER, describe las llaves primarias o de otros tipos que existen en cada una de las entidades y va acompañado de su correspondiente diccionario de datos.

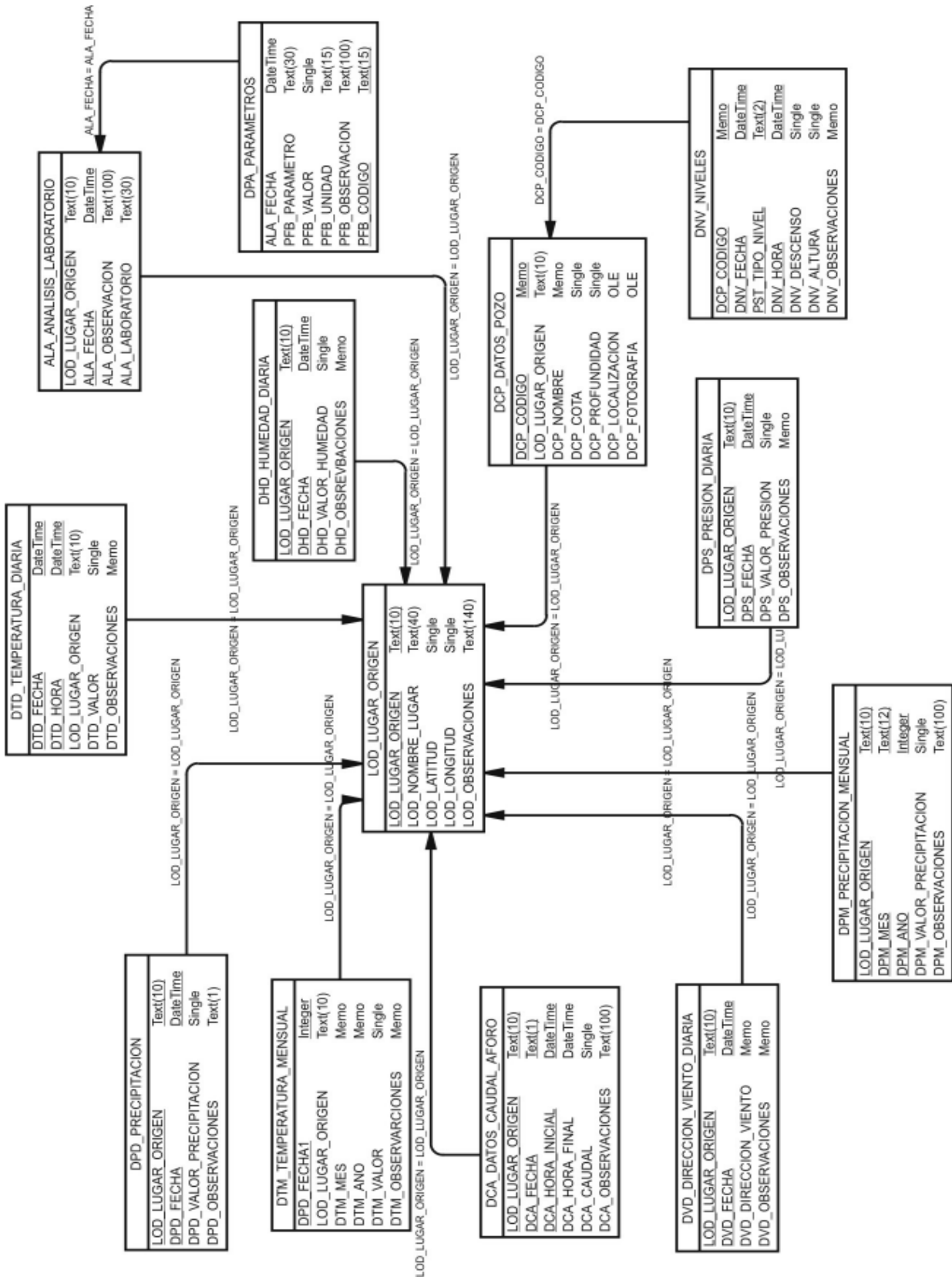


Figura 2. Modelo físico

El modelo físico es el que en forma definitiva es migrado a un motor de base de datos, para este caso, Microsoft Acces 2000. Se seleccionó dicho programa, debido a su compatibilidad con el software ArcGis, herramienta con la que se realiza el manejo cartográfico dentro del CGCyC, además de la facilidad para su manejo y accesibilidad que esta herramienta presenta para los usuarios finales.

Los datos recopilados se unificaron tanto en la parte cartográfica como alfanumérica, mediante cambios de unidades, revisión y cambios de coordenadas, asignación de fechas, digitalizaciones, validaciones, cambios de formatos gráficos y codificación, entre otros. Para la georreferenciación se utilizaron la proyección Gauus-Kruger y el datum Campo Hinchauspe (5).

Resultados

El tipo y volumen de datos que constituyen este SIG se sintetizan en la tabla 1. Las diferentes estaciones definen una buena cobertura espacial para la cuenca, lo que ha permitido definir y graficar tendencias en los diferentes parámetros hidrológicos e hidrogeológicos.

Tabla 1. Cantidad, tipo y cobertura temporal de registros contenidos en la base de datos.

Tabla	Registros	Datos	
		Desde	Hasta
Estaciones	229		
Dirección del viento (diaria)	3089	1993	2007
Temperatura (diaria)	8766	1993	2007
Temperatura (mensual)	36	2004	2004
Precipitación (mensual)	993	1938	2007
Precipitación (diaria)	75728	1998	2007
Humedad (diaria)	3093	1998	2007
Aforos	15460	1963	2007
Niveles de agua subterránea	1007	2003	2007
Análisis químicos	532	2003	2007
Total de registros	108933		

Al presente se cuenta con un modelo preliminar para consultas alfanuméricas, puesto a disposición de los diferentes usuarios; en este sentido, también se han preparado salidas alfanuméricas compatibles con programas específicos de hidrogeología, como son AquaChem, Hysep, Visual Modflow y Acuífer Test. Para una segunda fase contempla la puesta en funcionamiento de una interfaz gráfica que permita realizar consultas y almacenamiento de información vía Internet.

