



Autoridad Nacional
de Licencias Ambientales



Estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM

Análisis regional - Segundo año de
monitoreo

MARZO 2024

Rodrigo Elías Negrete Montes
Director General

Luis Enrique Orduz Valencia
**Subdirector Instrumentos
Permisos y Trámites
Ambientales**

Camilo Andrés Bernal Forero
Coordinador
**Grupo de Regionalización
y Centro de Monitoreo**

Jairo Alberto Ruiz
Líder
Análisis Regional

Angela Patricia Poveda Corredor
Sandra Milena Guayacán
Sonia Marcela Pacheco Higuera
Profesionales
Componente Hidrogeológico



Contenido

| | |
|--|----|
| 1. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA EN EL ÁREA DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL..... | 4 |
| 1.1 Formación Saldaña..... | 4 |
| 1.2 Formación Caballos | 5 |
| 1.3 Formación Hondita | 5 |
| 1.4 Grupo Olini (Formación Monserrate en el léxico petrolero) | 6 |
| 1.5 Formación Seca (Formación Guaduala en el léxico petrolero) | 7 |
| 1.6 Grupo Honda..... | 7 |
| 1.7 Grupo Huila | 8 |
| 1.8 Depósitos Cuaternarios | 8 |
| 2. ANTECEDENTES DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL | 13 |
| 3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL..... | 13 |
| 3.1 Condiciones de Lugar | 14 |
| 3.2 Condiciones de Modo | 21 |
| 3.3 Condiciones de Tiempo | 22 |
| 4. INFORMACIÓN ENTREGADA POR LOS PROYECTOS EN CUMPLIMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL..... | 23 |
| 5. ESTADO DE LA CALIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO. 26 | |
| 5.1 Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) | 27 |
| 5.2 Oxígeno Disuelto | 28 |
| 5.3 Nivel Estático | 29 |
| 5.3.1 Depósitos Aluviales (Qal)..... | 29 |
| 5.3.2 Terrazas Pumíticas (Qt3)..... | 30 |
| 5.3.3 Formación Neiva (Ngn) | 30 |
| 5.3.4 Grupo Honda (Ngh) | 31 |
| 5.3.5 Formación Gigante (NgQgi)..... | 32 |
| 5.3.6 Formación Seca (PgKs) | 32 |
| 5.4 pH..... | 35 |
| 5.5 Dureza total..... | 43 |
| 5.6 Nitratos y nitritos | 45 |
| 5.7 Diagramas de Piper..... | 46 |
| 5.7.1 Temporada de transición | 44 |





| | |
|---|----|
| 5.7.2 Temporada seca | 44 |
| 5.7.3 Temporada húmeda | 45 |
| 5.8 Diagramas de Stiff | 47 |
| 5.8.1 Depósitos Aluviales - Qal..... | 47 |
| 5.8.2 Terrazas Pumíticas - Qt3..... | 47 |
| 5.8.3 Formación Gigante – NgQgi | 48 |
| 5.8.4 Formación Neiva – Ngn | 49 |
| 5.8.5 Grupo Honda – Ngh | 49 |
| 5.8.6 Formación Seca – KPgs..... | 50 |
| 5.8.7 Formación Saldaña – Js | 51 |
| 5.9 Diagramas de Gibbs | 54 |
| 5.10 Diagramas de Mifflin | 43 |
| 5.11 Metales y metaloides | 46 |
| 5.11.1 Aluminio | 47 |
| 5.11.2 Hierro | 48 |
| 5.11.3 Manganeso | 43 |
| 5.11.4 Zinc | 44 |
| 5.12 Parámetros asociados al desarrollo de actividades relacionadas con hidrocarburos | 45 |
| 5.13 Parámetros microbiológicos | 45 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 43 |





1. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA EN EL ÁREA DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

En el área de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades que varían desde el Precámbrico hasta el Cuaternario; no obstante, en este documento solo se presentará la descripción de las unidades geológicas más relevantes para la estrategia, debido a que proveen el recurso hídrico subterráneo en la región o bien porque son sellos o unidades receptoras de aguas de producción en los procesos de reinyección.

La descripción litológica se tomó de la memoria explicativa del Mapa Geológico del Departamento del Huila, oficializado por INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2001.

La caracterización hidrogeológica se tomó del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) en el Sector Centro, Noroccidental y Nororiental de la Cuenca del Río Magdalena de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena - CAM (2017) y del documento “*Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica 11 – Campo La Hocha*”, presentado en el Informe de Cumplimiento Ambiental - ICA No 18 del Expediente LAM3028 (radicado 2022172775-1-000 del 12 de agosto de 2022).

1.1 Formación Saldaña

De acuerdo con INGEOMINAS (2001) se subdivide en dos conjuntos, uno sedimentario conformado por areniscas tobáceas sucias, areniscas feldespáticas, lodolitas, limolitas, calizas bioclásticas y conglomerados con cantos principalmente de caliza y limolita. El otro conjunto es de origen volcánico y está constituido principalmente por aglomerados flujos de lava de composición predominantemente andesítica y tobas líticas, vítreas y cristalinas. Su espesor varía lateralmente debido a que esta unidad se formó como producto de acumulación de materiales volcánicos, en la sección tipo, Cediél Et al (1981) reporta 1800 m y otros autores indican hasta 2200 m de espesor. En cuanto a su edad Cediél Et al., ubican a esta formación en Triásico Superior y Jurásico Inferior.

La Formación Saldaña es considerada parte del basamento económico de la cuenca del Valle Superior del Magdalena ya que constituye junto con otras unidades del Grupo Payandé la base de la cobertura productiva que inicia con la Formación Caballos en la región.

Según la CAM (2017) la Formación Saldaña se comporta hidrogeológicamente como un acuífugo, es decir que cuenta con muy bajas posibilidades de almacenar o transmitir agua subterránea.





En el documento “Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica I1 – Campo La Hocha” caracterizan a la Formación Saldaña como rocas poco permeables definidas como: *“unidades rocosas con porosidad secundaria insuficiente para permitir el flujo considerable de agua, tomando por lo tanto en algunos sitios connotaciones de acuitardos y capas sello. Las únicas posibilidades de flujo de agua son por fracturamiento de la roca”*.

En la estrategia de monitoreo se hace seguimiento a la calidad del agua en esta unidad a través del monitoreo de dos (2) manantiales localizados en el área del proyecto Campo La Hocha (LAM3028).

1.2 Formación Caballos

El segmento inferior se constituye por una secuencia de arenitas líticas, cuarzosas y cuarzofeldespáticas de grano fino a grueso e incluso conglomerático con algunas intercalaciones delgadas de lodolitas carbonosas. El segmento intermedio consta de capas gruesas de arcillolitas y lodolitas negras fosilíferas intercaladas con capas delgadas de calizas micríticas, láminas de carbón y niveles delgados de arenitas finas a muy finas cuarzosas. En el segmento superior las arenitas pasan a ser de grano grueso hasta conglomeráticas. En las capas de arenitas de grano fino de los segmentos superior e inferior es evidente la presencia de glauconita.

Esta unidad, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos, es el principal transportador de hidrocarburos, adicionalmente funciona como roca reservorio. En el PMAA (CAM, 2017) clasifican hidrogeológicamente a la Formación Caballos como un acuífero confinado de extensión regional, de buena productividad.

En los proyectos campos Huila Norte (LAM2307) y Área de Explotación Yaguará (LAM0989) es la unidad productora, y también cumple funciones como receptora para algunos pozos de reinyección.

En la red de monitoreo regional no hay puntos que capturen la Formación Caballos.

1.3 Formación Hondita

Es una secuencia de lodolitas físciles y limolitas arenosas con cemento calcáreo y silíceo, intercaladas hacia la base con esporádicas capas delgadas de calizas lumaquéllicas. Tanto los niveles de lodolitas como las capas de caliza son ricos en restos fósiles de peces, plantas, amonitas y bivalvos (INGEOMINAS, 2001). Velandia Et al. (1996) sugieren un espesor de 400 m para esta unidad; su edad se ubica entre el Albiano Medio y el Coniciano según Patarroyo (1993).

Algunos autores agrupan esta unidad con las formaciones Loma Gorda, La Luna, Bambucá y Tetúan bajo el nombre de Grupo Villeta. Las arcillolitas plásticas de la Formación Bambucá constituye el sello superior y lateral de la cuenca del Valle Superior del Magdalena.





La composición predominantemente arcillosa del Grupo Villeta constituye un sello efectivo en la base de la Formación Monserrate para los campos productores en el Valle Superior del Magdalena.

En el documento “Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica I1 – Campo La Hocha” clasifican a la Formación Villeta dentro del grupo de rocas poco permeables con baja a ninguna productividad de aguas subterráneas.

En la red de monitoreo regional se tienen cinco (5) piezómetros en esta unidad pertenecientes al proyecto Campo de Producción Jaguará (LAM0989).

1.4 Grupo Olini (Formación Monserrate en el léxico petrolero)

Se compone de tres conjuntos definidos como Lidita Inferior, Nivel de Lutitas y Arenas, y Lidita Superior. La Lidita Inferior se constituye por capas delgadas a medias de chert, intercaladas con capas de calizas arenosas con concreciones calcáreas y piritosas, limolitas blancas, areniscas fosfáticas y lodolitas síliceas con abundantes moldes de foraminíferos. El Nivel de Lutitas y Arenas está compuesto por capas de cuarzoarenitas de grano medio a fino, intercaladas con lodolitas bien laminadas meteorizadas. La Lidita Superior es el más delgado de los tres conjuntos se conforma por capas de chert intercalados con capas de areniscas fosfáticas con abundantes moldes de foraminíferos fosfatizados y fragmentos fósiles de peces. Se encuentran localmente capas delgadas de areniscas calcáreas con abundantes concreciones, hacia el tope (Tomado de INGEOMINAS, 2001). Le edad asignada a esta unidad es Santoniano- Campaniano Tardío (Vergara, 1994).

La Formación Monserrate es la unidad productora y receptora de aguas de producción en el campo La Hocha (LAM3028) y solo receptora de aguas de producción para fines disposal en el campo Huila Norte (LAM2307).

De acuerdo con los informes trimestrales de inyección de agua de producción presentados en el Informe de Cumplimiento Ambiental - ICA No 19 (radicado 20236200299132 del 30 de junio de 2023) del Expediente LAM3028, esta formación ha sido dividida en cuatro intervalos operacionales que de techo a base son: “Km1, Km2, Km3 y Km4, siendo las de mejores propiedades petrofísicas la parte basal de la unidad Km2 y todo el intervalo de la unidad Km3 que corresponden a areniscas cuarzosas, friables a moderadamente consolidadas, de grano muy fino a fino, subangular a subredondeado, selección regular y en partes con abundante matriz arcillosa”.

En el documento “Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica I1 – Campo La Hocha” esta unidad es definida como un acuífero libre a semiconfinado, con porosidad intergranular en los niveles de areniscas y secundaria en las areniscas fracturadas y porcelanitas diaclasadas, el flujo de agua es controlado por el buzamiento de las capas y la dirección de las fracturas, el potencial del acuífero es bajo a moderado.





En la estrategia de monitoreo se hace seguimiento a la calidad del agua subterránea de esta unidad a través de tres (3) manantiales ubicados en el proyecto Campo La Hocha (LAM3028).

1.5 Formación Seca (Formación Guaduala en el léxico petrolero)

Está constituida en su base por arcillolitas limosas. Rodríguez & Fuquen (1989) y Velandia et al. (1996) reportan la existencia de venillas de yeso entre las capas; a este conjunto Beltrán & Gallo (1968) le dieron el nombre de Formación San Francisco. Hacia el techo de la secuencia se presentan capas gruesas de areniscas líticas de grano fino, bien cementadas, con textura tipo “sal y pimienta”, intercaladas con arcillolitas limosas; para este conjunto Beltrán & Gallo (1968) propusieron el nombre de Formación Teruel. Su espesor varía entre 300m y 400m y su edad reportada es Maastrichtiano-Paleoceno (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

La Formación Guaduala es un importante sello en la cuenca y constituye el sello principal superior de la Formación Monserrate en el proyecto Campo La Hocha (LAM3028)

En el PMAA de la CAM (2017) y en el documento “Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica I1 – Campo La Hocha” clasifican hidrogeológicamente a la Formación Seca como un acuitado o acuícludo con muy baja permeabilidad.

En la estrategia de monitoreo se le hace seguimiento a esta unidad en seis (6) piezómetros del proyecto Campo de Producción Yaguará (LAM0989).

1.6 Grupo Honda

Constituido por una alternancia de capas de arcillolitas plásticas dispuestas en capas muy gruesas que varían lateralmente a limolitas, con cuarzoarenitas y litoarenitas de grano medio a grueso poco cementadas. Las arenitas presentan la textura conocida como “sal y pimienta” y concreciones de arena con cemento calcáreo. En las capas de arenitas se encuentran intercalados lentes conglomeráticos meteorizados, conformados por guijos de cuarzo y chert principalmente. Beltrán & Gallo (1968) reportan 1500m de espesor para esa unidad de Mioceno Medio.

Esta unidad, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos, se comporta como roca reservorio y algunos niveles funcionan como sellos en la cuenca.

Según el PMAA de la CAM (2017) el Grupo Honda conforma acuíferos de extensión regional con moderada productividad.

De acuerdo con el documento “Red de Monitoreo Unidad Hidrogeológica I1 – Campo La Hocha” es un acuífero libre con porosidad intergranular y a través de fracturas.

En la red de monitoreo regional se tienen tres (3) pozos profundos y cuatro (4) piezómetros del proyecto Campos Huila Norte (LAM2307) que captan agua del Grupo Honda.





1.7 Grupo Huila

De este grupo hacen parte las formaciones Neiva, en la parte inferior, y Gigante en la parte superior. La Formación Neiva está constituida por bancos de conglomerados compuestos por guijos de rocas ígneas y metamórficas, con matriz areno limosa, intercalados con capas de areniscas y niveles delgados de lodolitas y cenizas volcánicas. La Formación Gigante se compone de intercalaciones de arcillolitas, arenitas tobáceas friables y conglomerados en paquetes gruesos. Intercalados con los niveles de arenitas con capas gruesas de tobas compuestas predominantemente por pumita, vidrio volcánico y cuarzo.

En el PMAA de la CAM (2017) caracterizan hidrogeológicamente a la Formación Gigante como un acuífero libre a semiconfinado de extensión local y regional moderadamente productivo.

En la red de monitoreo regional se tienen 19 puntos de agua subterránea que captan el Grupo Huila, localizados en el proyecto Campos Huila Norte (LAM2307), distribuidos en 16 piezómetros en la Formación Neiva y tres (3) pozos en la Formación Gigante.

1.8 Depósitos Cuaternarios

Los puntos de agua subterránea que están siendo monitoreados por la estrategia regional captan el recurso principalmente de depósitos y terrazas aluviales, compuestos por sedimentos de arenas, limos, arcillas y conglomerados depositados por las corrientes superficiales como los ríos Magdalena, Suaza, Yaguará, Páez, Fortalecillas, Tune y Baché, entre otros.

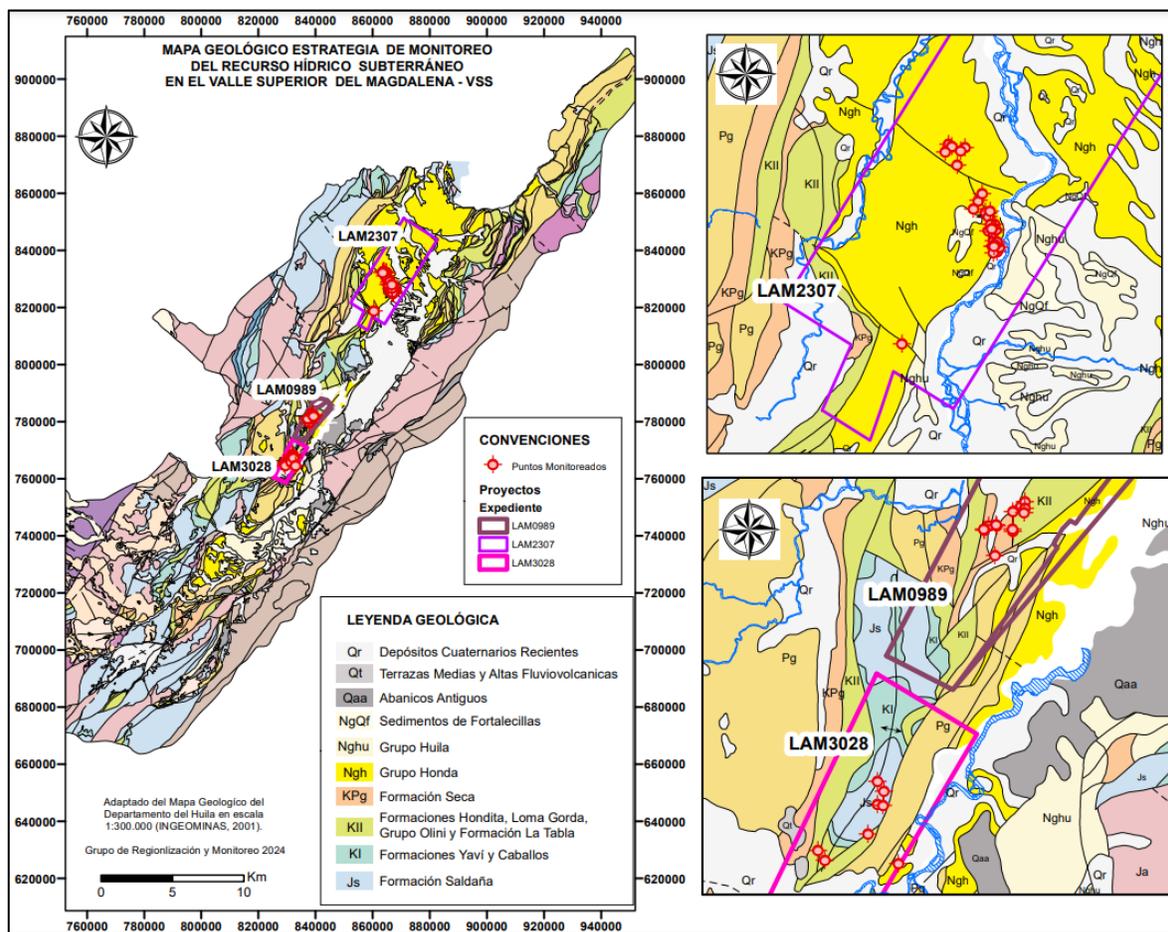
Esta unidad conforma acuíferos libres a semiconfinados de alta productividad, con aguas aptas para cualquier uso (CAM, 2017).

Para estos depósitos, en la estrategia de monitoreo regional actualmente se le hace seguimiento a la calidad del agua subterránea mediante seis (6) puntos, distribuidos en dos (2) piezómetros de los Campos Huila Norte (LAM2307), dos (2) manantiales del Campo La Hocha (LAM3028) y dos (2) piezómetros del Campo de Producción Yaguará (LAM0989).

A continuación (**Ilustraciones 1 y 2**), se presentan los mapas geológico e hidrogeológico del área donde se localizan los puntos de agua subterránea que actualmente conforman la estrategia de monitoreo regional:

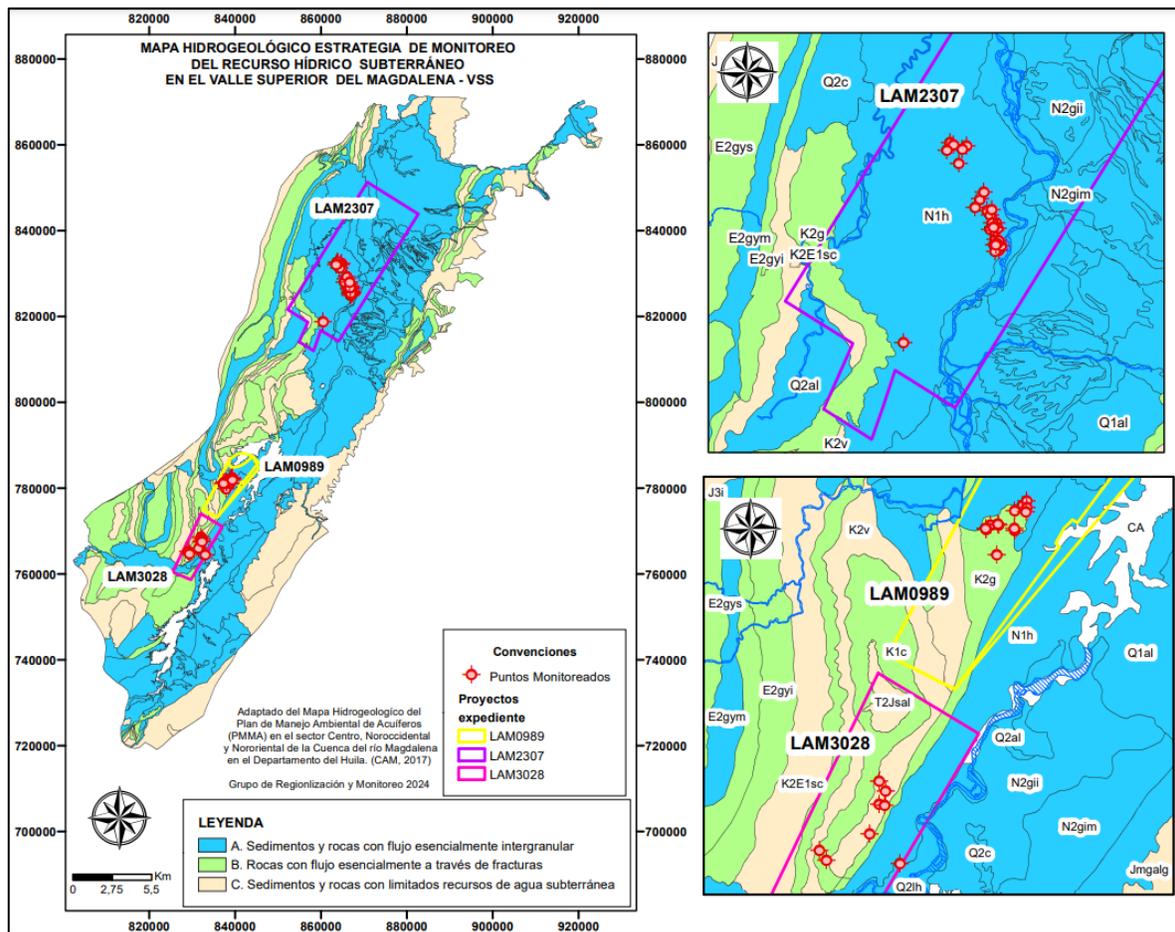


Ilustración 1. Mapa geológico estrategia de monitoreo de agua subterránea VSM



Fuente: ANLA, 2024.

Ilustración 2. Mapa hidrogeológico estrategia de monitoreo de agua subterránea VSM

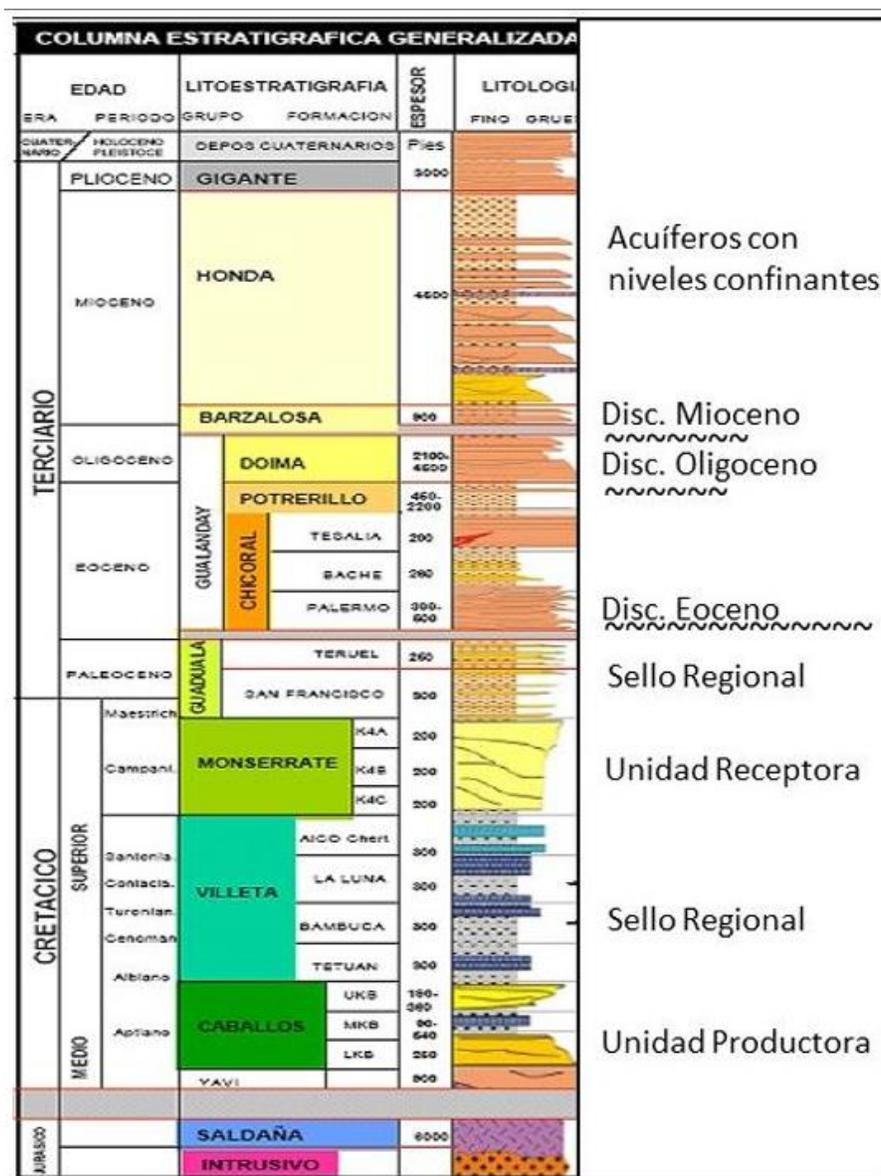


Fuente: ANLA, 2024.

Adicionalmente, en la Ilustración 3 se observa una columna estratigráfica generalizada de la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM, en la cual se presentan las unidades geológicas según su función en la industria petrolera, ya sea como productora, receptora o sello.



Ilustración 3. Columna generalizada de la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM



Fuente: Información presentada por el Campo Huila Norte mediante radicado 20236201063392 del 28 de diciembre de 2023.

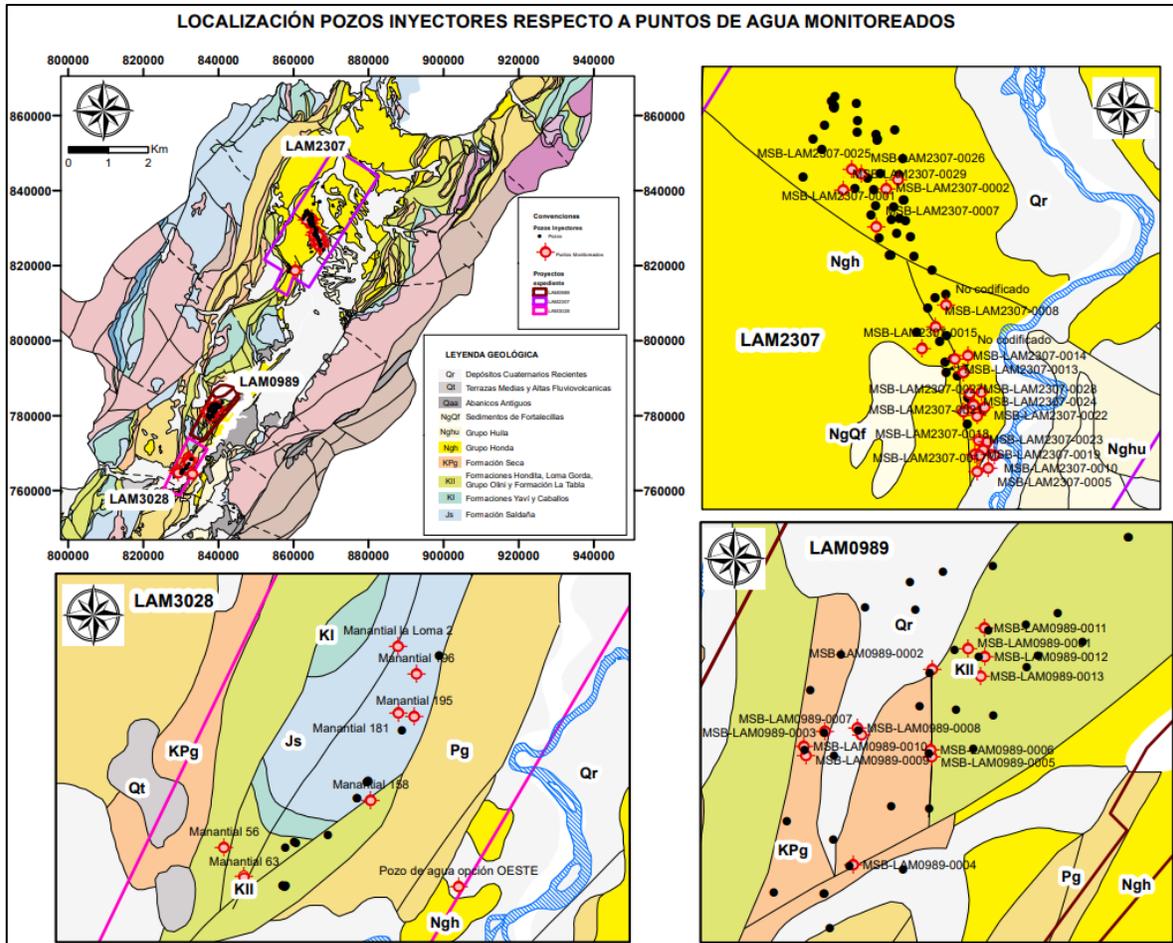
Por último, en la Ilustración 4 se presenta la relación espacial entre los puntos de agua subterránea que están siendo monitoreados en el marco de la estrategia regional y los pozos de inyección correspondientes a los proyectos Campo La Hocha (LAM3028), Campos Huila Norte (LAM2307) y Campo de Producción Jaguará (LAM0989), que son los proyectos que se encuentran reportando información de acuerdo con las obligaciones impuestas por la estrategia.

En la Ilustración 4 se evidencia que la mayoría de los puntos de agua subterránea que hacen parte de la estrategia se localizan en las áreas de influencia de los pozos inyectoras, así las



cosas, el análisis de calidad debe realizarse teniendo en cuenta la susceptibilidad de afectación por parte de la actividad de reinyección.

