

Hacia la elaboración de un modelo hidrogeológico de la Cuenca del Río Guachiría (Colombia)

Carlos Esteban Benavides-Guerrero¹ ; Linda Elizabeth Caro-Caro^{1*} ; Jorge Eliecer Mariño-Martínez¹ 

¹Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia. carlos.benavides01@uptc.edu.co; (*) linda.caro@uptc.edu.co; jorge.marino@uptc.edu.co

Resumen

En los últimos años, las variaciones climáticas extremas han generado afectaciones evidentes a los recursos naturales, perjudicando uno de los más importantes: el agua. Un claro ejemplo de ello es la Cuenca del Río Guachiría, ubicada en Colombia; allí, las prolongadas temporadas de sequía de la última década han perjudicado tanto a la biota como a la población civil, ya que dependen principalmente de este recurso. El presente estudio pretende incrementar el estado del arte sobre las variables hidrometeorológicas, hidráulicas y a grandes rasgos, entender las condiciones hidrogeológicas de la Cuenca del Río Guachiría, esto con la finalidad de brindar información que sirva de base para la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual (MHC) que ayude en la toma de decisiones por parte de las entidades encargadas de la gestión del recurso hídrico. En primer lugar, se determinaron las condiciones morfológicas y geológicas del área, encontrando que existe una predominancia de zonas planas con poca pendiente, conformadas por depósitos no consolidados, extensas zonas de inundación e influencia eólica sobre depósitos fluviales. Luego, se realizó un balance hídrico de largo plazo en la cuenca para cuantificar el recurso en la zona; a su vez, se identificaron zonas propicias de recarga en varios sectores: una parte hacia el piedemonte en la zona de altas pendientes y otra hacia los depósitos con influencia eólica, conformados por suelos arenosos y franco arenosos que suprayacen a la Formación Guayabo. Además, mediante pruebas de bombeo, se determinaron diferentes parámetros hidráulicos y se clasificaron los acuíferos como libres, confinados y semiconfinados, ligados a la litología de la zona, por su extensión y complejidad litológica. Finalmente, se realizó un muestreo hidrogeoquímico, donde se encontraron aguas en su mayoría relativamente jóvenes, de poco transporte y con contenidos altos de hierro.

Palabras clave: Hidrogeología; Hidrología; Recarga potencial; Hidrogeoquímica; Llanos orientales; Orinoquía.

Towards the elaboration of a hydrogeological model of the Guachiría river basin (Colombia)

Abstract

In recent years, extreme climatic variations have generated obvious effects on natural resources, harming one of the most important: water. A clear example of this is the Guachiría River Basin, located in Colombia, the prolonged dry seasons of the last decade have harmed both the biota and

Forma de citar: Benavides-Guerrero, C.E.; Caro-Caro, L.E.; Mariño-Martínez, J.E. (2022). Hacia la elaboración de un modelo hidrogeológico de la Cuenca del Río Guachiría (Colombia). *Boletín de Geología*, 44(2), 161-182. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022008>

the civilian population, since they depend mainly on this resource. The present study aims to increase the state of the art on hydrometeorological, hydraulic variables and, in general, to understand the hydrogeological conditions of the Guachiría River Basin, this with the purpose of providing information that serves as baseline for the elaboration of a conceptual hydrogeological model (CHM) that helps in decision-making by the entities in charge of water resource management. First, the morphometric and geological conditions of the area were determined, finding that there is a predominance of flat areas with little slope, made up of unconsolidated deposits, extensive flood zones and wind influence on fluvial deposits. Then, starting from a mass balance, a water balance was carried out in the basin to quantify the resource in the area; In turn, favorable recharge zones were identified in several sectors: one part towards the foothills in the area of high slopes and another towards the deposits with eolian influence, made up of sandy and sandy loam soils that overlie the Guayabo Formation. In addition, through pumping tests, different hydraulic parameters were determined, and the aquifers were classified as free, confined, and semi-confined, linked to the lithology of the area, due to their extension and lithological complexity. Finally, a hydrogeochemical sampling was carried out, where mostly relatively young waters, with little transport and high iron content were found.

Keywords: Hydrogeology; Hydrology; Potential recharge; Hydrogeochemistry; Eastern plains; Orinoquía.

Introducción

En las últimas décadas, la variación exponencial del clima ha generado un gran número de afectaciones medioambientales que, a su vez, influyen negativamente en la supervivencia y desarrollo de la sociedad, generando problemáticas que van desde sequías e inundaciones, hasta el aumento en casos de malaria (Poveda-Jaramillo *et al.*, 2020).

Colombia, un país privilegiado por la diversidad de sus ecosistemas y riquezas naturales, se ha visto afectado por estas variaciones climáticas, agravadas por su localización geográfica en el trópico septentrional, además de la acción antrópica proveniente de las industrias, la deforestación, la agricultura, la ganadería extensiva y la minería sin supervisión (Poveda-Jaramillo *et al.*, 2020; EIA, 2005).

Un ejemplo del desequilibrio ambiental por el que pasa Colombia, producto de esta variación climática, fue la temporada de estiaje que afectó gran parte del país, especialmente al departamento de Casanare, durante el primer semestre de 2014, situación que provocó la muerte de más de veinte mil animales, generando una emergencia medioambiental, particularmente en las sabanas de Paz de Ariporo y que se denominó por los medios y entes territoriales como la Sequía del Casanare (Guzmán, 2015).

Los múltiples eventos de ese tipo, ocurridos recientemente, advirtieron acerca de la necesidad de avanzar en estudios que provean de información básica necesaria para entender la dinámica hídrica, no solo en la región de la Orinoquía, sino en todo el país.

Con el fin de brindar a la comunidad un mayor conocimiento acerca del comportamiento del agua

superficial en la sabana inundable de Paz de Ariporo, específicamente en la Cuenca del Río Guachiría, se desarrolló un análisis que se acerca a un modelo hidrogeológico conceptual agrupando aspectos determinantes tales como: condiciones morfológicas e hidrológicas de la cuenca, constantes hidráulicas, calidad del agua y localización de zonas de recarga de acuíferos, que sirvan de guía para la planificación y adecuada gestión del recurso hídrico.

Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se localiza geográficamente en la Cuenca de los Llanos Orientales, específicamente hacia el norte del departamento del Casanare (Figura 1). Que corresponde a la Cuenca Hidrográfica del Río Guachiría, extendiéndose desde el piedemonte llanero, hasta los límites con el Vichada, donde su cauce principal desemboca al Río Meta, específicamente en las veredas de Caño Chiquito y Centro Gaitán, unas de las más afectadas durante los periodos de sequía, donde ocurrió la mayor mortandad de animales y escasez de agua.

Morfometría de la cuenca

La cuenca tiene un área de 3688 km² con altitudes que varían de los 100 a los 1320 m.s.n.m describiendo un relieve moderado, controlado por los diferentes eventos tectónicos y erosivos, en cuanto al Río Guachiría, este es caracterizado por patrones de drenaje meándrico y trezado que varían de acuerdo con la pendiente y tipo de material por donde circulan, así mismo, posee una densidad de drenaje baja, ya que los cauces se encuentran distantes debido a las dimensiones de la cuenca y su forma alargada, factores que interfieren en el tiempo de concentración, caracterizado como lento.

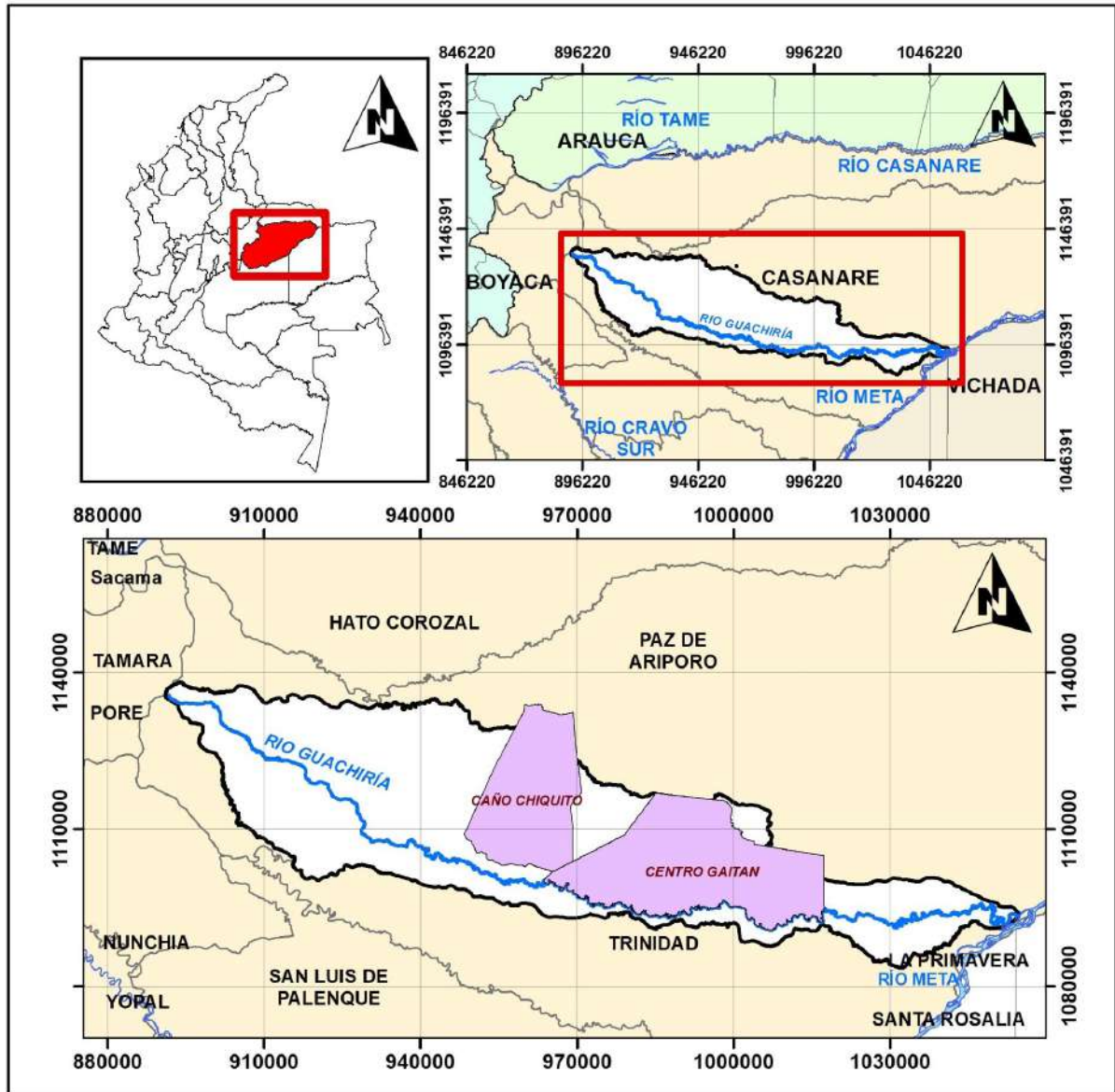


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Cobertura vegetal

En la cuenca del Río Guachiría se presentan coberturas de 5 categorías principales: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua, de las cuales predominan las categorías de coberturas de pastos, cultivos y espacios naturales en toda la región central, ya hacia la región más oriental sobre los depósitos eólicos se presenta herbazales arenosos y bosques de galería rodeando los cauces de los ríos (IDEAM, 2010).

Marco geológico

Dentro de la cuenca se identificaron diferentes aspectos litológicos de los suelos que condicionan las geoformas del terreno y que están ligadas a la geología, cuyas características condicionaran el proceso de infiltración, escorrentía y flujo subterráneo.

- Geomorfología: la cuenca consta de un paisaje variado, que inicia con una morfología montañosa característica del cinturón plegado del piedemonte,

posteriormente pasa a una vasta región de llanuras donde las terrazas aluviales dejadas por ríos antiguos fueron elevadas en el último levantamiento de la Cordillera y los ríos recientes depositan todo el material transportado desde las orógenas, dejando a su paso canales abandonados, finalmente en la parte más oriental predominan geformas típicas de ambientes eólicos (campos de dunas y mantos de loess) y suelos arcillo limosos con pobre drenaje, característicos de las llanuras de inundación de la sabana oriental.

