

Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia

Helberth Iván Gómez-Niño¹

doi: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020005>

Forma de citar: Gómez-Niño, H.I. (2020). Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2), 89-103. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020005.

Resumen

La problemática de abastecimiento de agua que ha vivido la ciudad de Yopal, Casanare en los últimos ocho años, ha generado un acentuado incremento en la demanda del recurso hídrico subterráneo. En el presente trabajo se plantea una evaluación general dentro del marco geológico e hidrogeológico de las captaciones presentes en los acuíferos cuaternarios de Yopal. El análisis se realizó teniendo en cuenta aspectos fundamentales como la consolidación de una base de datos referente a un inventario de 1225 puntos de captación de agua subterránea, y análisis representativo de material que constituyen los depósitos cuaternarios. La consolidación de la información ha permitido elaborar cartografía referente a la demanda del recurso hídrico subterráneo, y determinar condiciones de flujo subterráneo del área de estudio. Los resultados obtenidos permitieron concluir que las características geológicas del área de estudio favorecen el almacenamiento, circulación y captación de agua subterránea, la cual presenta una dirección predominante NW-SE. Y se determina que el depósito aluvial Qab, presenta conectividad hidráulica con los ríos Charte y Cravo Sur.

Palabras clave: Acuífero; Cuaternario; Abanico Aluvial; Llanura o Planicie aluvial; Nivel Piezométrico; Isopiezas.

Analysis of piezometric levels and groundwater collection patterns in the Quaternary aquifer of Yopal, Casanare, Colombia

Abstract

The problem of water supply that has lived the city of Yopal, Casanare in the last eight years, has generated a marked increase in the demand of the underground water resources. This paper presents a general evaluation within the geological and hydrogeological framework of the captions present in the Quaternary aquifers of Yopal. The analysis was carried out taking into account fundamental aspects such as the consolidation of a database referring to an inventory of 1225 points of groundwater collection, and representative analysis of material that make up the quaternary deposits. The consolidation of the information has allowed to elaborate cartography referring to the demand of the underground hydric resource, and to determine underground flow conditions of the study area. The results obtained allowed to conclude that the geological characteristics of the study area favor the storage, circulation and capture of groundwater, which presents a predominant direction NW-SE. And it is determined that the alluvial deposit Qab, presents hydraulic connectivity with the Charte and Cravo Sur rivers.

Keywords: Aquifer; Quaternary; Alluvial Fan; Plain or Alluvial Plain; Piezometric Level; Isopieces.

¹Grupo de Estudios e Investigaciones de Ingeniería Civil en la Orinoquía, Fundación Universitaria Internacional del Trópico Americano, Yopal, Colombia. helberthgomez@unitropico.edu.co

Introducción

El incremento en la demanda del recurso hídrico subterráneo en Yopal, Casanare, ha pasado a desempeñar un rol central en el abastecimiento de la ciudad en los últimos 8 años, este crecimiento se debe al colapso ocurrido en la planta de tratamiento de agua potable en el año 2011 (Gonzales, 2014). Hecho que ocasionó afectación en la cobertura del suministro por red domiciliaria, principalmente a los habitantes del casco urbano. Lo cual ha generado un aumento en la extracción de agua subterránea a través de pozos profundos de baja y gran producción, aljibes y ocasionalmente manantiales.

El crecimiento poblacional se ha triplicado en la última década por la afluencia de personas que llegan de otros lugares del país en busca de oportunidades laborales, sumado a esto, las consecuencias del conflicto armado y la problemática social que vive Venezuela han generado una serie de desplazamientos, especialmente a la capital del departamento de Casanare (Alcaldía Municipal de Yopal, 2012).

En los últimos 50 años el municipio ha experimentado un extraordinario crecimiento con ritmos elevados, el mayor auge se ha observado en los últimos 32 años, cuando su población se incrementó en más de 8 veces. Solo en los últimos 10 años, casi se duplica el número de sus habitantes, pasando de 36490 habitantes en 1993 a

86860 habitantes en el 2003 (DANE, 2018). La población proyectada para el 2020 en Yopal, corresponde a 155882 habitantes (DANE, 2018), la cual repercute directamente sobre la demanda del recurso hídrico.

Yopal, capital del departamento de Casanare presenta una extensión de 2771 km², se encuentra localizado en la cuenca del río Meta, subcuenca de los ríos Cravo Sur y Charte. La cuenca del río Cravo Sur es un territorio de estructura rural. De sus 565113 ha sólo 1489,7 ha albergan los cascos urbanos de los municipios de Labranzagrande, Paya, Pisba, Nunchía y Yopal, donde este último, corresponde al 94,3% del territorio urbano de la cuenca (Corporinoquia y Corpoboyacá, 2015). La cuenca del río Charte tiene una extensión total de 1003 km², e integra parte de los municipios de Pajarito y Labranzagrande en el departamento de Boyacá y los municipios de Yopal, Aguazul y Maní, en el departamento de Casanare, agrupando una población total de 196223 habitantes (ANLA, 2016).

En la Figura 1 se aprecia la localización y extensión geográfica del municipio de Yopal, el cual se localiza en la cuenca de los Llanos Orientales, y se caracteriza por presentar extensas zonas de depósitos cuaternarios. El municipio está dividido en un total de 92 veredas en 10 corregimientos, entre los que se destacan Santa Fé de Morichal, Punto Nuevo, Quebrada Seca, y Tilodirán.

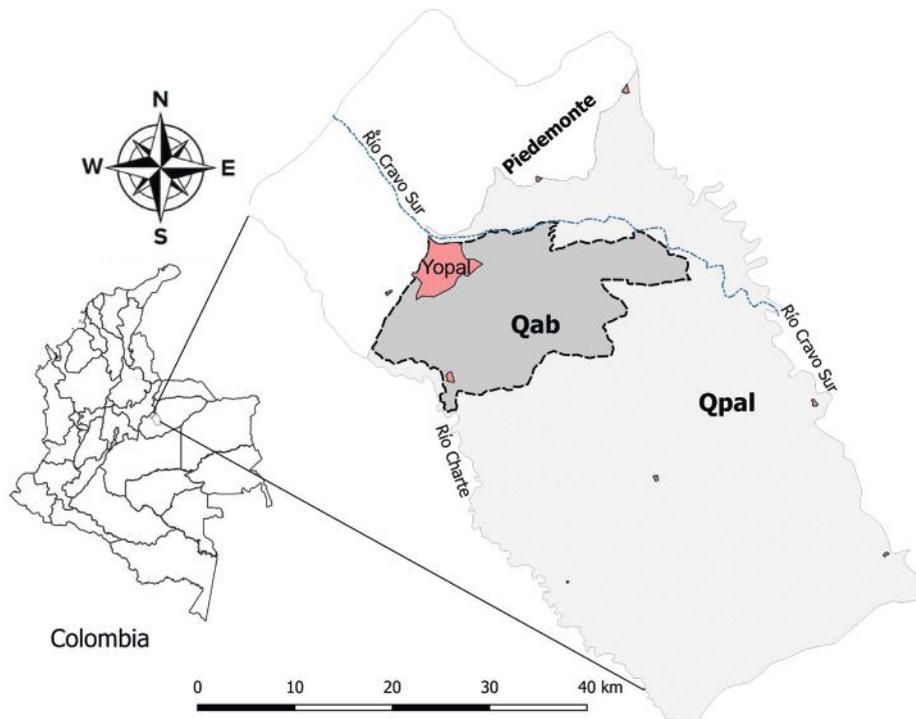


Figura 1. Localización área de estudio, Yopal, Casanare.

