APOYO EN LA ELABORACIÓN DE INFORMES TÉCNICOS SOBRE EL MUESTREO HIDROGEOQUÍMICO EN LA MINA SAN ANTONIO, BOYACÁ.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Acreditación Institucional de Alta Calidad

Autor

María Alejandra García Leguizamón

Director

José Alejandro Murad Pedraza

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

noviembre de 2025

Contenido

1. Introducción 3
2. Objetivos 4
   2.1 Objetivo General 4
   2.2 Objetivos Específicos 4
3. Plan de trabajo 5
4. Descripcion de resultados 9
5. Conclusiones y recomendaciones 22
6. Anexos 24
7. Referencias 25

1. INTRODUCCIÓN

La pasantía se desarrolló en la empresa AHG Group Hidrogeólogos SAS, consultora ambiental especializada en hidrogeología, hidrología y tramites ambientales. El trabajo se llevó a cabo en el proyecto de monitoreo hidrogeoquímico en la Mina San Antonio, ubicada en los municipios de Duitama y Santa Rosa de Viterbo, departamento de Boyacá, donde se realiza explotación de caliza a cielo abierto.

El principal problema que guio el monitoreo se relaciona con la necesidad de comprender el comportamiento del agua subterránea y superficial frente a la actividad minera, identificando los cambios fisicoquímicos que pueden deberse tanto a causas naturales como a impactos antrópicos. Por lo tanto, la empresa ha venido consolidando una red de monitoreos específicamente dos al año en diferentes temporadas de lluvias y análisis técnico que permite evaluar la calidad del agua y los niveles estáticos de los acuíferos, garantizando así el cumplimiento ambiental.

En este contexto, la pasantía tuvo como propósito apoyar la elaboración de informes técnicos derivados de las campañas de muestreo hidrogeoquímico, integrando el análisis de datos y las disposiciones normativas vigentes. Su importancia se establece en aportar información técnica y confiable para la toma de decisiones, tanto de la empresa cliente como de las entidades ambientales.

El desarrollo de estas actividades tuvo como resultado principal la elaboración del informe técnico INF_009_2024-A_VF: Quinceavo muestreo hidrogeoquímico y actualización de niveles estáticos en la red de monitoreo de aguas subterráneas de la Mina San Antonio, el cual se presenta como anexo de este documento y constituye la evidencia técnica del trabajo realizado durante la pasantía.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Apoyar en la elaboración de informes técnicos sobre el muestreo hidrogeoquímico en la mina San Antonio, Boyacá, mediante el análisis de la calidad del agua y la evaluación de su relación con la actividad minera, garantizando el cumplimiento de los estándares de AHG Group Hidrogeólogos SAS y la normativa ambiental aplicable.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar los datos obtenidos del muestreo hidrogeoquímico, determinando tendencias y posibles variaciones en la calidad del agua en función de la actividad minera.
- Comparar los resultados obtenidos con las normativas ambientales vigentes, identificando posibles impactos y riesgos ambientales asociados a la actividad minera en la mina San Antonio.
- Apoyar en la redacción y estructuración de informes técnicos, integrando los análisis obtenidos con los requerimientos normativos y los estándares de calidad de AHG Group Hidrogeólogos SAS.
- Presentar las conclusiones del informe técnico ante la empresa y el cliente, facilitando la interpretación de los resultados y proponiendo estrategias de mejora para la gestión ambiental.

3. PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo de la pasantía se estructuró en varias etapas que permitieron cumplir con los objetivos planteados, integrando actividades de revisión documental, análisis de datos, elaboración de productos técnicos y socialización de resultados como se evidencia en la Figura 1.

1. Planificación y revisión de información previa

- Se revisaron los informes técnicos elaborados por AHG Group Hidrogeologos SAS desde el año 2013 hasta la fecha, los cuales reúnen la información de las campañas de monitoreo hidrogeoquímico realizadas en la Mina San Antonio. Durante este análisis se evidenció que la red de monitoreo ha tenido cambios en el número de puntos a lo largo de los años, por lo que en 2024 cuenta con un total de 46 puntos distribuidos en diferentes unidades hidrogeológicas.

