



Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia)

Hydrodynamic, geochemical and isotopic study of formations aquifers in the region of Bucaramanga (Colombia)

SULLY GOMEZ*¹, JEAN DENIS TAUPIN² & JOSE ALFREDO RUEDA¹

¹Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, Universidad Industrial de Santander

²UMR Hydrosiences (IRD, UMI, UM2, CNRS), Maison des Sciences de l'Eau, Montpellier, France

RESUMEN

En la región de Bucaramanga (Santander, Colombia) la geología es compleja. Una parte alta formada de rocas ígneas o metamórficas meteorizadas y fracturadas (Macizo de Santander) con fuerte pendiente y una parte baja, plana, formada de depósitos aluviales (Meseta de Bucaramanga). Los dos sistemas geológicos están separados por la falla de Bucaramanga. Existen acuíferos compartimentados en la parte alta donde predominan manantiales; en la parte baja, donde el conocimiento hidrogeológico ha permitido definir por piezometría, revela dos niveles de acuíferos: profundo y freático. Para mejorar el conocimiento de la relación a nivel de flujo entre la parte alta y baja se ha requerido, el uso de herramientas isotópicas y geoquímicas. Los datos isotópicos e hidroquímicos disponibles permiten observar el avance del flujo desde la zona de la montaña hacia los acuíferos aluviales a través la falla de Bucaramanga, que son recargados parte o totalmente con aguas que provienen desde la zona del Macizo de Santander recorriendo largas o cortas distancias. Las anomalías en los análisis químicos del agua muestran que el acuífero freático ubicado bajo la ciudad metropolitana de Bucaramanga parece sufrir localmente de contaminación a partir de fuentes superficiales. Los datos de tritio (3H) y carbono 14 (^{14}C) han permitido hacer una primera evaluación de la tasa de residencia del agua en la meseta, con una renovación rápida para el acuífero freático y más lenta para el acuífero profundo.

Palabras claves: Colombia, Andes, acuífero, geoquímica, isotopía.

ABSTRACT

In the area of Bucaramanga (Santander-Colombia), geology is complex with the upper part composed by weathered and fractured igneous or metamorphic rocks (Santander mountain) with high slope and the lower part composed by alluvial formation (Bucaramanga plateau). The Bucaramanga – Santa Marta Fault divides the two geologic systems. There are aquifers in upper part with many springs and in lower part two groundwaters layered. To improve the knowledge of flux relation between the two parts, we used isotopic and geochemistry data to support the hydrogeological study. The results show a flow dynamic from upper part to lower part through the Bucaramanga – Santa Marta Fault, which recharges the alluvial formation by water from the Santander mountain with long to medium scale flow-lines. Chemical anomalies in alluvial superficial groundwater show a contamination from the surface where Bucaramanga city spreads. Results from tritium and ^{14}C give a recent recharge for phreatic alluvial groundwater and much older for the confined groundwater.

Keywords: Colombia, Andes, groundwater, geochemistry, isotope.

*sgomez@uis.edu.co

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en la ciudad de Bucaramanga se empezó a conocer en forma técnica hacia los años 1960, cuando se presentaron los primeros problemas de movimientos de masas de tierra en las escarpas de la Meseta de Bucaramanga, controlados en su momento mediante la construcción de obras de drenaje del acuífero superior. En los últimos años, el agua subterránea adquirió otro significado, las aguas subterráneas en la ciudad de Bucaramanga y sus alrededores se han utilizado en pequeñas industrias, lavaderos de automóviles y algunos en abastecimientos doméstico rurales, lo cual se refleja actualmente en el número importante de permisos solicitados a la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) (65) hasta la fecha (Rodríguez & Torres, 2011). Sin embargo, en la zona de montaña, se utilizan los numerosos manantiales existentes en consumo humano, agrícola y ganadero.

La principal fuente de agua para consumo humano de esta ciudad –que alberga cerca de un millón de habitantes y se encuentra localizada entre 900 y 1000 m.s.n.m. sobre rellenos aluviales y áreas de contacto de estos, con el macizo rocoso de Santander– continúa siendo el agua que proviene de las bocatomas de los ríos en la zona de montaña. El uso intensivo actual y el alto riesgo a la contaminación de los acuíferos (Gómez et al., 2011) exige el conocimiento de un modelo conceptual que explique el flujo o recarga desde la zona de la montaña (rocas duras fracturadas) hacia estos acuíferos y las interacciones entre ellos.

El marco geológico se ha planteado a partir de reconocimiento de campo, perforaciones, ensayos geofísicos, entre otros; lo cual ha permitido plantear un primer modelo geológico–geofísico (Ingeominas, 2004). También se han utilizado trazadores naturales como son los isótopos estables del agua como herramienta para monitorear los diferentes componentes del ciclo hidrológico, agua de lluvia, agua subterránea y agua de ríos.

El muestreo ha tomado en cuenta las condiciones locales que van interactuar sobre la composición isotópica, principalmente variabilidad espacial y altura. Un primer muestreo realizado entre 2002 y 2003 (Gómez & Anaya, 2004) permitió observar que la recarga a los acuíferos de Bucaramanga proviene principalmente de la zona de la montaña (sobre los 1800 m s.n.m.). Igualmente se han realizado algunas pruebas de bombeo, inventarios de puntos de agua (los caudales de extracción son poco confiables) y se cuenta con pozos de observación, algunos con instrumentos para toma de niveles y conductividad eléctrica. La información de niveles de agua en el acuífero superficial aunque aceptable en cubrimiento espacial permite construir líneas isopiezas, es poco aceptable en continuidad temporal. En el acuífero profundo la información es menor y aunque se observan líneas de flujo, es necesario mayor información espacial y temporal.

La interacción acuíferos–río ha sido estudiada, se conoce que la proporción del flujo base del río principal en contacto con los acuíferos en su punto de cierre es alrededor del 70% (Gómez & Guzmán, 2011).

La falta de un modelo conceptual de flujos subterráneos ha llevado a realizar una nueva recopilación de información y análisis detallado de las condiciones de los sistemas acuíferos, así como nuevos muestreos de trazadores de edad del agua como Tritio (3H), Carbono 14 (^{14}C) y datos complementarios de Deuterio (δ^2D) y Oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) los cuales son presentados en este trabajo. Aunque la hidroquímica es considerada una herramienta importante en el planteamiento de un modelo conceptual de flujo, existen datos aceptables en la zona del macizo y pocos datos en la zona de los acuíferos aluviales que son incluidos solamente para tener una idea general de la química de las aguas.

Las diferentes herramientas utilizadas en este trabajo han permitido realizar una mejor aproximación del estado del conocimiento de los sistemas acuíferos en esta región, de su hidrodinámica y modelo conceptual de flujo.

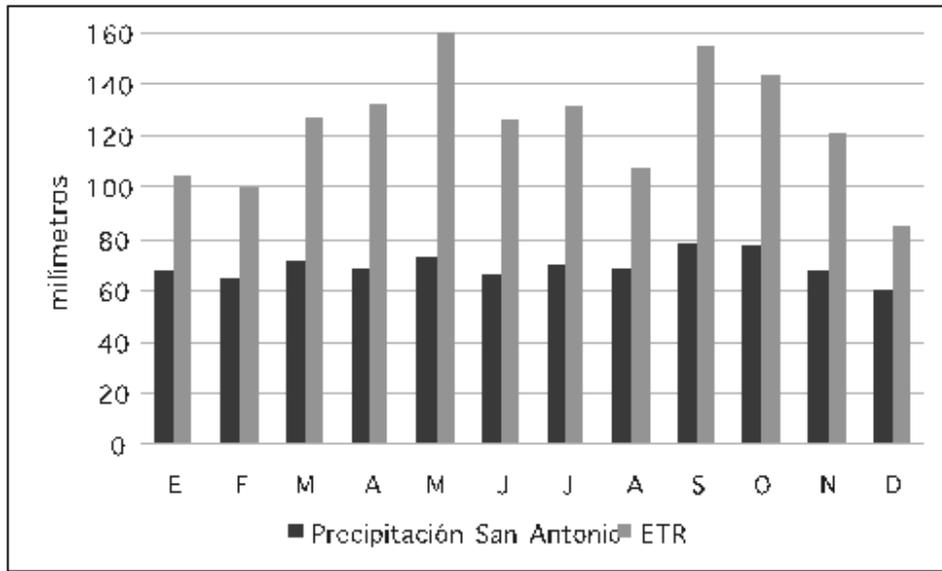


Fig. 2. Valores de precipitación y evapotranspiración real mensual promedio en la estación San Antonio (1990–2010)

En la Figura 2 se observan los valores de precipitación y evapotranspiración real en la estación San Antonio, localizada a una altura de 1480 m s.n.m. en la zona de montaña, los cuales muestran el comportamiento bimodal.

