

Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical

Conceptual hydrogeology model to Bajo Cauca antioqueño: a tropical aquifer system

Teresita Betancur^{*1}, *Oscar Mejía*², *Carlos Palacio*¹

¹Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA-. Universidad de Antioquia. Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia

²CORANTIOQUIA, Carrera 65, N.º 44A-32, Medellín, Colombia

(Recibido el 3 de octubre de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un trabajo de exploración hidrogeológica mediante el cual se logró construir la representación georreferenciada de la distribución del agua subterránea en el sistema acuífero del norte del departamento de Antioquia-Colombia a partir de información geológica, hidrológica, climatológica, nivelación piezométrica y análisis de calidad del agua.

----- *Palabras clave:* Modelo hidrogeológico, aguas subterráneas, Bajo Cauca Antioqueño, acuífero tropical

Abstract

This paper presents a hydrogeology conceptual model of *Bajo Cauca Antioqueño* obtained from hydrogeology exploration work and geostatistics modeling.

----- *Keywords:* Hydrogeology model, groundwater, *Bajo Cauca Antioqueño*, tropical aquifer

* Autor de correspondencia: teléfono + 57 + 4 219 55 96, fax + 57 + 4 + 2195514, correo electrónico: terebetanv@udea.edu.co (T. Betancur).

Introducción

El marco conceptual común a todo análisis hidrológico, independientemente de su escala, es la división sistémica de los procesos en un número de almacenamientos interconectados por flujos hídricos [1]. El medio acuífero constituye un sistema abierto que intercambia materia y energía desde y hacia las fronteras (Figura 1).

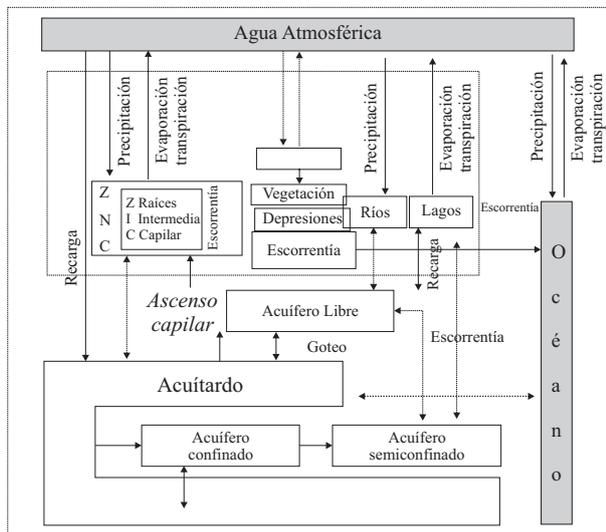


Figura 1 El sistema acuífero y sus interacciones con el entorno

La exploración de aguas subterráneas se define como “el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y de calidad adecuada para el fin que se pretende” [2]. El producto de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada es un modelo conceptual del sistema acuífero existente, entendiendo un modelo conceptual como una representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de un bloque diagrama o una sección transversal. El modelo conceptual comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las superficies freáticas y piezométricas y, por lo tanto, las condiciones de flujo subterráneo [3]. Además, identifica zonas y procesos de recarga y evaluación de reservas. El

propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. Esta simplificación es necesaria porque la reconstrucción completa del sistema es imposible. Un modelo conceptual es la idea básica de cómo operan los sistemas y procesos [4]. Como es de esperar, la calidad de los modelos hidrogeológicos obtenidos dependen de la calidad de la información disponible para su construcción, la que a su vez esta limitada por la disponibilidad de recursos financieros. Hay que señalar que un modelo hidrogeológico contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas y la prueba de su validez sólo se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas. Con relación a la certidumbre de los modelos conceptuales se puede utilizar el término *sorpresa* para referirse a la situación en la cual la colección de nueva información invalida un modelo conceptual original. La sorpresa puede surgir a causa de la revisión de la teoría científica o como consecuencia de la nueva información que se obtenga sobre un sitio particular y ella ocurre en 20-30% de los casos estudiados, indicando esto que no es fácil construir un modelo hidrogeológico apropiado [4]. El conocimiento de la naturaleza de los medios subterráneos se logra a partir de información cuantitativa (*hard*) pero también cualitativa (*soft*), y es posible incluso para un mismo sistema elaborar varios modelos conceptuales [5]. La hidrogeología esta lejos de ser una ciencia clásica cuantitativa y cada modelo o cada predicción son hipótesis que rara vez se pueden probar. La hidrogeología es fundamentalmente una ciencia descriptiva que trata de acercarse cada vez más al rigor cuantitativo con la idea de responder con más precisión a las preguntas que se formulan en torno al manejo de los recursos hídricos subterráneos [6]. El Bajo Cauca es una subregión del departamento de Antioquia en la cual el agua subterránea constituye un recurso natural estratégico en virtud de su función ecosistémica, al mantener el caudal base y los niveles de ríos y ciénagas en épocas de estiaje y porque representa la única fuente segura de abastecimiento de agua para más de 200.000

habitantes de los municipios de Caucaasia, Cáceres y Nechi. De acuerdo con la Ley 99 de 1993, corresponde a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia –CORANTIOQUIA– la responsabilidad de administrar adecuadamente los recursos naturales renovables dentro del área de su jurisdicción, por esta razón entre los años 2003 y 2006 realizaron varios estudios de evaluación hidrogeológica [7-10], a partir de los cuales se logró finalmente obtener el modelo conceptual del sistema acuífero regional del Bajo Cauca Antioqueño que se sintetiza en este artículo.