- Sin embargo, se identificó que no todos los puntos han podido ser muestreados de manera continua, debido a factores como la ausencia de agua en temporadas secas, o la falta de acceso a predios privados donde se ubican algunos aljibes, manantiales o pozos. Estas circunstancias generan que los valores reportados cambien dependiendo de las condiciones del momento, de esta forma se considera una limitación para la interpretación de los datos a largo plazo.

Adicionalmente, se realizó la consulta de normativas ambientales aplicables con el fin de establecer los parámetros de referencia para la evaluación de la calidad del agua:

- El Decreto 1594 de 1984, que establece los usos del recurso hídrico en Colombia y define criterios de calidad del agua para consumo humano, doméstico, agrícola, pecuario e industrial, indicando los límites máximos permisibles de contaminantes en cada caso.
- El Decreto 1076 de 2015, establece las bases para el uso sostenible del agua, la obtención de permisos de vertimientos, el manejo de aguas lluvias, y la necesidad

de presentar planos y estudios técnicos antes de iniciar el uso del recurso hídrico en el país.

- La Resolución 2115 de 2007, que regula específicamente la calidad del agua destinada al consumo humano, definiendo parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, así como las responsabilidades de las entidades prestadoras del servicio para garantizar agua potable segura.

La revisión del marco normativo permitió comprender la evolución y desarrollo de la red de monitoreo, valorar la importancia de contar con series de datos históricas y reconocer la necesidad de adaptar las campañas de muestreo a las condiciones del territorio.

2. Procesamiento y análisis de datos

Una vez recibidos los resultados de laboratorio, junto con los datos recolectados in situ durante la campaña de muestreo (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, entre otros), se procedió a su organización en una hoja de cálculo de Excel formulado (ANEXO II) herramienta que AHG Group Hidrogeólogos SAS ha venido utilizando históricamente para consolidar la información.

En este mismo Excel se realizaron gráficas individuales para cada parámetro, lo que facilitó la comparación con los límites normativos y la identificación de posibles desviaciones en los puntos monitoreados. En este punto, se realizó la comparación normativa detallada de los parámetros fisicoquímicos frente al Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 2115 de 2007, elaborando mapas temáticos que representaron la relación espacial de los puntos que cumplían y los que no, con el fin de identificar las zonas críticas en el área de estudio.

3. Elaboración del informe técnico

La redacción del informe técnico se realizó tomando como referencia los informes anteriores elaborados por AHG Group Hidrogeólogos SAS, lo cual permitió mantener la coherencia en la estructura y el lenguaje técnico empleado por la empresa. Sin embargo, se prestó especial atención a la actualización de la información, ya que algunos puntos de monitoreo presentaron cambios de ubicación respecto a campañas anteriores. Para su justificación se

analizó cuidadosamente esta variación en los puntos, explicando las razones y las causas que estas modificaciones podían tener en los resultados.

Dentro de las actividades realizadas se incluyó la elaboración cartográfica de algunos mapas, mientras que otros ya habían sido previamente construidos por la empresa. Asimismo, se integraron las tablas de resultados, las gráficas comparativas y se realizó su respectivo análisis, de manera conjunta con los lineamientos de AHG Group Hidrogeólogos SAS.