La dinámica del río Cravo Sur ha generado transporte y acumulación de materiales a lo largo de su cuenca y principalmente en la zona de transición entre el piedemonte y la llanura. Esta transferencia de material representa lo que se conoce geológicamente como depósitos cuaternarios, entre los cuales se puede mencionar el abanico aluvial (Qab), y llanuras o planicies aluviales (Qpal) (Figura 1). El material que constituye estos depósitos no consolidados (conglomerados, arenas, gravas, limos), favorece la recarga de un acuífero que puede ser entendida como un proceso en el cual una porción de la precipitación infiltra en el suelo, drena a través del perfil no saturado y pasa a formar parte del agua subterránea. La determinación y cuantificación de la recarga de un acuífero, es de vital importancia para la planificación y gestión de los recursos hídricos (Quiroz-Londoño *et al.*, 2012). Razón por la cual los sistemas acuíferos de mayor interés se encuentran asociados con los sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente aluvial y rocas sedimentarias terciarias semiconsolidadas a consolidadas, cuyas características texturales y composicionales los constituyen principalmente en acuíferos de tipo libre, localmente confinado (SGC, 2018). Actualmente en el área rural de Yopal, el agua subterránea se ha convertido en una alternativa de abastecimiento individual y colectivo, debido a que en estas áreas no está establecido el servicio por red domiciliaria.

Marco geológico e hidrogeológico

El conocimiento hidrogeológico es incipiente en Colombia y en especial en la Orinoquía, esto se ve reflejado en que solo se tiene identificado el 30,8% de sistemas acuíferos con un nivel de conocimiento suficiente para la gestión de las aguas subterráneas, y el restante que corresponde al 69,2% del total, en los últimos años no se ha logrado generar información hidrogeológica detallada que permita la caracterización de estos sistemas acuíferos (IDEAM, 2019). Sin embargo, cabe resaltar que el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha realizado estudios de carácter local, entre los cuales se puede mencionar el Modelo Hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal, Casanare. En este estudio se describe el comportamiento de las aguas subterráneas en el municipio de Yopal; es así como a través de la geología, geofísica, hidrología, e inventario de puntos de agua, hidráulica, hidrogeoquímica y la perforación exploratoria representada en el pozo SGC Yopal 1 se presentan algunas características de los sistemas acuíferos presentes en la zona (SGC, 2018).

Los depósitos aluviales cuaternarios, son depósitos recientes, contiguos a los ríos trenzados sometidos a

la inundación, constituidos principalmente por cantos, gravas y arenas, depositados por las corrientes mayores en llanuras relativamente angostas, conformando barras de meandro que en sus partes bajas están cubiertas por las aguas de los afluentes (Veloza-Franco y Morales-Arias, 2009).

En la Figura 1 se presenta el área que corresponde a los acuíferos asociados a los depósitos de origen aluvial, y que conforman 2 sistemas: uno local denominando abanico aluvial (Qab), y otro más extenso al cual podemos referirnos como depósitos de llanura o planicie aluvial (Qpal).

El depósito Qab esta originado por la dinámica del río Cravo Sur, el cual se encuentra morfológicamente activo construido primordialmente por eventos fluvio-torrenciales, dado su carácter de receptores de los materiales transportados por las crecientes del curso de agua de ambiente montañoso, que descarga en sectores de piedemonte (Méndez *et al.*, 2016). Este depósito se encuentra constituido por acumulación sucesiva de grava de diversos tamaños, angulares a sub-redondeadas debido al proceso de selección producido durante el desplazamiento y rotación de los fragmentos arrastrados por el agua (Hidrogeocol, 2012). El material tipo arena presenta granos gruesos a muy finos, con selección mala a moderada, granos redondeados a sub-redondeados, esféricos a subesféricos, además de presencia de limo y arcilla en menor proporción. Infrayaciendo al depósito Qab, se presenta una secuencia litológica arcillosa, seguida de capas conformadas por bloques, cantos, gravas y arenas, bien cementadas, con evidencia de material laterítico, el cual es comúnmente conocido como ripio o arrecife. Esta secuencia estratigráfica se encuentra aflorando cerca a la marginal de la selva, específicamente en el caño Upamena en Yopal. Estos depósitos se encuentran representados por la Formación la Corneta, que están cubiertos en parte por el gran abanico aluvial de Yopal (Hidrogeocol, 2012).

El depósito Qpal corresponde a una zona más extensa (Figura 1), esta unidad se caracteriza por presentar extensas superficies planas, litológicamente constituida por una capa de materia orgánica cuyo espesor oscila entre 0,20 m y 2 m (aumentando al Sureste), seguida de material fino arcilloso en tonalidades que incluyen ocre a amarillentos, aunque en algunos sectores se torna limo arcilloso, el espesor de este material se incrementa en dirección al río Meta, observándose en campo valores de 3 m (vereda Tacarimena - municipio de Yopal, Plancha 193) (Montoya *et al.*,

2013), inmediatamente después de este material se encuentra una secuencia de gravas, litológicamente constituidas por areniscas blancas a grises, de grano fino, se presenta también, limolitas negras, las gravas son clasto, soportadas con presencia de matriz inferior al 5% (SGC, 2018). Es común encontrar guijarros redondeados de arenisca cuarzosa y fragmentos de rocas con presencia de óxidos de hierro, así como una intercalación de capas lateríticas bien consolidadas. Los depósitos de corrientes se caracterizan por presentar geofomas de terrazas en niveles topográficos por encima del cauce actual de los ríos.

El área de estudio se encuentra localizada en la provincia hidrogeológica de los llanos orientales, que corresponde a la zona plana del oriente colombiano que contrasta con el relieve abrupto de la cordillera oriental adyacente, topográficamente se extiende a largo de la Orinoquía colombiana. Dentro de la provincia hidrogeológica de los llanos orientales, se han identificado 3 sistemas de acuíferos SAP3-1 Villavicencio-Granada-Puerto López, SAP3-2 Yopal Tauramena, SAP3-3 Arauca-Arauquita (IDEAM, 2014).

Estos acuíferos están constituidos por sedimentos del Paleógeno-Neógeno y depósitos recientes (depósitos cuaternarios). Desde el punto de vista geológico la cuenca está cubierta por depósitos cuaternarios fluviolacustres, que suprayacen rocas sedimentarias detríticas de textura arenosa, lutitas y carbonatadas. De acuerdo con las características de porosidad, permeabilidad y litología podemos definir tres unidades hidrogeológicas: acuíferos de porosidad primaria, acuíferos en rocas consolidadas con porosidad primaria, rocas granulares o fisuradas que forman acuíferos insignificantes con recursos limitados o sin recursos (Vargas *et al.*, 2013).

Este trabajo ha sido enfocado específicamente, a evaluar de manera general el comportamiento de los niveles de agua subterránea presentes en los materiales más recientes que constituyen depósitos Qab y Qpal, que se encuentran previamente definidos en la cartografía existente y presentan características favorables para el almacenamiento y circulación de agua subterránea. Para ello se realiza un análisis cartográfico e hidrogeológico del recurso hídrico subterráneo en Yopal, a partir del inventario de 1225 puntos de captación de agua, análisis de información sedimentaria de columnas estratigráficas levantadas en campo y medición de niveles piezométricos. En este trabajo se complementa la información previamente documentada por el SGC (2018),

con nuevos análisis que permite establecer la distribución espacial de captaciones, dirección del flujo subterráneo, y se incluyó el análisis de isopiezas locales en los sectores Morichal y Sirivana de Yopal, para establecer la existencia de la conectividad hidráulica del depósito Qab con los ríos Charte y Cravo Sur.