La zona montañosa (macizo rocoso de Santander) posee rocas ígneas (Cuarzomonzonitas) y metamórficas (Neis de Bucaramanga) altamente fracturadas y meteorizadas, en menor porcentaje se encuentran rocas sedimentarias entre las que se encuentran rocas calcáreas. La zona plana u ondulada se encuentra conformada por depósitos aluviales, tipo abanicos, localizados sobre rocas sedimentarias de la Formación Jordán y Girón principalmente (Ward et al., 1973). Las zonas montañosa y ondulada se encuentran separadas por la Falla de Bucaramanga, accidente geológico que demarca en gran parte la geomorfología y el comportamiento hidrogeológico de esta región.

En los depósitos aluviales de la Formación Bucaramanga y en formaciones sedimentarias (Gómez & Colegial, 2003) se encuentran acuíferos de pequeña a mediana extensión con productividad baja a media, algunos de ellos constituyen acuíferos colgados y se encuentran comunicados con acuíferos más profundos. Estos acuíferos se encuentran en contacto con los ríos que atraviesan los depósitos. El punto de cierre de la cuenca se localiza en el sitio llamado Café Madrid (640 m s.n.m.), aguas abajo confluyen los ríos de Oro y Suratá, es el sitio representativo de la interrelación entre el río y los acuíferos existentes.

Geología y características hidráulicas de acuíferos

El marco geomorfológico regional está dominado por las estructuras geológicas y la tectónica de la región (Figura 3), de manera que las unidades geomorfológicas coinciden a grandes rasgos con las unidades litológicas y estructurales (Hermelin, 1976). Las unidades morfológicas principales son el Macizo de Santander y la Terraza de Bucaramanga, donde se encuentran unidades hidrogeológicas de interés. La Terraza de Bucaramanga presenta escarpas que se caracterizan por tener pendientes abruptas, en ocasiones verticales, que forman su límite occidental y norte. Los ríos en la zona han contribuido en mayor o menor proporción al depósito de los materiales aluviales que conforman la zona de estudio. Existe un drenaje superficial relacionado directamente con la Terraza de Bucaramanga y aferente al río de Oro, constituido por corrientes que hacen parte del sistema de drenaje del Macizo de Santander. El sistema de corrientes superficiales se encuentra relacionado con los sistemas acuíferos.

Desde el punto de vista litológico se distinguen (Figura 3) los siguientes tipos de rocas (Julivert, 1963; Tricart et al., 1968): Las rocas ígneas metamórficas de edad Precámbrica y Paleozoica que

aflojan al oriente de la ciudad de Bucaramanga constituyen parte del Macizo de Santander, así como las formaciones Paja, Tablazo, Rosablanca, Los Santos y Silgará localizadas hacia la parte oriental de la cuenca. Las rocas sedimentarias de la Formación Girón y Jordán alrededor de la ciudad de Bucaramanga, con algunos afloramientos de Calizas y Areniscas (formaciones Surata–Bocas y Tiburón) al norte de la ciudad. Finalmente el depósito aluvial de Bucaramanga presenta continuidad horizontal, cuyos sedimentos constituidos por material granular conforman tres niveles o miembros.

Actualmente se tiene un modelo geológico geofísico (Ingeominas, 2001, 2004) planteado a partir de la interpretación de abundante trabajo de prospección geoelectrica geofísica, y del análisis de columnas litológicas de 73 pozos superficiales (profundidades entre 20 y 30 metros) y 11 perforaciones profundas (profundidades entre 50 y 300 metros). Tres de ellas atraviesan el relleno aluvial y reconocen los tres niveles, perforación de Metrocentro (100 m), perforación Parque de los Niños (100 m) y perforación Parque San Pio (300 m). Un corte típico obtenido del modelo geológico geofísico con sus principales unidades se observa en la Figura 3. Estos depósitos están formados por bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas, mezclados en proporciones variables y que conforman la Formación Bucaramanga.

Los depósitos suprayacen en unidades más antiguas que constituyen el basamento donde subyacen los depósitos aluviales sobre los cuales está construida la ciudad de Bucaramanga. Las primeras unidades tienen origen ígneo metamórfico de tipo neis, esquisto, migmatita e intrusivos de granodiorita (Precámbrica y Paleozoica) que afloran en el bloque montañoso (ubicado en la zona de estudio) al oriente del sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta, conformando un gran volumen rocoso conocido con el nombre de Macizo de Santander. Las segundas unidades conformadas por rocas sedimentarias de edad Jurásico afloran al noroccidente de Bucaramanga, norte de Floridablanca y alrededores de Piedecuesta por la Formación Jordán (Jj) y al suroccidente de Bucaramanga, noroccidente de Piedecuesta y norte de Floridablanca por la Formación Girón (Jg). La que tiene mayor presencia (cerca del 60%) es la Formación Girón. Las rocas que constituyen el basamento se encuentran fracturadas mostrando bloques que caen progresivamente desde la Falla de Santa Marta–Bucaramanga hasta el sector del río de Oro, formando una depresión tectónica con su mayor hundimiento bien definido bajo el río de Oro. El borde occidental de esta depresión está constituido por bloques de rocas de la Formación Girón que se levantan rápidamente formando el cerro de Palo Negro. Al oriente el contacto de la Formación Girón y el Macizo de Santander es fallado, cubierto en la zona de estudio por los depósitos aluviales Formación Bucaramanga.

La Formación Bucaramanga de edad Cuaternaria se encuentra conformada de base a techo por el miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr) con valores perfectamente diferenciables de resistividades eléctricas, según el modelo geológico físico (Tabla 1).

Miembro Órganos (Qbo):

Supera los 180 m, es el nivel más potente de la Formación Bucaramanga y conformado por una serie de fragmentos gruesos conglomeráticos que alternan con capas y lentes limo arenosos, con variaciones en composición y textura lateral y vertical con dos tipos de textura diferentes, una gruesa (Qbo1) y otra más fina (Qbo2) localizada hacia la base, con contrastes importantes en resistividad eléctrica (Ingeominas, 2004).

Miembro Finos (Qbf):

Conformado por una capa tipo lenticular, más o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, aumentando de norte a sur de la terraza y alcanza cerca de 20 metros hacia el suroccidente. En este nivel alternan niveles arcillosos, limos arenosos y arena limosos, formando una capa que presenta un contraste importante de resistividad eléctrica. Ha sido identificada en las perforaciones que se encuentran localizadas sobre la Terraza de Bucaramanga y se observa a lo largo de las escarpas norte y occidental de la terraza.