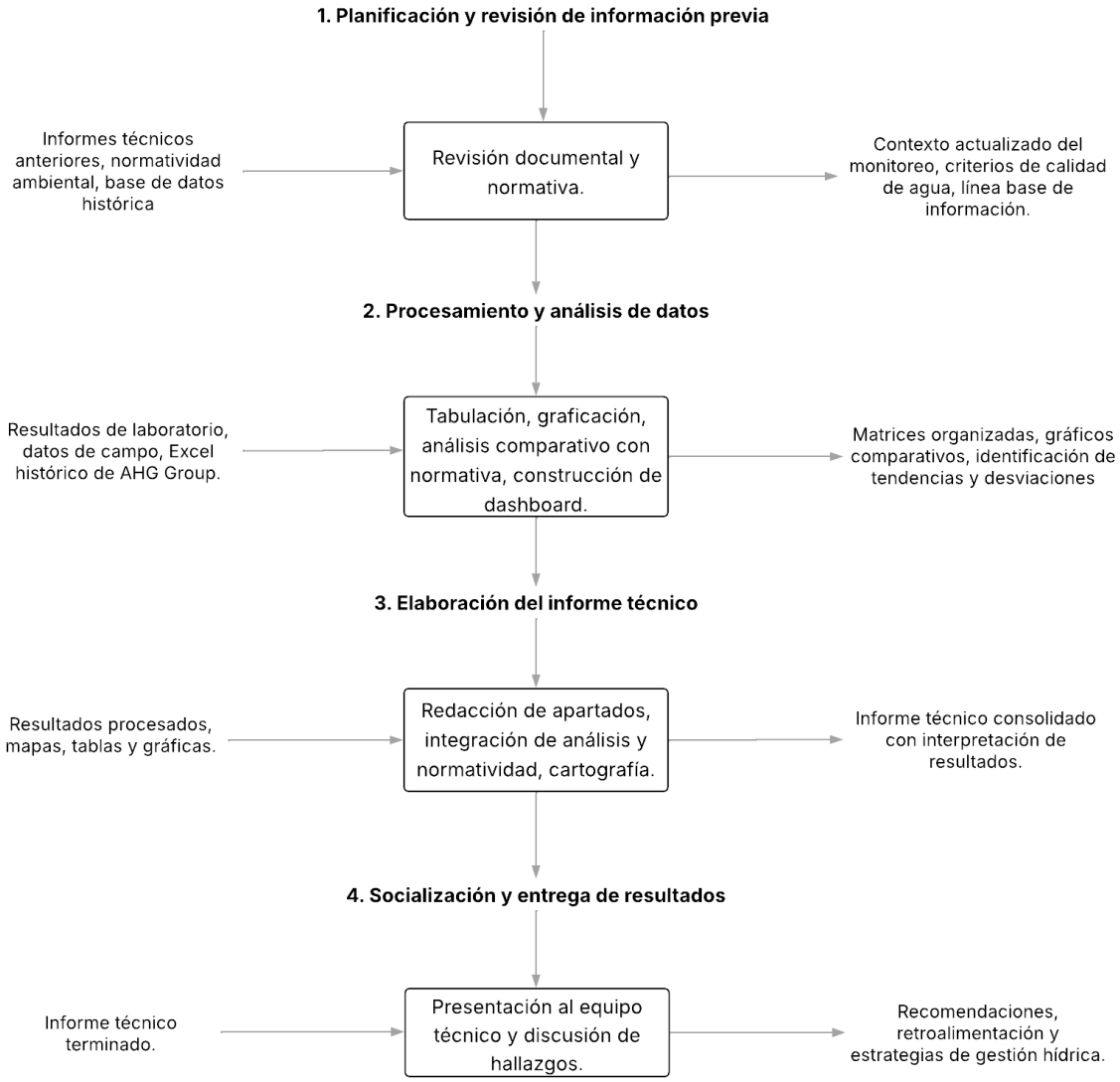
El proceso de redacción, análisis y consolidación de la información se desarrolló bajo el seguimiento del profesional encargado de la pasantía, el cual ofreció asesoría en cada etapa, con el fin de asegurar la calidad de los apartados incluidos.

La participación incluyó la redacción de apartados técnicos (capítulos 1 al 4 y secciones del 5), la incorporación de las tablas y gráficos elaborados, y la formulación de una sección de recomendaciones de tecnologías apropiadas de tratamiento del agua.

4. Socialización y entrega de resultados

- Presentación de los hallazgos principales al equipo técnico de AHG Group Hidrogeólogos SAS.
- Discusión de los resultados en relación con los objetivos ambientales de la empresa minera.
- Formulación de recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión hídrica en la zona de influencia de la Mina San Antonio.

Figura 1. Diagrama de flujo del plan de trabajo.



Fuente: Autora, 2025.

4. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo de la pasantía permitió obtener resultados técnicos relacionados con los objetivos planteados, a partir del procesamiento y análisis de la información correspondiente a la quinceava campaña de monitoreo hidrogeoquímico en la Mina San Antonio. Estos resultados se consolidaron en el informe técnico INF_009_2024-A_VF: Quinceavo muestreo hidrogeoquímico y actualización de niveles estáticos en la red de monitoreo de aguas subterráneas de la Mina San Antonio, el cual se presenta como anexo y constituye la principal evidencia del trabajo realizado durante la pasantía.

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo presenta el propósito general del estudio, el cual consiste en realizar la quinceava campaña de muestreo hidrogeoquímico y la actualización de los niveles estáticos en la red de monitoreo de aguas subterráneas de la Mina San Antonio, ubicada en los municipios de Duitama y Santa Rosa de Viterbo (Boyacá). Además, se exponen los objetivos generales y específicos del monitoreo, direccionados a identificar la evolución hidrogeológica y las posibles consecuencias derivadas de la actividad minera sobre los recursos hídricos.

El trabajo realizado se evidenció en la redacción del capítulo dentro del informe técnico ubicado en el Anexo: Informe, el cual fue revisado y aprobado por el equipo técnico de AHG Group Hidrogeólogos SAS.

Capítulo 2. Síntesis geológica

En este apartado se muestra la descripción geológica del área de estudio, caracterizando las formaciones presentes, su composición litológica, edad y características estructurales.

La redacción de este capítulo se realizó con base en la información geológica previamente recolectada por la empresa, manteniendo la organización y el formato estándar de AHG. El

aporte consistió en la adaptación y actualización de la información existente, teniendo en cuenta la coherencia técnica con los informes anteriores del proyecto.

Capítulo 3. Síntesis hidrológica

Este capítulo aborda el análisis del comportamiento hidrológico del área, incluyendo la identificación de subcuencas, la caracterización climática, el comportamiento de la precipitación y la estimación de la recarga potencial de los acuíferos. Se incorporó datos históricos de estaciones meteorológicas cercanas y se describen los principales elementos hidrográficos que inciden en la zona de influencia de la mina.

Este aporte se evidencia en la actualización de la base de datos hidrológica y en los gráficos consolidados que acompañan el capítulo dentro del informe final.

Capítulo 4. Red de monitoreo de agua subterránea

En esta sección se detalla el desarrollo de la red de monitoreo realizada, incluyendo los puntos de observación, los parámetros fisicoquímicos medidos y la evolución de los niveles estáticos de las fuentes subterráneas y superficiales. Se analizan los resultados por formación geológica y se presentan los gráficos y tablas comparativas que permiten observar los cambios en el tiempo.

Las tablas y gráficas comparativas elaboradas en Excel constituyen el producto principal del capítulo, ya que se usaron para las conclusiones y la consolidación final del informe.

Capítulo 5. Hidrogeoquímica

El capítulo desarrolla el análisis químico de las muestras de agua, incluyendo la caracterización de iones principales y parámetros fisicoquímicos, así como la interpretación de diagramas hidrogeoquímicos. Finalmente, se evalúa la calidad del agua de acuerdo a la normatividad nacional (Decreto 1594 de 1984 y Resolución 2115 de 2007) y se proponen

alternativas de tratamiento.

La primera parte del capítulo fue elaborada por otro integrante del equipo técnico de la empresa; sin embargo, el aporte se concentró en la comparación normativa de los resultados y la evaluación del cumplimiento de los límites establecidos.

Asimismo, se elaboraron mapas temáticos que representaron la distribución espacial de los puntos que cumplían o no con la normatividad, analizando su relación con las condiciones geológicas e hidrogeológicas. Finalmente, se desarrolló una sección de recomendaciones sobre la aplicación de tecnologías apropiadas como alternativas de tratamiento y mitigación de los impactos identificados.

Este trabajo se evidenció en la sección del informe donde se presentan los mapas de cumplimiento normativo y los análisis comparativos con la legislación ambiental, además de la propuesta de tecnologías apropiadas incluidas en el apartado de recomendaciones.

