
6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS

La Orinoquía se ha presentado como el futuro de Colombia por ser una despensa agrícola, y como la última frontera de Colombia que, con ayuda de empresas nacionales y extranjeras, se podría realizar agricultura a gran escala, y hacer del país una verdadera potencia alimentaria tal como lo son Brasil y Argentina.

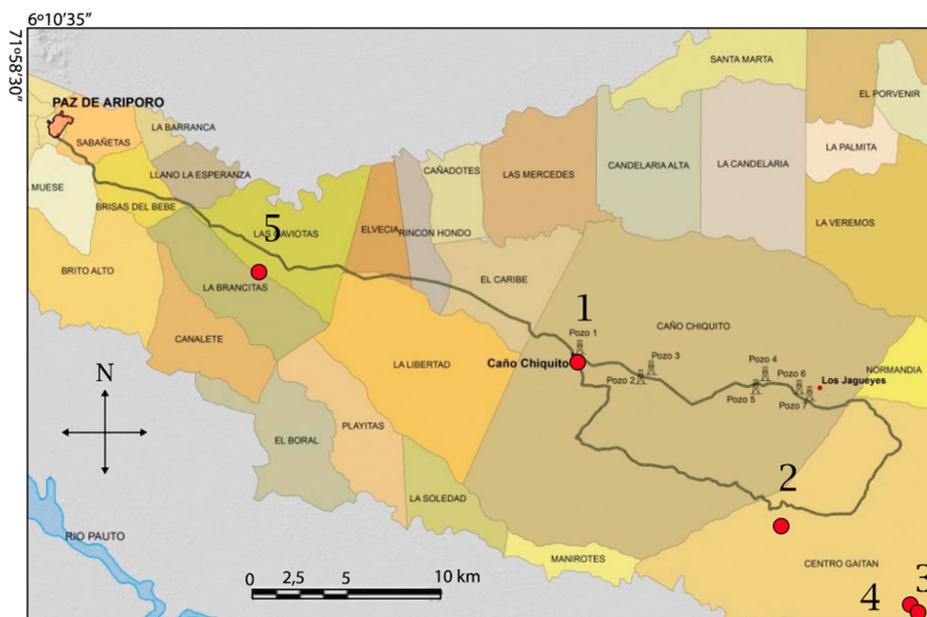
Los proyectos de producción agroindustrial de cereales, palma, caucho y caña de azúcar requieren grandes cantidades de agua. Esta región privilegiada cuenta con abundante agua durante la temporada lluviosa, tanta que los ríos principales, como el Meta, tiene dificultades para evacuarla; sin embargo, durante el verano las llanuras sufren estrés hídrico y se tornan resacas. Algunos indicios sugieren que las aguas subterráneas son la opción para proveer de esa agua extra.

Con el apoyo de la UPTC y Colciencias (2018) se desarrolló una investigación en Paz de Ariporo sobre el modelo hidrogeológico de las sabanas estacionales. Este Capítulo presenta algunos resultados de dicho estudio sobre las características de las rocas acuíferas en Paz de Ariporo, estos hallazgos tienen aplicación en la llanura inundable del norte de la Orinoquía (Figura 29) (UPTC y Colciencias, 2018).

La presentación de lo obtenido se inicia con la medición de niveles de agua a través del año, tomografías para radiografiar el subsuelo, seguido de caracterizaciones hidráulicas de los acuíferos a partir de pruebas de bombeo, y ensayos de permeabilidad de los suelos, para terminar con una reflexión sobre la calidad y vulnerabilidad de los acuíferos presentes.

Figura 29

Ubicación de las sabanas estacionales donde se hicieron los estudios de niveles freáticos y permeabilidad en Paz de Ariporo



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

6.1 Medición de los niveles de los pozos de agua

Las llanuras de la Orinoquía forman parte de una región plana, constituida por planicies o sabanas con alturas entre 100 m y 400 m de altura, formadas por la acumulación de sedimentos acarreados por los ríos que drenan de la cordillera oriental del noroeste al sureste. Los grandes ríos y sus tributarios constituyen un paisaje de llanura preferencialmente plano, en el que se interdigitan las llanuras de inundación con las llanuras eólicas formando una zona plana y continua.

Los cursos de agua fluyen en la llanura proximal como torrentes trenzados, y luego en la llanura distal se convierten en cursos meándricos con gradientes muy bajos y una alta saturación de sedimentos.

Durante los períodos de desborde en épocas de lluvia, las láminas de agua cubren la llanura depositando el sedimento según la cercanía al río. Las gravas y arenas o sedimentos más gruesos se depositan cerca al río, mientras que, los finos (arcillas y limos) son llevados por suspensión a la parte de la llanura más alejada conocidas como cuenca o basin.