- Suelos: en el área de estudio se pueden encontrar suelos inmaduros relativamente jóvenes clasificados taxonómicamente como Entisoles, Inceptisoles y unos pocos Oxisoles, categorización que es dada de acuerdo con la evidencia de los procesos y factores de formación donde predominan los suelos franco-arenosos a lo largo de toda la cuenca, específicamente materiales aluviales finos con alternancia de gruesos (RVA) en toda la región central de la cuenca y, materiales limosos y arenosos (RVD, RVC) con influencia

eólica hacia la región sureste de la cuenca (IDEAM, 2014).

- Geología: La cuenca está cubierta por llanuras de origen fluvial de edad cuaternaria, conformada por depósitos aluviales recientes, depósitos de abanico aluvial, depósitos de planicie aluvial y en la desembocadura con el Río Meta hacia el este de la cuenca se encuentran depósitos eólicos. En la región oeste hacia el piedemonte llanero predominan las formaciones rocosas del Neógeno; la Formación Caja o también llamada Formación Guayabo y la Formación Diablo, afectadas por las fallas de Paz de Ariporo y del Borde llanero (SGC, 2012).
- Existe predominancia de depósitos de planicie aluvial (Qhpa) en toda la región central los cuales son una intercalación de aluviales gruesos y finos con variaciones granulométricas internas (Schmudde, 1968; citado en SGC *et al.*, 2012); por otro lado, hacia la región este se encuentran los depósitos eólicos (Qpde, Qae) que consisten en arenas finas y limos (Figura 2).

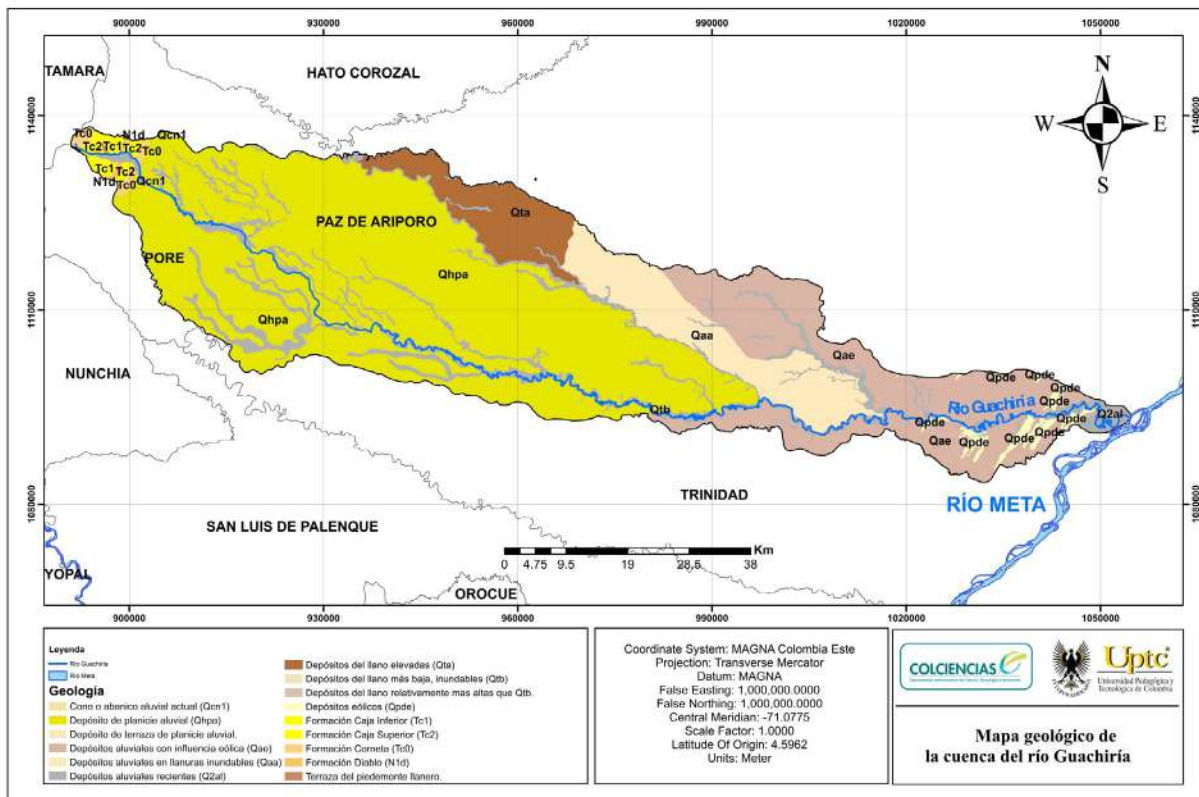


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del Río Guachiría. Modificado de PBOT (2011).

Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo, se integraron los parámetros morfométricos de la Cuenca del Río Guachiría, las condiciones superficiales de cobertura, geomorfología, tipo de suelos y geología, que condicionan la dinámica hídrica en la cuenca.

Además, se integró el comportamiento de las variables hidrometeorológicas, la caracterización de las zonas de recarga, parámetros hidráulicos de los acuíferos y la composición hidrogeoquímica del agua para obtener un acercamiento al modelo hidrogeológico de la cuenca (ver Figura 3).

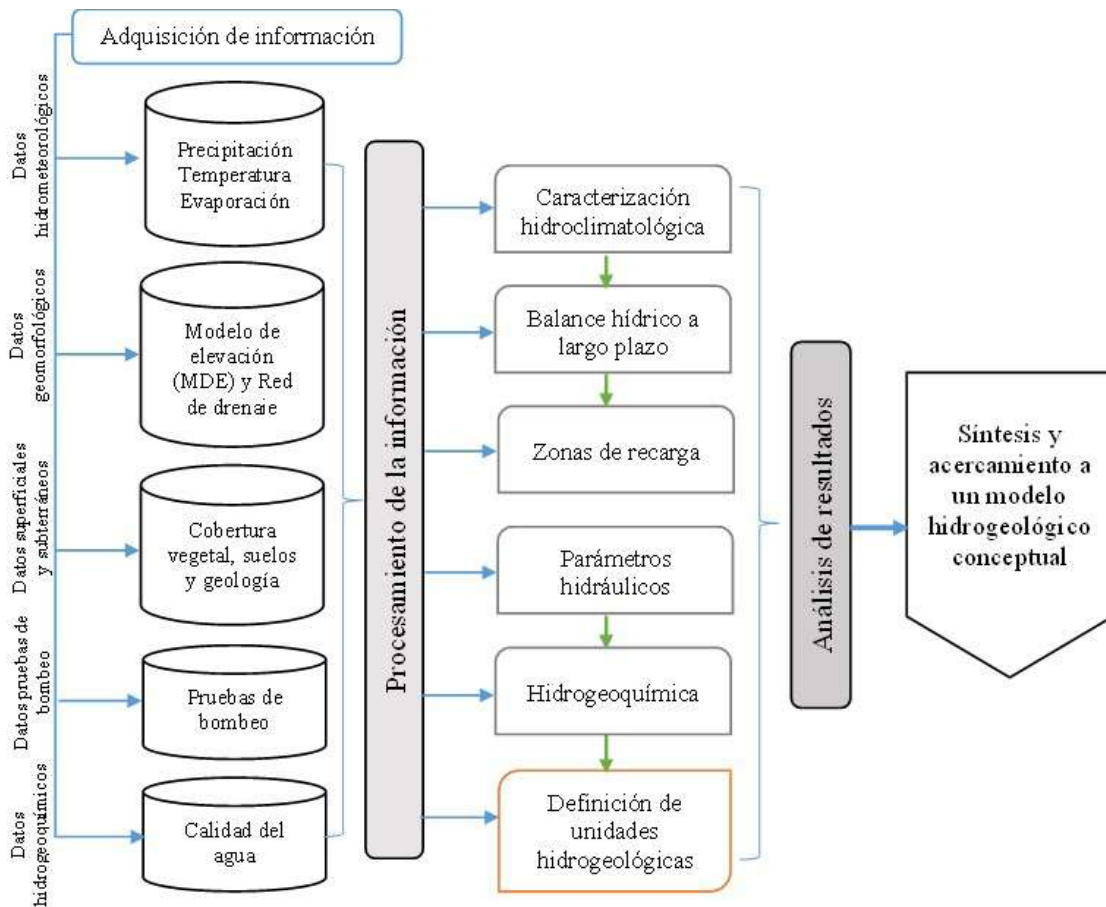


Figura 3. Esquema metodológico realizado para el estudio.

A continuación, se hace una ampliación a la metodología del procesamiento de la información adquirida.

Hidroclimatología

Se analizó información existente de series históricas, provenientes de 13 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM (Figura 4), en un lapso de 25 años, periodo comprendido entre 1990 a 2015, con el objetivo de ayudar en la estimación del comportamiento y la distribución espacial de variables que intervienen en el ciclo hidrológico, que podrían brindar datos suficientes para la evaluación del recurso hídrico en el área de estudio mediante un balance hídrico a largo plazo.

Una vez recopilada la información multitemporal de las estaciones, se analizó la calidad de la información, completando los datos faltantes, se realizó un análisis estadístico de las series de tiempo, se identificó la variabilidad en el tiempo, así como sus tendencias y anomalías, para posteriormente determinar la distribución espacio-temporal a través de técnicas de interpolación como el inverso de la distancia ponderada (IDW), esto para cada una de las variables del ciclo hidrológico (precipitación, temperatura, evapotranspiración).

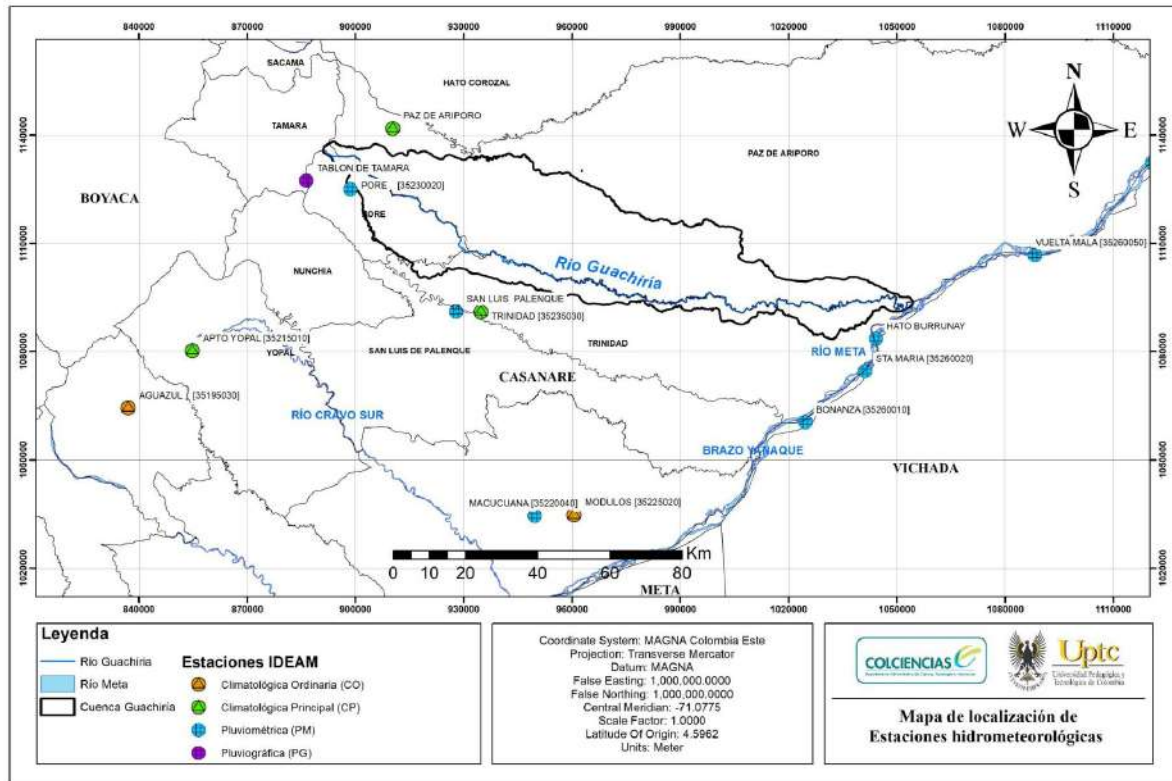


Figura 4. Localización de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Categorías de las estaciones: Climatológica Ordinaria (CO), Climatológica Principal (CP), Pluviográficas (PG) y Pluviométrica (PM).