A partir de este SIG se elaboraron diversas salidas gráficas, que ayudan al desarrollo de estos trabajos. Como productos sobresalientes de este sistema se tienen:

Modelo digital de elevación (MDE): Elaborado a partir de cartas topográficas elaborados por el Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000, con equidistancias de 2.5 y 5 metros y mejorado utilizando imágenes de satélite Landsat TM y Aster con resolución espacial de 28 y 15 metros respectivamente. Ha sido utilizado entre otras actividades para generar perfiles y mapas de pendientes, orientación y sombras. Además, se ha empleado para obtener la altura de diferentes elementos dentro de la cuenca.

Variación de niveles freáticos: Los datos de niveles almacenados en la BDG han permitido elaborar mapas isofreáticos para diferentes periodos de tiempo; con ellos se han podido cuantificar las variaciones volumétricas en el acuífero. La figura 3 ilustra la variación de nivel freático entre los años 2003 (influenciado por la última inundación en la zona) y 2005. El volumen de variación entre estos dos años se ha calculado en 8685.12 hm³.

Variación estadística y espacial de parámetros: Además de realzar el análisis estadístico de las diferentes variables, el sistema permite observar su comportamiento espacialmente, ya sea en forma de mapas de isolíneas o mediante gráficos representativos de cada estación monitoreada.

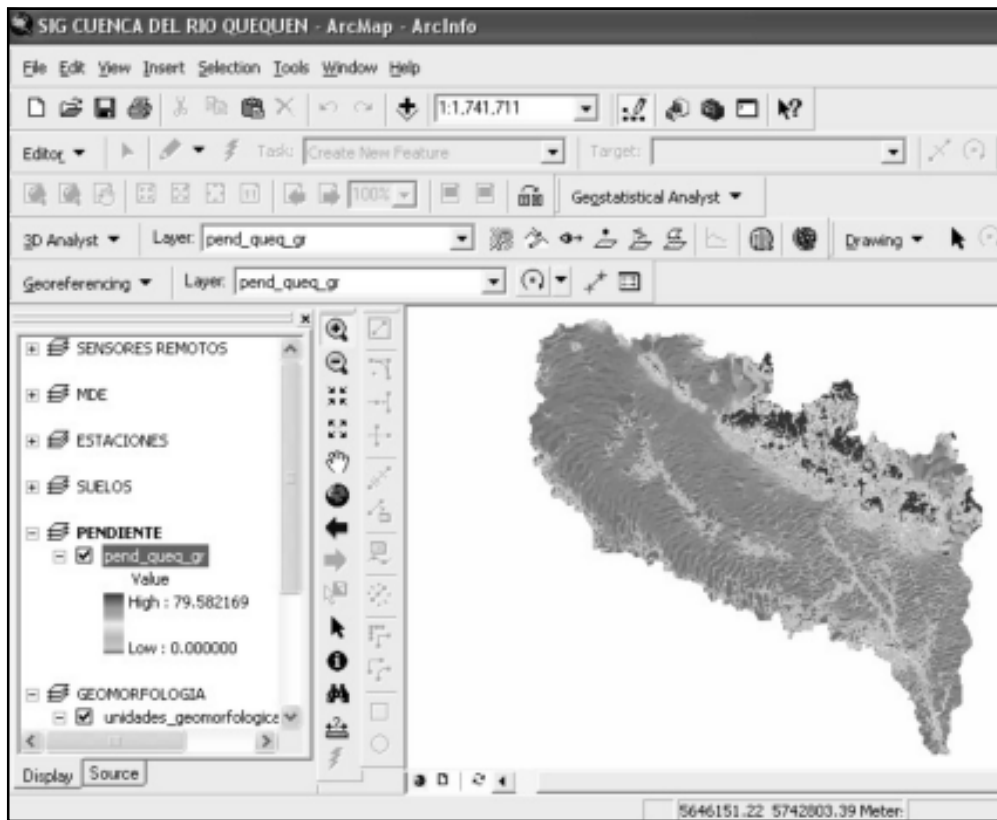


Figura 3. Modelo Digital de elevación - aplicaciones

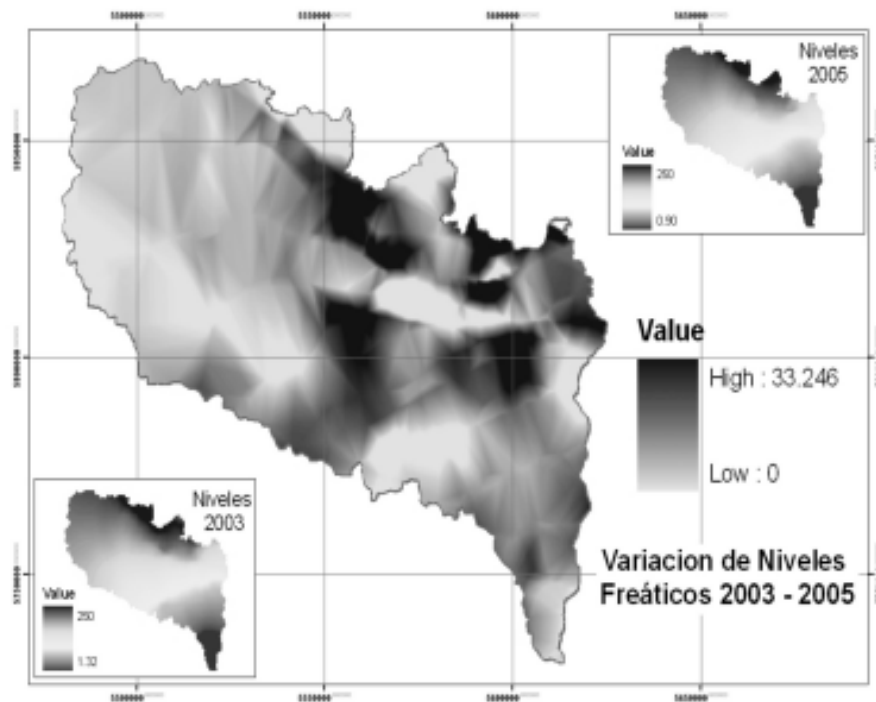


Figura 4. Variación del nivel freático

Gráficas comparativas de diferentes parámetros: El sistema permite generar salidas gráficas que permiten comparar distintas variables para un mismo periodo de tiempo (Figura 5). Este tipo de aplicaciones ha sido utilizado entre otros, para realizar cálculos de recarga (estimada entre 14 y 17%), monitoreo de nivel

