



Autoridad Nacional  
de Licencias Ambientales



# ***Estrategia de Monitoreo del Recurso Hídrico Subterráneo en el área del Valle Medio del Magdalena-VMM***

# **MAYO** **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  
Yady Melissa Triana Parra  
Juan Sebastián Ramírez Garzón  
Sonia Marcela Pacheco Higuera  
Jineth Sayri Castañeda Quijano  
**Profesionales**  
**Componente Hidrogeológico**



## Contenido

1. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA EN EL ÁREA DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL.....	4
1.1 Formación Umir.....	4
1.2 Formación Lisama .....	4
1.3 Grupo Chorro .....	5
1.3.1 Formación La Paz.....	5
1.3.2 Formación Esmeraldas.....	6
1.4 Grupo Chuspas .....	6
1.4.1 Formación Mugrosa.....	6
1.4.2 Formación Colorado .....	7
1.5 Grupo Real .....	9
1.6 Depósitos Cuaternarios .....	10
1.6.1 Depósitos de Terraza.....	10
1.6.2 Depósitos Fluvio Lacustres.....	10
1.6.3 Depósitos Aluviales Recientes .....	10
2. ANTECEDENTES DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL .....	15
3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL.....	16
3.1 Condiciones de Lugar .....	16
3.2 Condiciones de Modo .....	19
3.3 Condiciones de Tiempo .....	19
3.4 Condiciones especiales en el área de la estrategia .....	20
4. INFORMACIÓN ENTREGADA POR LOS PROYECTOS EN CUMPLIMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL.....	22
5. ESTADO DE LA CALIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO. 22	
5.1 Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) .....	24
5.2 Oxígeno Disuelto .....	29
5.3 Nivel Estático .....	32
5.3.1 Depósitos Cuaternarios (Qal-Qfl-Qat).....	32
5.3.2 Grupo Real (N1r) .....	33
5.3.3 Formación Colorado (P3N1c).....	33
5.3.4 Formación Mugrosa (P3m).....	34
5.4 pH.....	37
5.5 Dureza total.....	37



5.5.1 Época seca .....	37
5.5.2 Época de lluvia .....	39
5.6 Nitratos y Nitritos.....	41
5.7 Diagramas de Piper.....	42
5.7.1 Época Seca .....	44
5.7.2 Época de lluvias .....	44
5.8 Diagramas de Stiff .....	46
5.8.1 Formación Mugrosa (P3m).....	47
5.8.2 Formación Colorado (P3N1c).....	47
5.8.3 Grupo Real (N1r) .....	48
5.8.4 Depósitos Cuaternarios (Q) .....	48
5.9 Diagrama de Gibbs .....	49
5.10 Diagrama de Mifflin .....	52
5.11 Metales y Metaloides .....	54
5.11.1 Aluminio .....	54
5.11.2 Arsénico.....	57
5.11.3 Bario .....	59
5.11.4 Hierro .....	61
5.11.5 Plomo .....	62
5.11.6 Manganeso .....	64
5.12 Parámetros asociados al desarrollo de actividades relacionadas con hidrocarburos	65
5.12.1 Fenoles.....	65
5.12.2 BTEX totales.....	66
5.12.3 Hidrocarburos totales del petróleo (THP).....	66
5.13 Parámetros microbiológicos .....	67
6. Conclusiones .....	74
7. Referencias bibliográficas.....	78



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

En el área de estudio afloran unidades geológicas con edades que van desde el Cretáceo hasta el Cuaternario, predominantemente de origen sedimentario, que serán descritas a continuación, tomando como referencia el Léxico Estratigráfico (De Porta, 1974), plancha geológica 119 – Barrancabermeja en escala 1:100.000 (SGC, 2008) y el capítulo de geología del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena, el cual se realizó a partir del levantamiento de información en el control geológico para hidrogeología realizado por el Servicio Geológico Colombiano - SGC en el año 2019.

## 1.1 Formación Umir

Se constituye por cuarzoarenitas clastosoportadas de grano fino a medio, bien seleccionadas, con laminación plano-paralela, dispuestas en capas medias y gruesas, que suprayacen intercalaciones de arcillolitas con arenitas de grano medio clastosoportadas. En algunos sectores se observan areniscas de grano fino a muy fino con estratificación plano-paralela y cruzada e intercalaciones de areniscas de grano muy fino con limolitas laminadas silíceas impregnadas de hidrocarburo, con laminación plano-paralela y ondulada con abundante materia orgánica; hacia el techo de la unidad aumenta el tamaño de grano. Su espesor es cercano a los 1000 m (Morales et al., 1958) y su edad reportada es Campaniano – Maastrichtiano de acuerdo con Petters (1955) en Julivert, M., (1968) (Tomado de SGC, 2019).

Según el SGC (2019) la Formación Umir presenta posibilidades de formar acuíferos, posiblemente confinados en las capas de areniscas, dado que presentan alta porosidad y permeabilidad intergranular y a través de fracturas, razón por la cual la caracterizan hidrogeológicamente dentro de la unidad B3 “Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas y/o carstificadas”. No obstante, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH, en profundidad sus capas de arcillolitas junto con las lutitas de la Formación Simití representan los sellos de los potenciales reservorios cretácicos.

## 1.2 Formación Lisama

De acuerdo con el Léxico Estratigráfico (De Porta, 1974) la Formación Lisama se compone de shales abigarrados con intercalaciones de areniscas masivas grisáceas, de grano medio a fino que se hace más grueso hacia el techo de la formación. Esporádicamente se presenta estratificación cruzada y lentejones de carbón. Su espesor puede alcanzar los 1225 m (Morales et al., 1958), con un ambiente de depositación, de acuerdo con las características litológicas, bajo condiciones que variaban entre lagunares y deltaicas. En la concesión Superintendencia de Mares (LAM2249) se reporta un espesor de unos 1100 m (Taborda, 1965).



Hidrogeológicamente, el SGC (2019) clasifica esta unidad dentro del grupo A4, como un sistema acuífero de extensión intermedia a local con baja productividad. De acuerdo con la ANH, la Formación Lisama hace parte de las rocas reservorio que junto con las formaciones Esmeraldas y La Paz almacenan el 97% del petróleo probado de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

## 1.3 Grupo Chorro

### 1.3.1 Formación La Paz

La Formación La Paz, según el SGC (2019), en su parte superior se conforma por bancos de arcillolitas consolidadas, altamente diaclasadas, algunas de estas fracturas se encuentran rellenas de hidrocarburo, arcillas y óxidos de hierro. En la ruta del Cacao el mismo autor observó como parte de esta unidad también bancos de cuarzoareniscas de grano fino a medio con presencia de líticos y horizontes ocasionales de areniscas feldespáticas con óxidos de hierro, a las cuales se les observó buena permeabilidad.

De porta (1974) en el Léxico Estratigráfico la describe así: *“En la nomenclatura estándar propuesta por MORALES et al (1958) la Formación La Paz representa la parte inferior del Grupo Chorro. Consta de areniscas masivas, conglomeráticas, de color gris claro, con estratificación cruzada y con intercalaciones dispersas de limonitas y shales que se encuentran principalmente en los dos tercios inferiores de la formación. En la parte inferior de la formación se encuentra un nivel de lutitas arenosas que constituyen el Miembro Toro. La Colombian Soc. Petr. Geol. Geoph. (1965) ha señalado que dentro de la Concesión de Mares (LAM2249) la Formación La Paz comprende el Miembro Toro en la base y el resto de la sucesión constituye la llamada Zona-E. En los campos de Galán, Llanito y La Cira-Infantes la Formación La Paz está representada casi exclusivamente por la Zona-E que presenta un cambio notable en la litología, por cuanto consta de shales duras, masivas, moteadas, y ocasionalmente con areniscas de grano fino y shales arenosas. La Formación La Paz varía considerablemente de espesor de unas áreas a otras. En la sección tipo su espesor es de unos 1000 m”.* Según Taborda, (1965) alcanza su máximo espesor en el área del río Sogamoso, con 1280 m.

Hidrogeológicamente el SGC (2019) caracteriza a la Formación La Paz como un acuífero del grupo A4, continuo, de extensión intermedia a local y baja productividad. La ANH identifica a esta unidad como rocas reservorio.

De acuerdo con el Plan de Manejo Ambiental Contrato Carare - Las Monas del proyecto *“Campos Payoa, Salinas, Corazón, Aguas Claras y Las Monas, pertenecientes al contrato de asociación especial Carare - Las Monas”* entregado a la ANLA mediante radicado 20236200259502 del 22 de junio de 2023, se considera al yacimiento Esmeralda - La Paz como uno solo debido a su comportamiento uniforme, dado que en el Bloque las Monas, se dificulta establecer el contacto entre las dos unidades y no se identifican cambios en el régimen de fluidos (propiedades PVT) ni de presiones entre las mismas.

Estas unidades también cumplen la función de receptoras de aguas de producción para recobro secundario, en algunos pozos reciben el recurso hídrico por las dos capas de arenas principales en la base de la Formación Esmeraldas – La Paz denominadas en la industria como



*Purple y Yellow sand.* Así mismo, la unidad cuenta con dos capas sello regionales, uno de espesor cercano a los 180 m localizada entre los 520 y 720 m de profundidad aproximadamente y otra al tope de 46 m de espesor en el contacto transicional con la Formación Mugrosa, entre los 297 y 343 m de profundidad.

Otro aspecto importante es que de acuerdo con la interpretación de los registros realizados en el Campo Las Monas no se ha identificado la presencia de aguas dulces en las arenas de la Formación Esmeralda – La Paz.

### **1.3.2 Formación Esmeraldas**

En el Léxico Estratigráfico (De Porta, 1974) la describen así: *“Litológicamente consta de areniscas y limolitas compactas dispuestas en capas muy delgadas o láminas, micáceas, de grano fino y de color gris, que alternan con shales gris oscuras que localmente pueden presentarse moteadas de rojo, púrpura y marrón. Algunos lentejones de carbón pueden presentarse dispersos. En la parte superior de la Formación Esmeraldas se encuentra el Horizonte fosilífero Los Corros. El espesor de la formación es de unos 1200 m y se adelgaza en la Quebrada Putana”*

En el Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena (SGC, 2019) describen un único afloramiento de esta unidad, conformado por areniscas de grano muy fino con intercalaciones de limolitas masivas dispuestas en capas gruesas con estratificación plano-paralela. En este estudio, caracterizan hidrogeológicamente a la Formación Esmeraldas dentro del grupo C1 conformado por *rocas sedimentarias terciarias consolidadas en ocasiones fracturadas; de muy baja productividad.* La Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH, identifica a esta unidad como rocas reservorio.

En la modificación del Plan de Manejo Ambiental Integral de la Superintendencia de Mares (Expediente LAM2249) en el informe *“Inyección como Mecanismo de Mantenimiento Presión y Recobro Mejorado de Hidrocarburos en los Bloques de Mares”* para la Formación Esmeraldas mencionan: *“Aunque por las características litológicas la clasifican como una unidad sello, algunos niveles arenosos que la componen tienen potencial como roca almacenadora en algunos sectores de los bloques Centro y Llanito, donde se ha constituido como un objetivo secundario y operacionalmente ha sido denominada como Zona D12.”*

## **1.4 Grupo Chuspas**

### **1.4.1 Formación Mugrosa**

En el control geológico para hidrogeología del SGC (2019) se observaron como parte de esta unidad areniscas clastosoportadas de grano fino a grueso, friables, dispuestas en capas muy gruesas, impregnadas de hidrocarburo; en otro sector se identificaron shales con grietas de desecación y láminas de yeso e intercalaciones de areniscas cuarzosas a feldespáticas de grano fino a medio con estratificación cruzada. Adicionalmente el SGC (2019) observó rezumaderos naturales de petróleo y gas.

Según la Colombian Soc. Petr. Geol. Geoph. (1965) *“la parte inferior de la formación consta de areniscas de grano medio a fino, raramente grueso o con cantos, que están intercaladas con*



*shales de color azul o gris. La parte media consta de shales masivas moteadas con algunas intercalaciones de areniscas de grano fino. En la parte superior se encuentran areniscas a veces con cantos que se intercalan con shales moteadas. En las áreas productivas de la Concesión de Mares (LAM2249) estas partes corresponden respectivamente a las Zonas-C, parte inferior de la Zona-B y parte superior de la Zona-B. En la parte superior de la Formación Mugrosa se sitúa el Horizonte fosilífero del mismo nombre. El espesor de la Formación Mugrosa es variable; de unos 700 m en Colorado pasa a unos 500 m en el Campo de Llanito (Tomado de Léxico Estratigráfico, De Porta. 1974).*

En el Modelo Hidrogeológico Conceptual del SGC (2019) esta unidad es clasificada como C1 dentro de “sistemas acuíferos con muy baja a ninguna productividad con presencia de aguas salobres a saladas”. La ANH la caracteriza como una de las principales rocas reservorio de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

En el Campo de la Superintendencia de Mares (Expediente LAM2249) esta unidad ha sido reservorio por un largo tiempo de producción, con buenas características de porosidad y permeabilidad, con condiciones óptimas para la inyección de fluidos con fines de recobro mejorado y mantenimiento de la presión, por lo tanto, los horizontes B y C de esta unidad constituyen el objetivo de producción y reinyección de este campo. Adicionalmente los niveles arcillosos de la “Formación Mugrosa Fósil”, de continuidad regional, conforman un sello estratigráfico de cerca de 480 m de espesor que separan el reservorio de los acuíferos aprovechables (Tomado de la Modificación del Plan de Manejo Ambiental Integral de Mares – Campo Superintendencia de Mares con expediente LAM2249, en el informe “Inyección como Mecanismo de Mantenimiento Presión y Recobro Mejorado de Hidrocarburos en los Bloques de Mares”).

### **1.4.2 Formación Colorado**

Según el SGC (2019) en el área de estudio del Modelo Hidrogeológico Conceptual la Formación Colorado se compone de limolitas arcillosas cementadas a arcillolitas masivas compactas con presencia de grietas de desecación y yeso laminar.

De acuerdo con el Léxico Estratigráfico (De Porta, 1974) esta unidad “consta predominantemente de arcillas de color gris claro, púrpuras y moteadas de rojo, con intercalaciones de areniscas en bancos de espesor variable con estratificación cruzada. La parte superior de la formación consta de unos 100 m de arcillas de color gris y negro, carbonáceas, con areniscas de grano medio y poco potentes. Esta parte de la sección corresponde al Horizonte fosilífero La Cira o también llamado por otros autores con el nombre de Formación La Cira. Por lo general estas capas no suelen formar crestas que resalten morfológicamente, pero en la Concesión de Mares puede existir un nivel de areniscas conglomeráticas que puede formar un filón.

*En el Campo de La Cira la Formación Colorado se ha dividido en varias zonas denominadas con las letras A y B. Algunas de estas zonas presentan gran interés por ser productoras de petróleo...”*



(...) “En su sección tipo la Formación Colorado tiene un espesor de 1200 m, pero éste varía considerablemente y aumenta de una manera general hacia el E donde puede alcanzar hasta 2500 m al pie de la Cordillera Oriental”.

En el Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena (SGC, 2019) se le considera un acuitardo caracterizado dentro de la unidad C1, con muy baja productividad y presencia de aguas salobres.

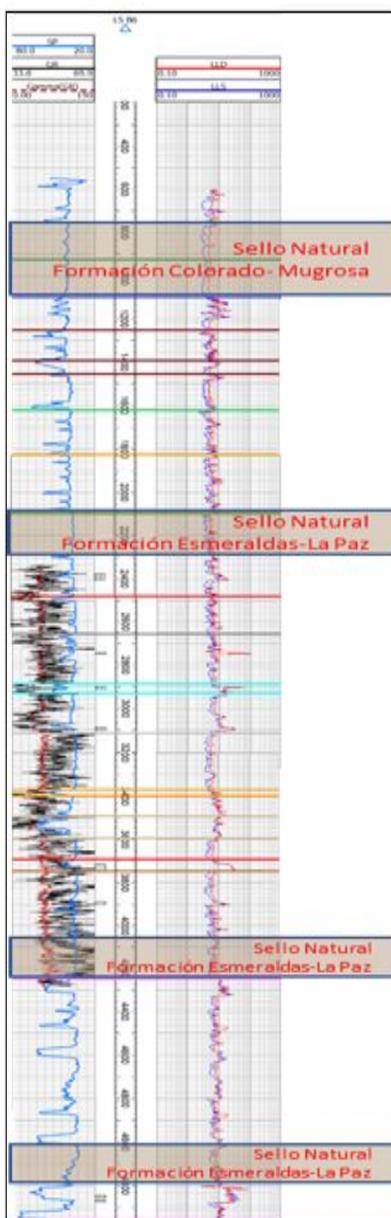
En el informe “*Inyección como Mecanismo de Mantenimiento Presión y Recobro Mejorado de Hidrocarburos en los Bloques de Mares*” de la Modificación del Plan de Manejo Ambiental Integral de Mares - Campo Superintendencia de Mares con Expediente LAM2249, describen a la Formación Colorado como un acuífero semiconfinado a confinado de baja productividad. La ANH cataloga a esta formación como reservorio de hidrocarburos.

Es tal su importancia que en el Campo Superintendencia de Mares (expediente LAM2249) constituye una de las principales unidades productoras y objetivo de inyección en su zona A para el recobro de hidrocarburos remanentes; en el informe “*Inyección como Mecanismo de Mantenimiento Presión y Recobro Mejorado de Hidrocarburos en los Bloques de Mares*” de la Modificación del Plan de Manejo Ambiental Integral de Mares, mencionan que tanto el hidrocarburo como las aguas de formación de esta unidad, en el área del campo, se encuentran confinados por trampas estratigráficas - estructurales, los niveles arcillosos de la Formación Real y las arcillolitas de la misma Formación Colorado, es decir que se encuentran aislados sin conexión hidráulica, a profundidades superiores a los 900 m de los acuíferos someros aprovechables.

En el Plan de Manejo Ambiental Contrato Carare - Las Monas del proyecto “*Campos Payoa, Salinas, Corazón, Aguas Claras y Las Monas, pertenecientes al contrato de asociación especial Carare - Las Monas*” con expediente LAM0172, entregado a la ANLA mediante el radicado 20236200259502 del 22 de junio de 2023 presentan los registros eléctricos de varios de sus pozos inyectoras, en los cuales es posible identificar los niveles sello identificados en la estratigrafía regional, los cuales garantizan el aislamiento hidráulico entre las formaciones productoras-receptoras y los acuíferos someros aprovechados por las comunidades, uno de dichos pozos es el denominado LSB06, en cuyo registro (**Ilustración 1**) se evidencian 4 sellos naturales de techo a base, conformados así: en la base de la Formación Colorado y en su contacto transicional con la Formación Mugrosa (espesor aproximado de 100 m); en el tope de la Formación Esmeraldas (espesor promedio de 60 m) y en su zona media (espesor de 37 m) y el sello en la base de la Formación La Paz (espesor cercano a los 56 m).



**Ilustración 1.** Sellos naturales pozo LS-B06 - Campos Payoya, Salinas, Corazón, Aguas Claras y Las Monas



Fuente: LAM0172, radicado 20236200259502 del 22 de junio de 2023

## 1.5 Grupo Real

En la plancha geológica 119 – Barrancabermeja en escala 1:100.000 (SGC, 2008) describen al Grupo Real como “constituida principalmente por capas gruesas de areniscas conglomeráticas con fragmentos de guijos finos a medios, con estratificación cruzada, intercaladas con capas medias a gruesas de arenitas cuarzosas tabulares con matriz arcillosa y lodolitas síliceas friables de color gris y morado”.



En el Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena (SGC, 2019) mencionan que el Grupo Real está conformado por bancos, capas gruesas a muy gruesas de conglomerados polimícticos, redondeados con matriz arenosa, intercalados con areniscas cuarzosas a feldespáticas de grano fino a muy grueso, con regular a mala selección y capas gruesas a medianas de arcillolitas plásticas abigarradas.

Hidrogeológicamente se clasificó al Grupo Real dentro de los Sedimentos y Rocas con Flujo Esencialmente Intergranular, resaltando que en sus primeros metros constituye un acuífero libre, continuo, de extensión regional, siendo el de mayor extensión y captación por parte de la comunidad, conformando así el acuífero de mayor importancia hidrogeológica en la zona centro del VMM.

Adicionalmente de los 20 a los 200 m de profundidad se identificaron capas acuíferas de tipo confinado, las cuales son captadas principalmente para abastecimiento público, por empresas agroindustriales y fincas ganaderas a través de pozos de variadas profundidades, debido a la geometría de intercalaciones que presenta la unidad.

## **1.6 Depósitos Cuaternarios**

### **1.6.1 Depósitos de Terraza**

Conformadas por guijos y guijarros monomícticos de cuarzoareniscas embebidos en una matriz areno cuarzosa de grano fino a medio y cuarzoareniscas maduras bien seleccionadas con matriz arcillosa y presencia de óxidos de hierro, en esta capa localmente se observaron lentes de gravas. De acuerdo con el corte geológico, el SGC (2019) estima un espesor de 60 m para esta unidad (Tomado de SGC, 2019) y son caracterizados como un “*acuífero por porosidad primaria, de extensión local y baja productividad*”.

### **1.6.2 Depósitos Fluvio Lacustres**

En el Modelo Hidrogeológico Conceptual (SGC, 2019) describen esta unidad constituida por “*materiales sedimentarios, de granulometría fina, correspondientes a arenas de grano fino, bien redondeadas, color gris claro*”. Los Depósitos Fluvio Lacustres por su composición litológica los definen como: “*acuitardo de extensión local de muy baja productividad*”.

### **1.6.3 Depósitos Aluviales Recientes**

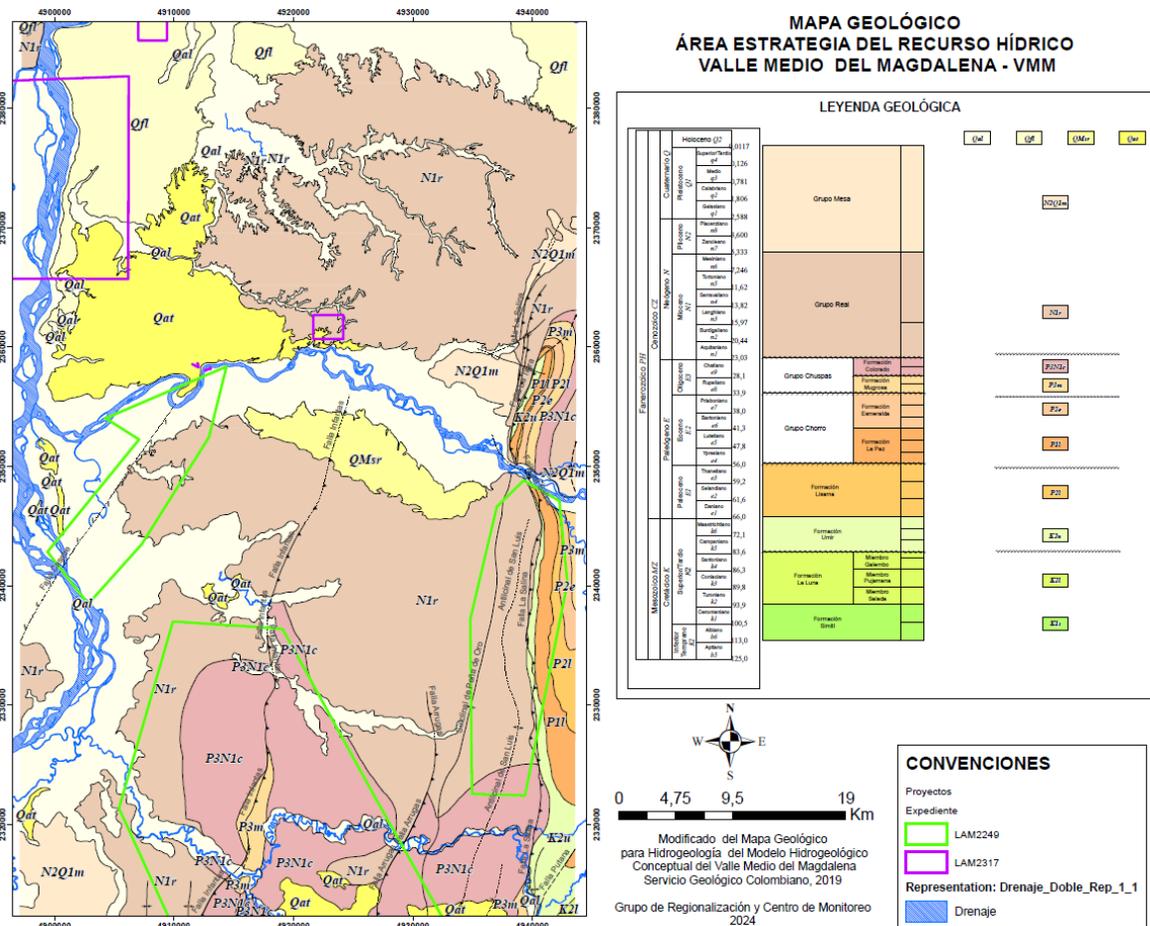
De acuerdo con el control geológico realizado por el SGC (2019) este depósito es constituido por cantos polimícticos de areniscas cementadas, cuarzoarenitas, fragmentos andesíticos, riolíticos y basálticos, cuarzo lechoso y chert embebidos en matriz areno arcillosa de grano fino a medio; arenas de tamaño de grano grueso y arcillas arenosas abigarradas.

El SGC caracteriza hidrogeológicamente a los Depósitos Cuaternarios dentro del grupo de sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular.

Los Depósitos Aluviales Recientes son definidos como un “*acuífero de tipo libre, de extensión local y discontinua, por porosidad primaria*”.

A continuación (**Ilustraciones 2 y 3**), se observan los mapas geológico e hidrogeológico del área de la estrategia de monitoreo regional analizada en el presente documento.