Metodología

Se realizó una búsqueda, verificación y clasificación de información referente a inventarios de puntos de agua dentro del área de estudio. Para lo cual se acudió a información contenida en el estudio hidrogeológico del municipio de Yopal (HIDROYOPAL, 2013), el cual contiene un inventario de 526 puntos de captación, así como información solicitada y suministrada por el Departamento de Recurso Hídrico (SIRH) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

La información para el desarrollo del presente trabajo se complementó durante los meses de octubre de 2016 hasta agosto de 2018, mediante visitas a predios que cuentan con captaciones de agua subterránea dentro del área de estudio. Esta información permitió generar el inventario de 1225 puntos de captación de agua subterránea, que se consolidó en una base de datos que contiene la georreferenciación mediante GPS, tipo de captación (pozo profundo, aljibe y manantial), nivel estático de la lámina, uso destinado al agua por los propietarios de los predios y registro fotográfico.

Como base para el análisis cartográfico del área de estudio, se trabajó con información digital con extensión shapefile (*.shp), obtenida del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC, 2018), así como información existente en el mapa geológico del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) (Alcaldía Municipal de Yopal, 2013). Esta información permitió realizar composiciones temáticas a partir del procesamiento de distribución espacial de los puntos de captación, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), implementado el software libre Quantum GIS (QGIS); en el cual mediante la aplicación del método de estimación de densidad de Kernel, se obtiene y se presenta el ráster de densidad de captaciones. También se utilizó el método de interpolación espacial Distancia Inversa Ponderada (IDW), el cual consiste en utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos, con el cual se generó el mapa de isolíneas. Como resultado se obtuvo la distribución y dirección de captaciones y flujo de agua subterránea, en el área de estudio. El sistema de coordenadas

utilizado a lo largo del presente trabajo corresponde al Datum MAGNA SIRGAS, origen Este.

A partir de información hidrogeológica y litológica de tres pozos profundos tomada de Hidrogeocol (2012), y de 4 columnas estratigráficas levantadas en el área que delimita el depósito Qab, en las cuales se recolectaron muestras pertenecientes a cada estrato; para realizar el análisis granulométrico y límites de Atterberg, según especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). Estas muestras posteriormente fueron clasificadas de acuerdo al método establecido en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Casagrande, 1948). Los resultados permitieron establecer una correlación estratigráfica en el depósito Qab y la conductividad hidráulica a partir de la clasificación SUCS, y de los datos obtenidos en las pruebas de bombeo de los pozos estudiados por Hidrogeocol (2012).

Resultados

En el área de estudio se estableció un inventario de 1225 puntos de captación de agua subterránea, los cuales están categorizados y georreferenciados (Tabla

1 y Figura 2), los cuales corresponden a captaciones sobre los depósitos Qab, Qpal, y parte del piedemonte. Sin embargo, debido a la gran extensión de territorio, existen áreas donde no ha sido posible obtener información sobre el recurso hídrico subterráneo. Esta información también ha sido estudiada y analizada en el modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal, donde se han inventariado 860 puntos de agua, distribuidos por tipo de punto en 297 aljibes, 31 manantiales, 528 pozos y 4 puntos de agua superficial (SGC, 2018).

En la Tabla 1 se presenta el resultado de la distribución según el tipo de captación, e información referente al estado de concesiones en el área de estudio. El aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en Yopal presenta un total de 119 concesiones existentes ante la autoridad ambiental Corporinoquia.

En la Figura 2 se presenta el inventario de los 1225 puntos de agua subterránea, los cuales se encuentran georreferenciados dentro del área de estudio. La distribución de las captaciones se encuentra categorizada según su localización específica de los depósitos Qab, Qpal y área de piedemonte cercana al casco urbano.

Tabla 1. Distribución del inventario de captaciones de agua subterránea, en el área de estudio.

Tipo de Captación	Abanico (Qab)	Planicie (Qpal)	Piedemonte	Total
Pozos	234	565	29	828
Aljibes	138	236	3	377
Manantiales	0	6	14	20
Inventario total				1225

En el área de estudio se encontraron 828 pozos profundos, los cuales se han realizado mediante equipos de perforación mecanizada y se encuentran revestidos con tubería de PVC de 4 a 6 pulgadas, las profundidades se encuentran entre los 20 a 460 m, lo que facilita captar un mayor caudal. Existen 377 aljibes con profundidades que oscilan desde los 5 a 24 m de profundidad y un diámetro que varía desde los 0,60 hasta 2,40 m, estas captaciones consisten en excavaciones manuales con herramientas básicas. Cuyas paredes se revisten con ladrillo, tubería de cemento o concreto para evitar que colapsen, el caudal captado es del orden de 0,5 a 1,2 L/s.

Con respecto a las captaciones mediante manantiales son de poca existencia, ya que estas son manifestaciones de agua subterránea que se dan naturalmente en el área de estudio. Se presentan hacia el Norte del casco urbano de Yopal, en zonas de alta pendiente que están relacionadas

con la geología de las formaciones que conforman el piedemonte.

Esta información permitió generar una serie de composición de mapas, en los cuales el resultado obtenido determina las zonas con mayor concentración de captaciones (Figura 3). Cada color expresa una categorización de acuerdo a la concentración de captaciones, siendo el color rojo zonas con mayor densidad de captaciones, y el color azul corresponde a zonas de captaciones bajas a nulas.

En la Figura 4 se presenta el tipo de captaciones sobre el depósito Qab. En esta área se encontraron 234 pozos profundos y 138 aljibes. Los pozos profundos que actualmente abastecen la ciudad de Yopal presentan caudales del orden de 30 a 60 L/s, niveles dinámicos entre 90 a 140 m (SGC, 2018).

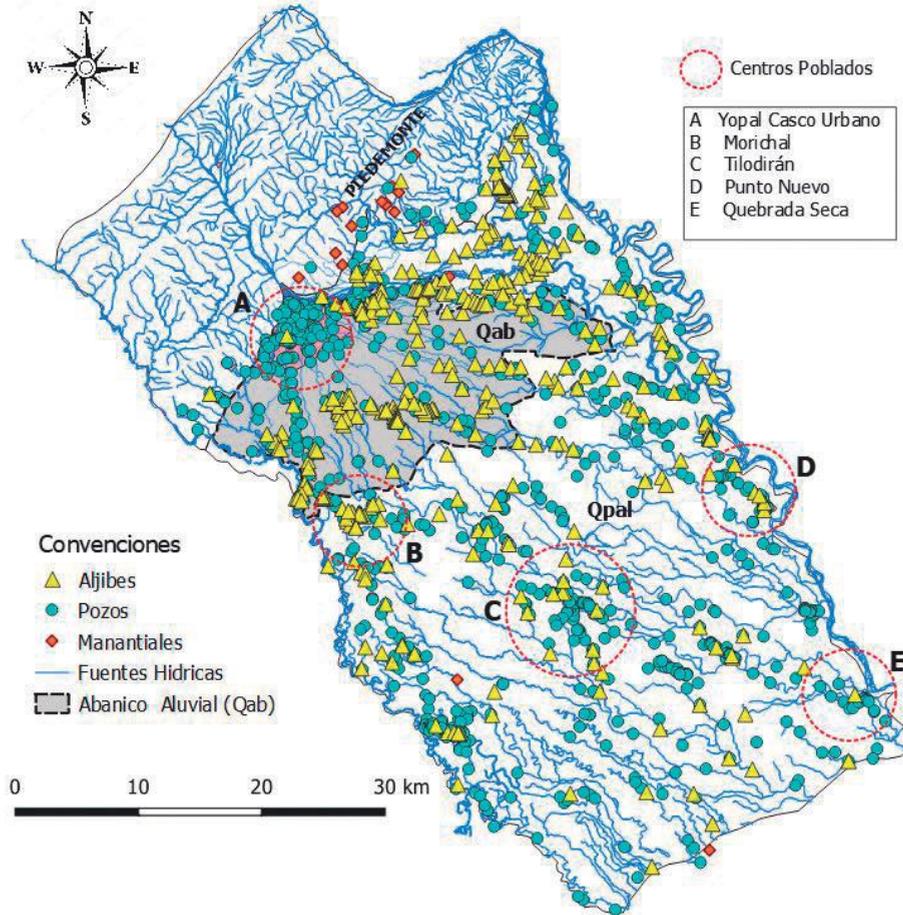


Figura 2. Inventario total de captaciones en el área de estudio. En los acuíferos cuaternarios de Yopal, el agua captada es empleada en un alto porcentaje para consumo doméstico, otros consumos importantes son el uso industrial y agrícola que se presenta en el área rural.