freático (descenso de 2.5 metros entre enero de 2003 y mayo del 2006), evaluación de la incidencia de la lluvia sobre los caudales, contenido isotópico de la lluvia y variación en la concentración de iones mayoritarios en diferentes estaciones de muestreo de agua, tanto superficial como subterránea

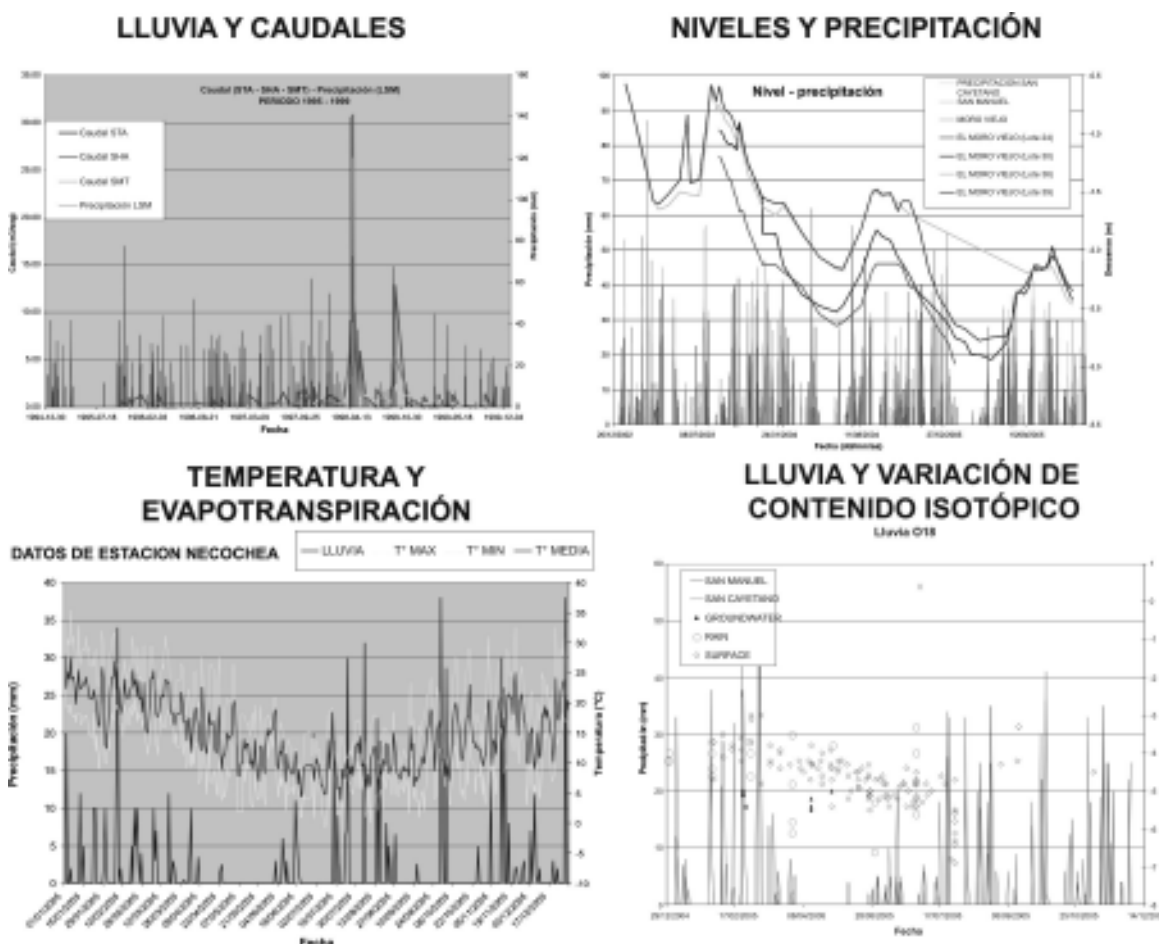


Figura 5. Generación automática de gráficos asociando múltiples parámetros

Experiencia Bajo Cauca antioqueño - Colombia

En la zona del Bajo Cauca antioqueño, ubicada al norte del departamento de Antioquia, en las últimas estribaciones de las cordilleras Central y Occidental, el agua subterránea es prácticamente la única fuente de abastecimiento de agua para consu-

mo humano en la zona rural de los municipios de Caucaasia, Tarazá, Cáceres, Zaragoza, El Bagre y Nechí, y se utiliza para abastecer el 30% de la demanda de agua por parte de los 90.000 habitantes de la zona urbana de Caucaasia. De los más de 3.400 Km² de superficie con potencial hidrogeológico en esa región, hoy se cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual preliminar,

obtenido mediante proyectos de exploración hidrogeológica básica realizados de manera conjunta por el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental -GIGA- de la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia CORANTIOQUIA entre los años 2003 y 2006. Durante la ejecución de estos estudios los SIG y herramientas geoestadísticas (Mejía et al. 2007) fueron usados como plataforma de preparación y manejo de información, así como de modelación de la geometría del sistema y parámetros los parámetros hidrodinámicos e hidráulicos que requieren un modelo hidrogeológico conceptual.