Ilustración 4. Localización pozos inyectoros vs puntos de agua subterránea monitoreados en la estrategia de monitoreo en el VSM



Fuente: Información presentada por el Campo Huila Norte mediante radicado 20236201063392 del 28 de diciembre de 2023.



2. ANTECEDENTES DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

Como instrumento de planificación en el área de la estrategia, para el componente hidrogeológico en el año 2017 se formuló el Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) en el Sector Centro, Noroccidental y Nororiental de la Cuenca del Río Magdalena en el Departamento del Huila.

El PMAA definió al acuífero conformado por la Formación Gigante como el de mayor importancia ambiental en la región, dado que es considerado una fuente hídrica estratégica exclusiva para el uso doméstico, con el fin de garantizar el abastecimiento de agua de la población actual y futura.

Por otro lado, se cuenta con el Reporte de Alertas de las Subzonas Hidrográficas Cuenca Alta del río Magdalena - SZH-CARM, realizado por la ANLA en el año 2018, en el que se concluye que en la región es importante profundizar en la investigación del estado del recurso hídrico subterráneo en cuanto a la identificación de zonas de recarga, tránsito y descarga y características de calidad y cantidad; de tal manera que sea posible definir oportunamente, desde el conocimiento, la gestión correspondiente para su manejo y protección; esto en el sentido de promover a futuro su aprovechamiento, con el fin de disminuirle presión al agua superficial, principalmente en las épocas secas, en las zonas de alta demanda debido al desarrollo de actividades agropecuarias. En tal sentido, el reporte recomienda la instrumentación de las cuencas hídricas y la conformación o actualización de redes de monitoreo regionales que permitan conocer con mayor certeza la calidad y dinámica del agua subterránea, así como su potencial en la zona.

Dicho conocimiento se adquiere a través de la construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales idóneos que representen las condiciones reales del territorio, para lo cual es imprescindible capturar información de calidad en redes de monitoreo regionales adecuadamente establecidas.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

La estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM establece la estandarización de parámetros y frecuencias para el monitoreo regional de la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo. Dicha estandarización a escala regional permitirá reconocer, mediante el análisis espacio temporal sistemático de los resultados de monitoreo, los factores de alteración que se puedan presentar en el componente hidrogeológico, asociados a las actividades de competencia de la ANLA





desarrolladas sobre la cuenca. Esto ofrece a la Autoridad Ambiental un sustento técnico esencial para determinar si existe o no la acumulación de impactos sobre el recurso hídrico subterráneo en la región y la eventual necesidad de imponer nuevas restricciones ambientales que se consideren pertinentes.

A la fecha, las condiciones de tiempo, modo y lugar de la estrategia han sido implementadas en tres (3) de los cinco (5) proyectos que la conforman, todos pertenecientes al sector de hidrocarburos y correspondientes con los siguientes expedientes:

- Área de Producción Huila Norte (LAM2307).
- Campo La Hocha (LAM3028).
- Campo de Producción Yaguará (LAM0989).

Estos tres (3) proyectos son responsables de la red de monitoreo regional que hasta el momento está oficialmente compuesta por 41 puntos de agua subterránea, distribuidos en seis (6) pozos profundos y 35 piezómetros.

No obstante, para el análisis realizado en el presente documento se cuenta con información de puntos adicionales que aún no están incluidos en la estrategia mediante acto administrativo, pero reportan información, teniéndose un total de 50 puntos de agua subterránea, distribuidos en 37 piezómetros (13 del expediente LAM0989 y 24 del LAM2307), 6 pozos del Expediente LAM2307 y 7 manantiales del LAM3028. Los puntos que no están oficialmente incluidos en la estrategia no se encuentran codificados.

En tal sentido, el análisis que se presenta en este documento se refiere al comportamiento del agua subterránea en el área de los proyectos Producción Huila Norte, Campo La Hocha y Campo Yaguará, toda vez que la estrategia de monitoreo continua en implementación en algunos expedientes.

A continuación, se presentan las condiciones de lugar, modo y tiempo de la estrategia de monitoreo:

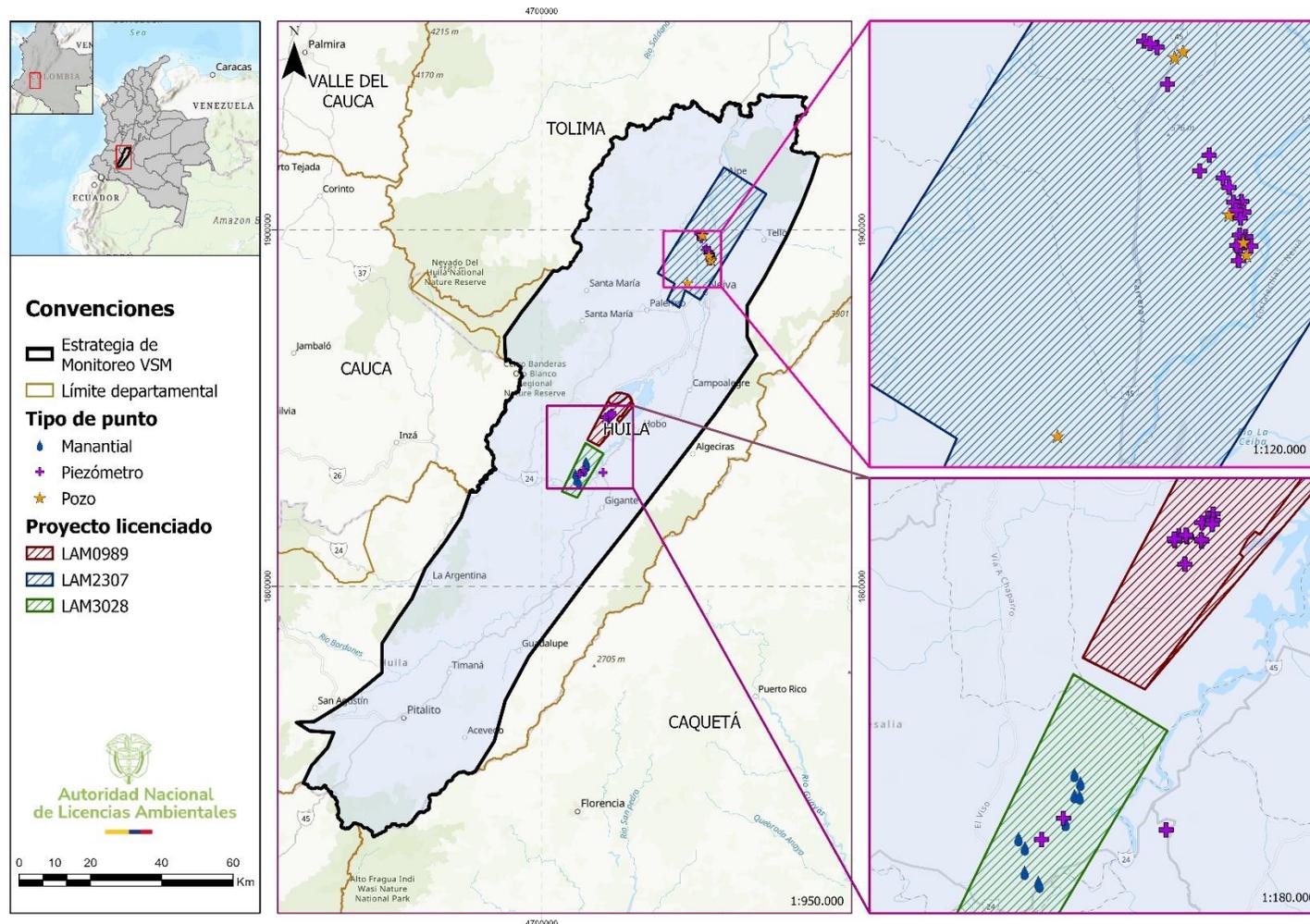
3.1 Condiciones de Lugar

En la **Ilustración 5** y **Tabla 1** se presentan la distribución y características de cada uno de los puntos de agua subterránea que actualmente hacen parte de la estrategia de monitoreo regional en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM:





Ilustración 5. Localización de los proyectos y puntos de agua subterránea que hacen parte de la estrategia de monitoreo del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM



Fuente: ANLA, 2024



Tabla 1. Puntos de agua subterránea que actualmente integran la estrategia de monitoreo regional en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM

| Expediente | Nombre del proyecto | Características del punto | | | | | | | Observación | |
|------------|---|---------------------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------|--|----|--|--|
| | | ID Licenciario | ID ANLA | Tipo de punto | Origen Único Nacional | | Monitoreado en el marco de la estrategia | | | Unidad geológica captada |
| | | | | | Este | Norte | Si | No | | |
| LAM3028 | Campo La Hocha | Manantial 56 | No codificado | Manantial | 4.709.407 | 1.831.487 | | X | Formación Monserrate | Reportan información de monitoreos, pero aún no están integrados oficialmente en la estrategia |
| | | Manantial 63 | No codificado | Manantial | 4.709.747 | 1.830.992 | | X | Formación Monserrate | |
| | | Manantial La Loma 2 | No codificado | Manantial | 4.712.379 | 1.834.894 | | X | Formación Saldaña | |
| | | Manantial 196 | No codificado | Manantial | 4.712.694 | 1.834.430 | | X | Formación Saldaña | |
| | | Manantial 181 | No codificado | Manantial | 4.712.383 | 1.833.766 | | X | Formación Saldaña | |
| | | Manantial 158 | No codificado | Manantial | 4.711.910 | 1.832.292 | | X | Formación Monserrate | |
| | | Manantial 195 | No codificado | Manantial | 4.712.653 | 1.833.710 | | X | Formación Saldaña | |
| | | Pozo de agua opción OESTE | No codificado | Pozo profundo | 4.713.404 | 1.830.819 | | X | Está incluido en la estrategia mediante Resolución 1835 de 17 de noviembre de 2020, no obstante, el proyecto no hace uso de la concesión, no se perforó el pozo. | |
| LAM2307 | Área de producción Huila Norte (o de Neiva) | Pozo profundo Dina | MSB-LAM2307-0001 | Pozo profundo | 4.745.323 | 1.898.592 | X | | Formación Honda Superior | |
| | | Pozo profundo DK-5 | MSB-LAM2307-0002 | Pozo profundo | 4.745.026 | 1.898.366 | X | | Formación Honda Superior | |
| | | Pozo profundo Santa Clara | MSB-LAM2307-0003 | Pozo profundo | 4.740.876 | 1.884.967 | X | | Formación Honda Inferior | |



| Expediente | Nombre del proyecto | Características del punto | | | | | | | Observación | |
|------------|---------------------|---------------------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------|--|----|---------------------------------------|--------------------------|
| | | ID Licenciario | ID ANLA | Tipo de punto | Origen Único Nacional | | Monitoreado en el marco de la estrategia | | | Unidad geológica captada |
| | | | | | Este | Norte | Si | No | | |
| | | Pozo Arenas 3 | MSB-LAM2307-0004 | Pozo profundo | 4.747.464 | 1.891.825 | X | | Formación Gigante | |
| | | Pozo Arenas 4 | MSB-LAM2307-0005 | Pozo profundo | 4.747.568 | 1.891.378 | X | | Formación Gigante | |
| | | Pozo Arenas 6 | MSB-LAM2307-0006 | Pozo profundo | 4.746.952 | 1.892.796 | X | | Formación Gigante | |
| | | Piezómetro 2 DK 8 | MSB-LAM2307-0007 | Piezómetro | 4.744.775 | 1.897.429 | X | | Grupo Honda | |
| | | Piezómetro AP 1 | MSB-LAM2307-0008 | Piezómetro | 4.746.254 | 1.894.914 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 10 | MSB-LAM2307-0010 | Piezómetro | 4.747.727 | 1.891.701 | X | | Depósitos Aluviales - Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 11 | MSB-LAM2307-0011 | Piezómetro | 4.747.233 | 1.891.717 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 12 | MSB-LAM2307-0012 | Piezómetro | 4.747.332 | 1.892.085 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 2 | MSB-LAM2307-0013 | Piezómetro | 4.746.744 | 1.894.111 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 3 | MSB-LAM2307-0014 | Piezómetro | 4.746.956 | 1.893.779 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 4 | MSB-LAM2307-0015 | Piezómetro | 4.745.913 | 1.894.361 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 5 | MSB-LAM2307-0016 | Piezómetro | 4.747.297 | 1.892.691 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 6 | MSB-LAM2307-0017 | Piezómetro | 4.747.545 | 1.892.033 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 7 | MSB-LAM2307-0018 | Piezómetro | 4.747.449 | 1.891.846 | X | | Formación Neiva | |



| Expediente | Nombre del proyecto | Características del punto | | | | | | | Observación | |
|------------|---------------------|----------------------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------|--|----|---------------------------------------|--|
| | | ID Licenciario | ID ANLA | Tipo de punto | Origen Único Nacional | | Monitoreado en el marco de la estrategia | | | Unidad geológica captada |
| | | | | | Este | Norte | Si | No | | |
| | | Piezómetro AP 8 | MSB-LAM2307-0019 | Piezómetro | 4.747.297 | 1.891.305 | X | | Depósitos Aluviales - Formación Neiva | |
| | | Piezómetro AP 9 | MSB-LAM2307-0020 | Piezómetro | 4.747.400 | 1.893.277 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro APF 3 | MSB-LAM2307-0021 | Piezómetro | 4.747.116 | 1.893.253 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro APF 4 | MSB-LAM2307-0022 | Piezómetro | 4.747.482 | 1.892.899 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro APF 5 | MSB-LAM2307-0023 | Piezómetro | 4.747.356 | 1.891.708 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro APF 7 | MSB-LAM2307-0024 | Piezómetro | 4.747.205 | 1.892.967 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro Intercol DT 63 | MSB-LAM2307-0025 | Piezómetro | 4.744.160 | 1.898.868 | X | | Grupo Honda | |
| | | Piezómetro Intercol Sur | MSB-LAM2307-0026 | Piezómetro | 4.744.407 | 1.898.735 | X | | Grupo Honda | |
| | | Piezómetro PY-1 | MSB-LAM2307-0027 | Piezómetro | 4.747.205 | 1.892.970 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro PY-2 | MSB-LAM2307-0028 | Piezómetro | 4.747.205 | 1.892.970 | X | | Formación Neiva | |
| | | Piezómetro Saltante Dindal | MSB-LAM2307-0029 | Piezómetro | 4.743.943 | 1.898.340 | X | | Grupo Honda | |
| | | Piezómetro APF 1 | No codificado | Piezómetro | 4.746.527 | 1.895.456 | | X | Formación Neiva | Reportan información de monitoreos, pero aún no están integrados |
| | | Piezómetro APF 2 | No codificado | Piezómetro | 4.747.066 | 1.894.205 | | X | Formación Neiva | |



| Expediente | Nombre del proyecto | Características del punto | | | | | | | Observación | |
|---------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------|--|----|-------------------------------|--------------------------|
| | | ID Licenciario | ID ANLA | Tipo de punto | Origen Único Nacional | | Monitoreado en el marco de la estrategia | | | Unidad geológica captada |
| | | | | | Este | Norte | Si | No | | |
| | | | | | | | | | oficialmente en la estrategia | |
| LAM0989 | Campo de producción Yaguará | Piezómetro 15 | MSB-LAM0989-0001 | Piezómetro | 4.719.556 | 1.848.530 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 8 | MSB-LAM0989-0002 | Piezómetro | 4.719.149 | 1.848.289 | X | | Depósitos Aluviales | |
| | | Piezómetro 9 | MSB-LAM0989-0003 | Piezómetro | 4.717.933 | 1.847.592 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 12 | MSB-LAM0989-0004 | Piezómetro | 4.718.249 | 1.846.084 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 16 | MSB-LAM0989-0005 | Piezómetro | 4.719.141 | 1.847.306 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 17 | MSB-LAM0989-0006 | Piezómetro | 4.719.131 | 1.847.385 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 18 | MSB-LAM0989-0007 | Piezómetro | 4.718.346 | 1.847.550 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 19 | MSB-LAM0989-0008 | Piezómetro | 4.718.299 | 1.847.632 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 20 | MSB-LAM0989-0009 | Piezómetro | 4.717.719 | 1.847.325 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 21 | MSB-LAM0989-0010 | Piezómetro | 4.717.692 | 1.847.422 | X | | Formación Seca | |
| | | Piezómetro 4 | MSB-LAM0989-0011 | Piezómetro | 4.719.745 | 1.848.754 | X | | Terrazas Pumíticas | |
| | | Piezómetro 14 | MSB-LAM0989-0012 | Piezómetro | 4.719.748 | 1.848.432 | X | | Terrazas Pumíticas | |
| Piezómetro 13 | MSB-LAM0989-0013 | Piezómetro | 4.719.700 | 1.848.207 | X | | Formación Seca | | | |

Fuente: ANLA, 2024





3.2 Condiciones de Modo

Los parámetros incluidos en una red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas deben contemplar aspectos físicos, químicos y microbiológicos, enfocándose además en determinar los posibles contaminantes que pueden generarse por el tipo de actividad desarrollada. Teniendo en cuenta lo anterior, y que la actividad objeto de monitoreo es la exploración y explotación de hidrocarburos y sus actividades conexas, se definieron los siguientes parámetros (Tabla 2) para la estrategia de monitoreo del Valle Superior del Magdalena - VSM:

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos - Estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM

| | Parámetro | Unidad de medida |
|----------------------|-------------------------------|------------------|
| Propiedades Físicas | Caudal* | L/s |
| | N.E y Nivel dinámico | m |
| | Temperatura | °C |
| | Conductividad eléctrica | µS/cm |
| Propiedades Químicas | Oxígeno Disuelto | mg/L |
| | pH | Und. |
| | Óxido redox Eh | mV |
| | TDS | mg/L |
| | Dureza | mg/L |
| | Na ⁺ | mg/L |
| | K ⁺ | mg/L |
| | Mg ⁺² | mg/L |
| | Ca ⁺² | mg/L |
| | Fe ⁺² | mg/L |
| | Al ⁺³ | mg/L |
| | SO ₄ ⁻² | mg/L |
| | Cl ⁻ | mg/L |
| | NO ₃ ⁻ | mg/L |
| | CO ₃ ⁻² | mg/L |
| | HCO ₃ ⁻ | mg/L |
| | Arsénico | mg/L |
| | Bario | mg/L |
| | Cadmio | mg/L |
| | Cinc | mg/L |
| | Cobre | mg/L |
| | Cromo | mg/L |
| | Hierro | mg/L |
| | Mercurio | mg/L |
| Níquel | mg/L | |
| Plomo | mg/L | |
| Selenio | mg/L | |
| Otros | TPH | mg/L |
| | Fenoles | mg/L |
| | BTEX | mg/L |
| Microbiológicos | Coliformes Totales | MNP/ml |
| | Fecales | MNP/ml |
| | E.Coli | MNP/ml |

*Solo para los pozos que cuenten con una concesión otorgada por ANLA

Fuente: Documento de formulación Estrategia de Monitoreo de las Aguas Subterráneas en la Cuenca del Valle Superior del Magdalena – VSM, año 2020.

Con el fin de que todos los resultados de las muestras se puedan analizar confiablemente bajo un criterio regional, éstas deben ser objeto del cálculo del porcentaje de error del



balance iónico, para así cuantificar el error analítico y determinar el nivel de confiabilidad de los valores de concentración reportados, los resultados de dicho cálculo deben ser presentados junto con los reportes de laboratorio. De acuerdo con el principio de electroneutralidad del agua, la suma de los aniones ha de ser igual a la suma de cationes (expresados en meq/L); sin embargo, siempre existe cierto porcentaje de error, el cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$(\%) \text{ diferencia} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100$$

A la luz de lo anterior, solo se valorarán como aceptables las muestras de agua subterránea que cumplan con los criterios presentados en la **Tabla 3**:

Tabla 3. Criterio para la aceptación del balance iónico de acuerdo con la sumatoria de aniones

| Suma de Aniones (meq/l) | Diferencia aceptable |
|-------------------------|----------------------|
| 0 – 3.0 | ± 0.2 meq/l |
| 3.0 – 10.0 | ± 2% |
| 10.0 - 800 | 5% |

Fuente Standard Methods – Cap 1030E Checking Analyses, 2017¹

Para el caso del Expediente LAM0989, el error máximo aceptable será del 15%. Las anteriores condiciones fueron establecidas en los actos administrativos que acogieron la estrategia.

3.3 Condiciones de Tiempo

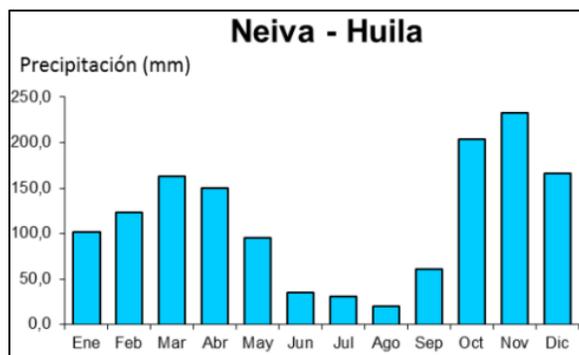
La variación estacional de los periodos de lluvias y periodos secos no solamente influye en la posición del nivel freático, sino que eventualmente genera cambios físicos y químicos naturales en el agua subterránea. La fluctuación del nivel freático puede contribuir a que ocurra movilización y solubilización de sustancias de origen antrópico presentes en la zona vadosa o franja de infiltración, alterando de este modo las características físicas y químicas del recurso hídrico subterráneo. Asimismo, los cambios estacionales de la precipitación modifican el volumen de agua almacenado en las unidades acuíferas, lo cual altera las concentraciones de las sustancias químicas diluidas en el agua subterránea. Por tal motivo, es adecuado que la frecuencia de monitoreo se defina a partir de los meses de máximas y mínimas precipitaciones en el año hidrológico, para conocer las tendencias de la calidad del agua bajo estos dos escenarios.

Para conocer la distribución de la precipitación media mensual multianual de la cuenca de interés, se analizan los registros presentados por la estación climatológica ubicada en la ciudad de Neiva, en el departamento del Huila (ver **Ilustración 6**).

¹ Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition, 2017.



Ilustración 6. Comportamiento de la precipitación media mensual multianual en la estación Neiva – Huila



Fuente: Atlas Climatológico de Colombia – IDEAM, 2016.

Considerando lo anterior, se establecieron las siguientes frecuencias de monitoreo:

- Campaña 1: mes de mayo - periodo de transición.
- Campaña 2: mes de agosto - época seca.
- Campaña 3: mes de noviembre - época de lluvia.

4. INFORMACIÓN ENTREGADA POR LOS PROYECTOS EN CUMPLIMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

En el marco del desarrollo de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM, a continuación, se presenta un análisis de los datos que han sido reportados por algunos de los proyectos vinculados a la estrategia, considerando parámetros de calidad y disponibilidad del agua subterránea, con el fin de verificar las condiciones de dicho recurso a escala regional.

En respuesta a las obligaciones impuestas en el marco de la estrategia de monitoreo regional, esta Autoridad Ambiental evidenció que se ha remitido la información presentada en la **Tabla 4**.

Con la entrega de esta información se completan para el proyecto Área de Producción Huila Norte (LAM2307), los monitoreos del año hidrológico completo 2022 y las temporadas seca y transición para el año 2023, teniendo reportes de laboratorio para dos (2) temporadas secas, dos (2) periodos de transición y una (1) temporada húmeda.

Con respecto al proyecto Campo La Hocha (LAM3028) la interpretación y análisis de la calidad del agua subterránea se realiza a partir de los monitoreos realizados en manantiales



identificados dentro del área del proyecto, tres (3) muestreados en época húmeda (mes de noviembre de 2021), uno (1) en época seca (mes de julio de 2021) y cuatro (4) en temporada seca del año 2022.

Con relación al proyecto Campo Yaguará la verificación de la calidad y comportamiento del agua subterránea se ejecuta partiendo de información de una (1) temporada húmeda del año 2022, dos (2) períodos de transición (2022 y 2023) y una (1) temporada seca medida en el año 2023.

Para la realización de los diagramas hidrogeológicos se emplearon solamente las muestras de agua subterránea que cumplieron con el porcentaje de error analítico, el cual fue establecido en las condiciones de modo de la estrategia de monitoreo regional y especificado para cada proyecto en el respectivo acto administrativo. Dicho porcentaje fue verificado por parte del Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo, de lo cual es importante destacar que para las tres temporadas climáticas se descartó un gran número de muestras que no cumplieron con el criterio establecido, para la temporada de transición solamente se consideraron el 34% de los muestreos y para las temporadas seca y húmeda este porcentaje correspondió con el 42 y 18% respectivamente.



Tabla 4. Información reportada en el marco de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena – VSM

| Expediente | Nombre del proyecto | Licenciatario | Acto administrativo que impone la estrategia | No. y fecha de radicado de información | No. Campaña | Temporada climática |
|------------|---|----------------|--|--|-------------|---------------------|
| LAM3028 | Campo La Hocha | HOCOL S.A. | Resolución 01835 del 17/11/2020 | 2022172775-1-000 del 12 de agosto de 2022 | 2 | Húmeda |
| | | | | | 3 | Seca |
| | | | | 20236200299132 del 30 de junio de 2023 | 2 | Seca |
| LAM2307 | Área de producción Huila Norte (o de Neiva) | ECOPETROL S.A. | Resolución 1673 del 22/09/2021 Resolución 0852 del 29/04/2022 Resolución 2816 del 04/12/2023 | 2022185271-1-000 del 26 de agosto de 2022 | 1 | Transición |
| | | | | 2022266512-1-000 del 25 de noviembre de 2022 | 2 | Seca |
| | | | | 2023065404-1-000 del 29 de marzo de 2023 | 3 | Húmeda |
| | | | | 20236200496282 del 18 de agosto de 2023 | 1 | Transición |
| | | | | 20236200947822 del 4 de diciembre de 2023 | 2 | Seca |
| LAM0989 | Campo de producción Yaguará | ECOPETROL S.A. | Resolución 2526 del 19/10/2022 | 20236200292752 del 29 de junio de 2023 | 1 | Transición |
| | | | | | 3 | Húmeda |
| | | | | 20236200994292 del 14 de diciembre de 2023 | 1 | Transición |
| | | | | | 2 | Seca |

Fuente: ANLA, 2024



5. ESTADO DE LA CALIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO

Con base en la información generada en el marco del monitoreo regional del recurso hídrico subterráneo, a continuación, se presentan los análisis de tendencias de los parámetros de interés respecto a las condiciones de calidad y disponibilidad del agua subterránea.

Es necesario mencionar que en este informe de análisis regional no se presentan interpolaciones ni análisis geoespaciales, dado que de momento no se cuenta con información de la totalidad de los proyectos que integran la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM, por lo tanto, la información analizada aún no es representativa de la totalidad del área de la estrategia. Es necesario continuar con la implementación de la estrategia en los demás proyectos que la integran, al igual que contar con un mayor número de campañas de monitoreo, cuya información permita realizar análisis multitemporales con resultados ajustados a las condiciones reales del medio a partir de los cuales se identifique la presencia o no de impactos ambientales sobre el recurso hídrico.

Es importante indicar el alcance temporal de los datos analizados en el presente informe, dado que los tiempos que se tuvieron en cuenta están definidos a partir de la imposición de las obligaciones de la estrategia regional, no obstante, la mayoría de los parámetros han venido siendo cuantificados por parte de los licenciarios en el marco de los Planes de Manejo Ambiental.

Así las cosas, en el análisis del presente documento los datos empleados corresponden con los años 2021 y 2022 para el proyecto Campo La Hocha (LAM3028), y para el caso del Área de Producción Huila Norte (LAM2307) y el Campo Yaguará (LAM0989) se tiene información de los años 2022 y 2023. El tratamiento de los datos se hace respecto a la temporada climática a la que corresponden y a medida que se cuente con más información se podrán establecer tendencias en cuanto a calidad y cantidad del recurso hídrico, a través de análisis multitemporales.

Adicionalmente, es necesario aclarar que aunque en la actualidad no hay una norma de calidad del agua subterránea, para algunos parámetros se realiza la comparación con la normatividad vigente para los usos señalados en los artículos 2.2.3.3.9.3 y 2.2.3.3.9.4 del Decreto 1076 de 2015 y el Capítulo II de la Resolución 2115 de 2007, debido a que estos usos están autorizados en varios de los puntos de agua monitoreados; así mismo, teniendo presente el Artículo 49 del Decreto 1594 de 1984: *“En los sitios en donde se asignen usos múltiples, los criterios de calidad para la destinación del recurso, corresponderán a los valores más restrictivos de cada referencia”*.





5.1 Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT)

La Conductividad Eléctrica (CE) es la capacidad de una sustancia para conducir la corriente eléctrica y su valor es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) representan la concentración de sustancias o minerales disueltos en las aguas naturales, tales como bicarbonatos, carbonatos, cloruros, calcio, sulfatos y otros iones como silicatos y demás.

Bibliográficamente, para el agua dulce se ha establecido un límite máximo de Conductividad Eléctrica (CE) de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según Custodio & Llamas (1983), y para el parámetro de Sólidos Disueltos Totales (SDT) el límite máximo es de 1000 mg/l según la clasificación de Freeze y Cherry (1979). De acuerdo con Custodio & Llamas (1983) se ha establecido un factor de conversión de aproximadamente 0,5 entre estos dos parámetros, es decir que $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm o mg/l}$, lo cual significa que los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) son cercanos a la mitad de los valores de Conductividad Eléctrica (CE).

Tiendo en cuenta que en el marco de las obligaciones de la estrategia de monitoreo regional la medición de los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) se solicita una frecuencia mensual, con los valores cuantificados de estos parámetros se elaboraron gráficas comparativas anuales, agrupando los datos de acuerdo con la unidad geológica que es captada por cada uno de los puntos, con el fin contrastar los resultados conseguidos y diferenciar comportamientos a lo largo de las diferentes temporadas climáticas.

Si bien la mayoría de los monitoreos solicitados por la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM comenzaron a ejecutarse en el año 2022, en la información que reposa en el Expediente LAM3028 - Campo La Hocha se encontraron algunos monitoreos fisicoquímicos realizados en manantiales que cumplían con las condiciones de la estrategia, por lo tanto estos datos se incluyeron en el presente informe, de tal manera que sirvan como punto de partida en el análisis de las condiciones del agua subterránea en este sector.