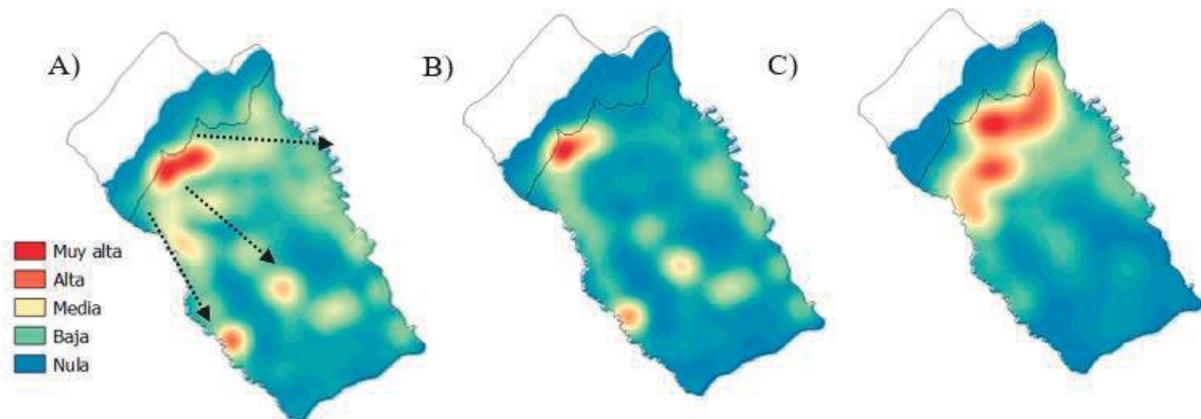


Figura 3. Análisis espacial en el área de estudio. **A.** Captación total mediante aljibes, pozos y manantiales, nótese que las flechas representan la dirección de las captaciones. **B.** Captaciones mediante pozos profundos. **C.** Captación mediante aljibes.

La evidencia de 4 columnas estratigráficas levantadas en el depósito Qab, así como la consecución litológica de tres pozos profundos construidos para la captación de aguas subterráneas (C-5 Pozo Hospital antiguo, C-6 Pozo Club Alcaraván, C-7 Pozo Ismocol) obtenidos de Hidrogeocol (2012), permitieron establecer las secciones litológicas caracterizadas por estratos horizontales con intercalaciones de materiales finos a gruesos poco consolidados. En el área de estudio se cuenta con información litológica detallada metro a metro, hasta una profundidad de 905 m, la cual corresponde al pozo SGC Yopal 1; realizado por el Servicio Geológico Colombiano cuyo objeto fue el de realizar la perforación de pozos exploratorios

para la generación de nuevo conocimiento del modelo hidrogeológico de los sistemas acuíferos del departamento de Casanare; dicho pozo se localiza en el casco urbano del municipio de Yopal, en las instalaciones del colegio Braulio González (SGC, 2018).

En la Tabla 2 y Figura 5 se presentan las características litológicas y correlación estratigráfica, que permiten establecer la secuencia litológica, espesor, y estimación preliminar de la conductividad hidráulica, mediante correlación acorde al tipo de material y su clasificación por el sistema SUCS.

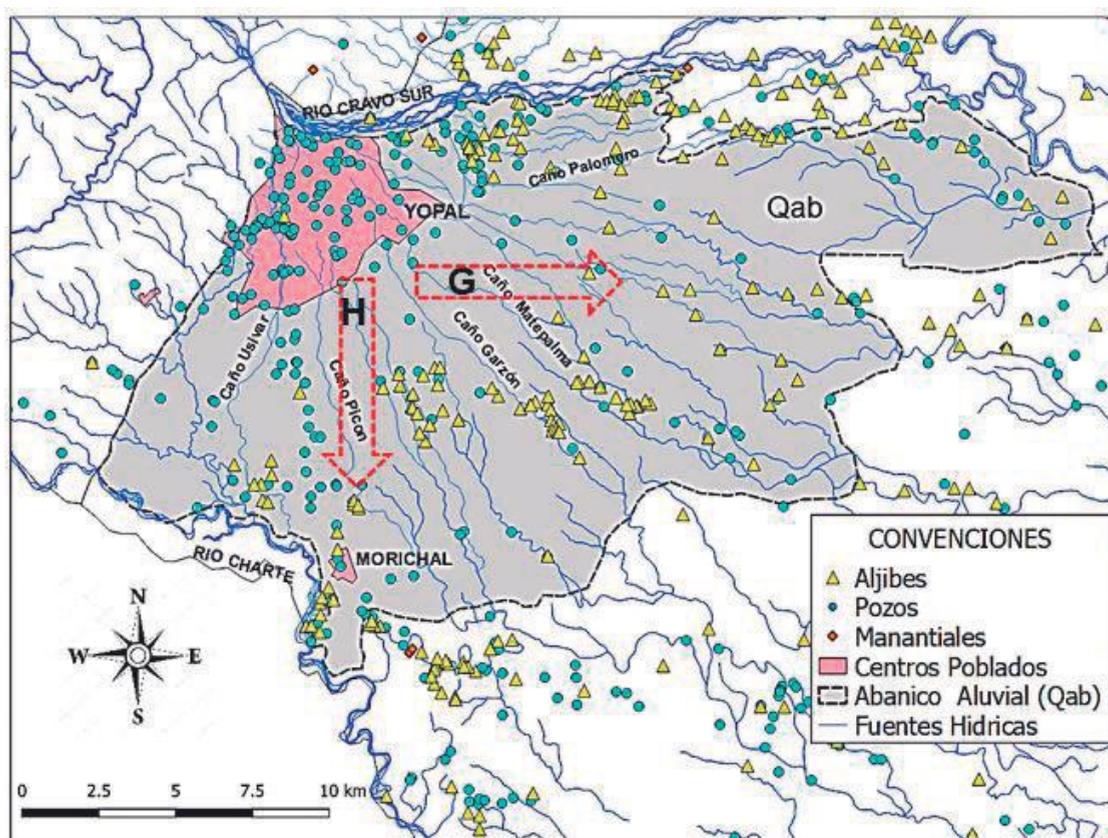


Figura 4. Captaciones sobre el depósito Qab. Las flechas H y G representan la dirección de las captaciones. Nótese la poca presencia de aljibes hacia el Oeste del depósito Qab.