Características generales del área de estudio

La región del Bajo Cauca antioqueño, con una extensión de 8.485 km², está localizada al noreste del departamento de Antioquia, y está conformada por seis municipios ubicados entre las serranías de Ayapel, en la cordillera Occidental y San Lucas, en la cordillera Central, estos municipios son: Cáceres, Tarazá, Cauca, Zaragoza, El Bagre y Nechí. El Bajo Cauca es una región rica y diversa social y culturalmente. Sus habitantes, más de 200.000, se distribuyen el 57% en la zona urbana y el 43% en áreas rurales.

La planicie aluvial del territorio de Cáceres, Cauca, El Bagre, Nechí, y Zaragoza, esta bañada por los ríos Man, Cauca y Nechí y cientos de pequeños afluentes. En esta llanura, se forman numerosas ciénagas con una extensión de más de 40.000 hectáreas, conectadas con los ríos mediante caños, formando complejos sistemas de lagos, pozas, pantanos y playones que retienen el agua de las crecientes y la liberan lentamente en el estiaje.

Aún existiendo imponentes corrientes de agua superficial en el Bajo Cauca antioqueño como los ríos Cauca, Man, Nechí y Caserí, las condiciones de abastecimiento del recurso para satisfacer la demanda para consumo humano son muy precarias. Por esto, el agua subterránea se ha constitui-

do en la principal fuente de abastecimiento para satisfacer la necesidad de recurso hídrico, aunque su explotación se hace de forma no planificada: desde más de 2.000 captaciones (pozos y aljibes) se extraen diariamente más de 10 millones de metros cúbicos de agua almacenada en los acuíferos libre y confinado que existen en la región.

Aplicación de los SIG en el proyecto

La fase inicial consistió en la recopilación, selección, adecuación y corrección de la información de la zona de estudio, para la cual se contaba con la cartografía básica a escala 1:25.000 producida por el IGAC y convertida a formato digital por CORANTIOQUIA. La información necesaria para la caracterización climatológica y la realización de balances hídricos fue adquirida del IDEAM; en total se contó con 4 estaciones climatológicas, 13 pluviométricas y 3 limnigráficas, con periodos comunes de registro a partir de 1984.

Como base preliminar para la caracterización geológica, previa al trabajo de verificación en campo, se consultaron los mapas geológico de Antioquia (González, 1996) y de la plancha 93 Cáceres (Zapata et al, 1993) elaborados por INGEOMINAS; para la fotointerpretación se contó con fotografías aéreas y se accedió a dos imágenes de satélite que cubrían parcialmente el área: landsat 954 de 1994 y una subescena Spot 2000.

Las memorias del mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000 (Universidad Nacional-CORANTIOQUIA, 2002) y el atlas climatológico de Colombia (IDEAM, 2005) fueron consultados y de ellos se retomaron elementos para las descripciones geomorfológica y climatológica de la zona de estudio.

Finalmente, a partir de los estudios conducentes a la construcción de tres modelos hidrogeológicos parciales y preliminares de las cuencas de los ríos Man y Cacerí y el norte de

Caucasia realizados por la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA, entre los años 2003 y 2005, se retomaron, evaluaron y reinterpretaron los datos de inventarios de puntos de agua, sondeos eléctricos verticales SEV, nivelación piezométrica y pruebas de bombeo, con el fin de definir y correlacionar las unidades hidrogeológicas, determinar sus propiedades hidráulicas y definir la red de flujo.

Resultados

En este proyecto los sistemas de información geográfica se han orientado al modelamiento espacial de las variables y los fenómenos asociados a los sistemas acuíferos, buscando constituir los insumos requeridos por el programa de modelación numérica ModFlow; en este sentido han sido tareas prioritarias: la determinación de la geometría de las unidades hidrogeológicas en función de la geología y la correlación estratigráfica, la identificación espacial de las características de uso, y la determinación de las condiciones de flujo y parámetros hidráulicos y evaluación de la recarga.

Actualmente se cuenta con un modelo base, el cual es utilizado en labores de gestión por parte de la corporación ambiental, y de investigación por parte de estudiantes de pre y posgrado de la Universidad, en él se han integrado los siguientes avances:

Corrección de objetos geográficos: En el desarrollo de los estudios hidrogeológicos arriba mencionados, se detectaron diferencias entre los elementos consignados en las cartas geográficas (IGAC) y la realidad (Ver figura 6). Esto se debe a que las planchas de referencia en algunos casos fueron creadas hace más de 30 años y a que algunos de los ríos en la región presentan una gran dinámica. Por lo tanto, con la ayuda de las fotografías aéreas, imágenes de satélite y algunas corroboraciones en campo asistidas por GPS, se corrigieron estos elementos con el fin de obtener una cartografía básica digital actualizada y coherente con la realidad.

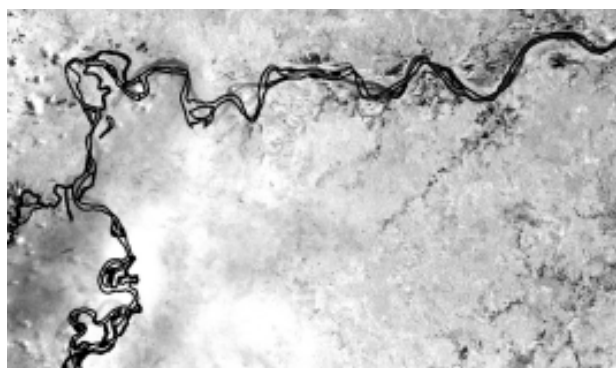


Figura 6. Curso del río Cauca en la cartografía (línea oscura) comparado con su aspecto actual (imagen de satélite en tonos de grises)

Modelo de digital de elevaciones: una vez obtenida la cartografía digital básica corregida se procedió a desarrollar un MDE el cual fue corregido utilizando la herramienta Hidrologic Tools desarrollada por el CRWR (Center for Research in Water Resources – Maidment et al, 2005). Esta corrección permitió eliminar falsos represamientos o la ausencia de canales de los cauces principales, los cuales afectarían posteriormente la identificación de fronteras en el modelo. La figura 7 ilustra esta corrección.