Descripción del área de estudio

La subregión conocida como Bajo Cauca se ubica al norte del departamento de Antioquia, Colombia, entre las últimas estribaciones y el piedemonte de las cordilleras occidental y central del sistema andino (Figura 2), en ella se ubican las cabeceras municipales de Taraza, Cáceres, Caucaasia, El Bagre, Zaragoza y Nechi. La planicie aluvial de esta región, puerta de entrada a la costa atlántica, tiene una extensión de 3.750 km² y es cruzada desde Tarazá hasta Caucaasia, en sentido sur-norte, y luego desde Caucaasia hasta Nechí, en sentido occidente-oriente por el río Cauca cuyos principales afluentes son los ríos Man, por la margen izquierda, y Nechí, en la margen derecha.

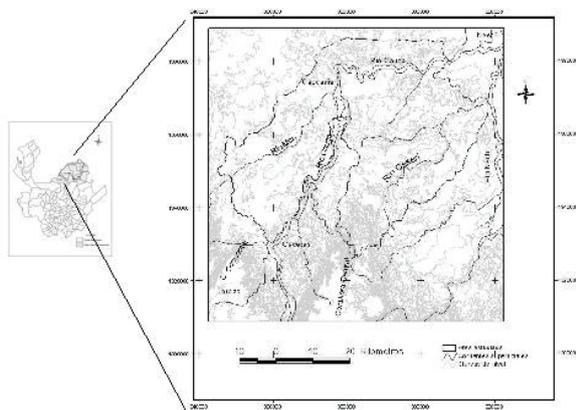


Figura 2 Localización del área de estudio

La posición de Colombia en la zona tropical hace que su territorio sea partícipe de las mayores pro-

porciones de energía que el sol le transfiere a la tierra y, la ubicación del Bajo Cauca antioqueño en Colombia hace que sus condiciones climáticas estén afectadas por un amplio conjunto de circunstancias que le confieren una especial complejidad: a escala regional se tiene influencia de los vientos Alisios dentro de la Zona de Confluencia Intertropical, el Bajo Cauca es la puerta de entrada a la región costera del Atlántico y estaría influenciada por la curvatura ciclónica de las ondas del este del Caribe, la cercanía a las vertientes de la cordillera Occidental podría imponerle alguna influencia de los sistemas sinópticos del Pacífico y asociado al tiempo de invierno en el hemisferio norte se presentaría la influencia de vaguadas de latitudes medias.

Metodología

El conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de una región representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico que involucre como elementos básicos la definición de la geometría de las unidades hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas, la determinación de las redes de flujo, la estimación de la recarga y la evaluación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas (figura 3). Los datos de que se disponga y la información que de ellos pueda extraerse representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita como resultado obtener el modelo deseado.

Datos e información

Institutos como el Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, el de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y el de Geología Minería y Química, INGEOMINAS, registran dentro de sus centros de documentación información fundamental para la exploración hidrogeológica. CORANTIOQUIA en cumplimiento de su función de administrar los recursos naturales renovables ha adelantado estudios conducentes a mejorar el conocimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción. La Universidad de Antioquia,

centro de educación superior líder en investigación en el país ha contribuido a los avances en el conocimiento hidrogeológico en el Bajo Cauca. Algunas firmas perforadoras conservan en sus archivos información relacionada con los pozos por ellos construidas. También a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite se logran formular hipótesis acerca de las características del medio físico en una región determinada. Pero por supuesto, es mediante el trabajo de campo que se logra completar y confirmar la información necesaria para realizar las tareas de exploración hidrogeológica local que permiten nuevos aportes al conocimiento del sistema acuífero.

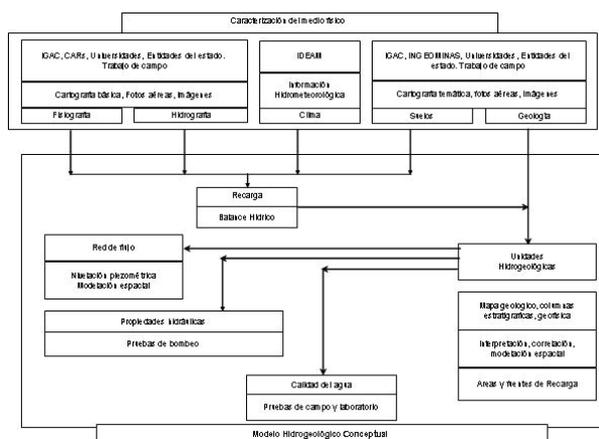


Figura 3 Esquema metodológico. Sintetiza la metodología seguida para obtener el modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño

La cartografía básica a escala 1:25.000, producida por el IGAC y convertida a formato digital por CORANTIOQUIA, que se utilizó para este estudio comprende las planchas 82-IV-A, 82-IV-B, 82-IV-C, 82-IV-D, 83-I-C, 83-I-D, 83-III-A, 83-III-B, 83-III-C, 83-III-D, 93-II-A, 93-II-C, 94-I-A, 94-I-B, 94-I-C y 94-I-D. La información necesaria para la caracterización climatológica y la realización de balances hídricos que permitieron estimar la recarga fue adquirida del IDEAM. En total se contó con 4 estaciones climatológicas, 13 pluviométricas y 3 limnigráficas, esta información fue sometida a análisis de homogeneidad y consistencia de series hasta definir el conjun-