En ese orden de ideas, como se observa en la **Ilustración 7**, para el año 2021 se observa que las Conductividades Eléctricas (CE) del agua subterránea en el área del Expediente LAM3028 no superan los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y para el caso de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) los valores se mantienen por debajo de los 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cumpliéndose la relación 2:1 establecida para estos parámetros, e indicando que se trata de aguas dulces. En cuanto al agua de los manantiales localizados sobre la Formación Monserrate (Km), cuyos valores de conductividad no superaron los 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se puede observar que estos valores están asociados con el agua lluvia de la zona, dado que bibliográficamente se ha establecido un valor de Conductividad Eléctrica (CE) de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como el límite entre el agua lluvia y el agua subterránea dulce. Lo

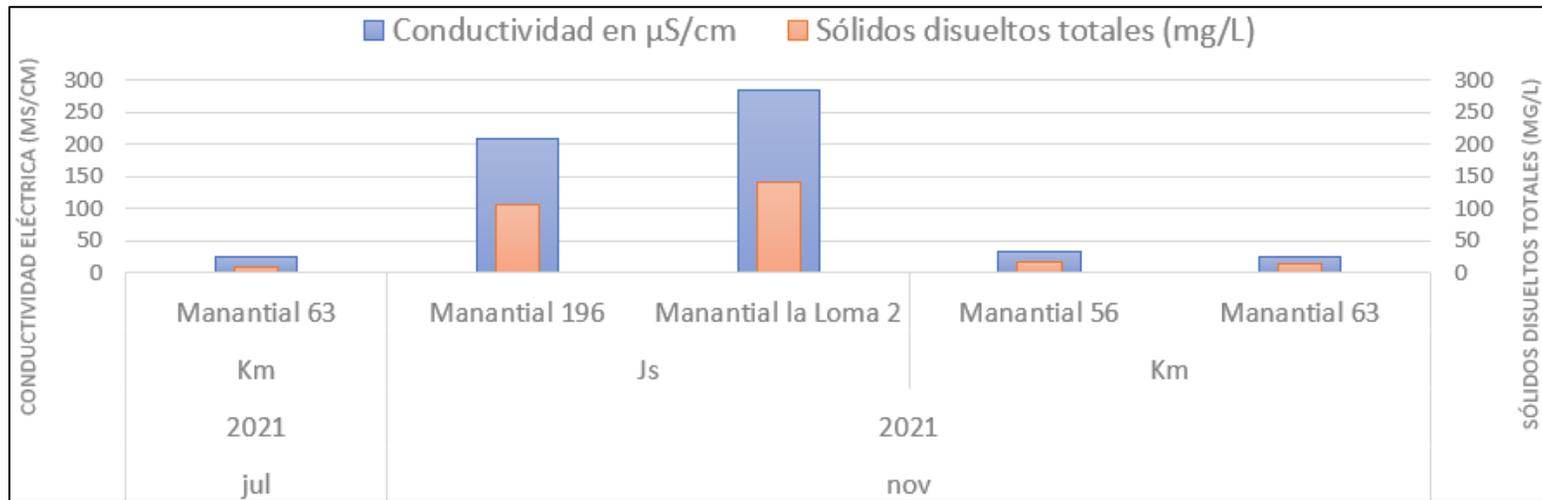


anterior permite interpretar que el agua de estos afloramientos es el resultado de un flujo local, con tiempos de residencia y recorridos cortos; es decir que, si bien esos manantiales se localizan sobre una unidad cretácica, donde se esperarían mayores tiempos de residencia del agua, la disposición de los materiales y las estructuras geológicas han permitido el desarrollo de flujos locales.

Los valores de Conductividades Eléctricas (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) en el agua de los manantiales localizados sobre la Formación Saldaña (Js) son algo mayores con respecto a los de la Formación Monserrate (Km), posiblemente debido a la edad geológica de la unidad y un mayor tiempo de residencia del agua subterránea en este acuífero.



Ilustración 7. Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2021



Fuente: ANLA, 2024



En las **Ilustraciones 8, 9 y 10** se observan los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2022, evidenciándose que los valores en las muestras analizadas están por debajo de los 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 300 mg/l respectivamente, lo que permite concluir que el agua subterránea almacenada en la totalidad de las unidades geológicas consideradas corresponde con aguas dulces.

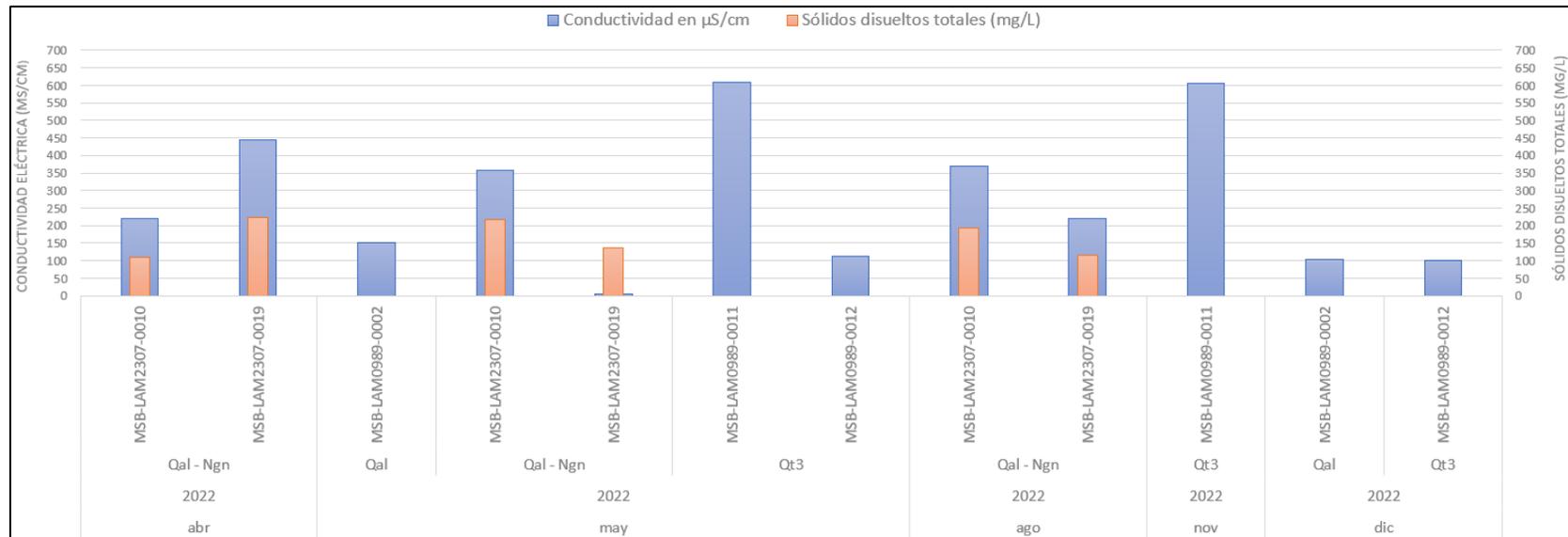
En cuanto a los depósitos cuaternarios, las Terrazas Pumíticas (Qt3) y los puntos con mezcla de agua Depósitos Aluviales - Formación Neiva (Qal - Ngn) presentan valores mayores que los Depósitos Aluviales (Qal). Respecto a las unidades del terciario, la Formación Neiva (Ngn) y el Grupo Honda (Ngh) presentan valores similares a lo largo del año; por su parte, la Formación Gigante (NgQgi), cuya edad está en el límite entre el terciario y el cuaternario, presenta valores por lo general menores, no obstante, estas diferencias no son marcadas. Los valores más elevados de conductividad en las primeras unidades mencionadas pueden deberse tanto a la edad geológica de las formaciones, como a su disposición en el subsuelo, características que permiten un mayor tiempo de residencia del agua subterránea en estos acuíferos y por lo tanto un mayor contenido iónico.

Respecto a las unidades geológicas más antiguas, los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) no presentan variaciones marcadas respecto a las unidades más recientes, de hecho, los valores de conductividad para la Formación Seca (KPgs) oscilan desde menos de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta más de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$; por su parte, para las Formaciones Saldaña (Is) y Monserrate (Km) los valores son similares a los del año 2021, con los registros más bajos en esta última formación.





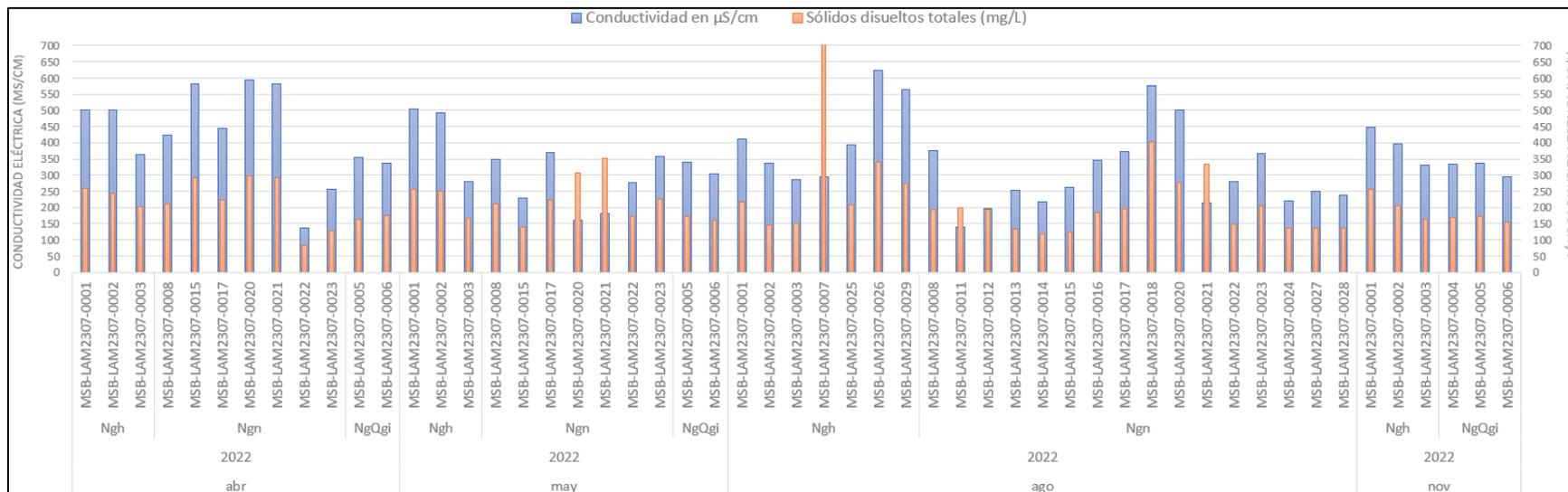
Ilustración 8. Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2022 - Depósitos Cuaternarios



Fuente: ANLA, 2024



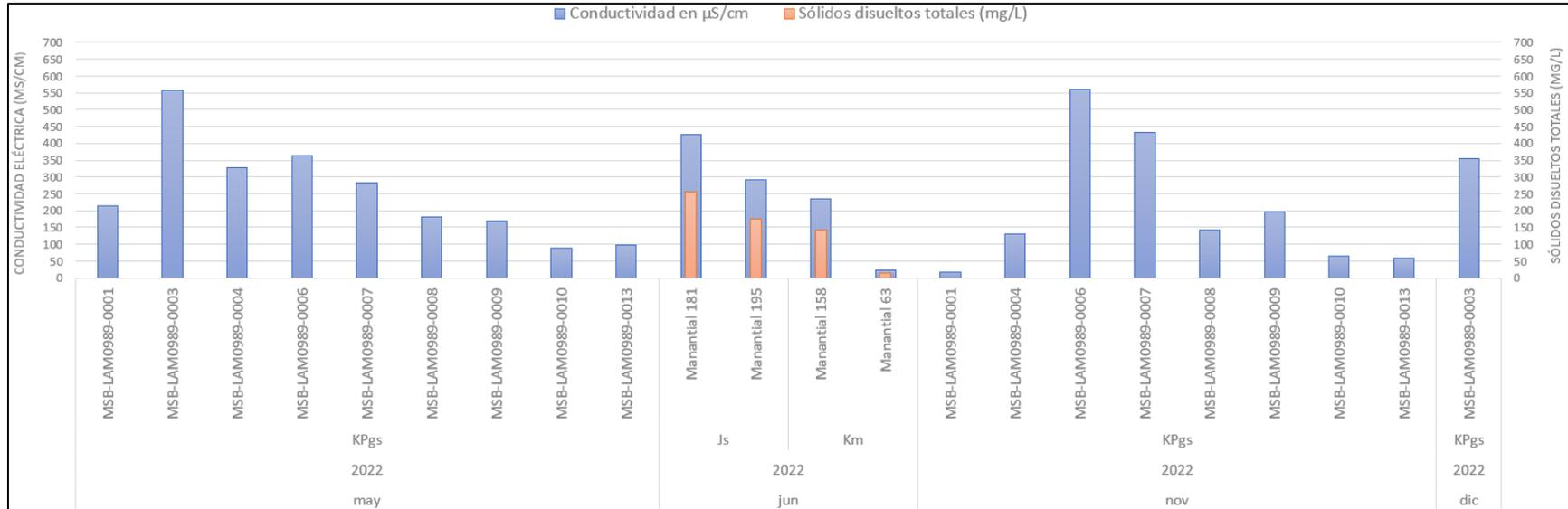
Ilustración 9. Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2022 - Formaciones de edad terciaria



Fuente: ANLA, 2024



Ilustración 10. Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2022 - Formaciones cretácicas y jurásicas



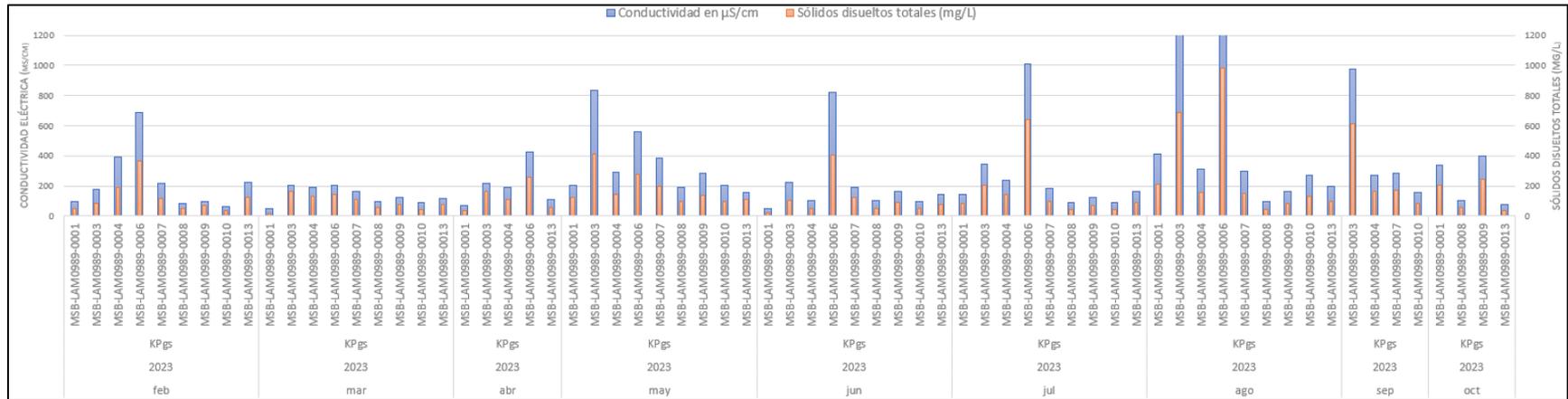
Fuente: ANLA, 2024

En las **Ilustraciones 11, 12 y 13** se observan los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2023, regionalmente respecto a los depósitos cuaternarios, el comportamiento en comparación a los años anteriores se mantiene igual. En cuanto a las unidades de edad terciaria, se evidencia que para la Formación Neiva (Ngn) y el Grupo Honda (Ngh) los valores de estos parámetros son levemente superiores, sin embargo, se mantienen en el mismo orden de magnitud, a excepción del punto MSB-LAM2307-0007 (Piezómetro 2 DK 8), que para el año 2023 presentó un incremento en los valores de conductividad, registrando valores superiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo tanto, de continuar este incremento será necesario analizar las causas del mismo.

Por último, con relación a las unidades más antiguas, para el año 2023 de momento solamente se tiene información disponible de los puntos de agua subterránea que captan a la Formación Seca (KPgs), observándose que respecto a las mediciones realizadas en el año 2022 en algunos de los puntos se presenta un aumento en los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT), superando incluso los 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por lo tanto, de continuar este incremento será necesario analizar las causas del mismo.



Ilustración 13. Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados en el año 2023 - Formaciones cretácicas y jurásicas



Fuente: ANLA, 2024

En consecuencia, a partir del análisis de las mediciones de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) es posible concluir que el agua subterránea almacenada en la totalidad de unidades geológicas consideradas es agua dulce, con conductividades que por lo general no superan los 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 400 mg/l respectivamente. Para los depósitos cuaternarios se concluyen flujos locales, con tiempos de residencia y recorridos más cortos que los presentados por el agua subterránea almacenada en las unidades de edades más antiguas, a excepción de los manantiales de la Formación Monserrate (Km) que también reflejan condiciones de flujo local.

Puntualmente, en el año 2023 se presentan algunos incrementos en los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) en algunos de los puntos de agua subterránea que captan la Formación Neiva (Ngn), el Grupo Honda (Ngh) y la Formación Seca (KPgs), los cuales deberán continuar analizándose, y en caso de registrar aumentos, analizar las causas de este comportamiento.

Es importante resaltar dos aspectos relacionados con la cuantificación de estos parámetros, en primer lugar, en algunos puntos se evidencia que no se cumple la relación aproximada de 2:1 que existe entre los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT), situación que puede deberse ya sea a condiciones inadecuadas o errores metodológicos en la toma de las muestras o a errores en la digitación de la información por parte del laboratorio, por lo tanto, en estos casos será necesario solicitar a los licenciarios la justificación de estos valores en el marco de los respectivos seguimientos ambientales. En segundo lugar, para algunas campañas no se realizó la cuantificación de los Sólidos Disueltos Totales (SDT), por lo tanto, será necesario realizar el respectivo requerimiento, de tal manera que los licenciarios cumplan con las condiciones de tiempo y modo de la estrategia de monitoreo regional.

Finalmente, se realizó la comparación de los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) obtenidos de la red de monitoreo regional con los valores de las aguas de producción de los proyectos Campo La Hocha (LAM3028), Campos Huila Norte (LAM2307) y Campo Yaguará (LAM0989), registrados en el año 2022, encontrándose que las muestras de aguas residuales tienen conductividades que por lo general superan los 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respecto a los sólidos disueltos la mayoría de los valores sobrepasan los 6.000 mg/L; estos datos fueron tomados de los resultados de monitoreos de aguas industriales en cinco (5) Plantas de Inyección de Agua (PIA). De lo anterior se concluye que actualmente no hay una interacción entre las aguas subterráneas someras y las aguas de formación de los niveles productores de hidrocarburos.



5.2 Oxígeno Disuelto

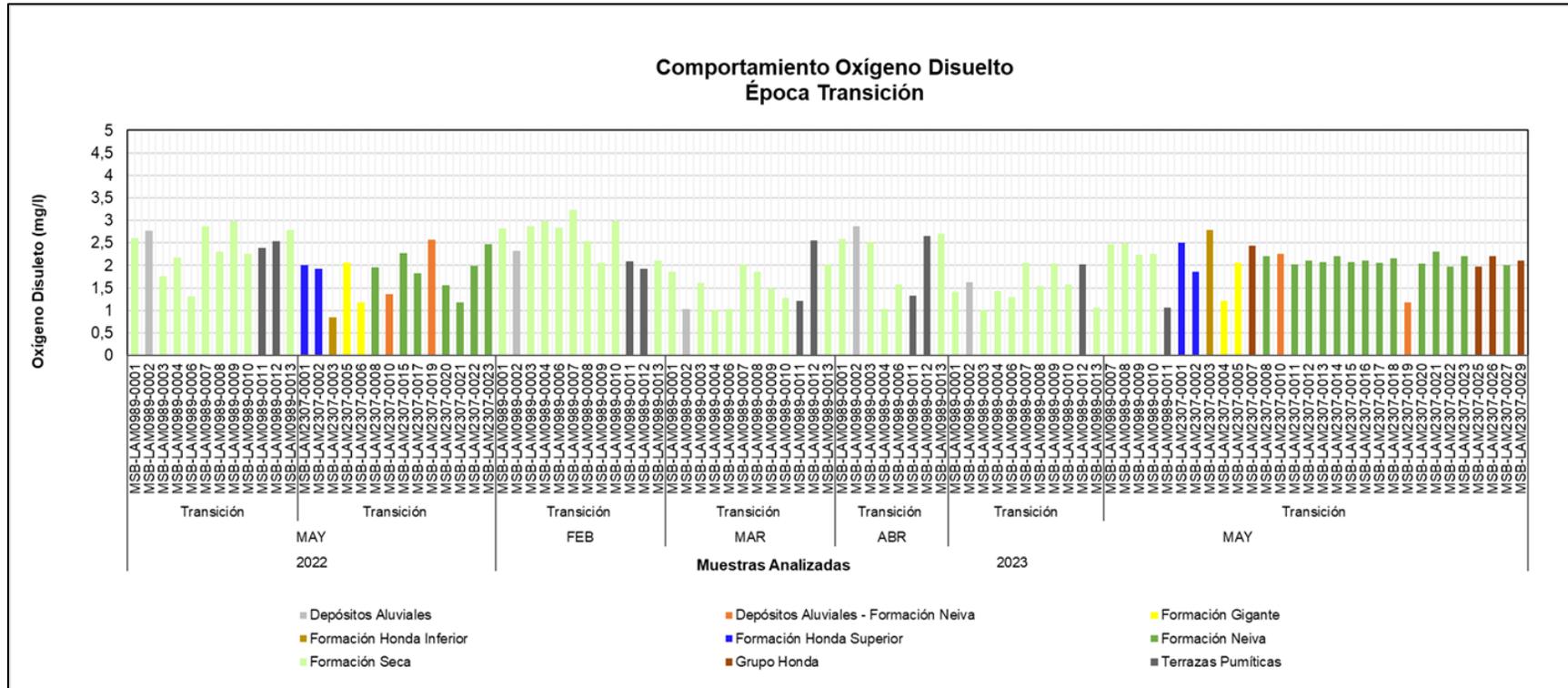
Como se puede observar en las siguientes gráficas (Ilustraciones 14, 15 y 16) las concentraciones de oxígeno disuelto en todas las muestras analizadas, para las épocas climáticas húmeda y transición, se mantienen por debajo 5 mg/l, sin señalar alguna tendencia por unidad geológica; a excepción de la temporada seca del año 2023 en la cual un pozo profundo del Área de Producción Huila Norte (LAM2307) que capta la Formación Gigante presenta una concentración cercana a los 8 mg/l, lo cual puede deberse posiblemente a un error humano en el momento de la toma de la muestra o a que el pozo presentó en el tiempo de medición algún tipo de recarga local artificial, dado que este punto de agua en otras mediciones del mismo parámetro presenta valores inferiores a 3 mg/l que se encuentran en el promedio encontrado para la Formación Gigante en otros puntos de agua.

Lo anterior indica que los valores hallados en general se encuentran dentro del rango normal para agua subterránea según Custodio & Llamas (1983): *“La mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 ppm, frecuentemente por debajo de 2 ppm”*. Es decir que, el agua de los acuíferos captados por los puntos de agua monitoreados corresponde con ambientes reductores indiferentes a la variabilidad climática y la unidad geológica en la cual se encuentre almacenada.





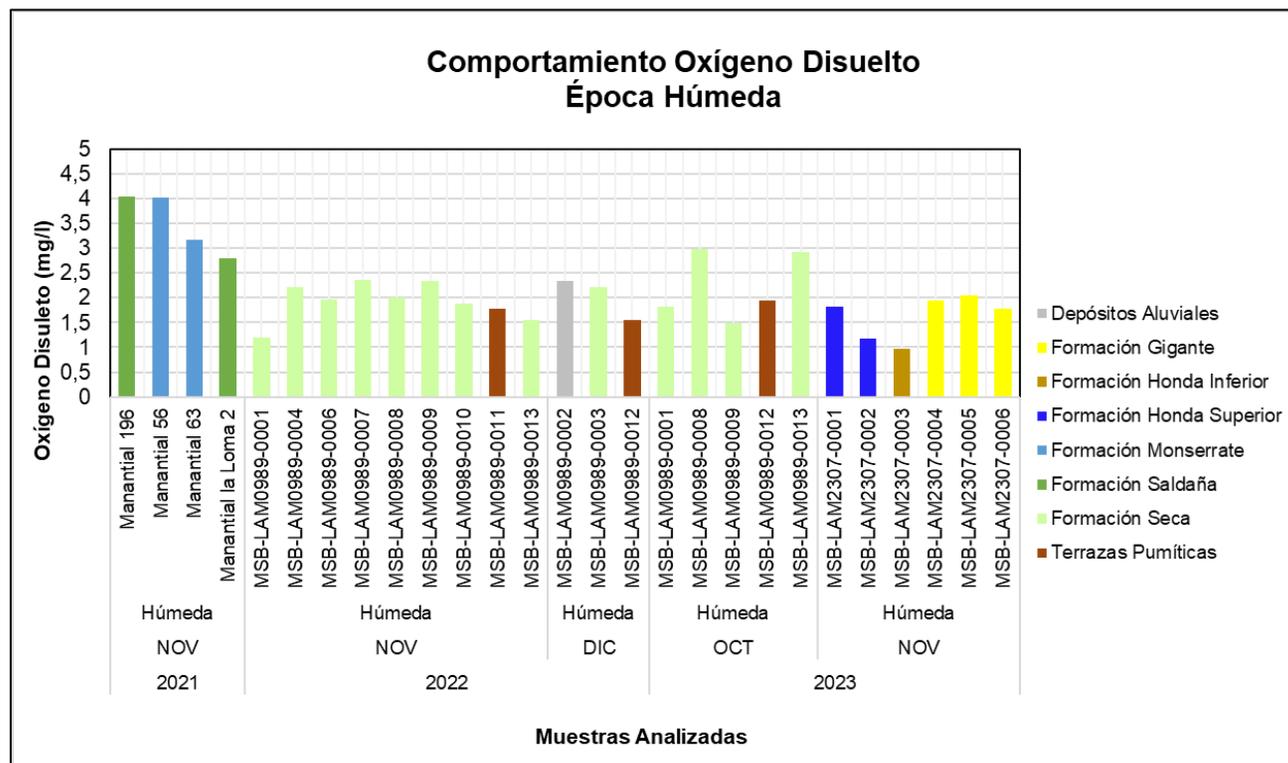
Ilustración 14. Oxígeno disuelto - temporada de transición



Fuente: ANLA, 2024



Ilustración 15. Oxígeno disuelto - temporada húmeda

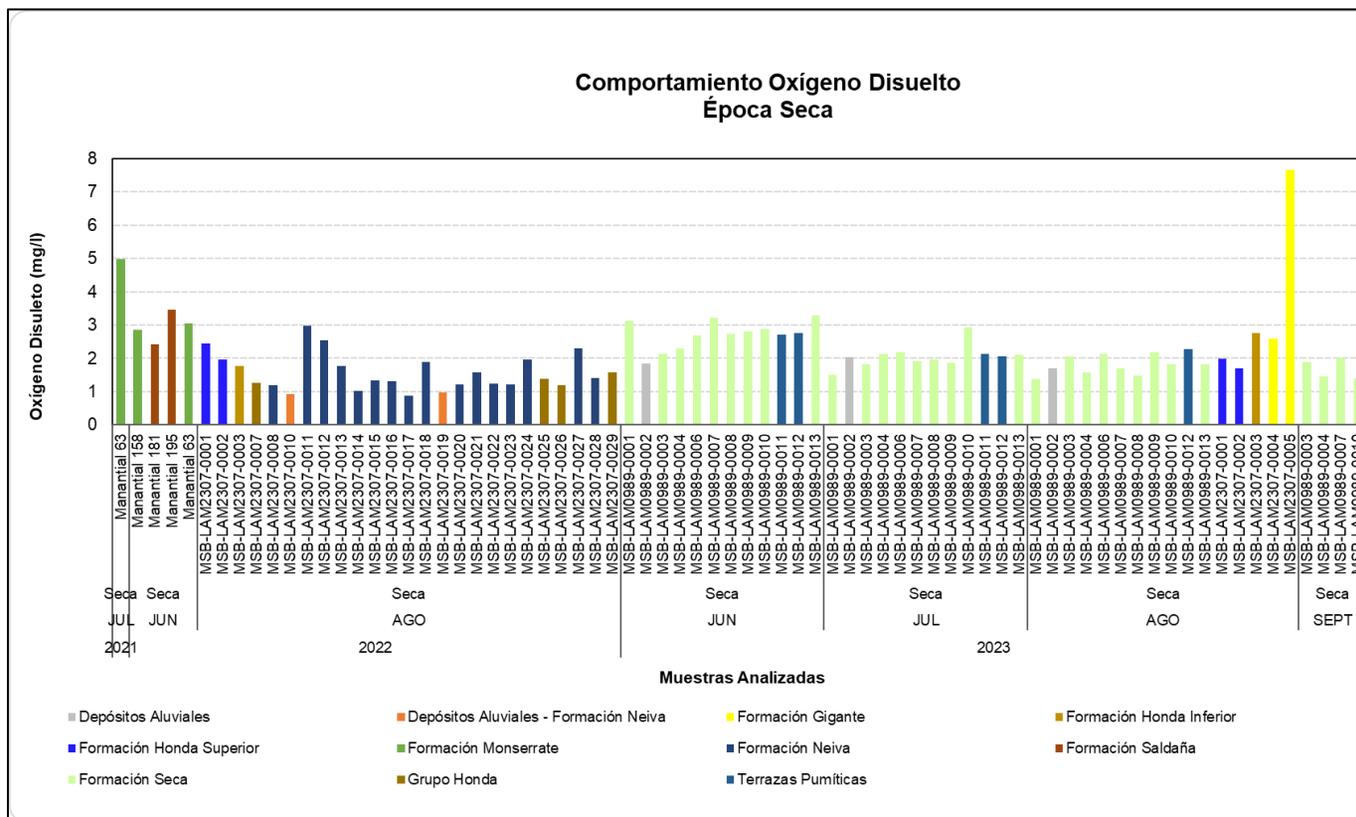


Fuente: ANLA, 2024





Ilustración 16. Oxígeno disuelto - temporada seca



Fuente: ANLA, 2024





5.3 Nivel Estático

Con el fin de identificar posibles alteraciones sobre la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el área de la estrategia de monitoreo de la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM, así como ofrecer un mayor entendimiento frente a la variación de los niveles del agua subterránea a lo largo del año hidrológico, se compilan los datos de los niveles estáticos medidos en los puntos de agua subterránea que integran la estrategia. Dentro de la información analizada se incluyen monitoreos de nivel estático del expediente LAM2037 registrados para el año 2021 y del expediente LAM0989 medidos en el periodo de 2023.