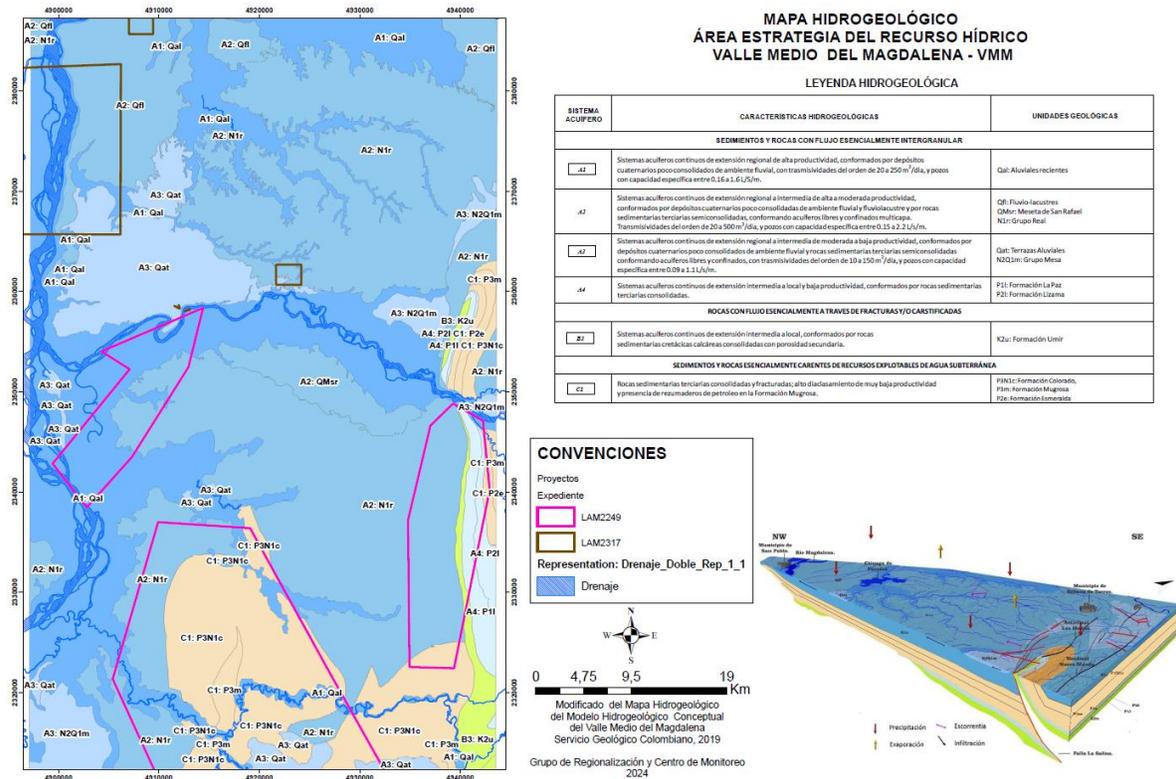
**Ilustración 2.** Mapa geológico estrategia de monitoreo VMM



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



**Ilustración 3.** Mapa hidrogeológico estrategia de monitoreo VMM



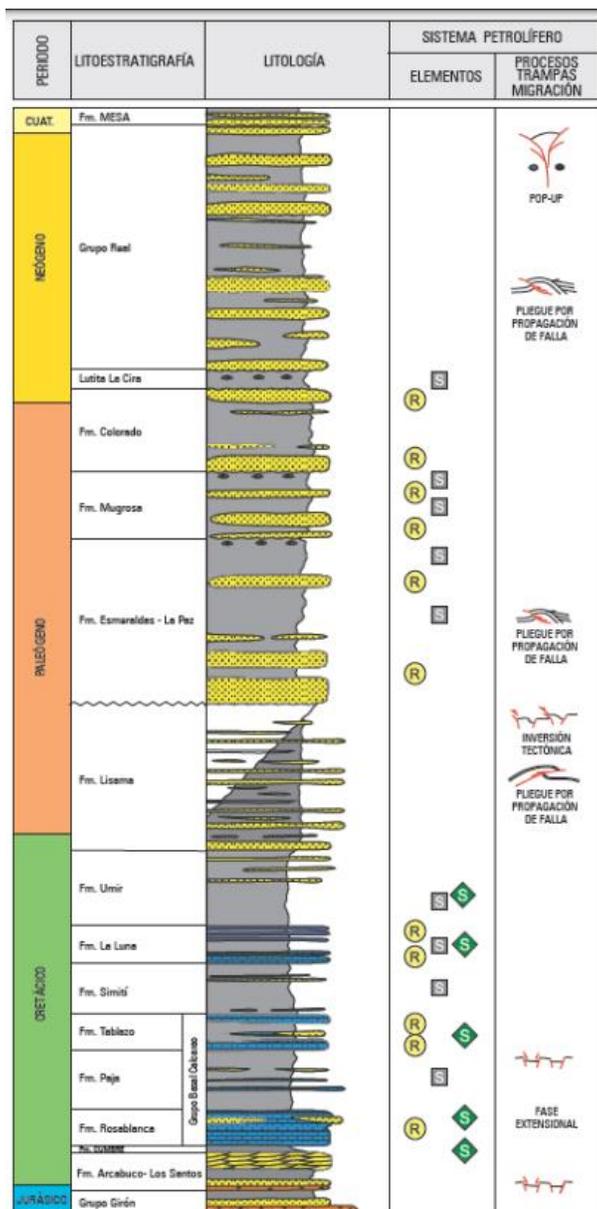
Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

A continuación, se presenta la columna estratigráfica generalizada de la cuenca del Valle del Magdalena Medio (tomada del documento “Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, Pozo Infantas – 1613, Evaluación Petrofísica ShelXpert, Pozos Catalina - 1 y Cocuyo – 1”, ANH, 2012) (Ilustración 4), destacando, de acuerdo con la descripción de párrafos anteriores, a la formaciones Colorado, Mugrosa, Esmeralda y La Paz como productoras de hidrocarburos – receptoras de aguas de formación y a la Formación Lisama como roca reservorio.

Las formaciones Simití y Umir se identifican como sellos de los potenciales reservorios cretáceos y los niveles arcillosos de las formaciones Colorado, Mugrosa, Esmeraldas y La Paz como sellos regionales de sus mismos niveles productores.



**Ilustración 4.** Columna estratigráfica generalizada de la cuenca del VMM



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH, 2012

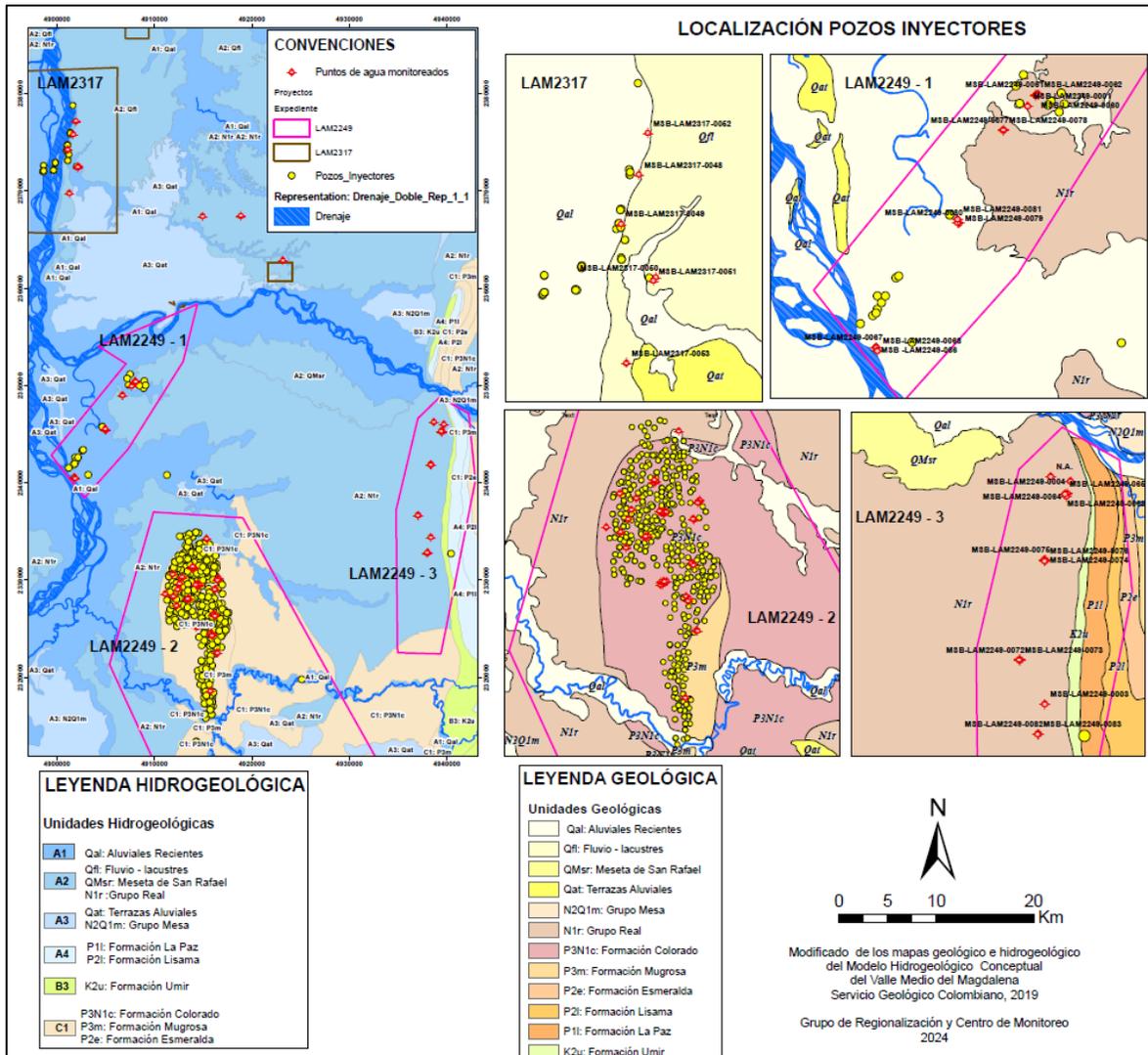
Adicionalmente, en la **Ilustración 5** se presenta la relación espacial entre los puntos de agua subterránea que están siendo monitoreados en el marco de la estrategia regional y los pozos de inyección correspondientes a los proyectos Campos Petroleros Cantagallo y Aledaños (LAM2317) y Campos de la Superintendencia de Mares (LAM2249), que son los que se encuentran reportando información de acuerdo con las obligaciones impuestas por la estrategia.

Como se puede observar, prácticamente la totalidad de los puntos de agua subterránea que hacen parte de la estrategia y monitorean las formaciones Mugrosa y Colorado se localizan en



las áreas de influencia de los pozos inyectoros, así como algunos puntos de agua localizados en los Depósitos Cuaternarios; en este sentido, el análisis de calidad en dichas unidades debe considerar la cercanía del desarrollo de las actividades de reinyección y el potencial del acuífero en cuanto a su aprovechamiento.

**Ilustración 5.** Localización pozos inyectoros vs puntos de agua monitoreados en la estrategia



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



## 2. ANTECEDENTES DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

En el año 2016 la Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales (SIPTA) de la ANLA publicó los reportes de alerta de la zona sur y centro del Valle Medio del Magdalena, cuyo propósito consistió en identificar posibles impactos acumulativos y determinantes de sensibilidad ambiental regional que permitieran orientar el licenciamiento ambiental en la región.

Con respecto al componente hidrogeológico, en dichos reportes de alertas se identificó que varios de los proyectos allí instalados, en su mayoría del sector de hidrocarburos, hacen uso del agua subterránea, ya sea para la actividad de recobro mejorado mediante inyección de agua, o mediante la captación del recurso en pozos profundos para uso doméstico y/o industrial; de igual manera, varios proyectos cuentan con permisos de vertimiento al suelo a través de campos de aspersión e infiltración.

Considerando este contexto, los reportes de alertas plantearon algunas recomendaciones respecto al monitoreo del recurso hídrico subterráneo, tales como la medición de la tendencia de los niveles de agua subterránea en las diferentes unidades hidrogeológicas que son objeto de captación, particularmente los niveles superiores e intermedios del Grupo Real y la Formación Mesa; además, se recomienda aumentar el conocimiento de la hidrogeología regional, de la oferta y demanda de aguas subterráneas y de la recarga de los diferentes niveles acuíferos, con el fin de contar con mayores elementos de juicio para evaluar futuras solicitudes de concesión de aguas subterráneas.

Atendiendo a tales recomendaciones, en el año 2020 se planteó desde la SIPTA la “*Estrategia de monitoreo regional de aguas subterráneas para la zona centro del Valle Medio del Magdalena - VMM*”, para esa primera versión de la estrategia se definió como área de interés el territorio delimitado por el Modelo Hidrogeológico Conceptual del VMM, oficializado y publicado por el Servicio Geológico Colombiano - SGC en el año 2019. Esta área se localiza hacia el costado oriental del río Magdalena, y abarca de igual manera gran parte de la extensión del polígono asociado al reporte de alertas desarrollado en el año 2016 por la ANLA.

Posteriormente, en el año 2021 la SIPTA publicó el reporte de análisis regional de la cuenca del río Sogamoso y cuencas afluentes directos río Lebrija Medio (mi) - NSS, en el cual se recomendó ampliar la *Estrategia de monitoreo regional de aguas subterráneas para la zona centro del Valle Medio del Magdalena - VMM*, de tal manera que abarcaran las zonas donde la probabilidad de presentar impactos acumulativos y/o sinérgicos es muy alta y alta.

En tal sentido, en el año 2023 el Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo de la SIPTA realizó la actualización de la estrategia, de tal manera que se redefinió el área de estudio, abarcando casi la totalidad de la cuenca e integrando los proyectos localizados en el costado occidental del cauce del río Magdalena, algunos de los cuales hacen uso del agua subterránea y realizan actividades de inyección. No obstante, como dicha actualización aún se encuentra en proceso de implementación, para el presente análisis solo se tienen en cuenta los



proyectos que estaban incluidos en la estrategia de monitoreo regional planteada en el año 2020 y que se encuentran reportando información, por lo tanto, el área de estudio demarcada en este documento también corresponde con la establecida en la primera versión de la estrategia.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO REGIONAL

La estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM 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 espaciotemporal 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. 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.

La estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM está conformada por 20 proyectos, todos pertenecientes al sector de hidrocarburos. No obstante, a la fecha solamente hay dos (2) proyectos reportando información, correspondientes con los siguientes expedientes:

- LAM2249 - Campos de la Superintendencia de Mares denominados a) La Cira-Infantas, que incluye los campos San Luis, Aguas Blancas, Tenerife, Colorado, Morenas y Mosqueteros; b) Llanito - Gala - Galán - Cardales; y c) Lisama - Nutria - Tesoro - Peroles y sus actividades asociadas
- LAM2317 - Campos Petroleros Cantagallo y Aledaños.

En tal sentido, el análisis que se presenta en este documento se refiere al comportamiento del agua subterránea en el área de los dos (2) proyectos citados anteriormente, toda vez que la estrategia de monitoreo continua en implementación en la mayoría de los expedientes que la conforman. A continuación, se presentan las condiciones de lugar, modo y tiempo de la estrategia de monitoreo:

#### 3.1 Condiciones de Lugar

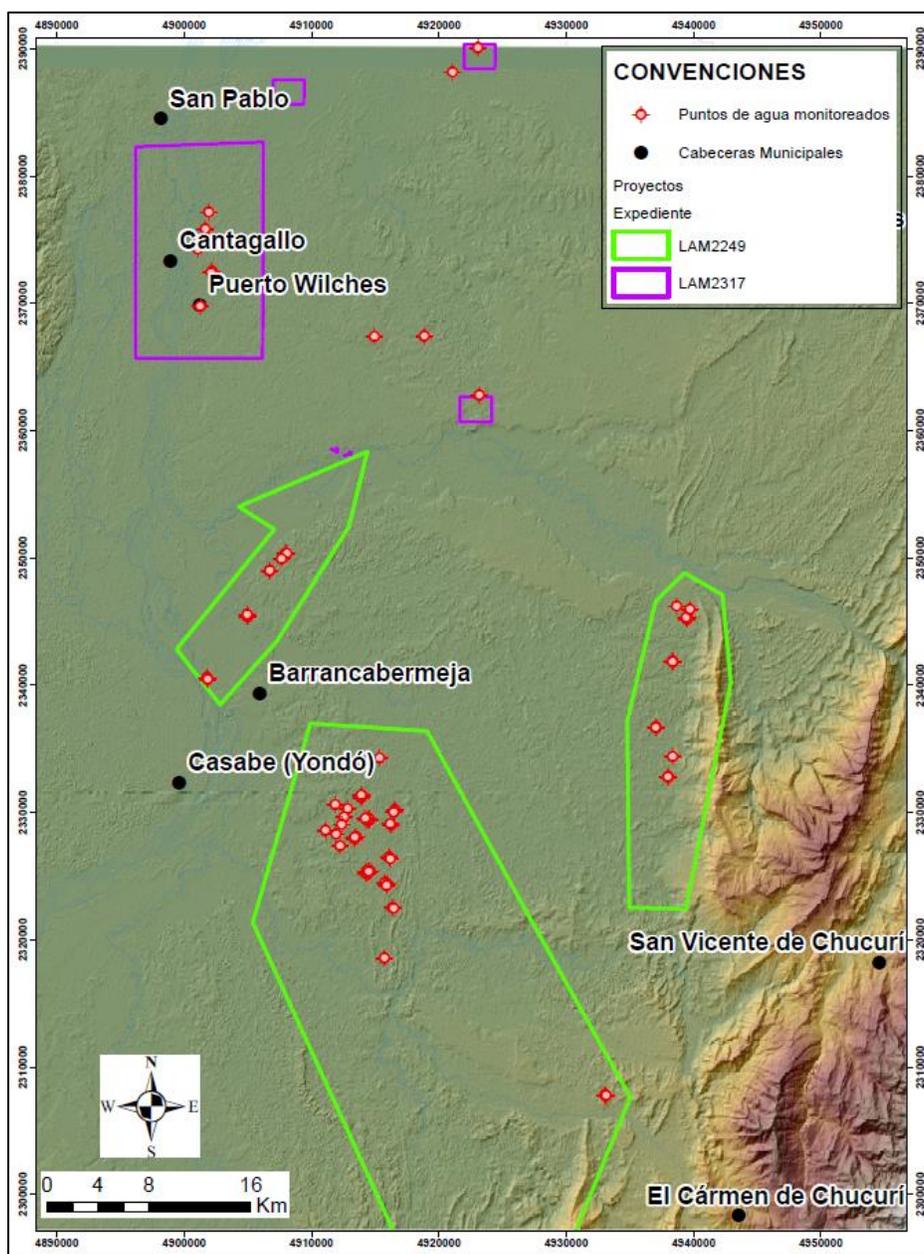
Actualmente, los proyectos Campos de la Superintendencia de Mares (LAM2249) y Campos Petroleros Cantagallo y aledaños (LAM2317) son responsables de la red de monitoreo regional, que hasta el momento está oficialmente conformada (mediante acto administrativo) por dieciséis (16) puntos de agua subterránea, distribuidos en once (11) pozos profundos y cinco (5) piezómetros (**Tabla 1**). No obstante, el proyecto “Campos de la Superintendencia de Mares” (LAM2249) reporta datos de sesenta y ocho (68) puntos de agua subterránea adicionales (ver **Anexo 1**), de los cuales sesenta y tres (63) son piezómetros y cinco (5) pozos profundos. Por lo tanto, para el presente análisis regional se cuenta con información de un total de ochenta y



cuatro (84) puntos, distribuidos en dieciséis (16) pozos profundos y sesenta y ocho (68) piezómetros.

En la **Ilustración 6** se presenta la distribución de los puntos de agua subterránea que actualmente hacen parte de la estrategia de monitoreo regional en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM, además, en la **Tabla 1** y **Anexo 1** se incluyen las características principales de cada punto. El detalle del número de puntos de monitoreo por unidad geológica se presenta en la **Tabla 2**.

**Ilustración 6.** Localización de los proyectos y puntos de agua subterránea monitoreados en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



Tabla 1. Puntos de agua subterránea que actualmente hacen parte de la estrategia de monitoreo regional en la cuenca del Valle Medio del Magdalena – VMM

Características del punto							
Expediente	Proyecto	ID Licenciatario	ID ANLA	Tipo de punto	Origen Único Nacional		Unidad geológica captada
					Este	Norte	
LAM2249	Campos de la Superintendencia de Mares	Pozo Llanito 1A Planta Compresora Llanito	MSB-LAM2249-001	Pozo	4.907.665,39	2.349.959,29	Grupo Real
		Pozo Miraflores - Particular	MSB-LAM2249-002	Pozo	4.915.363,92	2.334.287,42	Grupo Real
		Pozo ABA 1 Tesoro 41 (Agua Subterránea)	MSB-LAM2249-003	Pozo	4.938.374,77	2.334.408,65	Grupo Real
		Pozo Lisama 5A Estación Central de Lisama	MSB-LAM2249-004	Pozo	4.939.718,62	2.346.000,28	Grupo Real
		Pozo captador P-074	MSB-LAM2249-005	Pozo	4.938.687,96	2.346.240,25	Grupo Real
LAM2317	Campos petroleros Cantagallo y aledaños	Pozo La Cristalina	MSB-LAM2317-0043	Pozo	4.923.078,37	2.390.124,99	Llanuras de Inundación - Depósitos de coluvión y Terrazas Aluviales
		PM - 3 Ubicado detrás del Pozo CR-3	MSB-LAM2317-0044	Piezómetro	4.921.100,08	2.388.192,30	Llanuras de Inundación
		Pozo Taladro 2	MSB-LAM2317-0045	Pozo	4.923.196,09	2.362.842,06	Grupo Real
		Pozo Km 20	MSB-LAM2317-0046	Pozo	4.918.872,24	2.367.454,96	Grupo Real
		Pozo San Claver Km 16	MSB-LAM2317-0047	Pozo	4.914.955,09	2.367.418,42	Grupo Real
		PM-4A Cantagallo	MSB-LAM2317-0048	Piezómetro	4.901.675,78	2.375.859,52	Depósitos Aluviales Recientes
		PM-5A Cantagallo	MSB-LAM2317-0049	Piezómetro	4.901.097,34	2.374.273,00	Depósitos Aluviales Recientes
		PM-6A Cantagallo	MSB-LAM2317-0050	Piezómetro	4.902.218,43	2.372.561,46	Depósitos Fluvio Lacustres
		PM-7A Cantagallo	MSB-LAM2317-0051	Piezómetro	4.902.135,21	2.372.444,74	Depósitos Fluvio Lacustres
		Acueducto Santa Teresa	MSB-LAM2317-0052	Pozo	4.901.961,83	2.377.196,91	Depósitos Aluviales Recientes - Grupo Real
Planta de tratamiento - Casco Urbano Puerto Wilches	MSB-LAM2317-0053	Pozo	4.901.270,39	2.369.785,64	Depósitos Fluvio Lacustres - Terrazas Aluviales - Grupo Real		

Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



Tabla 2. Puntos de monitoreo de agua subterránea por unidad geológica

Unidad geológica	Puntos de agua subterránea		
	Piezómetros	Pozos	Total
Depósitos Cuaternarios	11	3	14
Grupo Real	15	8	23
Formación Colorado	39	5	44
Formación Mugrosa	3	0	3
		<b>Total</b>	<b>84</b>

Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

## 1.2 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 para la estrategia de monitoreo:

- **Parámetros in situ:** temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Sólidos Disueltos Totales - SDT y nivel estático.
- **Parámetros cuantificados en laboratorio:** oxígeno disuelto, dureza, sodio, potasio, magnesio, calcio, hierro, aluminio, sulfatos, cloruros, nitratos, carbonatos, bicarbonatos, arsénico, bario, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio, hidrocarburos totales (TPH), fenoles, BTEX, coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y bacteria E. Coli.

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:

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

Con el fin de que los resultados de las muestras se puedan analizar confiablemente, éstas deben ser objeto del cálculo del balance iónico, para así cuantificar el porcentaje de error analítico y determinar el nivel de confiabilidad de los valores de concentración reportados. A la luz de lo anterior, el error máximo aceptable es de  $\pm 10\%$ , el cual debe ser reportado por el mismo laboratorio que analice las muestras. En consecuencia, en el análisis realizado en el presente documento, solamente fueron valoradas como aceptables las muestras de agua subterránea que cumplieron con el porcentaje de error máximo establecido.

## 1.3 Condiciones de Tiempo

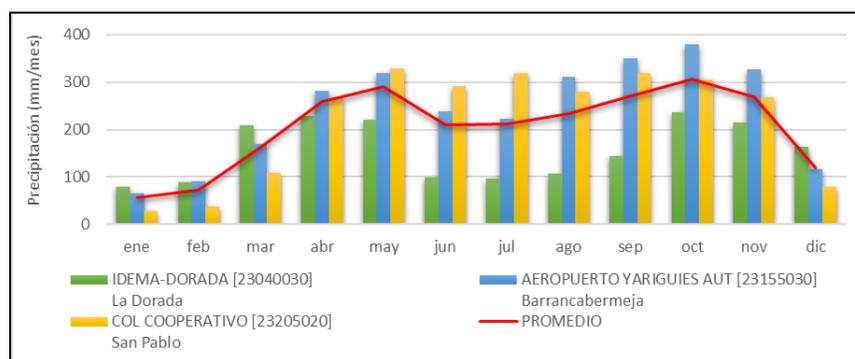
La variación estacional de los periodos de lluvias y periodos secos no solamente influye en la posición del nivel freático, sino que eventualmente genera cambios físicos y químicos



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 analizaron los registros presentados por algunas estaciones climatológicas localizadas en la cuenca del VMM (ver **Ilustración 7**). De acuerdo con el análisis de la información de precipitación media mensual multianual, el régimen de precipitación para la zona de estudio es bimodal, con dos periodos de altas precipitaciones, uno en el mes de mayo en el primer semestre, y otro en el mes de octubre en el segundo semestre, presentando este último un periodo lluvioso de mayor magnitud. Por su parte, los meses más secos son enero y febrero.

**Ilustración 7.** Precipitación total media mensual multianual (2010 - 2023) para la cuenca del VMM



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo con datos de IDEAM, 2023

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

- Campaña 1: mes de febrero para el monitoreo en época de estiaje.
- Campaña 2: mes de noviembre para el monitoreo en época lluviosa.

Además, como se mencionó anteriormente, la estrategia solicita la cuantificación mensual de parámetros in situ.

## 1.4 Condiciones especiales en el área de la estrategia

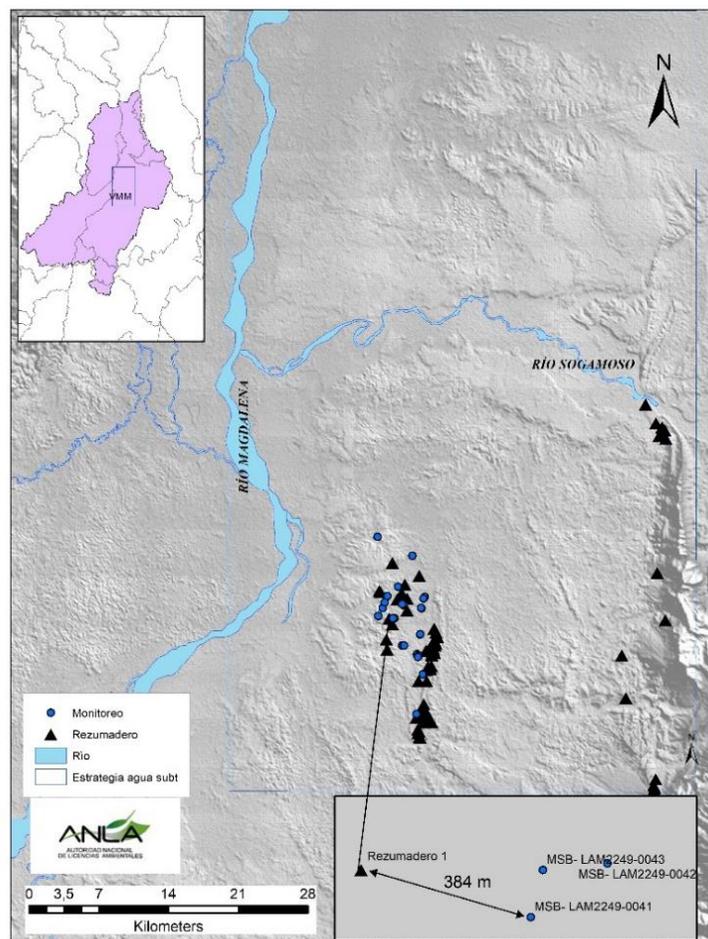
En el área de la estrategia se encuentran 69 rezumaderos, que corresponden a manifestaciones de hidrocarburos que tienden a presentarse de manera natural a lo largo de las fallas geológicas principales y secundarias, varios de los rezumaderos presentes se encuentran sobre las Formaciones Mugrosa y Colorado, que en algunos sectores se



encuentran aflorando en el área del proyecto Campo de la Superintendencia de Mares (Expediente LAM2249). Teniendo en cuenta que estas formaciones corresponden a unidades operacionales en el campo y que son roca yacimiento, se espera que los rezumaderos se presenten en estas áreas de forma natural.

En la **Ilustración 8** se muestra la distribución de los rezumaderos respecto a lo puntos de monitoreo de la estrategia regional, además, se muestra en detalle que el punto de monitoreo más cercano a uno de los rezumaderos está localizado a 384 m.