Los zurales son geformas con poca elevación separados por zanjas. Hacia el oriente, la llanura de origen eólico es conformada por limo y arena fina arrastrados por el viento que forman banquetas y desarrollan suelos arcillosos con drenaje bajo. En la zona intermedia de la llanura, la precipitación media anual fluctúa 2.002 y 2.500 mm con una temperatura media cálida persistente con pequeñas variaciones entre 26 y 28 °C, con exceso hídrico entre abril a noviembre y deficitario entre diciembre y marzo cuando los humedales disminuyen y finalmente se secan (Figura 30).

Figura 30

Disminución y desecación de los humedales durante la época seca en la Orinoquía



La disminución de los humedales y su desecación parecieran están directamente relacionados con el descenso de los niveles freáticos de los acuíferos superficiales; para probar dicha hipótesis, se midieron los niveles de los pozos durante los últimos meses de 2014 y los primeros de 2015.

En noviembre se hizo la primera medición de niveles freáticos y se calcularon siete pozos seleccionados numerados del 1 al 7, siendo el número 1, el correspondiente al pozo profundo que surte de agua al caserío de Caño Chiquito y el número 7, el más distante ubicado en Las Jagüeyes. Durante dicha medición, se encontraron niveles freáticos que variaron entre 1,23 m (Pozo 1) y 1,96 m (Pozo 6) a partir de la superficie del terreno (UPTC y Colciencias, 2018).

El nivel más superficial corresponde al pozo profundo del acueducto de Caño Chiquito, el cual, aunque su extracción es permanente, tiene su propia recarga cercana del Caño Chiquito. La mayor profundidad corresponde al pozo ubicado en Las Jagüeyes, que igualmente, presenta bombeo constante (Figuras 29 y 31).

Transcurridos dos meses de evaluación de niveles freáticos, finalizando el mes de diciembre, se observa que, aunque hay descensos en los niveles freáticos, estos no son tan marcados en los pozos que tienen en sus proximidades caños y quebradas que aún tienen agua corriente, como es el caso del pozo de Caño Chiquito (Pozo 1), el cual solo experimento un descenso de 0,41 m. Es de anotar que, en este pozo, se pueden presentar descensos superiores durante el bombeo continuo (4,96 m en diciembre 16 de 2014), pero una vez pasa el efecto de abatimiento, recupera los niveles generalizados de la región.

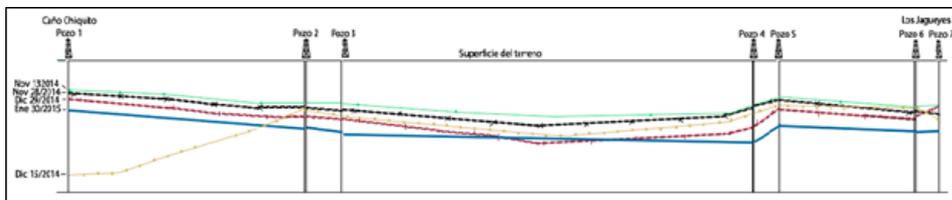
La evaluación de niveles freáticos evidencia una reducción significativa en el volumen de los cuerpos de agua superficiales de la sabana estacional, principalmente, por evaporación durante el tiempo transcurrido de la estación seca. A finales de enero, los ríos y caños que tienen su nacimiento tanto en el piedemonte, como la

llanura, presentan reducción significativa de sus caudales que tienen una alta dependencia de la recarga vertical de las lluvias.

En la sabana estacional se tiene un gran potencial hidrogeológico en los depósitos aluviales, que puede ser utilizado para reducir el déficit hídrico. Esto se puede conseguir recargando los acuíferos y aumentando el número de pozos profundos, técnicamente bien ubicados y construidos, que garanticen su sostenibilidad año tras año en el periodo de estiaje.

Figura 31

Medición, ubicación y perfil esquematizado de registro de niveles freáticos



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

6.2 Radiografía del subsuelo – tomografías

Con el fin de conocer las características geológicas y de aguas subterráneas de las rocas del subsuelo se realiza la evaluación geofísica para determinar sus propiedades y correlacionarlas geológicamente para identificar la presencia de acuíferos.

La técnica más empleada para el estudio de la hidrogeología es la geoelectrica, específicamente, la relacionada con el levantamiento de tomografías geoelectricas, que es una medida más precisa y en tres dimensiones que busca correlacionar la resistividad de las rocas al paso de la corriente, con las características hidrogeológicas de las rocas.

Geología. El área en la que se llevaron a cabo las tomografías geoelectricas se caracteriza por no tener afloramientos de rocas, y solo presenta depósitos cuaternarios producto de la acumulación de una

llanura aluvial. La formación infrayacente a los depósitos cuaternarios es la formación Guayabo. La cual consiste en intercalaciones de litologías arenosas conglomeráticas con arcillolitas grises y limolitas con presencia de lentes ferruginosos.

Los depósitos de llanura aluvial se caracterizan, en las planchas geológicas de Bélgica (195) y del río Guachiría (196), por estar compuestos por lodos arenosos de color gris a marrón en las zonas altas de la sabana conocidas como bancos, que son las que tienen menor grado de inundación.