Es importante mencionar que, si bien el licenciario del expediente LAM2307 hace entrega de los monitoreos fisicoquímicos realizados en el laboratorio para los periodos de 2022 y 2023, en los reportes radicados a esta entidad no se encuentra la información de los niveles, por lo tanto, esta información será requerida en el marco del seguimiento ambiental de este proyecto.

En este sentido, y con el objetivo de realizar una aproximación al comportamiento de los niveles estáticos en el área de la estrategia, se tomaron los datos reportados por parte del Expediente LAM2307 en el Informe de Cumplimiento Ambiental – ICA No 13 (periodo comprendido del 1 de enero al 31 de diciembre de 2021), si bien este registro de niveles estáticos es limitado espacial y temporalmente, permite tener una idea inicial de la profundidad de los niveles y su variación estacional, además estos datos sirven de partida para los posteriores análisis regionales que se realicen en el marco de la estrategia de monitoreo planteada para el Valle Superior del Magdalena - VSM.

Adicionalmente, en lo referente a los monitoreos realizados para el Expediente LAM0989, si bien la sociedad reporta información de monitoreos fisicoquímicos para el año 2022, dentro de los laboratorios realizados no está incluido el parámetro de nivel estático. Sin embargo, mediante el radicado 20236200994292 del 14 de diciembre de 2023 la sociedad entregó los resultados obtenidos en el marco de la presente estrategia para los meses de febrero a octubre de 2023, los cuáles serán usados en el presente análisis.

En las siguientes graficas se puede evidenciar el comportamiento promedio mensual de la profundidad de los niveles de agua medidos en el año 2021 y en el año 2023 en los puntos de agua subterránea monitoreados en el expediente LAM2307 y el expediente LAM0989, respectivamente. El análisis se realizó por unidad geológica captada:

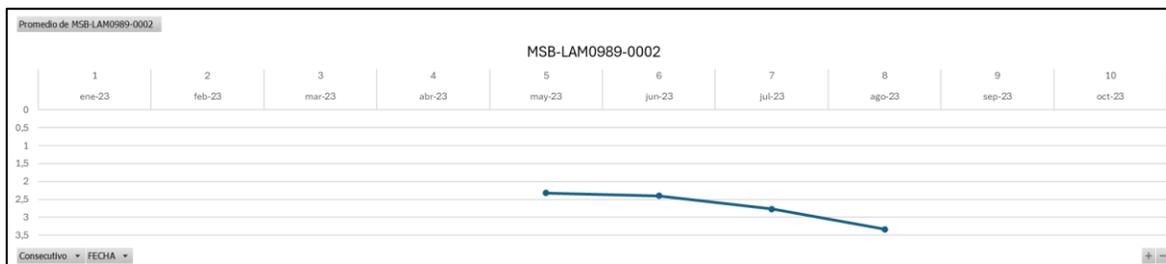
5.3.1 Depósitos Aluviales (Qal)

Según lo observado en la **Ilustración 17**, el registro de niveles se realizó para un único punto localizado en esta unidad, con niveles de entre 2,3 y 3,3 metros de profundidad entre mayo y agosto de 2023. De manera preliminar, los resultados indican que el nivel estático para los Depósitos Aluviales (Qal) se encuentra directamente influenciado por el régimen de



precipitación del área, donde se espera que en la temporada seca (mes de agosto) la profundidad de este parámetro aumente.

Ilustración 17. Niveles estáticos Depósitos Aluviales (Qal) - Año 2023



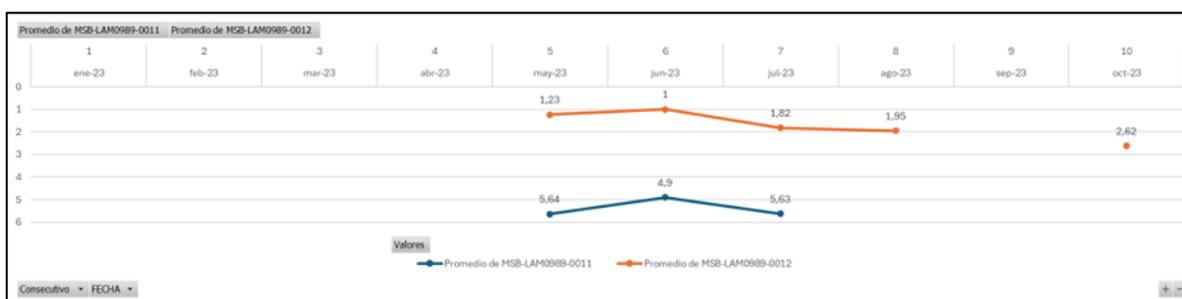
Fuente: ANLA, 2024

5.3.2 Terrazas Pumíticas (Qt3)

La profundidad de los niveles estáticos de la unidad de Terrazas Pumíticas (Qt3) (Ilustración 18) se determinó a partir de la información registrada para dos puntos del expediente LAM0989. Aunque hay poca información asociada a esta unidad cuaternaria, se observa que para el piezómetro MSB-LAM0989-0012 hay profundidades someras de nivel estático de entre 1 y 2 m. Por su parte, para el piezómetro MSB-LAM0989-0011 se presentan mayores profundidades promedio que van desde los 4,9 a 5,6 m.

En cuanto al comportamiento en el tiempo, se observa que en junio hay una disminución en la profundidad de nivel, seguido por un aumento en los meses posteriores. Esto puede asociarse a la recarga del acuífero somero proveniente de la infiltración de las lluvias de meses anteriores, no obstante, aún no se cuenta con información suficiente para determinar un comportamiento generalizado de estos niveles acuíferos.

Ilustración 18. Niveles estáticos Terrazas pumíticas (Qt3) - Año 2023



Fuente: ANLA, 2024

5.3.3 Formación Neiva (Ngn)

Como se observa en la Ilustración 19 los niveles estáticos de la Formación Neiva no superan los 20 m de profundidad, pero hay piezómetros con niveles de entre 30 y 40 m de profundidad. De igual manera, para la mayoría de los puntos se evidencia que a lo largo del

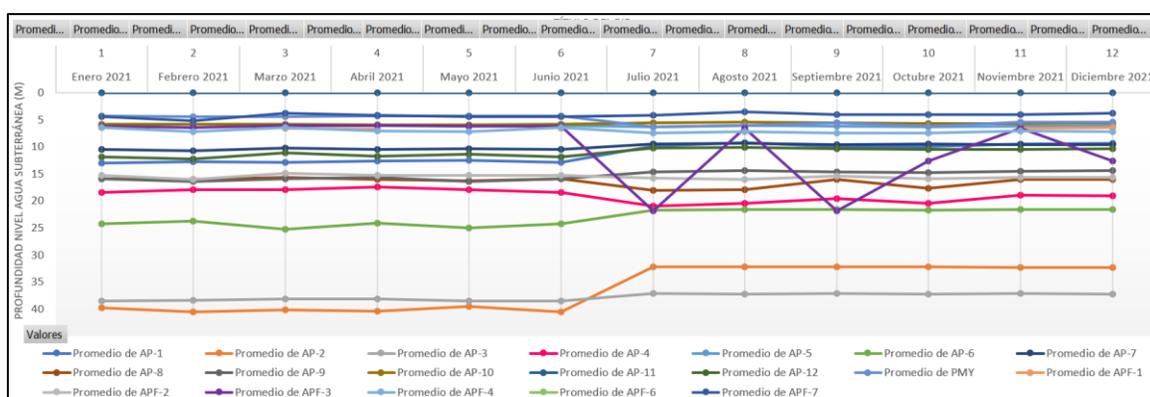


año hidrológico no hay variaciones importantes y las oscilaciones no necesariamente obedecen al comportamiento de la precipitación.

Los efectos de la temporada climática seca se observan solamente de manera puntual en algunos puntos, como por ejemplo en los piezómetros AP-4 y AP-8, en los cuales en la temporada seca hay una disminución de alrededor de 2 m en el nivel estático.

En el piezómetro APF-3 se observa un comportamiento fuera de la tendencia en los meses de julio y septiembre, posiblemente debido a errores en la medición, y en el piezómetro AP-2 el nivel estático asciende cerca de 8 m entre los meses de junio y julio, estos comportamientos deberán ser verificados en los posteriores monitoreos allegados por parte de los licenciarios en el marco de la estrategia.

Ilustración 19. Niveles estáticos Formación Neiva (Ngn) - Año 2021



Fuente: ANLA, 2024

5.3.4 Grupo Honda (Ngh)

Los datos de profundidad de niveles estáticos en el Grupo Honda (Ngh) son limitados, dado que en el marco de la estrategia regional solamente se analizan datos de mediciones llevadas a cabo en el segundo semestre del año 2021, realizadas en tres pozos captadores.

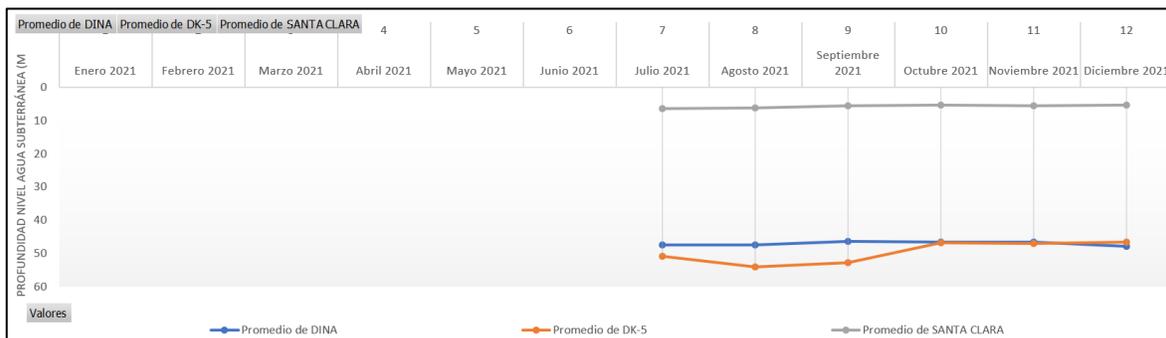
En la Ilustración 20 se puede observar que la profundidad de los niveles estáticos en esta unidad puede estar alrededor de los 40 o 50 m, no obstante, en ciertas condiciones el nivel puede ser más somero y estar en promedio a una profundidad de 6 m. Al igual que en la Formación Neiva (Ngn), para el Grupo Honda (Ngh) no se evidencia que a lo largo del año hidrológico existan variaciones importantes, las oscilaciones de cada punto son leves y no necesariamente obedecen al comportamiento de la precipitación, por lo cual no se puede ser concluyente.

Los efectos de la temporada climática seca se observan solamente de manera puntual en el pozo captador DK-5, dado que, en los meses de julio, agosto y septiembre, correspondientes con la temporada seca, el nivel estático es más profundo y asciende en octubre, noviembre y diciembre, que son los meses del segundo semestre en donde se presentan mayores precipitaciones.





Ilustración 20. Niveles estáticos Grupo Honda (Ngh) - Año 2021



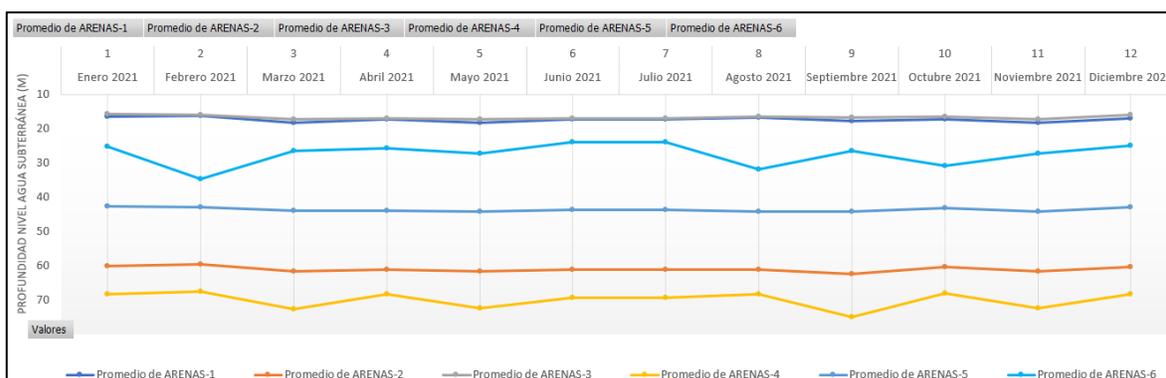
Fuente: ANLA, 2024

5.3.5 Formación Gigante (NgQgi)

Como se puede observar en la Ilustración 21, la profundidad de los niveles estáticos en la Formación Gigante varía ampliamente, pudiendo ir desde los 16 m (Pozo Arenas 1), hasta más de los 70 m (Pozo Arenas 4). De igual manera, es posible concluir que a lo largo del año hidrológico no hay variaciones importantes en los niveles estáticos de esta unidad y las oscilaciones no necesariamente obedecen al comportamiento de la precipitación.

Las mayores variaciones se presentan en los pozos Arenas 4 y Arenas 6, no obstante, son de algunos metros y no coinciden con el régimen de lluvias del área de la estrategia.

Ilustración 21. Niveles estáticos Formación Gigante (NgQgi) - Año 2021



Fuente: ANLA, 2024

5.3.6 Formación Seca (PgKs)

Respecto a la Formación Seca (KPs), en la Ilustración 22 se observa que las profundidades del nivel estático varían desde los 0,31 m (MSB-LAM0989-0009) hasta un poco más de los 9 m en su nivel más bajo (MSB-LAM0989-0006). Además de esto, se presentan variaciones importantes en los niveles reportados para esta unidad obedeciendo a un nivel estático





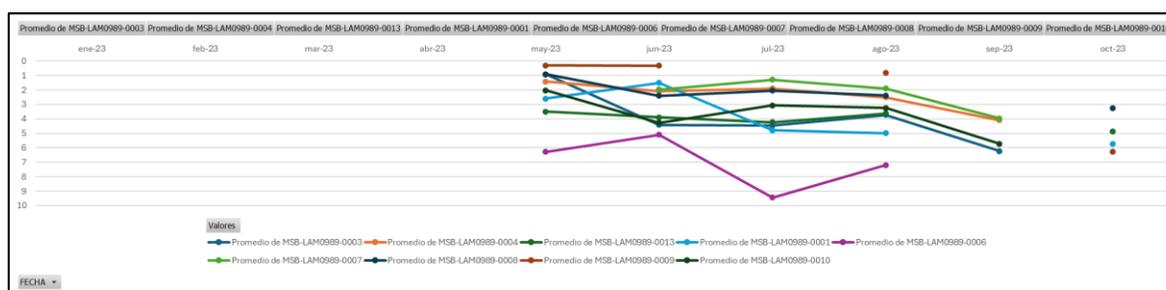
somero para el mes de mayo, y un nivel profundo a generalizado para los meses de septiembre y octubre.

De acuerdo con lo anterior, se deduce que, si bien para los meses de agosto y septiembre se espera un aumento en la profundidad de los niveles por la temporada seca, para el mes de octubre de 2023 se marcó más esta tendencia, lo que no se asocia con el régimen hidrológico esperado (inicio de temporada de lluvias).

Los piezómetros MSB-LAM0989-0001 y MSB-LAM0989-0006 cuentan con un comportamiento fuera de la tendencia para los meses de junio y julio. En este sentido, es necesario que se verifique este comportamiento en los posteriores monitoreos entregados por los licenciarios en el marco de la presente estrategia para definir la causalidad de las mediciones.

Es necesario enfatizar que estos datos corresponden a un análisis inicial directamente relacionado con la cantidad de información disponible en el marco de la presente estrategia.

Ilustración 22. Niveles estáticos Formación Seca (KPGs)- Año 2023



Fuente: ANLA, 2024

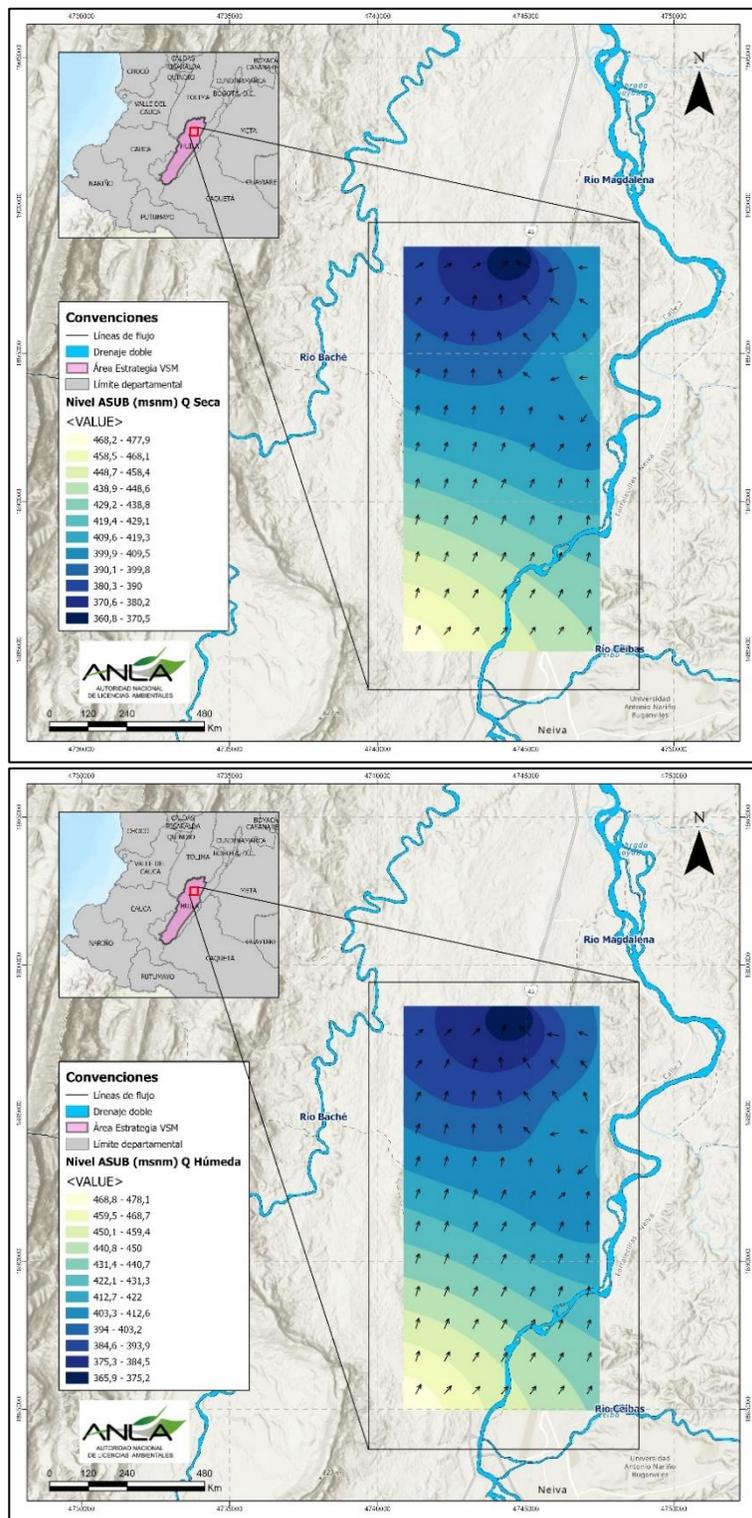
Además de lo anterior, se realizó un ejercicio análisis geoestadístico, a partir de los registros de los niveles estáticos, para determinar la profundidad y distribución espacial de la superficie piezométrica de los acuíferos constituidos por las formaciones geológicas neógenas que se reconocen en el área de estudio y que cuentan con información completa para este ejercicio (formaciones Neiva y Honda Superior), por medio de la técnica de interpolación de Kriging.

Teniendo en cuenta lo anterior, se identificó la superficie piezométrica a partir de los registros de niveles piezométricos para las campañas de temporada seca y húmeda realizadas en el año 2021, debido a que para estos periodos se cuenta con una cantidad de datos suficiente para lograr realizar el análisis adecuado (**Ilustración 23**). Es de anotar que, debido a que el área de la estrategia es extensa, el marco de análisis de define hacia el norte, donde se localizan los proyectos que hacen parte de esta red de monitoreo. Si bien el análisis no define el comportamiento del área total de la estrategia, sí permite contar con una aproximación al comportamiento de la piezometría y el flujo del agua subterránea en la zona donde se concentran los proyectos licenciados, por lo cual, corresponde a un insumo que permite



fortalecer análisis de carácter regional que se realicen desde las diferentes autoridades ambientales.

Ilustración 23. Piezometría y direcciones de flujo – Acuíferos neógenos, época seca (arriba) y época húmeda (abajo)



Fuente: ANLA, 2024



A partir de la **Ilustración 23** se puede identificar el carácter confinado de los acuíferos de las unidades cenozoicas evaluadas (Formación Neiva y Formación Honda Superior) debido a que el nivel estático oscila entre los 5.5 y los 47 metros de profundidad. Además de esto, las isopiezas y líneas de flujo nos permiten reconocer una dirección de flujo del agua subterránea en dirección sur-norte, que coincide con la dirección de flujo con los drenajes principales de la zona (río Magdalena y río Baché).

Finalmente, de manera preliminar, se evidencia condiciones de flujo similares para la época seca y para la época húmeda, lo que sugiere que estos acuíferos no son influenciados de manera directa por el régimen de lluvia anual, conclusión soportada además por el carácter confinado identificado.

Es necesario intensificar la medición de niveles estáticos en todos los proyectos de manera que nos permita aumentar el área de análisis, y así identificar tendencias claras asociadas a la variación de la superficie piezométrica y la dirección de flujo para las diferentes temporadas del año.

5.4 pH

El pH en todos los puntos de agua subterránea que monitorean las unidades geológicas del Terciario (formaciones Gigante, Neiva y Honda) independientemente de la época climática se mantiene en el rango entre 7 y 9 unidades, tendiendo más hacia la neutralidad las muestras de la Formación Neiva, así se encuentren mezcladas con agua del Cuaternario y hacia la alcalinidad las muestras del grupo Honda.

En los depósitos cuaternarios los valores de pH oscilan siempre en el rango ácido entre 4 y 6,9 unidades, presentándose los valores más bajos principalmente en las Terrazas Pumíticas durante la época seca, debido posiblemente a una mayor disolución de los minerales de origen volcánico que pueden contribuir a la acidez debido al descenso del volumen de recarga en esta época.

La Formación Seca mantiene el comportamiento del pH estable en el rango ácido entre 4 y 6,9 unidades en todas las épocas climáticas, debido posiblemente a que sus fuentes de recarga no son directas, es decir hay un mayor trayecto de tránsito y tiempo de residencia del agua en la roca.

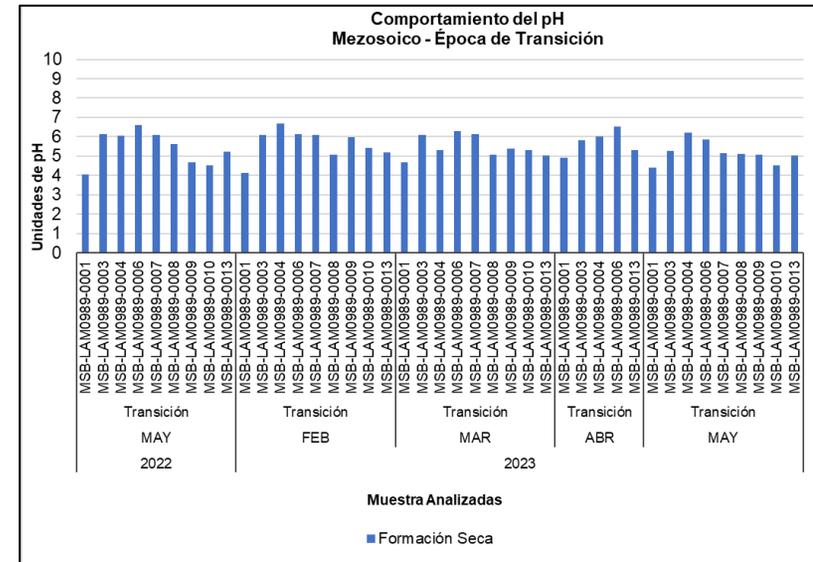
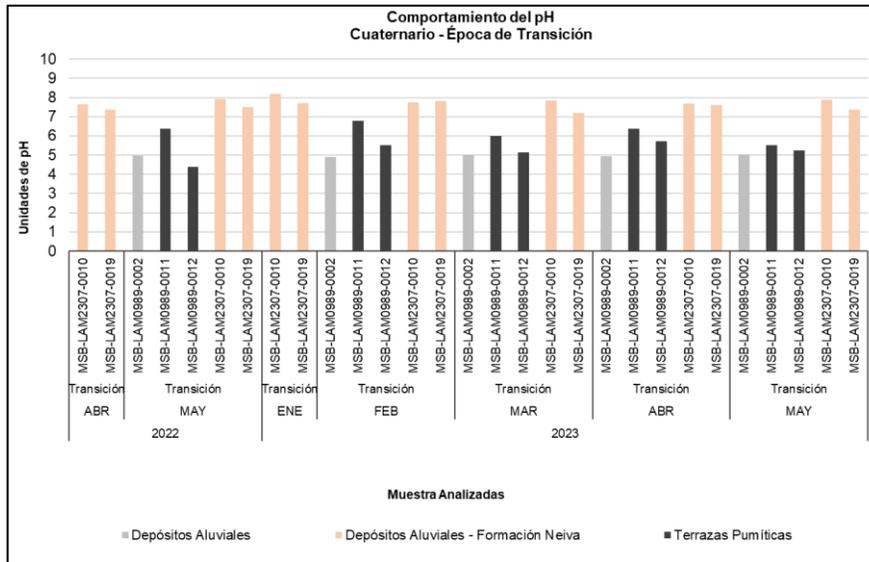
En la Formación Saldaña el agua muestreada en época húmeda presenta pH neutros que tienden hacia la alcalinidad en periodo seco, mientras que en la Formación Monserrate en temporada húmeda los pH son levemente ácidos (6 unidades) y aumentan hacia la neutralidad en época seca; cómo se puede observar en las dos unidades en los tiempos de menor recarga el agua tiende a aumentar los valores de potencial de hidrogeno debido probablemente a una mayor disolución de minerales presentes en la roca.

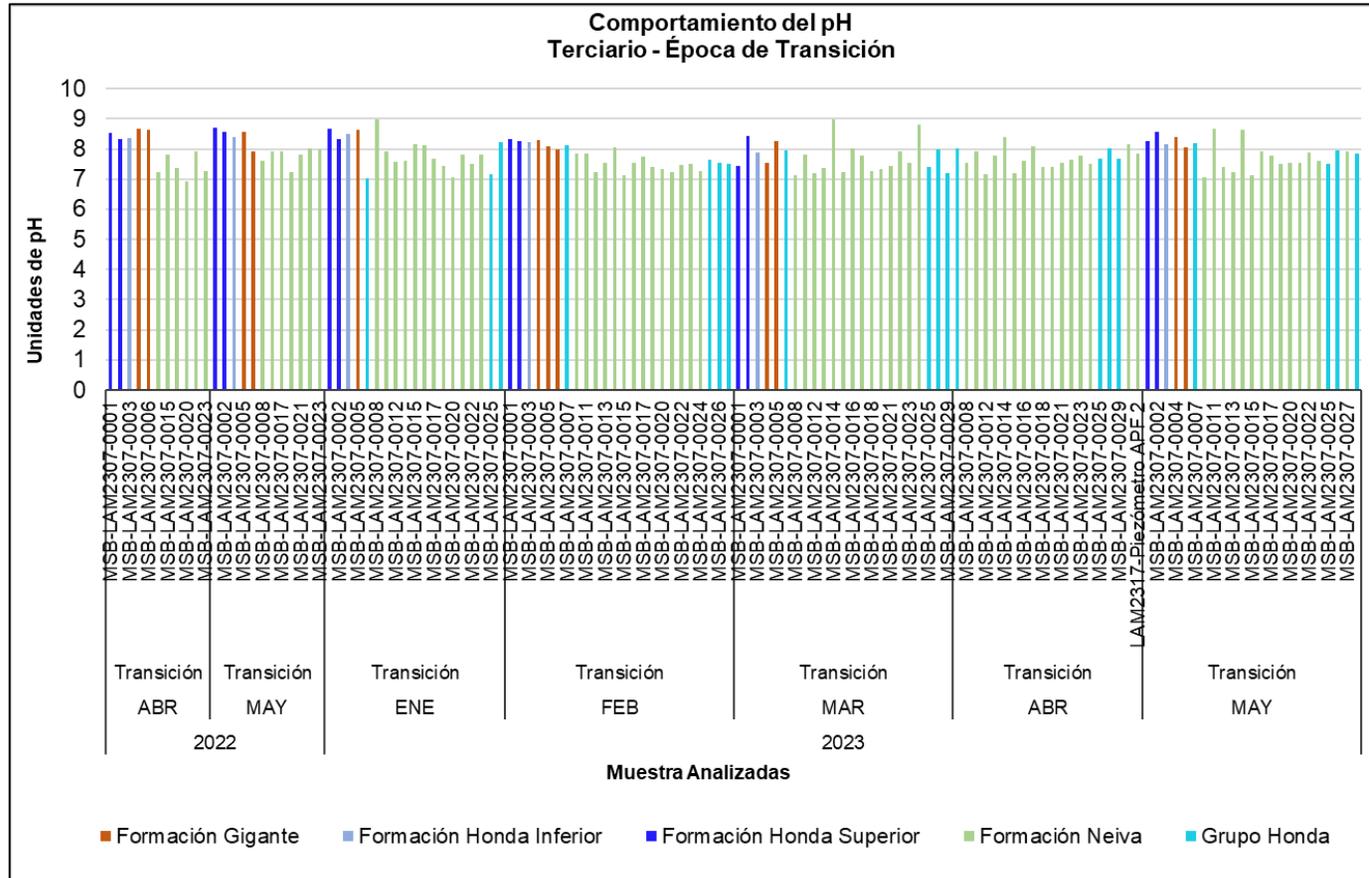


Varios piezómetros que captan principalmente de los depósitos cuaternarios y la Formación Seca presentan valores de pH por debajo al límite inferior establecido de 6,5 unidades en el Artículo 4 de la Resolución 2115 de 2007 para consumo humano, por lo cual si se requiriese el uso del agua es esas zonas para tal fin sería necesario realizar tratamiento químico previamente. Por lo demás, el comportamiento de este parámetro se encuentra acorde con las condiciones naturales del medio asociado directamente a la composición litológica de las unidades por donde fluye el agua.