El nivel piezométrico tomado en 255 aljibes permitió establecer la superficie freática, que está representada por líneas equipotenciales, definidas como curvas llamadas isopiezas como se presenta en la Figura 6. Las isopiezas fueron categorizadas por colores; siendo la escala de color rojo isopiezas con mayor carga

hidráulica y el color azul isopiezas con menor carga hidráulica. Las flechas indican la dirección y el sentido del flujo, con orientación ortogonal a las isopiezas y en sentido decreciente de los potenciales hidráulicos en el área de estudio.

Tabla 2. Características litológicas de las secciones encontradas en el abanico aluvial Qab (C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7) y correlación de la conductividad hidráulica estimada a partir de la clasificación de materiales según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La conductividad hidráulica de las secciones C-5, C-6, C-7 fue determinada mediante pruebas de bombeo (Hidrogeocol, 2012).

Sección	Litología	Correlación SUCS y conductividad hidráulica K (m/día)
(C-1, C-4) Caño Upamena	<p>Hacia el techo se presenta una capa de material fino tipo limo arenoso color pardo amarillento de 6,6 m de espesor.</p> <p>Subyacente se encuentra una capa de material redondeado a sub-redondeado tipo conglomerado, que varía en tamaño de 15 a 45 cm, soportado en una matriz de gravas de color rojizo a café, bien cementadas presenta cantidad apreciable de óxidos de hierro.</p> <p>Hacia la base presenta una intercalación de capa de arenas lateríticas, soportados por matriz limosa, bien cementada con abundante óxido de hierro.</p>	<p>CL-ML $10^{-5} - 10^{-2}$, muy baja permeabilidad, se puede clasificar como Acuitardo.</p> <p>GW-GM $10 - 10^2$, baja a alta permeabilidad, se puede clasificar como Acuífero bueno.</p> <p>SM-SC $10 - 10^{-1}$, permeable a algo permeable, se puede clasificar como Acuífero pobre.</p>
(C-2) Morichal	<p>Capa de material fino tipo color pardo amarillento de 13 m de espesor, con intercalación de capas tipo lateritas, lentes de arcillas de color gris claro.</p> <p>Subyacente se encuentra una capa de material redondeado a sub-redondeado, que varía en su tamaño de 15 a 45 cm, soportado en una matriz de tipo grava arenosa, con ocasión de material arcilloso.</p>	<p>CL-ML $10^{-4} - 10^{-2}$, muy baja permeabilidad, se puede clasificar como Acuitardo.</p> <p>GW-GM $10 - 10^2$, baja a alta permeabilidad, se puede clasificar como Acuífero bueno.</p>
(C-3) Río Cravo Sur	<p>Capa de material redondeado a sub-redondeado, que varía en su tamaño de 5 a 50 cm, este material se encuentra soportado por una matriz de grava y arena, mal seleccionada no consolidada.</p>	<p>GW $10^3 - 10^4$, alta permeabilidad, se puede clasificar como Acuífero excelente.</p>
(C-5) Pozo prof. Hospital	<p>Bloques y guijarros, arenas conglomeráticas, con diámetros de 0,5 a 0,8 mm, hacia los 125 m se empieza a presentar intercalación de arcillas, seguida por capas de arenas conglomeráticas</p>	<p>0,18 determinada por pruebas de bombeo (Hidrogeocol, 2012)</p>
(C-6) Pozo prof. Club Alcaraván	<p>Hacia el techo se presenta una capa de arcilla, con espesor de 15 m, seguida por una capa de grava y arenas cuarzosas de grano grueso, intercalada por arena cuarzosa de grano fino a medio.</p>	<p>0,30 determinada por pruebas de bombeo (Hidrogeocol, 2012)</p>
(C-7) Pozo prof. Ismocol	<p>Hacia el techo se presenta una capa de arcilla, con espesor de 13 m, seguido por una capa de cantos redondeados y arena, con intercalación de arcillas.</p>	<p>0,49 determinada por pruebas de bombeo (Hidrogeocol, 2012)</p>

El SGC reporta el análisis de la dirección de flujo subterráneo con más detalle, la cual está asociada a cada unidad de interés hidrogeológico en el municipio de Yopal, que corresponde a los depósitos de abanico Q2ab, la terraza cuaternaria de planicie aluvial Q1pal y el depósito aluvial actual del río Cravo Sur Q2al (SGC, 2018).

A fin de poder determinar el comportamiento del agua subterránea en cercanías de los ríos Charte y Cravo Sur; en la Figura 7 y 8 se presenta el resultado de un mapa de isopiezas, generado a partir de niveles piezométricos en aljibes y el nivel de la lámina de agua para cada río en un periodo con lluvias.

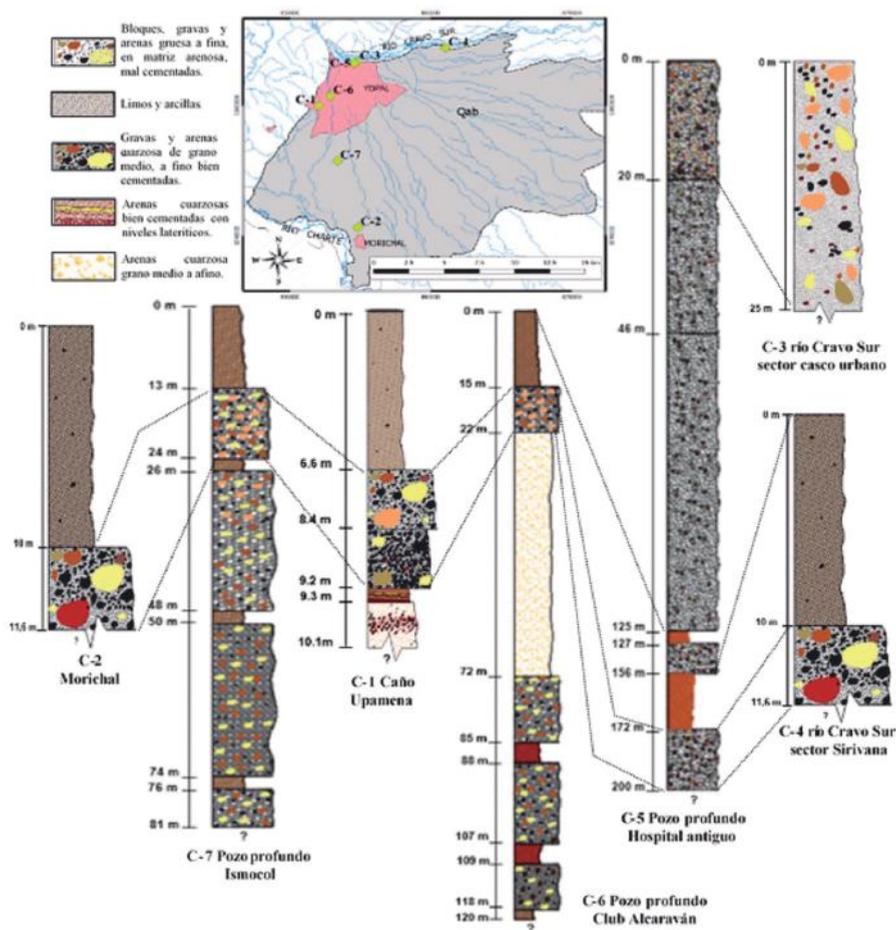


Figura 5. Localización y correlación de columnas estratigráficas, desde Morichal hasta la margen derecha del río Cravo Sur (sector Sirivana). El análisis estratigráfico corresponde a tres columnas litológicas (C-5, C-6, C-7) tomadas y modificadas de Hidrogeocol (2012), y cuatro columnas estratigráficas levantadas y georreferenciadas en área establecida como abanico aluvial Qab. C-1 caño Upamena E: 851674 N: 1080306. C-2 Morichal E: 854448 N: 1070968. C-3 río Cravo Sur E: 854397 N: 1083671. C-4 río Cravo Sur sector Sirivana E: 860679, N: 1084745. Nótese que las columnas difieren en la escala vertical.