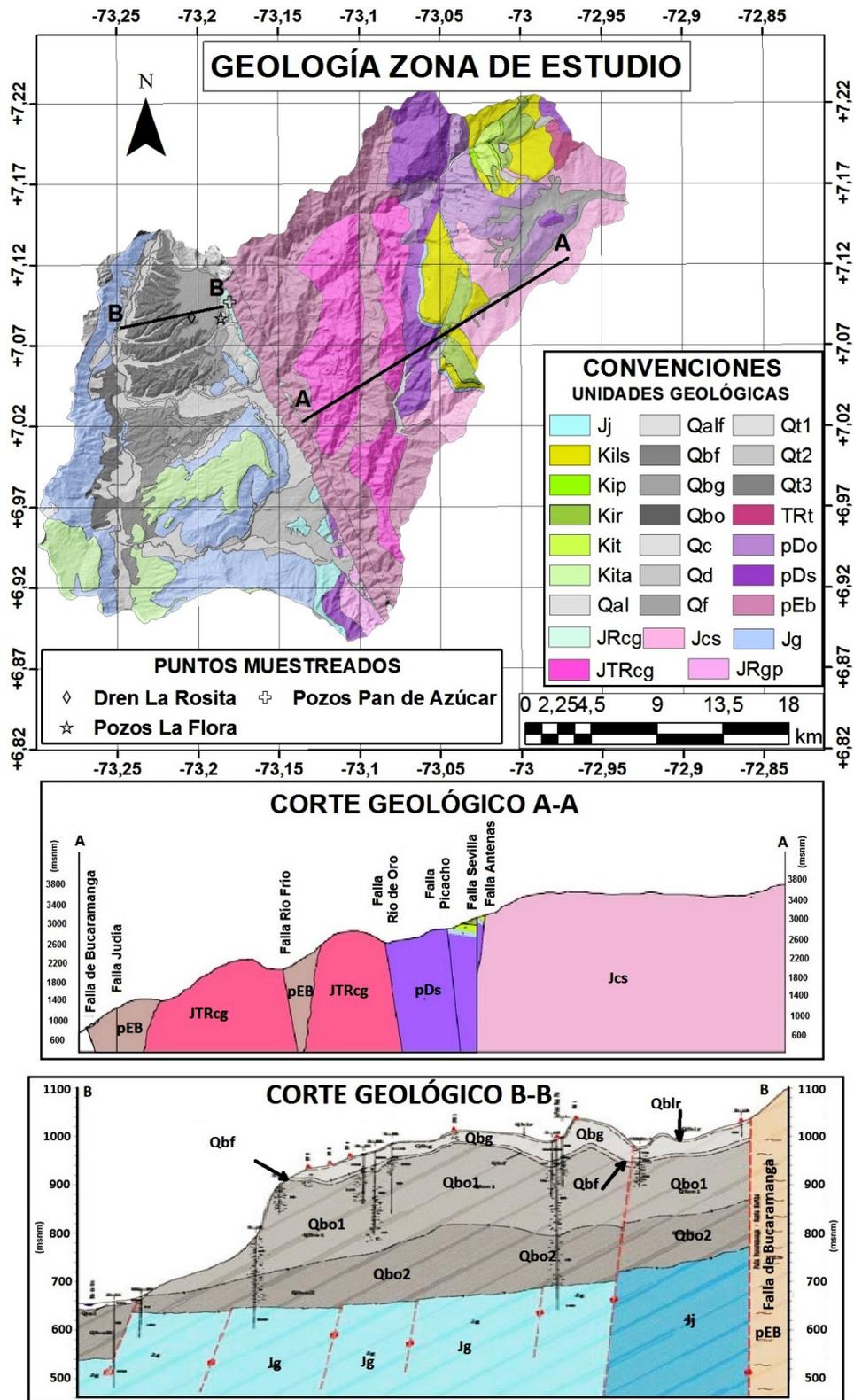


Fig. 3. Mapa geológico y perfiles típicos de la geología de la región de Bucaramanga zona alta y baja (Ingeominas, 2004)

Tabla 1. Valores de resistividad eléctrica (ohmios-m) y espesores (m) observados en el modelo geológico-geofísico

Miembro	Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3		
	Espesor	Resistividad	Espesor	Resistividad	Espesor	Resistividad	
Limos rojos	1	34-103	1	34-103	0		
Gravoso	30-40	58-1113	30-40	80-400	0		
Nivel de Finos	5-16	2-24	10-13	10-30	0		
Órganos 220-300 metros	Grueso	120-70	42-533	10-150	40-250	15-30	40-750
	Fino	40-140	7-29	70-200	8-26	120-180	5-25
Rocas Basamento	Girón	132-238	Girón	100-160	Girón	100-180	
	Neis	20-850	Neis	20-850	Jordán	36-469	

Miembro Gravoso (Qbg):

Presenta niveles gravosos, gravo-arenosos y gravo-lodosos. La textura granular y el grado de meteorización medio a alto sugiere que la parte superficial de este miembro presenta buena permeabilidad. Los valores de resistividad y perforaciones estudiadas muestran un espesor relativamente continuo de 30 a 40 m.

Limos Rojos (Qblr):

Se presentan en forma variable en el sector urbanizado de Bucaramanga, extendiéndose hacia el sur hasta el sector norte del municipio de Floridablanca. Están compuestos por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos y amarillentos. Existen también depósitos aluviales (Qal, Qal1 y Qal2) distribuidos de acuerdo a su posición en los valles de los principales ríos. Localmente se presentan depósitos coluviales de ladera (Ql), la mayoría de pequeña extensión, provenientes en gran parte de fenómenos de remoción en masa o por efecto de la gravedad, los cuales se acumulan en las laderas o al pie de estas.

El agua subterránea en el Macizo de Santander han sido estudiados a partir de manantiales (Rueda, 2013), se nota que éstos están asociados a fallas geológicas o zonas de parteaguas. El primero funciona a través de zonas meteorizadas a lo largo de lineamientos de parteaguas. La meteorización de las zonas de parteaguas puede llegar hasta espesores de por lo menos 40 metros, que tienen presencia de niveles con algún grado de saturación. Los recorridos de estos flujos parecen ser cortos y están fuertemente controlados por la geomorfología del parteaguas (cerros y valles). El segundo tipo de flujo identificado ocurre a través de fallas geológicas y es llamado de larga distancia. Los dos flujos antes mencionados no se dan de manera aislada, por el contrario están muy relacionados. En algunos puntos, las fallas geológicas cruzan los lineamientos de parteaguas, generando zonas de interacción entre los dos flujos. La conductividad hidráulica de la falla es mucho más alta que la de la zona meteorizada, por lo tanto las zonas de falla pueden captar y almacenar volúmenes de agua. A partir de investigaciones y de la construcción del modelo geológico-geofísico de la región se ha reconocido que son más prometedores los acuíferos fracturados en la cercanía al río de Oro (Girón Fracturado) y zonas meteorizadas y fracturadas de la parte oriental del área (Neis e Intrusivo) donde se localiza el Sistema de Fallas Santa Marta-Bucaramanga (Gómez & Colegial, 2003; Ingeominas, 2004).

En el área de la Terraza de Bucaramanga, son evidentes los niveles freáticos superficiales que se observan a lo largo de las escarpas y han sido medidos (1984-1992) en piezómetros, construidos con profundidades de 30 metros en el Miembro Gravoso (Qbg), donde se ha identificado un acuífero superficial que se extiende en toda la amplitud de la Terraza de Bucaramanga, delimitado en la parte baja por el Miembro Finos (Qbf) impermeable. Los espesores saturados en áreas cercanas a las escarpas pueden alcanzar valores mayores a 10 metros entre la escarpa norte y la Quebrada Seca. Hacia el sur de la Terraza entre Quebrada Seca y Quebrada la Iglesia estos espesores saturados toman valores entre 3 y 7 metros y más adelante pierden conexión horizontal, encontrándose algunos acuíferos de pequeño espesor hasta su desaparición hacia la zona del río Frio (Ingeniería de Suelos, 1991); hacia la zona central y oriental de la terraza aumenta el valor de los espesores saturados. Este acuífero ha sido llamado

Acuífero Superficial de la Meseta de Bucaramanga, inicialmente fue estudiado con el fin de controlar los movimientos de masas de tierra que afectaban la escarpa occidental y norte de la terraza, donde se diseñaron numerosas obras de drenaje. Actualmente el sistema de medición de niveles se encuentra suspendido, sin embargo existen y funcionan cerca de 30 pozos de pequeño caudal. Muy pocas pruebas de bombeo disponible y algunas de laboratorio reportan valores de conductividad hidráulica para este acuífero entre 0.4 y 1.7 m/día.

En la región de Bucaramanga, comprendida entre el río Surata y río Frio, se conocen cerca de 18 pozos localizados en el Miembro Órganos (Qbo) de la Formación Bucaramanga (Rodríguez & Torres, 2011), el cual ha sido llamado Acuífero Profundo de Bucaramanga (Gómez & Anaya, 2004). Aunque el modelo geológico–geofísico reconoce que en esta unidad existen dos niveles diferenciables desde sus valores de resistividad eléctrica, donde el nivel inferior que suprayace a las rocas de la Formación Girón es menos permeable y el nivel superior presenta mejores condiciones de saturación, se ha observado que los pozos existentes perforan inclusive hasta la Formación Girón, producen caudales de bombeo interesantes y presentan mejores condiciones hidráulicas, comparadas con el acuífero superficial. Por supuesto se debe diferenciar entre el aporte del Miembro Órganos y el aporte de la Formación Girón. En general los pozos localizados cerca al río de Oro presentan mejores condiciones hidráulicas. En la Tabla 2 se observan los pozos que se encuentran localizados en el acuífero profundo de Bucaramanga o toman parte de éste, de los cuales se tiene información de pruebas de bombeo.