Delimitación de la cuenca superficial. El MDE corregido se convierte en el insumo básico para redefinir la cuenca superficial, la cual si bien puede no coincidir con la subterránea, sí permite establecer un marco geográfico para los siguientes análisis.

Modelo geométrico de los acuíferos. Con la información estratigráfica con que se contaba, aunada a la información obtenida a partir de sondeos eléctricos verticales, se procedió a generar un modelo geométrico integrando el modelo geoestadístico kriging ordinario con remoción de tendencias de segundo orden $(2,2021 * \text{Gaussian} (50324, 14713, 21,0) + 5,5655 * \text{Nugget})$ desarrollado por Mejía (2006), Mejía et al. (2007). Esto permitió obtener las fronteras físicas del modelo en superficie y profundidad de las 5 unidades acuíferas identificadas.

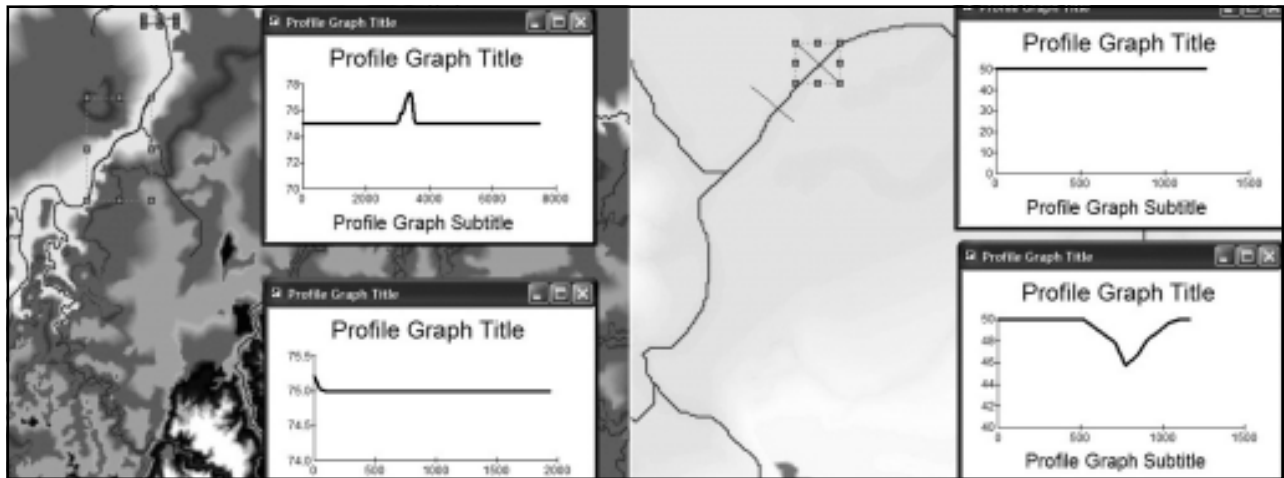


Figura 7. MDE corregido. A la izquierda, falso represamiento sobre el corte longitudinal del río (perfil superior) y su apariencia en el modelo corregido (perfil inferior). A la derecha, ausencia de cauce (perfil superior) y su corrección (perfil inferior).

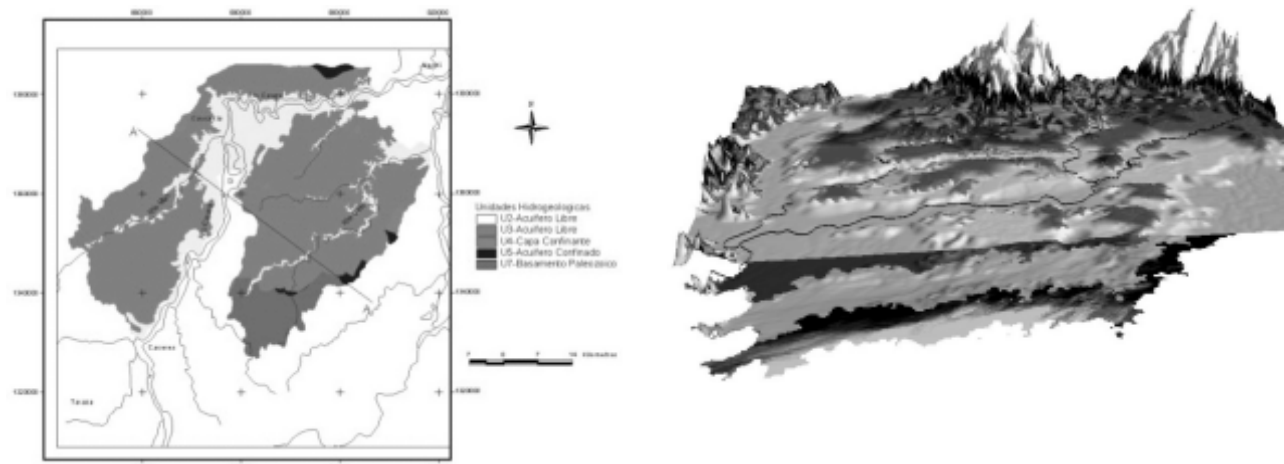


Figura 8. Vista en planta y en 3D de las Unidades acuíferas identificadas. (Nota: la escala vertical fue exagerada en 15X)

Modelación piezométrica. Con los datos de nivelación obtenidos en dos campañas, una realizada en invierno y otra en verano, se obtuvieron las superficies que son la expresión espacial de este parámetro para las me-

diciones disponibles, a través de interpolaciones utilizando el algoritmo gravitacional IDW. La figura 90 ilustra este parámetro en la época de verano saturando el acuífero libre.