to adecuado de datos para ser tenidos en cuenta en los análisis y cálculos. Como base preliminar para la caracterización geológica, previo al trabajo de verificación en campo, se consultaron los mapas geológicos de Antioquia [11] y de la plancha 93 Cáceres [12] elaborados por INGEOMINAS, para la fotointerpretación se contó con 95 fotografías aéreas del vuelo C-2552 (01 a 08) contratado por CORANTIOQUIA en el año 2000 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 [13] y el atlas climatológico de Colombia [14] fueron consultados y de ellos se retomaron elementos para las descripciones geomorfológica y climatológica de la zona de estudio. La Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA entre los años 2003 y 2005 realizaron los estudios para la construcción de tres modelos hidrogeológicos parciales y preliminares de las cuencas de los ríos Man y Cacerí y el norte de Cauca. La información obtenida durante los inventarios de puntos de agua, realización de sondeos eléctricos verticales SEV's, nivelación piezométrica y pruebas de bombeo, fue retomada, evaluada y reinterpretada con el fin de definir y correlacionar las unidades hidrogeológicas, determinar sus propiedades hidráulicas y definir la red de flujo. Se contó con información hidroestratigráfica para 136 puntos, de los cuales 49 corresponden a columnas de perforación y 87 a SEV's. En la figura 4 se observa la distribución de los sitios para los cuales se dispuso de esta información. El mapa de puntos hidroestratigráficos está documentado con una tabla de atributos con una serie de campos descriptivos en los que para cada registro se cuenta con código de identificación, el nombre del lugar, coordenadas Norte y Oeste de localización espacial y para cada unidad hidrogeológica identificada su espesor en metros, a partir de estos datos se modeló posteriormente la geometría regional del sistema acuífero. Las condiciones constructivas de las captaciones y la falta de pozos de observación constituyen una limitante constante en la realización de ensayos de

bombeo adecuados para la determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos, a partir de sólo 26 puntos de agua se obtuvo información para caracterizar parcialmente las condiciones hidráulicas del sistema. Para la definición de superficie piezométrica y dirección de flujo subterráneo se retomó la información obtenida durante los inventarios y nivelaciones realizadas durante la ejecución de los tres estudios de exploración realizados en las cuencas de los ríos Man y Cácer y Norte de Cauca. Finalmente, la caracterización de la calidad del agua subterránea se realizó a partir de la información disponible en los mismos estudios de exploración básica y con algunos datos procedentes de monitoreos realizados en 2005 y 2006 durante campañas de muestreo para análisis hidrogeoquímico e isotópico.

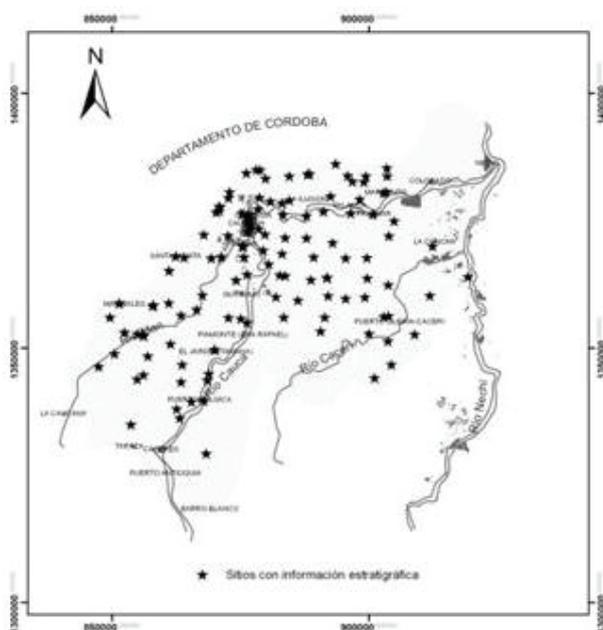


Figura 4 Localización de puntos con información hidroestratigráfica

Procedimiento de análisis

El conjunto de actividades plasmado en la figura 3 sintetiza los métodos aplicados para obtener un modelo hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño que proporcione de la forma más clara

posible las ideas concebidas en relación con la geometría y propiedades hidráulicas del sistema acuífero, las fuentes, zonas y magnitud de la recarga y las condiciones de calidad del agua subterránea.

Para la caracterización del medio físico, condición sobre la que se soporta el posterior análisis hidrogeológico, se elaboraron Modelos Digitales de Terreno DTM's, vistas tridimensionales que representan la superficie topográfica y mapas de pendiente a partir de las funciones de análisis espacial del *software* para SIG. Junto con ellos la fotointerpretación y el procesamiento de imágenes, la revisión de información documental y el control de campo, permitieron realizar una adecuada descripción fisiográfica, geológica y de los suelos del área de estudio. La estadística descriptiva aplicada a la información hidrometeorológica en el contexto de la dinámica meteorológica regional proporcionó los criterios para la determinación de las condiciones climáticas. La identificación y definición de las unidades hidrogeológicas se realizó a partir del análisis de la geología y la correlación de la información estratigráfica obtenida a partir de los registros de perforación de pozos y de la geoelectrónica. La modelación de la geometría de cada unidad y sus propiedades hidráulicas y de flujo se realizó mediante el análisis geoestadístico. Se tuvo en cuenta que este análisis es un proceso multipaso que requiere el uso de *software* especializado e incluye: i) el análisis exploratorio de los datos iniciando con el uso de la estadística descriptiva para determinar los estadísticos básicos; ii) la evaluación de la normalidad y las posibles transformaciones necesarias para lograrla; iii) la determinación de tendencias y anisotropías, iv) la construcción del semivariograma y la determinación del rango, la meseta y el valor del efecto pepita entre otros elementos; v) el ajuste de modelos teóricos para dichos variogramas, vi) el análisis del efecto pepita; vii) la evaluación de los agrupamientos o *clusters* y viii) la validación cruzada, hasta llegar, finalmente, a la creación de la superficie deseada [15]. A la luz de las consideraciones conceptuales este proceso se implementó utilizando el módulo *Geostatistical analyst* de

que dispone el software ArcGIS versión 9.1. Se aclara que si bien los procedimientos tipo *kriging* no tienen un carácter de precisión que lleve a que en cada punto conocido el predicho sea igual al valor observado, en conjunto si logra representar superficies con claro sentido físico desde el punto de vista litológico, estructural y en consecuencia hidrogeológico, razón esta por la cual se prefirieron los resultados dados por la geostatística sobre los que proporcionan modelos de

interpolación como Spline o IDW. En la tabla 1 se presentan las condiciones de modelación que mejor representan las características geométricas del sistema hidrogeológico. La modelación de la superficie freática del acuífero libre a partir de los datos de nivelación piezométrica obtenidos durante las campañas de campo se ajustó según el modelo que se indica, en la tabla 1. No se dispuso de información para estimar la superficie piezométrica del acuífero confinado.