El inventario realizado en el año 2011 (Rodríguez & Torres, 2011) en los acuíferos aluviales de Bucaramanga permite reconocer 126 puntos de agua subterránea entre pozos profundos, cisternas, manantiales y piezómetros en todas las unidades hidrogeológicas; 45 de ellos concesionados, lo cual permite obtener información muy general, y muy pocos puntos poseen aforos o pruebas de bombeo. Durante el inventario se pudo medir el nivel del agua en puntos localizados, a partir de los cuales se realizaron mapas de isopiezas tanto para el acuífero superficial de Bucaramanga como para el acuífero Profundo (Figura 4). Pruebas de bombeo en los acuíferos superficial y profundo han reportado transmisividades del orden de 26 m²/día (ETA, 1979).

En el acuífero superficial se observa que la dirección del flujo ocurre en dirección este–oeste a partir de la zona oriental de la Terraza con un gradiente del 2% y que el flujo termina en los bordes de la escarpa occidental y norte de la Terraza de Bucaramanga, siendo las principales corrientes superficiales que atraviesan la terraza, líneas de flujo de este acuífero. El acuífero profundo tiene la misma dirección del flujo este–oeste hacia el río de Oro con un gradiente hidráulico del 4%, siendo este río una línea equipotencial del acuífero.

El acuífero fracturado de la zona meteorizada del Ígneo metamórfico ha sido reconocido mediante perforaciones profundas (80 a 100 metros) en rocas meteorizadas y fuertemente fracturadas (Gómez & Colegial, 2003) y una medición continua de niveles en pozos de observación han reportado la existencia de dos acuíferos uno superficial libre y otro más profundo confinado. Pruebas de bombeo en la parte somera de las perforaciones anteriores (pozos de observación) han reportado transmisividades entre 1 y 10 m²/día (Caballero & Gómez, 2011; Barrera & Ruiz, 2012). Este acuífero se encuentra en contacto con los acuíferos aluviales de la Formación Bucaramanga, se localiza alrededor de la Falla Bucaramanga–

Tabla 2. Resumen de algunos parámetros hidráulicos en pozos del acuífero profundo de Bucaramanga

Nombre de Pozo	Profundidad (m)	Transmisividad	Coefic. Almac.
Somascos	56	0.3 – 8.0 m ² /d	0.0070
Metrocentro	98	25.9 m ² /d	0.0061
P. Agropecuaria	45		
P. Frescaleche	100	Sin información	Sin información
P. Estación El Carmen	63	Sin información	Sin información

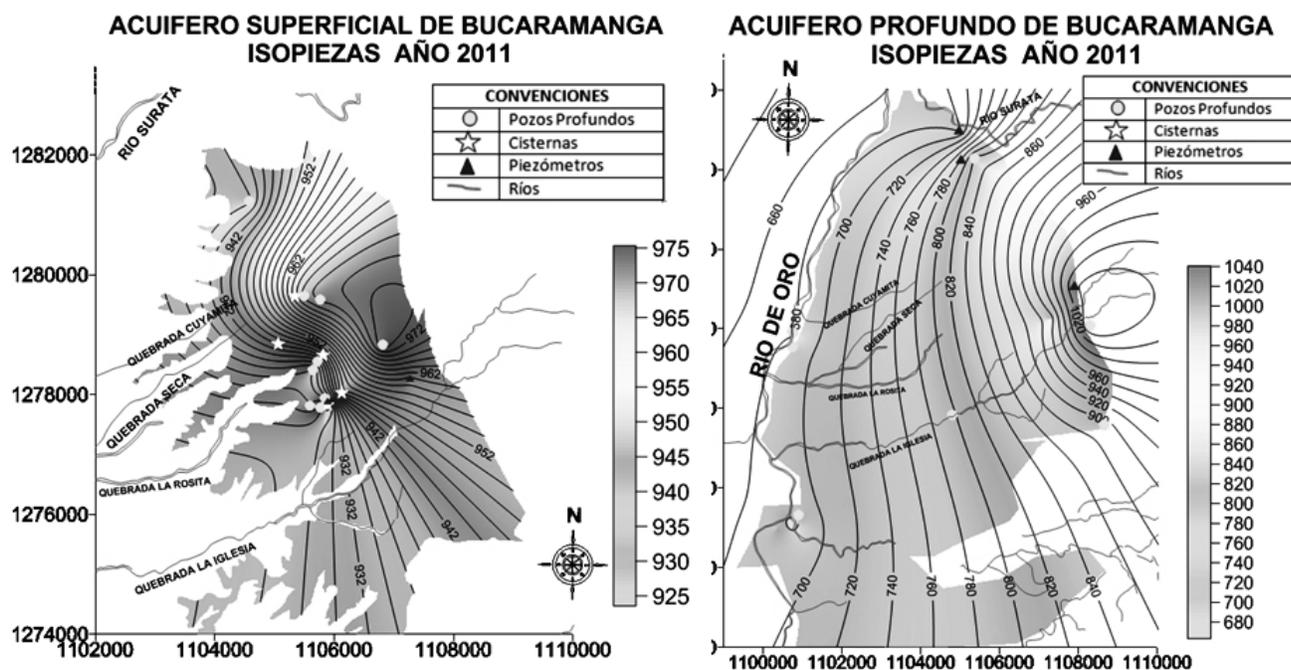


Fig. 4. Líneas isopiezas de los acuíferos superficial y profundo en la zona aluvial de la Formación Bucaramanga

Santa Marta al occidente y su extensión al oriente comprende la zona meteorizada y fracturada del Neis de Bucaramanga en el Macizo de Santander, pero hasta el momento se desconoce su extensión, profundidad y comportamiento hidráulico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidroquímica

En la región de Bucaramanga se han realizado algunos análisis hidroquímicos de iones mayores. Los balances iónicos realizados a las muestras reportan valores menores al 4%, las muestras se analizaron en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales, UIS, Colombia. En la zona del Macizo de Santander se tienen 49 puntos de manantiales identificados (Ingeominas, 2009). Las aguas en su mayoría corresponden a facies bicarbonatadas cálcicas, mixtas y sódicas. En las formaciones Los Santos y Silgará existen dos puntos con clasificación sulfatada cálcica y sulfatada mixta. La única fuente cartografiada de sulfatos en la zona es la Formación Paja, de carácter sedimentario que está compuesta por niveles delgados de limolitas, lodolitas y arcillolitas negras con presencia de impresiones fósiles, con minerales accesorios moscovita y piritita, frecuentemente se encuentran niveles de yeso. Aunque los cultivos en estas zonas de montaña no son extensos, no se descarta la existencia de contaminación por uso agrícola. Se realizaron otras mediciones químicas fueron hechas en el macizo sobre manantiales en dos líneas altitudinales (1500–2200 m s.n.m.) correspondiendo al lineamiento de la divisoria de aguas entre los ríos Tona y Frio (Rueda, 2013). La geoquímica presenta facies bicarbonatadas cálcica con un aumento de la conductividad eléctrica en dirección este–oeste, poniendo en evidencia una continuidad hidráulica y la dirección de flujo del sistema acuífero superficial en el macizo de Santander. Al final, durante el año 2012, se complementó la hidroquímica con mediciones en 4 pozos y un dren en la parte baja de la zona. En la zona de la Falla de Bucaramanga, en el sector oriental de la ciudad, se encuentran ubicados los puntos de muestreo Pan de Azúcar, en el acuífero fracturado de litología granito, cuarzomonzonita y diorita, y los puntos de La Flora, en el sector oriental de la formación aluvial de Bucaramanga; en cada punto hay dos piezómetros, uno superficial y otro profundo. Finalmente en la zona de la escarpa occidental se tiene

un dren llamado La Rosita, que drena agua desde el acuífero superficial de la Formación Bucaramanga y fue seleccionado para tomar una muestra (Tabla 3); localización de estos puntos en la Figura 3.

En los puntos de la zona de la Falla de Bucaramanga se encuentran aguas $HCO_3^-Ca^{2+}$ (Pan de Azúcar profundo), $SO_4^{2-}/HCO_3^- - Ca^{2+}$ (Pan de Azúcar superficial), $HCO_3^- - Na^+/Ca^{2+}$ (La Flora profundo) y HCO_3^-/Cl^-Ca^{2+} (Flora superficial dos campañas). El agua del dren La Rosita se clasifica como Cl^-Na^+ y no presenta ninguna correlación con la geología aluvial de la meseta (Tabla 4, Figura 5).