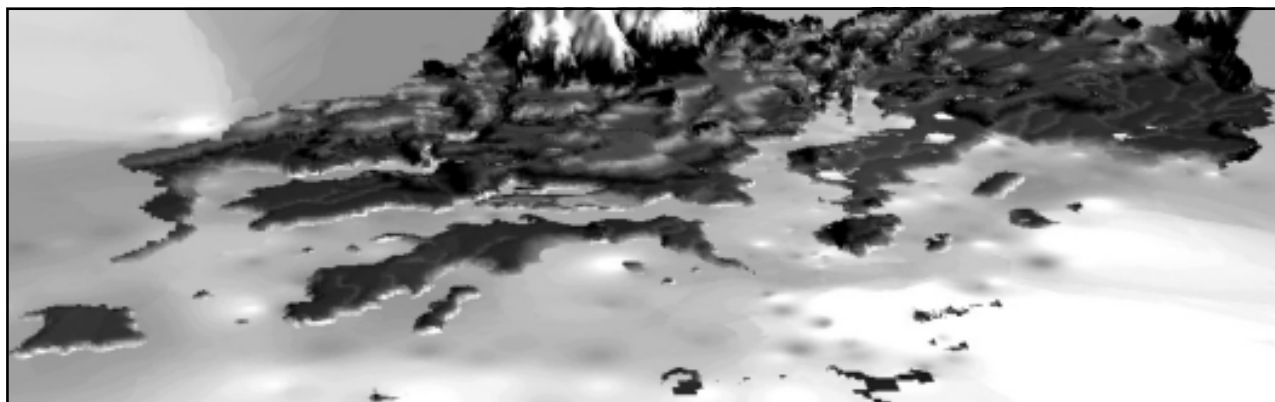


Figura 9. Ilustración de la nivelación piezométrica superpuesta con el acuífero libre. (Nota: la escala vertical fue exagerada en 15X)

Otras herramientas de apoyo. Conjunto con lo anterior se han desarrollado e integrado diferentes herramientas que permiten apoyar los análisis hidrogeológicos y las nuevas investigaciones que se abordan. Estas herramientas son:

- Generador de archivos maestro de entradas/salidas (I/O) y de geometría de unidades acuíferas para ModFlow. Dado que la transacción de fuentes de datos entre estas

dos plataformas suele ser compleja y requiere gran cantidad de manipulación de los archivos, en lo referente a la determinación del dominio geográfico, tamaño de celda y formato de los datos, se generó un submodelo en Model Builder para ayudar a los analistas en la creación de las entradas al ModFlow. La figura 10 ilustra la funcionalidad de este aplicativo.

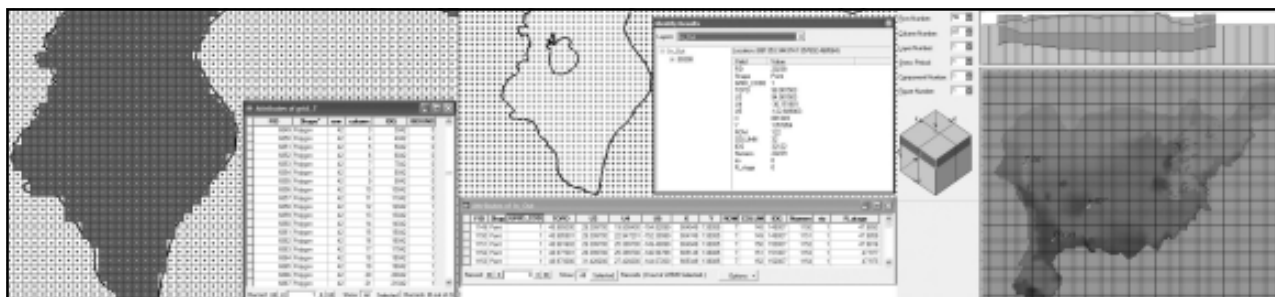


Figura 10. Generación de archivos I/O y de geometría de unidades en ArcGis para su operación en ModFlow

- Aplicativo para la determinación de la recarga considerando la distribución espacial de las variables hidrometeorológicas. A pesar de que este aplicativo fue desarrollado por Villegas et al. (2006) en lenguaje Avenue para ArcView 3.x es de gran utilidad para el cálculo de balances hídricos y recarga utilizando el formato raster. Igualmente se planea en el corto plazo migrarlo a un lenguaje compatible con ArcGis 9.x. La figura 11 muestra el diagrama de flujo de este aplicativo.
- Submodelos para indicadores de descarga y recarga espacialmente explícitos (GVI y Índice de acumulación de humedad por topografía) e integración de datos provenientes de fuentes SRTM. Dado que en nuestros países es común trabajar con información escasa y

que actualmente es posible contar con imágenes satelitales de radar y multiespectrales a través de portales universitarios, se integraron dos submodelos en Model Builder de tal forma que exista una herramienta que permita desarrollar modelos exploratorios en el ámbito regional, como precursores de modelos de mayor detalle basados en recolección de datos de campo.

DISCUSIÓN

A pesar que los sistemas de información geográfica -SIG- cuentan con la capacidad de desarrollar procesos de modelamiento complejo con múltiples parámetros variables en el tiempo y en el espacio, esta función se ha visto opacada por su calidad para producir mapas de gran calidad y óptima representación gráfica. Por esto, este artículo presenta dos ejemplos de aplicación en Suramérica en los cuales se han retomado estas funcionalidades para apoyar el estudio de un recurso estratégico como son las aguas subterráneas.

Es así, como en un estudio hidrogeológico gran parte de las acciones, tanto de recopilación, como de adecuación y preprocesamiento de datos y parámetros, pueden ser eficientemente realizadas a través de los sistemas de información geográfica

(ver figura 11), brindando de esta forma una perspectiva espacial y didáctica no solo a los expertos en la temática, sino también a los gestores del recurso y la comunidad en general.

Sin embargo, se debe ser cauteloso en otorgar a estos “modelos virtuales” propiedades definitivas, ya que su mayor funcionalidad radica, no tanto en la solución de un modelo específico, sino en su capacidad para apoyar al investigador en la “forma como se modela” (ver figura 12), de tal forma que desde la etapa temprana de definición del problema, en aspectos tales como la selección y recolección de datos, y análisis preliminares, como pueden ser la selección de las fronteras físicas de análisis, el investigador se apoye en las herramientas georreferenciadas con el objetivo de evitar esfuerzos innecesarios en el acopio de información no pertinente o, peor aún, en una mala delimitación del sistema bajo análisis. Igualmente los sistemas de información geográfica serán auxiliares en la identificación y análisis de fronteras hidrogeológicas, o podrán ayudar igualmente en la determinación de redes de monitoreo y muestreo de los parámetros necesarios para ajustar, calibrar y validar un modelo, incluso en situaciones en las que sea necesario proceder a la elaboración de un nuevo modelo conceptual o redefinir el problema bajo estudio.