Balace hídrico a largo plazo en la cuenca

Una de las mejores perspectivas para estimar la dinámica hídrica es mediante la ecuación de conservación de energía en un volumen de control, que para el caso de estudio corresponde a la cuenca del Río Guachiría. A partir de un enfoque simplificado, debido a las limitantes de calidad y cantidad de la información existente se realizó el balance hídrico a largo plazo partiendo de la ecuación 1 que se expresa según Manabe (1969) y Schaake (1990) (citado en Poveda-Jaramillo *et al.*, 2020) de la siguiente forma:

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - ETR(t) - R(t), \quad (1)$$

Donde $S(t)$ es el cambio en el almacenamiento en función del tiempo, $P(t)$ es la precipitación total anual (mm/año), $ETR(t)$ es la evapotranspiración real (mm/año) y $R(t)$ corresponde a la escorrentía (mm/año), que puede entenderse como:

$$R(t) = \text{Escorrentía subsuperficial o recarga} + \text{Escorrentía superficial} \quad (2)$$

Por lo que reemplazando 2 en 1 se tiene $\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - ETR(t) - (R_{SuboRec} + R_{Sup})$, ahora despejando la recarga o escorrentía subsuperficial y teniendo la consideración de que la variación en el almacenamiento a escala anual se considera cero se tiene que;

$$R_{SuboRec} = P(t) - ETR(t) - R_{Sup} \quad (3)$$

Donde $R_{SuboRec}$ corresponde a la recarga, $P(t)$ es la precipitación en mm/año, $ETR(t)$ es la evapotranspiración real y R_{Sup} corresponde a la escorrentía superficial. Finalmente, el resultado de la ecuación 3 corresponderá a la fracción de agua que finalmente llega a recargar las unidades acuíferas y se considerará como una recarga potencial pues no considera la variación en el almacenamiento ni el agua que se encuentra almacenada por capilaridad.

Estimación de la evapotranspiración real

El cálculo de la evapotranspiración representa la principal salida de agua de un sistema, por lo tanto, son necesarias algunas simplificaciones para su determinación, la evapotranspiración real (ETR) puede ser calculada a partir de la evapotranspiración potencial

$$ETP = 0,0023(t_{med} + 17,78)Ro * (t_{max} - t_{min})0,5, \quad (4)$$

donde: Ro es la radiación solar $t_{max}-t_{min}$ y son las temperaturas máximas y mínimas mensuales. A partir de la ETP puede calcularse la ETR por medio

$$ETR = \left\{ ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

donde, ETR es la evapotranspiración real (mm/año), ETP es la evapotranspiración potencial (mm/año) y P es la precipitación media en la cuenca (mm/año).

Estimación de la escorrentía

Para la estimación de la escorrentía se realizó una modificación de la variable R_{Sup} en la ecuación 3, pues se utilizó un coeficiente de infiltración (Ci) en función de la precipitación promedio mensual

$$R_{Sub\ o\ Rec} = P(t) - ETR(t) - (Ci * P(t)), \quad (6)$$

donde Ci es el coeficiente de infiltración en unidades de mm/año que corresponde a $Ci=0,88*(Kfc*Kp*Kv)$, donde los coeficientes Kfc , Kp y Kv son ponderaciones correspondientes a cada parámetro de superficie (textura del suelo, pendiente y vegetación respectivamente). Cabe aclarar que este es un método simplificado de estimación de la escorrentía superficial basado en las propiedades texturales superficiales en un volumen de control para este caso la cuenca del Río Guachiría.

Distribución espacial de zonas favorables de recarga

Para el caso de estudio se sigue la metodología de Schosinsky y Losilla (2000), adaptada para la representación del método de balance por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ayuda a identificar las zonas con mayor potencial de recarga hacia los acuíferos profundos.

Las zonas de interés se evalúan desde la precipitación promedio que cae sobre la cuenca, estableciendo en

(ETP) que asimila las condiciones más favorables. Con la finalidad de dar solución a la ecuación 3 se calculó en primer lugar la variable ETP, mediante la metodología de la fórmula simplificada Hargreaves y Samani (1985):

de la ecuación de Budyko (1974), que se presenta a continuación:

multianual (mm/año), que se representa mediante una aproximación a la escorrentía superficial calculada a partir de estimaciones realizadas por Schosinsky y Losilla (2000), dicho coeficiente equivale al porcentaje de la precipitación que finalmente puede llegar a infiltrarse, a partir de la ecuación 3, se tiene que $R_{Sup} = Ci * P(t)$, siendo Ci el coeficiente de infiltración y $P(t)$ la precipitación mensual multianual, quedando de la siguiente forma:

primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje; luego, la porción que llega a infiltrarse en el suelo y, finalmente, se debe realizar un balance de suelos que permita estimar el agua que drena hacia el acuífero, teniendo en cuenta también las condiciones morfológicas de la cuenca (SGC, 2018).

Esto se realiza mediante ponderaciones, teniendo en cuenta las aptitudes de cada variable de retener o dejar fluir agua, las cuales están representadas mediante capas ráster; de acuerdo con las propiedades ligadas al tipo de vegetación (Kv), textura del suelo (Kfc) y pendiente de la cuenca (Kp), se realizan operaciones entre rásters, incluyendo así cada una de las variables que intervienen en el flujo del agua, desde el momento que ocurre la precipitación, por lo que brinda una buena aproximación de las posibles zonas que presentan mayores condiciones favorables para su acumulación e infiltración.

Pruebas de bombeo

Como método de análisis de las condiciones hidráulicas subterráneas se reinterpretaron, de estudios anteriores (Benavides-Guerrero *et al.*, 2021), y realizaron pruebas de bombeo en pozos de captación, extrayendo agua a caudal constante por un tiempo establecido, monitoreando el descenso de su nivel, de tal manera que se logró determinar el comportamiento de los acuíferos en los depósitos cuaternarios y en la Formación Guayabo, para un total de 22 pruebas de bombeo.

La interpretación de datos obtenidos en las pruebas de bombeo se realizó mediante el software R-Studio con la extensión Pumping Test y el software Acuífer Test, donde se establecieron los tipos de acuíferos presentes diferenciándolos según sus propiedades hidráulicas en relación con sus propiedades litológicas.

Hidrogeoquímica

El análisis hidrogeoquímico consistió en determinar las concentraciones de aniones, cationes y las propiedades físicas como conductividad eléctrica, sólidos totales, pH y turbiedad, mediante una ruta de muestreo en cuerpos de agua lóticos, lénticos, algunos pozos que no superaban los 100 metros de profundidad y molinos de bombeo de agua.

Para esto se realizaron dos muestreos, uno durante el mes de agosto de 2017 finalizando la temporada de sequía y el otro en el mes de mayo de 2018 durante la temporada lluvias, en los cuales se tomaron 41 muestras por campaña, distribuidas desde las zonas altas en el Páramo del Cardón en Chita - Boyacá, donde nace el Río Guachiría, siguiendo la carretera que conduce desde el centro urbano de Paz de Ariporo a la vereda de Centro Gaitán (Figura 5), con el objetivo de adquirir una red distribuida de datos que mostrara las condiciones locales del agua.

Las muestras recolectadas, se llevaron al laboratorio de aguas de la UPTC-Sogamoso con los debidos protocolos de muestreo y cadena de custodia, a los resultados obtenidos se les realizaron pruebas de calidad de la información mediante el balance iónico y los valores de conductividad para verificar que la información fuera confiable, donde en la campaña de Agosto del 2017 se tomaron 23 muestras mientras que la de mayo de 2018, por condiciones adversas, solo se pudieron tomar 21, siguiendo la recomendación de confiabilidad de datos hecha por Custodio y Llamas (1976), teniendo en cuenta el error admisible y la conductividad eléctrica.

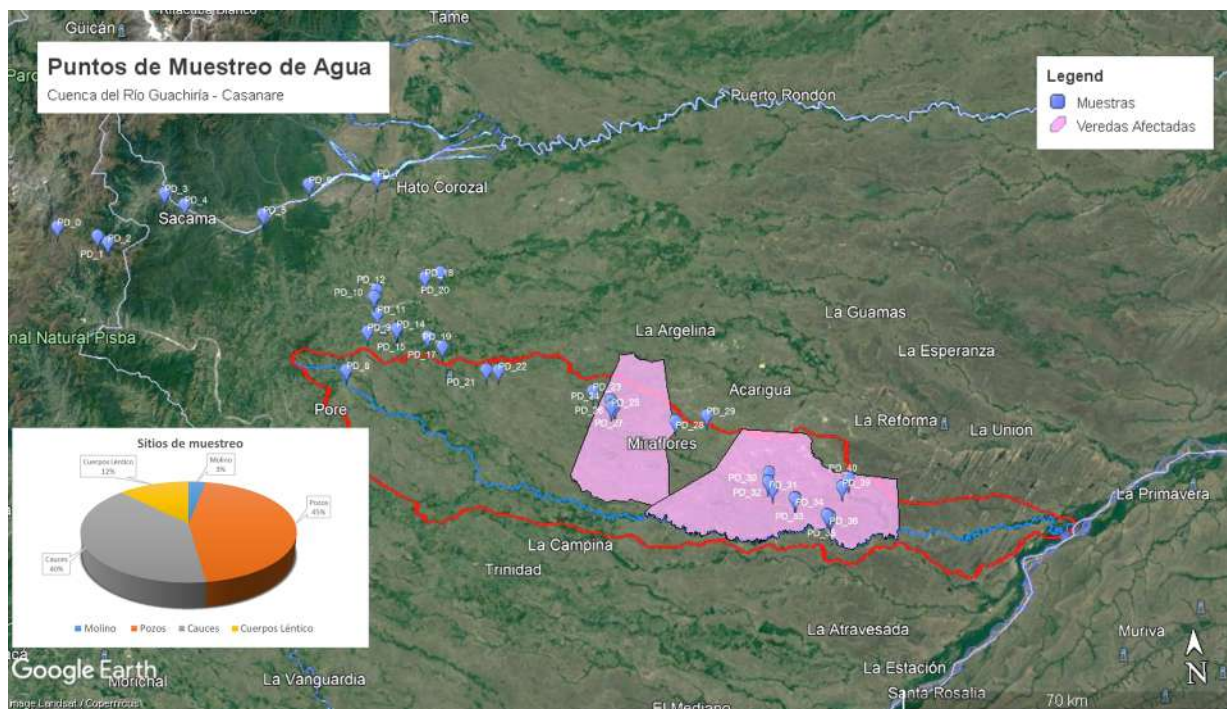


Figura 5. Distribución de los puntos de agua muestreados desde el Páramo del Cardón hasta la vereda de Centro Gaitán, distribuidas en el departamento de Casanare y Boyacá. Modificado de Google Earth.

Posterior a la discretización de la información filtrada, se realizó una caracterización de las muestras mediante distintos diagramas de clasificación de Stiff y Piper, que sirvieron para interpretar los diferentes tipos de aguas en la sabana y su relación con las condiciones geológicas, antrópicas y estacionales.

Unidades hidrogeológicas

Con la información anteriormente obtenida se realizó una síntesis para la definición las unidades hidrogeológicas con posibles propiedades acuíferas presentes en la cuenca, dándole prioridad a aquellas unidades que son fuente de aprovechamiento por parte de la población, donde se agruparon las unidades según su litología, propiedades hidráulicas e hidrogeoquímica.

Adicionalmente se buscó complementar la información geológica por medio de la recopilación de información obtenida mediante métodos indirectos como la geoelectrica por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV) para poder determinar la continuidad

y espesor de las unidades hidrogeológicas para lo que se reinterpretaron 23 SEV, los cuales se agruparon en tres zonas y se interpretaron en tres cortes; la primera zona esta ubicada hacia el piedemonte denominada como Zona Acueducto, la segunda zona es la transición entre el piedemonte y la llanura o zona transicional denominada Zona Totumo, y la tercera zona está ubicada en las llanuras denominada como Zona EIA como se muestra en la [Figura 6](#).