Capítulo 6 y 7. Conclusiones y recomendaciones finales

Estos capítulos reúnen las conclusiones técnicas del estudio y las recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos en el monitoreo hidrogeoquímico. Se recopilan las observaciones más relevantes sobre el comportamiento de los acuíferos y la calidad del agua en la zona de influencia de la Mina San Antonio.

El aporte en esta parte consistió en la elaboración inicial de las conclusiones del informe, las cuales fueron revisadas y complementadas bajo la supervisión de la profesional encargada de la pasantía. De esta forma, a continuación, se evidencia por pasos la para consolidación de los resultados en el informe final.

4.1 Procesamiento y análisis de datos hidrogeoquímicos

Se realizó la organización y sistematización de los datos recolectados durante la campaña de campo, los cuales incluyeron parámetros fisicoquímicos medidos in situ (pH,

conductividad eléctrica, temperatura, sólidos disueltos totales) y análisis hidroquímicos en laboratorio (sodio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, entre otros). Estos datos se tabularon en matrices de Excel y se representaron mediante gráficas comparativas y diagramas que luego fueron adjuntos en el informe final entregable.

Con el apoyo del equipo técnico de AHG Group Hidrogeólogos SAS, se elaboraron representaciones gráficas como:

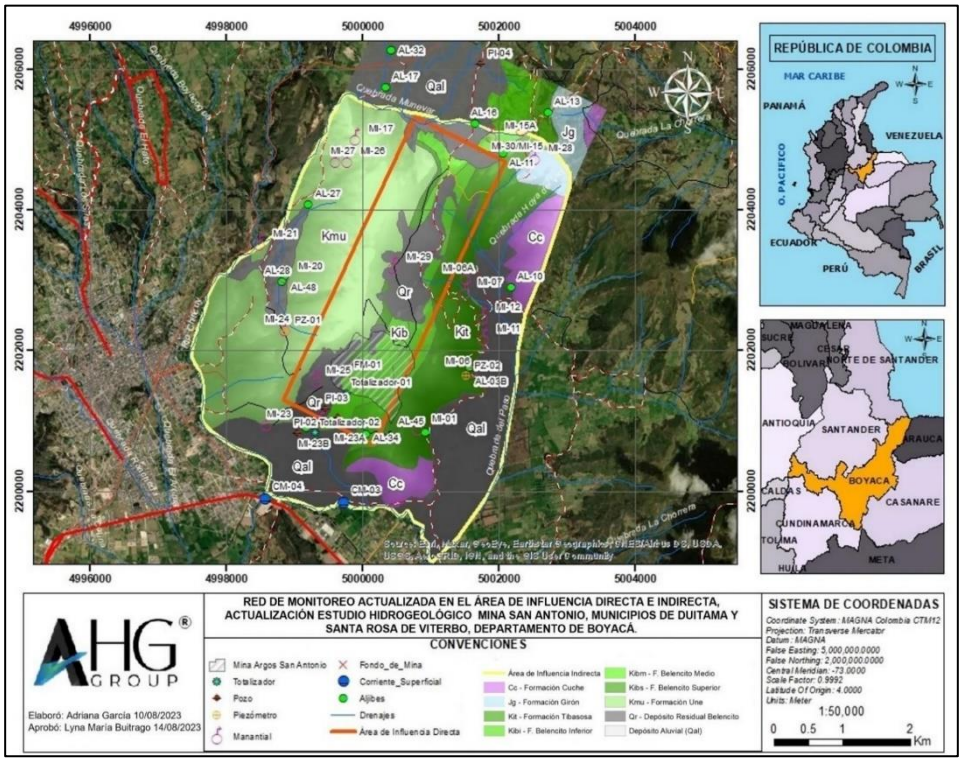
- Diagramas de Piper, permitieron clasificar los tipos de agua y evidenciar su evolución hidrogeoquímica, la mayoría de las fuentes de agua subterránea se mantuvieron en un grupo propio de zonas con presencia de calizas, aunque en algunos casos se identificaron aguas con mayor cantidad de sulfatos y cloruros, lo que muestra que hay zonas donde la calidad del agua puede estar cambiando, posiblemente por la explotación minera o por mezclas de diferentes tipos de agua.
- Diagramas de Stiff y Schoeller, útiles para identificar las facies iónicas predominantes y compararlas con periodos de muestreo anteriores. No obstante, en algunos puntos se identificaron aguas con mayor presencia de sodio, cloruros y sulfatos, lo que indica que existen variaciones químicas ligadas tanto a la geología del lugar como a posibles influencias de la actividad minera y de otros usos del suelo. Estos resultados reflejan que, aunque el comportamiento general del agua es estable, hay sectores donde se registran cambios que requieren seguimiento continuo.
- El diagrama de cajas y bigotes permitió visualizar la variación de los principales componentes químicos del agua. En este análisis se observó que el sodio fue el elemento con valores más destacados en la mayoría de muestras, mientras que los bicarbonatos y sulfatos presentaron la mayor variabilidad entre los diferentes puntos de muestreo. En contraste, el calcio y el cloruro mostraron valores más bajos aunque con algunas fluctuaciones, y el magnesio se mantuvo bastante estable. Estos resultados evidencian que, aunque la composición del agua responde en gran medida a la geología local, existen ciertos iones que reflejan cambios importantes en la calidad del recurso hídrico.