Se realizó el seguimiento a dos aljibes A-B aledaños al río Cravo Sur (Figura 8), en donde en los periodos de alta precipitación, presentan niveles de agua cercanos a la superficie con una profundidad de 2,2 m y nivel piezométrico de 291,8 m para el aljibe A; 2,45 m y nivel piezométrico de 293,5 m para el aljibe B.

En la Figura 9 se representan los resultados de niveles de agua en los aljibes A-B, en un periodo sin

precipitación, correspondiente al día 08 de diciembre de 2019. En los cuales se presenta niveles de agua con respecto a la superficie correspondientes a 8,30 m y nivel piezométrico de 285,7 m para el aljibe A; 4,6 m y nivel piezométrico de 291,4 m para el aljibe B. El nivel de la lámina de agua del río Cravo Sur corresponde a una cota de 282 m.

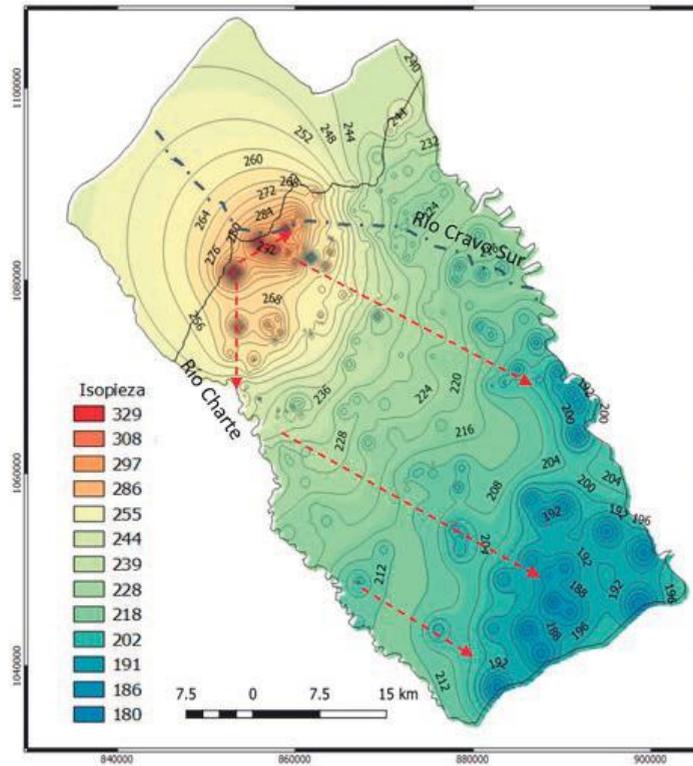


Figura 6. Mapa de isopiezas, representa la forma de la superficie freática del sistema de acuíferos cuaternarios. Nótese la dirección del flujo referida a las flechas, se define teniendo en cuenta que las líneas de flujo deben ser siempre ortogonales a las isopiezas.

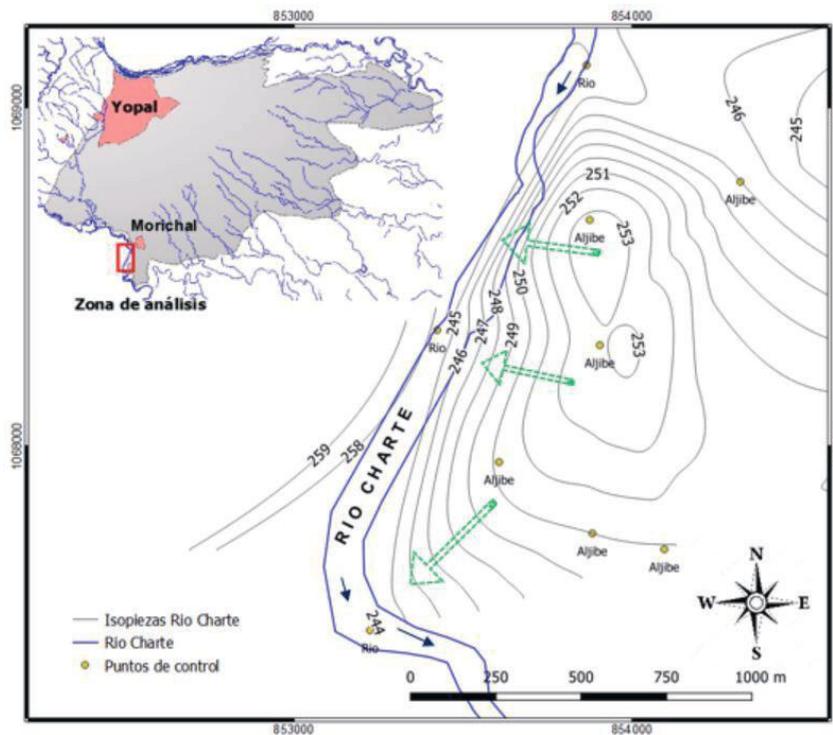


Figura 7. Mapa de isopiezas río Charte, sector Morichal. Se indica la dirección del flujo subterráneo representada por las flechas discontinuas.

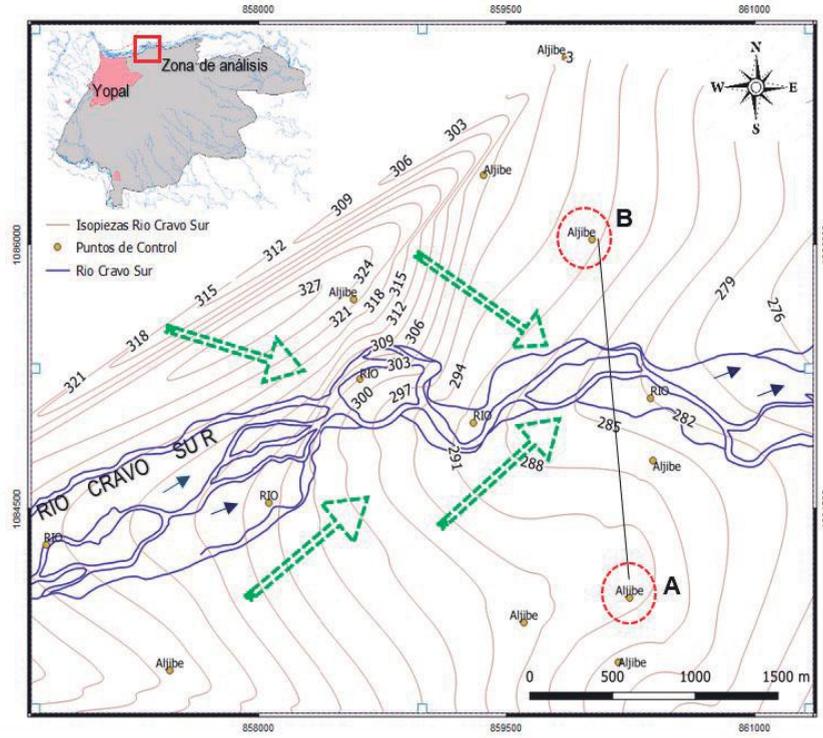


Figura 8. Mapa de isopiezas río Cravo Sur, sector vía Sirivana. Nótese que la dirección del flujo superficial del río Cravo Sur es en sentido W-E. La dirección del flujo subterráneo está representada por las flechas discontinuas de mayor tamaño, que son perpendiculares a las isopiezas, las cuales presentan convexidad hacia aguas arriba. Se incluyó 2 aljibes A y B como puntos de observación de niveles de agua.