Las zonas bajas de sabana sufren más inundaciones y algunas permanecen anegadas durante todo el año, y están compuestas por turba negra fangosa, con menos arena y con óxidos de hierro formando costras (Alcaldía de Paz de Ariporo, 2014).

En la plancha geológica que cubre la parte urbana de Paz de Ariporo (174) los sedimentos de llanura aluvial se caracterizan por una granulometría variada entre gravas y arcillas, estas últimas constituyen el sedimento de desborde. Los bloques de roca son arenosos embebidos en materiales más finos areno-arcillosos; también se encuentran depósitos limosos en capas más delgadas. En general, los sedimentos no tienen buena selección y no están bien consolidados (SGC, 2012; 2015).

Metodología y equipos. Las tomografías fueron levantadas por medio de un tomógrafo ABEM Terrameter LS 04-064-250, usado para medir auto potencial (Self Potential SP), resistividad y polarización. Dicha herramienta es importante, en tanto que permite obtener imágenes tomográficas en tres dimensiones y, por lo tanto, lograr la proyección de las rocas a profundidad a partir de las diferencias en el potencial eléctrico (Figura 32).

Gracias a las tomografías geoelectricas se observa una representación de las propiedades eléctricas bajo la superficie del terreno. Para

esto se clavan electrodos al subsuelo de igual distancia paralelos a la zona de estudio. Una serie de cables conecta cada electrodo al sistema principal encargado de medir y almacenar la información.

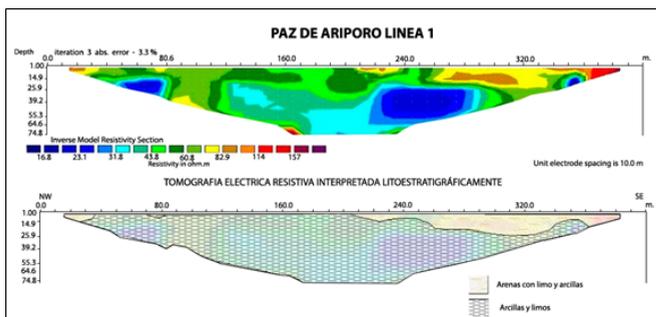
En este estudio, los electrodos se clavaron con una distancia de separación de 10 m mediante un arreglo tipo Schlumberger, y la información obtenida, fue procesada por medio del software RES2DIVN que permite la inversión correcta de los datos.

Resultados. Con las tomografías geoelectricas se logró identificar características importantes del subsuelo mediante la interpretación de los perfiles de resistividad. Dichos perfiles se levantaron en las veredas de Centro Gaitán y Caño Chiquito que son representativas de la llanura de inundación lugar en el que se presentó la sequía más severa.

Las rocas del subsuelo, en el perfil de la vereda Caño Chiquito, de acuerdo con las características geológicas y de suelos en dicha área, se interpretan como depósitos de planicie aluvial con composiciones de arenas con limo y arcillas cerca de la superficie. Los valores de resistividad de esta capa son mayores a los 70 ohm-m, y esta infrayacida por una capa de arcillas y limos con valores menores de resistividad (Figura 32 y 33).

Figura 32

Tomografía y perfil litoestratigráfico de la vereda Caño Chiquito



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

Figura 33

Presencia de areniscas silíceas con niveles de limo en Caño Chiquito

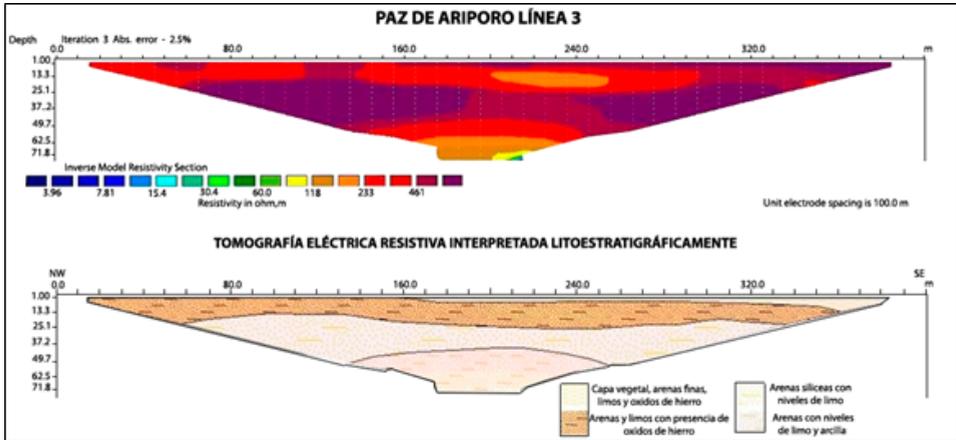


Las tomografías en la vereda Centro Gaitán, en sus perfiles de resistividad se interpretan como depósitos de planicie aluvial con composiciones de arenas finas, limos y óxidos de hierro con valores altos de resistividad mayores a los 750 ohm-m, representados por la parte más superficial.