La síntesis de clasificación de las unidades hidrogeológicas se basó en los estudios y definiciones dadas por IDEAM (2014), que considera la continuidad, capacidad específica, productividad y litología de las unidades para asignar la importancia hidrogeológica que será de interés como fuentes acuíferas en la zona de estudio, caracterización que se asignó de acuerdo con la [Tabla 1](#), donde no se tienen en cuenta las unidades metamórficas y karstificadas debido a su naturaleza (B1-B2), los cuales no se encuentran dentro de la zona de estudio.

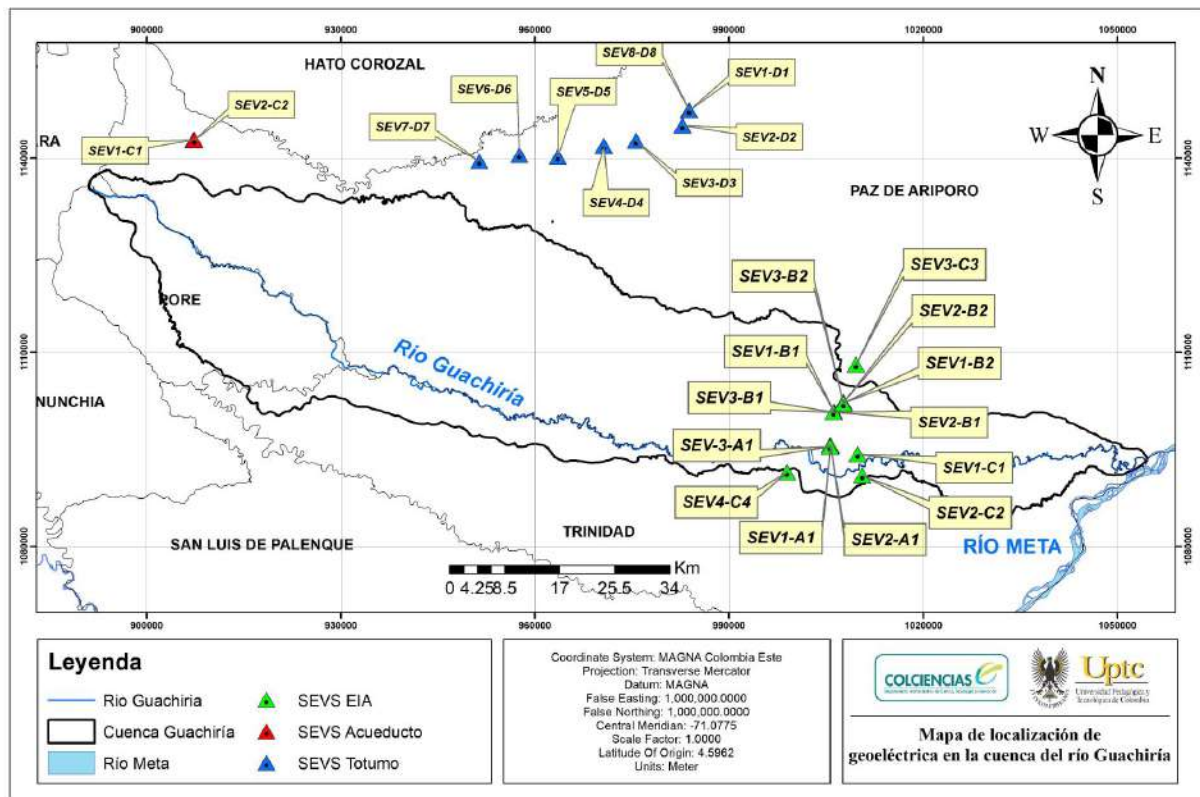


Figura 6. Mapa de localización de la geoelectrica (SEV).

Tabla 1. Clasificación de unidades hidrogeológicas. Tomado y modificado del IDEAM (2014).

Unidad	Prod.	CE (l/m/s)	Característica de los acuíferos
Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular			
A1	Alta	2,0 - 5,0	Acuíferos de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias poco consolidadas de ambiente fluvial. Acuíferos libres, confinados y confinados, de buena calidad química generalmente.
A2	Media	1,0 - 2,0	Acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial y marino, que desarrollan acuíferos de tipo confinado generalmente de buena calidad química.
A3	Baja	0,5 - 1,0	Acuíferos continuos y discontinuos de extensión local y regional conformados por sedimentos cuaternarios y rocas terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, eólico y marino, que desarrollan acuíferos libres y localmente confinados con agua de regular calidad.
Sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas			
C1	Muy baja	< 0,05	Complejo de rocas sedimentarias poco consolidadas a muy consolidadas que en ocasiones almacenan agua.
C2	Muy baja a ninguna	< 0,05	Complejo de rocas ígneo - metamórficas con muy baja a ninguna productividad.

Resultados

Caracterización hidroclimatológica

Los resultados obtenidos del análisis de información de las estaciones hidrometeorológicas por cada variable que interviene en el ciclo hidrológico fueron los siguientes:

- Precipitación: variable más importante del ciclo hidrológico, representa la cantidad total de agua durante el año (Musy, 2001). Como resultado de la información climatológica se obtuvo una distribución de la precipitación de tipo unimodal a lo largo del año, con valores promedio de precipitación por el orden de 2294 mm/año, se observaron además valores de precipitación promedio mensuales máximas en la estación Tablón de Tamara (35230030) por el orden de 406 mm/mes, durante la temporada invernal, así como mínimos de 8 mm/mes en la estación Pore (35230020), durante las temporadas secas.
- Temperatura: también tiene una distribución de tipo unimodal, es una variable importante ya que junto a la radiación solar son reguladores de la salida de agua de la cuenca, se registraron valores promedio de temperatura de 26,9°C, su variación en toda la cuenca no es mayor a 1°C.
- Humedad relativa: es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, se observó una disminución

del 30% de humedad entre el periodo lluvioso (humedad entre 50-60%) y el periodo seco (humedad entre 80-90%).

- Evapotranspiración: es la principal salida de agua de la cuenca y permite definir si existe déficit por la relación existente entre la ETP real (Evapotranspiración propia) y la ETP potencial (Evapotranspiración con condiciones de humedad de suelo y cobertura vegetal óptimas). Se obtuvo un valor promedio de ETP de 1182 mm/año, a partir de la cual se calculó la ETR dando como resultado un valor de 951 mm/año aproximadamente.
- Balance Hídrico a largo plazo: se obtuvo que la precipitación promedio anual distribuida en la cuenca es de aproximadamente 2294 mm/año, a partir de la cual hay una evapotranspiración real de 951 mm/año, así mismo a lo largo de la cuenca por escorrentía discurren 1143 mm/año durante lo que finalmente dejaría una lámina de agua de 200 mm/año de fracción de agua que finalmente llegaría a recargar los acuíferos. Observando el ciclo hidrológico en la cuenca se evidenció un déficit de lluvias entre los meses de diciembre y marzo (Figura 7), periodos en que la evapotranspiración excede las lluvias, como ejemplo se realizó un balance respecto a la estación Paz de Ariporo (36015010), donde se evidencian los meses de déficit de lluvias.



Figura 7. Distribución de la precipitación media a lo largo del año hidrológico en la estación climatológica Paz de Ariporo (36015010).

- Recarga: Como resultado de los procesamientos con capas ráster a partir de la información anteriormente obtenida de las variables hidrológicas, y la identificación de diferentes los tipos de coberturas superficiales de vegetación, suelos y geología que interactúan con el agua que precipita sobre la cuenca, se observan valores de recarga promedios por el orden de 287 mm y máximos de hasta 470 mm.

donde existen las mejores condiciones para la infiltración hacia los acuíferos profundos, también se identificó como en las formaciones aflorantes hacia el piedemonte existen zonas de recarga pero que van directamente a las formaciones más profundas como lo es la Formación Guayabo. Se pudo observar, como en las zonas de suelos finos que cubren gran parte de la sabana inundable durante una buena parte del año la recarga es mucho más lenta que en las zonas con litologías más arenosas por lo que son más susceptibles a la evaporación debido también a la escasa vegetación arbórea en esta zona, por lo que la fracción de lluvia que finalmente llega a infiltrarse es muy reducida en estas zonas.

Distribución espacial de zonas de recarga

Se obtuvo el mapa de la **Figura 8** que muestra las zonas de recarga concentradas en su mayoría hacia el suelo franco-arenoso en la región más oriental de la cuenca,

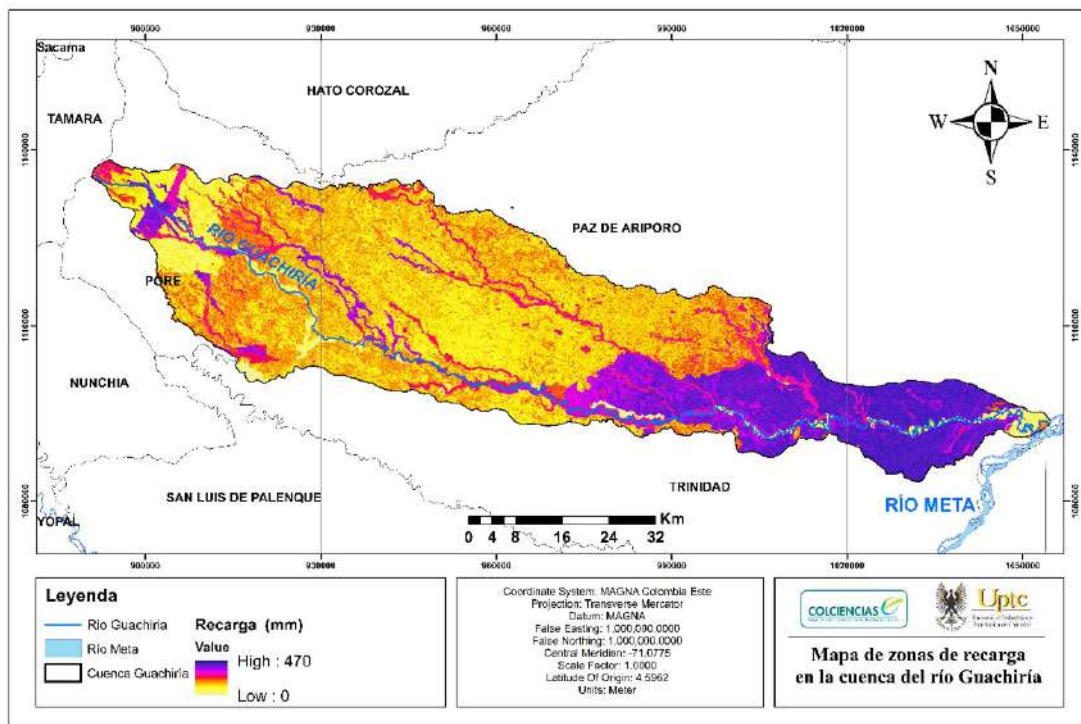


Figura 8. Zonas de recarga potencial en la cuenca del Río Guachiría, las regiones moradas y fucsias es donde existe recarga, y las zonas amarillas y naranjas es donde la recarga no existe o es muy poca.

Definición de unidades hidrogeológicas

Parámetros hidráulicos

De acuerdo con las pruebas de bombeo y el análisis geológico de las formaciones a profundidad por medio de geoelectrónica, se encontraron diferentes tipos de unidades con propiedades acuíferas que presentan heterogeneidad dentro del mismo depósito, se identificó que según los pozos analizados; 7 captan aguas provenientes de acuíferos confinados, 5 de acuíferos semiconfinados y 4 de acuíferos libres, donde su variación se ve afectada por presencia de limos, arcillas, y algunas acumulaciones de materia orgánica, litologías depositadas durante los procesos diagenéticos en eventos como inundaciones y crecidas de los ríos en temporadas invernales, también por el efecto del viento acarreado finos en suspensión y la dinámica fluctuante de estos ambientes de depositación.