Figura 9. Esquema representativo de niveles piezométricos para 2 aljibes A y B. La distancia horizontal entre los aljibes es de 2046 m. Estos fueron georreferenciados según sistema de coordenadas. El aljibe A está localizado en el sector vía Sirivana E: 860246 N: 1083992. El aljibe B está localizado en la vereda Guayauque E: 860021 N: 1086026. La diferencia entre el nivel de agua en los aljibes y el nivel del río Cravo Sur, permite definir la dirección de agua subterránea que está representada por las 4 flechas.

Discusión

De acuerdo con la distribución geográfica del inventario de puntos de agua como se muestra en la Figura 2, existe una mayor concentración en centros poblados y en especial en el casco urbano de Yopal debido a la problemática de desabastecimiento existente, también existen otras captaciones asociadas a zonas de cultivos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 3A, representa la distribución espacial de captaciones totales en el área de estudio, en donde se establece que dichas captaciones presentan un comportamiento similar en 3 direcciones representadas por las flechas arriba mostradas (NW-SE, y subparalela a los ríos Cravo Sur y Charte). El modelo espacial también representa parte de la descarga de los sistemas de acuíferos, la cual está representada por los caudales subterráneos captados en cada uno de los puntos inventariados.

En la Figura 3B se evidencia la captación mediante pozos profundos, los cuales presentan una distribución puntual muy alta en el área del casco urbano de Yopal, y de baja a media hacia el área rural. La alta densidad de pozos profundos sobre el casco urbano de Yopal obedece a la mayor población y a la contingencia provocada por el desabastecimiento de agua por red domiciliaria, generada por el colapso de la planta de tratamiento en el 2011.

En la Figura 3C se presenta la captación mediante aljibes, este método de captación es muy alto hacia el Norte del área de estudio, lo cual se puede asociar a la existencia de material proveniente del depósito Qab, el cual está compuesto principalmente por bloques, gravas y arenas poco cementadas, lo cual favorece la infiltración, almacenamiento y circulación del agua subterránea en periodos de lluvia, recargando esta parte del acuífero. De acuerdo a las condiciones litológicas que se presentan como resultados en la Figura 5, principalmente como se evidencia en la columna estratigráfica C-5 Pozo profundo Hospital antiguo, existe una capa de arcilla que se extiende desde Morichal y suprayaciendo a esta se encuentran un espesor de 125 m de arenas y gravas, que configuran esta área particular como acuífero libre.

La descarga de los acuíferos cuaternarios está representada por la posible conectividad hidráulica existente con fuentes superficiales y el total de captaciones por medio de las cuales se extraen caudales del orden de 0,10 y 31 L/s, hasta 62,52 L/s, datos obtenidos de información preliminar referente a las pruebas de bombeo. Estos últimos caudales se presentan

en los pozos de gran producción con profundidades entre los 100 y 500 m, que se encuentran localizados en el casco urbano de Yopal y se establecieron como medida contingente al desabastecimiento que ha vivido Yopal en los últimos 8 años.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 4, donde se presenta la georreferenciación de estas captaciones sobre el depósito Qab, se evidencia que los aljibes se encuentran más próximos a las corrientes de agua superficial, específicamente en áreas cercanas al río Cravo Sur y río Charte, lo cual supone que existe conectividad hidráulica con el depósito Qab. Para poder definir dicha conectividad, se han generado mapas de isopiezas en áreas cercanas a los ríos, específicamente en el sector de Morichal y en el sector vía Sirivana (Figura 7 y 8).

Con respecto a la localización de los pozos profundos (Figura 4), estas captaciones se pueden encontrar distantes a cursos de agua superficial en algunos sectores, pero también es común encontrar pozos profundos muy cerca de corrientes hídricas. Se evidencia mayor concentración en el casco urbano de Yopal. De acuerdo a los resultados obtenidos se aprecia 2 direcciones (H, G) determinadas por las captaciones sobre el acuífero cuaternario Qab. La dirección H comprende el centro poblado de Morichal hasta el casco urbano de Yopal, en donde predomina la existencia de pozos profundos, estas captaciones presentan una orientación aproximadamente en sentido N-S. La dirección G está comprendido entre casco urbano de Yopal, vía Sirivana, veredas Picón y La Unión; la orientación de las captaciones corresponde a una orientación NW-SE, donde predominan las captaciones por medio de aljibes.

La poca existencia de aljibes hacia el Oeste del abanico aluvial se debe a que en este sector existen condiciones sedimentarias que no favorecen este tipo de captación, ya que allí se presenta una capa de arcillas que varía en espesor de los 12 m hasta 15 m, como se aprecia en las columnas estratigráficas C-1, C-2, C-7 (Figura 5). Los resultados obtenidos de espesores y composición para cada columna estratigráfica, permitió establecer que las características sedimentarias de la columna C-1, C-2, C-4, C-6, C-7, corresponden a una secuencia similar (Tabla 2), pero difieren con la composición de la columna C-3 y C-5. Estos resultados indican que desde el punto de vista geológico la extensión y delimitación cartográfica del depósito Qab, no corresponde a la delimitación existente y referida en la cartografía geológica colombiana. Lo cual supone que la extensión del depósito podría ser menor.

La correlación estratigráfica mostrada en la Figura 5 y los resultados obtenidos en la Tabla 2, indican que las condiciones geológicas permiten asociar estos materiales con dos sistemas de acuíferos cuaternarios diferentes. Uno confinado a semiconfinado, que corresponde al sector localizado desde Morichal y que se extiende hacia el Norte llegando cerca del piedemonte. La capa de material fino expuesto hacia la superficie de las columnas C-1, C-2, C-6, C-7 se correlaciona con una conductividad hidráulica baja, esta condición hidráulica incide en la recarga del acuífero, dificultando la infiltración de agua producto de la precipitación, haciendo más difícil obtener agua mediante captaciones por aljibes, razón por la cual en esta área existe una mayor captación de agua mediante pozos profundos.

El otro sistema hidrogeológico que se puede establecer corresponde a un acuífero libre. Se trata del modelo más simple, que consiste en una estructura geológica permeable, saturada de agua hasta cierto nivel, por encima del cual existe una franja de terreno permeable no saturada, a través del cual circula el agua de recarga (Navarro, 2000).

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 2, la conductividad hidráulica obtenida a partir de la correlación mediante análisis granulométricos y su clasificación SUCS, así como la conductividad hallada mediante pruebas de bombeo por Hidrogeocol, indican que el material clástico constituido por material tipo bloques, cantos y gravas, soportados en matriz de arena gruesa a fina; depositados por eventos fluviales que componen las diferentes columnas estratigráficas, pueden establecer 2 zonas de interés hidrogeológico que se describen a continuación:

Sector casco urbano de Yopal y río Cravo Sur: en esta zona se puede contrastar la información de conductividad hidráulica referente a las columnas estratigráficas C-3, C-5, donde los valores de K obtenidos indican características de un acuífero libre de excelente a bueno, de alta permeabilidad. Estas condiciones sedimentarias han forjado áreas estratégicas de material no consolidado que favorecen el almacenamiento, circulación y captación de agua subterránea, que facilitan su aprovechamiento por medio de aljibes a profundidades superiores a los 4 m y captaciones mediante pozos profundos de los cuales se extraen caudales mayores.