En esta unidad suprayace una capa de arenas y limos con presencia de óxidos de hierro, presentando resistividades mayores a 170 ohm-m. La siguiente capa representa arenas silíceas con niveles de limo y resistividades de 500 ohm-m aproximadamente, y, por último, se encuentra una capa compuesta por arenas con niveles de limo y arcillas con valores de menor resistividad en todo el perfil (< 170 ohm-m) (Figura 34).

Figura 34

Tomografía y perfil litoestratigráficos de la vereda Centro Gaitán



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

Los perfiles litoestratigráficos representan las unidades encontradas en el subsuelo. Dichas unidades se asocian con capas compuestas por arenas, areniscas silíceas con intercalaciones de limos, arcillas y presencias de óxidos de hierro con resistencias que van de los 70 ohm-m a los 500 ohm-m y pueden ser clasificados como acuíferos semiconfinados a confinados, mientras las secuencias arcillosas con intercalaciones de limo pueden considerarse como acuitardos.

Una de las mayores resistencias obtenidas en el levantamiento fue aquella que superó los 750 ohm-m, que puede estar representada por arenas, limos y óxidos de hierro secos. Esto confirma el carácter arenoso de los depósitos de la sabana distal tal como se determinó directamente con la medición de la permeabilidad de los acuíferos superficiales (numeral 6.5).

6.3 Características hidráulicas de los acuíferos – pruebas de bombeo

Si la investigación hidrogeológica se quiere hacer desde el punto de vista cuantitativo, se deben conocer las características de acuífero inherentes a él, su capacidad almacenadora, y su habilidad para permitir el flujo a través de los intersticios. Para esto se necesita establecer y definir una serie de parámetros que sirven para evaluarlo, optimizarlo y hacer predicciones. Esos parámetros se conocen como características o constantes hidráulicas.

La determinación de las características hidráulicas de los acuíferos se realizó mediante pruebas de bombeo en los pozos profundos de la zona. Estas consisten en impulsar agua en un pozo a caudal constante y registrar las caídas (abatimiento) del nivel del agua con el tiempo (Figura 35). Estas pruebas sirven para estudiar las condiciones de la roca almacenadora, hacer predicciones, calcular las variaciones en el nivel piezométrico en tiempo y espacio, identificar los límites de los acuíferos, así como determinar los volúmenes óptimos de producción de los pozos en litros por segundo o m³/día.

En síntesis, las pruebas de pozo o de bombeo permiten evaluar las reservas de los acuíferos y de esta manera obtener información necesaria, que alimente los modelos hidrogeológicos formulados para la cuenca considerada. La prueba de acuíferos permite determinar las constantes o características hidráulicas de los pozos como: conductividad hidráulica (velocidad), transmisividad (permeabilidad), capacidad específica (rendimiento) y coeficiente de almacenamiento. A continuación se explican cada una de dichas características:

La **conductividad hidráulica** está relacionada con la permeabilidad y es la aptitud que una roca brinda al ser atravesada por el agua. De forma técnica, es la constante de proporcionalidad lineal entre el volumen de agua y el gradiente hidráulico (la pendiente o inclinación del acuífero). Se expresa en metros/segundo o metros/día.

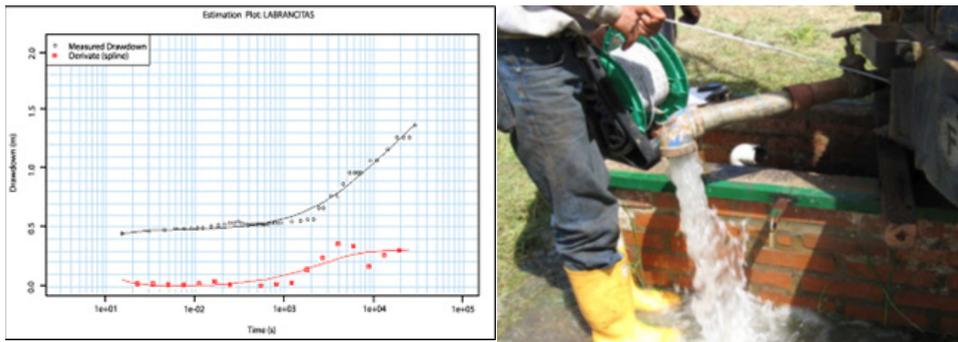
La **transmisividad** es la conductividad hidráulica por el espesor y señala la viabilidad del agua para circular por un acuífero. Se expresa en metros²/día.

La **capacidad específica** se comprende como la concordancia entre la cantidad de agua bombeada y el total del cambio de nivel del agua, y se expresa en caudal por longitud (litros/segundo/metro).

El **coeficiente de almacenamiento** se relaciona con la cantidad de agua que se puede sacar de una roca, a través de un pozo, para que se produzca un descenso unitario en el nivel piezómetro. Se expresa en porcentaje y sirve para diferenciar acuíferos libres de acuíferos confinados.