En la **Tabla 2** se presentan los parámetros hidráulicos relacionados con los diferentes tipos de acuíferos encontrados en el área de estudio, los cuales se determinaron de acuerdo con las gráficas de abatimiento vs tiempo, y la información de los sondeos eléctricos verticales ubicados cerca de las pruebas de pozo.

Los valores de transmisividad obtenidos en los acuíferos libres fluctuaron entre 10,85 y 193,1 m²/día, y los rangos de capacidad específica entre 0,42 a 2,85 l/s/m, indicando acuíferos de baja a media productividad, mientras que para los acuíferos confinados las transmisividades fueron muy variables, desde 65,3 a 279 m²/día, indicando una productividad media a baja, consistente con la capacidad específica obtenida la cual fue de 0,56 a 2,85 l/s/m.

La conductividad hidráulica que se obtuvo de los depósitos aluviales fue de 4,05E-5 m/s o 3,4 m/días correspondientes a permeabilidades bajas, al igual que la Formación Guayabo donde los valores fueron de 1,03E-4 m/s o 8,9 m/día y para los depósitos eólicos presentan valores de conductividad hidráulica de 5,44E-7 m/s o 4,70E-2 m/día, indicando muy bajas permeabilidades.

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas de la cuenca del Río Guachiría, y retomando lo antes mencionado se encontró, que en su mayoría los pozos extraen aguas provenientes de los depósitos cuaternarios compuestos por gravas, arcillas, limos arenosos y concentraciones de óxidos de hierro.

En la información recopilada se identificaron los niveles piezométricos en los pozos y fuentes de agua analizados donde se encontró que el nivel fluctúa paralelo a la superficie del terreno, encontrándose sobre la superficie en temporadas invernales, siguiendo una dirección de gradiente hidráulico predominante hacia el Río Meta (sureste), paralelo con el flujo del cauce de los ríos y drenajes presentes en el área de estudio.

Hidrogeoquímica del piedemonte y la sabana inundable

Las propiedades fisicoquímicas encontradas en el muestreo realizado a los puntos de interés hídrico revelaron que en su mayoría las muestras presentan una calidad aceptable, no presentan turbidez considerable debido a que en su mayoría son muestras subterráneas o tomadas de lagunas y lagunillas a gran altitud, por otro lado, las muestras de las quebradas si presentan altos valores de sólidos totales disueltos y turbidez (2 UTN) debido a la energía de arrastre de sedimentos del río y a la temporada de muestreo.

El PH del agua estuvo dentro de los parámetros de las normas de calidad de agua variando entre temporadas de 5 a 7,5 en donde las aguas más ácidas se encontraban en zonas pobladas debido muy probablemente a afectaciones antrópicas, la dureza de las aguas en general dio como resultado aguas blandas, excepto por algunas muestras (PD_27, 30, 32, 34 y 34) en las veredas de interés donde se encontraron aguas algo duras, también se identificó que en su gran mayoría las muestras presentan altos contenidos de hierro (>0,3 mg/l).

Tabla 2. Parámetros hidráulicos obtenidos según el tipo de acuífero.

Tipo de Acuífero	Transmisividad (m²/día)	Capacidad Específica (l/s/m)	Conductividad K (m/día)	Coef. de Almacenamiento
Confinado	65,3 a 279	0,56 a 2,85	1,9 a 10,46	5,63E-6 a 1,28E-4
Semiconfinado	3,98 a 132,1	0,09 a 0,72	0,047 a 3,1	9,4E-4 a 0,0022
Libre	10,8 a 193,1	0,42 a 2,85	0,8 a 2,5	6,8E-3 a 0,6

De los 41 puntos de agua muestreados y los resultados de los laboratorios correspondientes se analizó, filtro y proceso la información para lo cual durante el proceso de filtrado de información y consistencia de los datos, se obtuvo que teniendo en cuenta el balance iónico ($\geq 15\%$) y el valor de la conductividad, se escogieron las muestras analizadas que eran aptas para realizar las respectivas clasificaciones; para lo cual cumplieron y se seleccionaron 23 muestras de la temporada de agosto-2017 y de la temporada de mayo-2018 se seleccionaron 27 muestras (Figura 9).

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización de las muestras discretizadas, que son aptas para su análisis mediante los distintos diagramas de clasificación:

- Diagrama de Stiff

Según los diagramas se pudo observar que gran mayoría de las muestras corresponden a aguas lluvia principalmente con contenidos de bicarbonatos, calcio y magnesio, que corresponden a aguas jóvenes con poca mineralización y cuyos diagramas presentan una forma de punta de flecha, por otro lado las muestras que presentaban mayor concentración iónica corresponden a muestras subterráneas que se encuentran cerca a los centros poblados (PD_20, 24, 25, 26, 27), posiblemente afectados por contaminación antrópica, donde se observan altos contenidos de magnesio y algunas con altos contenidos de cloro (Figura 10). Cabe aclarar que los pozos no superan los 100 metros de profundidad por lo que también se observaron pozos con aguas

poco mineralizadas captadas probablemente de los depósitos cuaternarios recientes que cubren gran parte de la sabana inundable.

- Diagrama de Piper

Según la representación de los diagramas de Piper, la gran mayoría de muestras se clasificaron como bicarbonatadas cálcicas-magnésicas, así mismo, se pudo observar que en el muestreo de mayo hay una muestra errática que corresponde a la muestra PD_11, ubicada en el casco urbano de Paz de Ariporo que se clasifica como Hyper clorurada cálcica, esto debido a las altas concentraciones de calcio y sulfatos presentes en su composición, probablemente por fuentes contaminantes antrópicas, lavado de jabones por escorrentía y pesticidas de cultivos cercanos a la fuente como pudo observarse en la visita de campo (Figura 11 y Figura 12).

Unidades hidrogeológicas en la cuenca del Río Guachiría

La definición de las unidades hidrogeológicas tiene en cuenta cada uno de los aspectos anteriormente analizados, y permite agrupar las unidades geológicas en unidades hidrogeológicas homogéneas con propiedades acuíferas similares. Adicionalmente, con la finalidad de complementar la información geológica existente, se interpretó información de geoelectrónica existente en la zona, que permitió definir tres zonas que podían interpretarse como perfiles debido a la cercanía de los SEV.

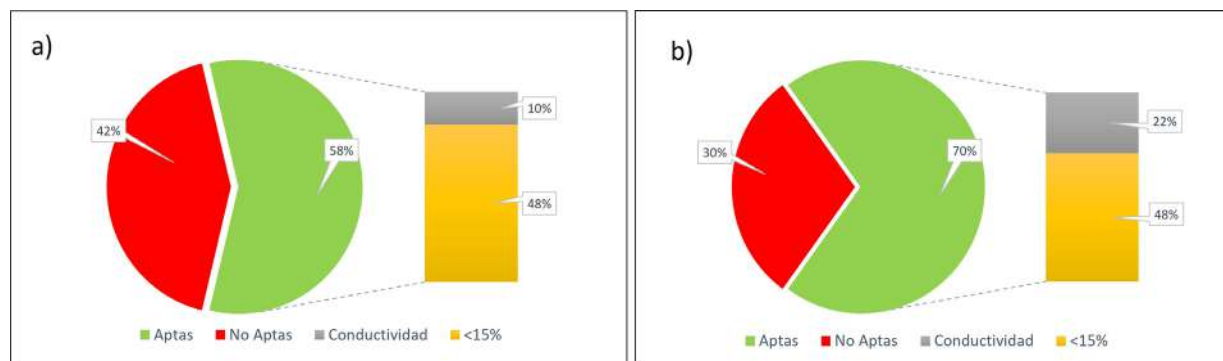


Figura 9. Porcentajes de muestras por temporada aptas para el procesamiento luego de la discretización de información por balance iónico y conductividad (a) agosto 2017, (b) mayo 2018.

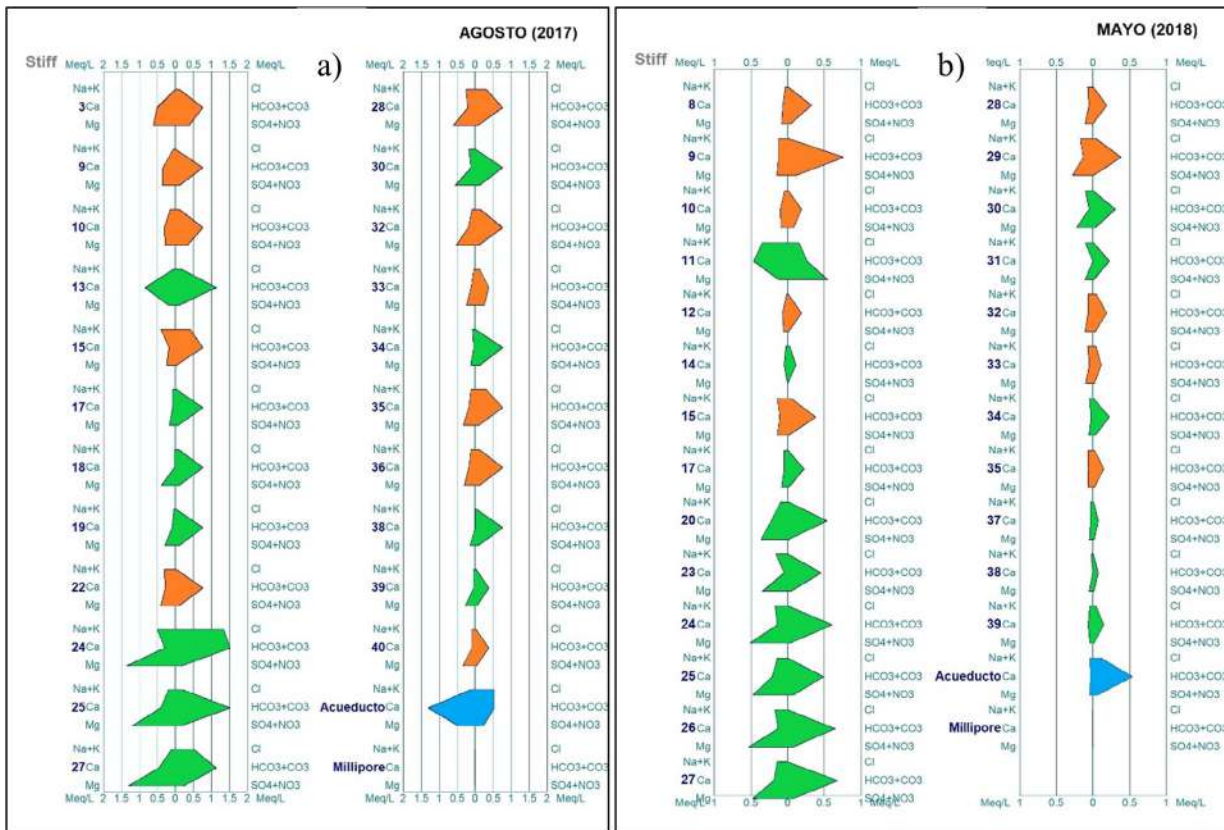


Figura 10. Diagramas de Stiff de las 23 y 27 muestras confiables para el muestreo de agosto-2017 (a) y el de mayo-2018 (b), en color naranja se muestran las muestras de aguas superficiales y en color verde las subterráneas.

Información que se representó en bloquediagramas correspondientes de cada zona (Figura 13), cuya profundidad de exploración no excedió los 200 metros por lo que las unidades geológicas que se identificaron correspondieron principalmente a los depósitos de planicie aluvial (Qhpda), depósitos de terrazas (Qta) y depósitos aluviales inundables (Qaa) cuyas principales características se encuentran a continuación:

- *Zona Acueducto o zona de piedemonte (170 metros aprox.):* evidencia de ambiente de río fluvial trenzado, litológicamente se encuentra un espesor de gravas estimado de 20 m, provenientes posiblemente de la cordillera oriental y a medida que se aleja se observa una disminución de grano (secuencia típica de un abanico aluvial).
- *Zona Totumo o llanura aluvial (95 metros aprox.):* se interpretó un ambiente típico de ríos trenzados y meándricos donde la cantidad de depósitos arenosos tiene gran influencia por la energía del

río al momento de depositarse, además de grandes llanuras de inundación compuestas por materiales finos, como lodos, arenas muy finas y limos. En la interpretación se observó el pinchamiento de una capa arenosa producto de la transición entre el canal y la llanura aluvial.