Los valores, encontrados en la Falla de Bucaramanga y la zona de escarpa occidental de Bucaramanga, del ion cloruro oscilan entre 11 y 30 mg/L, mayores que los encontrados por Ingeominas

Tabla 3. Ubicación de puntos de muestreo en la zona de falla y meseta de Bucaramanga

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altura (m s.n.m.)	Prof. Agua (m)	Descripción
La Flora, superficial, profundo (2)	1107270	1278242	957.9	2 y 20 m resp	Zona de Falla
Pan de Azúcar, superficial, profundo (2)	1107875	1279071	1042.0	20 y 10 m resp.	Zona de Falla
Dren La Rosita (1)	1105251	1278261	893.9	No aplica	Zona Escarpa

Tabla 4. Resultados de muestreos hidroquímicos en la zona de Falla de Bucaramanga y escarpa occidental de Bucaramanga

Nombre	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	CE
La Flora superficial-julio	7.6	2.4	3.1	14	21.2	3.9	43.5	1.3	204
La Flora superficial-mayo	7.5	2.5	3.1	14	16.1	5.8	42.7	3.6	204
La Flora profundo	15.1	8.6	5.2	15.6	21	2.6	94.8	0.2	239
Pan de Azúcar-superficial	5.1	1.9	11.7	67.8	11.1	116.7	122.9	3.2	390
Pan de Azúcar-profundo	4.9	2.5	16.5	65.1	23.2	51.2	183.7	0.5	420
La Rosita	17.2	3.8	1.8	9	30.6	0	31.2	8.2	206

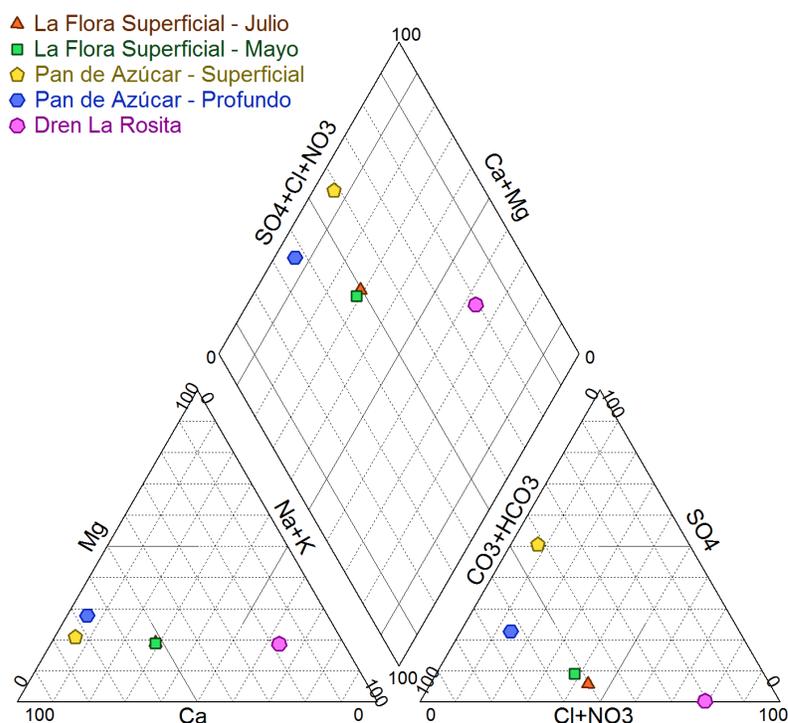


Fig. 5. Diagrama de Piper, campaña 2012

(2009) que presentan valores hasta de 10 mg/L en la zona de montaña. En el agua de lluvia en la zona de montaña (estaciones pluviométricas de La Galvicia y La Mariana) se encontraron valores de cloruros entre 0.02 hasta 1 mg/L (promedio de 0.3 mg/L) (Barrera, 2006); el valor de 10 mg/L encontrado en el acuífero del macizo parece representar el nivel natural basado sobre el hecho de que no hay muchas actividades antrópicas alrededores de los puntos de medición. Para explicar el contenido más elevado en la parte baja, la hipótesis intuitiva de este comportamiento, es que estos valores son resultado de la contaminación de las aguas subterráneas (actividades antrópicas) por infiltración local o resultado de una contaminación a la escala de la cuenca como punto bajo de recolección.

El valor de cloruros (y sodio) en el dren La Rosita (zona aluvial) muestreado en septiembre de 2012 es mayor que al registrado en los piezómetros superficiales de la zona de falla. El aumento en la concentración de cloruros y sodio en el agua subterránea al pasar por la ciudad da lugar a presumir la existencia de recarga local o en su defecto a aportes de agua por fugas en el sistema de alcantarillado, que transportan sustancias contaminantes que alcanzan el nivel acuífero.

El comportamiento de los sulfatos muestra anomalía en los pozos de Pan de Azúcar, se tiene 51 a 116 mg/L en el pozo profundo y superficial, este último tiene un olor característico a H_2S correlacionado con la alta concentración de sulfatos, respectivamente; en los demás puntos de la zona aluvial y de falla se encuentran valores de menos de 6 mg/L. Ingeominas (2009) reporta valores entre 50 mg/L y 240 mg/L en 8 puntos localizados en formaciones sedimentarias (presencia de piritas) en la parte más alta del macizo de Santander, los demás puntos presentan valores menores a 30 mg/L.

La hipótesis de flujo de agua subterránea, actualmente aceptada, plantea que la zona de falla es la franja que comunica la zona de recarga en el macizo de Santander con los acuíferos en la meseta aluvial, es confirmada por el estudio de los isótopos (ver al fin de este capítulo). Por lo tanto, la recarga local en la Meseta de Bucaramanga es mínima. Pero, si se podría pensar que en el acuífero profundo la composición en sulfatos es la resultante de la infiltración del agua en la totalidad del Macizo de Santander, el valor encontrado en el acuífero superficial parece demasiado elevado para guardar esta hipótesis, una contaminación local por infiltración directa a partir de la superficie, parece más probable para el nivel superior, debido a que únicamente este pozo presenta valores muy alto y olor de H_2S .

Se espera que los valores de conductividad eléctrica (CE) aumenten en la dirección de flujo desde Pan de Azúcar (zona de falla) hasta La Rosita (final de la Meseta de Bucaramanga), al recibir la contaminación de la zona urbana sobre el acuífero superficial, aunque el comportamiento de estos valores es contrario, la CE disminuye. Los resultados anteriores pueden reflejar una dilución generada por posible recarga desde las fugas del sistema del acueducto que abastece a cerca de 520 000 habitantes que viven en la Meseta de Bucaramanga. Una estimación de la recarga artificial considerando pérdidas del 20% en el área urbana es de 470 mm anuales, valor suficiente para que ocurra dilución de la concentración anterior de iones. Una futura campaña más amplia de medición sobre la totalidad de la meseta permitirá confirmar esta hipótesis.

Isótopos

En la región de Bucaramanga se han realizado muestreos de isótopos estables (óxígeno 18 ($\delta^{18}O$) y deuterio (δ^2H)) desde el año 2002; primero con el fin de identificar el origen de la recarga de los acuíferos aluviales, y posteriormente estudiar los caudales base de los ríos y determinar hipótesis de flujo desde el Macizo de Santander. Los análisis se hicieron en laboratorios que prestan servicios a la Agencia Internacional de Energía Atómica. El aparato usado es el IRMS (Isotope-ratio mass spectrometry) por técnica de equilibración del agua con gas CO_2 de referencia a 40 °C para el oxígeno 18 ($\sigma = 0.05\text{‰}$) y reducción sobre metales (zinc o cromo) del agua en un horno (> 1000 °C) para el deuterio ($\sigma = 1\text{‰}$).