**Ilustración 8.** Rezumaderos y puntos de monitoreo de la estrategia regional



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Se pudo verificar que los rezumaderos se encuentran localizados entre los 380 m y 2 km de distancia de los puntos de monitoreo analizados, la posible relación entre las concentraciones de los puntos de monitoreo y la presencia de estos cuerpos se analiza en el apartado de análisis fisicoquímicos asociados a los hidrocarburos.



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

Una vez revisada la información que los proyectos que hacen parte de la estrategia han entregado a esta Autoridad Ambiental, se identificó que en el marco de esta se ha remitido la información presentada en el **Anexo 2**.

Con la entrega de esta información se compilan monitoreos de los años 2022 y 2023. Con respecto al proyecto Campos de la Superintendencia de Mares (LAM2249) se tienen los monitoreos de las temporadas seca y lluvias de los años 2022 y 2023, además de los monitoreos mensuales de parámetros in situ para la totalidad de los meses.

Con relación al proyecto Campos petroleros Cantagallo y aledaños (LAM2317) se tiene información de monitoreos in situ del año 2022 (de junio a octubre y diciembre), respecto al año 2023 se cuenta con los monitoreos de la temporada de lluvias, además de la cuantificación de los situ de los meses de noviembre y diciembre.

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

A continuación, se presenta un análisis de los datos que han sido reportados en el marco de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM, con el fin de verificar las condiciones de calidad y disponibilidad de dicho recurso a escala regional. 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.

Es importante mencionar que en este informe de análisis regional las interpolaciones y análisis geoespaciales presentados están limitados espacialmente por el área de los expedientes analizados, dado que de momento no se cuenta con información de la totalidad de los proyectos que integran la estrategia, por lo tanto, la información analizada aún no es representativa de la totalidad del área de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Por lo tanto, 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.

Adicionalmente, es importante 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 de presente el Artículo 2.2.3.3.3.4 del Decreto 1076 de 2015: *“ARTÍCULO 2.2.3.3.3.4. Criterios de Calidad para usos múltiples. En aquellos tramos del cuerpo de agua o acuífero en donde se asignen usos múltiples, los criterios de calidad para la destinación del recurso corresponderán a los valores más restrictivos de cada referencia.”*

Para la realización de los diagramas hidrogeológicos se emplearon solamente las muestras de agua subterránea que no superaron el porcentaje máximo de error analítico, el cual fue establecido de acuerdo con referencias bibliográficas en un 10%. Dicho porcentaje fue verificado por parte del Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo, de lo cual es importante destacar que para los análisis de la temporada seca fueron empleados el 43% de los muestreos (39 de 91 muestras), y para el caso de la temporada de lluvias el 41% (42 de 102 muestras), es decir que se tuvieron que descartar más de la mitad de los muestreos debido a que el error analítico supero el valor máximo establecido. Adicionalmente, es preciso aclarar que en algunos puntos de agua subterránea no es posible realizar una comparación entre temporadas climáticas debido a que no 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.

Por otro lado, considerando que el sector de hidrocarburos es el de mayor relevancia en el área de la cuenca del VMM, con una importante presencia de proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos, en el análisis del presente documento se consideraron monitoreos de aguas de formación y aguas residuales industriales empleadas en las actividades de reinyección; la información empleada fue la siguiente:

- Expediente LAM2249 - Campos de la Superintendencia de Mares: monitoreos tomados del documento *“Inyección como mecanismo de mantenimiento de presión y recobro mejorado de hidrocarburos en los Bloques de Mares”*, realizado por parte de Ecopetrol S.A. en el año 2023 en el marco del trámite de Modificación del Plan De Manejo Ambiental Integral de Mares. En este documento se tomó información de monitoreos de agua de formación de los años 2005 y 2017, y monitoreos de agua residual industrial de los años 2007, 2014, 2016, 2018 y 2019.
- Expediente LAM2317 - Campos petroleros Cantagallo y aledaños: monitoreos de agua residual industrial de los años 2018 y 2019, y un monitoreo de agua de formación del año 2022.

- Expediente LAM0172 - Campos Payoa, Salinas, Corazón, Aguas Claras y Las Monas: monitoreo del año 2023 del agua residual industrial de la Planta de inyección de agua – Batería Payoa.

Cabe resaltar que los proyectos anteriormente mencionados tienen la obligación de entregar a esta Autoridad los resultados de los monitoreos de agua residual industrial, no obstante, en la revisión de la información que reposa en cada expediente no se encontró un registro continuo de estos monitoreos, dado que la obligación de su entrega fue establecida recientemente o porque no han sido entregados y fueron objeto de requerimiento en los seguimientos ambientales.

Por lo tanto, en el análisis comparativo realizado en el presente documento se empleó como punto de partida la información anteriormente citada, la cual será complementada en los siguientes análisis regionales con los nuevos monitoreos de aguas de formación y aguas residuales industriales que sean allegados a esta Autoridad en el marco de los seguimientos ambientales de los proyectos involucrados.

## **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).

Teniendo 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 con una frecuencia mensual, con los valores cuantificados de estos parámetros se elaboraron gráficas comparativas a lo largo de las diferentes temporadas climáticas, 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.

El análisis espacial por temporada climática de la conductividad eléctrica (**Ilustración 9**), muestra la distribución del parámetro en toda el área de la estrategia, indicando zonas de baja conductividad con valores que no superan los 596  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , asociadas a aguas dulces hacia el norte; zonas de moderada conductividad en un intervalo entre 2500 y 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en hacia el



Sur Oeste diferenciando claramente la presencia de zonas de alta conductividad con valores de hasta 11000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la zona Oeste y sur del polígono, asociadas con aguas salobres.

La tendencia espacial se mantiene a lo largo de las tres temporadas climáticas, acentuando las concentraciones puntuales altas en la temporada de transición, por lo que se concluye que los niveles altos de este parámetro pueden indicar aguas con mayores tiempos de residencia, mineralizaciones propias de la unidad de almacenamiento, o aportes externos.

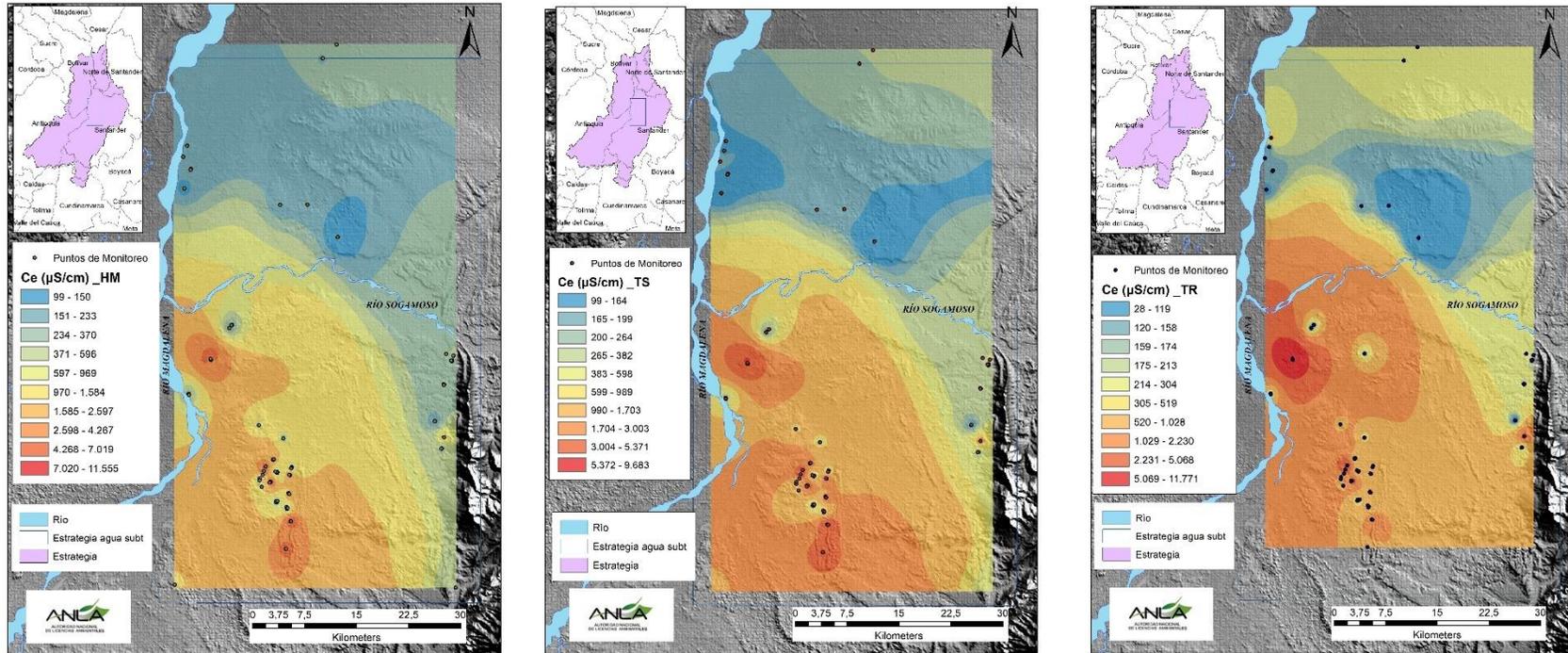
En este orden de ideas y con el fin de complementar el comportamiento espacial de la conductividad, se analizaron paralelamente los parámetros de Sólidos Disueltos Totales - SDT y conductividad eléctrica, en las respectivas temporadas climáticas, y además asociados a las unidades geológicas captadas (**Ilustración 10**), indicando que para las unidades Cuaternarias, Depósitos Fluviolacustres (Qfal), Depósitos Fluviolacustres – Terrazas aluviales -Grupo Real (Qfal-Qal) y Grupo Real (N1r) asociadas a los acuíferos superficiales, los valores de CE y SDT, no exceden los valores típicos para aguas dulces, con intervalos de conductividad eléctrica menores a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las tres temporadas climáticas analizadas, no obstante la unidad Cuaternario aluvial en la zona de la Estación Gala presenta concentraciones promedio típicas de agua salobre del orden de 5500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 3500 mg/L para de CE y SDT respectivamente, tendencia que se mantiene a lo largo del año hidrológico; para Formaciones Colorado y Mugrosa los parámetros presentan concentraciones promedio moderadas a altas (1900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ - 5800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), asociadas con aguas salobres, registrando los valores más altos en la temporada de lluvia y mostrando descenso en las concentraciones en las temporadas seca y de transición.

Los parámetros analizados presentan correlación de acuerdo con las relaciones bibliográficas indicadas, salvo la unidad geológica Cuaternario Aluvial (Qal), que para las temporadas lluvia y seca, denota un significativo aumento en los sólidos disueltos totales, concentraciones asociadas a puntos específicos y que pueden estar asociados 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.

Teniendo en cuenta el análisis espacial y gráfico se puede observar que los promedios de CE y SDT altos se encuentran en puntos que captan de la unidad Cuaternario Aluvial, Formación Colorado y Mugrosa, localizados en la zona oeste y sur del área de la estrategia respectivamente.



**Ilustración 9.** Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) cuantificados por temporada climática

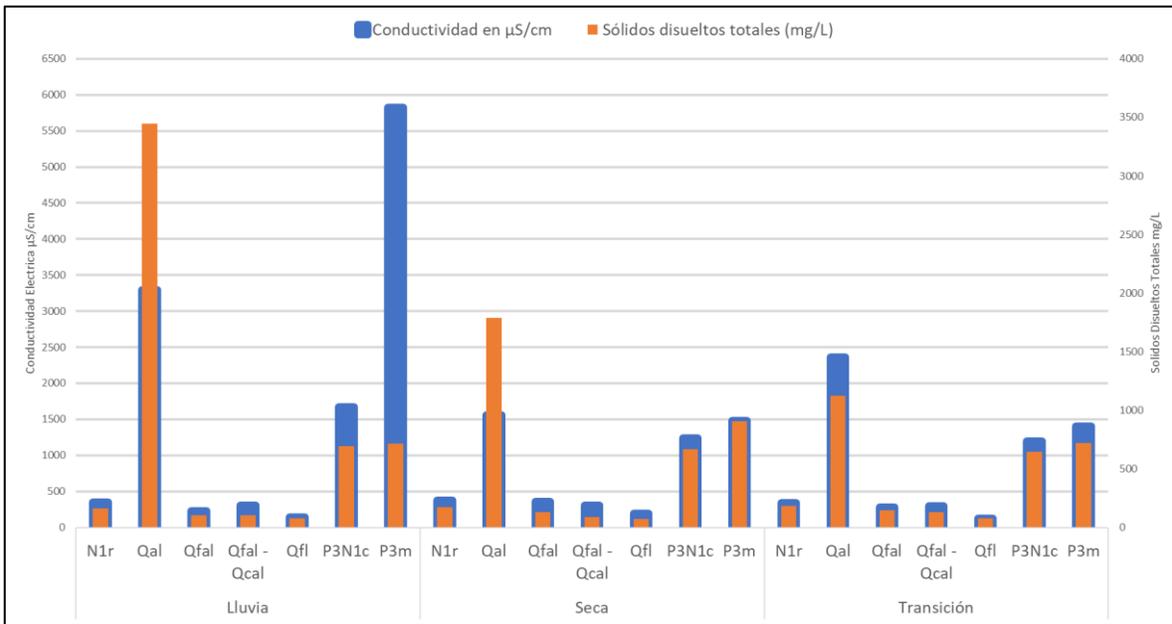


\*\*\* **HM:** Temporada Húmeda (lluvias) **TS:** Temporada Seca **y TR:** Temporada de Transición

**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo, 2024



**Ilustración 10.** Distribución promedio de la Conductividad Eléctrica (CE) por unidad geológica



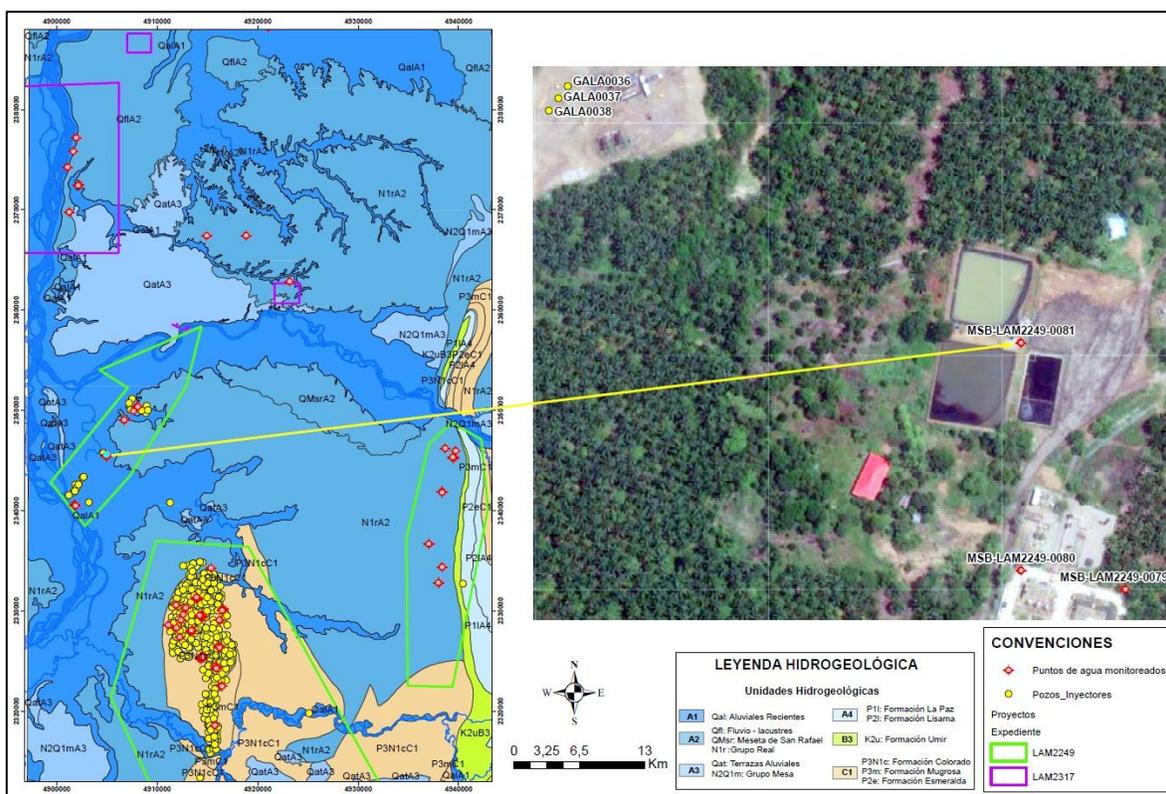
**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo, 2024

Considerando que las Formaciones Colorado y Mugrosa, contienen aguas mineralizadas salobres, los puntos con valores de CE y SDT altos estarían asociados con las características propias de estas; sin embargo, las concentraciones altas de estos parámetros en la unidad Cuaternario Aluvial (Qal), indican posibles aportes externos asociados con la actividad industrial que es dominante en esta zona.

Los puntos de monitoreo que reportan estos resultados están asociados con el expediente LAM2249, específicamente en la Estación Gala del Bloque Llanito, zona industrial donde se realiza la separación trifásica (agua -crudo -gas) del hidrocarburo de esta zona del campo, proceso en el que el agua de formación es almacenada en piscinas previo tratamiento para su conducción a la PIA (**Ilustración 11**).



**Ilustración 11.** Localización de los puntos de monitoreo con concentraciones anómalas



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Como se puede observar en la **Ilustración 11**, el punto de monitoreo MSB-LAM2249-0081, que se encuentra en la unidad geológica Cuaternario Aluvial (Qal), y está ubicado en la zona oeste de la estrategia de monitoreo, presenta los valores más altos de CE y SDT, también se encuentra situado muy cerca de las piscinas de almacenamiento de la Estación Gala, así mismo está a una distancia de aproximadamente 300 m de pozos inyectores de la misma estación.

Según el análisis anterior y los hallazgos del seguimiento, se sugiere implementar un análisis de rehabilitación que permita la recuperación de los sitios posiblemente afectados, sobre todo teniendo en cuenta que de acuerdo con los análisis de CE y SDT citados en el Modelo Hidrogeológico Conceptual del VMM, realizado por parte del SGC en el año 2019, en puntos de la comunidad localizados en Campo Gala, se presentan concentraciones de hasta 528  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mostrando valores típicos de aguas dulces e indicando que los valores altos encontrados en el presente análisis pueden estar asociados a las actividades de la industria.

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 Superintendencia Mares (LAM2249), Campo Cantagallo (LAM2317) y Campos Payoia, Salinas, Corazón, Aguas Claras y Las Monas, pertenecientes al contrato de asociación especial Carare – Las Monas (LAM0172), registrados desde el año 2005, encontrándose que las muestras de aguas residuales tienen conductividades que bajo revisión



de datos superan los 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respecto a los sólidos disueltos la mayoría de los valores sobrepasan los 14.000 mg/L; estos datos fueron tomados de los resultados de monitoreos de aguas industriales de los diferentes proyectos (ver **Anexo 3**). De lo anterior se concluye de manera general que no hay una interacción entre las aguas subterráneas someras y las aguas de formación de los niveles productores de hidrocarburos, no obstante, teniendo en cuenta los valores anómalos de la CE y SDT, en la zona oeste de la estrategia, se hace necesario realizar seguimiento a estos puntos en específico para descartar o verificar dicha relación.

## 5.2 Oxígeno Disuelto

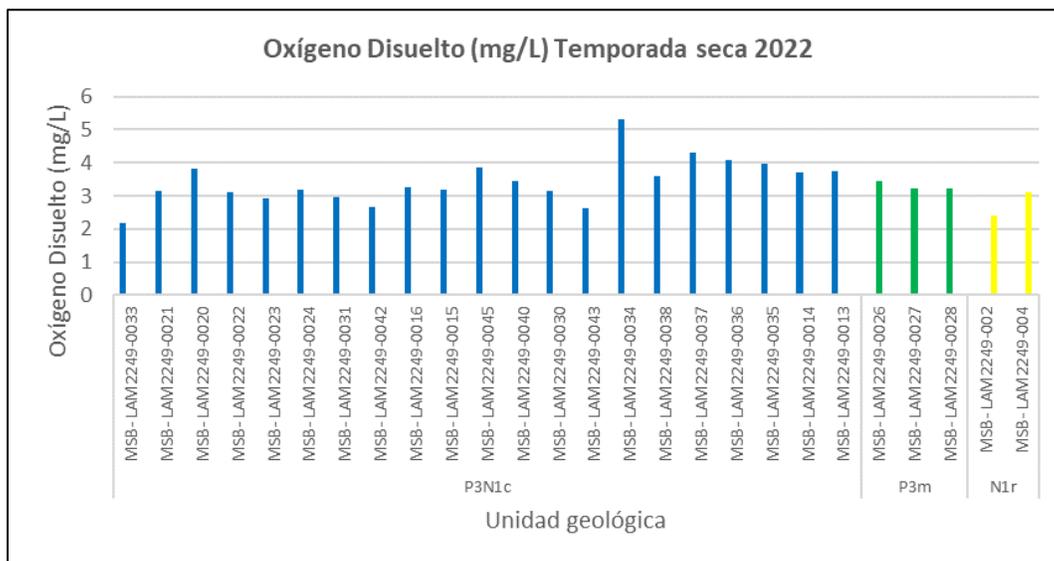
En el área de estudio se cuantifica el parámetro de oxígeno disuelto en las épocas climáticas de estiaje y lluvias para el año 2022, tal como se presenta en las **Ilustraciones 12 y 13**, y únicamente en época lluviosa para el año 2023, expuesto en la **Ilustración 14**.

De veintinueve (29) registros se obtuvo un promedio de 3,34 mg/L (máx. de 5,3 mg/L y min. de 2,17 mg/L) para la temporada seca del año 2022, siendo además que solo uno de estos superó los 5 mg/L. En contraste, durante la temporada de lluvias del mismo año, el promedio de los cinco (5) valores obtenidos fue de 5,44 mg/L (máx. de 7,68 mg/L y min. de 4,13 mg/L); vale la pena mencionar que, además, en la temporada en cuestión solo se obtuvieron valores para los puntos que captan los acuíferos recientes someros y el Grupo Real. Finalmente, para el año 2023 solo se cuenta con registros de la temporada de lluvias; en esta, el promedio es de 3,97 mg/L (máx. de 7,43 mg/L y min. de 0,35 mg/L), siendo los valores del Grupo Real los más elevados, con un promedio de 4,5 mg/L. De los setenta y dos (72) valores obtenidos, diecisiete (17) se encuentra por encima de los 5 mg/L, y se encuentran principalmente en los pozos que captan la Formación Colorado y el Grupo Real.

En relación con lo mencionado, Custodio & Llamas (1983) plantean concentraciones de entre 0 y 5 ppm (en este caso equivalente a mg/L) como rango normal para las aguas subterráneas, características que encajan con la mayoría de los registros encontrados, con énfasis en las épocas secas. Ahora bien, la tendencia generalizada a obtener valores más altos de oxígeno disuelto durante las épocas de lluvias, que además se dan principalmente en acuíferos someros, podría asociarse con una recarga por infiltración directa.

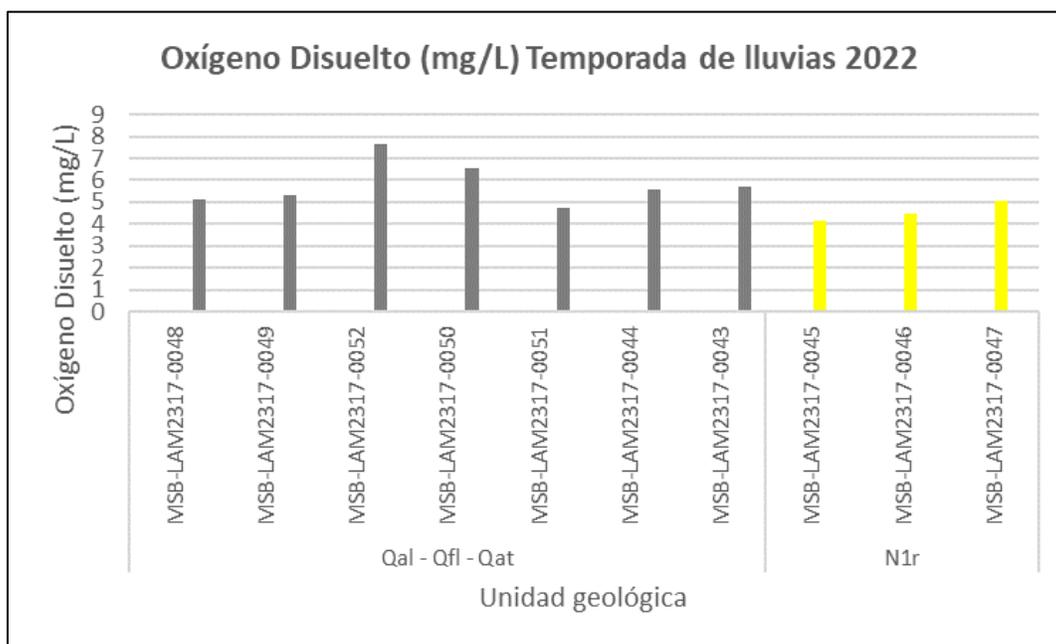


**Ilustración 12.** Oxígeno disuelto - Temporada seca 2022



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

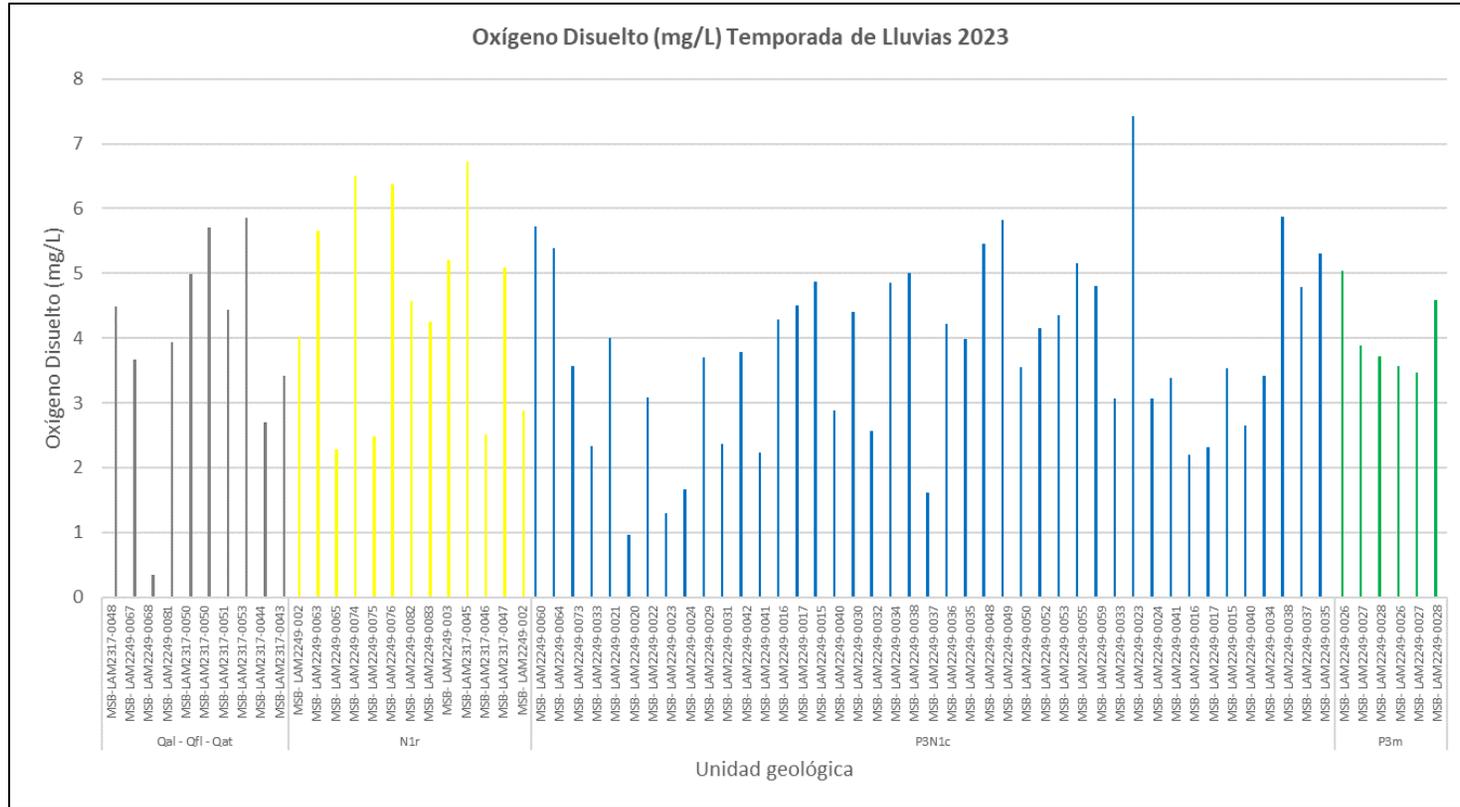
**Ilustración 13.** Oxígeno disuelto - Temporada de lluvias 2022



**Fuente:** Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



**Ilustración 14. Oxígeno disuelto - Temporada de lluvias 2023**



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo 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 Medio del Magdalena - VMM, 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. Así pues, se tienen en cuenta monitoreos de nivel estático de los expedientes LAM2249 y LAM2317, con registros del año 2022 y 2023.