Tabla 1 Modelos de semivariograma para la interpolación con *kriging*

<i>Variable</i>	<i>Modelo</i>	<i>Semivariograma</i>
Acuífero libre	Gaussiano	2,72*Gaussiano(7.724; 3.912; 19,8)+3,5*nugget
Capa confinante	Esférico	525,3*Esférico(50.383; 25.806; 57,4)+1.112,5*nugget
Acuífero confinado	Esférico	49,7*Esférico(82.914; 53.538; 288,6)+42,7*nugget
Transmisividad acuífero libre	Esférico	1,38*Esférico(10.493; 6.527,8, 16,1)+0*nugget
Superficie freática verano	Esférico	94,6*Esférico(10.528; 3.329; 39,8)+0,68*nugget
Superficie freática invierno	Esférico	180,8*Esférico(3.289; 2.068; 48,7)+0,68*nugget

El aspecto más crítico dentro de la ejecución de los proyectos de exploración hidrogeológica lo constituyen la evaluación de la recarga. Dentro de un contexto general, se dispone de diversos métodos para estimar la cantidad de agua que ingresa a un acuífero: los métodos directos describen la recarga como un mecanismo de percolación del agua desde el suelo hasta el acuífero, los métodos indirectos son aquellos que utilizan variables que describen y representan el flujo del agua a través del suelo. En los procedimientos directos se utilizan dispositivos de medición como los lisímetros o sustancias como trazadores ambientales o trazadores artificiales, con los procedimientos indirectos es necesario determinar la relación entre el flujo y la variable que lo describe, dentro de estos el balance de agua, que emplea la precipitación como principal variable de entrada al sistema, es el más utilizado. La ecuación de balance hídrico es una relación de conservación de masas en la que las entradas al sistema son iguales a las salidas más la variación en el almacenamiento, a

largo plazo se supone que el cambio en el almacenamiento es poco significativo pero a escalas de tiempo mensual o mayor su magnitud es considerable. El almacenamiento total se compone de un almacenamiento en el suelo, a disposición del uso consuntivo de la vegetación (que para el caso de la zona de estudio está compuesta principalmente por pastos), y un almacenamiento subterráneo. Existen alternativas de representación más complejas que caracterizan diferentes estratos del suelo en cada uno de los cuales dominan diferentes procesos de transporte hidráulico y diversas transferencias energéticas. Recogiendo la experiencia adquirida durante la realización de los trabajos de exploración hidrogeológica en la región, de acuerdo con la conceptualización de Thornthwaite-Mather se adaptó para el balance en la región el modelo de celdas propuesto por Bradbury et al., 2002 [16]. Teniendo en cuenta que el agua subterránea en la región del Bajo Cauca Antioqueño constituye prácticamente la única fuente segura de abastecimiento para consumo

humano, se tomaron en consideración las directrices establecidas en el decreto 475 de 2007 del Ministerio de Protección Social en relación con las condiciones exigidas para el agua de consumo humano, para evaluar su calidad. Para cada uno de los 71 análisis disponibles se confrontaron las concentraciones de los parámetros medidos con los valores reglamentarios y se elaboró una tabla síntesis de las condiciones de cada punto.

Resultados

El modelo hidrogeológico

El medio físico, la distribución espacial y la geometría de las unidades hidrogeológicas, la identificación de fuentes de recarga y la estimación de su magnitud, la posición de la superficie piezométrica, las propiedades hidráulicas y las condiciones de calidad del acuífero libre, son los elementos que en conjunto dan forma al modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño.

El medio físico

Después de descender desde el dominio montañoso de frentes erosivos de las cordilleras Occidental y Central, en Tarazá y Cáceres, el Bajo Cauca con alturas entre 50 y 200 metros sobre el nivel del mar, se abre en una zona amplia, de topografía suave, con superficies planas y onduladas, correspondiente a las superficies de erosión Caucasia y Zaragoza-Cáceres y a las superficies aluviales de los ríos Cauca y Nechí [13]. El río Cauca, una de las principales arterias fluviales del país, cruza la región del Bajo Cauca transportando a la altura de la estación limnigráfica Cacaoteras del Dique en Caucasia caudales del orden de $1.100 \text{ m}^3/\text{seg}$. Los ríos Nechí y Man, afluentes del Cauca y el río Cacerí, tributario del Nechí completan los sistemas que recolectan una densa red hídrica. En antiguos cauces y bajos inundables se desarrolla un complejo de humedales con más de 150 ciénagas. Las rocas presentes en el Bajo Cauca corresponden a un basamento Paleozoico ígneo y metamórfico sobre el cual reposan unidades litológicas constituidas por rocas y depósitos sedimentarios de edades Terciario y Cuaterna-