Para conocer la señal isotópica de las lluvias se realizó un muestreo mensual durante los años 2004 a 2006 en estaciones localizadas entre 1000 y 3214 m s.n.m., mostrando lluvias empobrecidas en las dos épocas lluviosas y lluvias menos empobrecidas en las dos épocas menos lluviosas del año, en la Figura

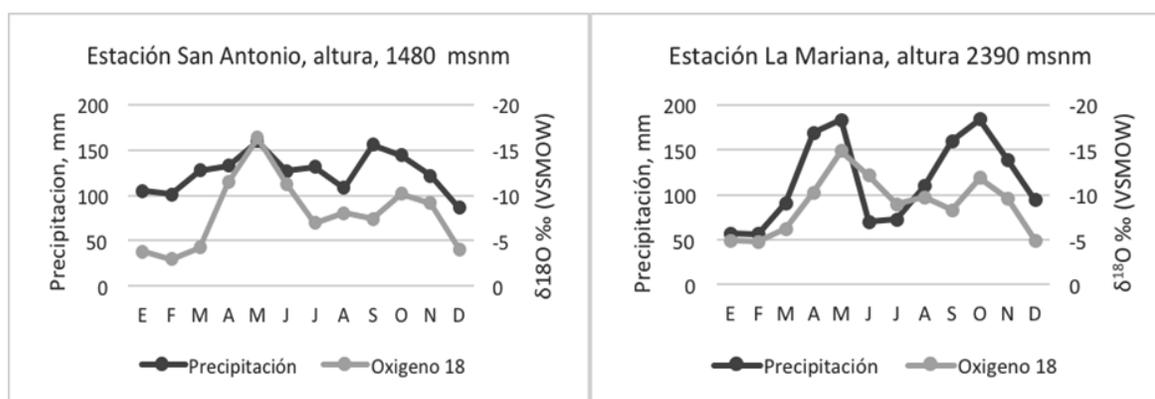


Fig. 6. Precipitación y valores isotópicos promedios (2004 a 2006) de la lluvia en la zona del Macizo

6 se muestran los resultados de 2 de los 6 sitios de recolección ubicados a 1480 y 2390 m de altura, estos resultados están relacionados con el paso de la ZITC (Villacis et al., 2008) y el efecto de masa (Dansgaard, 1964).

Comparando con los muestreos continuos de isótopos estables realizados a los principales ríos de la región entre 2005 y 2007 –que incluyen el punto de cierre de la cuenca hidrográfica (Estación Café Madrid) y algunos puntos sobre ríos principales que nacen en el Macizo de Santander y desembocan en el río principal llamado río de Oro (esta información fue soportada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), y la Red Global para Isótopos en Ríos GNIR)– la señal isotópica muestra una variabilidad temporal idéntica pero con una atenuación en los valores extremos comparativamente con la señal de lluvia (2‰ para ríos y 8‰ para la lluvia). Los valores de desviaciones isotópicas de lluvias, de aguas subterráneas y de agua en ríos fueron utilizados para realizar la separación de flujo base en la cuenca; encontrándose que el flujo base corresponde a un 70% del valor total reportado por el río (Gómez & Guzmán, 2011).

En el gráfico $\delta^{18}O$ vs δ^2D (Figura 7) se observan los valores de las aguas de lluvias, manantiales y pozos, tomados durante los muestreos (2002–2011). Los datos de lluvia y agua subterránea han permitido calcular una línea meteórica local, cuya relación es: $\delta D = 8.15\delta^{18}O + 12.81$. Se puede observar que existe un ligero exceso de Deuterio comparado con la línea meteórica mundial definida por Craig (1961) $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ y definida estadísticamente por Rozanski et al. (1993) $\delta D = (8.2 \pm 0.07)\delta^{18}O + (11.27 \pm 0.65)$, en relación con la circulación atmosférica que evidencia el reciclaje continental de humedad a través del exceso de Deuterio (Salati et al., 1979; Gat & Matsui, 1991; Gallaire et al., 2010). Los otros puntos de aguas subterráneas y manantiales se disponen totalmente sobre esta recta meteórica local mostrando ausencia del proceso secundario como la evaporación durante su transporte hacia el acuífero y dentro del acuífero.

Los resultados de muestreos de aguas de lluvias en la zona del Macizo de Santander han permitido observar un efecto orográfico bien marcado (Dansgaard, 1953), ya mostrado en los Andes Bolivianos (Gonfiantini et al., 2001), en la medida que se asciende (entre 950 y 3400 m s.n.m.) las aguas se empobrecen en isótopos estables. Se ha analizado el efecto orográfico de los datos de aguas de lluvias mensuales del primer muestreo (2002) y los datos del muestreo mensual de lluvias (2004–2006), en cada una de las seis estaciones utilizadas para recolectar la muestra a lo largo de la zona de montaña. Se observa un gradiente aproximado de $-0.16‰$ por cada 100 metros (Figura 8). En la Figura 8 se ha incorporado los datos de los acuíferos y manantiales muestreados en 2010 y 2011 (mes de febrero, época de verano) a diferentes alturas en el Macizo de Santander y en pozos localizados en la zona de la Falla de Bucaramanga.

Los manantiales (triángulo sólido) muestreados en 2010 entre cotas 1300 y 3420 m s.n.m. expresan el mismo efecto orográfico anterior. Aquí se incluyen dos valores de las zonas más altas (3420 m

s.n.m.), uno de ellos localizado dentro de la cuenca hidrográfica, muy cerca de la divisoria de agua y que corresponde a un manantial localizado en Formación de Calizas (El Uval), el otro corresponde a un punto fuera de la cuenca (Mutiscua) en el altiplano de Berlín. Este comportamiento idéntico a la lluvia muestra que el transporte subterráneo en esta zona es corto y representa una infiltración local con un tránsito rápido (escala anual a un poco más) entre áreas fuera y dentro de la cuenca. El muestreo de 2011 (redondo sólido) incluyó algunos manantiales ubicados entre 1650 y 2500 m s.n.m. Estos manantiales parecen mostrar la tendencia general del efecto orográfico anterior, excepto tres puntos presentan valores más enriquecidos que podría marcar una transferencia más rápida, inferior al año y más sensible a la variación infraanual de la lluvia. Efectivamente, el muestreo se realizó en el mes de febrero correspondiendo a los valores más enriquecidos en la lluvia.

Durante los muestreos de 2010 y 2011 (Figura 8, cuadrados sólidos para 2010 y cuadrados simples para 2011) se tomaron muestras de agua de cuatro pozos, Pan de Azúcar y La Flora, superficial y profundo alrededor de la zona de Falla de Bucaramanga; los dos primeros en el acuífero meteorizado fracturado de las rocas ígneas y metamórficas y los otros dos en la zona aluvial. Los valores en oxígeno 18 muestran una composición isotópica más empobrecida que el nivel de altura de los pozos, lo que significa que la zona de infiltración del agua dentro estos pozos vienen de la zona más alta. El pozo más profundo (Pan de Azúcar -80 metros y rejillas a partir de 50 metros) muestra aguas provenientes de alrededor de

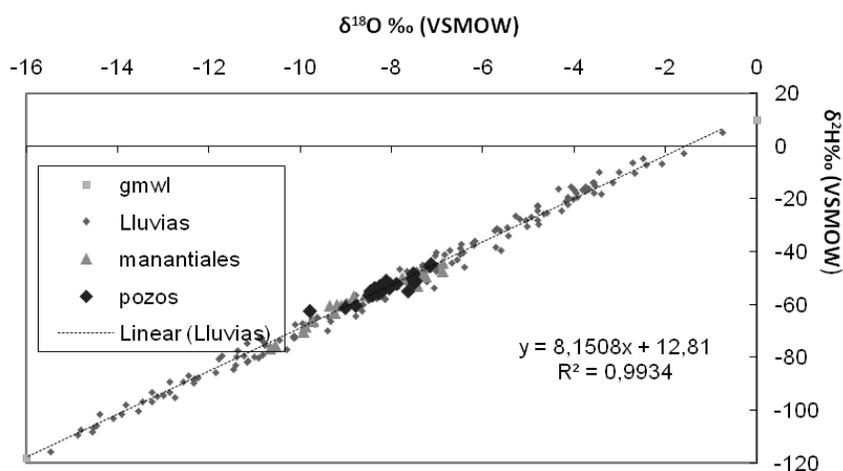


Fig. 7. Línea meteórica local con resultados de aguas lluvias y aguas subterráneas (2002–2011)

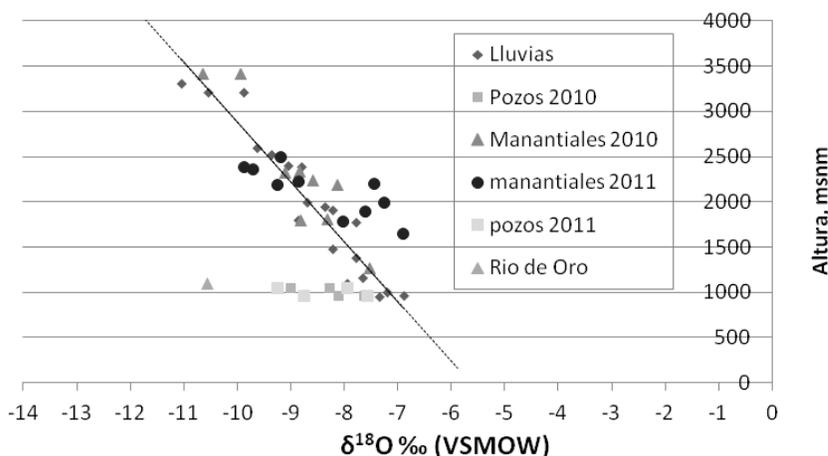


Fig. 8. Efecto orográfico de ^{18}O en lluvias y comportamiento de los manantiales y pozos en el macizo de Santander (2002–2011)

2500 m y el pozo superficial (20 metros) muestra aguas provenientes de 2000 m aproximadamente. Los dos pozos en los acuíferos aluviales (La Flora), uno de ellos se recarga también con aguas provenientes de 1900 metros y el pozo superficial (24 metros) con recargas de 1400 metros. En la Tabla 5 se observan los valores de desviaciones isotópicas de los pozos localizados alrededor de la Falla de Bucaramanga. Los valores se muestran muy parecidos entre sí, sin embargo los valores más empobrecidos se presentan en el año 2011, con excepción del acuífero meteorizado fracturado libre de Pan de Azúcar.