A continuación, se expone el comportamiento medio mensual de la profundidad de los niveles estáticos medidos, clasificándose por unidad geológica como: Formación Colorado, Formación Mugrosa, Grupo Real, y Depósitos Cuaternarios. Cabe aclarar que las concesiones otorgadas por esta Autoridad captan al Grupo Real y los Depósitos Cuaternarios. Además, se realizó la siguiente división temporal para los diferentes periodos climáticos:

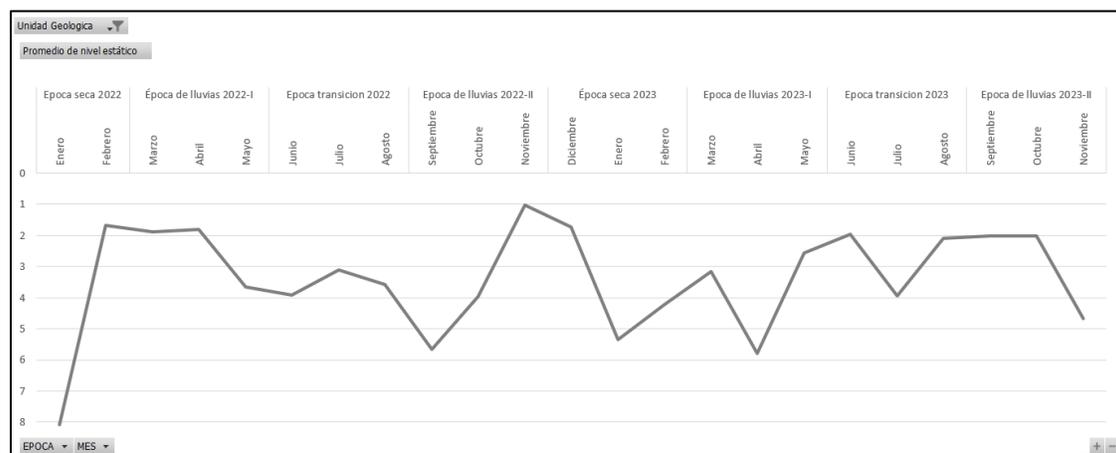
- Diciembre a febrero: época seca.
- Marzo a mayo: primera época de lluvias.
- Junio a Agosto: época de transición.
- Septiembre a noviembre: segunda época de lluvias.

### 5.3.1 Depósitos Cuaternarios (Qal-Qfl-Qat)

En esta categoría se unifican los Depósitos Aluviales Recientes, Depósitos Fluvio Lacustres, Terrazas Aluviales, Llanuras de Inundación y Depósitos de Coluvión, dada la característica de ser los acuíferos más someros en el área de interés.

Se analizan 149 registros, y se abarca desde la temporada seca del 2022 hasta la segunda temporada de lluvias del 2023.

**Ilustración 15.** Profundidad promedio de niveles estáticos Depósitos Cuaternarios (Qal – Qfl – Qat) (metros)



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

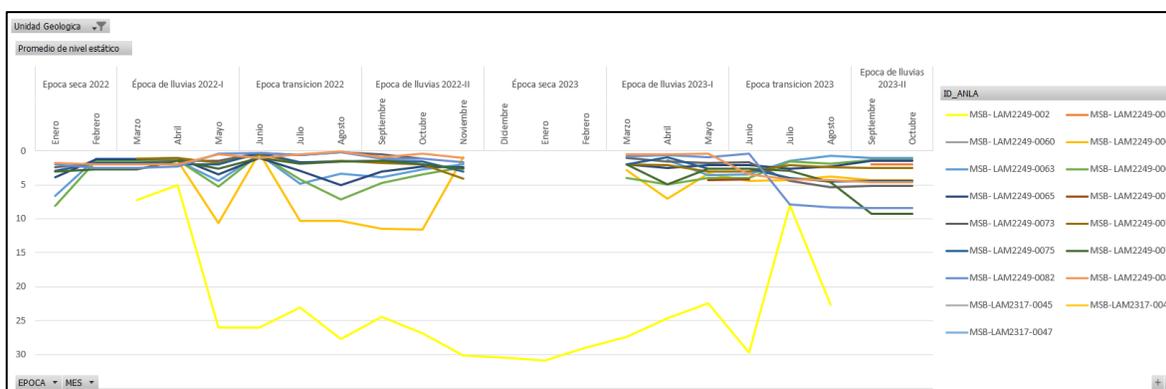


Como lo presenta la **Ilustración 15**, los niveles del agua subterránea medidos en puntos que captan las unidades someras muestran un rango medio de entre 1 y 9 m de profundidad, con su pico de superficialidad en la segunda época de lluvias del año 2022.

### 5.3.2 Grupo Real (N1r)

Los 244 registros para esta unidad geológica muestran una tendencia general entre 2 y 5 m de profundidad, constituyendo acuíferos someros. Sin embargo, y como se presenta en la **Ilustración 16**, los puntos MSB-LAM2249-002 y MSB-LAM2249-005 presentan un comportamiento diferente con relación al generalizado en esta unidad; destaca el punto MSB-LAM2249-002, en el cual se mantiene un promedio general superior a los 20 m de profundidad, con valores de niveles estáticos reportados de alrededor de 30 m en algunos meses.

**Ilustración 16.** Profundidad niveles estáticos Grupo Real (N1r) por punto de muestreo (metros)



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Al margen de lo anterior, surgen dos posibilidades en cuanto al origen de dichos comportamientos:

- Las anomalías en los valores para el punto MSB-LAM2249-002 se dan porque no se está dejando recuperar el nivel estático al momento de la medición.
- Se están truncando los valores reportados para nivel estático y nivel freático.

En tanto no hay forma de estar seguros de cuál puede ser el origen de dichas variaciones, se requiere que la Sociedad titular del expediente LAM2249 (al cual pertenece el punto hidrogeológico en cuestión), aclare las causas de tal comportamiento y que, dado el caso, se garantice la recuperación del nivel estático para su medición.

### 5.3.3 Formación Colorado (P3N1c)

Corresponde a la unidad con mayor cantidad de puntos y, subsecuentemente, de registros: se cuenta con 729 mediciones de nivel del agua. Sin embargo, si bien el cruce cartográfico ubica tales puntos hidrogeológicos sobre esta unidad, es información que requiere de aclaración mediante los diseños de dichos puntos.

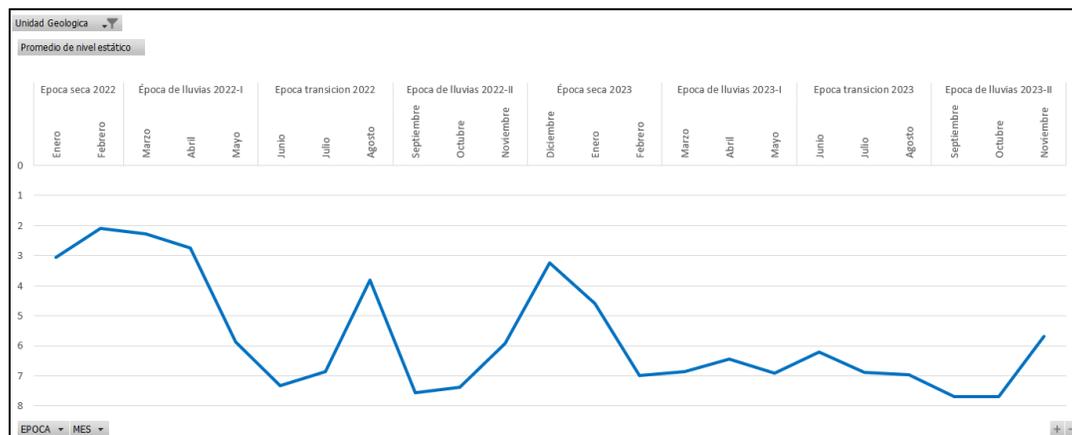
Como se observa en la **Ilustración 17** los niveles estáticos de la Formación Colorado, si bien se encuentran en un rango entre los 2 y 8 m de profundidad aproximadamente (5,81 m de





profundidad media), se observa una tendencia hacia el descenso en los valores medidos, siendo que para el año 2023 los niveles estáticos se encuentran alrededor de los 7 m de profundidad. Además, se aprecia la ocurrencia de dos picos de disminución en la profundidad del agua en los meses de agosto y diciembre del 2022, la primera en plena época transitoria, y la segunda tras la finalización de la temporada de lluvias.

**Ilustración 17.** Profundidad promedio de niveles estáticos Formación Colorado (P3N1c) (metros)



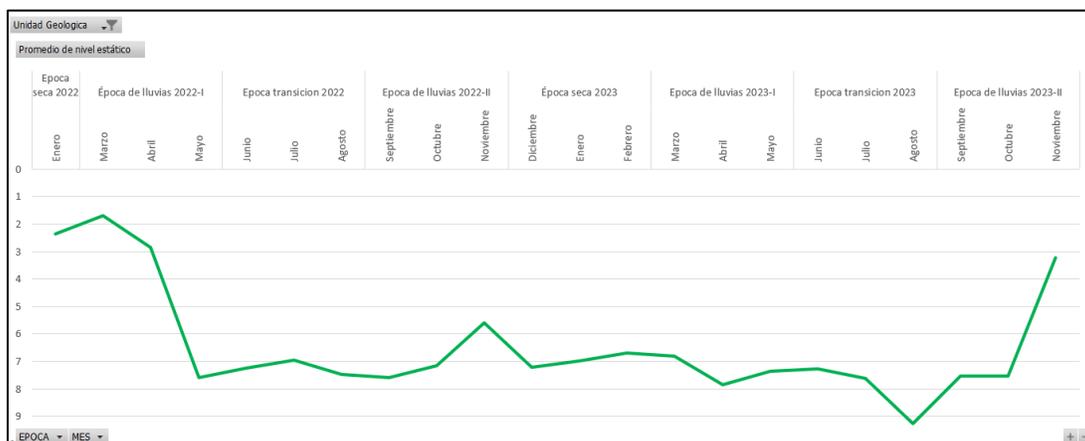
Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.3.4 Formación Mugrosa (P3m)

De forma similar a lo mencionado para la Formación Colorado, más allá de la concordancia geográfica de los puntos hidrogeológicos con esta unidad, se requiere realizar una aclaración a partir de la información de diseño de tales puntos.

En la **Ilustración 18** se puede observar que la profundidad de los niveles estáticos en esta unidad varía entre los 1,5 y 9,5 m, pero con una tendencia a estar por debajo de los 5 m (6,51 m de profundidad media); esto último, teniendo en cuenta que el promedio es de 6,5 m de profundidad.

**Ilustración 18.** Profundidad promedio de niveles estáticos Formación Mugrosa (P3m) (metros)



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



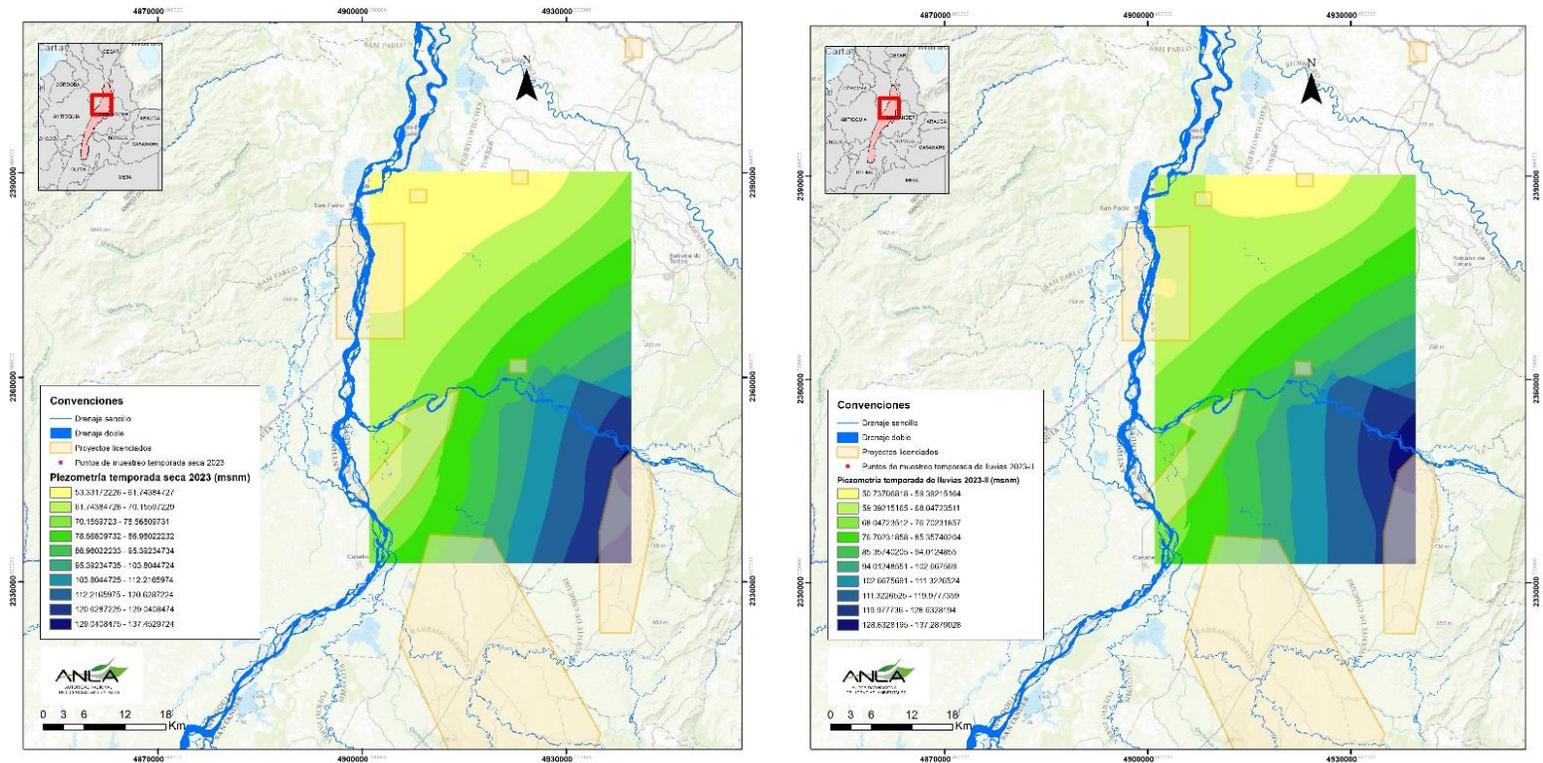
Dentro de la tendencia que presentan las aguas subterráneas en la unidad, destaca la respuesta a las épocas lluviosas del segundo semestre del año, en las que tiende a disminuir la profundidad media de los niveles estáticos, primero hacia los 5,5 m en 2022 y posteriormente hacia los 3 m en 2023.

Además de lo anterior, se determinó la profundidad y distribución espacial de la superficie piezométrica de los acuíferos constituidos por las formaciones geológicas cuaternarias que se reconocen en el área de estudio y que cuentan con información completa para este ejercicio, por medio de la técnica de interpolación de Kriging Ordinario, por el cual se pueden estimar los valores de una variable en lugares no caracterizados, utilizando la información proporcionada por la muestra.

Teniendo en cuenta lo anterior, se identificó la superficie piezométrica a partir de los registros de niveles piezométricos para las campañas realizadas en el año 2023, específicamente para los depósitos recientes, debido a que para este periodo se cuenta con una cantidad de datos suficiente para lograr realizar el análisis espacial adecuado (**Ilustración 19**). Además, teniendo en cuenta que el área de la estrategia es extensa, el marco de análisis se define hacia el norte, donde se localizan los proyectos que hacen parte de esta red de monitoreo y, por consiguiente, los puntos de muestreo. Si bien el análisis no define el comportamiento del área total de la estrategia, si 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.



**Ilustración 19.** Piezometría – Acuíferos Cuaternarios, época seca (izquierda) y época de lluvias (derecha)



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



A partir de la **Ilustración 19** se puede observar que el río Magdalena ejerce un control hidráulico en relación con la trayectoria de los acuíferos someros a nivel local: el flujo se da de forma preponderante en sentido suroriente - noroccidente, que a su vez se observa como un movimiento desde las zonas altas hacia las zonas bajas del cauce del río Magdalena, comportamiento que coincide con lo analizado en el análisis regional realizado por esta autoridad para el año 2022. Se puede decir, entonces, que probablemente el río Magdalena sería la zona de descarga de los acuíferos superficiales aquí estudiados.

Finalmente, y con relación a los niveles piezométricos, se observa un leve ascenso de estos en la época de lluvias en comparación a los advertidos durante la época seca de la primera parte del año, lo cual habría de relacionarse, tal como se mencionará en otros apartados del presente documento, con la influencia de las lluvias sobre los acuíferos del área de estudio y la recarga directa por infiltración hacia estos.

## 5.4 pH

Los valores de pH de las muestras analizadas presentan un rango promedio entre 5 y 7,6 unidades, presentándose los niveles más bajos en la temporada de lluvia en la unidad Depósitos Fluvio Lacustres -Terrazas – Grupo Real (Qfal - Qcal), por debajo del límite de 6,5 unidades establecido en el Artículo 4 de la Resolución 2115 de 2007, indicando aguas ácidas, y los valores más altos en la temporada de lluvia en la Formación Colorado (P3N1c), dentro del límite de 9 unidades establecido en el Artículo 4 de la Resolución 2115 de 2007, indicando aguas alcalinas de corto tránsito.

## 5.5 Dureza total

Este parámetro fue monitoreado en los puntos de agua subterránea que hacen parte de la red de monitoreo, durante dos temporadas climáticas (época seca y lluvias) en los años 2022 y 2023. A continuación, se presenta el análisis de la dureza total por temporada climática.

### 5.5.1 Época seca

El comportamiento de la dureza total en los puntos de agua subterránea que se encuentran captando la unidad geológica Formación Mugrosa (P3m) y la Formación Colorado (P3N1c) durante la época seca se presenta en la **Ilustración 20**.

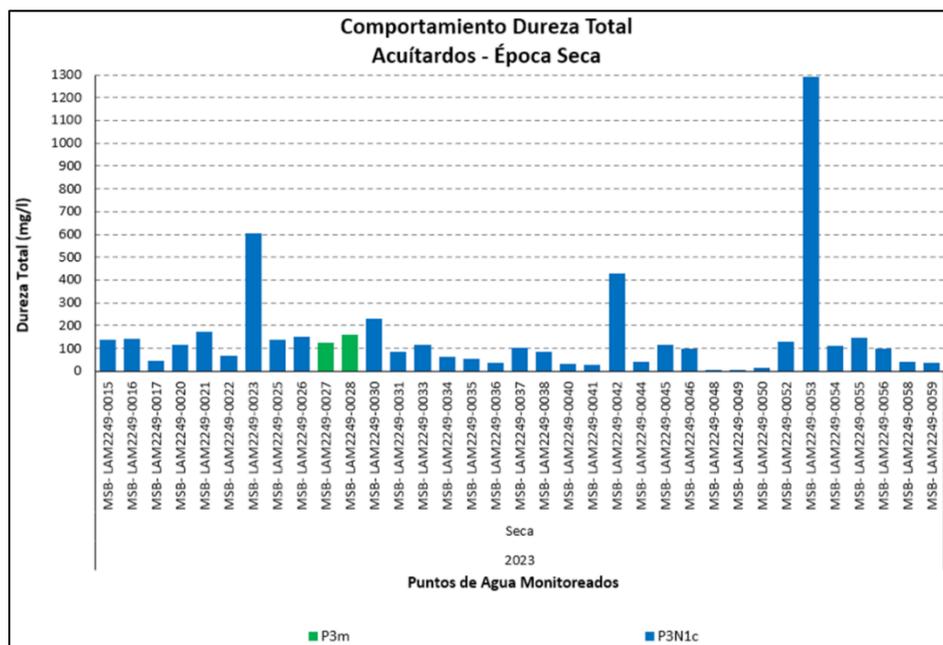
Los valores registrados en los puntos de agua subterránea que captan el acuitardo asociado a la Formación Mugrosa (P3m) oscilan entre 124 mg/L y 162 mg/L, clasificándolos como aguas duras. Del mismo modo, los valores registrados para los puntos de monitoreo que captan el acuitardo asociado a la Formación Colorado (P3N1c) varían entre 5,39 mg/L y 1291,82 mg/L, clasificándolas en aguas que van desde aguas blandas hasta muy duras.

En tres (3) muestras reportadas (MSB-LAM2249-0023, MSB-LAM2249-0042 y MSB-LAM2249-0053), el valor se encuentra por encima de 300 mg/l, el cual corresponde al 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*”.





**Ilustración 20.** Comportamiento del parámetro dureza total en los acuitardos – Época seca



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Por otro lado, en la **Ilustración 21** se presenta el comportamiento de la dureza total en los puntos de agua subterránea que se encuentran captando las unidades acuíferas asociadas al Grupo Real (N1r) y los Depósitos Aluviales Recientes (Qal) durante la época seca.

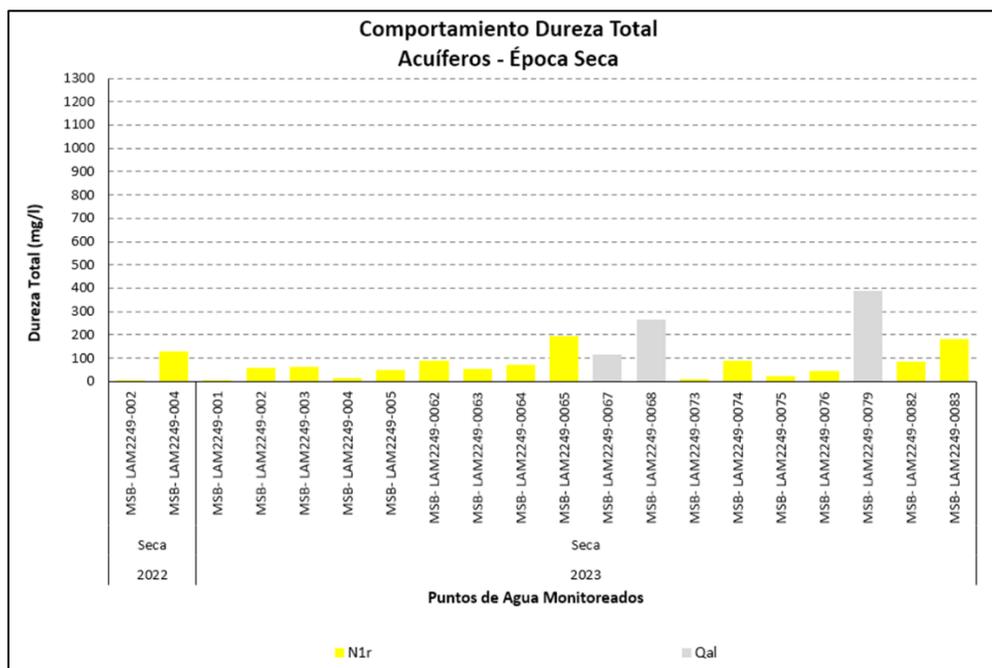
Los valores registrados en los puntos de agua subterránea que captan el acuífero asociado al Grupo Real (N1r) oscilan entre 3,94 y 193,31 mg/L, clasificándolos desde aguas blandas hasta muy duras. Asimismo, los valores registrados para los puntos de monitoreo que captan el acuífero asociado a los Depósitos Aluviales Recientes (Qal) varían entre 114,93 y 386,62 mg/L, clasificándolos desde aguas moderadamente duras hasta muy duras.

La muestra MSB-LAM2249-0079 con concentración de dureza total de 386,62 mg/l, se encuentra por encima de 300 mg/l, el cual corresponde al 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*”.





**Ilustración 21.** Comportamiento del parámetro dureza total en los acuíferos – Época seca



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.5.2 Época de lluvia

En la **Ilustración 22**, se presenta el comportamiento de la dureza total en los puntos de agua subterránea que monitorean los acuitardos asociados a la Formación Mugrosa (P3m) y la Formación Colorado (P3N1c) durante la época de lluvias.

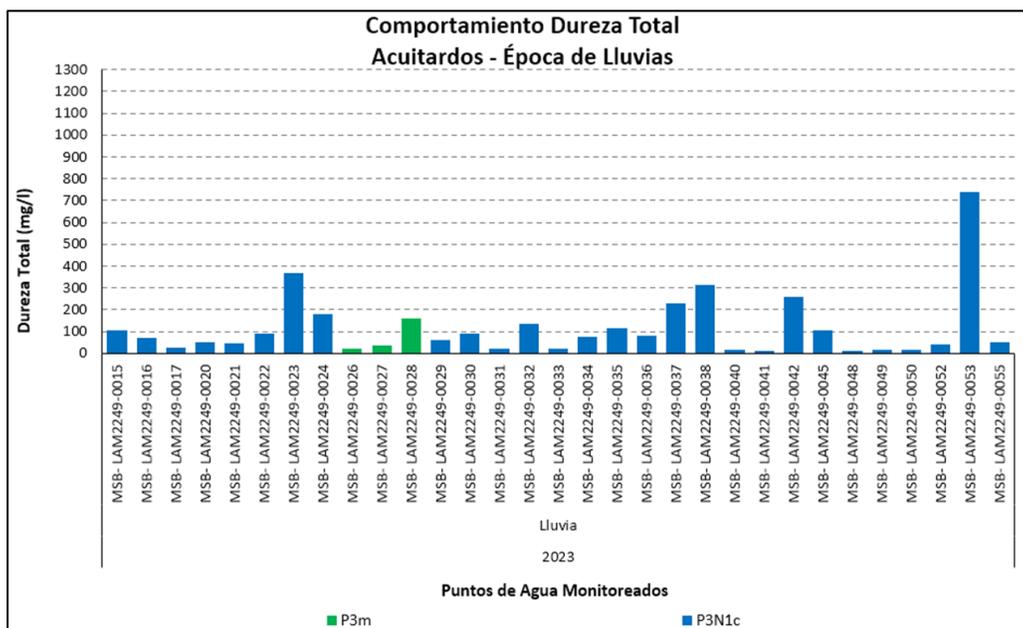
Los valores registrados en los puntos de agua subterránea que captan el acuitardo asociado a la Formación Mugrosa (P3m) oscilan entre 21,21 y 160,39 mg/L, clasificándolos como aguas que van de tipo blandas a duras. Del mismo modo, los valores registrados para los puntos de monitoreo que captan el acuitardo asociado a la Formación Colorado (P3N1c) varían entre 11,50 y 740 mg/L, clasificándolas en aguas que van desde aguas blandas hasta muy duras.