Ilustración 24. pH - temporada de transición



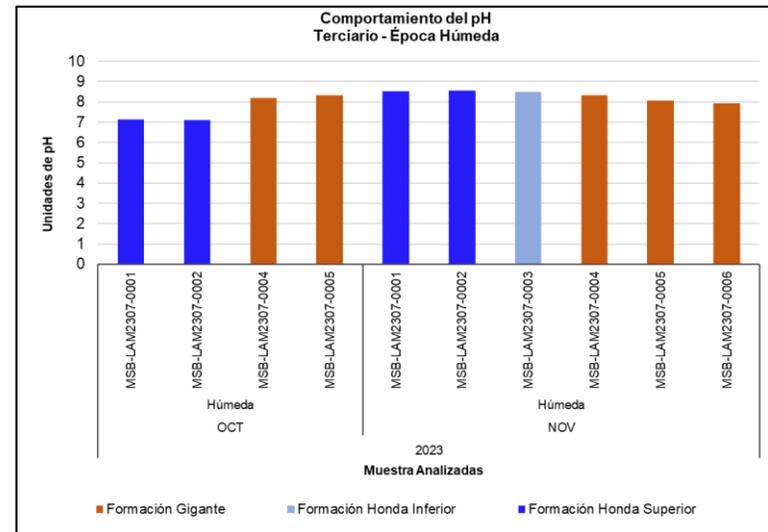
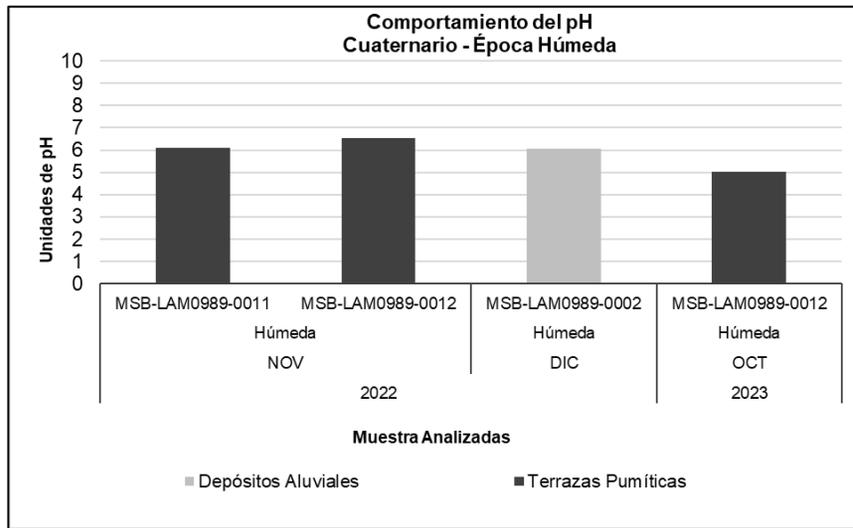


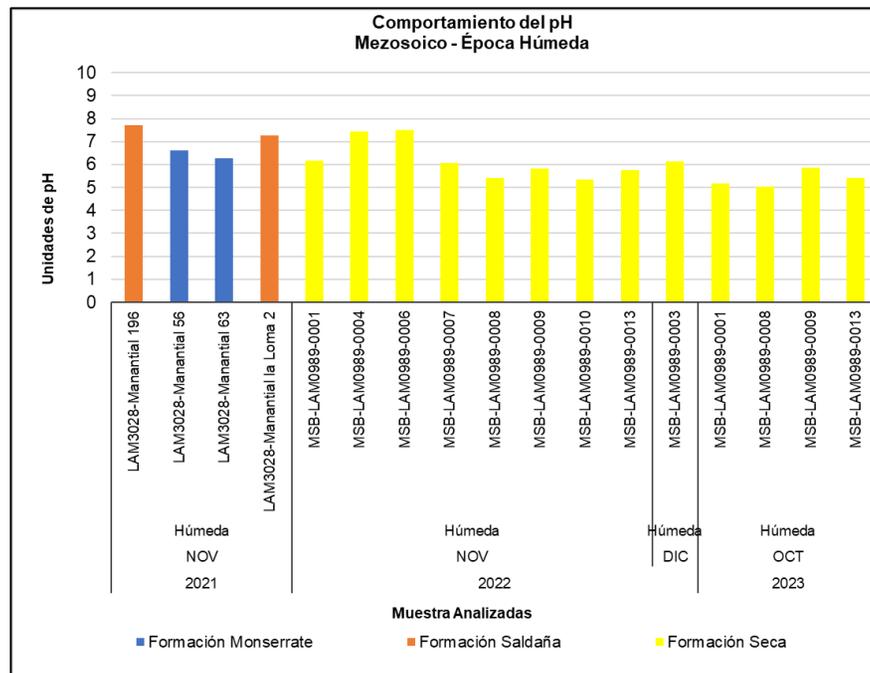
Fuente: ANLA, 2024





Ilustración 25. pH - temporada húmeda



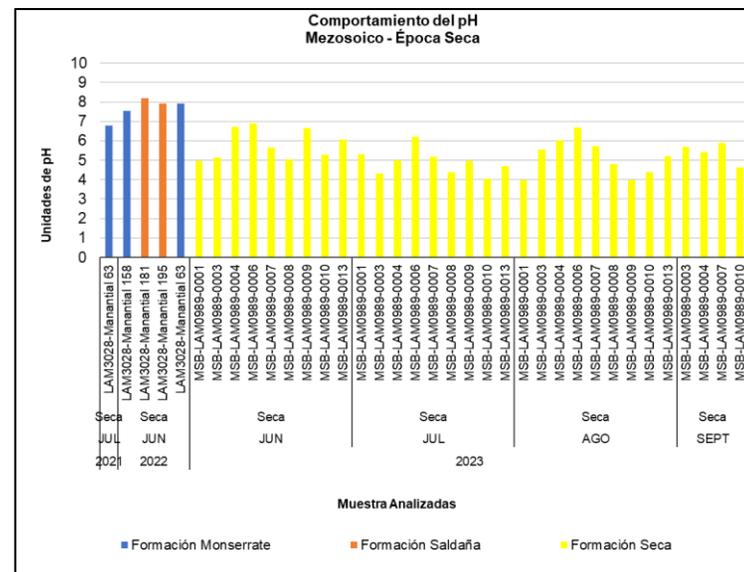
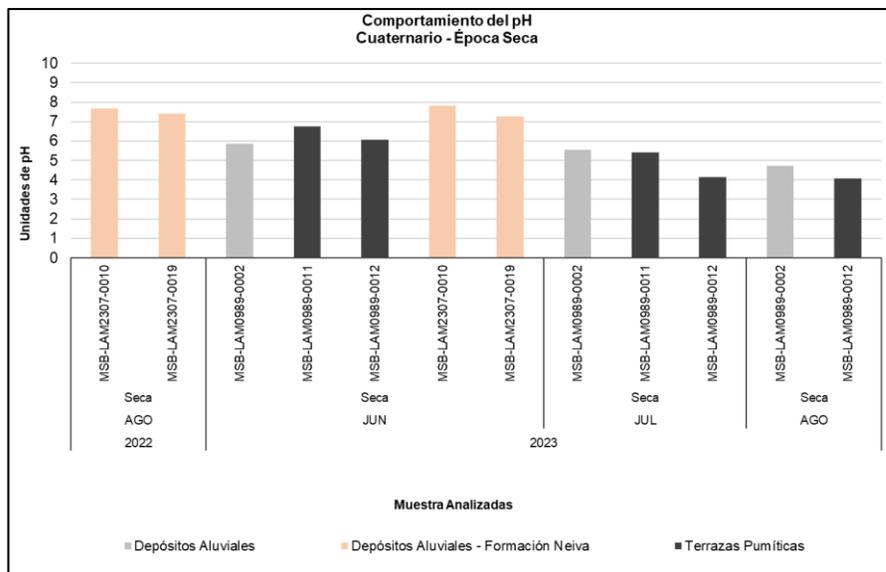


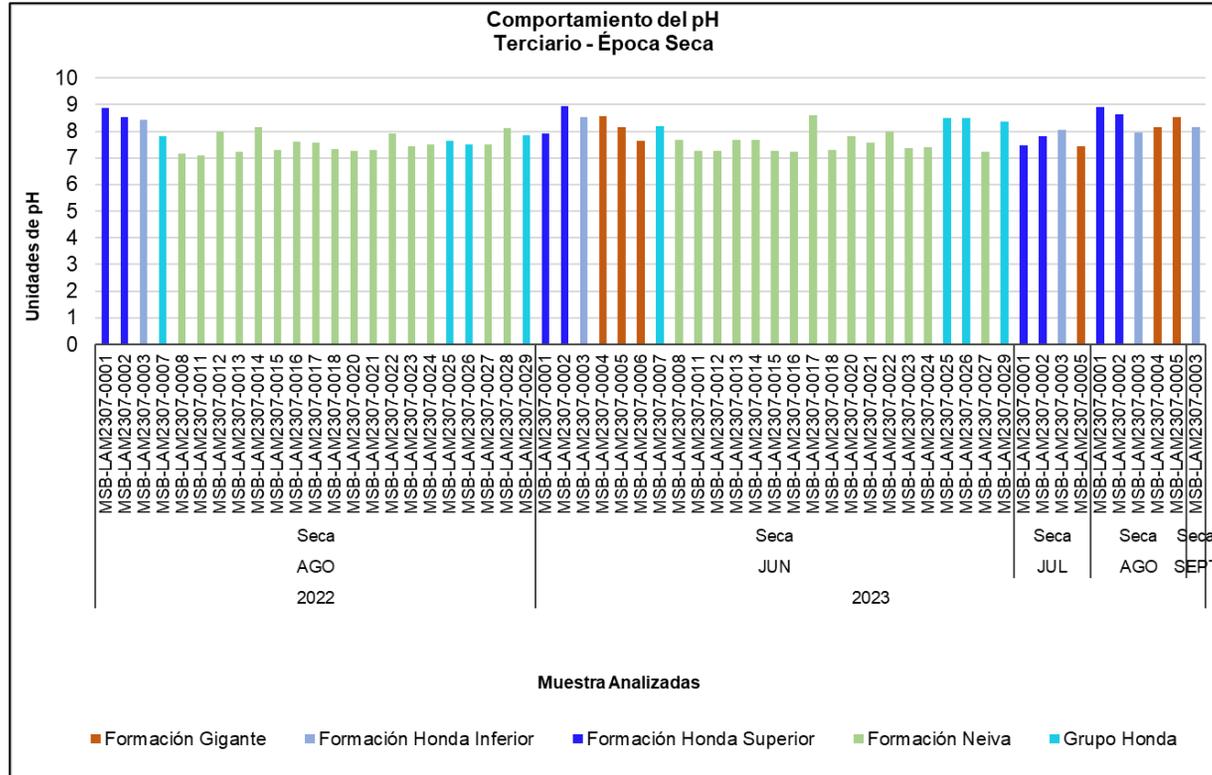
Fuente: ANLA, 2024





Ilustración 26. pH - temporada seca





Fuente: ANLA, 2024



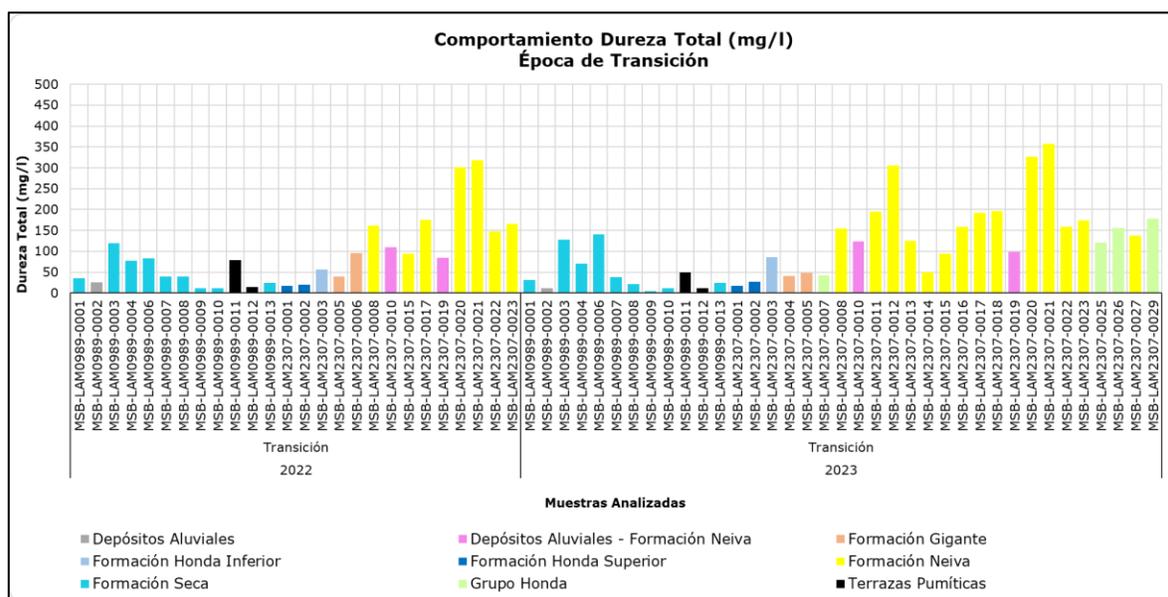


5.5 Dureza total

En todos los manantiales y pozos profundos monitoreados que captan las formaciones Monserrate, Saldaña, Honda y Gigante, para las tres temporadas climáticas monitoreadas (Ilustraciones 27, 28 y 29), el valor reportado se encuentra por debajo de 300 mg/l, que es el valor máximo estipulado en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 - *características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana*.

La anterior condición no se cumple en dos (2) y tres (3) piezómetros que captan la Formación Neiva (Ngn) en las temporadas seca y transición respectivamente y otros dos (2) piezómetros de las formaciones Honda y Seca para la época de verano; en estos puntos durante las épocas mencionadas el agua se clasifica como dura a muy dura, posiblemente debido a que en esos periodos el agua reside por más tiempo en la roca, de tal manera que a menor disolución se facilita una mayor de concentración de sales en el agua. Es importante mencionar que, en esos puntos de agua, donde se identificaron aumentos en las concentraciones de dureza, solo se monitorea la calidad del recurso hídrico sin hacer uso de este.

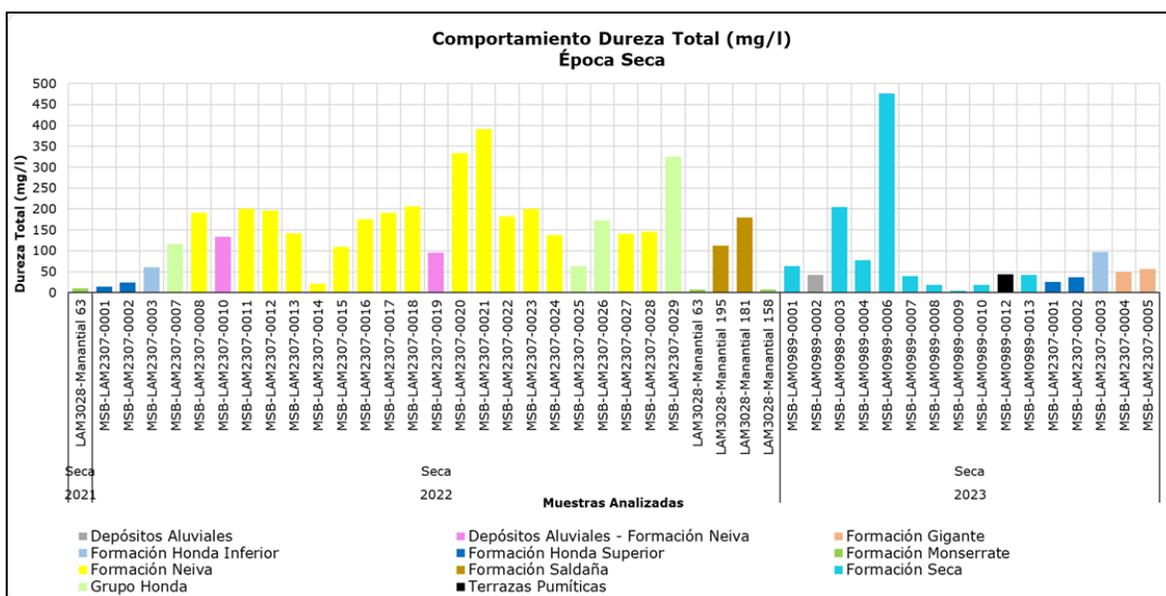
Ilustración 27. Dureza total - temporada de transición



Fuente: ANLA, 2024

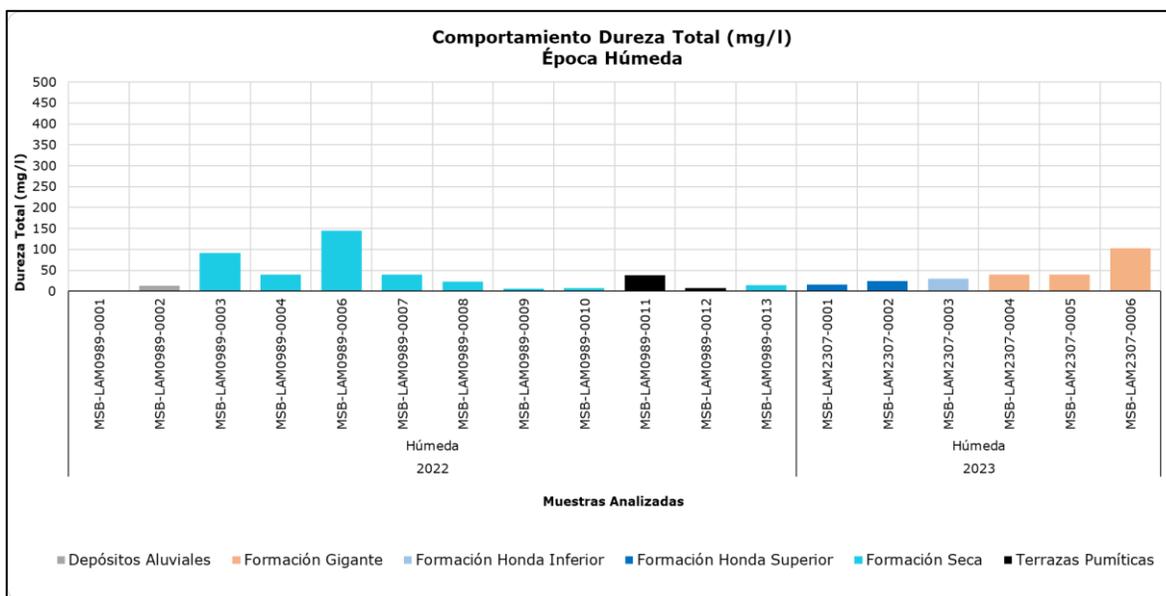


Ilustración 28. Dureza total- temporada seca



Fuente: ANLA, 2024

Ilustración 29. Dureza total - temporada húmeda



Fuente: ANLA, 2024





5.6 Nitratos y nitritos

En el agua subterránea el nitrógeno puede aparecer en forma de amoníaco (NH_3), amonio (NH_4) y por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en nitritos (NO_2) y finalmente en nitratos (NO_3) que es la forma más usual y estable (De Miguel, 1999).

Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, o bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/L.

En el marco de la estrategia se solicita la cuantificación de nitratos, no obstante, en algunas campañas de monitoreo algunos proyectos de manera adicional reportan la cuantificación de nitritos.

A partir de los monitoreos considerados en el presente análisis regional, se evidenció que en todas las campañas de monitoreo (temporadas seca, húmeda y transición) realizadas por los proyectos que están reportando información en el marco de la estrategia, por lo general las concentraciones de nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2) son inferiores al límite de cuantificación establecido por los métodos analíticos empleados por el laboratorio, por ende, a nivel regional los niveles de carga orgánica son bajos y no alteran las condiciones de calidad de las aguas subterráneas.

Puntalmente, en el mes de mayo del año 2023 se cuantificó en el Piezómetro 4 (MSB-LAM0989-0011) una concentración de nitratos (NO_3) de 1,24 mg/L, y en el mes de mayo del año 2022 en el Piezómetro APF 3 (MSB-LAM2307-0021) una concentración de nitritos (NO_2) de 2,12 mg/L, lo que podría indicar procesos biológicos activos en el agua subterránea, asociados posiblemente a actividades antrópicas, no obstante, este aspecto deberá ser verificado en los seguimientos posteriores, de tal manera que se pueda establecer si estas concentraciones fueron puntuales o son continuas en las inmediaciones de los piezómetros mencionados.

Con base en lo anterior, no se evidencia que los parámetros nitritos y nitratos se encuentren presentes de forma apreciable en el agua subterránea a nivel regional, por ende, no se identifican situaciones asociadas a las condiciones de las rocas o a la degradación de materia orgánica que influyan de manera importante en la calidad del recurso hídrico subterráneo.





5.7 Diagramas de Piper

Mediante los diagramas de Piper se muestran las proporciones relativas de aniones y cationes en el agua subterránea, permitiendo identificar las facies hidroquímicas, es decir el tipo de agua de acuerdo con los iones presentes, y su evolución en el caso de contar con datos de diferentes temporadas climáticas, tal como es el caso de la presente estrategia.

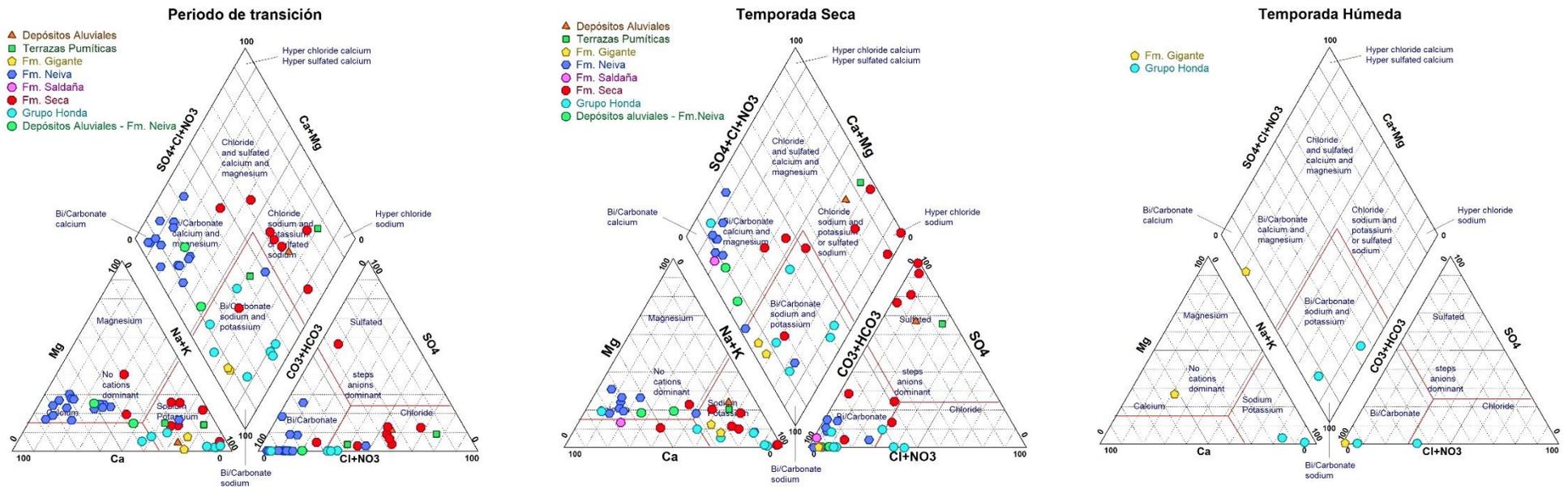
A continuación, se presenta un diagrama de Piper por cada una de las campañas de monitoreo (**Ilustración 30**), las cuales fueron realizadas en temporadas climáticas diferentes, de acuerdo con las condiciones de tiempo planteadas en la estrategia. Las muestras de agua fueron organizadas de acuerdo con la unidad geológica captada, realizando las siguientes agrupaciones:

- Depósitos aluviales (Qal)
- Terrazas pumíticas (Qt3)
- Formación Gigante – (NgQgi).
- Formación Neiva – (Ngn).
- Depósitos aluviales – Formación Neiva (Qal-Ngn).
- Grupo Honda – (Ngh).
- Formación Seca (KPgs)
- Formación Saldaña (Js)





Ilustración 30. Diagramas de Piper por cada temporada climática - Monitoreo años 2022 y 2023



Fuente: ANLA, 2024



5.7.1 Temporada de transición

Para el análisis de los diagramas de Piper en la temporada climática de transición, se tomaron los monitoreos realizados en las campañas del mes de mayo de los años 2022 y 2023, los cuales permiten identificar tendencias en la composición química de las aguas subterráneas para las unidades analizadas. En este sentido, a continuación, se enlistan los hallazgos observados:

- Para esta temporada climática se cuenta con un monitoreo en los depósitos aluviales (Qal), el cual representa una facie hidroquímica de tipo clorurada sódica.
- En cuanto a la unidad cuaternaria de Terrazas Pumíticas (Qt3) se observa la presencia de agua bicarbonatada sódica y clorurada sódica, para las dos muestras reportadas.
- Para la Formación Gigante (NgQgi), existe una clara predominancia del anión bicarbonato y el catión sodio, dando como resultado una clasificación hidrogeoquímica de tipo bicarbonatadas sódicas.
- La unidad geológica con mayor número de muestras en esta temporada climática es la Formación Neiva (Ngn) con 15 registros. Para esta unidad se evidencia una predominancia clara del catión y anión de calcio y bicarbonato, respectivamente, lo que indica aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas. En este grupo solamente una muestra de agua resultó ser de tipo bicarbonatada sódica.
- La mezcla de aguas de los Depósitos Aluviales – Formación Neiva presenta una composición hidrogeoquímica de tipo bicarbonatada cálcica y magnésica.
- El Grupo Honda (Ngh) presenta una clara predominancia del anión bicarbonato y el catión sodio, de manera que el agua se encuentra en una facie hidroquímica de tipo bicarbonatada sódica.
- La Formación Seca (KPgs), con el segundo mayor registro de muestras, tiene como anión y catión predominantes el cloro y el sodio, respectivamente; por lo cual el agua subterránea se clasifica como clorurada sódica. A pesar de esto, se presentan tres muestras que cuentan con facies hidroquímicas diferentes: bicarbonatada sódica (MSB-LAM0989-0007), bicarbonatada cálcica y magnésica (MSB-LAM0989-0006), y sulfatada cálcica y magnésica (MSB-LAM0989-0004).

5.7.2 Temporada seca

Para la temporada seca se consideraron los monitoreos de las dos campañas llevadas a cabo en el mes de agosto de los años 2022 y 2023. De acuerdo con la información recolectada, se pueden observar las siguientes características:

- Para los depósitos aluviales (Qal) se determinó la predominancia de sodio como catión y sulfato como anión, resultando en aguas subterráneas de tipo sulfatada sódica.



- De manera similar a los depósitos aluviales, las Terrazas Pumíticas (Qt3) presentan una facie hidroquímica de tipo sulfatada sódica.
- Por su parte, la Formación Gigante (NgQgi) el catión y el anión predominantes son el sodio y el bicarbonato, respectivamente, contando con aguas de composición bicarbonatada sódica, de manera similar a lo reportado en el periodo de transición.
- La Formación Neiva (Ngn) en esta temporada nuevamente cuenta con un mayor número de muestras de agua subterránea, manteniendo la misma composición hidrogeoquímica que presentó en el periodo de transición, existiendo una tendencia muy clara hacia aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas, con algunas excepciones de tipo bicarbonatada sódica.
- La mezcla de aguas de los Depósitos Aluviales – Formación Neiva presenta una composición hidrogeoquímica de tipo bicarbonatada cálcica y magnésica, de manera similar al periodo de transición.
- El Grupo Honda (Ngh) también mantiene una clara composición hidrogeoquímica hacia aguas de tipo bicarbonatadas sódicas, a excepción de una muestra de agua que resultó ser de tipo bicarbonatada cálcica.
- La Formación Seca (KPgs) no presenta una tendencia claramente definida respecto a la clasificación y composición hidroquímica de las aguas subterráneas. Sin bien el catión predominante es el sodio (a excepción de una muestra con predominancia de calcio), el anión predominante varía entre bicarbonato y sulfato. De acuerdo con lo anterior, la clasificación hidroquímica corresponde a aguas sulfatadas sódicas principalmente, así como bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas.
- Para esta temporada, se cuenta con un único registro para la formación Saldaña (Js), con agua subterránea de tipo bicarbonatada cálcica.

5.7.3 Temporada húmeda

Respecto a la temporada húmeda, se cuenta con los monitoreos realizados en el periodo climático húmedo del año 2022 (mes de noviembre), para la Formación Gigante (NgQgi) y el Grupo Honda (Ngh). En este periodo se pueden observar las siguientes características:

- La Formación Gigante (NgQgi) cuenta con una única muestra para la temporada húmeda con una clasificación hidrogeoquímica de tipo bicarbonatada cálcica.
- Al igual que para la temporada de transición y el periodo seco, en el periodo húmedo el agua subterránea almacenada en el Grupo Honda (Ngh) mantiene una clara composición hidrogeoquímica hacia aguas de tipo bicarbonatadas sódicas.

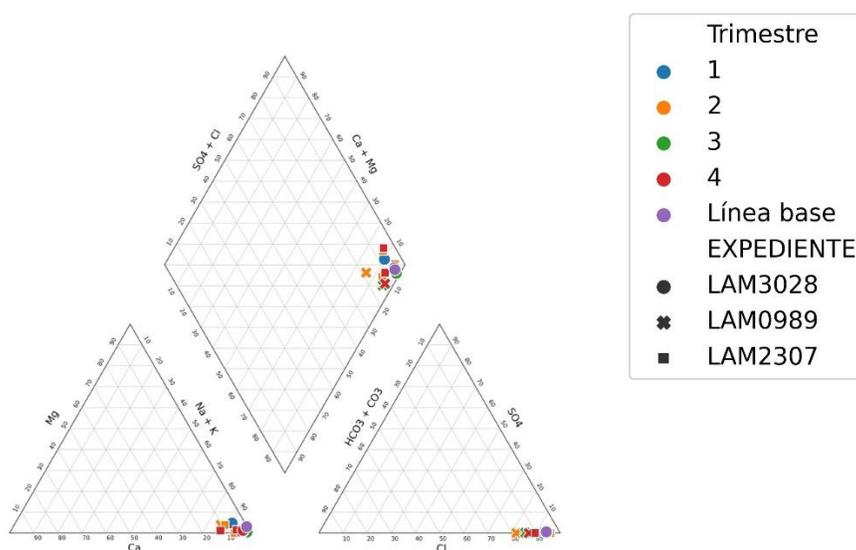
De acuerdo con los análisis anteriores y lo observado en los diagramas de Piper se puede concluir que las unidades cuaternarias correspondientes a los Depósitos Aluviales (Qal) y las Terrazas Pumíticas (Qt3) presentan variaciones en su composición geoquímica pasando de tener una composición clorurada sódica en el periodo de transición a sulfatada sódica en la temporada seca.