rio (Figura 5). El Batolito Jurásico de Segovia (Jdse), es el principal cuerpo ígneo regional en tanto que las rocas de los Complejos Puquí y Cajamarca agrupan diferentes facies metamórficas. La planicie del Bajo Cauca antioqueño está emplazada sobre un dominio sedimentario de edad Terciario con rocas de la Formación Cerrito (Tcf) y el Grupo Sincelejo (TcS). La Formación Cerrito [12] está dividida en tres miembros: Miembro Superior, areno-arcilloso, con niveles de arenitas calcáreas fosilíferas y algunos mantos de carbón, registra espesores de hasta 300 m. Miembro Medio, principalmente limo-arcillosos con capas de arenitas calcáreas fosilíferas hacia la parte media, presenta 54 mantos de carbón y espesores que alcanzan 850 m; el Miembro Inferior, conformado por areniscas, conglomerados y calizas, se caracteriza por la ausencia de mantos de carbón y posee un espesor de 400 m. En general los clastos de areniscas y conglomerados son 90% silíceos y el cemento dolomítico. El Grupo Sincelejo aflora al sur de la cuenca del río Man estaría dispuesto de manera discordante sobre la Formación Cerrito, exhibiendo rasgos geomorfológicos claramente contrastantes con el entorno. Regionalmente los depósitos aluviales recientes de mayor importancia están asociados a las llanuras de inundación de los ríos Cauca, Nechí y Man y, a las terrazas asociadas al río Cauca (6 en total), y a los ríos Nechí y Man (3 niveles en cada uno). Estructuralmente la Falla Espíritu Santo representa el rasgo tectónico más importante del Bajo Cauca, con un rumbo de $N30^\circ-50^\circ E$ pone en contacto los sedimentos terciarios con las rocas del Complejo Cajamarca, se trata de una falla normal activa con un ángulo de buzamiento alto al occidente, con un bloque oriental levantado y desplazamiento lateral izquierdo [11]. La falla del río Tarazá, con dirección $N10^\circ-20^\circ E$ controla el flanco oriental del sinclinal de Tarazá, desaparece hacia el norte, y mantiene la expresión topográfica por un trayecto de 10 km, sobre los sedimentos de la Formación Sincelejo. Sin evidencias directas medidas en afloramientos, las manifestaciones puntuales en superficie de los Miembros Medio e Inferior de la Formación Cerrito al occidente, norte y suroeste de la planicie del Bajo Cauca antioqueño sugieren

la existencia de un amplio sinclinal con dirección aproximada N40°-60°E [17]. Los cambios físicos y químicos y la actividad orgánica sobre las rocas de la planicie del Bajo Cauca han dado origen a diferentes asociaciones de suelo con propiedades texturales y estructurales que imponen relaciones complejas entre las fases sólida, líquida y gaseosa que coexisten en estos sistemas y que constituyen factores determinantes de las posibilidades agro-lógicas de los suelos y de la infiltración y precolación del agua lluvia para constituir la recarga a los acuíferos. El Ministerio de Agricultura en 2002 [18], dentro del estudio “Zonificación de áreas de aptitud forestal comercial para el departamento de Antioquia” actualizó el mapa de suelos departamento de Antioquia realizado en 1979 [19] por la subdirección agrológica del IGAC. En la tabla 2 se resumen las principales características de las asociaciones de suelo que son tenidas en cuenta para el cálculo de la recarga.

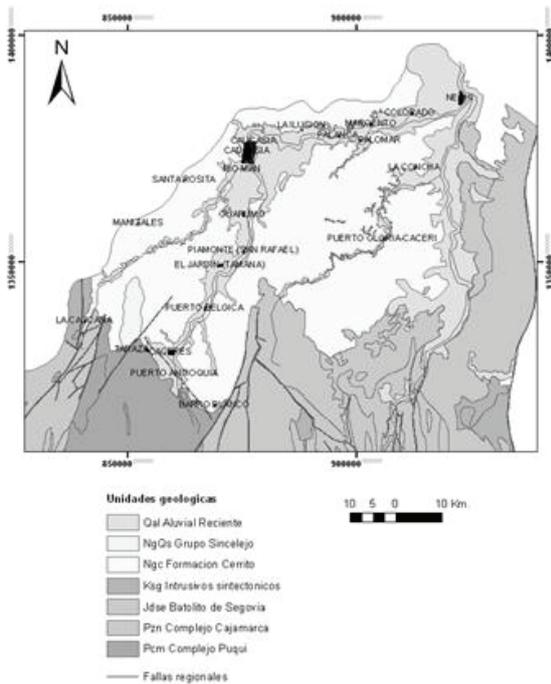


Figura 5 Mapa Geológico del Norte de Antioquia y el Bajo Cauca Antioqueño [17]

La localización tropical de la planicie del Bajo Cauca Antioqueño y sus condiciones climáticas:

una temperatura promedio anual de 27,8° que no registra variabilidad superior a 1° C y una precipitación promedio multianual de 2.800 milímetros, configuran un conjunto de circunstancias que imprimen a la zona un patrón climático homogéneo al que se le puede aplicar las denominaciones de *tropical lluvioso de selva* [20] o *cálido húmedo* [21]. Sin embargo, la influencia que sobre algunas variables climatológicas puede llegar a tener la cercanía de las vertientes de las cordilleras Central y Occidental y del mar Caribe, hace necesario que la descripción de las condiciones climáticas del Bajo Cauca trascienda la planicie aluvial del sistema Cauca-Nechi y se remonte vertiente arriba, comprendiendo inclusive regiones con climas *templado y frío*. Según la información disponible del IDEAM [14] y Universidad de Antioquia-CORATIOQUIA [10], la región andina en Antioquia esta caracterizada por un régimen pluviométrico bimodal, con dos estaciones lluviosas, una entre abril y mayo y la otra desde septiembre hasta noviembre y dos períodos secos junio-agosto el primero y luego diciembre marzo. Pero hacia el norte, después de pasar el alto de Ventanas, conforme se desciende desde los 2.500 metros de altura hasta llegar al piedemonte e ingresar en el Bajo Cauca para llegar luego a la región Caribe, el comportamiento de la precipitación se trona unimodal, con un período seco entre diciembre y marzo y condiciones húmedas entre abril y noviembre. Además la distribución espacial de la lluvia permite identificar un gradiente pluviométrico en sentido noroeste-sureste, con valores que aumentan desde 2.300 mm/año hasta 4.300 mm hacia las cabeceras del río Man y la cuenca del río Cacerí. Los análisis regionales hechos por el IDEAM para el comportamiento de la precipitación en las épocas de anomalías climáticas asociadas a los fenómenos Niño y Niña ubican al Bajo Cauca como una región en la que el comportamiento de la precipitación es normal con excesos solamente, para ambos escenarios climatológicos, hacia la confluencia del río Nechi en el Cauca.