Las muestras MSB-LAM2249-0023, MSB-LAM2249-0038 y MSB-LAM2249-0053 muestran valores superiores a 300 mg/l, el cual es el límite máximo estipulado en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007, que define las características químicas con consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.





**Ilustración 22.** Comportamiento del parámetro dureza total en los acuitardos – Época Lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

De igual forma, en la **Ilustración 23** se observa el comportamiento de la concentración de dureza total en las unidades acuíferas asociadas al Grupo Real (N1r) y a los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qc, Qat, Qfl) durante la época lluvias.

Los valores registrados en los puntos de agua subterránea que captan el acuífero asociado al Grupo Real (N1r) oscilan entre 2,5 y 198 mg/L, clasificándolos desde aguas blandas hasta muy duras. Asimismo, los valores registrados para los puntos de monitoreo que captan el acuífero asociado a los Depósitos Aluviales Recientes (Qal) varían entre 32,81 y 762 mg/L, clasificándolos desde aguas blandas hasta muy duras.

Mientras que, la concentración de dureza total en los puntos que monitorean los depósitos Qfal, Qfl, Qc, Qfl y Qat indica un agua de tipo blanda.

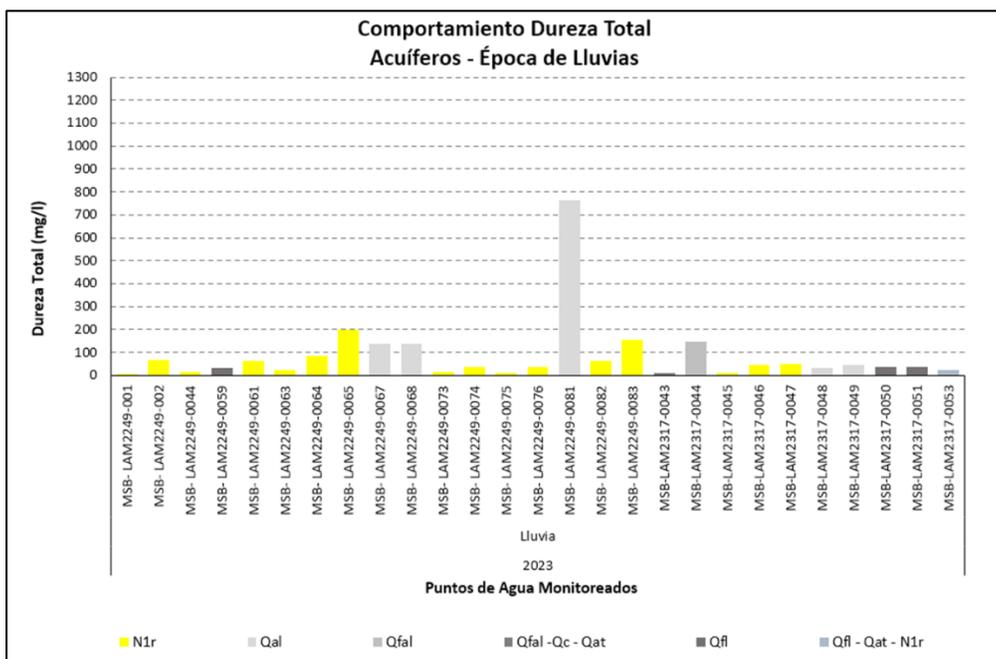
La muestra MSB-LAM2249-0081 con concentración de dureza total de 762 mg/l, se encuentra por encima de 300 mg/l, el cual corresponde al valor máximo estipulado en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 “*características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana*”.

En consecuencia, se recomienda solicitar a los respectivos licenciatarios, en el marco de los seguimientos ambientales, el análisis de las causas asociadas a los valores elevados en la concentración de dureza total del agua subterránea, en los puntos mencionados anteriormente.





**Ilustración 23.** Comportamiento del parámetro dureza total en los acuíferos – Época de Lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

## 5.6 Nitratos y Nitritos

En el agua subterránea el nitrógeno puede aparecer en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), amonio ( $\text{NH}_4$ ) y por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en nitritos ( $\text{NO}_2$ ) y finalmente en nitratos ( $\text{NO}_3$ ) 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.

A partir de los monitoreos considerados en el presente análisis regional, se evidenció que los nitratos y nitritos para el 90% de los puntos, presenta valores inferiores al límite de detección de acuerdo con los reportes de los licenciatarios y los valores reportados, correspondientes con el 10% restante, están por debajo de 2 mg/L. 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.

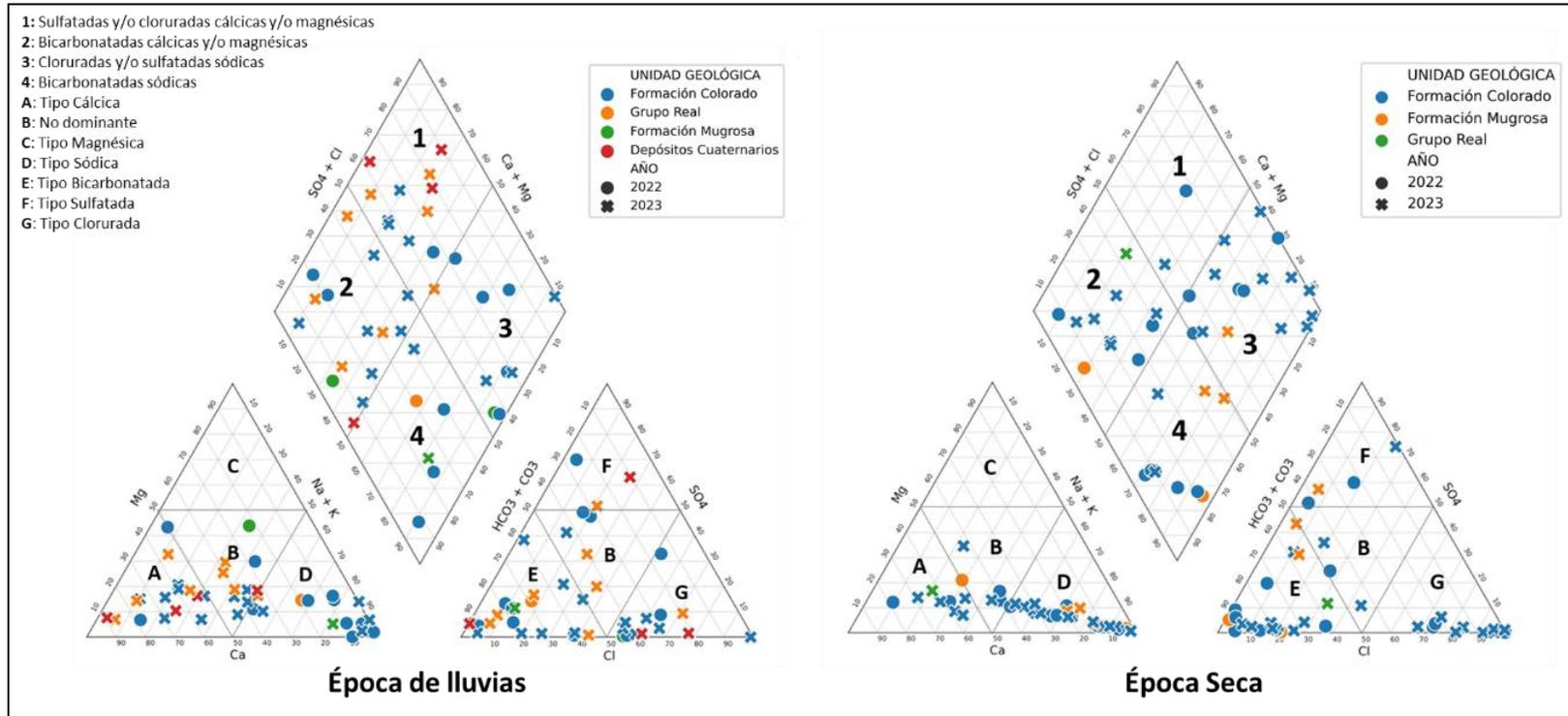
A continuación, se presenta un diagrama de Piper por cada una de las campañas de monitoreo (**Ilustración 24**), las cuales fueron realizadas en temporadas climáticas diferentes (época de lluvias y seca), de acuerdo con las condiciones de tiempo planteadas en la estrategia. Las muestras de agua fueron organizadas de acuerdo con la unidad geológica captada, realizando las siguientes agrupaciones:

- Depósitos Cuaternarios
- Formación Colorado
- Grupo Real
- Formación Mugrosa





**Ilustración 24.** Diagramas de Piper por cada temporada climática - Monitoreo años 2022 y 2023.



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



### 5.7.1 Época Seca

A partir de los monitoreos realizados en el periodo climático seco (diciembre - febrero) en los años 2022 y 2023, se pueden observar las siguientes características:

- Durante esta temporada climática en los años 2022 y 2023, se tienen monitoreos del recurso hídrico subterráneo en la Formación Colorado, Formación Mugrosa y Grupo Real.
- La Formación Colorado (P3N1c) en la temporada seca cuenta con el monitoreo de 17 muestras, en las cuales, no se observa una tendencia clara en su composición hidroquímica, ya que presenta aguas con facies hidrogeoquímicas bicarbonatadas cálcicas y sódicas, así como Cloruradas. En menor proporción (2 muestras) presentan facies Sulfatas.
- La Formación Mugrosa (P3m) en la temporada seca cuenta con el monitoreo de tres (3) muestras, observándose para el año 2022, dos facies hidrogeoquímicas: dos (2) puntos presentaron agua de tipo Bicarbonatadas sódicas y una (1) muestra de tipo Bicarbonatada cálcicas.
- La Formación Mugrosa (P3m) para el año 2023, presenta aguas con facies hidrogeoquímicas Bicarbonatadas sódicas y Sulfatas sódicas.
- El Grupo Real (N1r) en la temporada seca cuenta con el monitoreo de una (1) muestra, cuya facie hidrogeoquímica es Bicarbonatadas cálcicas.

### 5.7.2 Época de lluvias

Respecto a la época de lluvias, se cuenta con los monitoreos realizados en los años 2022 y 2023, que presentan las siguientes características:

- Durante esta temporada climática en los años 2022 y 2023, se tienen monitoreos del recurso hídrico subterráneo en la Formación Colorado, Formación Mugrosa, Grupo Real y Depósitos Cuaternarios.
- La Formación Colorado (P3N1c) en la época de lluvias cuenta con el monitoreo de 18 muestras, en las cuales, no se observa una tendencia clara en su composición hidroquímica, ya que presenta aguas con facies hidrogeoquímicas: Sulfatas y/o Cloruradas cálcicas, Bicarbonatadas cálcicas y/o sódicas, Sulfatadas sódicas y en menor proporción Bicarbonatadas sódicas.
- La Formación Mugrosa en la época de lluvias cuenta con el monitoreo de dos (2) muestras, observándose para el año 2022, dos facies hidrogeoquímicas: agua de tipo Bicarbonatadas cálcica y/o magnésica; y Cloruradas y/o Sulfatadas sódicas.
- La Formación Mugrosa en la época de lluvias para el año 2023, contó con el monitoreo de una (1) muestra, cuya facie hidrogeoquímica es Bicarbonatada sódica.
- El Grupo Real (N1r) en la época de lluvias para el año 2022, presenta el monitoreo de una (1) muestra, cuya facie hidrogeoquímica es Bicarbonatada sódica.
- El Grupo Real (N1r) en la época de lluvias para el año 2023, presenta el monitoreo de ocho (8) puntos, en los cuales predominan dos facies: Cloruradas cálcicas y Bicarbonatadas cálcicas.



- Los Depósitos Cuaternarios en la época de lluvias para el año 2023, cuenta con cuatro (4) muestras de agua subterránea, observándose que tres (3) muestras presentan una clasificación hidrogeoquímica de tipo Cloruradas cálcicas y una (1) Bicarbonatada sódica.

De acuerdo con los análisis anteriores y lo observado en los diagramas de Piper se puede concluir que:

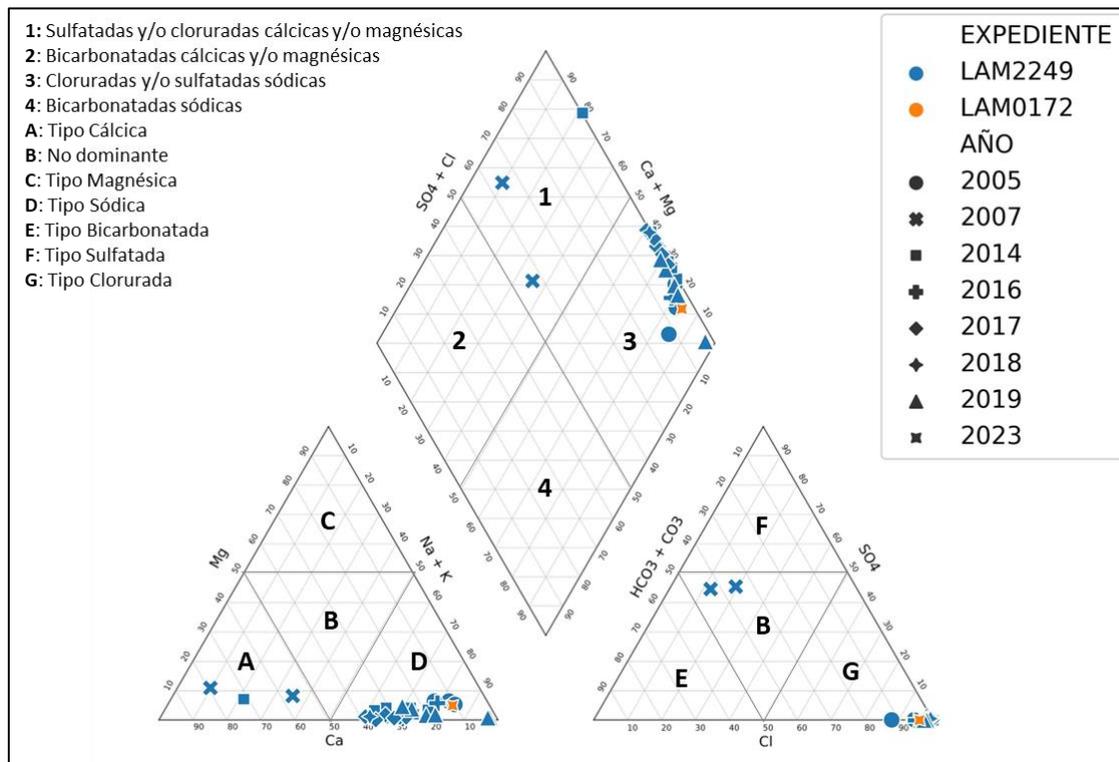
- En general todas las muestras analizadas durante las dos temporadas climáticas para los años 2022 y 2023, presentaron un predominio de los cationes calcio y sodio y, por otro lado, un predominio de los aniones bicarbonato y cloruro. Sin embargo, las aguas subterráneas asociadas a las unidades geológicas: Formación Colorado, Formación Mugrosa, Grupo Real y Depósitos Cuaternarios no presentaron una tendencia marcada en su composición hidroquímica. Esta circunstancia será resuelta con más información mediante los próximos análisis regionales de monitoreo.
- Durante el monitoreo de la temporada seca y de lluvias para los años 2022 y 2023, las aguas subterráneas que conforman la Formación Colorado (P3N1c) evidencian aguas de facies hidroquímicas Cloruradas y/o sulfatadas sódicas, asociadas con conductividades eléctricas altas (41 – 10690  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Estos resultados corroboran el Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena (SGC, 2019), donde se clasifica esta formación como un acuitardo dentro de la unidad C1 y se caracteriza por su baja productividad y la presencia de aguas salobres.

Adicionalmente, se presenta el diagrama de Piper para las aguas de formación e inyección, de acuerdo con los monitoreos reportados desde el año 2005 hasta el 2023. Las muestras de agua fueron organizadas de acuerdo con el año de monitoreo y expediente. Se resalta que el expediente LAM2249 cuenta con 32 muestras, mientras que, el proyecto con expediente LAM0172 cuenta con una (1) muestra de aguas de inyección, tomada del documento de la última modificación del plan de manejo ambiental del mes de junio de 2023.

De acuerdo con la **Ilustración 25** en las muestras el catión y el anión predominante son el sodio y cloruro, respectivamente. Por lo tanto, la clasificación hidrogeoquímica de estas aguas son cloruradas sódicas. Además, se identifican tres (3) muestras del expediente LAM2249 correspondientes a los años 2007 y 2014, donde el catión predominante es el calcio, mientras que no se observa una predominancia en cuanto al anión. Por lo tanto, estas muestras se clasifican como aguas de tipo Sulfatadas y/o Cloruradas cálcicas.

Después de realizar un análisis multitemporal de las aguas de inyección y formación en la región del VMM, se puede concluir que muestran una tendencia hacia la presencia de aguas con características cloruradas-sódicas.

**Ilustración 25.** Diagrama de Piper para las aguas de inyección



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Finalmente, los Depósitos Cuaternarios presentan una composición hidroquímica de tipo clorurada cálcica, asociada con conductividades eléctricas altas, lo que podría ser indicativo de potenciales afectaciones causadas por fuentes contaminantes antrópicas, entre las que se encuentra el desarrollo de los proyectos de hidrocarburos asentados en la región. No obstante, para corroborar esta hipótesis, es necesario contar con un análisis multitemporal de largo plazo, que permita analizar con mayor certeza las causas de estas composiciones en los niveles acuíferos más someros, los cuales se caracterizan por presentar flujos locales, en donde se esperaría una composición química de baja mineralización, con predominio de los iones bicarbonato y calcio.

## 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, permiten visualizar diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, además, simultáneamente permiten dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

A continuación, se presenta el análisis de los diagramas de Stiff, los cuales fueron realizados mediante el aplicativo diseñado para tal fin por parte del Centro de Monitoreo de la ANLA. Es



importante resaltar que la totalidad de los diagramas tienen la misma escala, definida de acuerdo con las concentraciones iónicas de las muestras consideradas y procurando la mejor visualización de los datos analizados, de esta manera el valor máximo en las gráficas es 8 meq/L.

El análisis se presenta por unidad geológica, no obstante, tal como se puede observar en el **Anexo 4**, para algunas unidades y/o puntos de agua subterránea específicos, no se tienen monitoreos en la totalidad de las temporadas consideradas en el presente análisis regional, ya sea porque no se cumplió con el criterio del error analítico, o porque no fueron monitoreadas por parte de los licenciarios.

### **5.8.1 Formación Mugrosa (P3m)**

Para el análisis de esta unidad se cuenta con tres (3) puntos de agua subterránea. En general predomina el anión bicarbonato y el catión sodio, por lo que hidrogeoquímicamente el agua subterránea de esta formación es principalmente de tipo bicarbonatada sódica. En el agua subterránea natural la composición más común es la de tipo bicarbonatada cálcica, no obstante, en esta formación hay predominio del sodio, por lo que puede interpretarse un proceso de intercambio iónico, originado posiblemente por la edad de esta unidad, donde los flujos de agua subterránea tienen mayores recorridos y por ende mayor tiempo de residencia dentro de los niveles permeables de esta formación.

Respecto al grado de mineralización del agua, en la mayoría de las muestras es intermedio, no obstante, en los puntos MSB- LAM2249-0026 (Estación LCI-06 PM-40) y MSB- LAM2249-0027 (Estación LCI-06 PM-41) se observan mayores mineralizaciones, aspecto que es corroborado por el parámetro de conductividad eléctrica, que registra valores superiores al promedio regional.

En cuanto a la relación entre el grado de mineralización del agua subterránea y las temporadas climáticas (periodo seco y de lluvias), con los datos actualmente disponibles para la Formación Mugrosa, se puede evidenciar que en la temporada seca la concentración iónica es mayor en comparación con la temporada de lluvias, aspecto que responde a los procesos de infiltración de agua fresca proveniente de las precipitaciones que causa un efecto de disolución en el agua.

### **5.8.2 Formación Colorado (P3N1c)**

Es la unidad que cuenta con mayor número de monitoreos en las temporadas analizadas (temporadas seca y húmeda de los años 2022 y 2023), con un total de 26 puntos. En general predomina el anión bicarbonato y los cationes calcio y sodio, por lo que hidrogeoquímicamente el agua subterránea de esta formación es principalmente de tipo bicarbonatada cálcica y sódica.

Respecto al grado de mineralización del agua, en la mayoría de las muestras va desde intermedio a bajo, no obstante, se presentan algunos valores por fuera de la tendencia que registran mineralizaciones más altas, tal como es el caso de los puntos MSB- LAM2249-0023 (Estación LCI-05 PM 38), MSB- LAM2249-0034 (PM 2 (Pozo LC0711)), MSB- LAM2249-0038 (PM 3 (Pozo LC0842)), MSB- LAM2249-0042 (Estación LCI-02 PM-9) y MSB- LAM2249-0045



(Deshidratadora el Centro PM-2), en estos casos la totalidad de estas muestras con altas mineralizaciones corresponden con aguas de tipo cloruradas sódicas, es decir que pueden corresponder con aguas que presentan un mayor tiempo de residencia en los acuíferos o están influenciadas por algún factor en superficie. Las causas de estas mayores mineralizaciones podrán ser determinadas en la medida que se cuente con un mayor número de monitoreos, tanto para temporada seca como húmeda, de tal manera que sea posible descartar o confirmar si esta composición hidrogeoquímica es puntual o permanente.

La relación entre el grado de mineralización del agua subterránea y las temporadas climáticas (periodo seco y de lluvias) no es clara para el caso de la Formación Colorado, de momento, debido a la disponibilidad de información, solamente en algunos puntos se evidencia que en temporada seca la concentración iónica es mayor en comparación con la temporada de lluvias, donde se espera una concentración menor debido a los procesos de infiltración de agua fresca proveniente de las precipitaciones.

### **5.8.3 Grupo Real (N1r)**

Para el análisis de esta unidad se cuenta con nueve (9) puntos de agua subterránea, no obstante, la mayoría de los monitoreos corresponden solamente a la temporada de lluvias del año 2023, a excepción del punto MSB- LAM2249-002 (Pozo Miraflores), del cual se tiene dos (2) monitoreos: temporada de lluvias del año 2022 y temporada seca del año 2023.

Se evidencia un claro predominio del anión bicarbonato y del catión calcio, por lo que hidrogeoquímicamente el agua subterránea de esta formación es de tipo bicarbonatada cálcica. En general, los grados de mineralización son bajos y no se presentan valores atípicos. Las anteriores características permiten interpretar que el agua subterránea almacenada en los niveles permeables del Grupo Real es representativa de aguas naturales con tiempos de residencia y recorridos cortos, lo cual es esperable considerando la edad más reciente de la unidad y su disposición en el área de estudio.

Dada la limitación temporal de los monitoreos, de momento no es posible establecer la relación entre el grado de mineralización del agua subterránea y las temporadas climáticas (periodo seco y de lluvias).

### **5.8.4 Depósitos Cuaternarios (Q)**

Para el análisis de estos depósitos se cuenta con cuatro (4) puntos de agua subterránea y la totalidad de los monitoreos corresponden solamente a la temporada de lluvias del año 2023. Debido a la edad de estos depósitos y su disposición en superficie, se esperaría que el agua subterránea fuera de tipo bicarbonatada cálcica, no obstante, de acuerdo con los diagramas de Stiff, no se evidencia un predominio del anión bicarbonato; respecto a los cationes, el calcio sí es el ion mayoritario.

A partir de los diagramas de Stiff de los depósitos cuaternarios se evidencia que en algunas muestras los aniones predominantes son los cloruros y los sulfatos, además, para el punto MSB- LAM2249-0081 (PM- 48 Estación Gala) se observa un mayor grado de mineralización, aspecto que es congruente con valores elevados de conductividad eléctrica y presencia de algunos metales, por lo tanto, a partir del presente análisis regional, será necesario solicitar al

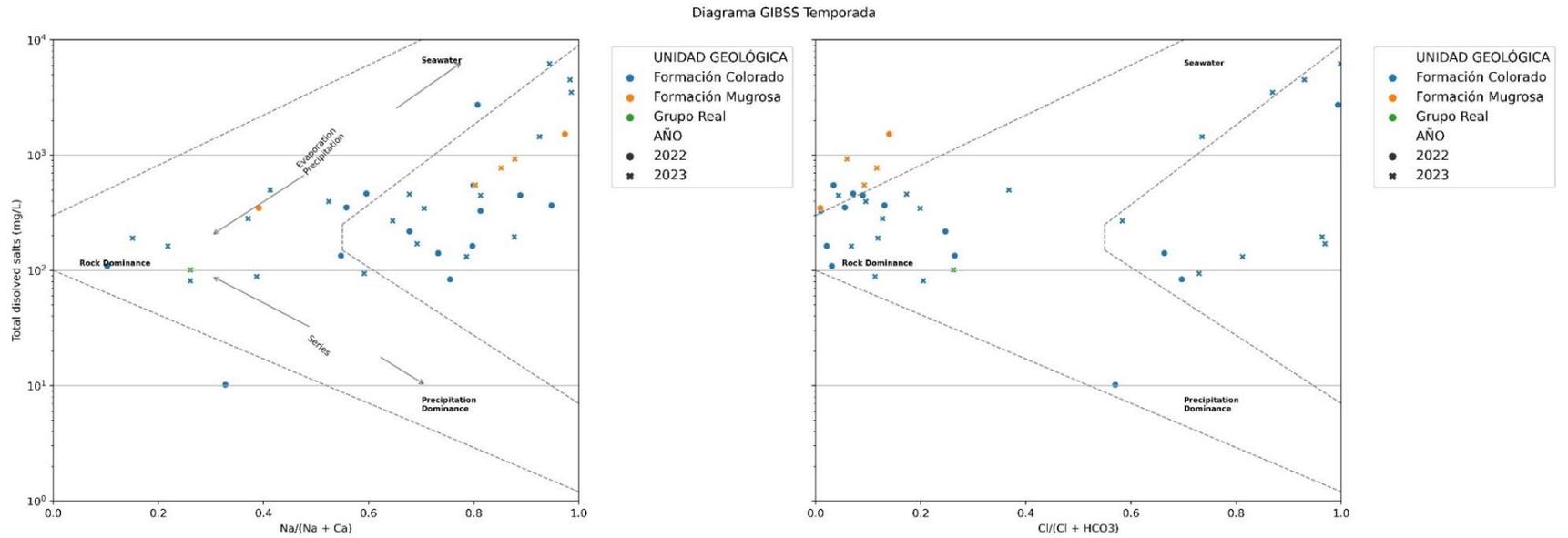
licenciatarario responsable de este punto el análisis puntual de estos valores. En los otros puntos analizados las mineralizaciones son bajas, no obstante, dada la limitación temporal de los monitoreos, de momento no es posible establecer la relación entre el grado de mineralización del agua subterránea y las temporadas climáticas (periodo seco y de lluvias).