Sector corregimiento de Morichal hasta caño Upamena: en esta zona se obtiene información de

conductividad hidráulica referente a las columnas estratigráficas C-1, C-2, C-6, C-7, donde los valores de K obtenidos indican una conductividad hidráulica baja hacia el techo de las respectivas columnas estratigráficas. Sin embargo, a profundidades superiores a los 13 m, la conductividad hidráulica varía según información de los diseños y las pruebas de bombeo del pozo Ismocol C-7, en donde se instalaron filtros en dos tramos entre los 50 y 78 m de profundidad y se puede extraer un caudal de 172,8 m³/día (Hidrogeocol, 2012). Para el pozo localizado en el Club Alcaraván C-6, se instalaron filtros a profundidades de 72 y 118 m de profundidad y se puede extraer un caudal máximo 285,1 m³/día (Hidrogeocol, 2012). De acuerdo a lo anterior los valores de K en (m/día) referidos por Hidrogeocol, se consideran muy bajos, respecto a los hallados y correlacionados por el sistema SUCS.

Como se puede apreciar en el mapa de isopiezas (Figura 6) el sentido del flujo del agua subterránea presenta una dirección predominante en sentido NW-SE y otras orientadas hacia los ríos Charte y Cravo Sur, lo cual supone que existe conectividad hidráulica entre los depósitos y los ríos. Las isopiezas presentan una cota superior a los 323 m.s.n.m, en el sector del casco urbano de Yopal y piedemonte, resultado que permite asociar que en estas áreas se presenta una recarga potencial del acuífero Qab. Las isopiezas presentan una tendencia de descenso hacia el sur del municipio con valores de 184 m.s.n.m. Tal y como se ha propuesto en trabajos previos (SGC, 2018) la red de flujo para el acuífero superficial mantiene una dirección predominante N-S, partiendo del ápice del abanico de Yopal, estimándose este como zona de recarga y posible conexión hidráulica permanente con el río Cravo Sur.

Los resultados mostrados en las Figuras 7, 8 y 9, confirman que el flujo subterráneo presenta dirección hacia los ríos Charte y Cravo Sur. Específicamente en la Figura 8, las isolíneas presentan una convexidad hacia aguas arriba del río Cravo Sur, lo cual es característico en la cartografía hidrogeológica para definir los ríos ganadores o efluentes (García-Rodríguez y Fernández-Escalante, 2008).

Los descensos en los niveles piezométricos en los aljibes A y B de la Figura 9, coinciden con el descenso del río Cravo Sur, para el mismo periodo de monitoreo, estos ríos que reciben agua desde los acuíferos, su lecho se sitúa a una cota inferior al nivel piezométrico, confirmando la conectividad hidráulica del depósito y el río.

Conclusiones

Los depósitos cuaternarios dentro del área de estudio, consisten en una sucesión de sedimentos que debido a sus características, composición, granulometría y conductividad hidráulica, favorecen el almacenamiento, circulación y captación de agua. Estas características definen el área de estudio como 2 unidades hidrogeológicas importantes; una de carácter local que corresponde al depósito cuaternario de abanico aluvial Qab, que se constituye como un acuífero libre. Y otra de mayor extensión que corresponde a depósitos de planicie o llanura aluvial Qpal, que se constituye como acuífero confinado a semiconfinado, el cual presenta alta concentración de óxidos de hierro y niveles lateríticos, que tienen incidencia directamente en la calidad de agua.

Las condiciones hidrogeológicas generales del material que conforman los acuíferos cuaternarios de Yopal Casanare, favorecen la extracción de agua principalmente mediante aljibes y pozos profundos. Se evidencia una mayor demanda en áreas con mayor densidad de población, principalmente en los corregimientos de Santa Fe de Morichal, Tilodirán, Punto Nuevo, Quebrada Seca y el casco urbano de Yopal; este último debido a la problemática de desabastecimiento existente desde hace más de 8 años. Los pozos profundos es el método de captación que predomina en el área de estudio, ya que facilita acceder al recurso hídrico a mayor profundidad y extraen un mayor caudal.

La distribución de las isopiezas determina la dirección de un flujo regional de agua subterránea, en sentido predominante NW-SE. También se nota una importante influencia en dirección a los ríos Charte y Cravo Sur. Las isopiezas de mayor valor presentes en las unidades hidrogeológicas cuaternarias, representan áreas de recarga que se asocia al depósito de abanico aluvial Qab, principalmente hacia el sector del casco urbano y límite del piedemonte de Yopal.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, encontramos que la unidad geológica correspondientes al depósito Qab, presenta conectividad hidráulica con los ríos Charte y Cravo Sur.

Este trabajo contribuyó en la generación de nuevos aportes al conocimiento del estado del recurso hídrico subterráneo, y condiciones hidrogeológicas existentes en Yopal, Casanare, y servirá como aporte en futuras

investigaciones que permitan cuantificar los caudales extraídos de los acuíferos aquí estudiados.

Agradecimientos

El autor agradece a la coordinación técnica de investigación de la Fundación Universitaria Internacional del Trópico Americano UNITROPICO, por el apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Yopal. (2012). Plan de Atención Territorial - Yopal. Alcaldía Municipal de Yopal.
- Alcaldía Municipal de Yopal. (2013). Plan de Ordenamiento Territorial POT - Yopal. Tomo II. Alcaldía Municipal de Yopal.
- ANLA. (2016). Reporte sobre la cuenca del río Charte. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- Casagrande, A. (1948). *Classification and identification of soils*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University.
- Corporinoquia y Corpoboyacá. (2015). Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Cravo Sur. Corporinoquia y Corpoboyacá
- DANE. (2018). Proyecciones de población municipal por área. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- García-Rodríguez, M.; Fernández-Escalante, A.E. (2008). *Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo*. 2da ed. Madrid: Ediciones FIEC.
- Gonzales, T. (2014). Colapso Planta tratamiento Acueducto Yopal. Tribunal administrativo de Casanare.
- Hidrogeocol. (2012). Modelo conceptual y formulación del modelo numérico para los escenarios factibles para el aprovechamiento y manejo adecuado del acuífero del municipio de Yopal – Casanare. Hidrogeocol.
- HIDROYOPAL. (2013). Estudio hidrogeológico municipio de Yopal. HIDROYOPAL.

- IDEAM. (2014). Anexo 4. Fichas síntesis de sistemas acuíferos y aguas subterráneas frente a indicadores. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Méndez, W.; González, Z.; Suárez, J.; Arauno, M.; Vielma, M.; Maiz, H. (2016). Geomorfología de los abanicos aluviales del piedemonte norte del macizo El Ávila, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40(87), 95-128.
- Montoya, D.; Numpaque, A.; Martín, C.; Alcárcel, F. (2013). Geología de la Plancha 193 Yopal, departamento de Casanare. Servicio Geológico Colombiano.
- Navarro, A. (2000). Conceptos básicos de hidrogeología. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Quiroz-Londoño, O.M.; Martínez, D.E.; Massone, H.E. (2012). Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en ambientes de llanura. La llanura interserrana bonaerense (Argentina), como caso de estudio. *DYNA*, 79(171), 239-247.
- SIAC. (2018). Sistema de Información Ambiental de Colombia. <http://www.siac.gov.co/geoservicios>
- SGC. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal, departamento de Casanare. Servicio Geológico Colombiano.
- Vargas, N.; Campillo, A.; García, M.; Jaramillo, O. (2013). *Aguas subterráneas en Colombia una visión general*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Veloza-Franco, J.A.; Morales-Arias, C.J. (2009). Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico en el municipio de Maní departamento de Casanare. *Boletín de Geología*, 31(1), 71-83.

Helberth Iván Gómez-Niño
ORCID: 0000-0002-5959-4726

Trabajo recibido: agosto 20 de 2019
Trabajo aceptado: abril 04 de 2020