Las unidades hidrogeológicas

El sistema acuífero del Baja Cauca antioqueño está conformado por tres unidades hidrogeológi-

cas, un acuífero libre denominado informalmente unidad hidrogeológica U_{123} , un acuitardo -unidad U4- y un acuífero confinado -U5-, su distribución espacial y en profundidad se presentan en el mapa de la figura 6 y en los cortes de la figura 7 .

En el *acuífero libre* - U_{123} - se conjugan, cubiertos por una delgada capa de suelo, los depósitos aluviales de los ríos Cauca, Man, Nechi y Cacerí y el saprolito poco consolidado de las rocas sedimentarias del Terciario del Miembro Superior de la Formación Cerrito. U_{123} abarca toda la planicie del

área de estudio, sus mayores espesores se dan a lo largo de varias franjas longitudinales en sentido $N10^{\circ}-15^{\circ}E$ y supera los 90 metros; entre los ríos Man y Cauca la profundidad de U_{123} oscila entre 40 y 90 metros, paralelo al curso del río Cacerí y hacia la confluencia de los ríos Nechi y Cauca esta unidad tiene también importantes espesores que alcanzan hasta 60 metros. Este acuífero libre se hace considerablemente menos potente, por debajo incluso de los 10 metros hacia el norte y el occidente en los límites con el departamento de Córdoba y hacia el sur en la vertiente andina.

Tabla 2 Características texturales, capacidad de campo y punto de marchites para las asociaciones de suelo [19]

Asociación	% Gruesos	% Finos	Capacidad de campo cm^3agua/cm^3suelo	Punto de marchites cm^3agua/cm^3suelo
Margarita	46,86	52,61	0,31	0,21
Cáceres	42,28	57,73	0,31	0,12
Cucharal	37,75	63,37	0,27	0,12
Taraza	40,75	59,25	0,28	0,15
Samán	19,8	80,13	0,34	0,18
El Real	32,26	68,12	0,31	0,17
Zaragoza	46,06	53,94	0,31	0,2
Raudal	44,11	55,89	0,27	0,15

El acuitardo - U4-: Subyace en toda el área de estudio a la unidad U_{123} , esta constituida por el Miembro Medio de la Formación Cerrito. A pesar de las bajas conductividades en el existen varias captaciones desde las cuales se extrae agua. Desde el centro del área de estudio, siguiendo un eje en sentido SW-NE, los espesores de U4 disminuyen desde 100 metros hasta que la unidad desaparece al norte donde aflora U5 o al sur al intersectar el basamento paleozoico. Los órdenes de magnitud de las profundidades de U4 alcanzan los 160 metros en el centro, al norte aproximadamente 20 metros y al sur son inferiores a 10 metros

El acuífero confinado -U5-: El Miembro Inferior de La Formación Cerrito constituye un acuífero confinado regional en el Bajo Cauca Antioqueño, sus espesores varían entre 10 y mas de 100 metros, esta unidad poco explorada y explotada podría constituir una importante reserva de agua

subterránea para la región; al igual que los espesores la profundidad de la base de U5 es incierta llegando a superar seguramente los 260 metros.

Recarga

La distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, los atributos geomorfológicos del paisaje, la hidrografía, el tipo de cobertura, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas, son todos factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero. Para la zona de estudio, tal como se presenta en la figura 8, se identificaron tres fuentes de recarga: en principio se tiene una recarga distribuida a lo largo y ancho de la planicie ocasionada por la infiltración directa del agua lluvia. En segundo lugar se produciría recarga a través de la interacción hidráulica que existe entre los principales cuerpos de agua superficial como lo son

los ríos Cauca y Man y desde algunas ciénagas y jagüeyes. Finalmente, se daría recarga lateral indirecta desde la roca metamórfica encajante del sistema tanto hacia el acuífero libre como hacia el acuífero confinado. Acerca de la procedencia del agua que satura la unidad U4, la cual, teniendo carácter de acuitardo, constituye fuente de agua para algunos moradores de la región, ella se daría a través de la conexión vertical con las unidades U_{123} desde la que se produciría goteo y U5 desde la cual podría haber ascensos ocasionados por efecto de flujo pistón.

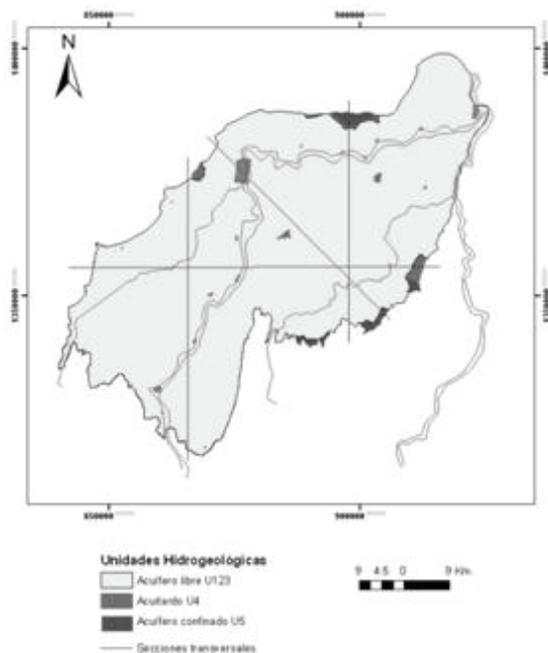


Figura 6 Mapa hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño

Estimación de la recarga. Los balances hídricos para un escenario hidrológico promedio y para períodos representativamente seco, año 1997 y húmedo, año 1999 muestran, ponderando por unidad de suelo magnitudes de recarga de 1273 mm/año, 982 mm/año y 1729 mm/año respectivamente. Las variaciones mensuales indican que en condiciones hidrológicas promedio los máximos valores de recarga se producen principalmente en septiembre y las condiciones críticas mínimas se dan en marzo.