En término de circulación hidrodinámica, podríamos separar un flujo profundo y lento circulando dentro la totalidad del macizo a partir de un sistema de fallas que afectan el macizo y que va afectar a los pozos más profundos en la zona baja; y una circulación más superficial y rápida relativa a la circulación en la parte meteorizada del macizo que va afectar a los pozos más superficiales en la zona baja. Lo que concuerda con la modelación propuesta por Rueda (2013) y que los isótopos radioactivos van a confirmar.

En esta campaña se tomó también muestras al final de la época seca (febrero 2010 en el río de Oro a 1100 m s.n.m., en el llamado El Conquistador (1.115.127,2E 1.265.218,3N). Mediciones hechas entre 2004 y 2006 han mostrado que la señal isotópica promedio en El Conquistador varía entre -8.50 y -10.50‰ en oxígeno 18 (hasta -12.10‰ para una muestra durante el mes de julio de 2006), sensiblemente más empobrecida que en la estación Café Madrid (-7.50 y -9.50‰ en oxígeno 18) ubicada a 650 m s.n.m. (Gómez & Guzmán, 2011). Pero en esta última medición (El Conquistador) es más empobrecida que las lluvias y aguas subterráneas a altura idéntica, y corresponde a condiciones de río de bajo caudal (flujo base del río principalmente), constituido por la descarga de los acuíferos hacia los ríos sobre la totalidad del Macizo de Bucaramanga entre 1100 y 3500 m.s.n.m. Se puede notar que este valor es más empobrecido que el valor teórico esperado, resultante de un aporte de agua e igual a cada altura. Es decir que la parte alta del macizo (agua más empobrecida con el efecto de altura) parece ser más contributiva al río que la parte media y baja. Un muestreo complementario de la parte baja hacia la parte alta del río será necesario para validar este proceso.

Tabla 5. Valores isotópicos de cuatro pozos localizados en la zona alrededor de la Falla de Bucaramanga

Pozos	Fecha	^{18}O	2H	Altura (m s.n.m.)	Acuífero
Pan de Azúcar profundo	27/02/2010	-9.02	-61.1	1045	Meteorizado Fracturado Ígneo Metamorf, Confinado
	16/02/2011	-9.25	-64.4		
Pan de Azúcar superficial	28/02/2010	-8.28	-55.6	1045	Meteorizado Fracturado Ígneo Metamorf, Libre
	17/02/2011	-7.94	-55.0		
La Flora profundo	27/02/2010	-8,12	-54.6	960	Depósito aluvial, Miembro Gravoso, Acuífero superficial
	18/02/2011	-8.76	-59.8		
La Flora superficial	27/02/2010	-7.59	-50.8	960	Depósito aluvial, coluvión, Acuífero superficial o colgado
	19/02/2011	-7.64	-51.1		

Tiempo de residencia

Para complementar el análisis de los isótopos estables del agua en los acuíferos se realizaron muestreo de isótopos radioactivos para determinar así el tiempo de residencia del agua, con tritio (3H) en 2003

(9) y carbono 14 (^{14}C) (2) en 2011 sobre la fase bicarbonatada disuelta completado por el análisis de carbono 13. Las muestras fueron analizadas (en laboratorios de Argentina (tritio) y de Francia (carbono 14)) con técnica de contador de centelleo líquido. El tritio en la atmósfera de la zona tropical ha variado a partir de 1950 con los ensayos nucleares (Gat et al., 2000). Hasta 1963–64 ha subido el nivel (pico de tritio en 1963/64, alrededor de 200 UT), y con la suspensión de los ensayos nucleares en 1963 ha bajado hasta los años 1990 donde se recuperó su nivel natural (Gat et al., 2000).

En este estudio dos mediciones mensuales (en 2003) de la lluvia fueron analizadas en la quebrada La Cascada (1580 m s.n.m., 1110284 E, 1278577 N) y en la estación La Cumbre (1008 m s.n.m., 1109324 E, 1274653 N), los valores son 2 y 3 UT.

En Colombia, el registro de la estación IAEA–GNIP de Bogotá para el periodo (1998–2005) muestra valores mensuales entre 2 y 3 UT; también en Quito (Ecuador), datos del año 2004 (IAEA–GNIP) muestran valores entre 2 y 3 UT, que representan el nivel natural regional. En las 9 mediciones de tritio en los pozos se observan dos comportamientos diferentes (Figura 9). Pozos que presentan valores de tritio entre 1.9 y 2.7 UT, es decir agua reciente, y pozos que presentan valores muy pequeños de tritio < 0.5 UT, bajo el nivel de error de la medición ($\delta = 0.5$ UT); es decir, agua más vieja. Conforme a un modelo de circulación de flujo tipo pistón probable respectivamente a la configuración de los dos acuíferos en la meseta (sedimentarios y confinados) los primeros valores corresponden a los pozos localizados en el acuífero superficial de Bucaramanga que muestran presencia de tritio en relación con una recarga principalmente actual, después del año 1950. Los segundos valores corresponden a pozos localizados en el acuífero profundo, la ausencia de tritio muestra una recarga antes del año 1950.

Los dos valores de carbono 14 (^{14}C) confirman los resultados del tritio, el pozo muestreado en el acuífero superficial (La Flora) da un valor elevado de 92.7 (± 0.4) pcm con un $^{13}\text{C} = -16.36\%$ VPDB– $\delta = 0.1\%$, indicando una contribución actual importante. Al contrario el pozo profundo (Somascos) confirma una recarga antigua (62.4 pmc ± 0.5) que da según el modelo entre 3900 BP (modelo decaimiento radiactivo sencillo) y 2120 BP (modelo de mezcla del OIEA–Salem et al., 1980). El uso de este último modelo de mezcla podría justificarse en relación con el valor de carbono 13 relativamente enriquecido (-9.76% VPDB) de la muestra. Para un análisis espacial más fino se necesitaría otras mediciones de carbono 14. Sin embargo, parece que en la zona profunda de las formaciones aluviales la renovación del agua es muy débil.

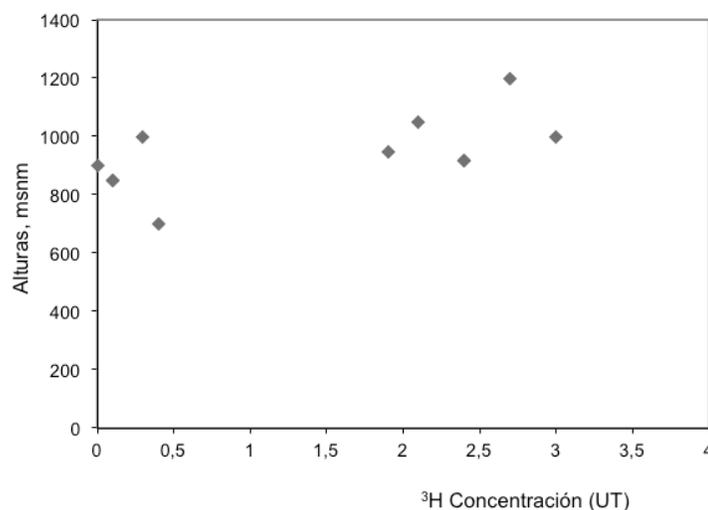


Fig. 9. Valores de tritio en la región de Bucaramanga (Valores menores a 0.5 corresponde a acuífero profundo y valores mayores a 1.9 corresponde al acuífero superficial – error de estimación en la medición igual a 0.5 UT)

CONCLUSIONES

La región de Bucaramanga tiene dos sistemas hidrogeológicos diferentes en relación con la geología y la geomorfología separados por la Falla de Bucaramanga. En la parte alta, en el macizo de Santander su hidrogeología de rocas fracturadas y meteorizadas en contexto de pendiente fuerte favorece la aparición de manantiales, donde se evidencian dos tipos de flujos, uno profundo y lento que pasa a través de todo el macizo a lo largo de fallas geológicas, otro superficial y rápido que discurre a través de las rocas meteorizadas del macizo. En la parte baja, en la meseta de Bucaramanaga es una hidrogeología de rocas sedimentarias en contexto plano, donde se encuentran un acuífero freático y otro más profundo.