Respecto a las unidades neógenas (Formación Gigante (NgQgi), Formación Neiva (Ngn) y el Grupo Honda (Ngh)) se determina que mantienen su composición hidrogeoquímica estable durante el año hidrológico, es decir no presentan variaciones importantes en los iones disueltos en el agua relacionadas con la variación climática.

Finalmente, la Formación Seca (KPgs) es la que presenta mayor variación composicional, tanto entre temporadas, como para las muestras tomadas en un mismo periodo, destacando la clara predominancia del anión cloruro para el periodo de transición, que pasa a ser reemplazado por el sulfato y el bicarbonato en la temporada seca.

Respecto a las aguas de formación, en la **Ilustración 31** se presenta el diagrama de Piper para las aguas residuales industriales monitoreadas en el año 2022 en los proyectos que actualmente integran la estrategia regional. Se evidencia que la totalidad de los muestreos corresponden a aguas de tipo cloruradas sódicas, típicas de aguas de formaciones profundas, con largos tiempos de residencia y alta concentración de sales disueltas, que hidrogeoquímicamente no tienen relación con la caracterización de las aguas subterráneas monitoreadas por la estrategia, correspondientes con niveles más someros. En tal sentido, es posible afirmar que no existe una conexión hidráulica entre los acuíferos aprovechables y las formaciones acuíferas receptoras de aguas de producción.

Ilustración 31. Diagrama de Piper - aguas de producción



Fuente: ANLA, 2024



5.8 Diagramas de Stiff

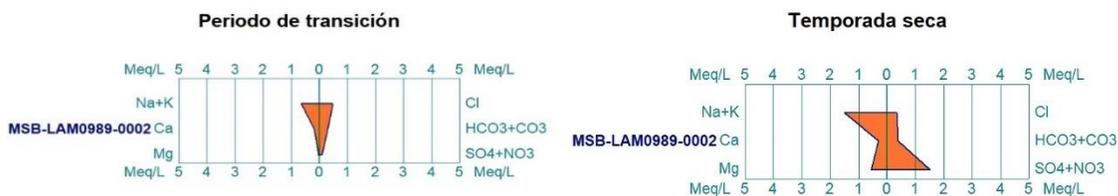
Los diagramas de Stiff son una representación gráfica de la composición de los iones mayoritarios en una muestra de agua subterránea, por lo tanto, permite visualizar diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, además, simultáneamente permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

A continuación, se presentan los diagramas de Stiff por cada una de las unidades geológicas captadas y analizadas en el presente informe:

5.8.1 Depósitos Aluviales - Qal

Para los Depósitos Aluviales (**Ilustración 32**) solamente se registra un monitoreo para periodo de transición y otro para temporada seca para el año 2023. En estas campañas se confirma el paso de composición hidroquímica del agua subterránea de clorurada sódica en el periodo de transición a sulfatada sódica en la temporada seca. Además, se evidencia baja mineralización para las dos muestras, siendo ligeramente mayor para el periodo seco. Este comportamiento se asocia a la influencia directa de las precipitaciones en los acuíferos someros, siendo menor en la temporada seca, favoreciendo una mayor concentración de iones en el agua.

Ilustración 32. Diagramas Stiff – Depósitos Aluviales (Qal)



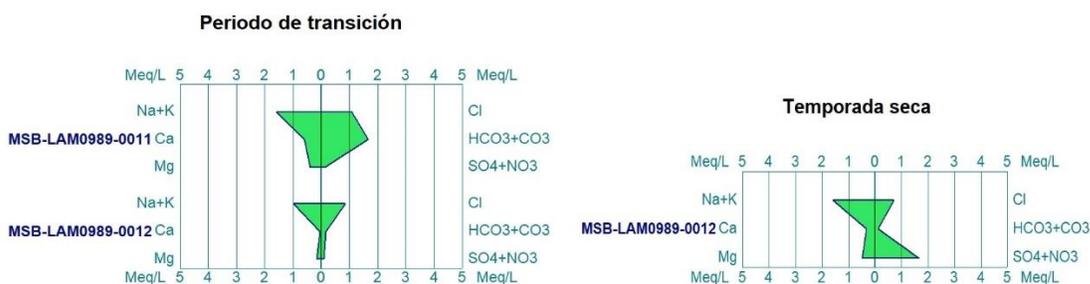
Fuente: ANLA, 2024

5.8.2 Terrazas Pumíticas - Qt3

Las Terrazas Pumíticas (**Ilustración 33**) presentan una variación entre la facie hidroquímica del agua subterránea entre el periodo de transición y la temporada seca, siendo clorurada sódica y sulfatada sódica, respectivamente, para el punto monitoreado en las dos temporadas. En cuanto al grado de mineralización, se observa una baja carga de iones similar en las dos campañas analizadas. Al igual que para la unidad anterior, este comportamiento se rige por la incidencia de las precipitaciones en los acuíferos someros.



Ilustración 33. Diagramas Stiff – Terrazas Pumíticas (Qt3)



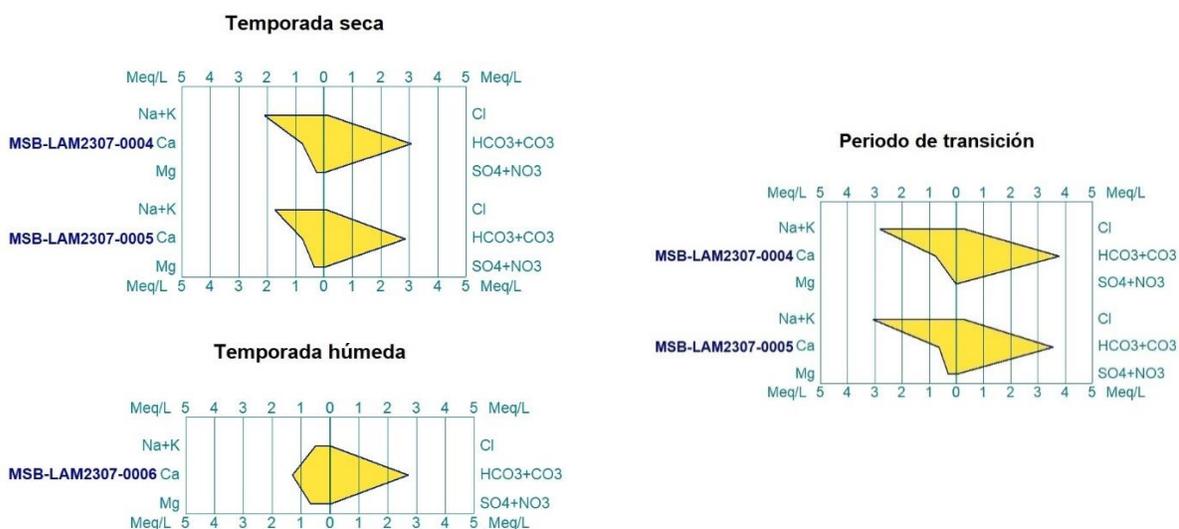
Fuente: ANLA, 2024

5.8.3 Formación Gigante – NgQgi

Para la Formación Gigante se presentan monitoreos para las tres temporadas: húmeda, seca y transición. A pesar de que la cantidad de datos es escasa, a partir de la información disponible se evidencia que el agua de esta formación es de tipo bicarbonatada sódica, con una excepción en el Pozo MSB-LAM2307-0006 en la temporada húmeda, cuya agua resultó ser de tipo bicarbonatada cálcica (Ilustración 34).

Adicionalmente, la información analizada nos indica que esta formación tiene una mineralización intermedia, siendo ligeramente mayor en el periodo de transición.

Ilustración 34. Diagramas Stiff - Formación Gigante (NgQgi)



Fuente: ANLA, 2024



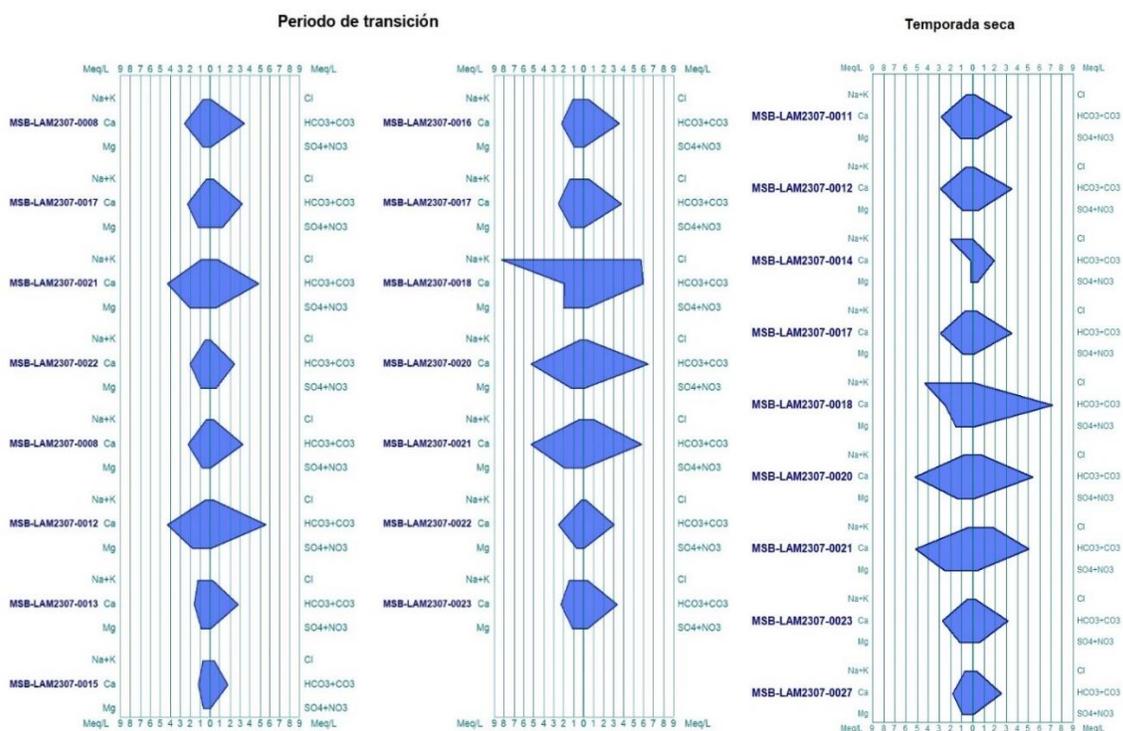
5.8.4 Formación Neiva – Ngn

Para la Formación Neiva solamente hay muestreos para el periodo de transición y la temporada seca, sin embargo, para cada campaña se cuenta con varios puntos monitoreados, lo que permite una mejor caracterización de este acuífero.

Hidrogeoquímicamente, a partir de la forma de los polígonos de los diagramas de Stiff (Ilustración 35) se puede evidenciar que el agua subterránea de esta formación es de tipo bicarbonatada cálcica, a excepción de algunos puntos que resultaron ser de tipo bicarbonatada sódica, para los dos periodos evaluados.

A nivel regional, para esta formación se evidencia una mineralización intermedia, no obstante, hay algunos puntos que presentan una concentración iónica más elevada, tales como los piezómetros MSB-LAM2307-0018, MSB-LAM2307-0020 Y MSB-LAM2307-0021, que se mantiene para las dos campañas monitoreadas. Esta mineralización puede asociarse a una menor influencia del régimen de precipitaciones para esta formación.

Ilustración 35. Diagramas Stiff - Formación Neiva (Ngn)



Fuente: ANLA, 2024

5.8.5 Grupo Honda – Ngh

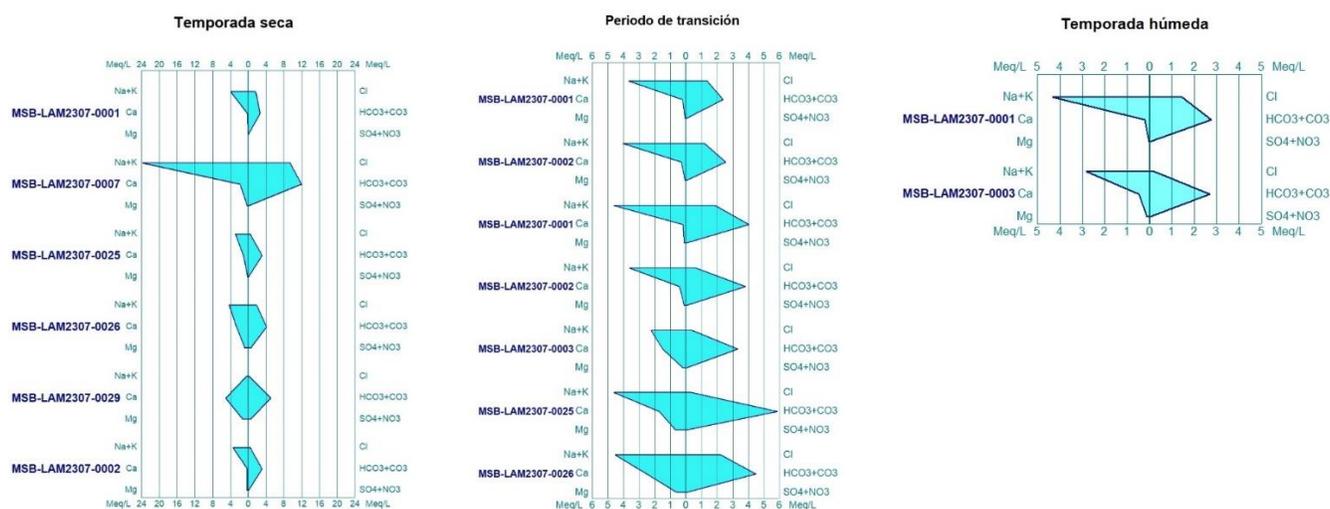
Dentro del año de monitoreo analizado en el presente informe, Grupo Honda (Ngh) cuenta con monitoreos en todas las temporadas climáticas analizadas. El agua subterránea de esta formación presenta una tendencia clara en su composición hidrogenoquímica, la cual es de tipo bicarbonatada sódica, con grados de mineralización intermedios (Ilustración 36).



En este punto es importante mencionar que, a pesar de que existe una tendencia general de mineralización intermedia, el piezómetro MSB-LAM2307-0007 presenta concentraciones de iones mayoritarios muy elevada, lo que se traduce en un muy alto grado de mineralización. De acuerdo con este registro, y basado en lo reportado en el Diagrama de Mifflin para este mismo punto, se deduce la presencia de un flujo de agua de tipo regional asociado.

Teniendo en cuenta que se encontró un registro fuera del comportamiento hidroquímico tendencial para esta formación, es necesario que los aspectos identificados de manera puntual sean verificados en campañas posteriores, de manera que sea posible identificar si son ocasionales, estacionales o permanentes.

Ilustración 36. Diagramas Stiff - Grupo Honda (Ngh)



Fuente: ANLA, 2024

5.8.6 Formación Seca – KPgs

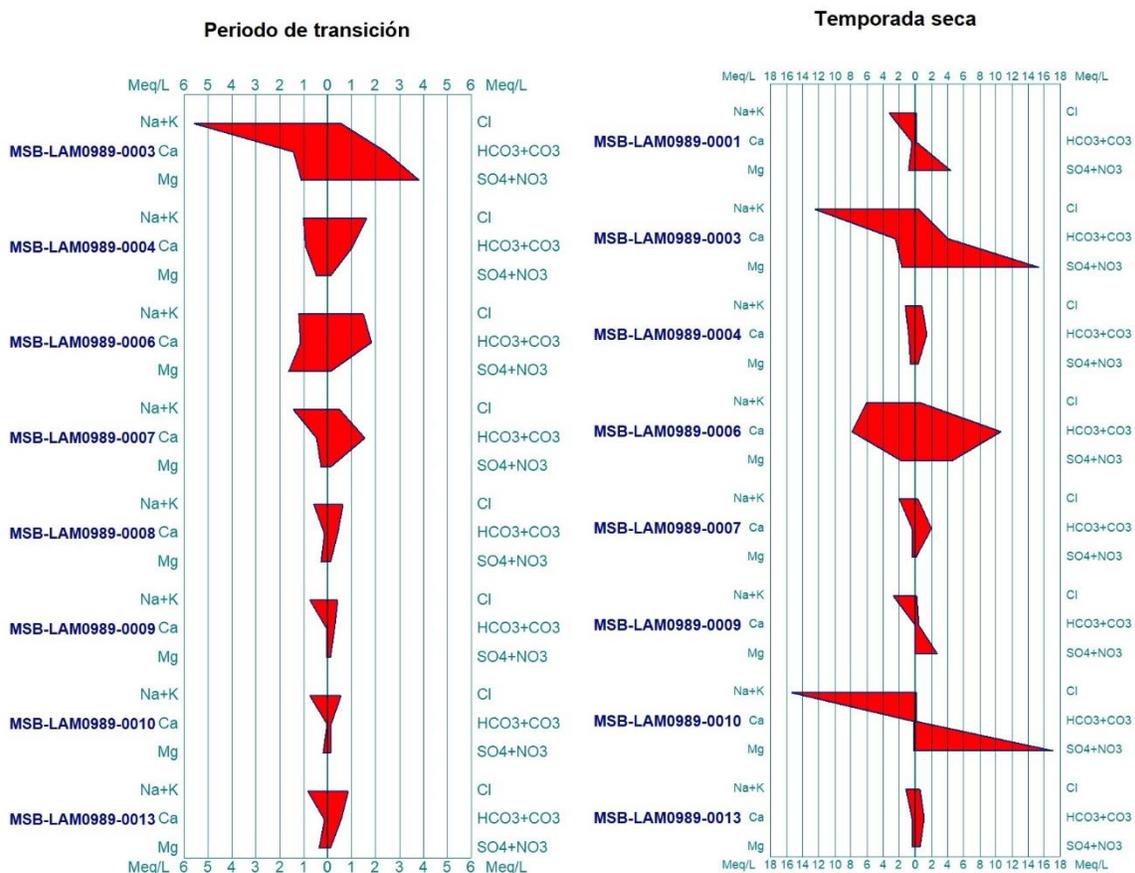
La Formación Seca (KPgs) cuenta con monitoreos para la temporada seca y el periodo de transición. En primer lugar, tal y como se evidenció en los diagramas Piper, la clasificación hidroquímica del agua subterránea para el periodo de transición es predominantemente clorurada sódica, mientras que en el periodo de transición es sulfatada y bicarbonatada cálcica.

Adicionalmente, respecto al grado de mineralización se pueden observar (Ilustración 37) que, para el periodo de transición, la unidad presenta agua subterránea con mineralización intermedia, sin embargo, para la temporada seca este grado de mineralización aumenta para todos los monitoreos, especialmente para los asociados a los piezómetros MSB-LAM0989-0003, MSB-LAM0989-0006 Y MSB-LAM0989-0010.

Este comportamiento evidenciado para los 3 piezómetros mencionados se asocia a un flujo de tipo intermedio y regional, de acuerdo con lo obtenido en los diagramas de Mifflin.

Finalmente, es necesario que para esta formación se verifique los registros obtenidos en los siguientes monitoreos de manera que sea posible identificar una clara tendencia de facie hidroquímica en el agua subterránea, y el grado de mineralización.

Ilustración 37. Diagramas Stiff – Formación Seca (KPGs)



Fuente: ANLA, 2024

5.8.7 Formación Saldaña – Js

La formación Saldaña cuenta con una sola muestra para la temporada seca que muestra un agua de tipo bicarbonatada cálcica con bajo grado de mineralización (Ilustración 38).

Ilustración 38. Diagramas Stiff – Formación Saldaña (Js)



Fuente: ANLA, 2024



Es importante mencionar que, en las formaciones Gigante, Honda y Neiva no se identificó ninguna muestra con agua de tipo clorurada sódica que pueda indicar una posible migración de fluidos (aguas de formación) a esos niveles.

Respecto a las aguas de formación, en la **Ilustración 39** se presentan los diagramas de Stiff para las aguas residuales industriales monitoreadas en el año 2022 en los proyectos que actualmente integran la estrategia regional. Es importante mencionar que de acuerdo con las concentraciones de los iones mayoritarios fue necesario manejar diferentes escalas para los 2 tipos de aguas analizadas, en el caso de los puntos de la estrategia el máximo establecido fue de 5 Meq/L, mientras que para las aguas de formación fue de 800 Meq/L.

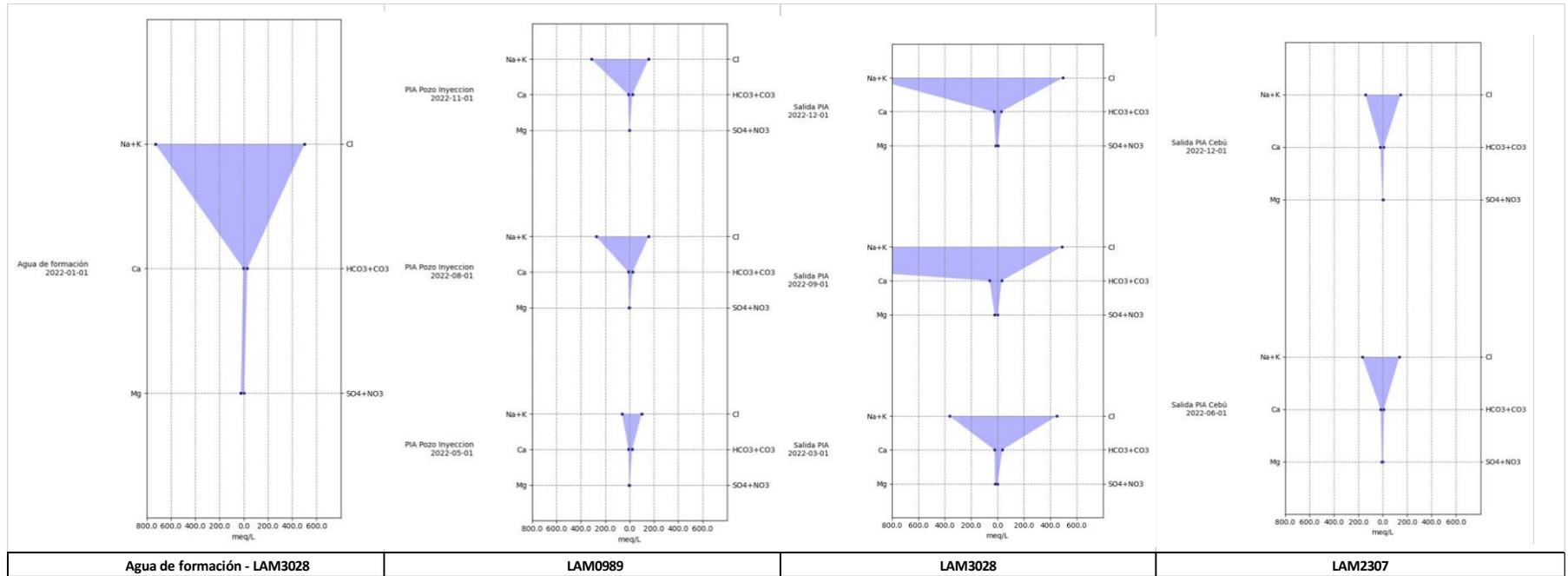
Se evidencia que la totalidad de los muestreos corresponden a aguas altamente mineralizadas, de tipo cloruradas sódicas, provenientes de formaciones profundas, con largos tiempos de residencia y alta concentración de sales disueltas, de composición similar con el agua de formación caracterizada en la línea base del proyecto Campo La Hocha (LAM3028); este aspecto es contrario a lo observado anteriormente para las aguas subterráneas monitoreadas por la estrategia, las cuales hidrogeoquímicamente presentan predominio de aguas bicarbonatadas cálcicas, correspondientes con flujos locales provenientes de la infiltración directa de la precipitación y conexiones hidráulicas con fuentes superficiales, en algunos casos condicionadas por la variabilidad climática.

Si bien la mayoría de los puntos de agua subterránea de la red de monitoreo regional se localizan en las áreas de influencia de los pozos inyectores, a partir de los monitoreos del año 2022 de las aguas residuales industriales se confirma que actualmente no se presenta una afectación sobre los niveles acuíferos más someros a causa de la actividad de inyección, toda vez que los monitoreos de los acuíferos superficiales hidrogeoquímicamente presentan comportamientos acordes con la dinámica del medio.





Ilustración 39. Diagramas de Stiff - aguas de producción



Fuente: ANLA, 2024



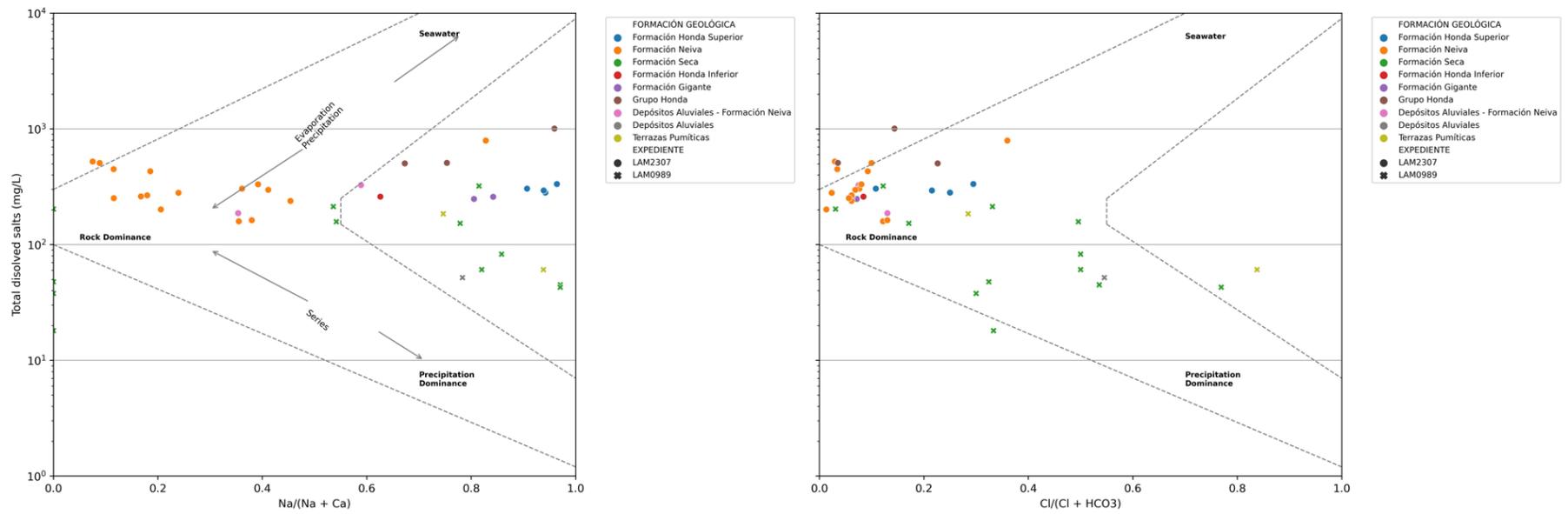
5.9 Diagramas de Gibbs

Con las concentraciones medidas de los iones mayoritarios se establecieron relaciones interparamétricas que indican la proporción de los iones Na^+ y Cl^- como indicadores de la concentración de sales en los puntos de agua monitoreados, esto, con el fin de establecer procesos geoquímicos predominantes que influyen en la calidad del agua subterránea. Para ello se generaron diagramas de Gibbs por cada temporada climática (seca, húmeda y transición), tal como se observan en las **Ilustraciones 40, 41 y 42**.