Figura 35

Prueba de bombeo en un pozo utilizando una sonda eléctrica. Se grafica el Cambio de nivel o abatimiento (s) vs. Tiempo (t) a caudal constante



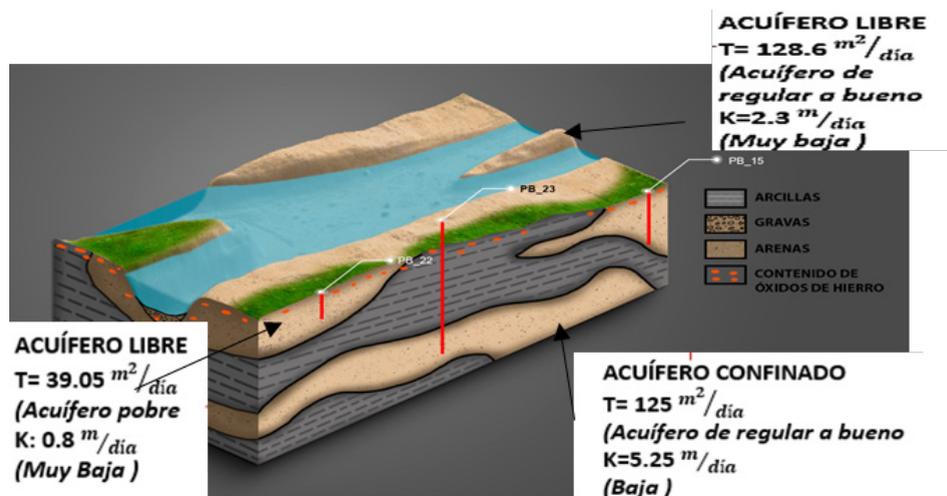
Resultados. En concordancia con los resultados alcanzados de la información secundaria, a partir de la reinterpretación de algunas pruebas y de las pruebas de bombeo adicionales, se puede concluir que, el acuífero del miembro superior de la Formación Guayabo tiene en promedio una transmisividad de 67,22 metros²/día y una conductividad hidráulica de 2,71 metros/día, indicativos de una permeabilidad media, y al comparar estos valores con la capacidad específica que en la mayoría de las pruebas dio baja (0,5-2 litros/segundo/metro), se clasifica este acuífero como de baja-media productividad, de tipo semiconfinado.

Los depósitos en planicies aluviales presentes en Paz de Ariporo pueden ser acuíferos desde libres a confinados dependiendo las litologías presentes en la zona. Los **depósitos cuaternarios** poseen una transmisividad promedio de 61,89 metros²/día, y una conductividad hidráulica también promedio de 2,14 metros/día, indicativo de una permeabilidad media: De acuerdo al valor de capacidad específica de 1.12 litros/segundo/metro, se clasifica estos acuíferos semiconfinados de baja productividad.

Para resumir la información relacionada con los pozos de bombeo y las características hidráulicas de los acuíferos, se esquematizó un bloque diagrama con el fin de realizar una interpretación completa acerca de las condiciones hidrogeológicas e hidráulicas en el área de estudio. El bloque diagrama presenta las características hidráulicas de los acuíferos libres y confinados (Figura 36).

Figura 36

Esquema hidrogeológico representativo



Nota. Benavides, Caro y Mariño (2021)

Los valores de transmisividad en los acuíferos libres fluctuaron entre 30 y 120 m²/día indicando acuíferos con algo de permeabilidad, los valores para los acuíferos confinados fueron muy variables desde 4 a 849 m²/día denotando que algunos son permeables y otros son algo permeables (Chaparro et. al., 2019).

Los valores de conductividad hidráulica en los acuíferos libres fluctúan entre 0,8 y 2,3 m/día manifestando una baja velocidad de desplazamiento. En los acuíferos confinados los valores son más amplios y van de 0,04 a 9,7 m/día lo cual expresa una velocidad baja a media.

Según su capacidad específica (CE, indicador de productividad), 15 pozos con valores de CE que varían de 0,425 a 1,3 (l/s/m), se sitúan en acuíferos con buena extensión lateral y poca productividad, tres en acuíferos con variada continuidad lateral regional y productividad media con valores de CE de 1. 27 a 2,0 (l/s/m), y dos en acuíferos continuos y discontinuos de extensión regional, con productividad alta con valores de CE que oscilan entre 2,8 y 3,1 (l/s/m), estos últimos varían en función de su espesor y continuidad, ya que las formaciones y depósitos son de gran extensión, cubriendo grandes áreas fuera de la cuenca. De acuerdo con los resultados de la capacidad específica, la productividad de los acuíferos se cataloga como media.

6.4 Determinación de la calidad del agua subterránea

Determinar la calidad del agua en la Orinoquía es primordial, ya que la población rural, se abastece de aguas subterráneas por medio de embalses, pozos someros (aljibes) y pozos profundos. Las comunidades más inmediatas al piedemonte toman el agua de consumo y se surte del agua de las corrientes y arroyos que descienden de la Cordillera Oriental. Las comunidades de la sabana utilizan más el agua subterránea de aljibes y pozos.