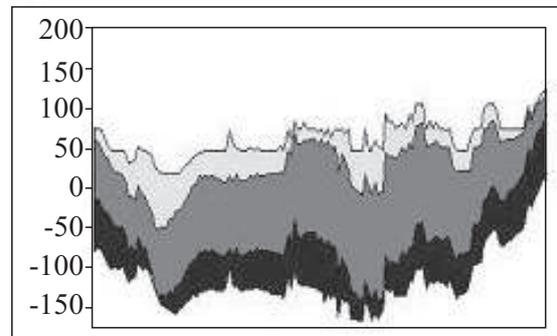
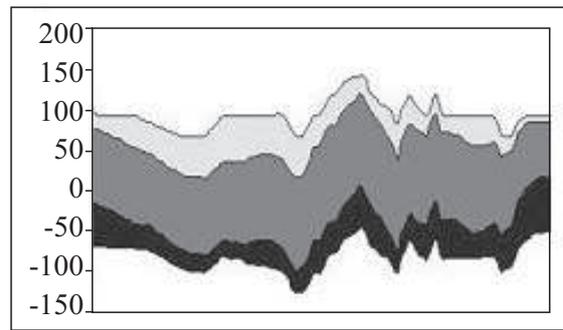


Figura 7 Secciones hidrogeológicas del Bajo Cauca antioqueño

Superficie freática para el acuífero libre

Con variaciones del nivel que no superan los 5 metros entre invierno y verano, el nivel freático del acuífero libre se localiza cerca de la superficie y, las condiciones de flujo subterráneo están marcadas por importantes divisorias (figura 9) entre los ríos Man y Cauca y Cauca y Cacerí, definiéndose áreas donde el agua fluiría desde altos freáticos localizados entre 90 y 140 metros hacia las grandes corrientes superficiales a las cuales aportaría caudal base. También desde el norte en límites con el departamento de Córdoba el flujo subterráneo se daría hacia el río Cauca. Al occidente en la vertiente izquierda del río Man sólo se logra dibujar de manera aproximada un flujo hacia el cauce y tal vez en algunos sitios en sentido opuesto. Para entender y explicar algunos bajos freáticos hacia la parte alta del río Man, en la parte baja del río Cacerí y cerca al casco urbano de Caucasia se requerirían de una nivelación de mayor escala.

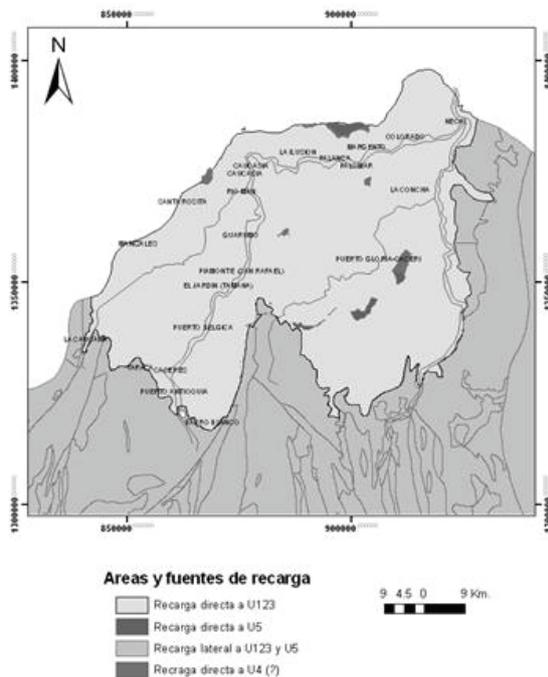


Figura 8 Fuentes y áreas de recarga al sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño

Propiedades hidráulicas

A partir de una serie de datos de conductividad hidráulica para el acuífero libre se obtuvo el modelo de distribución espacial de este parámetro según el cual el valor predominante alcanza el intervalo entre 1 y 2 m/día con zonas en las que se llega a 3 m/día. Estos resultados deben ser manejados con cautela a la espera de poder realizar pruebas más ciertas para su cuantificación.

Calidad del agua subterránea

De 123 datos de calidad de agua subterránea tomadas desde el acuífero libre, se observa que el 21% de las captaciones no cumplen el criterio de color, el 19.7% con el de turbiedad, el 22% el de alcalinidad, el 19.7% de las muestras superan el valor admisible de hierro total y el 62% esta por fuera de los rangos de pH, la DQO y los nitritos registran el 13% y 11% de muestras por fuera de los rangos permitidos para esos parámetros, algunas muestras acumulan 4 o 5 parámetros con valores por fuera de la norma. En todos los casos

en que se realizó medición de coliformes estos se encontraron presentes, situación no deseada en agua para consumo humano.