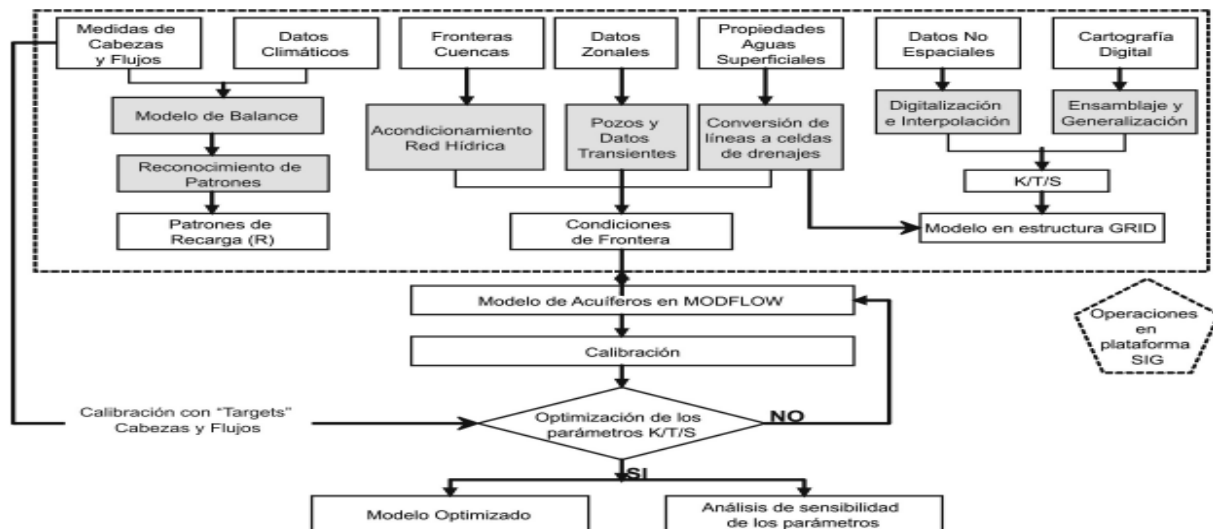


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de modelamiento integrado SIG-MODFLOW (Fuente: Yu-Feng et al, 2005, traducido y modificado por los autores)

En los dos ejemplos mostrados en este trabajo, se pueden observar las múltiples aplicaciones que los SIG están teniendo en grupos de investigación en Latinoamérica. Es así como, en el caso documentado en Argentina, se observa un sistema que se ha convertido en una fuente de datos primarios para todo tipo de análisis hidrológico e hidrogeológico, sirviendo como punto de partida para diversos proyectos de investigación. Por su parte, en el caso de documentado para Colombia, se ha dado un paso más adelante, realizando modelos que permiten cuantificar las diversas variables necesarias para establecer las características generales del acuífero. En ambos casos la información primaria ha sido el factor fundamental para dichos avances.

Es por todo lo anterior que estos sistemas deben tomarse como herramientas de apoyo para realizar una evaluación previa de cómo el modelo conceptual representa el sistema real, según los objetivos del estudio, y evaluar críticamente la calidad de los datos de entrada. Los ítems que deben tenerse en cuenta con prioridad son: la conveniencia del modelo, la discretización la representación del contexto geológico y las condiciones de frontera, la representación de las condiciones iniciales, y la exactitud de la matriz solución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los SIG cuentan con las potencialidades y aplicativos necesarios para apoyar los estudios hidrogeológicos en el modelamiento preliminar de las variables y procesos involucrados, permitiendo que independientemente del método seleccionado, diferencias finitas o elementos finitos, se obtengan representaciones adecuadas de los sistemas bajo análisis, a través de la aplicación de análisis geoestadísticos, vectoriales y matriciales.

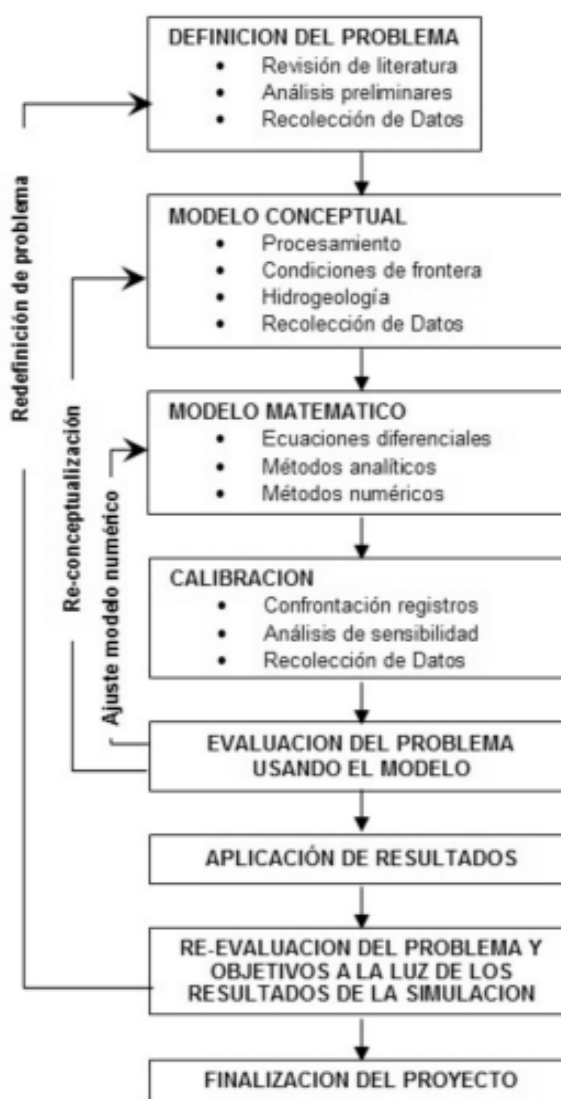


Figura 12. Diagrama del proceso de modelamiento del flujo subterráneo (Reilly, 2001)

El sistema de información geográfica debe ser una parte integral del proceso de modelamiento, ya que puede acompañar y en muchos casos asumir parte de las tareas requeridas en la construcción del sistema de análisis.