- *Zona EIA o cauces aluviales (68 metros aprox.):* teniendo en cuenta su localización se pudo determinar que el perfil cruza sobre el cauce de un caño paralelo al Río Guachiría, ya que se evidenció la presencia de un canal central, debido a los depósitos típicos de canal (cantos, arenas y gravas) rodeados de litologías más finas como arcillas o limos, esta región de barras de finos podría considerarse como parte de las llanuras de inundación antiguas probablemente de meandros abandonados cubiertos por material vegetal o llanuras de inundación en la sección más distal del abanico aluvial.

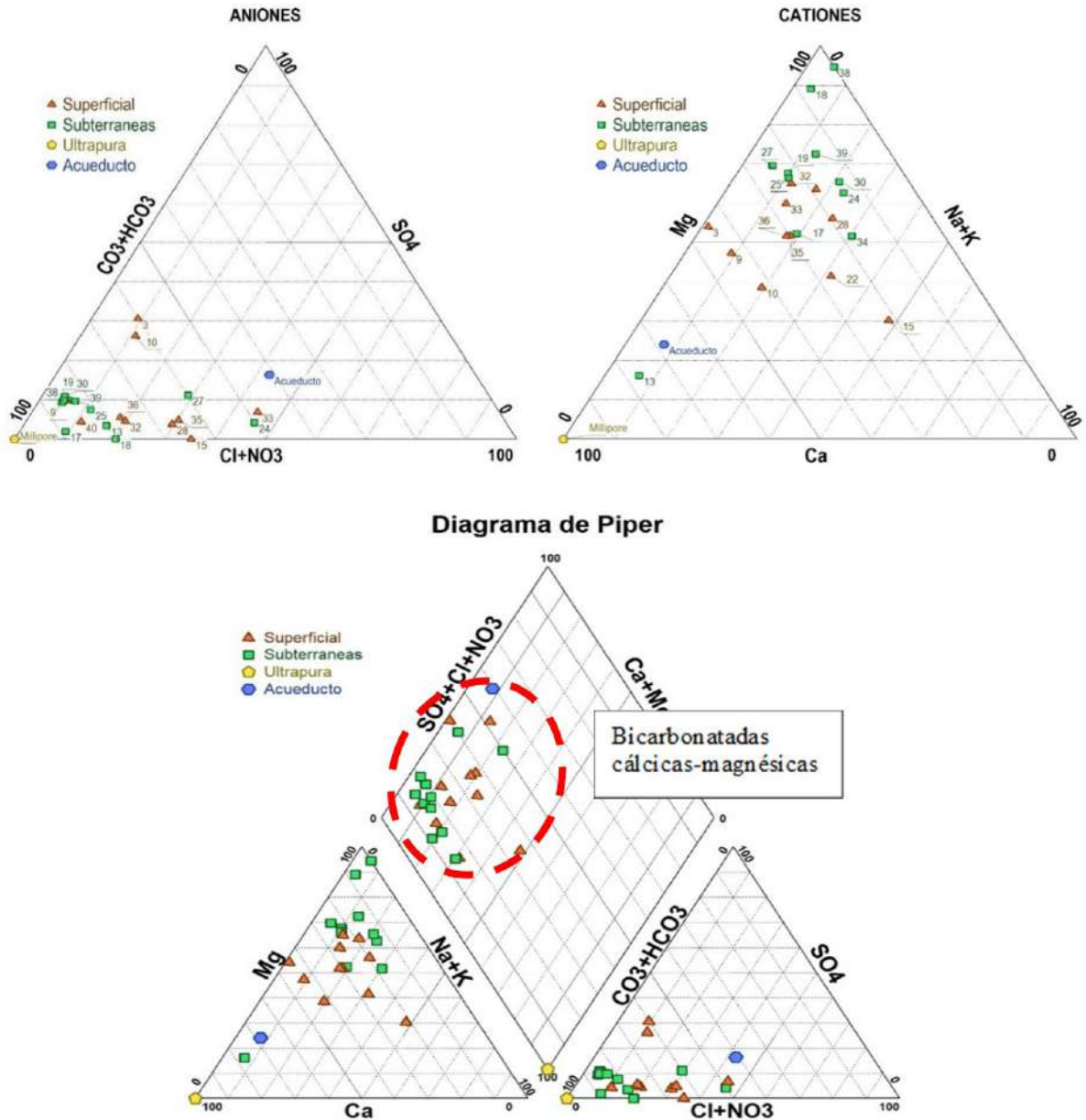


Figura 11. Representación en el diagrama de Piper de los muestreos en temporada de agosto que cumplen las condiciones del balance iónico y que corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas.

A partir de los diferentes rangos de los parámetros hidráulicos y con base en la descripción litológica de las unidades geológicas y de las que se pudo obtener información, al igual que la información indirecta de geoeléctrica recopilada, se definieron 3 unidades hidrogeológicas principales que agrupan las litologías presentes en la zona de estudio, donde se diferencian según sus características hidrogeológicas, y su

propiedad para almacenar y transmitir agua donde las unidades del grupo A corresponden a sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular, las del grupo B corresponden a rocas con flujo a través de fracturas o del grupo C que corresponden a sedimentos o rocas con limitados o ningún recurso de aguas subterráneas (Tabla 3), clasificación adaptada del ENA del año 2014.

Asimismo, se realizó una identificación de cada una de las unidades presentes en cuanto a sus características hidrogeológicas como sus parámetros hidráulicos, hidrogeoquímica y espesores aproximados; para agruparlas según los tipos de acuíferos que pueden encontrarse en la zona de estudio, como se muestra

en la [Tabla 3](#), cabe resaltar que las dimensiones de los acuíferos requieren de estudios posteriores, debido a la profundidad y extensión de exploración de la información utilizada para este estudio, por lo que su clasificación puede variar con un mayor conocimiento de la geometría de los depósitos.

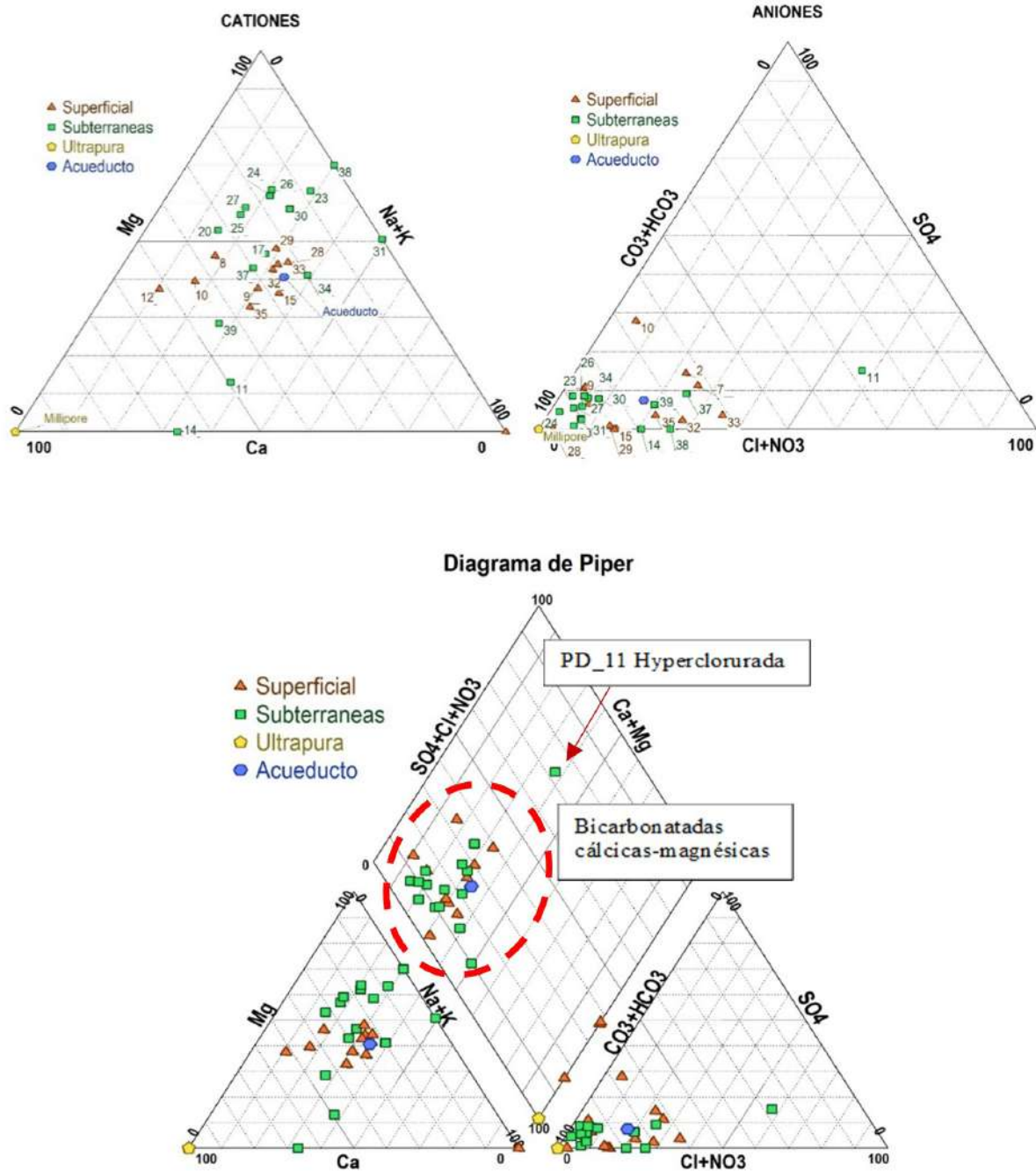


Figura 12. Representación en el diagrama de Piper de los muestreos en temporada de mayo que cumplen las condiciones del balance iónico y que corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas.

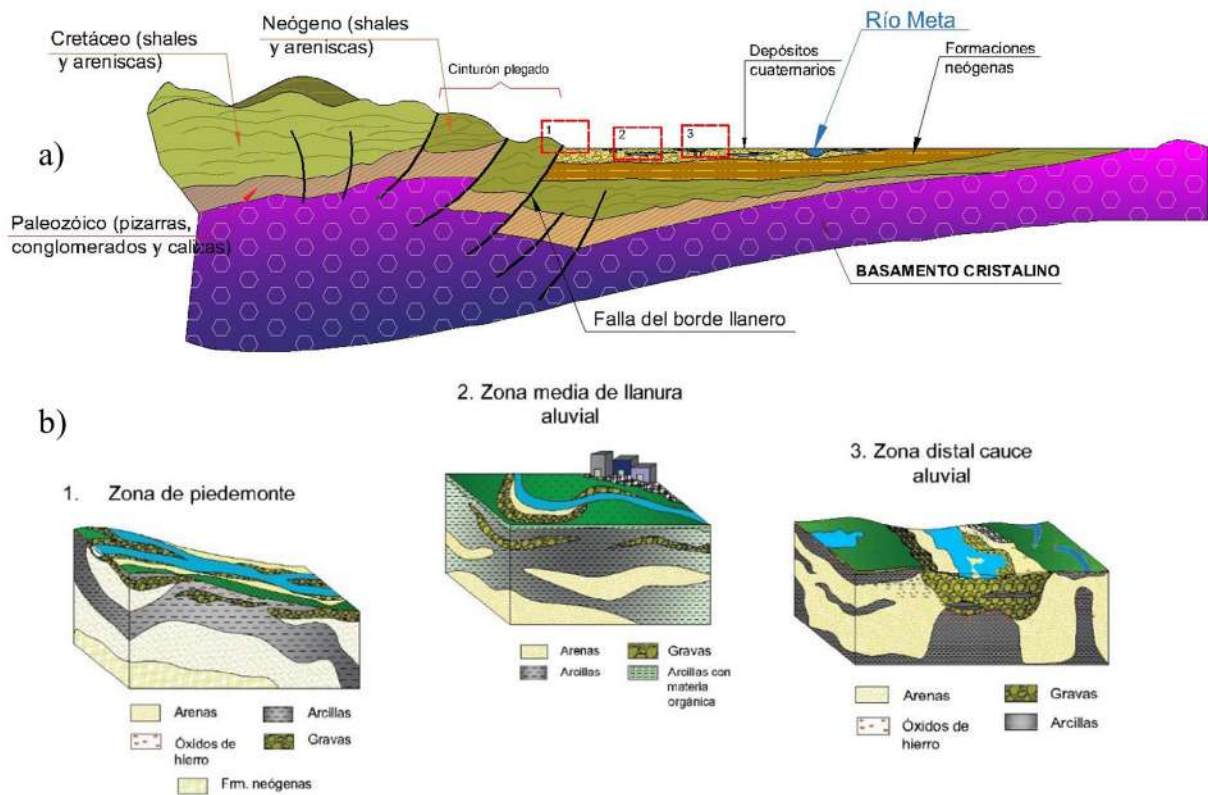


Figura 13. Esquematación de la disposición litológica en la zona de estudio; a) Corte regional de la cuenca de los llanos orientales, en referencia a la cuenca del Río Guachiría, b) Diferentes esquemas de las condiciones geológicas presentes en la cuenca: (1) piedemonte, (2) llanura aluvial y (3) cauces aluviales. Modificado de Galvis y Suárez (1984).