## 5.9 Diagrama de Gibbs

Con las concentraciones medidas de los iones mayoritarios se establecieron relaciones interparamétricas que indican la proporción de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  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 y lluvias), tal como se observan en las **Ilustraciones 26 y 27**.



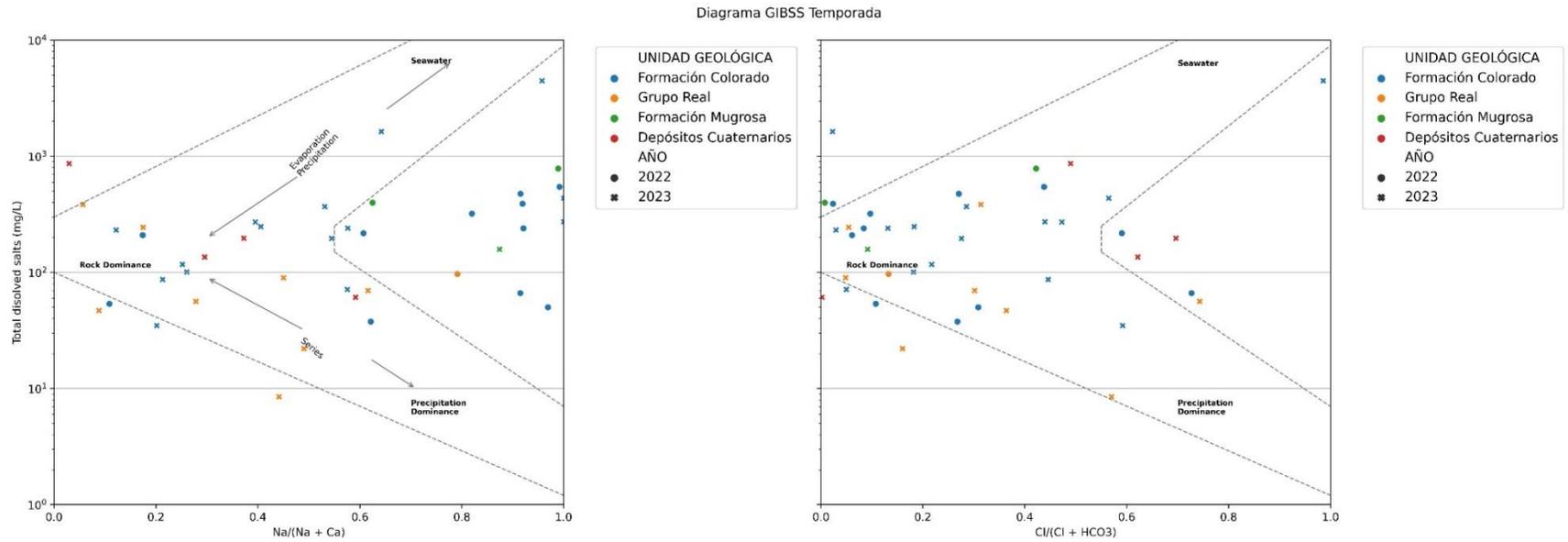
**Ilustración 26.** Diagrama de Gibbs para temporada seca



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



**Ilustración 27.** Diagrama de Gibbs para temporada de lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



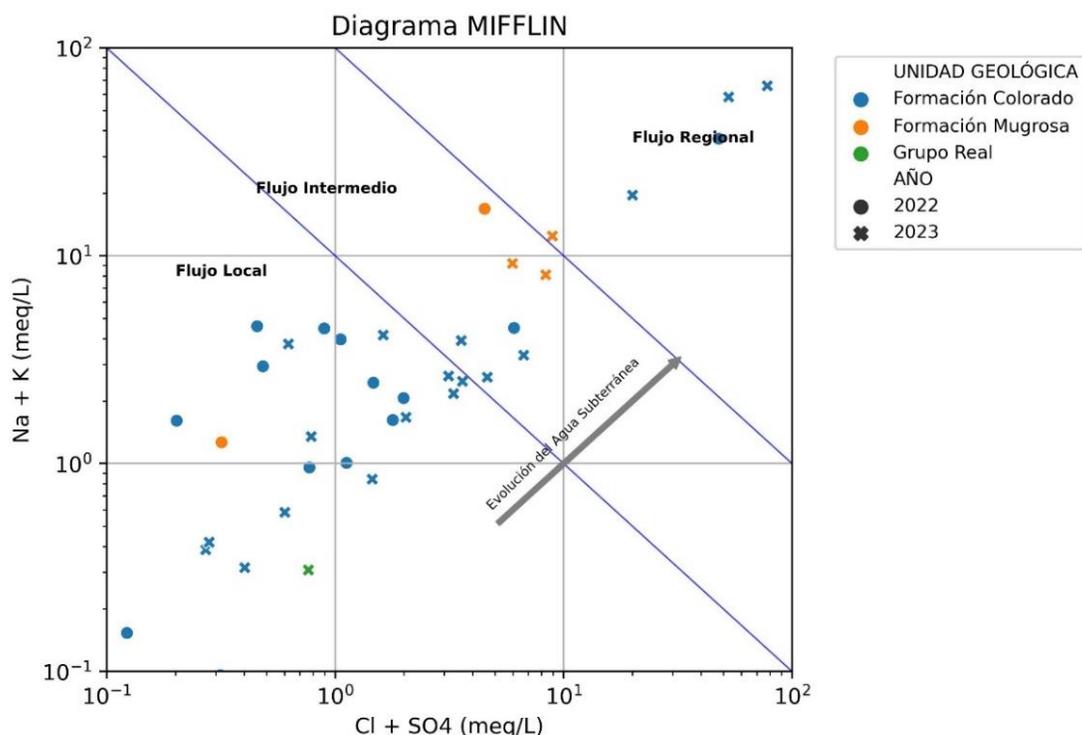
A partir de la interpretación de los diagramas de Gibbs, se observa a nivel general que, en las dos (2) temporadas climáticas, independientemente de la unidad geológica, la presencia de los iones analizados proviene principalmente del proceso de interacción agua – roca, siendo este proceso el que prevalece en la química del agua.

Al hacer un análisis más detallado se evidencia que en la temporada seca (**Ilustración 26**) el contenido iónico del agua subterránea está influenciado por la composición de la roca almacenadora, por su parte, para la temporada de lluvias (**Ilustración 27**), si bien sigue prevaleciendo el mismo comportamiento, se observa que algunos puntos de la Formación Colorado y el Grupo Real presentan un predominio en su composición relacionado con procesos de precipitación, asociándose con agua superficial, aspecto que tiene sentido si se considera la temporada climática en donde el agua almacenada en los acuíferos se mezcla con agua lluvia, la cual tiene tiempos de residencia y recorridos cortos.

## 5.10 Diagrama de Mifflin

Este diagrama proporciona información sobre la evolución del agua subterránea con base a la creciente concentración de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  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 el presente informe se realizaron diagramas de Mifflin por cada temporada climática (seca y lluvias), tal como se observan en las **Ilustraciones 28 y 29**.

**Ilustración 28.** Diagrama de Mifflin – Temporada seca

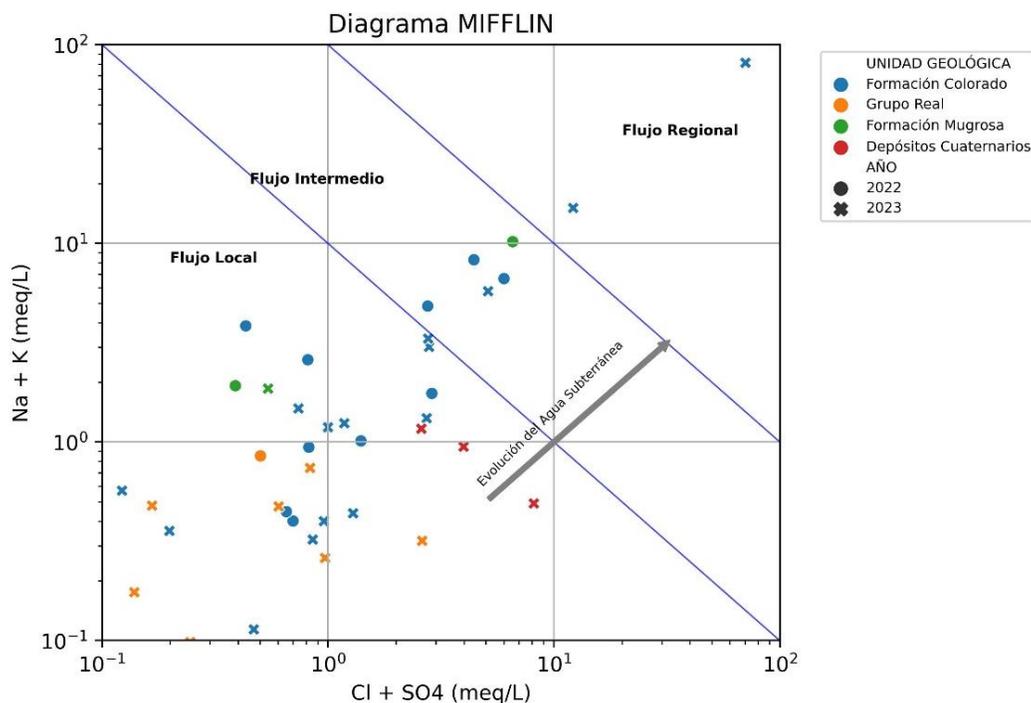


Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024





**Ilustración 29.** Diagrama de Mifflin – Temporada de lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

En primer lugar, al comparar los diagramas de Mifflin de las temporadas secas y húmedas de los años 2022 y 2023, se puede observar que en la temporada seca (**Ilustración 28**) si bien la mayoría de los puntos monitoreados captan agua subterránea de flujos locales, existen varios puntos de la Formación Colorado y la Formación Mugrosa que captan agua de flujos intermedios y regionales, este comportamiento se relaciona directamente con la temporada climática, donde no hay recarga por precipitación y por ende las concentraciones iónicas reflejan el tipo de flujo identificado en estas formaciones, en las cuales, por ser más antiguas el agua subterránea tiene recorridos más extensos y mayores tiempos de residencia en los niveles acuíferos, adquiriendo de esta manera una concentración mayor de los iones sulfato, cloruro y sodio.

En línea con lo anterior, en el diagrama de la temporada de lluvia (**Ilustración 29**) se evidencia un menor número de muestras captando agua subterránea de flujos intermedios y regionales, prevaleciendo así los flujos locales, en respuesta a la recarga de los acuíferos por precipitación. Se resalta que la totalidad de las muestras del Grupo Real y los Depósitos Cuaternarios corresponden a flujos locales, aspecto que es lógico si se considera la edad más reciente y la disposición estructural de estas unidades geológicas. Por su parte, las muestras de flujo intermedio y regional continúan perteneciendo a las Formaciones Colorado y Mugrosa, pero como ya se mencionó anteriormente en menor proporción dada la influencia de la precipitación.





## 5.11 Metales y Metaloides

En este numeral se analizará el comportamiento, según la época climática (temporada seca y lluvias) para los años 2022 y 2023, de las concentraciones de los metales y metaloides monitoreados: hierro, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, zinc, mercurio, níquel, plomo, manganeso y selenio.

En las dos (2) temporadas monitoreadas para los años 2022 y 2023, los metales de cadmio, níquel, cobre, selenio, cromo y zinc no presentaron concentraciones superiores al Límite de Cuantificación del Método (LCM).

A continuación, se presentan los parámetros que arrojaron resultados cuantificables, con un análisis regional. El comportamiento individual de cada punto de agua monitoreado será descrito en el informe de seguimiento correspondiente al proyecto responsable del mismo.

### 5.11.1 Aluminio

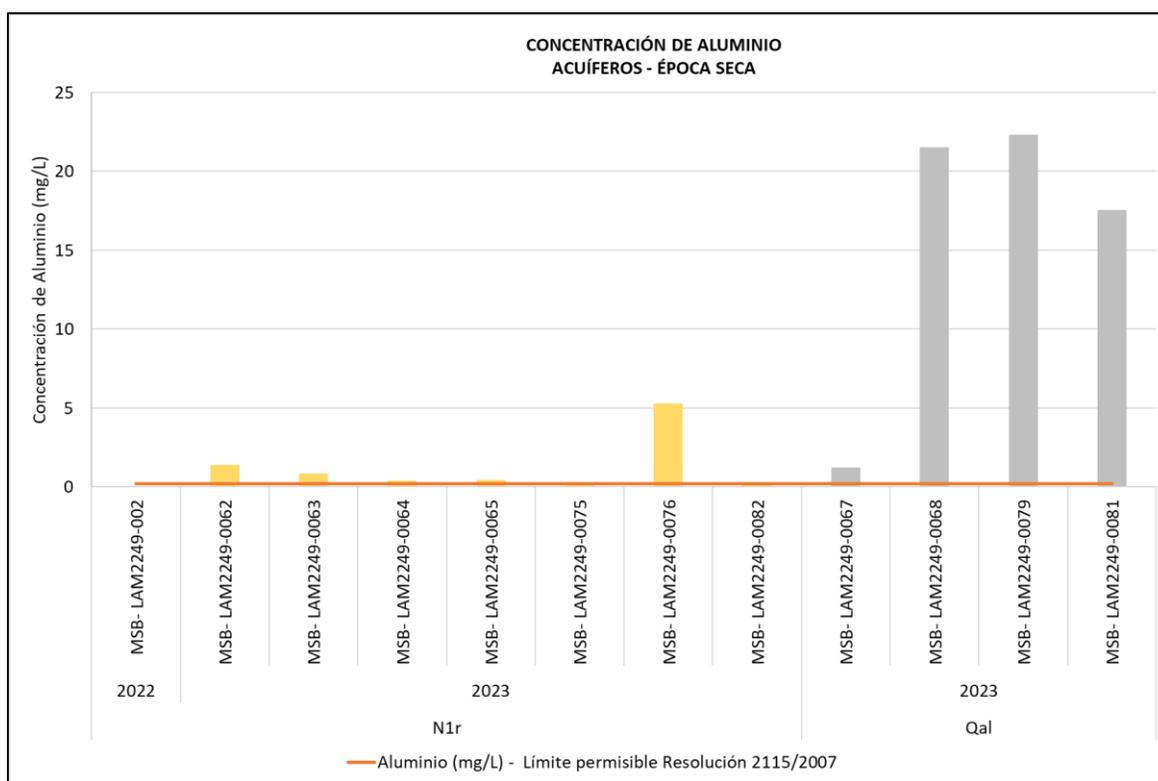
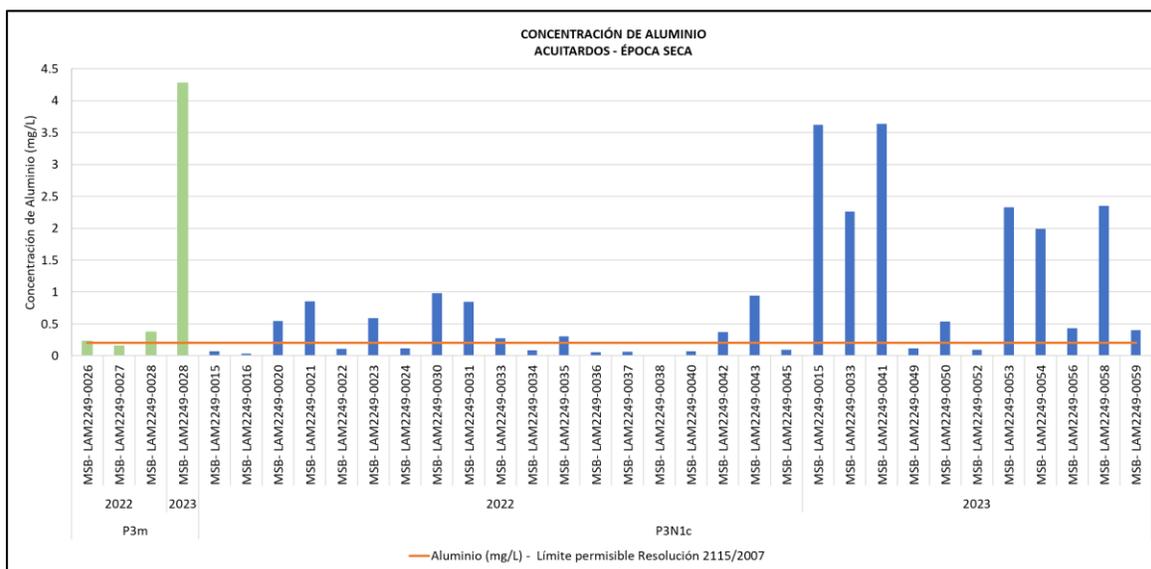
Durante la época seca, en 46 puntos de monitoreo de agua subterránea, este metal presentó concentraciones superiores al límite de cuantificación. Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y los Depósitos Aluviales Recientes (Qar).

De igual forma, se observó que, en 25 puntos de monitoreo, las concentraciones medidas son 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” (**Ilustración 30**). Se destacan especialmente los piezómetros MSB-LAM2249-0068, MSB-LAM2249-0079 y MSB-LAM2249-0081, ya que presentan concentraciones de aluminio superiores a 15 mg/l. Estos puntos se encuentran monitoreando los Depósitos Aluviales Recientes (Qal), los cuales corresponden a acuíferos de permeabilidad intergranular, cuya recarga se produce mediante infiltración directa, captando flujos locales. Por lo tanto, la presencia de aluminio puede estar relacionada con condiciones presentes en el acuífero, cuyas causas deberán ser analizadas a detalle en los conceptos técnicos de seguimiento ambiental respectivos.





**Ilustración 30.** Concentración de aluminio durante la época seca



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Durante la época de lluvias, el aluminio presentó concentraciones superiores al límite establecido en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0,2 mg/l) que representa *“características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud*



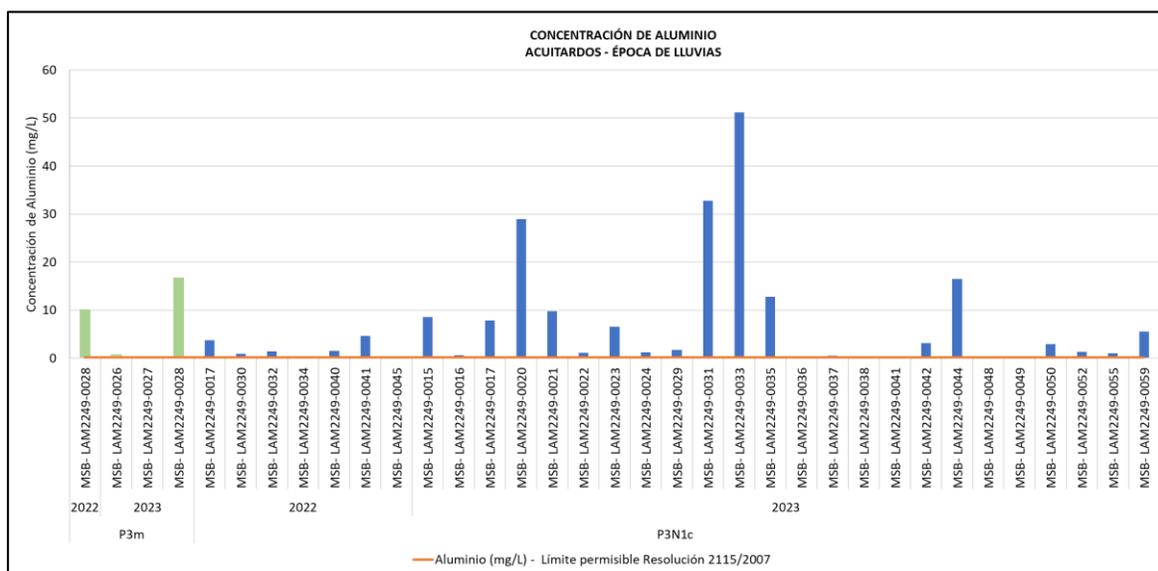


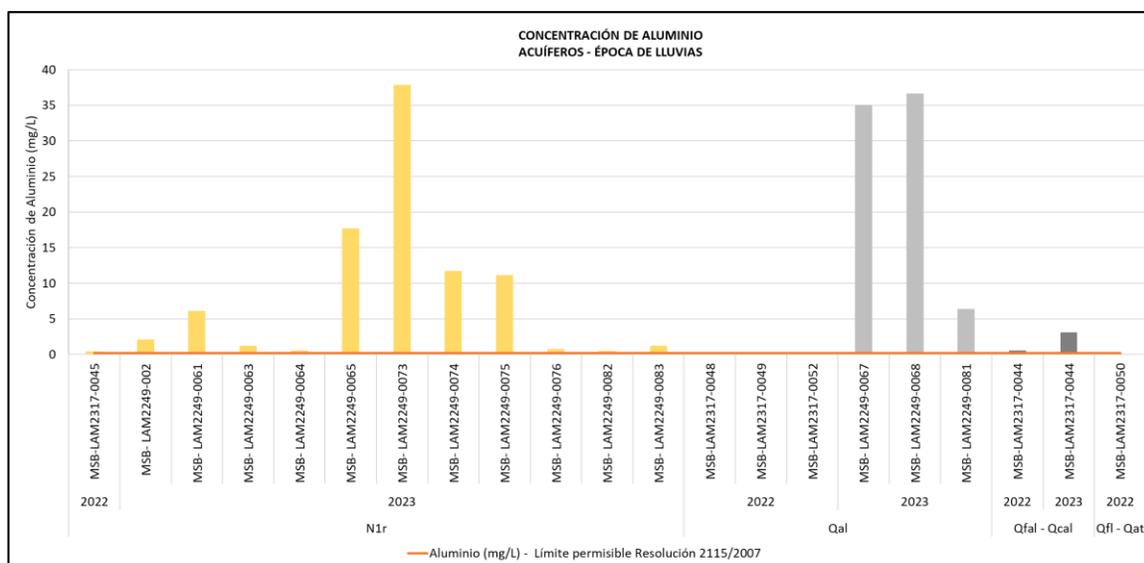
humana”, en 39 puntos de agua subterránea. Estos puntos están ubicados en las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal-Qcal) (**Ilustración 31**).

Se destacan especialmente los puntos MSB-LAM2249-0073, MSB-LAM2249-0020, MSB-LAM2249-0031, MSB-LAM2249-0033, MSB-LAM2249-0067 y MSB-LAM2249-0068, debido a que presentan concentración de aluminio superiores a 20 mg/l (Figura30). Estos puntos se encuentran monitoreando al Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).

Durante el análisis de las concentraciones de aluminio para la época de lluvias en el área de estudio, se observa un aumento generalizado y constante en comparación con la temporada seca. Por ejemplo, en los puntos MSB-LAM2249-0068 y MSB-LAM2249-0081, se registraron valores de 21.49 mg/L y 17.51 mg/L respectivamente durante la época seca, mientras que durante la temporada de lluvias se registraron valores de 36.6 mg/L y 6.32 mg/L respectivamente. Por lo tanto, es necesario identificar el origen de la presencia de aluminio en estos puntos de agua subterránea, mediante un análisis multitemporal, el cual permitirá identificar los patrones espaciales y temporales de los datos reportados, así como evaluar la posible influencia de actividades antropogénicas.

**Ilustración 31.** Concentración de aluminio durante la época de lluvias





Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.11.2 Arsénico

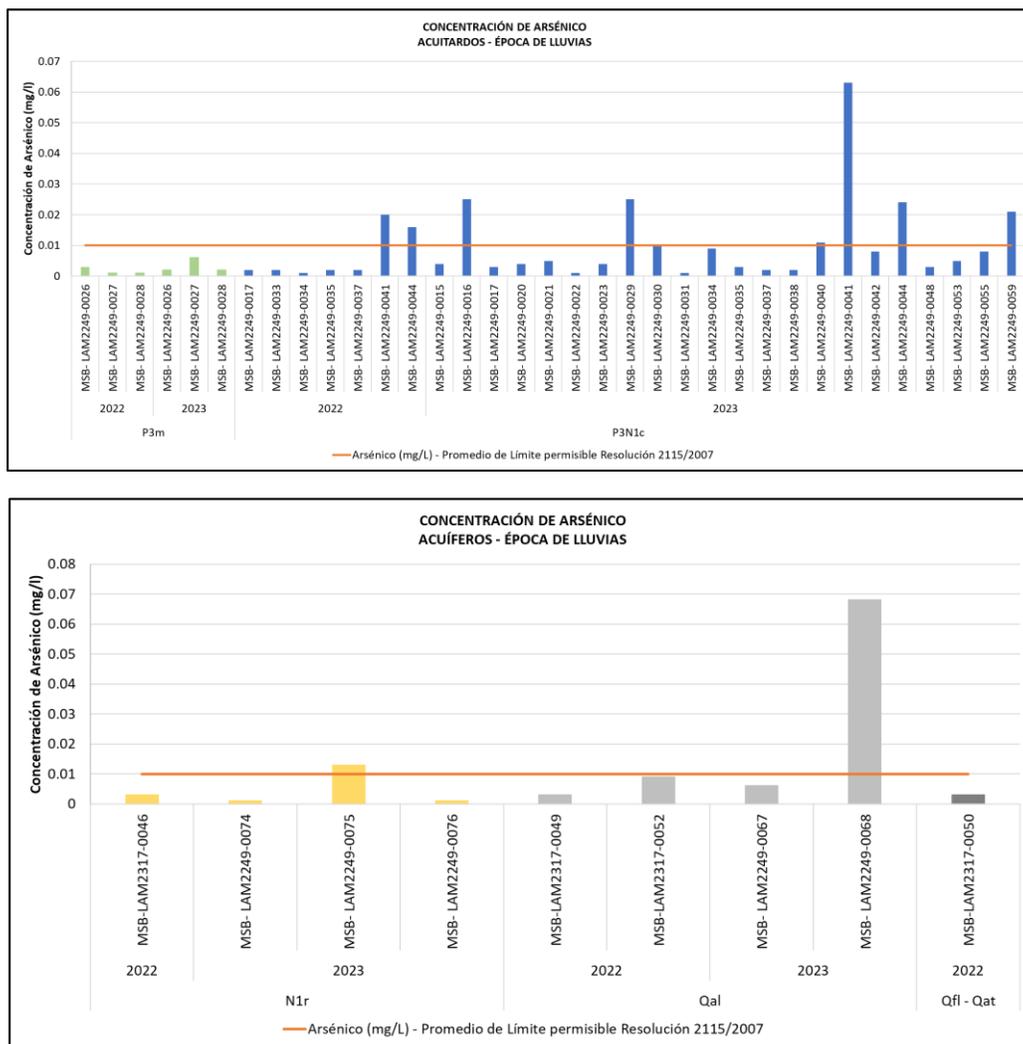
El arsénico presentó concentraciones superiores al límite de cuantificación en 17 puntos de agua subterránea monitoreados durante la época seca de los años 2022 y 2023 (**Ilustración 30**). Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).

Adicionalmente, los puntos MSB-LAM2249-001, MSB-LAM2249-0031, MSB-LAM2249-0043, MSB-LAM2249-0046, MSB-LAM2249-0079 y MSB-LAM2249-0081, indicaron concentraciones superiores al valor máximo permisible establecido en el artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0,01mg/l) que representa *“características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana”*. Por lo tanto, es pertinente realizar los requerimientos respectivos en los seguimientos específicos para identificar la fuente de dicha concentración. Esto es especialmente importante dado que estas unidades geológicas están siendo utilizadas como fuente de abastecimiento por la comunidad.





**Ilustración 33. Concentración de arsénico durante la época de lluvias**



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.11.3 Bario

Durante la época seca, el bario muestra concentraciones superiores al límite de cuantificación en 47 puntos de agua subterránea monitoreados durante la época seca de los años 2022 y 2023, con valores que oscilan entre 0,11 y 117,59 mg/l. Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).