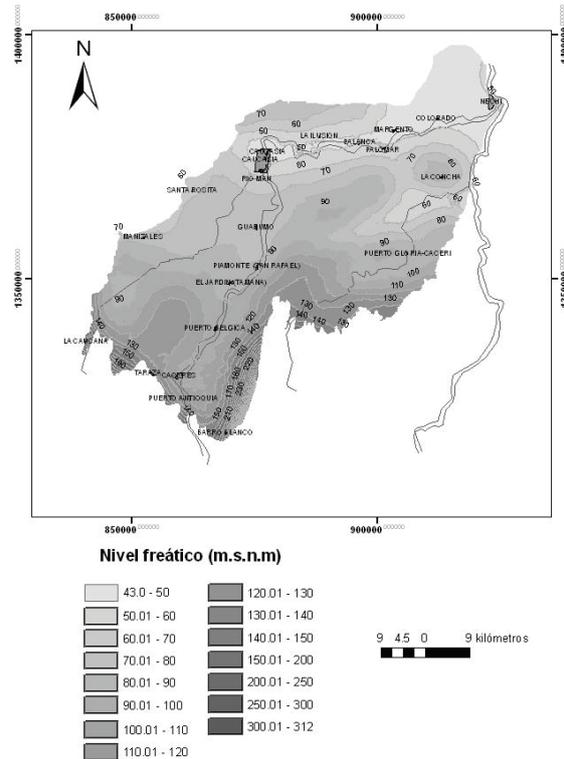


Figura 9 Nivel Freático época de invierno

Discusión y Conclusiones

La caracterización de un sistema hidrogeológico se sustenta en las condiciones físicas del medio en el cual se encuentra localizado el embalse de agua subterránea al que se denomina acuífero. Toda tarea de construcción de un modelo conceptual de un sistema acuífero debe considerar las evaluaciones: i) geológica y estratigráfica que permiten definir las unidades hidrogeológicas, ii) geomorfológica y de suelos que posibilitan identificar áreas de recarga, iii) climatológica e hidrológica, conducente a la cuantificación de la recarga, iv) de monitoreo freático y piezométrico, para definir la dirección de flujo subterráneo, v) relacionadas con pruebas de bombeo, que permitan determinar las propiedades hidráulicas del medio y, vi) de calidad del agua. Difícilmente la sola exploración hidrogeológica apoyada en métodos físicos e hi-

drodinámicos proporciona resultados completos y seguros en relación con el conocimiento del sistema acuífero. Sin lugar a dudas se requieren incorporar métodos de modelación numérica, químicos, hidroquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos, que amplíen el panorama y, además proporcionen enfoques cuantitativos, que permitan probar la validez de los modelos conceptuales y buscar, cuando haga falta, alternativas para la interpretación y evaluación. Muchos de estos métodos están ya bien contrastados y deben empezar a convertirse, en nuestro medio, en herramientas al alcance de hidrólogos e hidrogeólogos. El modelo hidrogeológico aquí expuesto constituye una primera contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño, sistema que deberá continuarse estudiando para lograr la comprensión que permita intervenir sobre el con criterios de sostenibilidad ambiental.

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro sincero agradecimiento a las instituciones CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia y a las personas que en ellas, acompañaron las actividades mediante las que se obtuvo la información necesaria para esta evaluación hidrogeológica en el Bajo Cauca antioqueño. Igualmente, muchas gracias a la comunidad del Bajo Cauca.

Referencias

1. F. Chapman. *Hidrología comparada*. Comité Nacional Español para el Programa Hidrológico Internacional. Ministerio de Obras Públicas; Transporte Medio Ambiente España. UNESCO. 1993. pp. 490.
2. E. Custodio, R. Llamas. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, Barcelona. 1997. pp. 584.
3. M. P. Anderson, W. W. Woessner. *Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport*. Ed. Academic Press. San Diego. 1992. pp. 381.
4. J. Bredehoeft. "The conceptual model problem — surprise". *Hydrogeol. J.* Vol. 13. 2005. pp. 37-46.
5. J. Carrera, A. Alcolea, A. Medina, J. Hidalgo, L. Floten. "Inverse problem in hydrogeology". *Hydrogeol. J.* Vol. 13. 2005. pp. 206-222.
6. C. Voss. "The future of hydrogeology". *Hydrogeol. J.* Vol. 13. 2005. pp. 1-6.
7. Universidad de Antioquia- CORANTIOQUIA. *Evaluación Hidrogeológica entre los Municipios de Cauca y Cáceres*. Informe final del convenio interinstitucional 1201. Medellín. 2003. pp. 365.
8. Universidad de Antioquia-CORANTIOQUIA. *Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos al norte del municipio de Cauca*. Informe final del convenio interinstitucional 5119. Medellín. 2004. pp. 344.
9. Universidad de Antioquia- CORANTIOQUIA. *Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos en la cuenca del Río Cacerí*. Informe final del convenio interinstitucional 5691. Medellín. 2005. pp. 316.
10. Universidad de Antioquia- CORANTIOQUIA. *Validación del modelo hidrogeológico de la territorial Panzenú usando técnicas isotópicas*. Informe final del convenio interinstitucional 5878. Medellín. 2006. pp. 104.
11. H. González. *Mapa geológico del departamento de Antioquia*. INGEOMINAS. 1996. pp. 92
12. Zapata, Cossio. *Geología de la plancha 93. Cáceres*. INGEOMINAS. 1993. pp. 72.
13. Universidad Nacional – Corantioquia. *Mapa geomorfológico de Antioquia*. Ingeominas. 1997. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. escala 1:400.000. 2002.
14. IDEAM. *Atlas climatológico de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia. 2005. pp. 219.
15. O. Mejía, T. Betancur, L. Londoño. "Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del Bajo Cauca antioqueño". *Revista DYNA*. Vol. 74. 2007. pp. 137-150
16. K. R. Bradbury, W. R. Dripps, D. W. Hankley, M. P. Anderson, K. W. Potter. *Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates*. Final Project Report to the Wisconsin Department of Natural Resources. 2002. pp. 84.
17. T. Betancur. "Estado actual y perspectiva de la investigación hidrogeológica en el Bajo Cauca antioqueño". *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Universidad Nacional. Medellín. N.º 17. 2005. pp. 97-108.
18. Ministerio de Agricultura. *Zonificación de áreas de aptitud forestal comercial para el departamento de Antioquia*. 2002. pp.81
19. IGAC. *Estudio de suelos del departamento de Antioquia*. 1979. pp. 1557.
20. W. Köppen. *Climatología: con un estudio de los climas de la tierra*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. 1948. pp. 478.
21. L. R. Holdridge, *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José. Costa Rica. 1967. pp. 206.