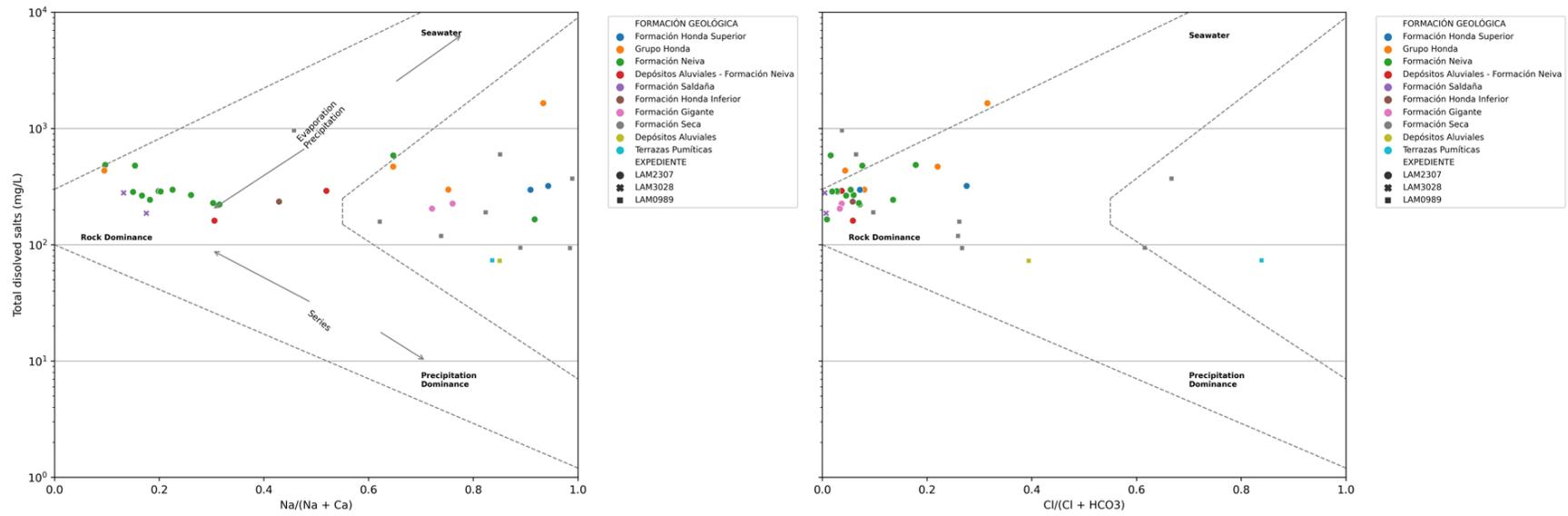
Ilustración 40. Diagrama de Gibbs - temporada de transición



Fuente: ANLA, 2024



Ilustración 41. Diagrama de Gibbs - temporada seca

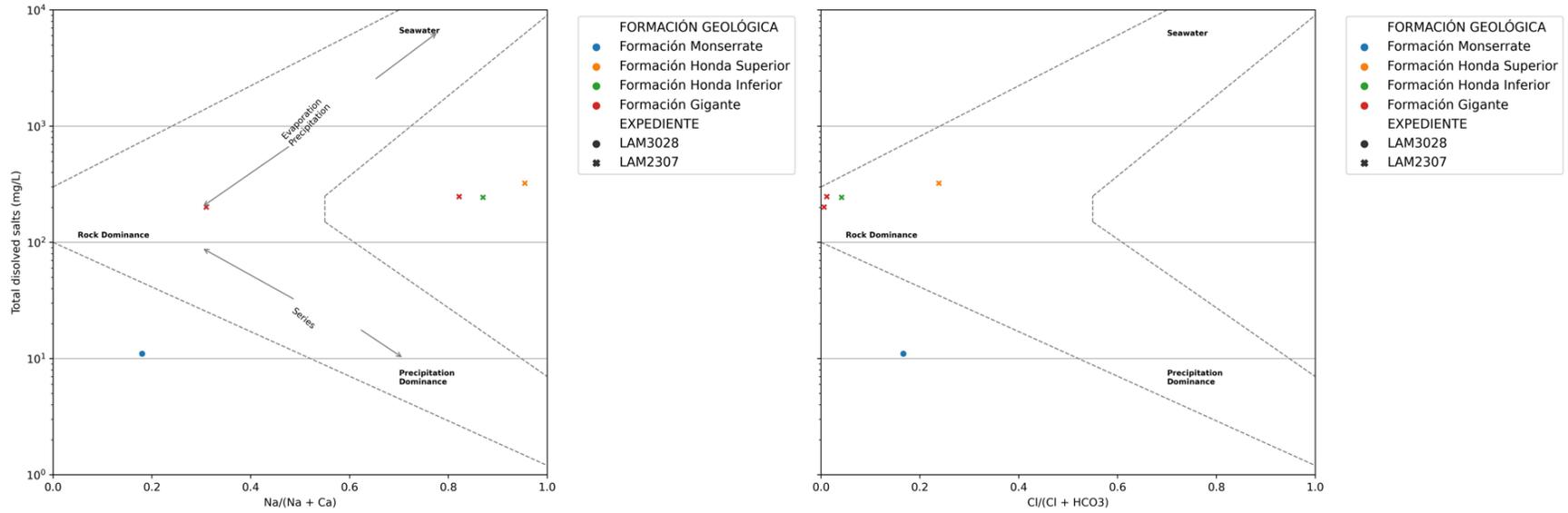


Fuente: ANLA, 2024

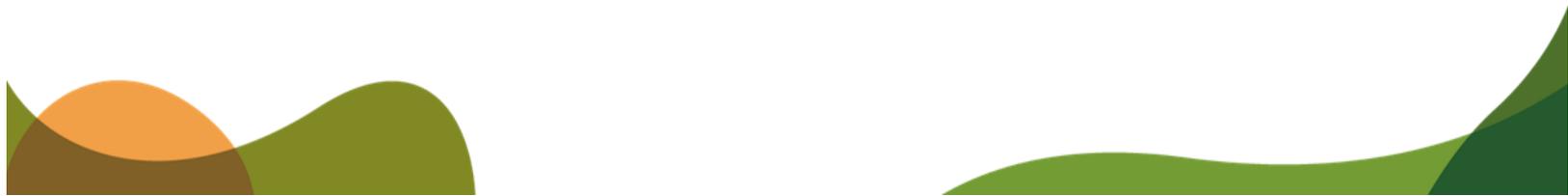




Ilustración 42. Diagrama de Gibbs - temporada húmeda



Fuente: ANLA, 2024





A partir de la interpretación de los diagramas de Gibbs, se observa a nivel general que, en las tres temporadas climáticas, independientemente de la unidad geológica, la presencia de los iones analizados proviene principalmente del proceso de interacción agua – roca, siendo este proceso el que prevalece en la química del agua.

Al hacer un análisis más detallado se evidencia que en la temporada seca (**Ilustración 41**) el contenido iónico del agua subterránea está influenciado por la composición de la roca almacenadora, por su parte, para la temporada húmeda (**Ilustración 42**), si bien sigue prevaleciendo el mismo comportamiento, se observa que el agua de la Formación Monserrate (Km), a diferencia de los demás puntos, tiene un predominio en su composición relacionado con procesos de precipitación, asociándose más con agua superficial, aspecto que tiene sentido si se considera que los puntos de agua subterránea de esta formación corresponden con manantiales, los cuales provienen de flujos locales, con tiempos de residencia y recorridos cortos; dicha relación se corrobora con los bajos valores de conductividad eléctrica que se registraron para estos puntos.

En el periodo de transición (**Ilustración 40**), si bien predominan los procesos de interacción agua – roca, una característica particular es que la presencia de los aniones mayoritarios en la Formación Seca (KPgs) proviene principalmente de la precipitación meteórica, seguida de la interacción con el medio geológico.

Para la realización de los diagramas de Gibbs se emplearon solamente las muestras de agua subterránea que cumplieron con el porcentaje de error analítico, el cual fue establecido en las condiciones de modo de la estrategia de monitoreo regional, en ese orden de ideas es importante destacar que para las tres temporadas climáticas se descartó un gran número de muestras que no cumplieron con el criterio establecido, para la temporada de transición solamente se consideraron el 34% de los muestreos y para las temporadas seca y húmeda este porcentaje correspondió con el 42 y 18% respectivamente; adicionalmente, es preciso aclarar que no es posible realizar una comparación entre épocas en algunos puntos de agua debido a que no todos fueron monitoreados en todas las campañas. Los aspectos mencionados anteriormente deberán ser objeto de requerimiento en los respectivos seguimientos ambientales de los proyectos involucrados, de tal manera que se pueda contar con un registro continuo de los puntos de agua subterránea que hacen parte de la estrategia, además de tener datos de calidad que sean representativos de las condiciones fisicoquímicas del recurso.

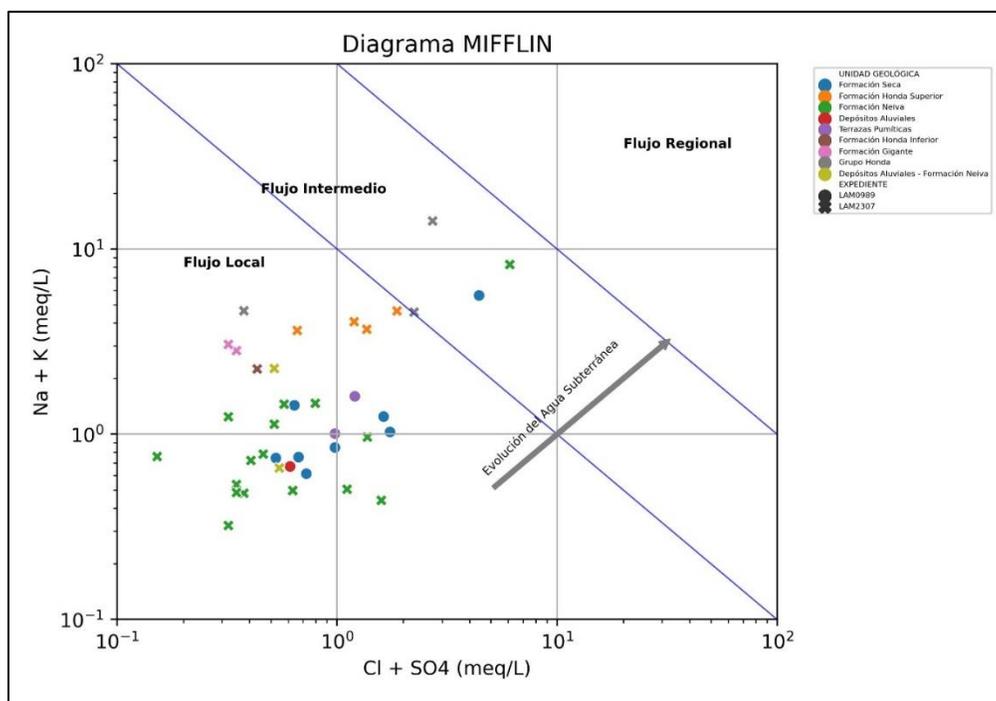
5.10 Diagramas de Mifflin

Este diagrama proporciona información sobre la evolución del agua subterránea con base a la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} a lo largo del flujo. El gráfico se subdivide en 3 secciones, determinando puntos de flujo local, intermedio y regional, siendo este último el más evolucionado y ligado a zonas de descarga.



En la temporada de transición (**Ilustración 43**), correspondiente al mes de mayo, se puede observar que la mayoría de los puntos monitoreados principalmente los relacionados con los Depósitos Cuaternarios y la Formación Gigante, captan agua de flujos locales; solamente tres (3) puntos extractores de las formaciones Honda, Seca y Neiva se localizan en el rango de flujos intermedios posiblemente relacionados con mayores profundidades de captación o zonas de recarga más distantes desde sus área de afloramiento por lo tanto corresponden con una mayor mineralización.

Ilustración 43. Diagrama de Mifflin- temporada de transición



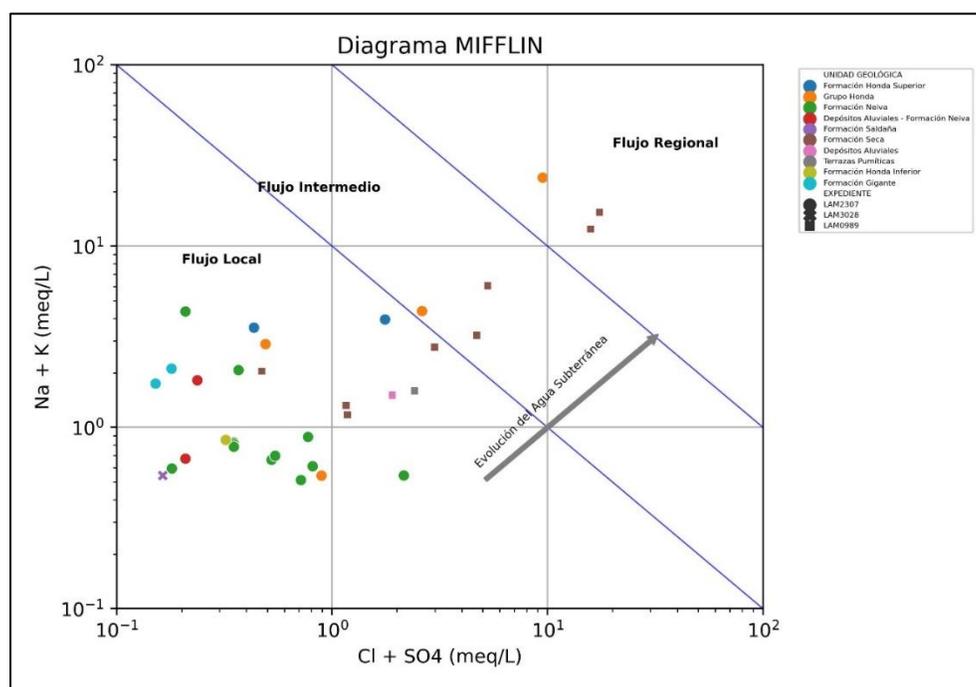
Fuente: ANLA, 2024

En los monitoreos realizados en temporada seca (**Ilustración 44**), se mantiene la captación de flujos locales por parte de los piezómetros, manantiales y pozos pertenecientes a las formaciones Gigante, Saldaña y los depósitos Cuaternarios.

Se identifican flujos regionales e intermedios en puntos que captan el agua subterránea del Grupo Honda (Ngh) correspondientes al Área de Producción Huila Norte (LAM2307) y piezómetros de la Formación Seca pertenecientes al campo Yaguará (LAM0989). Según lo expuesto en el diagrama Piper se observan muestras de estas mismas unidades geológicas y proyectos clasificadas como aguas de tipo bicarbonatadas sódicas (Grupo Honda – LAM2307) y cloruradas y/o sulfatadas sódicas para la Formación Seca – LAM0989, lo cual se relaciona directamente con el tipo de flujo identificado ya que para adquirir esa caracterización geoquímica el agua requiere de recorridos extensos y mayores tiempos de residencia en el acuífero.

No obstante, se requiere que el monitoreo se realice de manera sistemática en todos los puntos de agua durante el año hidrológico, de tal manera que sea posible establecer tendencias multitemporales que permitan identificar variaciones en la dinámica del agua subterránea a nivel regional; además, es importante conocer el diseño de todos los puntos de agua, con el objetivo de identificar con certeza la unidad geológica captada, lo cual se solicita por parte de esta autoridad a los proyectos.

Ilustración 44. Diagrama de Mifflin- temporada seca

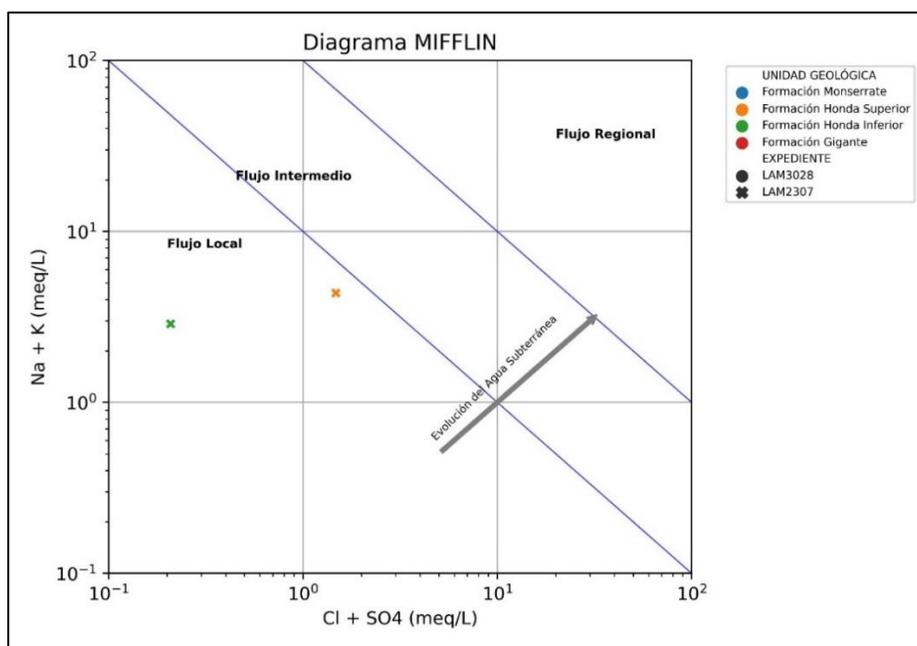


Fuente: ANLA, 2024

En la temporada húmeda (Ilustración 45), las dos únicas muestras que cumplieron con el porcentaje de error analítico correspondientes con puntos del proyecto Área de Producción Huila Norte que monitorean el Grupo Honda (miembros superior e inferior) captan flujos locales, se mantiene la relación entre el tipo de flujo y el tipo de agua identificado ya que se trata de aguas de tipo bicarbonatada cálcica y sódica respectivamente, lo cual se afirma con su localización dentro de diagrama.



Ilustración 45. Diagramas de Mifflin- temporada húmeda



Fuente: ANLA, 2024

Con lo anterior, de manera a priori, teniendo en cuenta que no hay un monitoreo continuo en todos los puntos de agua, es posible concluir, comparando las tres temporadas climáticas, que la mayoría captan flujos locales de corto tiempo de residencia caracterizados por una mineralización predominantemente de tipo bicarbonatada cálcica - sódica correspondiente con aguas jóvenes producto de la infiltración directa, probablemente en las zonas de afloramiento o por flujos verticales provenientes de depósitos cuaternarios de poco espesor.

5.11 Metales y metaloides

En las tres (3) temporadas monitoreadas, los metales arsénico, bario, berilo, boro, cadmio, cobalto, cobre, cromo, litio, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio y vanadio no presentaron concentraciones superiores al Límite de Cuantificación del Método (LCM).

Respecto a los metales y metaloides de aluminio, hierro, manganeso y zinc, sí se detectaron concentraciones cuantificables, que serán descritos a continuación. Es importante mencionar que, aunque en la actualidad no hay una norma de calidad del agua subterránea, se realiza la comparación con la normatividad vigente para los usos señalados en los artículos 2.2.3.3.9.3 y 2.2.3.3.9.4 del Decreto 1076 de 2015 y al Capítulo II de la Resolución 2115 de 2007, debido a que estos usos están autorizados en varios de los puntos de agua monitoreados; así mismo, teniendo de presente el Artículo 49 del Decreto 1594 de 1984: “En los sitios en donde se asignen usos múltiples, los criterios de calidad para la destinación del recurso, corresponderán a los valores más restrictivos de cada referencia.”





5.11.1 Aluminio

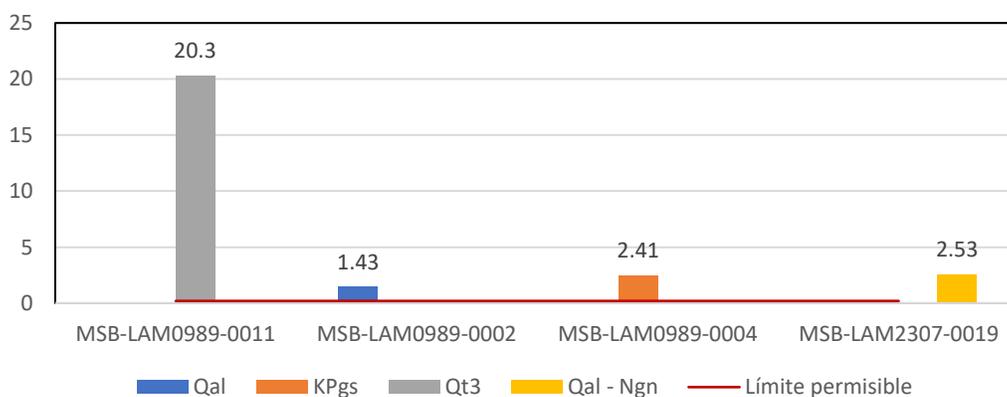
De los 107 registros que se presentaron para este metal, solamente se encontraron 4 registros (**Ilustración 46**) con concentraciones superiores al límite de cuantificación, específicamente para un periodo de transición (Piezómetros MSB-LAM0989-0011 y MSB-LAM2307-0019) y para un periodo de época seca (Piezómetros MSB-LAM0989-0002 y MSB-LAM2307-0004).

Respecto a los resultados, en la **Ilustración 46** se puede observar que los 4 puntos presentan concentraciones superiores al valor máximo permisible establecido en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0.2mg/l) que representa “características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana”. Sin embargo, se resalta el valor medido relacionado al piezómetro MSB-LAM0989-0011, debido a que cuenta con una concentración mucho mayor al límite permisible.

Este comportamiento del aluminio se puede deber a que la mayoría de las unidades asociadas son depósitos cuaternarios que son recargados por infiltración directa, captando flujos locales para esas épocas.

Dado lo anterior, es importante aumentar el número de información asociada a este metal para lograr identificar la tendencia de las concentraciones en el agua subterránea, así como identificar de manera clara si la presencia de aluminio se debe a una condición natural del medio o se ha adquirido por cambios químicos en el agua sujetos a condiciones externas. Es de especial importancia identificar mediante nuevos monitoreos si el valor del piezómetro MSB-LAM0989-0011 representa las condiciones reales de concentración del metal en la zona o se debe a un error de medición.

Ilustración 46. Concentraciones de aluminio para temporadas seca y de transición.



Fuente: ANLA, 2024





5.11.2 Hierro

Para el área de estudio se identificaron 48 puntos de agua subterránea con presencia de hierro en concentraciones superiores al límite de cuantificación (LCM), distribuidos en las diferentes unidades geológicas analizadas, tal como se observa en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Cantidad de puntos de agua subterránea con concentraciones de hierro superiores al LCM por formación geológica.

| Formaciones | # puntos |
|---------------------------------------|----------|
| Depósitos Aluviales | 1 |
| Depósitos Aluviales - Formación Neiva | 2 |
| Formación Gigante | 3 |
| Formación Monserrate | 3 |
| Formación Neiva | 16 |
| Formación Saldaña | 4 |
| Formación Seca | 10 |
| Grupo Honda | 7 |
| Terrazas Pumíticas | 2 |
| Total general | 48 |

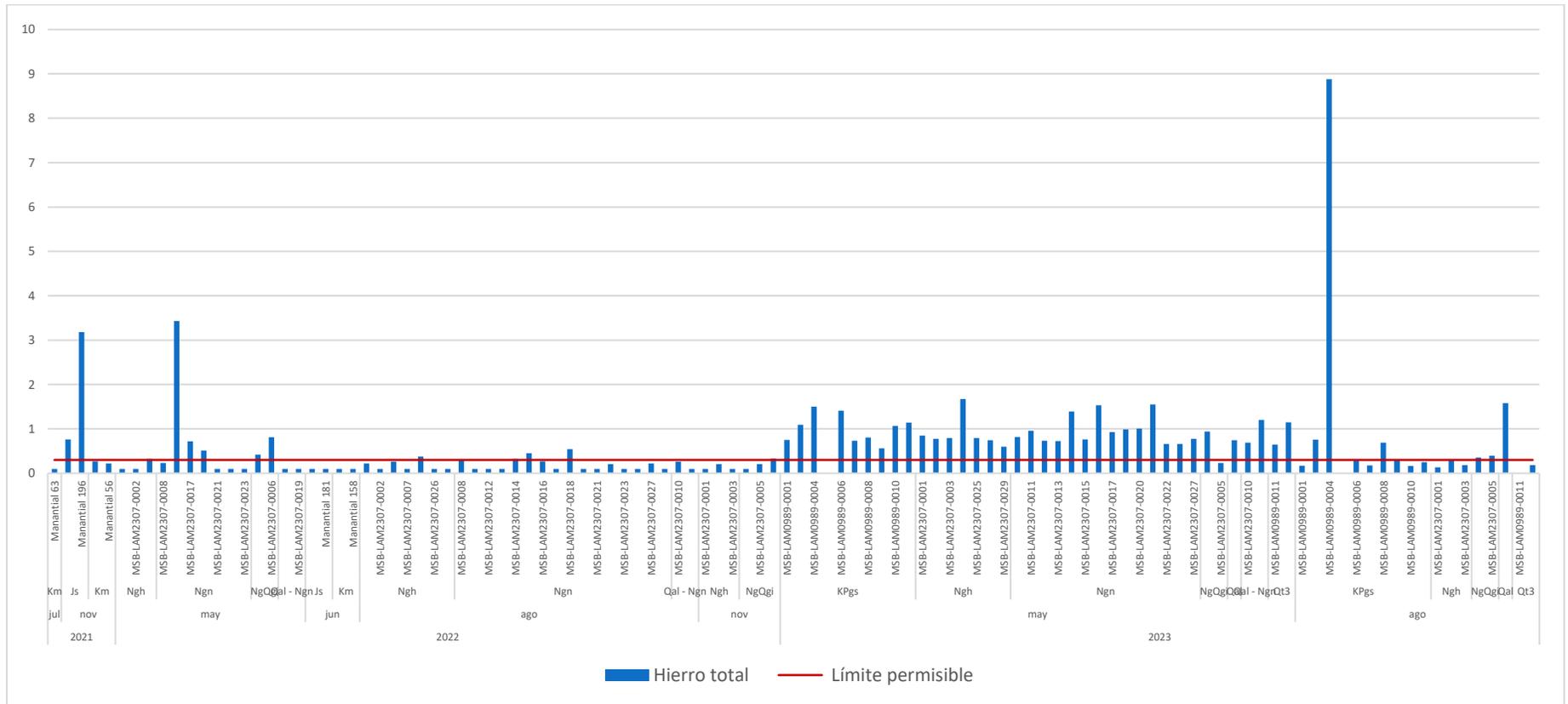
Fuente: ANLA, 2024

Para estos puntos, se encontraron 107 monitoreos con valores superiores al límite de cuantificación (LCM), distribuidos en dos periodos de transición (2022 y 2023), dos temporadas secas (2022 y 2023) y una temporada húmeda (2021), los resultados se muestran en la **Ilustración 47**.





Ilustración 47. Concentraciones de hierro superiores al límite de cuantificación (LCM), distribuidas por unidad geológica y temporada climática



Fuente: ANLA, 2024



De acuerdo con la **Ilustración 47** y realizando la comparación con los límites permitidos en el establecido en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0,3 mg/l) que representa “*características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana*”, se observa que, de los 107 monitoreos, 59 presentan valores por encima del límite permitido.

Adicionalmente, se puede identificar una tendencia de aumento en los valores de concentración de hierro en la temporada húmeda (mes de noviembre), y especialmente en los periodos de transición (mes de mayo) para los dos años analizados (**Tabla 6**). En relación con la temporada seca, se observa una disminución considerable en las concentraciones de hierro, pues el 69,6% de los monitoreos tienen valores inferiores al límite permisible.

Tabla 6. Número de monitoreos de hierro para cada época climática comparados con los valores que superan el máximo permisible de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007

| Época climática | Número de monitoreos | Monitoreos mayores al límite permisible | % de monitoreos mayores al límite permisible |
|-----------------|----------------------|---|--|
| Húmeda | 10 | 3 | 33,3 |
| Seca | 46 | 14 | 30,4 |
| Transición | 51 | 42 | 82,3 |
| Total | 107 | 59 | |

Fuente: ANLA, 2024

El comportamiento descrito puede obedecer directamente al régimen de lluvias de la zona, que favorece los procesos de infiltración, y a su vez, el arrastre de este metal al agua subterránea que puede estar asociado a la composición de las unidades geológicas. Sin embargo, se considera relevante analizar las concentraciones elevadas de hierro con el comportamiento histórico del parámetro, para confirmar si se trata de una condición natural del acuífero relacionado con la litología de las formaciones geológicas y las condiciones particulares de la zona o está directamente influenciado por actividades antrópicas.

5.11.3 Manganeso

En cuanto al manganeso se recolectaron 10 monitoreos con concentraciones de manganeso superiores al límite de cuantificación medible (**Ilustración 48**), relacionados con 6 piezómetros para 2 periodos climáticos en el año 2023: periodo de transición (4 monitoreos) y en la temporada seca (6 monitoreos). Los piezómetros asociados se localizan en la Formación Seca (KPgs) y las unidades cuaternarias de Terrazas Pumíticas (Qt3).

Se realizó la comparación de las concentraciones medidas con el valor máximo permisible en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0,1 mg/l), encontrando que en todos los puntos monitoreados los valores de manganeso superan el valor límite permisible para el consumo humano, en las dos épocas climáticas. Además, importante resaltar, el valor

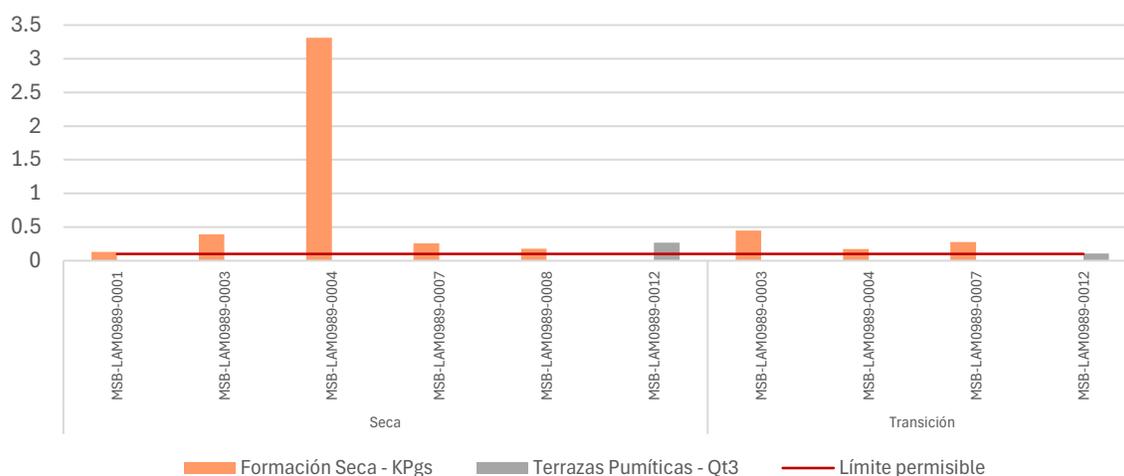




registrado para el piezómetro MSB- LAM0989-0004 presenta una concentración muy superior al límite permisible para la época seca.

Si bien este comportamiento parece ser parte de la condición natural del área, es necesario continuar realizando la medición de las concentraciones de este parámetro en el marco de esta estrategia para identificar la proveniencia de este. Así mismo, de acuerdo con este hallazgo, sumado a los valores anómalos encontrados para los metales hierro y aluminio, es necesario realizar tratamiento de esta agua si se pretende usar para consumo humano.

Ilustración 48. Concentraciones de manganeso para las temporadas seca y de transición.



Fuente: ANLA, 2024

5.11.4 Zinc

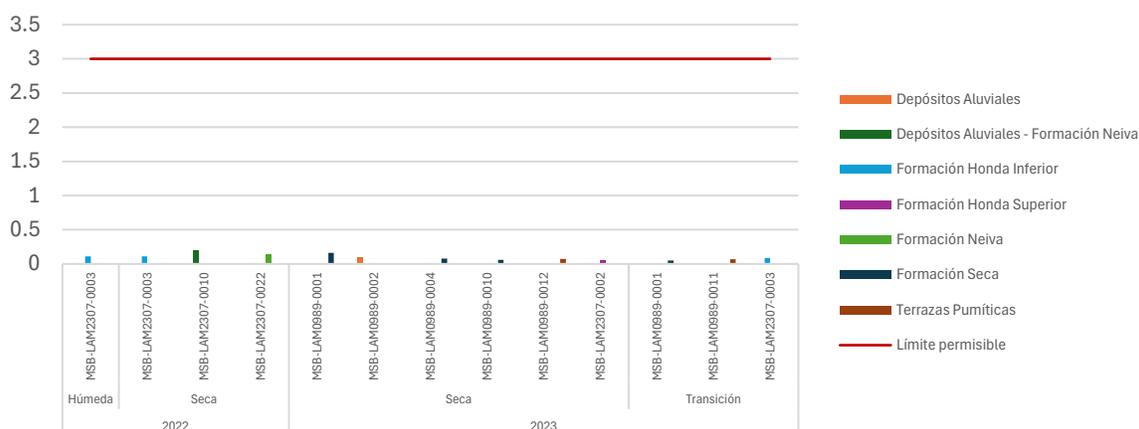
Finalmente, con relación al zinc, se realizaron 98 monitoreos en donde se determinó la concentración de este parámetro, dentro de los cuáles 13 presentan valores mayores al límite cuantificable de medición (**Ilustración 49**).