Los puntos MSB-LAM2249-0062, MSB-LAM2249-0042, MSB-LAM2249-0079 y MSB-LAM2249-0081, muestran concentraciones que superan el límite permisible establecido en el Artículo 5 de la Resolución 2115 de 2007 (0,7 mg/l) “*características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana*”. Es importante destacar que el punto MSB-





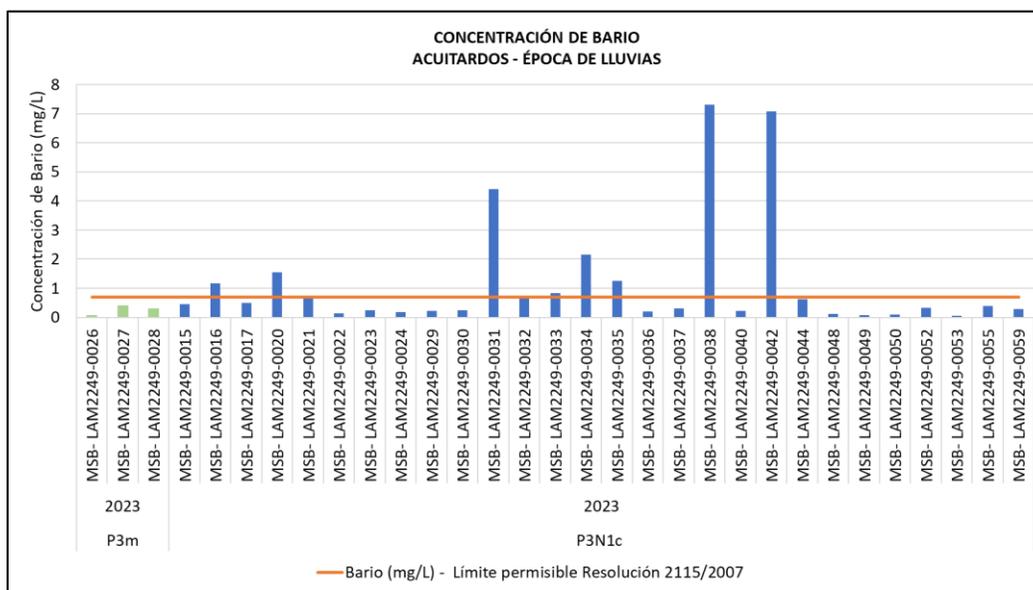
LAM2249-0081, ubicado en los Depósitos Aluviales Recientes (Qal), presenta concentraciones de bario de 117,59 mg/l. Por lo tanto, se considera pertinente realizar los requerimientos respectivos en los seguimientos específicos, de tal manera que sea posible identificar la fuente de concentración, teniendo en cuenta que se presenta en unidades geológicas que están siendo captadas por la comunidad.

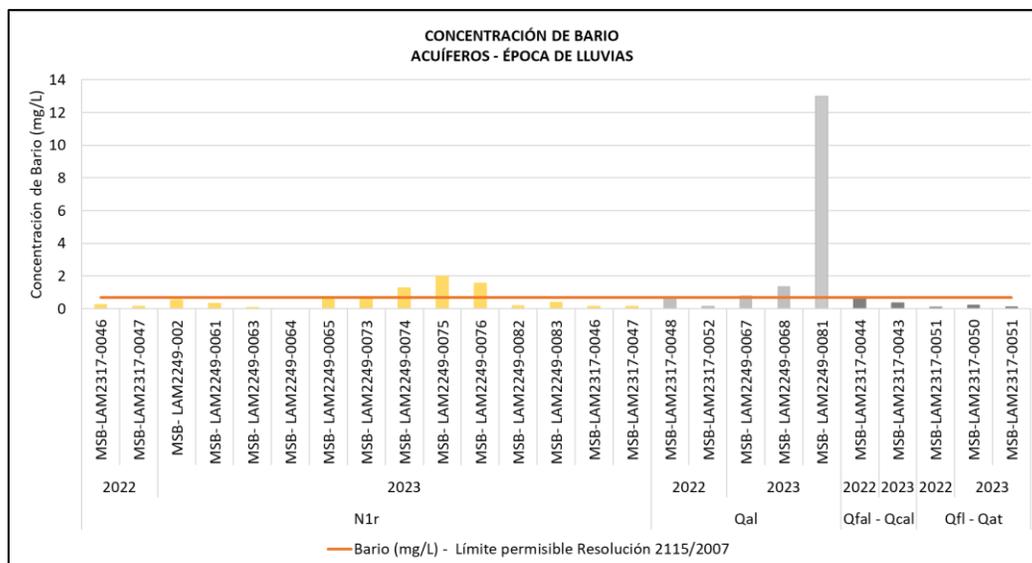
En el monitoreo durante la época de lluvias, se registraron valores de bario por encima del límite de cuantificación en todas las muestras reportadas. Además, se observa que trece (13) puntos de agua subterránea exceden el límite permisible establecido en el Artículo 5 de la Resolución 2115 de 2007 (0,7 mg/l) *“características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana”*.

Es importante destacar que los puntos MSB-LAM2249-0038, MSB-LAM2249-0042 y MSB-LAM2249-0081 presentan concentraciones de bario superiores a los 6 mg/l. En comparación con la época seca, se observa un aumento generalizado y constante en la concentración del parámetro, como se evidencia en el punto MSB-LAM2249-0081 (**Ilustración 34**). Por lo tanto, resulta imperativo identificar el origen de la presencia de bario en estos puntos de agua subterránea.

A partir del análisis de las concentraciones de bario, se considera pertinente realizar los requerimientos respectivos en los seguimientos específicos, de tal manera que sea posible identificar la fuente de dichas concentraciones, teniendo en cuenta diversos factores geológicos, hidrogeológicos y antropogénicos.

**Ilustración 34.** Concentración de bario durante la época de lluvias





Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.11.4 Hierro

El hierro presenta concentraciones superiores al límite de cuantificación (<0,1 mg/l) en 51 puntos de agua subterránea monitoreados durante la época seca de los años 2022 y 2023, con valores que oscilan entre 0,16 y 3066 mg/l. Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c), Formación Mugrosa (P3m) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).

Al comparar las concentraciones de hierro encontradas durante la temporada seca con el límite permisible establecido en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (0,3 mg/l), el cual, indica las *"características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana"*, se encontró que diez (10) puntos de monitoreo exceden dicho límite. Estos puntos son: MSB-LAM2249-004, MSB-LAM2249-005, MSB-LAM2249-0031, MSB-LAM2249-0041, MSB-LAM2249-0042, MSB-LAM2249-0043, MSB-LAM2249-0054, MSB-LAM2249-0058, MSB-LAM2249-0067 y MSB-LAM2249-0068.

Durante el monitoreo realizado en la época de lluvias, se identificaron 54 puntos de agua subterránea con presencia de hierro. Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qfl-Qat) (**Ilustración 35**).

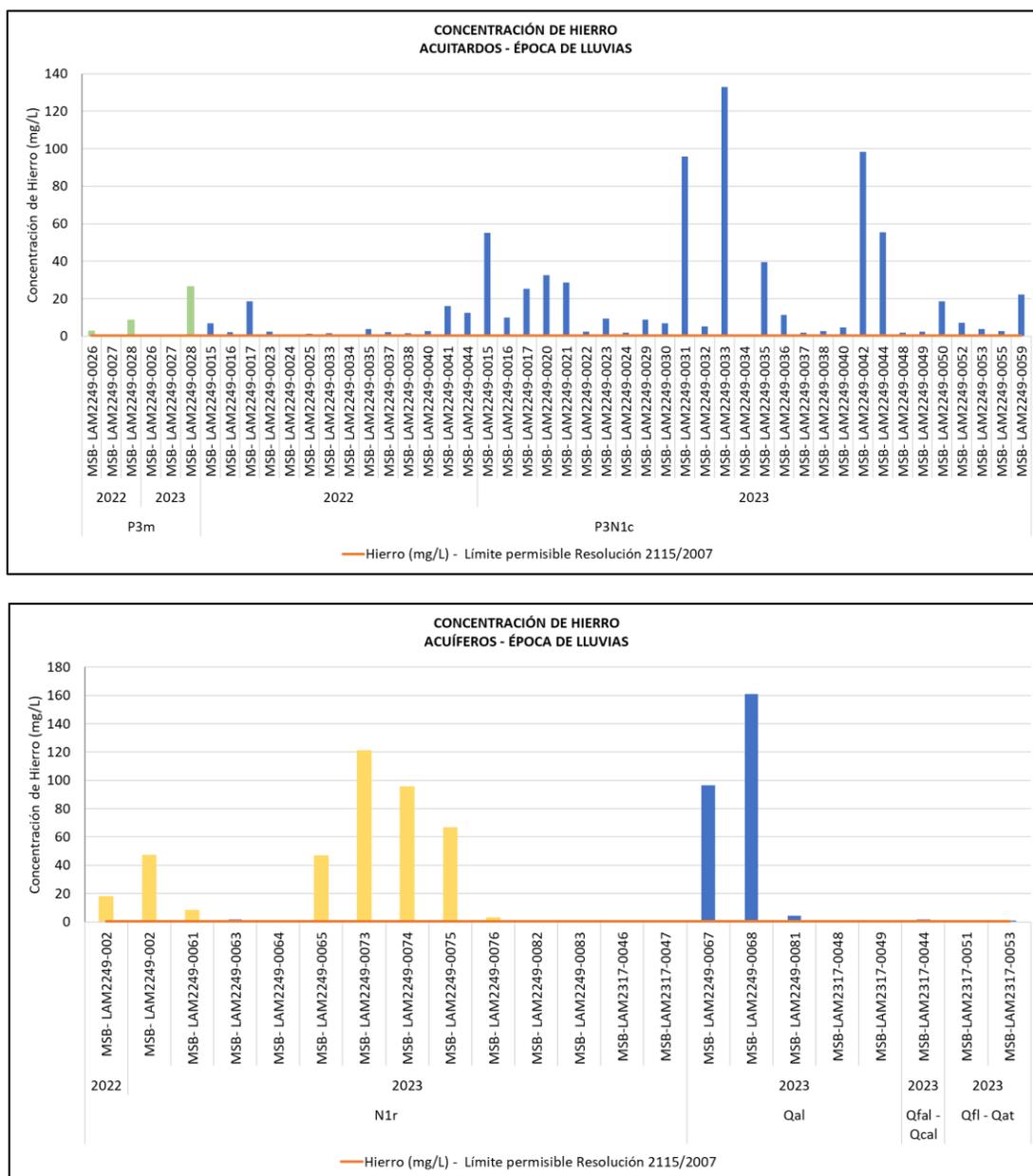
Se destaca que, los puntos MSB-LAM2249-0073 y MSB-LAM2249-0068 mostraron concentraciones de hierro superiores a los 100 mg/l. Estos puntos están ubicados en áreas de captación del Grupo Real (N1r) y los Depósitos Aluviales Recientes (Qal), respectivamente.

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.

**Ilustración 35.** Concentración de hierro durante la época de lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.11.5 Plomo

Durante la época seca, el parámetro de plomo muestra concentraciones que superan el límite permisible establecido en la Resolución 2115 de 2007 (0,01 mg/l), que define las





características químicas de sustancias con efectos adversos reconocidos en la salud humana. Esto se observa en seis (6) puntos de monitoreo de agua subterránea durante la temporada seca.

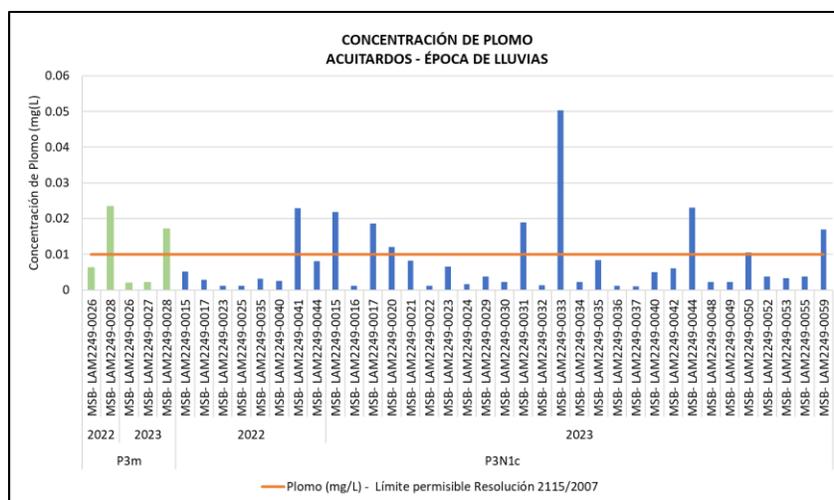
Estos seis (6) puntos identificados con el ID ANLA MSB-LAM2249-0025, MSB-LAM2249-0036, MSB-LAM2249-0037, MSB-LAM2249-0038, MSB-LAM2249-0046 y MSB-LAM2249-0044 se encuentran captando la unidad geológica Formación Colorado (P3N1c). Presentan concentraciones que van desde 0,0259 hasta 1,68 mg/l, observándose la mayor concentración en el punto MSB-LAM2249-0025.

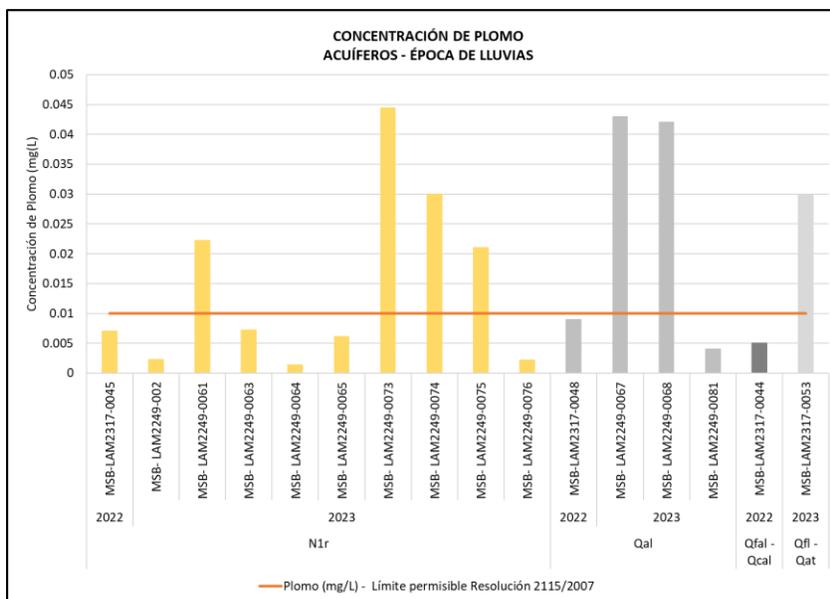
De igual forma, durante la época de lluvias, el plomo muestra concentraciones que superan el límite permisible establecido en la Resolución 2115 de 2007 (0,01 mg/l) en 17 puntos de monitoreo de agua subterránea (**Ilustración 36**). Este hallazgo evidencia un aumento considerable en la concentración del parámetro en comparación con la época seca. Este comportamiento puede atribuirse directamente al régimen de lluvias de la zona, que favorece los procesos de infiltración y, a su vez, el arrastre de este metal hacia las aguas subterráneas, posiblemente relacionado con actividades antropogénicas

Estos puntos se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qfl-Qat). Presentan concentraciones que van desde 0,001 hasta 0,005 mg/l, observándose la mayor concentración en el punto MSB-LAM2249-0033.

Debido a las concentraciones de plomo en las muestras analizadas, se considera relevante analizar el comportamiento histórico del parámetro, con la finalidad de identificar posibles fuentes de contaminación, teniendo en cuenta que se presenta en unidades geológicas que están siendo captadas por la comunidad.

**Ilustración 36.** Concentración de plomo durante la época de lluvias





Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.11.6 Manganeseo

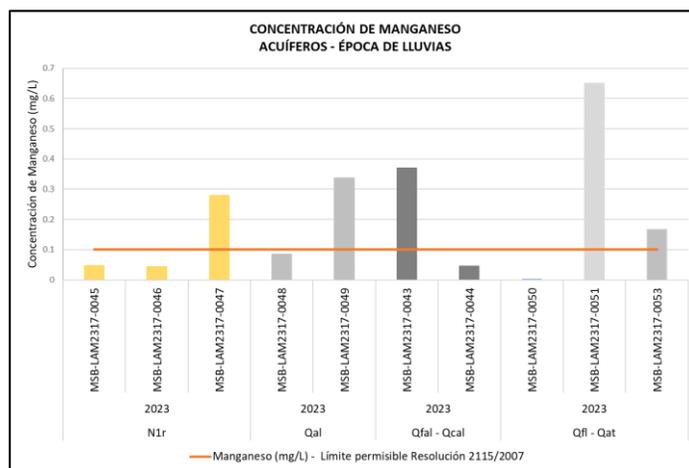
En el monitoreo de la época de lluvias para el año 2023, se identificaron nuevo (9) puntos de monitoreo con presencia de manganeso, los cuales se encuentran captando las unidades geológicas del Grupo Real (N1r) y los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal-Qcal, Qfl-Qat) (**Ilustración 37**).

Se realizó la comparación de las concentraciones medidas con el valor máximo permisible establecido en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007. Se encontró que los puntos MSB-LAM2317-0047, MSB-LAM2317-0049, MSB-LAM2317-0043 y MSB-LAM2317-0051 presentan concentraciones de manganeso que exceden el límite permitido. Por lo tanto, se considera necesario continuar realizando la medición de las concentraciones de este parámetro en el marco de esta estrategia regional con la finalidad de identificar la proveniencia de este.





**Ilustración 37.** Concentración de manganeso durante la época de lluvias



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Como conclusión general, se observó un aumento generalizado en la concentración de metales y metaloides en todos los puntos de agua subterránea monitoreados del expediente LAM2249, en comparación con los resultados reportados durante la época seca. Por lo tanto, se recomienda solicitar al respectivo licenciataria, en el marco de los seguimientos ambientales, que realice un análisis de las causas asociadas a los valores elevados de concentración de estos parámetros en el agua subterránea.

## 5.12 Parámetros asociados al desarrollo de actividades relacionadas con hidrocarburos

Los monitoreos realizados en el marco de la presente estrategia de monitoreo permitieron obtener resultados para los parámetros asociados al desarrollo de actividades propias de la industria de los hidrocarburos, tales como los fenoles, hidrocarburos totales y BTEX durante los años 2022 y 2023; sin embargo, no en todas las temporadas se encontraron cuantificaciones por encima del límite de detección utilizado por cada laboratorio. Vale la pena mencionar, además, que en el área existen rezumaderos naturales de hidrocarburos (más de setenta), por lo cual se entiende que estas sustancias se encuentran de en el área de manera natural. Dicho esto, se presentan los resultados para cada uno de los parámetros mencionados:

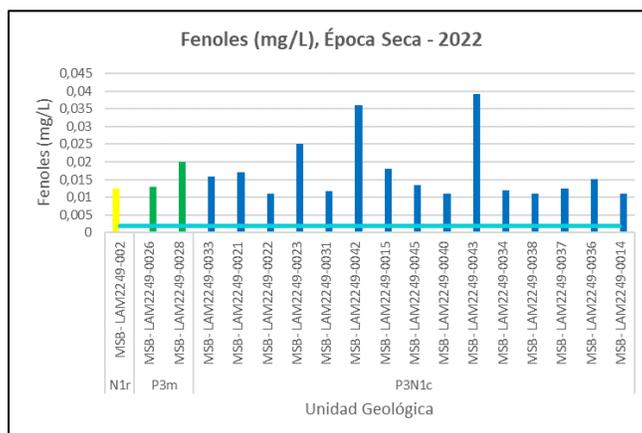
### 5.12.1 Fenoles

Se registraron valores para la época seca del año 2022, con una preponderancia en los monitoreos realizados a pozos captadores de la Formación Colorado. Tal como se presenta en la **Ilustración 38**, se observa que todas las mediciones se encuentran por encima del valor máximo permitido por el Decreto 1076 de 2015.





**Ilustración 38.** Concentración de fenoles durante la época seca del año 2022



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

### 5.12.2 BTEX totales

Se registran cuatro (4) valores, los cuales corresponden a la época lluviosa del año 2023. De tales registros el valor mínimo registrado fue de 0,156, mientras que el máximo fue de 0,582; sin embargo, esto no permite sugerir ninguna tendencia en relación con el comportamiento del parámetro en cuestión durante las campañas de monitoreo que atañen el presente documento.

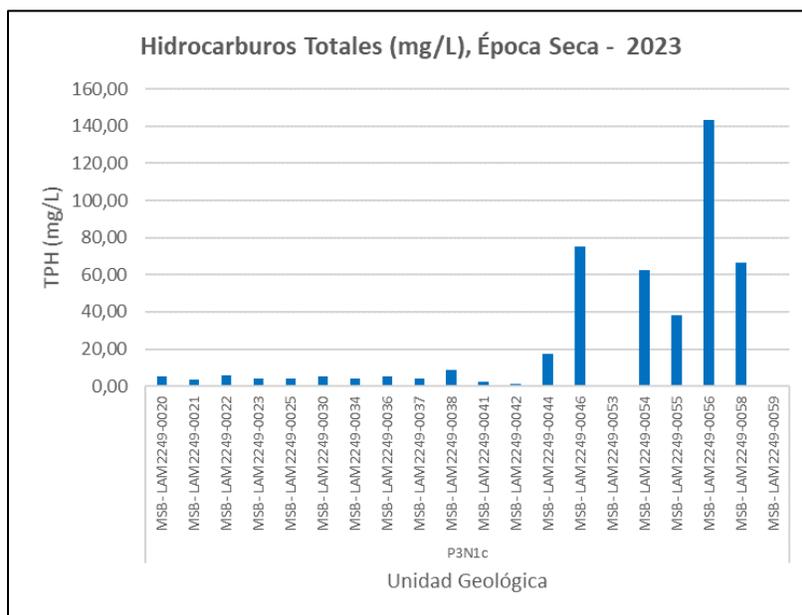
### 5.12.3 Hidrocarburos totales del petróleo (THP)

En concordancia con los demás parámetros presentados en la presente sección, la mayoría de los puntos monitoreados presentan valores por debajo del límite de cuantificación. Así pues, en el marco de la estrategia de monitoreo regional, solo se obtienen valores para el año 2023, con relevancia en aquellos de la temporada seca, si bien todas las muestras indican presencia en la Formación Colorado (**Ilustración 39**), la cual es reservorio de hidrocarburos, y hay valores que sobrepasan los 10 mg/L, destaca la medición obtenida del punto MSB-LAM2249-0056 (PM 7B PLANTA DESHIDRATADORA LISAMA), con un valor de 143,3 mg/L.





**Ilustración 39.** Concentración de hidrocarburos totales durante la época seca del año 2023



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024

Vale la pena mencionar, además, que se encontró un (1) registro por encima del límite de cuantificación sobre el Grupo Real para la temporada de lluvias del año 2023 (58,0 mg/L), en el punto MSB- LAM2249-0044; por su parte, en los depósitos cuaternarios no se encuentran registros cuantificables.

Dado que en el presente análisis de la estrategia de monitoreo regional se están analizando datos de los años 2022 y 2023, y solo se cuenta con datos por encima del límite de detección para la temporada seca del año 2023 y de forma puntual para la temporada de lluvias del mismo año, no es posible afirmar que exista una tendencia en relación con la presencia de TPH en el área de estudio. Además, y teniendo en cuenta que para este parámetro no hay un límite normativo, se hace necesario continuar realizando análisis anuales para verificar si efectivamente hay o no alguna tendencia en cuanto a la presencia de estos compuestos en las aguas subterráneas.

### 5.13 Parámetros microbiológicos

En las **Ilustraciones 40, 41, 42 y 43** están representados los parámetros microbiológicos del agua subterránea, las cuales corresponden a Coliformes Totales, Coliformes termotolerantes (fecales) y la bacteria Escherichia Coli (E.coli), el análisis se realizó para cada una de las campañas de monitoreo consideradas (época seca y de lluvias de los años 2022 y 2023), con la finalidad de observar su contenido de acuerdo con la temporada climática.

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.





En cada una de las gráficas de los parámetros microbiológicos se han incluido los límites establecidos en el Artículo 2.2.3.3.9.3 del Decreto 1076 de 2015. Este decreto establece los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico. En el caso de los coliformes totales, el límite es de 20.000 microorganismos por cada 100 ml, mientras que para los coliformes termotolerantes (fecales) es de 2.000 microorganismos por cada 100 ml. Es importante destacar que, aunque esta normativa no establece un límite específico para la bacteria E. coli, su presencia indica contaminación fecal y representa un riesgo para la salud humana, lo que limita el uso del agua para consumo humano.

A partir del análisis de las gráficas, se puede observar que, en las dos temporadas climáticas (época seca y lluvias) analizadas para los años 2022 y 2023, se evidencia una concentración importante de coliformes totales, coliformes termotolerantes y E. Coli en los puntos de agua subterránea que se encuentran captando la unidad acuífera correspondiente a los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qcal, Qfl, Qat), comportamiento coherente, debido principalmente a que corresponden a acuíferos libres con porosidad primaria, vulnerables a la contaminación antrópica, la cual puede atribuirse a la presencia de la ganadería, pastoreo, entierro de residuos sólidos y pozos sépticos, entre otros.

El análisis de los mencionados parámetros microbiológicos durante la temporada seca de los años 2022 y 2023, indican que:

- Para el parámetro Coliformes Totales, 46 puntos de agua subterránea analizados cumplen la norma para actividades domésticas requiriendo tratamiento convencional (20.000 NMP/ml).
- Asimismo, trece (13) puntos de agua subterránea analizados presentaron concentraciones de Coliformes Totales por encima de los límites establecidos en el Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 (20.000 NMP/ml). Estos se encuentran captando las unidades geológicas: Grupo Real (N1rc), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).
- En cuanto a los Coliformes Termotolerantes (fecales), 56 puntos de agua subterránea analizados cumplen la norma establecida para actividades domésticas requiriendo tratamiento convencional (Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 - 2.000 NMP/100mL).
- De igual forma, se observan tres (3) puntos de monitoreo con concentraciones superiores al límite establecido en el Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 (2.000 NMP/ml). Identificados con ID ANLA: MSB-LAM2249-0064, MSB-LAM2249-0067 y MSB-LAM2249-0068, los cuales se encuentran captando, las unidades geológicas Grupo Real (N1r) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).
- Se observaron concentraciones del parámetro E. coli, en trece (13) puntos de agua subterránea analizados, los cuales se encuentran captando las unidades geológicas: Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).