Existe en el mundo un gran interés en la integración de los sistemas de información georreferenciado, y otras utilidades como los sensores remotos, con los sistemas de modelamiento de aguas subterráneas; sin embargo, los mayores desarro-

llos se concentran en grupos altamente especializados y son desarrollados, en la mayoría de los casos, para aplicaciones específicas.

Es necesario incrementar el intercambio de conocimientos en la aplicación de la geoinformática a la hidrogeología entre grupos en Latinoamérica, de tal forma que se compartan las lecciones aprendidas y las mejores prácticas desarrolladas conformando así comunidad académica en este tópico de la hidrogeología.

Existen una serie de aplicativos y conocimiento en el contexto internacional, muchos de ellos desarrollados bajo la filosofía del software libre y producción universitaria, que pueden ser integrados al estudio y manejo de las aguas subterráneas, brindando de esta forma una herramienta “liviana” a pequeñas municipalidades, comunidades y académicos que no tienen la posibilidad económica de acceder a software comerciales.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMPO DE FERRERAS, A. M & PICCOLO, M.C. (2002) Hidroquímica del Arroyo Pescado Castigado. En: Actas III Jornadas Nacionales de Geografía Física. Santa Fe, 97,103.
- FREDRICK K, BECKER W, MATOTT L, DAW A, BANDILLA K Y FLEWELLING D. (2007). Development of a numerical groundwater flow model using SRTM elevations. *Hydrogeology Journal* 15: 171–181.
- GONZÁLEZ, H., (1996). Memorias del mapa geológico de Antioquia, escala 1:400.000. INGEOMINAS, 78 p.
- ISRAEL M, AL-HADITHI M y SINGHAL D. (2006). Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal* 14: 753–759.
- IDEAM, (2005). Atlas climatológico de Colombia.
- JANKOVIC I. (2003). SPLIT: Win32 computer program for analytic-based modeling of single layer groundwater flow in heterogeneous aquifers with particle tracking, capture-zone delineation, and parameter estimation. University at Buffalo.
- KRUSE, E. (1993). El agua subterránea y los procesos fluviales en la región centro oriental de la provincia de Buenos Aires . En: Caracterización Ambiental de la Provincia de Buenos Aires. C.I.C. la Plata . Año II, 15, 13-31.
- MAIDMENT, D. ; y PIERCE, S. (2005). Groundwater - GIS in Water Resources. Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin.
- MATOTT S. (2004). OSTRICH, model-independent, multi-algorithm calibration tool. University at Buffalo.
- MEJÍA O., (2006). Técnicas geoestadísticas en hidrogeología, caso de estudio Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de grado, Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Universidad San Buenaventura, Medellín, 108 p.
- MEJIA, O.; BETANCUR, T.; Y LONDOÑO, L. (2007) Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del Bajo Cauca antioqueño. *Revista DYNA* edición 152, vol. 74 .
- MINOR, T.; RUSSELL, C.; y MIZELL, S. (2007). Development of a GIS-based model for extrapolating mesoscale groundwater recharge estimates using integrated geospatial data sets. *Hydrogeology Journal* 15: 183–195.

- MUNICH, Z. y CONRAD, J. (2007). Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa. *Hydrogeology Journal* 15: 19–28.
- REILLY, T. y HARBAUGH, A. (2004). Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models. Scientific Investigations Report 2004-5038. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- SAWARS, A. y EGGERS, H. (2006). Development of a conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources. *Hydrogeology Journal* 14: 1676–1687.
- SILAVISESRITH, W. y MATOTT, S. (2005). ArcAEM: GIS-Based Application for Analytic Element Groundwater Modeling. University at Buffalo.
- SOLOMON, S. y QUIEL, F. (2006). Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeology Journal* 14: 729–741.
- TWEED, S.; LEBLANC, M.; WEBB, M. y LUBCZYNSKI, M. (2007). Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology Journal* 15: 75–96.
- UNIVERSIDAD NACIONAL CORANTIOQUIA, (2002). Memorias del mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000.
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, CORANTIOQUIA, Evaluación hidrogeológica entre los municipios de Caucasia y Cáceres. Informe final del convenio interinstitucional 1201, Medellín, 365 p.
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, CORANTIOQUIA, (2004). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al norte del municipio de Caucasia. Informe final del convenio interinstitucional 5119, Medellín, 344 p.
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, CORANTIOQUIA, (2005). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos en la cuenca del río Cacerí. Informe final del convenio interinstitucional 5691, Medellín, 316 p.
- VILLEGAS J, ESCOBAR J, GÓMEZ A, WILLS A y BETANCUR T. (2006) Aplicación de los sistemas de información geográfica en el cálculo de la recarga de acuíferos. Caso de estudio: Cuenca del río Caserí. II Congreso Colombiano de Hidrogeología, Bucaramanga-Colombia.
- WATKINS. D. McKINNEY, MAIDMENT. D Y MINDERLIN (1996). Use of geographic information system in groundwater modelling. En: *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol 122 N° 2 1996.
- YU-FENG L, WALKER D, MEYER S. 2005. Groundwater Flow Models of Northeastern Illinois a case study for building MODFLOW models with GIS. Department of Natural Resources – Illinois. No6308.
- ZAPATA, G. y COSSIO, U., (1993). Geología de la plancha 93 (Cáceres) escala 1:100.000. Ingeominas, Medellín, 98 p.