Inicialmente, el muestreo de agua para calidad se enfocó en el norte de Casanare, sin embargo, posteriormente se amplió a tres grandes sectores desde los fríos páramos de la Cordillera hasta el gran río

Meta: la cercanía a los ríos Casanare-Guachiría, del río Cravo Sur y del río Cusiana.

También, se intentó muestrear tanto en tiempos de lluvias como en tiempos secos para notar las diferencias, dado que estos son extremos (Figura 25). Es así que, en la región preocupa no solamente la cantidad de agua, especialmente durante la época de estiaje, sino también de la calidad, que depende no solo de la procedencia, pues también incluye el recorrido en el que se recoge impurezas esto significa que su potabilidad puede ser alterada.

El análisis consistió en determinar las concentraciones de aniones, cationes y las propiedades físicas como la conductividad eléctrica, sólidos totales, pH y turbiedad. Además, fue posible realizar el muestreo en dos temporadas: una realizada en el mes de agosto de 2017 que corresponde a la temporada de lluvias y la otra en mayo de 2018.

De acuerdo con el análisis obtenido de las muestras y luego de haber realizado la validación de los resultados se interpretaron mediante diferentes diagramas hidrogeoquímicos, que muestran en resumen las características químicas presentes en el agua subterránea, como lo son, diagrama de Stiff, Piper y Schöeller-Berkaloff (Figura 37).

En cuanto a los diagramas de Schöeller-Berkaloff, para el muestreo de agosto de 2017, se agruparon las muestras según el tipo de punto de muestreo (superficial o subterráneo), y se encontró que las muestras subterráneas del mes de agosto pertenecen a una misma familia de aguas, ya que tienen un comportamiento muy similar al graficarlas en estos diagramas (Figura 37).

Se evidencia que las concentraciones de Na^+K son menores en las muestras de tipo subterráneas (Pozo Doña Alix y Aljibe Finca “La Venturosa”, Centro Gaitán) y las demás muestras guardan similitud en cuanto a sus concentraciones de Ca, Na, SO_4 , HCO_3 y NO_3 .

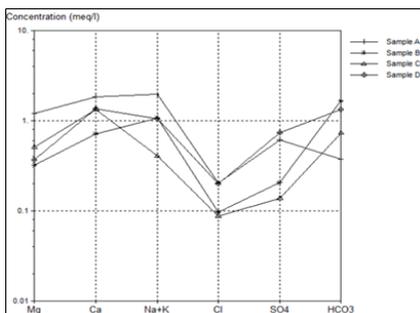
Por último, para este muestreo, los análisis de las muestras superficiales difieren de las muestras obtenidas en el acueducto que presenta un comportamiento más linealizado; y para las muestras que corresponden a las muestras tomadas en los cauces, presentan una concentración específica para cada uno que se diferencia entre sódica, clorurada y sulfatada (Calvo, 2020).

En general, las aguas superficiales y subterráneas de las llanuras casanareñas muestran bajo contenido mineralógico, mínimas conductividades eléctricas, predominio de iones bicarbonato, calcio y magnesio, así como bajos contenidos de cloruro y sulfato, que están relacionados con agua lluvia. En este sentido, las cantidades de bicarbonato son más elevadas en los acuíferos que en las aguas de superficie, relacionados con fenómenos redox que se producen en la capa de suelos como resultado de la recarga a los acuíferos del subsuelo.

Los contenidos de hierro son relativamente altos, superando el límite para el agua potable. En algunas áreas los contenidos de fósforo son elevados debido al cultivo del arroz. En ciertas muestras, los contenidos de hierro, níquel, manganeso y nitratos pueden ser altos (Calvo, 2020; Benavides y Caro, 2019, Veloza y Morales, 2009; Benavides, Caro y Mariño, 2021).

Figura 37

Diagrama de Schöeller-Berkaloff para temporada de lluvias, agosto (2017)



Nota. López (2020)

6.5 Permeabilidad de los suelos y recarga de los acuíferos

Como existe mucha controversia sobre la permeabilidad de las superficies de las llanuras inundables en la Orinoquía, esta investigación se enfocó en determinar in - situ las características de dichos suelos, especialmente las que tienen que ver con permeabilidad y granulometría y lo anterior, con el fin de aclarar las diferentes hipótesis sobre la textura de los suelos, se han planteado los siguientes postulados:

1) En ambientes fluviales como es el caso de las llanuras inundadas de Paz de Ariporo, se asume que la anegación periódica de los ríos tapizaría las planicies con sedimentos de textura fina depositados por las inundaciones rítmicas de los ríos que llevan sedimentos lodosos en suspensión, ese material fino aislaría la superficie del suelo evitando la recarga o infiltración vertical (Veloza y Morales, 2009).

2) En contraste, las investigaciones de la oficina geográfica nacional concluyeron que las superficies de las sabanas inundables son de textura gruesa arenosa porque se han desarrollado cerca de las zonas de desborde de los ríos. Por consiguiente, cuando se detienen las lluvias, los suelos no pueden retener el agua por su textura granular. Como resultado, el suelo permanece seco porque el agua se infiltra (IGAC, 2016).