Asimismo, el análisis de los parámetros microbiológicos de la época de lluvias de los años 2022 y 2023 muestra las siguientes conclusiones:



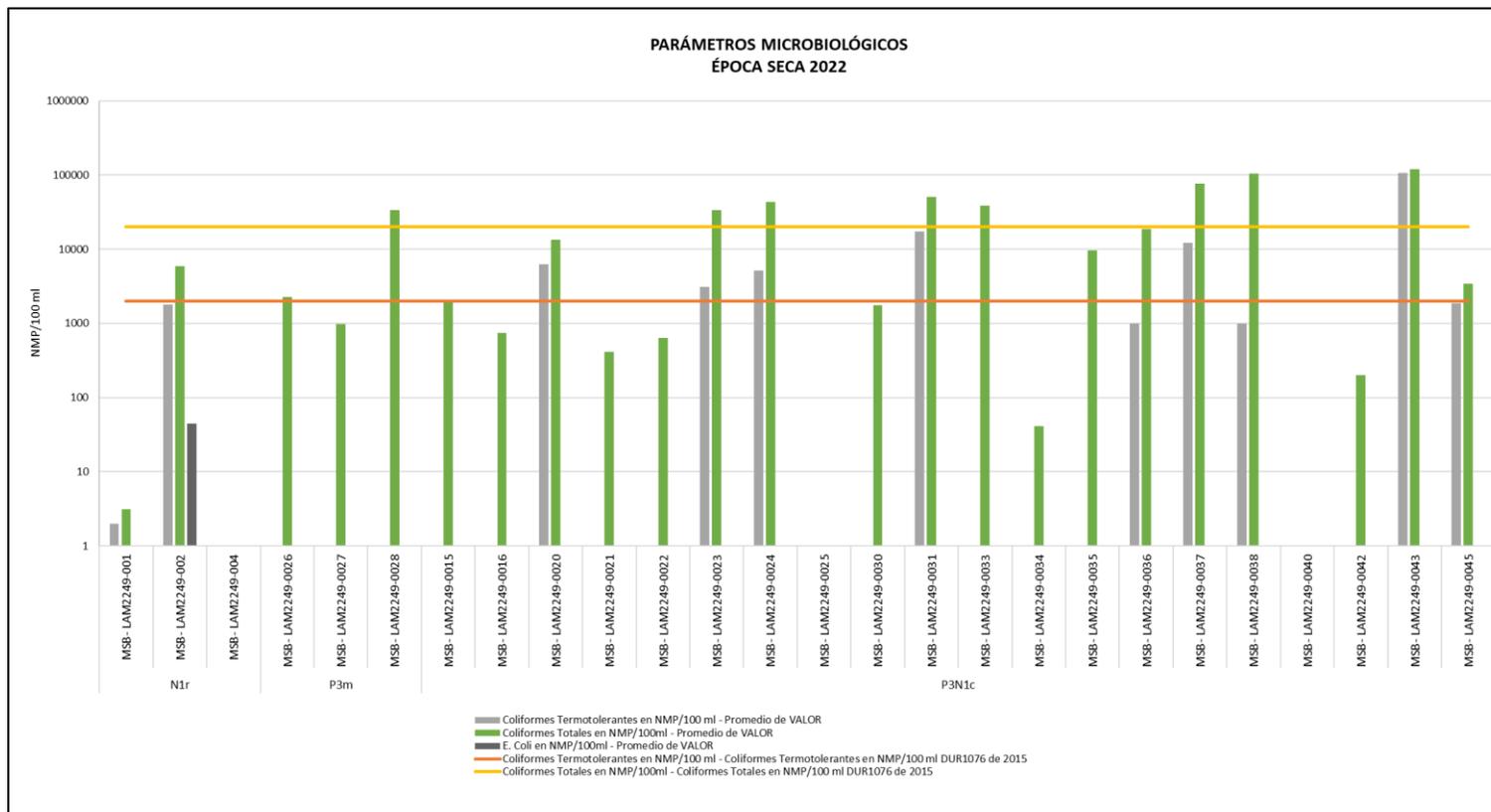
- Para el parámetro Coliformes Totales, 63 puntos de agua subterránea analizados cumplen la norma para actividades domésticas requiriendo tratamiento convencional (20.000 NMP/ml).
- Asimismo, cinco (5) puntos de agua subterránea analizados presentaron concentraciones de Coliformes Totales por encima de los límites establecidos en el Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 (20.000 NMP/ml). Estos puntos identificados con ID MSB-LAM2249-0068, MSB-LAM2317-0044, MSB-LAM2249-0028, MSB-LAM2249-0024 y MSB-LAM2249-0041, los cuales se encuentran captando las unidades geológicas: Formación Colorado (P3N1c), Formación Mugrosa (P3m) y Depósitos Aluviales Recientes (Qal).
- En cuanto a los Coliformes Termotolerantes (fecales), 63 puntos de agua subterránea analizados cumplen la norma establecida para actividades domésticas requiriendo tratamiento convencional (Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 - 2.000 NMP/100mL).
- De igual forma, se observan tres (3) puntos de monitoreo con concentraciones superiores al límite establecido en el Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 (2.000 NMP/ml). Identificados con ID ANLA: MSB-LAM2249-0068, MSB-LAM-2317-0043 y MSB-LAM2317-0044, los cuales se encuentran captando, los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal-Qcal).
- Se muestra en dieciocho (18) puntos de agua subterránea concentraciones de la bacteria E.coli, los cuales se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal-Qcal, Qfl-Qat). Indicando que el agua en esos puntos ha sido expuesta a heces y existe un inmediato riesgo a la salud pública.

Con base en los anteriores análisis, se evidencia que, durante la temporada seca, las concentraciones de los parámetros microbiológicos aumentan, al igual que el número de puntos de monitoreo que exceden los límites establecidos por la normativa nacional. Adicionalmente, se observan puntos de agua subterránea que a lo largo de todos los monitoreos realizados en el año 2022 y 2023, independientemente de la temporada climática, presentan valores elevados en los parámetros microbiológicos analizados (ID ANLA: MSB-LAM2249-0064, MSB-LAM2249-0028, MSB-LAM2249-0024, MSB-LAM2249-0025, MSB-LAM2249-0037, MSB-LAM2249-0044 y MSB-LAM2249-0068), todos correspondientes al proyecto con expediente LAM2249. El análisis de las causas asociadas a estos valores elevados recurrentes en los parámetros microbiológicos del agua subterránea en estos puntos deberá ser objeto de solicitud a los respectivos licenciarios en el marco de los seguimientos ambientales.

Finalmente, los puntos de agua subterránea con valores por encima del límite establecido por la normatividad se encuentran localizados en las áreas de los proyectos con expediente LAM2249 – “Superintendencia de Mares Campo La Cira-Infantas: San Luis, Aguas Blancas, Tenerife, Colorado, Morenas y Mosqueteros 1-7” y LAM2317 – “Campos Petroleros Cantagallo y Aledaños”. El análisis de las causas asociadas a estos valores elevados en los parámetros microbiológicos del agua subterránea deberá ser objeto de solicitud a los respectivos licenciarios en el marco de los seguimientos ambientales.



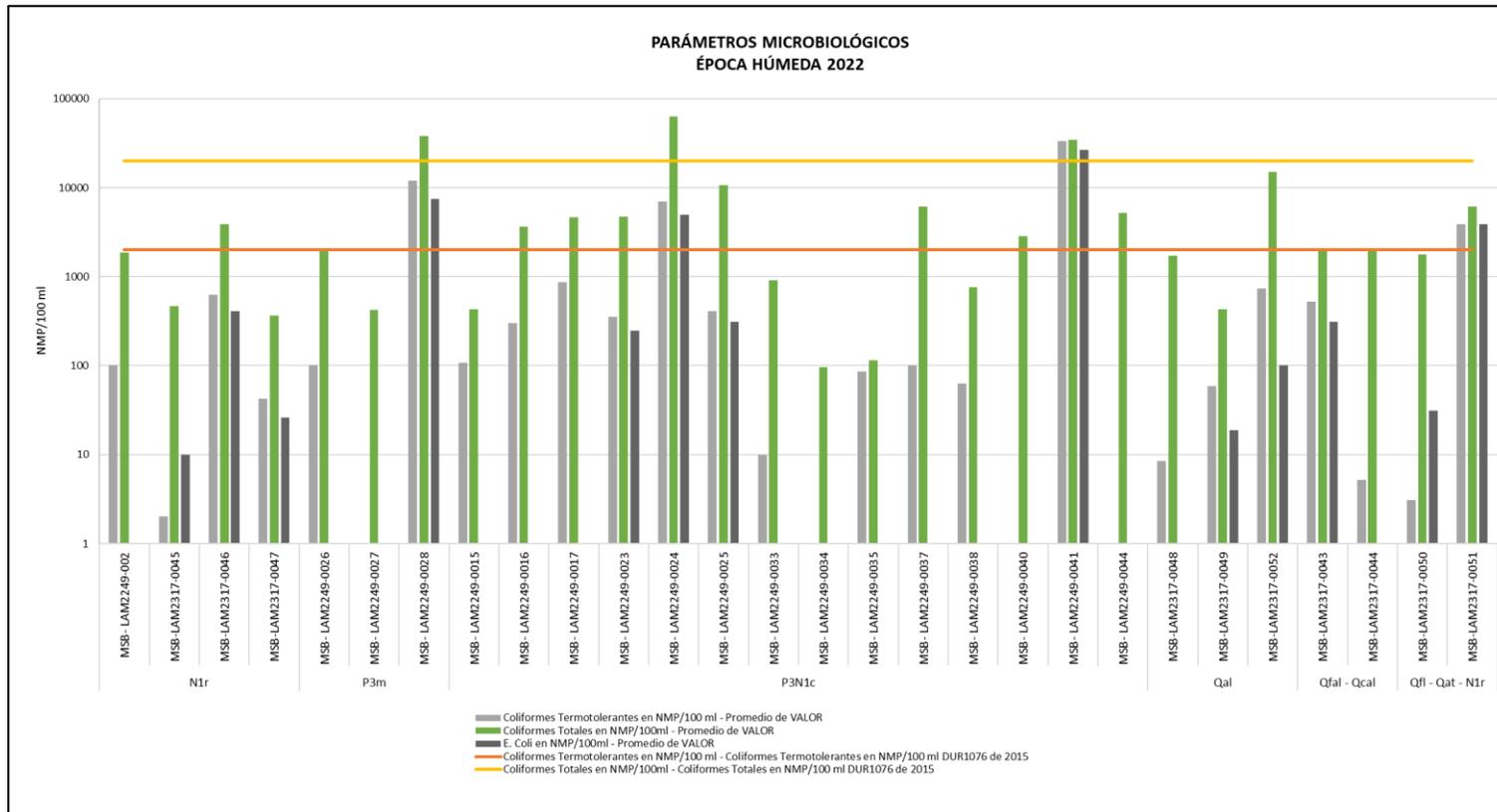
**Ilustración 40.** Parámetros microbiológicos cuantificados en la época seca del año 2022



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024



**Ilustración 41.** Parámetros microbiológicos cuantificados en la época de lluvias del año 2022

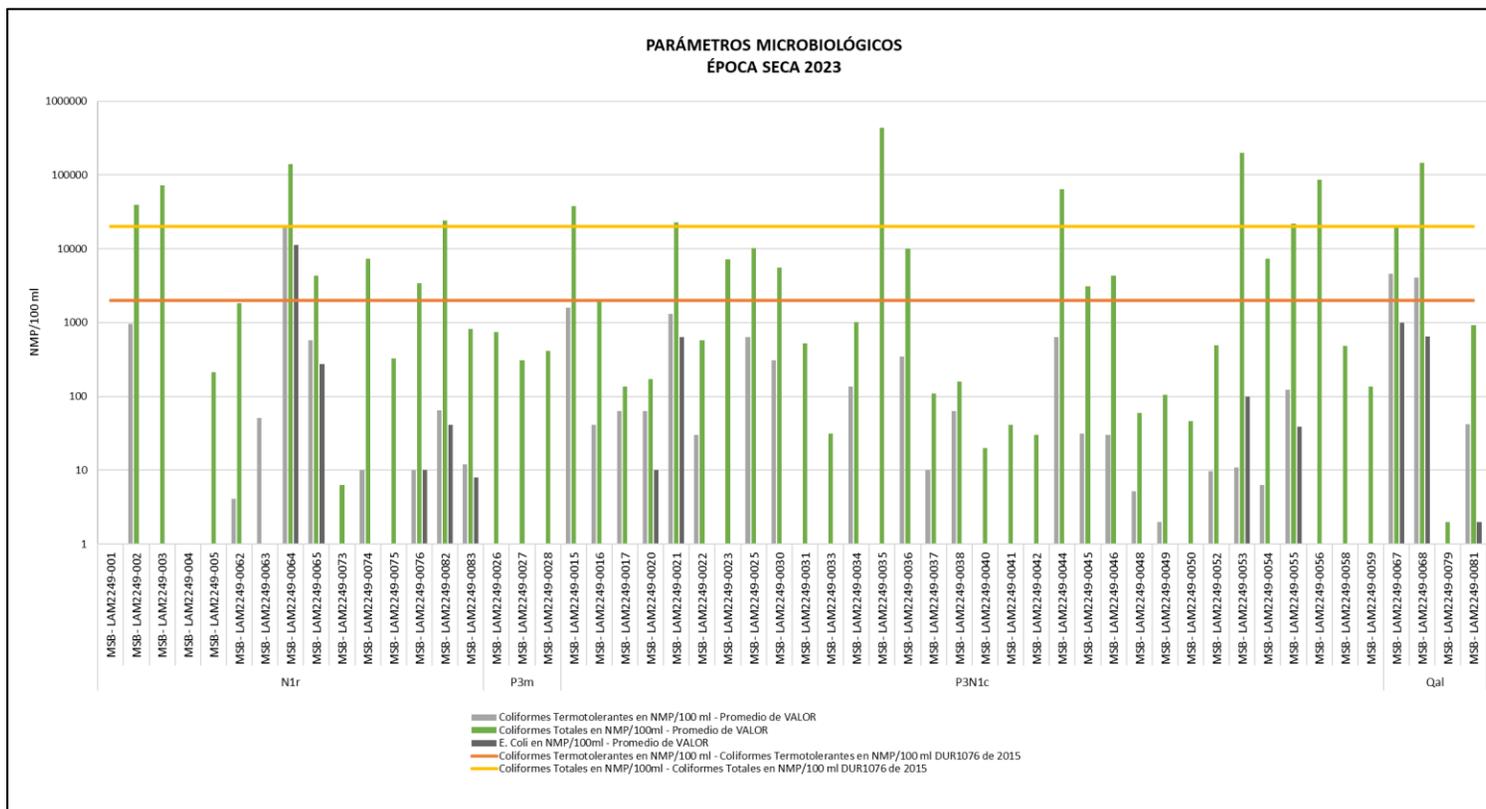


Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024





**Ilustración 42.** Parámetros microbiológicos cuantificados en la época seca del año 2023

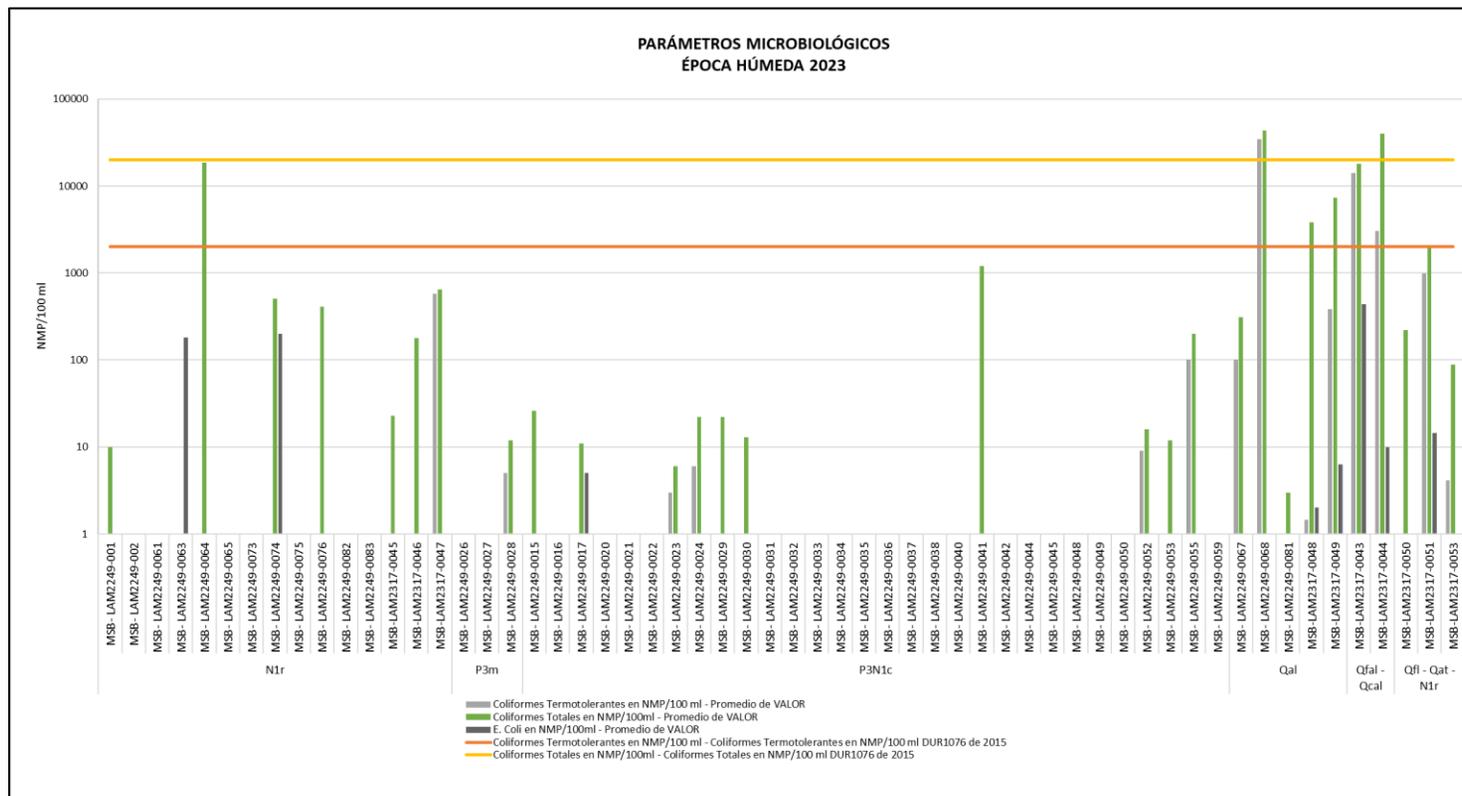


Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024





**Ilustración 43.** Parámetros microbiológicos cuantificados en la época de lluvias del año 2023



Fuente: Grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo ANLA, 2024





## 6. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones de los monitoreos disponibles hasta la fecha de la estrategia regional del recurso hídrico subterráneo en el área del Valle Medio del Magdalena - VMM, 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 dos temporadas climáticas se descartó un número de muestras que no cumplieron con el criterio establecido para cada proyecto; para la temporada seca se consideraron el 43% de los muestreos y para la temporada de lluvias el 41%, por lo tanto, será necesario que en los respectivos seguimientos ambientales se solicite a los licenciarios 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.
  - A partir del análisis de las mediciones de Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), dureza, aluminio, arsénico y bario es posible concluir que el agua subterránea en algunos puntos que monitorean los depósitos del Cuaternario Aluvial (Qal) en el área del Expediente LAM2249 están presentando concentraciones anómalas, por lo que en el marco del seguimiento ambiental de este proyecto será necesario hacer el requerimiento para que el licenciario analice y realice las acciones correctivas a lugar.
  - En la mayoría de los puntos analizados que se encuentran captando las unidades geológicas Grupo Real (N1r), Formación Mugrosa (P3m), Formación Colorado (P3N1c) y Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qfl-Qat), en los monitoreos realizados en época seca y de lluvias se presentan concentraciones detectables de plomo, sobrepasando los límites permisibles en la Resolución 2115 de 2007, que tendrían efectos sobre la salud humana. Por lo tanto, es pertinente realizar los requerimientos respectivos en los seguimientos específicos, de tal manera que sea posible identificar la fuente de dicha concentración, teniendo en cuenta que se presenta en unidades geológicas que están siendo captadas por la comunidad.
  - 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.
  - Se evidenció que los proyectos que actualmente reportan información en el marco de la estrategia regional no están cumpliendo a cabalidad con las condiciones de reporte

y entrega de información, en el sentido de radicar tres (3) meses después de realizada la campaña de monitoreo los reportes de laboratorio. Además, en algunos casos no se cuantifican la totalidad de los parámetros solicitados; 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.

- ✓ Los Depósitos Cuaternarios presentan una composición hidroquímica de tipo cloruradas cálcicas, asociada con conductividades eléctricas altas, lo que podría ser indicativo de potenciales afectaciones causadas por fuentes contaminantes antrópicas, entre las que se encuentra el desarrollo de los proyectos de hidrocarburos asentados en la región. No obstante, para corroborar esta hipótesis, es necesario contar con un análisis multitemporal de largo plazo, que permita analizar con mayor certeza las causas de estas composiciones en los niveles acuíferos más someros, los cuales se caracterizan por presentar flujos locales, en donde se esperaría una composición química de baja mineralización, con predominio de los iones bicarbonato y calcio.
- ✓ 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 en la mayoría de los acuíferos someros 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 multitemporales de las aguas residuales industriales analizadas se confirma que actualmente no se presenta una afectación directa sobre los niveles acuíferos someros a causa de la actividad de inyección, toda vez que los monitoreos de estos acuíferos hidrogeoquímicamente presentan comportamientos acordes con la dinámica de su medio, el cual difiere de las condiciones de flujo y almacenamiento de aguas subterráneas profundas. En tal sentido, es posible afirmar que, hasta el momento no se ha identificado una posible conexión hidráulica entre los acuíferos aprovechables y las formaciones acuíferas receptoras de aguas de producción.
- ✓ Los puntos MSB-LAM2249-0031, MSB-LAM2249-0042, MSB-LAM2249-0043 que captan los acuitardos asociados a las Formaciones Colorado (P3N1c) y Mugrosa (P3m), en época seca y de lluvias presentan concentraciones elevadas de aluminio y arsénico, lo cual será objeto de seguimiento en los próximos análisis regionales, de tal manera que se pueda establecer si se trata de un aumento localizado debido a causas antrópicas o a un comportamiento constante propio de las características litológicas de las formaciones geológicas.

- ✓ Es importante destacar las altas concentraciones de los metales aluminio, arsénico, hierro, bario y plomo, reportadas principalmente en los puntos de agua que se encuentran captando los Depósitos Cuaternarios (Qcal y Qfal - Qcal) y el Grupo Real (N1r). Los cuales, de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual regional y el análisis del diagrama de Mifflin, se dan en puntos de agua en los que se identificaron flujos locales, recargados por infiltración directa de aguas lluvia. Por lo tanto, es necesario identificar cual es el origen de la presencia de dichos metales, situación que deberá ser confirmada por los estudios técnicos (monitoreos, análisis de estanqueidad, caracterización del entorno y análisis de composición litológica, diseños de puntos de agua subterránea, modelos hidrogeoquímicos) que sean solicitados a los licenciarios.
- ✓ Respecto a la presencia de organismos microbiológicos, para las dos temporadas climáticas se evidencia concentración importante de coliformes totales, coliformes termotolerantes y E. Coli en los puntos de agua subterránea que se encuentran captando las unidades correspondientes a los Depósitos Cuaternarios (Qal, Qfal, Qcal, Qfl, Qat), Grupo Real (N1r), Formación Colorado (P3N1c) y la Formación Mugrosa (P3m). De igual manera, se puede observar que en la época seca es donde mayor número de puntos superan los umbrales establecidos por el Artículo 2.2.3.3.9.3. del Decreto 1076 de 2015 en relación con estos parámetros.
- ✓ Se observan puntos de agua subterránea que, a lo largo de todos los monitoreos realizados en los años 2022 y 2023, independientemente de la temporada climática, presentan valores elevados en los parámetros microbiológicos analizados (ID ANLA: MSB-LAM2249-0064, MSB-LAM2249-0028, MSB-LAM2249-0024, MSB-LAM2249-0025, MSB-LAM2249-0037, MSB-LAM2249-0044 y MSB-LAM2249-0068), todos correspondientes al proyecto con expediente LAM2249. El análisis de las causas asociadas a estos valores elevados recurrentes deberá ser objeto de solicitud a los respectivos licenciarios en el marco de los seguimientos ambientales.
- ✓ Los parámetros fenoles, BTEX e hidrocarburos totales del petróleo (asociados a la actividad de hidrocarburos), presentaron valores cuantificables, en algunos puntos de agua monitoreados por el expediente LAM2249; que, para el primero de estos parámetros, además, se encuentran por encima del límite máximo permisible según el Decreto 1076 del año 2015; asimismo, vale la pena mencionar que distintos puntos no fueron monitoreados por la presencia de hidrocarburos en estos, como se evidencia en los reportes entregados por la Sociedad. Así pues, se incumple el parágrafo del Artículo 2.2.3.3.9.4. del Decreto 1076 de 2015, que cita que *“No se aceptará película visible de grasas y aceites flotantes, materiales flotantes provenientes de actividad humana, radioisótopos y otros no removibles por desinfección, que puedan afectar la salud humana”*, lo anterior, será objeto de verificación y requerimiento en el seguimiento ambiental de este proyecto. Sin embargo, como se presentó a lo largo del presente documento, en el área se han identificado más de 80 rezumaderos naturales de hidrocarburos, por lo cual se entiende que estas sustancias se encuentran en el área de manera natural.

- ✓ La presencia de oxígeno disuelto, así como la fluctuación de los niveles estáticos en los acuíferos someros monitoreados, indican una relación directa entre la composición y dinámica de las aguas subterráneas y la variabilidad climática debido a procesos de recarga por infiltración directa.
- ✓ Para hacer un análisis completo del área de la estrategia de monitoreo regional de agua subterránea en la cuenca del Valle Medio del Magdalena - VMM, 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.
- ✓ 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 los Reportes de Alertas de la zona sur y centro del Valle Medio del Magdalena, las cuales sugieren la instalación de redes de monitoreo con el fin de analizar tendencias en el comportamiento de las aguas subterráneas en la región, así como aumentar el conocimiento de la hidrogeología regional por parte de entidades y autoridades ambientales competentes como lo es la ANLA, toda vez que la red de monitoreo regional establecida hasta el momento en el Valle Medio del Magdalena por esta Autoridad, aporta información que permite realizar análisis multitemporales de la calidad y dinámica del agua subterránea por unidades geológicas a partir de datos reportados directamente en respuesta a las obligaciones de la estrategia, es decir, que esta información primaria presentada por los licenciarios de los proyectos facilita la ejecución de análisis hidrogeológicos más específicos y detallados de la cuenca, que con mencionó anteriormente, se irá fortaleciendo a 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.
- ✓ En el Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena (SGC, 2019) las formaciones Colorado y Mugrosa son caracterizadas hidrogeológicamente como acuitardos; no obstante, de acuerdo con el análisis desarrollado en este documento, se considera que dichas unidades pueden ser susceptibles de afectación toda vez que constituyen en profundidad los principales reservorios y receptores de aguas de producción, además en superficie cuentan con la presencia de una amplia densidad de pozos inyectores y actividades asociadas, que posiblemente pueden generar concentraciones locales aumentadas de algunos parámetros identificados en los análisis realizados, comportamientos anómalos que serán objeto de requerimientos en los seguimientos específicos de los proyectos a cargo.



## 7. Referencias bibliográficas

De Porta, J., 1974. Colombie (Deuxième Partie) Tertiaire et Quaternaire. 626pp.

Ecopetrol., (AEX- ICP), 1998. Evaluación de la Secuencia Terciaria del Valle Medio del Magdalena Calidad de Reservorio Regional del Cretáceo de Plataforma en el Valle Medio Del Magdalena. Informe Interno ECOPETROL, Bogotá.

Ecopetrol., 2023. Inyección como mecanismo de mantenimiento presión y recobro mejorado de hidrocarburos en los Bloques de Mares. Informe presentado en el marco de la Modificación del Plan de Manejo Ambiental integral de Mares, 488 pp. Bogotá.

Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. 2008. Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico, Escala 1:100.000 de la Plancha 119 – Barrancabermeja VMM. 95 pp. Bogotá Sede Central.

Julivert, M., 1968. Lexique Stratigraphique International, Vol. V Amerique Latine, Fasc. 4, Colombie, Paris.

Morales et al., 1958. General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: In Habitat of Oil Symposium: American Association of Petroleum Geologists Bulletin., pp. 641-691.

Servicio Geológico Colombiano. 2019. Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle Medio del Magdalena. Escala 1:100.000. 200 pp. Bogotá Sede Central.