El análisis hidroquímico indica aguas de tipo principalmente bicarbonatadas cálcicas en la zona con un cambio local de facies más sulfatadas según las condiciones locales, este cambio puede ser de origen geológico o antrópico. En el macizo de Santander, el aumento de la conductividad eléctrica en dirección este-oeste pone en evidencia una continuidad hidráulica en relación con líneas de parteaguas y direcciones este-oeste de fallas. En la zona de la Falla de Bucaramanga y la Meseta de Bucaramanga la química muestra un comportamiento atípico en los iones Cl y SO_4 .

En este trabajo se ha formulado una hipótesis de contaminación antrópica basada en las elevadas concentraciones de estos iones, sin embargo se debe buscar otras hipótesis como la posible relación entre la zona sedimentaria de la parte alta de la cuenca y la Falla de Bucaramanga, como zona baja de recolección. Se debe continuar con muestreos continuos en puntos localizados alrededor y a lo largo de la zona de la falla que permitan evaluar la evolución en las características químicas del agua. Por su parte, la conductividad eléctrica también presenta un comportamiento atípico entre la zona de la falla y la meseta, disminuyendo su valor en dirección del flujo. Se formuló una hipótesis de recarga artificial del acuífero superficial en la Meseta de Bucaramanga por posibles fugas en el sistema de acueducto de la ciudad de Bucaramanga. Los resultados de isótopos estables muestran la influencia del efecto orográfico en los datos de aguas subterráneas, encontrándose que la principal recarga en los acuíferos de la meseta proviene de la zona montañosa del macizo de Santander, desde 1500 (acuífero superficial) hasta sobre los 3000 m s.n.m. (acuífero profundo). Las recargas a estos acuíferos se encuentran asociadas a flujos de larga a media distancia. Además, los valores isotópicos en el flujo base del río de Oro, sitio el Conquistador, muestran que la parte más alta del macizo contribuye en mayor proporción a la recarga de los acuíferos en contacto con los ríos en la zona de montaña. El aporte de otras zonas (media y baja) al flujo base, así como la identificación y aporte de aguas infiltradas en las partes más altas del macizo, dentro y fuera de la cuenca, deben ser estudiados mediante muestreos complementarios y estudios geológicos.

El Tritio y el Carbono 14 muestran la diferencia entre edades del agua del acuífero superficial y del acuífero profundo de las formaciones aluviales, siendo las primeras aguas nuevas y las segundas aguas de muy poca renovación, respectivamente. Este resultado permite reconocer la necesidad urgente de protección del acuífero superficial y el manejo razonable de las aguas del acuífero profundo poco renovable de la ciudad de Bucaramanga. Un estudio complementario basado en un número mayor de mediciones de carbono14 y carbono13 debería permitir afinar la evaluación de la edad de las aguas del nivel más profundo y usar el modelo de corrección de edad más adaptado.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrera, B. (2006). Estimación de la recarga en la cuenca superior del río Lebrija mediante el balance de masa del ión cloruro. Tesis de Ingeniería Civil, UIS.
- Barrera, M.A. & Ruiz, D.A. (2012). Pruebas de bombeo en pozos en la zona oriental de Bucaramanga. Tesis de Ingeniería Civil, UIS.
- Caballero, S.A. & Gómez, E. (2011). Pruebas de bombeo en pozos profundos y pozos de observación en la ciudad de Bucaramanga. Tesis de Ingeniería Civil, UIS.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Sciences*, 133: 1702–1703.
- Dansgaard, W. (1953). The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapour. *Tellus*, 5: 461–469.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 435–468.
- ETA Ltda. (1979). Informe de perforación profunda de exploración No.1 de Metrocentro. Informe técnico.
- Gallaire, R., Taupin, J. D. & Coudrain, A. (2010). Evolution récente des paramètres cryo-climatiques et des teneurs isotopiques des précipitations dans les Andes boliviennes: La Paz et Glacier du Zongo. *Hydr. Sciences J.*, 55(4): 467–483.
- Gat, J. R. & Matsui, E. (1991). Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model, *JGR*, 96(D7), 13179–13188.
- Gat J. R., Mook W. G. & Meijer H.A. (2000). Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and Applications. Vo. II, Atmospheric vapor. Ed IAEA and UNESCO.
- Gómez, S. & Colegial, J. (2003). Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos. Informe de Investigación UIS–Colciencias, 01–120.
- Gómez, S. & Anaya, A. (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga, *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*, 11: 37–50.
- Gómez, S. & Guzmán, J. (2011). Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija. *Revista. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 61: 41–52.
- Gómez, S., Gutiérrez, F. & Torres, C.M. (2011). Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. *Revista UIS–Ingenierías*, 10(1): 51–62.
- Gonfiantini, R., Roche, M.A., Olivry, J.C, Fontes, J.Ch. & Zuppi, G.M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chem. Geol.*, 181: 147–167.
- Hermelin, M. (1976). Estudio geomorfológico: Contribución al estudio de los fenómenos erosivos de la Terraza de Bucaramanga. Informe Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga.
- Ingeniería de Suelos (1991). Informe del estado del conocimiento en la investigación de aguas subterráneas en la Terraza de Bucaramanga. Presentado a la CDMB.
- Ingeominas (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Subdivisión de Amenazas Geoambientales. Informe técnico.
- Ingeominas (2004). Modelo Geológico Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga. Informe Técnico de Olga de Bermúdez y Luis Vásquez.
- Ingeominas (2007). Proyecto de Investigación Geológica e Hidrogeológica en la Región Central del Departamento de Santander. Zona Macizo de Santander, Colombia.
- Ingeominas (2009). Informe hidrogeológico del Macizo de Santander. Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre estratigrafía y tectónica del cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de Geología UIS*, 18: 41–59.
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36 (11/12), 2233–2249.
- Rodríguez, J. & Torres, D. (2011). Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga. Tesis de Ingeniería Civil. UIS.
- Rozanski, K., Araguás–Araguás, L. & Gonfiantini, R. (1993). Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. *Geophysical Monograph Series*, 78 *Climate Change in Continental Isotopic Records*. American Geophysical Union.

- Rueda, J. A. (2013). Modelo hidrogeológico conceptual y revisión de la vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. UIS.
- Ruiz, J.D & Arenas, J.P. (2005). Estudio de la variación del régimen de lluvias en la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de Ingeniería Civil. UIS.
- Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E. & Gat J.R. (1979). Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study, *Water Res. Res.*, 15(5), 1250–1258.
- Salem, O., Visser, J.H., Dray, M. & Gonfiantini, R. (1980). Groundwater flow in patterns in the western Lybian Arab Jamahirya. In *Arid Zone hydrology: Investigations with Isotope Technique*. Proceedings of an advising group meeting, Vienna, Nov. 1978, 165–179.
- Tricart, J., Usselman, P. & Lecarpentier, C. (1968). Etudes preliminaires pour l'aménagement du Bassin du Río Lebrija. *Rev. Geografica. I.P.G.H.*, 68: 83–139.
- Villacís, M., Vimeux, F. & Taupin, J.D. (2008). Analysis of the climate controls on the isotopic composition of precipitation ($\delta^{18}\text{O}$) at Nuevo Rocafuerte, 74.5°W, 0.9°S, 250 m, Ecuador. *C. R. Geoscience*, 340: 1–9.
- Ward, D., Goldsmith, R. Cruz, J. & Restrepo, A. (1973) Geología de los cuadrángulos H12 y H13, Pamplona, Departamento de Santander, Ingeominas, *Boletín Geológico* 21 (1–3):1–132.