3) La textura arenosa de los suelos se debe al origen eólico de los mismos por la acumulación de arena y desertificación que se dio al final de las glaciaciones. Para determinar la validez de las hipótesis anteriormente presentadas, se resolvió llevar a cabo análisis de permeabilidad y granulometría de los suelos en las zonas donde se presentó mortandad de fauna durante la sequía de 2013-2014 (Chaparro et al., 2019) (Figura 29).

Ensayos de permeabilidad. Para la investigación sobre la absorción de los suelos in-situ se utilizó el ensayo de carga constante decreciente que consiste en hacer una perforación manual en el suelo, colocar un tubo de PVC y medir la velocidad del descenso del nivel del agua en 5 zonas de Paz de Ariporo (Figura 29). Para el ensayo se utilizaron los siguientes materiales: Flexómetro, cronómetro, agua, pala, barra, y tubo de PVC de 6 pulgadas.

Al perforar un agujero en la tierra de más o menos 20 cm de diámetro y 1 metro de hondura, se consigue el diámetro adecuado para penetrar un ducto de PVC de 7,5 cm radio y 1 metro de longitud, que se hunde en la base del agujero. Esto permite que el agua se infiltre por la base del tubo solamente. A continuación, el tubo se llena de agua.

La velocidad con que sube el nivel del agua por el interior del tubo se mide en periodos de 1, 2 y 5 minutos al inicio de la prueba, y posteriormente, se espacia cada 5 minutos, hasta que las diferencias entre las dos interpretaciones previas sean mínimas y se tengan suficientes lecturas para determinar la permeabilidad. En consecuencia se espera que la velocidad de infiltración varíe con la permeabilidad del suelo a investigar.

Para calcular la permeabilidad se usó la ecuación de Angelone que se basa en la metodología del permeámetro en el que la carga es persistente (Angelone et al., 2006). Los resultados se contrastaron con los de granulometría para así llegar a las conclusiones obtenidas a partir de la medición de diferentes variables.

Resultados. Los resultados del coeficiente de permeabilidad indican que la filtración de la parte superficial de los llanos está entre POBRE a BUENA (Tabla 1). En concordancia con las conclusiones del IGAC que reporta que los suelos de Casanare son franco arenosos y lodosos, con grosores cambiantes según la ubicación con respecto de la cercanía al cauce de los ríos, donde los sedimentos más gruesos están cerca al cauce principal y los sedimentos más finos, al ser llevados por suspensión, están más alejados (IGAC, 1993).

Es posible, que, en este estudio, los sitios de muestreo correspondan con zonas de causes de los ríos, y, por lo tanto, los sedimentos investigados tengan una textura arenosa prevalente. Para confirmar la naturaleza arenosa de los suelos, se realizaron pruebas de curva granulométrica en el material extraído para las pruebas de permeabilidad. Dicha prueba consiste en hacer pasar la muestra por tamices de diferente diámetro, además determinar

el porcentaje de cada diámetro y generar una curva granulométrica (Terzaghi y Peck, 1973).

Para la muestra número 1, toda la granulometría es menor que el tamiz # 4, esto significa que gran parte del material tiene un diámetro de 0,85 a 0,425 mm, que corresponde a arena media; De acuerdo con dicho calibre el coeficiente de permeabilidad fructuaria entre pobre y bueno.

Las cinco pruebas de granulometría mostraron que el tamaño de los granos fluctuaba entre 0,425 y 2 milímetros en el rango de arena media a gruesa (Tabla 1). Al correlacionar la granulometría con la permeabilidad, se comprobó que el coeficiente de permeabilidad se clasificaría entre pobre y bueno, prevaleciendo la buena permeabilidad.

Tabla 1

Drenaje o permeabilidad (K) y su correlación con la textura de suelos equivalentes

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje				Bueno					Pobre		Prácticamente impermeable	
Tipo de suelo	Grava limpia		Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición				
			Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o la descomposición. ^d									
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.			Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.								
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.						
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.						Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia					

Nota. Casagrande & Fadum (1940)

6.6 Análisis

De acuerdo con el análisis de las transmisividades por el orden de 3.98 m²/día hasta 845 m²/día, los acuíferos se clasifican desde poco permeables a permeables, respectivamente; dicha variación está influenciada por la composición litológica diversa, aunado a la mezcla de litologías gruesas de los canales aluviales, así como, a los cuerpos arcillosos que quedan al transcurrir los cauces abandonados que contienen los acuíferos estudiados en las pruebas de bombeo.

Ahora bien, en cuanto a “La correlación entre la reinterpretación geofísica e hidráulica del área de investigación se determinó que la actividad de los ríos influenció en la depositación de materiales a lo largo del tiempo, modelando los acuíferos, afectando las propiedades hidráulicas al depositar cuerpos arenosos limitados con barras de depósitos finos de meandros abandonados o zonas de inundación que ocasionalmente podrían convertir acuíferos libres en acuíferos confinados o semiconfinados, disminuyendo las propiedades de conductividad y almacenamiento de agua” (Calvo,2020,pág. 28).