Tabla 3. Unidades estratigráficas, litología y clasificación hidrogeológica de la Cuenca del Río Guachiría.

Formaciones	Litología	Clasificación Hidrogeológica	Símbolo
Depósitos de planicie aluvial (Qhpa/Qaa)	Gravas con intercalaciones arcillosas	Acuíferos libres y semiconfinados	A3, A2
Depósitos de terraza y llanura aluvial (Qhdta/Qta)	Terrazas con arenas conglomeráticas y lodos arenosos	Acuíferos libres y semiconfinados	A3
Depósitos aluviales recientes (Q2al)	Conglomerados con matriz arena lodosa	Acuíferos libres y semiconfinados	A1
Depósitos eólicos (Qpde/Qae)	Arenas cuarzosas de grano fino, con buena selección.	Acuíferos libres	A3
Formación Caja (N1c) Guayabo	Areniscas y conglomerados cuarzosos intercalados con lodolitas	Acuíferos confinados	A3
Formación Diablo (N1d)	Intercalaciones de areniscas y lutitas		
Formación San Fernando (E2N1sf)	Lutitas y arcillolitas con intercalación de Areniscas	Acuitardo	C1

Realizando la agrupación de las unidades hidrogeológicas de acuerdo a sus propiedades homogéneas se pudo observar que en su mayoría gran parte de la cuenca está conformada por unidades hidrogeológicas A3 (Figura 14), que según su heterogeneidad litológica pueden comportarse como acuíferos libres a semiconfinados y en algunos casos específicos donde los depósitos finos de las llanuras inundables (Qhda, Qhpa) son lo bastante considerables pueden comportarse como depósitos confinados, donde también se encuentran agrupados los depósitos eólicos (Qae), por otro lado los acuíferos A1 corresponde a los relacionados a los cauces recientes (Q2al). Se pudieron identificar acuíferos C1 considerados como de poca importancia hacia la región del piedemonte debido a las intercalaciones y a la litología predominante de las rocas terciarias consolidadas.

Discusión de resultados

En la cuenca del Río Guachiría afloran depósitos cuaternarios de origen eólico y fluvial los cuales estratigráficamente reposan en forma discordante sobre rocas de edad Neógeno que corresponden a la Formación Guayabo, considerada en el área como un

acuífero de moderada productividad y de importancia para la cuenca del Orinoco, pero que para el caso de estudio no fue muy representativo debido a que gran parte de las captaciones y problemáticas relacionadas con el agua ocurren en los depósitos más superficiales.

En los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua se encontró que en su mayoría corresponden a aguas meteóricas con baja mineralización de tipo bicarbonatadas cálcicas-magnésicas, composición muy similar a las aguas del Río Guachiría y como se pudo observar ya que la recarga más intensa se da hacia la región oriental en cercanías al Río Meta, indicaría una relación directa de recarga entre las unidades acuíferas de los depósitos cuaternarios y el Río Guachiría lo que corrobora lo encontrado en estudios como COLCIENCIAS-UPTC (2016) que reporto una similitud isotópica correspondiente a aguas jóvenes entre la llanura aluvial y las muestras tomadas en la zona de piedemonte y los páramos, afirmación que se cumple en años hidrológicos relativamente lluviosos que concuerdan con las temporadas de muestreo agosto 2017 y mayo 2018 que se consideran influenciados por el fenómeno ENSO húmedo o Niña.

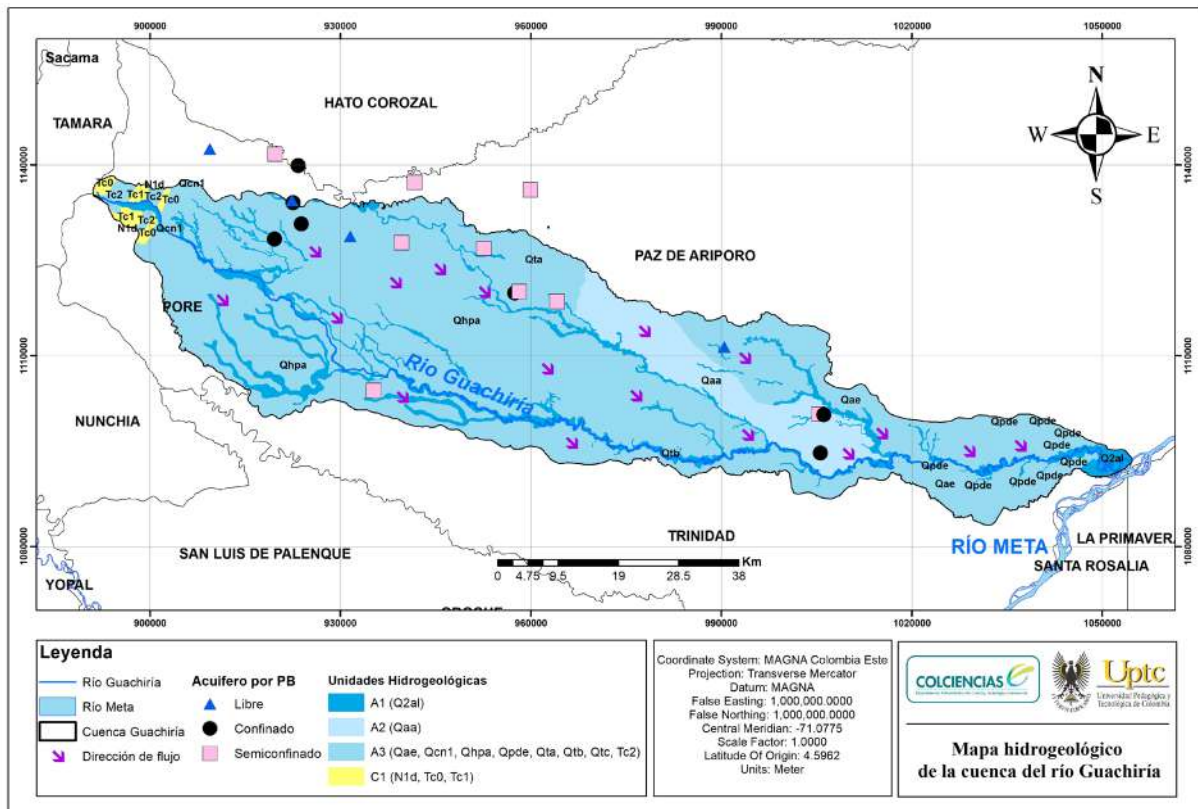


Figura 14. Mapa unidades hidrogeológicas cuenca del Río Guachiría.

Por otro lado, aquellas muestras que presentaban una mineralización mayor o iones de sulfatos y nitratos fuera de los límites se entiende que son aguas de los pozos dentro de los cascos urbanos que tenían una composición más ácida, se observó que la presencia elevada de estos iones proviene muy posiblemente de contaminación con detergentes, aguas servidas o pesticidas de las viviendas aledañas a las captaciones y cultivos, por lo que estas aguas no corresponden a flujos regionales o recarga de acuíferos infrayacentes, además que en cuanto a su calidad no serían aptas para consumo humano por lo que es recomendable tener un mayor control en el tratamiento de los residuos cerca a estos puntos de agua y vertimientos cercanos para impedir la contaminación de estas fuentes aprovechables.

Adicionalmente y como un punto importante se encontraron altas concentraciones de metales de hierro, níquel y manganeso asociados a la degradación de los suelos y rocas, así como la variación constante del nivel freático durante el año hidrológico, que concentran estos metales sobre la superficie debido al entorno reductor que se genera en estos ambientes de inundación, los cuales posteriormente son lavados por la precipitación y transportados por la escorrentía hacia los cuerpos hídricos, elevando las concentraciones de estos metales a lo largo de toda la cuenca, principalmente en las fuentes superficiales, a esto se adicionan actividades antropogénicas que tienen un grado de contaminación mayor en los ecosistemas de la sabana, donde las altas concentraciones puede traer repercusiones tanto para los seres humanos y animales como en el deterioro de las tuberías y bombas de las captaciones, por lo que es recomendable realizar mantenimientos periódicos y controles de concentraciones de metales pesados, que pueden aumentar en la transición entre temporada seca y lluvias donde la degradación de los suelos es mayor.

La evidencia de un déficit de agua en la cuenca durante algunos meses del año (diciembre a marzo) no se ve reflejado en descensos totales del nivel del cauce principal pese a las pérdidas por la textura superficial y por evapotranspiración, por lo que su permanencia puede deberse a varios factores como por ejemplo; un flujo base consistente que podría explicarse con posibles recargas laterales o trasvases de cuencas aledañas producto del régimen de flujo predominante en dirección sureste desde el piedemonte hacia el Río Meta, además de las grandes extensiones de las unidades acuíferas cuaternarias presentes a lo largo

del piedemonte llanero, depósitos que se encuentran interdigitados y se extienden más allá de la cuenca del Río Guachiría, lo que podría corroborarse con estudios posteriores más centrados en la geometría y dimensión de las unidades acuíferas superficiales de extensión regional en los llanos orientales.

Respecto a la relación entre la reinterpretación geofísica e hidráulica de la zona de estudio se determinó que la dinámica del río influyó en la depositación de materiales finos a lo largo del tiempo, modelando los acuíferos, afectando las propiedades hidráulicas al depositar cuerpos arenosos limitados con barras de depósitos finos impermeables de meandros abandonados o zonas de inundación que ocasionalmente podrían cambiar las propiedades de acuíferos libres en acuíferos confinados o semiconfinados, disminuyendo la conductividad y el almacenamiento de agua, escenarios que pueden observarse en la [Figura 15](#) donde se esquematizan tres condiciones litológicas que se presentan en la cuenca del Río Guachiría.

Teniendo en cuenta la heterogeneidad de los depósitos y con base en estudios hidrogeológicos realizados en otras zonas de piedemonte en el país, como estudios realizados en la región del Urabá antioqueño ([CORPOURABA & Universidad de Antioquia, 2016](#)), podría considerarse que de igual forma los acuíferos presentes en la cuenca del Río Guachiría corresponden a acuíferos multicapa cuya característica es la extensión regional y la alternancia de capas permeables, semipermeables e impermeables, propiedades que se pudieron encontrar tanto en la información litológica subterránea identificada en los SEV como en los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas que a pesar de encontrarse en un mismo depósito presentaban características variadas debido a la heterogeneidad litológica dada por su génesis y evolución en el tiempo, que condicionaron las propiedades acuíferas de las unidades hidrogeológicas en la cuenca.

Partiendo de la consideración de la cuenca del Río Guachiría como una zona de acuíferos multicapa, se elaboraron tres bloquediagramas ([Figura 15](#)), que esquematizan una posible distribución de las unidades acuíferas y zonas impermeables a partir de la información encontrada y recopilada en el desarrollo del presente estudio.