Realizando una comparación con el valor máximo permisible en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (3 mg/l) se concluye que para las 4 campañas evaluadas dentro de las 3 épocas climáticas para los años 2022 y 2023, no se excede en ningún caso el límite permitido.





Ilustración 49. Concentraciones de zinc para las tres épocas climáticas en los años 2022 y 2023



Fuente: ANLA, 2024

5.12 Parámetros asociados al desarrollo de actividades relacionadas con hidrocarburos

Luego de revisar las concentraciones medidas en los parámetros asociados al desarrollo de actividades propias de la industria de los hidrocarburos, tales como los fenoles, hidrocarburos totales, BTEX y grasas y aceites, se confirmó que no se presentan concentraciones cuantificables en ningún pozo profundo, manantial o piezómetro monitoreado durante los años 2021, 2022 y 2023.

5.13 Parámetros microbiológicos

En las Ilustraciones 50, 51 y 52 están representados los parámetros microbiológicos del agua subterránea, es decir los coliformes totales, coliformes termotolerantes (fecales) y la bacteria Escherichia Coli (E. Coli), se elaboraron gráficas comparativas anuales, agrupando los datos de acuerdo con la unidad geológica que es captada por cada uno de los puntos, con el fin de contrastar los resultados conseguidos y diferenciar comportamientos a lo largo de las diferentes temporadas climáticas.

Es importante mencionar que en las gráficas solamente se incluyeron los valores que fueron cuantificables mediante los análisis de laboratorio, excluyéndose todos aquellos reportes en donde no existía registro de estos parámetros dado que su concentración estaba por debajo del Límite de Cuantificación del Método (LCM) de medición.

Si bien gran parte de los puntos incluidos en la estrategia de monitoreo regional de aguas subterráneas de la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM corresponden con piezómetros, en los cuales no se hace aprovechamiento del recurso hídrico, como punto de partida para el análisis de los parámetros microbiológicos, se toman como referencia los





límites establecidos en el Artículo 2.2.3.3.9.3 del Decreto 1076 de 2015, en el cual se establecen los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico; para el caso de los coliformes totales el límite es 20.000 microorganismos/100 ml y para los coliformes termotolerantes (fecales) es de 2.000 microorganismos/100 ml, para la bacteria E.Coli no se establece límite según esta normativa.

De acuerdo con las gráficas de los datos cuantificados en los años 2021, 2022 y 2023, se puede observar que en ninguna de las temporadas climáticas monitoreadas en este periodo de tiempo se evidencian valores que superen el límite establecido en la normatividad nacional respecto a la presencia de coliformes totales y termotolerantes (fecales). Los valores más superiores se registraron en el año 2023, no obstante, como ya se mencionó no se superan los límites normativos, localmente se destaca que el Piezómetro 9 (MSB-LAM0989-0003) en la campaña realizada en el mes de agosto de 2023, presentó los mayores registros en la cuantificación de los parámetros microbiológicos, por lo tanto, este punto será de interés en los próximos monitoreos, de tal manera que se pueda determinar si persisten estos valores y realizar el respectivo requerimiento al licenciario del proyecto.

En cuanto a la bacteria Escherichia Coli (E. Coli), los valores cuantificados corresponden con mediciones realizadas en piezómetros, no obstante, como se mencionó anteriormente, para este parámetro no existe límite normativo y su presencia es de especial atención en pozos de agua subterránea en donde el recurso tenga fines domésticos, no obstante, en este tipo de puntos no se evidenciaron concentraciones de este parámetro.

Adicionalmente, se resalta que la presencia de organismos microbiológicos en el agua subterránea no está influenciada por ninguna temporada climática, dado que en todos los monitoreos realizados hay cuantificación de estos parámetros; de igual manera, su identificación y cuantificación tampoco está asociada a una unidad geológica específica, pues en la totalidad de las formaciones existen puntos de agua subterránea en donde se detectó la presencia de coliformes totales y coliformes termotolerantes (fecales), posiblemente asociados al desarrollo de actividades antrópicas realizadas por actividades de la comunidad.

Respecto a los parámetros microbiológicos es importante resaltar que a nivel general se logra hacer una diferenciación en función del tipo de punto de agua subterránea, evidenciándose que es más común identificarlos en los piezómetros y manantiales, además su cuantificación es superior en estos puntos en comparación con los pozos profundos. Este comportamiento se sustenta a partir de la profundidad de los puntos de agua subterránea, pues los manantiales y piezómetros captan el recurso de niveles acuíferos someros que están dispuestos en superficie o muy cerca de esta, por lo tanto, están más expuestos a posibles cargas contaminantes, por su parte, los pozos tienen mayor profundidad y captan el agua de niveles inferiores que por lo general están aislados y no tienen conexión directa con la superficie.

De acuerdo con lo anterior, los parámetros de coliformes totales, coliformes termotolerantes (fecales) y la bacteria Escherichia Coli (E. Coli) no presentan valores con tendencia alta en el





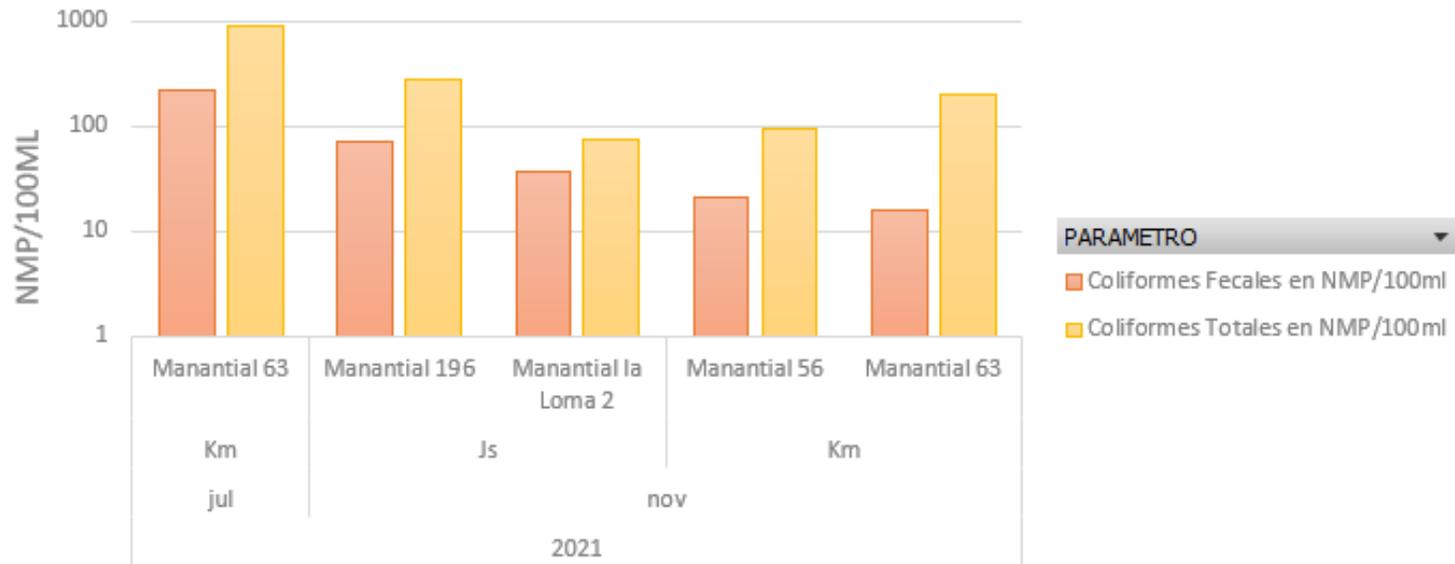
periodo analizado, en ninguno de los proyectos que actualmente reportan monitoreos en el marco de la estrategia regional, lo que indica que, de momento, respecto a los parámetros microbiológicos, las actividades desarrolladas no generan impactos acumulativos en la calidad del agua subterránea.

No obstante, cabe mencionar que debido a las concentraciones evidenciadas en los parámetros microbiológicos, el agua subterránea de los niveles más someros no es apta para consumo humano, en caso de requerirse para este uso deberá ser previamente tratada.





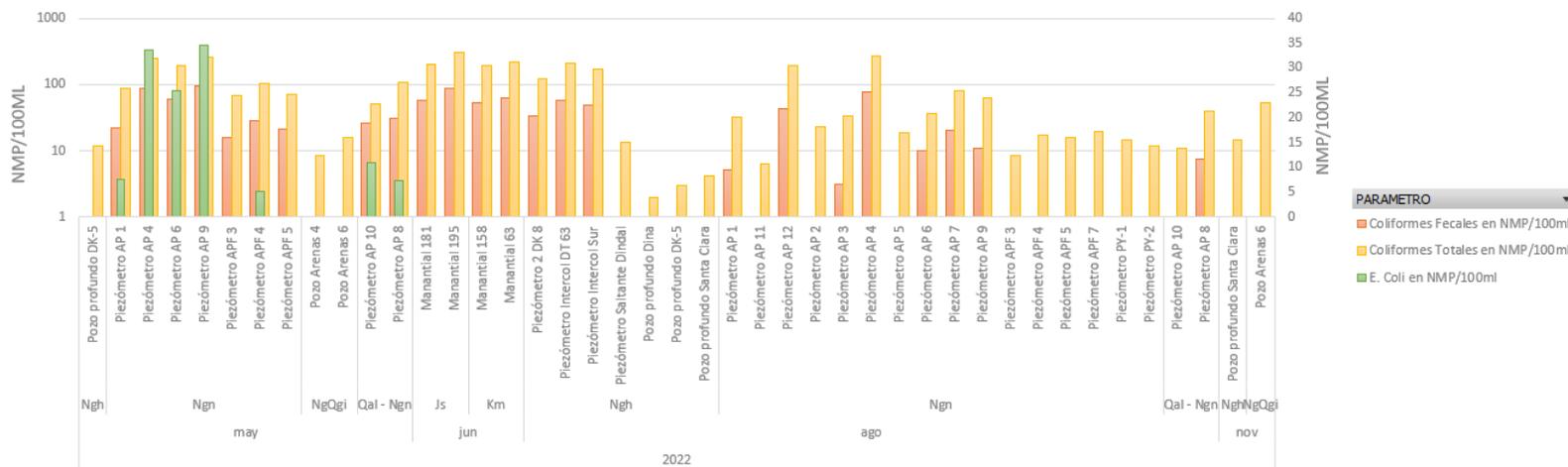
Ilustración 50. Parámetros microbiológicos cuantificados en el año 2021



Fuente: ANLA, 2024



Ilustración 51. Parámetros microbiológicos cuantificados en el año 2022

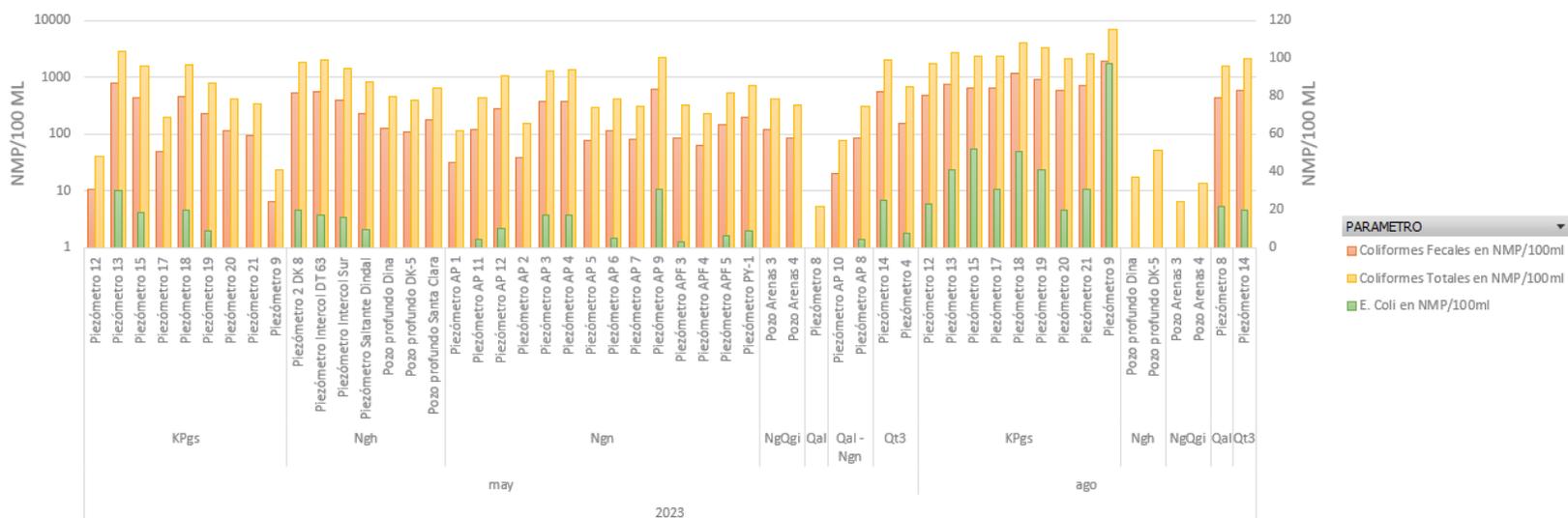


Fuente: ANLA, 2024

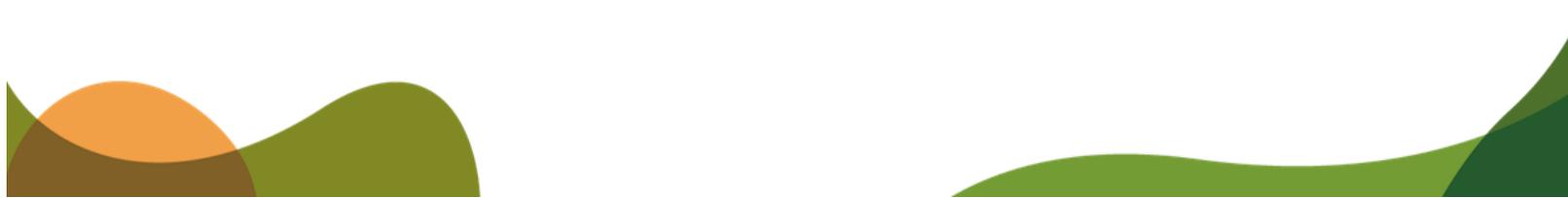




Ilustración 52. Parámetros microbiológicos cuantificados en el año 2023



Fuente: ANLA, 2024





6. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del segundo año de monitoreo de la estrategia regional del recurso hídrico subterráneo en el área del Valle Superior del Magdalena - VSM, las cuales serán robustecidas en la medida que se cuente con un mayor número de campañas y la estrategia sea impuesta en la totalidad de los proyectos que la conforman:

- ✓ Aspectos por considerar en el marco de los seguimientos ambientales de los proyectos que hacen parte de la estrategia regional:
 - Respecto al porcentaje de error analítico se destaca que para las tres temporadas climáticas se descartó un gran número de muestras que no cumplieron con el criterio establecido para cada proyecto; para la temporada de transición solamente se consideraron el 34% de los muestreos y para las temporadas seca y húmeda este porcentaje correspondió con el 42 y 18% respectivamente, por lo tanto, será necesario que en los respectivos seguimientos ambientales se solicite a los licenciatarios la verificación del balance iónico y el cálculo del error analítico con los laboratorios que realizan los muestreos, de tal manera que se establezcan las acciones de mejora correspondientes que permitan dar cumplimiento al límite establecido.
 - En algunos puntos se evidencia que no se cumple la relación aproximada de 2:1 que existe entre los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT), situación que puede deberse ya sea a condiciones inadecuadas o errores metodológicos en la toma de las muestras o a errores en la digitación de la información por parte del laboratorio, por lo tanto, en estos casos será necesario solicitar a los licenciatarios la justificación de estos valores en el marco de los respectivos seguimientos ambientales. En segundo lugar, para algunas campañas no se realizó la cuantificación de los Sólidos Disueltos Totales (SDT), por lo tanto, será necesario realizar el respectivo requerimiento, de tal manera que los licenciatarios cumplan con las condiciones de tiempo y modo de la estrategia de monitoreo regional.
- ✓ A partir del análisis de las mediciones de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) es posible concluir que el agua subterránea almacenada en la totalidad de unidades geológicas consideradas es agua dulce, con conductividades que por lo general no superan los 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 400 mg/l respectivamente.
- ✓ Para los depósitos cuaternarios se concluyen flujos locales, con tiempos de residencia y recorridos más cortos que los presentados por el agua subterránea almacenada en las unidades de edades más antiguas, a excepción de los manantiales de la Formación Monserrate (Km) que también reflejan condiciones de flujo local.





- ✓ Las concentraciones de oxígeno disuelto en todas las muestras analizadas en épocas húmeda y transición se mantienen por debajo 5 mg/l; en época seca se mantiene el mismo comportamiento en la mayoría de los puntos a excepción de un pozo profundo que capta la Formación Gigante que presentó una concentración de 8mg/l que puede deberse a condiciones locales y antrópicas debido a que ese valor solo se observa en ese momento de medición. Con lo anterior, es posible afirmar que las concentraciones medidas de oxígeno disuelto se encuentran dentro del rango normal para agua subterránea según Custodio & Llamas (1983).
- ✓ En las unidades cuaternarias se ven niveles piezométricos que varían de acuerdo con el régimen de lluvia del área, mientras que para las unidades neógenas como la Formación Neiva (Ngn), el Grupo Honda (Ngh) y la Formación Gigante (NgQgi), los niveles estáticos no presentan variaciones importantes y las oscilaciones observadas no necesariamente obedecen al comportamiento de la precipitación. Frente a la Formación Seca (KPGs), se evidencia disminución considerable en el nivel freático entre los meses de septiembre y octubre.
- ✓ En cuanto al análisis de determinación de isopiezas para las formaciones neógenas Formación Neiva (Ngn) y el Grupo Honda (Ngh), para las épocas húmeda y seca a partir de los registros obtenidos en las campañas de 2021, se establece que estas unidades representan acuíferos de tipo confinado con dirección de flujo en el mismo sentido que la red de drenaje superficial principal. Además, es posible concluir que no tienen fuerte influencia de las precipitaciones debido a que se presentan condiciones similares tanto en época seca como en época húmeda.
- ✓ El pH en todos los puntos de agua que monitorean unidades del Terciario (formaciones Gigante, Neiva y Honda) independientemente de la época climática se mantiene en el rango entre 7 y 9 unidades, siendo más neutra el agua de la Formación Neiva y más alcalina el agua del Grupo Honda, debido meramente a la interacción agua – roca.
- ✓ En los depósitos cuaternarios y la Formación Seca el pH oscila en el rango ácido entre 4 y 6.9 unidades, tornándose más bajos los valores en época de verano principalmente en las Terrazas Pumíticas, debido posiblemente a una mayor disolución de los minerales de origen volcánico que pueden contribuir a la acidez debido al descenso del volumen de recarga o mezcla de aguas en esta época.
- ✓ En las formaciones Saldaña y Monserrate en los tiempos de menor recarga el agua tiende a aumentar los valores de potencial de hidrogeno debido probablemente a una mayor disolución de minerales presentes en el relleno de las fracturas de la roca, debido a que las dos unidades de edad Cretáceo presentan probablemente permeabilidad secundaria.
- ✓ El parámetro de dureza total en la totalidad de los pozos y manantiales que captan las formaciones Monserrate, Saldaña y Honda y Gigante respectivamente, en las tres





temporadas climáticas, reporta valores por debajo de 300 mg/l que es el valor máximo establecido en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007.

- ✓ Algunas muestras procedentes de las formaciones Neiva (Ngn) y Honda de acuerdo con las concentraciones de dureza halladas son clasificadas como aguas como duras a muy duras, posiblemente debido a una condición intrínseca local, relacionada con la composición litológica de las unidades o a que, en temporada seca, donde prevalecen estos valores, el agua reside por más tiempo en la roca de tal manera que se facilita una mayor de concentración de sales.
- ✓ No se evidencia que los parámetros nitritos y nitratos se encuentren presentes de forma apreciable en el agua subterránea a nivel regional, por ende, no se identifican situaciones asociadas a las condiciones de las rocas o a la degradación de materia orgánica que influyan de manera importante en la calidad del recurso hídrico subterráneo.
- ✓ A partir de los diagramas de Piper se puede concluir que las unidades cuaternarias (Depósitos Aluviales (Qal) y Terrazas Pumíticas (Qt3) presentan variaciones respecto a la clasificación hidroquímica del agua subterránea siendo de tipo clorurada sódica en el periodo de transición y sulfatada sódica en la temporada seca. A su vez, para las unidades neógenas Formación Gigante (NgQgi), Formación Neiva (Ngn) y Grupo Honda (Ngh) el agua no presenta variaciones composicionales para las diferentes épocas climáticas, contando con agua de tipo bicarbonatada sódica para la primera y bicarbonatada sódica para las otras dos. Finalmente, para la Formación Seca no se cuenta con una tendencia clara, sin embargo, se advierte la predominancia del anión cloruro para el periodo de transición; y los iones bicarbonato y sulfato para la temporada seca.
- ✓ En cuanto a los grados de mineralización, los Diagramas de Stiff muestran mineralizaciones bajas para las unidades cuaternarias (Depósitos Aluviales y Terrazas Pumíticas), y mineralizaciones intermedias para las unidades cenozoicas y para la Formación Saldaña (Js), con excepciones de mineralizaciones puntuales con mineralizaciones muy elevadas en temporada seca para la Formación Seca y el Grupo Honda para la Formación Gigante (NgQgi), que se asocian a flujos regionales, pero que deberán ser corroboradas mediante los monitoreos siguientes.
- ✓ La mayoría de los muestreos de agua de producción en las plantas de inyección corresponden a aguas altamente mineralizadas, de tipo cloruradas sódicas, provenientes de formaciones profundas, con largos tiempos de residencia y alta concentración de sales disueltas, compatibles con el agua de formación de las unidades productoras de hidrocarburos; este aspecto es contrario a lo observado para las aguas subterráneas monitoreadas por la estrategia, las cuales hidrogeoquímicamente presentan predominio de aguas bicarbonatadas cálcicas, correspondientes con flujos locales provenientes principalmente de la infiltración directa.





- ✓ Si bien la mayoría de los puntos de agua subterránea de la red de monitoreo regional se localizan en las áreas de influencia de los pozos inyectores, a partir de los monitoreos del año 2022 de las aguas residuales industriales se confirma que actualmente no se presenta una afectación sobre los niveles acuíferos más someros a causa de la actividad de inyección, toda vez que los monitoreos de los acuíferos superficiales hidrogeoquímicamente presentan comportamientos acordes con la dinámica de su medio, el cual difiere de las condiciones de flujo y almacenamiento de aguas subterránea profundas. En tal sentido, es posible afirmar que no existe una conexión hidráulica entre los acuíferos aprovechables y las formaciones acuíferas receptoras de aguas de producción.
- ✓ A partir de la interpretación de los diagramas de Gibbs, se observa a nivel general que, en las tres temporadas climáticas, independientemente de la unidad geológica, la presencia de los iones analizados proviene principalmente del proceso de interacción agua – roca, siendo este proceso el que prevalece en la química del agua. Puntualmente, el agua de la Formación Monserrate (Km), a diferencia de los demás puntos, tiene un predominio en su composición relacionado con procesos de precipitación, asociándose más con agua superficial, aspecto que tiene sentido si se considera que los puntos de agua subterránea de esta formación corresponden con manantiales, los cuales provienen de flujos locales, con tiempos de residencia y recorridos cortos; dicha relación se corrobora con los bajos valores de conductividad eléctrica que se registraron para estos puntos.
- ✓ A partir de los Diagramas de Mifflin es posible concluir que la mayoría de los puntos de agua monitoreados, captan flujos locales de corto tiempo de residencia, caracterizados por una mineralización predominantemente de tipo bicarbonatada cálcica - sódica, correspondiente con aguas jóvenes producto de la infiltración directa, probablemente en las zonas de afloramiento o por flujos verticales provenientes de depósitos cuaternarios de poco espesor.
- ✓ En las temporadas transición y seca se observan algunas muestras en la franja de flujos intermedios y regionales procedentes de las formaciones Seca y Honda que posiblemente corresponden con aguas clasificadas según el diagrama Piper como bicarbonatadas sódicas (Grupo Honda – LAM2307) y cloruradas y/o sulfatadas sódicas (Formación Seca – LAM0989), para adquirir esa caracterización geoquímica el agua requiere de recorridos extensos y mayores tiempos de residencia en el acuífero, condiciones que se cumplen esas épocas del año para esas unidades geológicas que probablemente no se recargan por infiltración directa.
- ✓ En las tres temporadas monitoreadas los metales aluminio, arsénico, bario, berilo, boro, cadmio, cobalto, cobre, cromo, litio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, vanadio y zinc no presentaron concentraciones superiores al límite de cuantización; a diferencia del hierro que presentó algunas concentraciones levemente superiores al límite máximo establecido en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007,



aspecto que puede deberse a la composición litológica de las rocas que almacenan el agua y al tipo de suelo por donde esta se infiltra.

- ✓ Respecto a los parámetros asociados al desarrollo de actividades propias de la industria de los hidrocarburos (fenoles, hidrocarburos totales, BTEX, y grasas y aceites) se confirmó que no se presentan concentraciones cuantificables en ningún pozo profundo, manantial o piezómetro monitoreado.
- ✓ En relación con los metales y metaloides, en ninguno de los monitoreos realizados, los metales arsénico, bario, berilo, boro, cadmio, cobalto, cobre, cromo, litio, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio y vanadio presentaron concentraciones superiores al Límite de Cuantificación del Método (LCM), por lo cual no fueron objeto de análisis. Por su parte para el aluminio, hierro y manganeso presentaron valores superiores a los máximos permisibles establecidas en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007. Respecto al hierro, es importante destacar que las concentraciones más altas se asocian a la época húmeda, y especialmente, al periodo de transición. Finalmente, el zinc no presenta valores superiores a los límites permisibles.
- ✓ En cuanto a los parámetros microbiológicos se concluye que, en ninguno de los monitoreos realizados en los años 2021, 2022 y 2023 se evidencian valores que superen el límite establecido en la normatividad nacional (Artículo 2.2.3.3.9.3 del Decreto 1076 de 2015) respecto a la presencia de coliformes totales y termotolerantes (fecales). La presencia de organismos microbiológicos en el agua subterránea no está asociada a ninguna temporada climática específica, como tampoco está relacionada a una unidad geológica puntual.
- ✓ En cuanto a la bacteria Escherichia Coli (E. Coli), los valores cuantificados corresponden con mediciones realizadas en piezómetros, no obstante, como se mencionó anteriormente, para este parámetro no existe límite normativo y su presencia es de especial atención en pozos de agua subterránea en donde el recurso tenga fines domésticos, no obstante, en este tipo de puntos no se evidenciaron concentraciones de este parámetro.
- ✓ Respecto a los parámetros microbiológicos es importante resaltar que su presencia y cuantificación es más común en los piezómetros y manantiales, este comportamiento se sustenta a partir de la profundidad de captación, pues en estos puntos se capta el recurso de niveles acuíferos someros que están dispuestos en superficie o muy cerca de esta, por lo tanto, están más expuestos a ser afectados por posibles cargas contaminantes; por su parte, los pozos tienen mayor profundidad y captan el agua de niveles inferiores que por lo general están aislados y no tienen conexión directa con la superficie. Cabe mencionar que debido a las concentraciones evidenciadas en los parámetros microbiológicos, el agua subterránea de los niveles más someros no es apta para consumo humano, en caso de requerirse para este uso deberá ser previamente tratada.

- ✓ Es necesario que las empresas reporten junto con los análisis fisicoquímicos y microbiológicos la medición de los niveles estáticos en aquellos puntos que aplique, con el fin de evaluar de manera continua la dinámica del agua subterránea e identificar si se presentan impactos sobre la misma.
- ✓ Es fundamental que se presenten los balances iónicos y el error analítico en todos los monitoreos reportados a esta entidad, de tal manera que sea posible establecer la calidad de la información y confiabilidad de los datos. Adicionalmente, es importante que los licenciarios revisen junto con los laboratorios los valores de los errores analíticos, de tal manera que se pueda reducir el porcentaje de muestras que deben ser descartadas de los análisis por no cumplir con los límites establecidos.
- ✓ Producto del análisis integral realizado a los resultados de los monitoreos presentados por los proyectos Campo La Hocha (LAM3028), Área de Producción Huila Norte (LAM2307) y Campo Yaguará (LAM0989) se deduce que en sus áreas de estudio, hasta el momento, no se identifican impactos que puedan estar afectando la calidad y dinámica del agua subterránea, ni indicios de que estos se estén acumulando en el tiempo; no obstante, es de mencionar que dicho análisis no es determinante, toda vez que no se cuenta con información de todos los puntos de agua en las tres (3) temporadas climáticas que permitan hacer comparaciones e identificar plenamente el comportamiento del agua subterránea de manera multitemporal en dichos puntos, por lo tanto es necesario continuar con la recopilación de monitoreos en el marco de la estrategia regional, de tal manera que se cuenten con registros más extensos y se pueda continuar estableciendo las tendencias en la calidad y cantidad del agua subterránea en el área de la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM.
- ✓ Para hacer un análisis completo del área de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Superior del Magdalena - VSM, se debe contar con el reporte de información de la totalidad de proyectos que la conforman. Por lo anterior, la ANLA continuará con la implementación de la estrategia en los proyectos seleccionados y en otros que cuenten con puntos de agua o redes de monitoreo que presenten las condiciones idóneas para ser medidos en cuanto a calidad y cantidad del agua subterránea, de tal manera que se fortalezca la red espacialmente y en profundidad.
- ✓ **No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.** Finalmente, si bien la estrategia regional continua en implementación y el reporte de los monitoreos inició recientemente, se puede concluir que los resultados de esta se ajustan a las recomendaciones dadas por el Reporte de Alertas de las Subzonas Hidrográficas Cuenca Alta del río Magdalena - SZH-CARM (ANLA, 2018), donde se planteó la importancia de profundizar en la investigación del estado del recurso hídrico subterráneo mediante la conformación o actualización de redes de monitoreo regionales que permitan conocer con mayor certeza la calidad y dinámica del agua subterránea, pues como se evidencia a lo largo del presente documento, el análisis se realiza por unidades geológicas, con datos reportados directamente en respuesta a las



obligaciones de la estrategia, es decir que es información primaria reportada directamente por lo licenciarios de los proyectos, permitiendo así un análisis más específico y detallado de la cuenca, el cual, como se mencionó anteriormente, será robustecido en la medida que se cuente con un mayor número de campañas y la estrategia sea impuesta en la totalidad de los proyectos que la conforman.