Es decir, se infiere que según la capacidad específica (CE) encontrada entre 0.09 a 3.125 (l/s/m), los acuíferos presentes en la zona cambian en su ensanchamiento y prolongación, desde acuíferos cuaternarios locales a regionales como la formación Guayabo, con variada productividad de muy baja a alta.

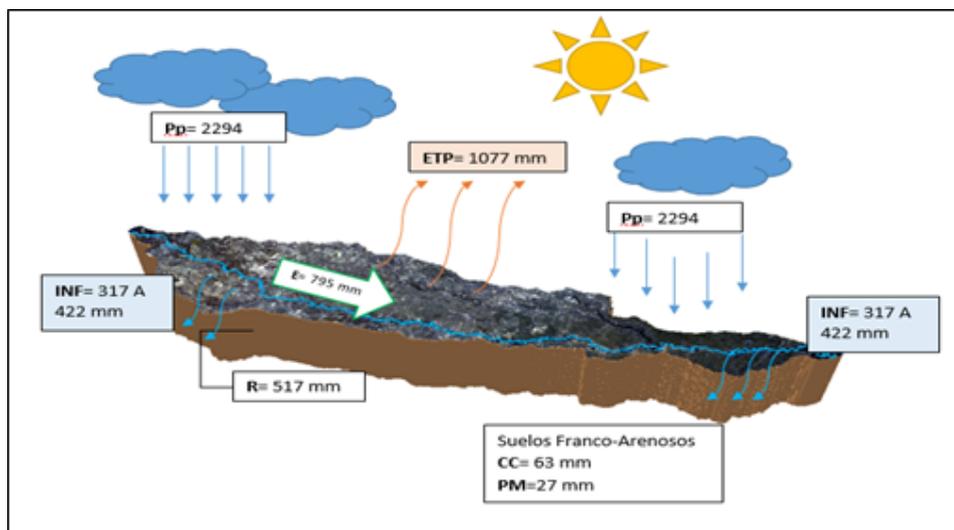
A pesar de las diferentes características hidráulicas y extensión de los acuíferos, estos no pueden dar abasto a toda la población. Para lo cual, en temporada de sequía se deben considerar pozos de mayores profundidades en acuíferos de la Formación Guayabo (Caja) que no están demasiado afectados superficialmente por la evapotranspiración y la descarga lateral, como los acuíferos libres de los depósitos cuaternarios.

Se determinó que la recarga potencial es mayor hacia el oriente de la cuenca y tiene un valor promedio entre 200 y 400 mm/anuales, debido a la relación de la litología superficial de los suelos de origen eólico y la escasa vegetación que permite la infiltración hacia los acuíferos subterráneos, esto es corroborado por los altos coeficientes de infiltración obtenidos de acuerdo con la cobertura superficial (suelo-vegetación-pendiente) (Figura 38).

Se concluye que, para mejorar el seguimiento e inspección de las aguas subterráneas y superficiales se requieren más estaciones de monitoreo.

Figura 38

Mapa de la recarga potencial (R) para el norte de la Orinoquía colombiana



Nota. Pp=precipitación, ETP=evapotranspiración, E=escorrentía, R=recarga, INF=infiltración. En los suelos CC (capacidad de campo) y PM (punto de marchitamiento), Benavides y Caro (2019)

Parte de la explicación para la presencia de las sequías en Casanare podría estar en la naturaleza arenosa de los suelos que permiten que el agua se infiltre fácilmente.

La escasez de agua, especialmente en época seca, es posible mitigarla con estudios hidrogeológicos que ayuden a ubicar los acuíferos, y, por lo tanto, la ubicación acertada de los pozos. También se requieren estudios adicionales sobre la recarga y conexión hidráulica de los acuíferos.

Como los suelos en esta parte de las sabanas inundables son preferencialmente arenosos, el agua se infiltra con facilidad, lo cual permite recargar los acuíferos semiconfinados y libres que se pueden utilizar accediendo a ellos con pozos de agua. Estudios hidrogeológicos adicionales ayudarían a una mejor ubicación de las rocas contenedoras de agua. A partir de los resultados, se reafirma la hipótesis número 2 que indica que los suelos son principalmente arenosos debido a la cercanía y frecuencia de los ríos.

De la misma manera, se confirma la existencia de depósitos de ambiente eólicos conocidos como dunas, o médanos en la Orinoquía, tal como se ve en las estructuras diagonales que representan las dunas en la Figura 39, las cuales indican que los médanos tal vez son más frecuentes de lo que siempre se pensó. La presencia simultánea de depósitos fluviales y eólicos confirmaría la dominancia de los suelos arenosos en el área.

Figura 39

Presencia de depósitos eólicos cuaternarios (Qpde) o médanos en Casanare



Nota. SGC (2012)