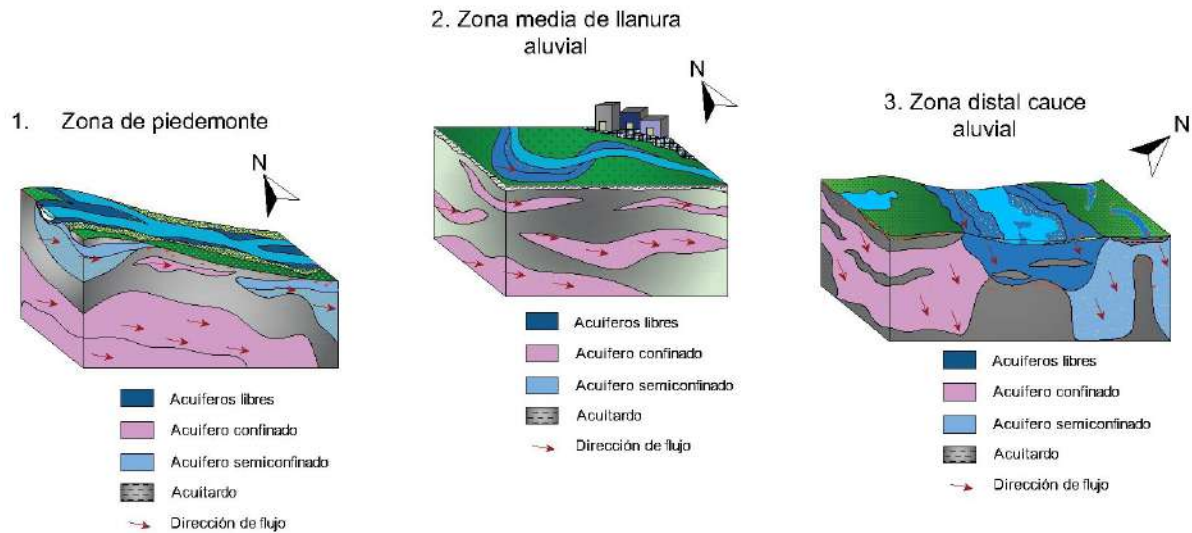


Figura 15. Bloquediagramas hidrogeológicos de la disposición de unidades con propiedades acuíferas presentes en la cuenca en las zonas de (1) piedemonte, (2) llanura aluvial y (3) cauces aluviales.

Debido a la extensión de la cuenca y la heterogeneidad que presenta se identificaron tres zonas que pueden resumir distintos ambientes de deposición de las unidades acuíferas, donde se identifican zonas de acumulación, direcciones de flujo y barreras impermeables que limitan el flujo subterráneo.

1. Zona de piedemonte: donde los ríos trenzados trascurren con alta energía debido a la pendiente, variando su curso, mientras disminuye la pendiente la energía del cauce igual, creando a su paso cauces sinuosos (meandros) y diferentes geoformas como barras laterales, terrazas y llanuras aluviales, depositando arenas y partículas finas a muy finas, cambiando las propiedades hidráulicas y las condiciones de los de los acuíferos. En esta zona pueden encontrarse unidades hidrogeológicas consideradas como acuíferos libres a semiconfinados, al igual que las zonas de recarga de las unidades regionales más profundas como la Formación Caja o Guayabo y la Formación Diablo.
2. Zona media de llanura aluvial: en esta zona la pendiente es muy poca por lo que el cauce se torna sinuoso de tipo meándrico, existen cauces abandonados colmatados por materia orgánica, al igual que zonas inundables en temporadas invernales, el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie. Pueden encontrarse unidades hidrogeológicas que pueden considerarse acuíferos confinados y semiconfinados correspondientes a barras de considerable espesor o cauces antiguos de buena conductividad sellados

verticalmente por litologías arcillosas típicas de llanuras de inundación, y lateralmente limitados por cuerpos arcillosos acumulados en cauces de meandros abandonados, donde también pueden encontrarse turbas con costras de óxidos de hierro.

3. Zona distal, cauce aluvial: en la zona distal en cercanías con el Río Meta se evidencian depósitos eólicos y terrazas aluviales que corresponden a unidades hidrogeológicas de importancia alta a moderada que tienen propiedades acuíferas favorables por sus propiedades litológicas granulares y que se pueden considerar como acuíferos libres, así como semiconfinados, cuya división depende del porcentaje de arcillas o finos que presenten las unidades. Al igual que en las anteriores zonas se pueden encontrar depósitos arcillosos y con materia orgánica que sirven de sellos laterales, además de capas confinantes conformadas por depósitos de inundación antiguos que corresponderían a las unidades hidrogeológicas de baja importancia que limitan el flujo local del agua.

Conclusiones

Se pudo determinar que la cuenca se encuentra en un ciclo evolutivo en fase de vejez donde los procesos denudativos están en su fase final, caracterizado por la morfología suavemente inclinada predominante en gran parte de la cuenca, la cual está afectada por los diferentes eventos erosivos como la acción de los vientos, que generan depósitos eólicos al este

de la cuenca, así mismo la dinámica fluvial del Río Guachiría ha transportado sedimentos provenientes del piedemonte acumulando depósitos de barras así como depósitos de cauces a su paso, y en las zonas planas de las llanuras aluviales donde agua disminuye su velocidad y aumenta su sinuosidad se han depositado cuerpos arcillosos con materia orgánica propios de meandros abandonados y planicies de inundación.

Según la heterogeneidad de los depósitos y la capacidad específica (CE) encontrada entre 0,09 a 3,125 (l/s/m), los acuíferos presentes en la zona varían en su extensión y continuidad, tratándose de acuíferos de locales (depósitos cuaternarios) a regionales (Formación Caja o Guayabo), con variada productividad de muy baja a media que, a pesar de las diferentes características hidráulicas y su extensión, pueden dar abasto a la demanda de la población, pero que en temporada de sequía deben considerar la regulación y reducción de caudales de extracción, así como debería considerarse el aprovechamiento de pozos a mayores profundidades en acuíferos que no son tan susceptibles a las variaciones climáticas estacionarias.

Teniendo en cuenta la información disponible y según los diferentes autores, para el cálculo de la evapotranspiración real se concluyó que existe una recarga potencial promedio en la cuenca aproximada de 200 mm/año, la cual debido a las propiedades texturales y composicionales de la cuenca se distribuyen en las zonas del piedemonte donde afloran las rocas Neógenas y en los depósitos aluviales arenosos, que en su mayoría se encuentran hacia la región oriental en cercanías a la desembocadura del Río Guachiría en el Río Meta al igual que en los depósitos eólicos allí presentes desprovistos de coberturas boscosas.

La metodología para definir las zonas potenciales de recarga fue de gran utilidad porque ayudó a determinar no solo la distribución espacial de la recarga sino también la relación entre cada uno de los aspectos que se encuentran en el territorio como lo son; la pendiente, vegetación y textura del suelo, que tienen gran influencia en la precipitación que llegará finalmente a recargar los acuíferos, por tal motivo al determinarse esta distribución, existe una herramienta de utilidad para la delimitación zonas de recuperación y preservación de coberturas o suelos que permitan avanzar en la gestión integral del recurso hídrico en el departamento del Casanare.

Se determinó que en general las aguas de las que se abastece la población en las zonas muestreadas son aguas jóvenes de características bicarbonatadas cálcicas y magnésicas cuya calidad es precaria, debido a que en su mayoría exceden los valores de concentraciones de hierro y unas fuentes específicas cercanas a los centros poblados presentan altas concentraciones de cloro, sulfatos y nitratos asociadas a intervención antrópica que deben ser de especial cuidado para su tratamiento, además de elevadas concentraciones de sólidos totales disueltos que deben tenerse en cuenta en estos procesos de filtración y potabilización.

Se encontró una relación directa entre el cauce principal y las unidades acuíferas cuaternarias (A3) que puede invertirse dependiendo de la temporada estacional; donde durante el verano el Río Guachiría estaría recargando las unidades acuíferas circundantes siguiendo la dirección predominante a favor del gradiente altitudinal en sentido noroeste-sudeste desde el piedemonte llanero al Río Meta. Esta afirmación queda abierta a discusión, hasta la publicación de estudios de isotopía que se vienen adelantando en esta región y que podrán confirmar o refutar dicha aseveración.

Debido a la heterogeneidad en las propiedades de las unidades hidrogeológicas, las unidades acuíferas de la sabana inundable de los llanos orientales deberían ser considerados como acuíferos multicapa, hipótesis que es necesaria complementar con estudios posteriores a partir de información directa de núcleos de perforación o una red más amplia de información geoelectrónica que brinde mayor peso a lo encontrado en el presente estudio, además de un análisis posterior de isótopos que confirmen los hallazgos encontrados en cuanto a las direcciones de flujo y procedencia de las aguas subterráneas.

Los resultados encontrados en este estudio corresponden a una base para el desarrollo de un Modelo Hidrogeológico Conceptual posterior, que se complementa a partir de una mayor red de muestreo tanto geoquímico, isotópico e hidráulico así como de información geofísica indirecta mediante sondeos eléctricos verticales o tomografías que permitan conocer en mayor medida tanto la geometría de las unidades hidrogeológicas aquí planteadas como sus propiedades hidráulicas y así obtener mayor conocimiento del territorio frente a los planes de desarrollo que se esperan en esta región.

Agradecimientos

Agradecimientos a Minciencias - UPTC, a través del proyecto de investigación: “Modelo Hidrogeológico Conceptual e Isotópico de la Sabana Estacional de Paz de Ariporo, Casanare, Colombia” (Contrato 005 de 2016), por incentivar y apoyar la elaboración de este proyectos de investigación, a Corporinoquia por la información suministrada como línea base para el desarrollo del proyecto, al Magister Germán Herrera por sus lineamientos y orientación en los procesamientos necesarios, y finalmente a los pobladores del municipio Paz de Ariporo por su hospitalidad, gracias a los cuales se logró el acceso a los predios para la toma de muestras y pruebas de bombeo necesarias para la adquisición de información base para el desarrollo del proyecto.

Referencias

- Benavides-Guerrero, C.E.; Caro-Caro, L.E.; Mariño-Martínez, J.E. (2021). Determinación del comportamiento hidráulico de los acuíferos del norte de la Orinoquia, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 109-127. <https://doi.org/10.18359/rcin.4680>
- Budyko, M.J. (1974). *Climate and life*. Academic Press.
- COLCIENCIAS-UPTC (2016). Proyecto de investigación: modelo hidrogeológico conceptual e isotópico de la sabana estacional de Paz de Ariporo, Casanare, Colombia. Contrato 005 de 2016. Proyecto.
- CORPOURABA & Universidad de Antioquia. (2016). Plan de manejo ambiental de acuífero sistema hidrogeológico golfo de Urabá. Medellín.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1976). *Hidrología subterránea*. Tomo I. Omega Barcelona.
- EIA (2005). Estudio de Impacto Ambiental Bloque Guachiría-Caño Chiquito. Solana Petroleum. Proyecto. Centro de Información de Corporinoquia.
- Galvis, N.; Suárez, M. (1984). *Geología de la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia*. Informe de Progreso N°1. Bogotá: INGEOMINAS.
- Guzmán, M. (2015). Donde se entrelazan dos mundos. Más de una razón. *Revista Semana*, 34-35.
- Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- IDEAM (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá.
- IDEAM (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá.
- IGAC (2014). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras, Departamento de Casanare. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Musy, A. (2001). Cours “Hydrologie générale”. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d’Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1, 2 y 3.
- PBOT (2011). Revisión y ajuste al Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Paz de Ariporo Casanare. Alcaldía municipal de Paz de Ariporo, Acuerdo 500.02-006 de 2011.
- Poveda-Jaramillo, G.; Mesa-Sánchez, O.J.; Vélez-Upegui, J.I. (2020). *Hidrología de Colombia. El ciclo del agua en una geografía compleja*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sarmiento, G.; Monasterio, M.; Silva, J. (1971). Reconocimiento ecológico de los Llanos Occidentales. *Acta Científica Venezolana*, 22, 52-61.
- Schosinsky, G.; Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55.
- SGC. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal, departamento de Casanare. Grupo de Exploración de Aguas Subterráneas.
- SGC. (2012). Memoria Geológica de la Plancha 196 Río Guachiría, escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano.

Fecha de recibido: 08 de noviembre de 2020

Fecha de aprobado: 19 de mayo de 2022