4.1.1 Calidad fisicoquímica general del agua

En la mayoría de puntos de monitoreo (Figura 2), parámetros como pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por la normativa colombiana. Los valores de pH oscilaron entre 6,5 y 7,8, evidenciando aguas neutras a ligeramente básicas, lo cual es característico de acuíferos en contacto con formaciones calcáreas.

La conductividad eléctrica presentó valores entre 350 y 1.250 µS/cm, lo que indica variaciones asociadas a la concentración de sales disueltas y a la interacción agua–roca. Los sólidos disueltos totales se mantuvieron en su mayoría por debajo de los 1.000 mg/L, con algunas excepciones que superaron este valor en pozos ubicados en la Formación Belencito, reflejando una mayor mineralización.

Figura 2. Localización de puntos de muestreo, 2024.



Fuente: AHG, SAS.

4.1.2 Identificación de puntos críticos

Se identificaron algunos puntos críticos que requieren especial atención:

En el punto AL-09, ubicado en la unidad hidrogeológica de los Depósitos Aluviales, se registraron concentraciones de sulfatos cercanas a 300 mg/L, valor cercano al límite máximo permitido para consumo humano (Resolución 2115 de 2007). Este comportamiento puede estar asociado a procesos de disolución de yesos o a la influencia de actividades antrópicas.

En el pozo PZ-1, correspondiente a la Formación Tibasosa, se detectaron niveles elevados de cloruros (≈ 220 mg/L), lo que sugiere una posible influencia de aguas de escorrentía superficial o mezclas con descargas externas.

Algunos aljibes ubicados en zonas altas mostraron variaciones estacionales significativas en la conductividad eléctrica, con incrementos en temporada seca, reflejando concentración de sales por menor recarga hídrica.

Estos resultados evidencian que, aunque la mayoría de parámetros cumplen la normativa, existen condiciones puntuales que deben ser tenidas en cuenta en el análisis, ya que representan riesgos de deterioro en la calidad del agua.

4.1.3 Evaluación hidrogeoquímica y facies iónicas

El análisis hidrogeoquímico mediante diagramas de Piper y Stiff mostró que la mayoría de las aguas se clasifican dentro de la facies bicarbonatada cálcica (Ca-HCO3), típica de acuíferos en contacto con rocas calcáreas. Sin embargo, algunos puntos en la Formación Belencito y en los Depósitos Aluviales presentaron tendencia hacia aguas sulfatadas cálcicas y cloruradas mixtas, lo que sugiere un mayor grado de interacción agua–roca y posible influencia de actividades mineras o agrícolas cercanas. (Appelo & Postma, 2005)

4.1.4 Niveles estáticos de los acuíferos

El monitoreo de niveles estáticos evidenció estabilidad general en las unidades hidrogeológicas, aunque con fluctuaciones relacionadas a la estacionalidad climática. En temporada de lluvias, los niveles aumentaron en promedio 0,5 a 1,2 metros, mientras que

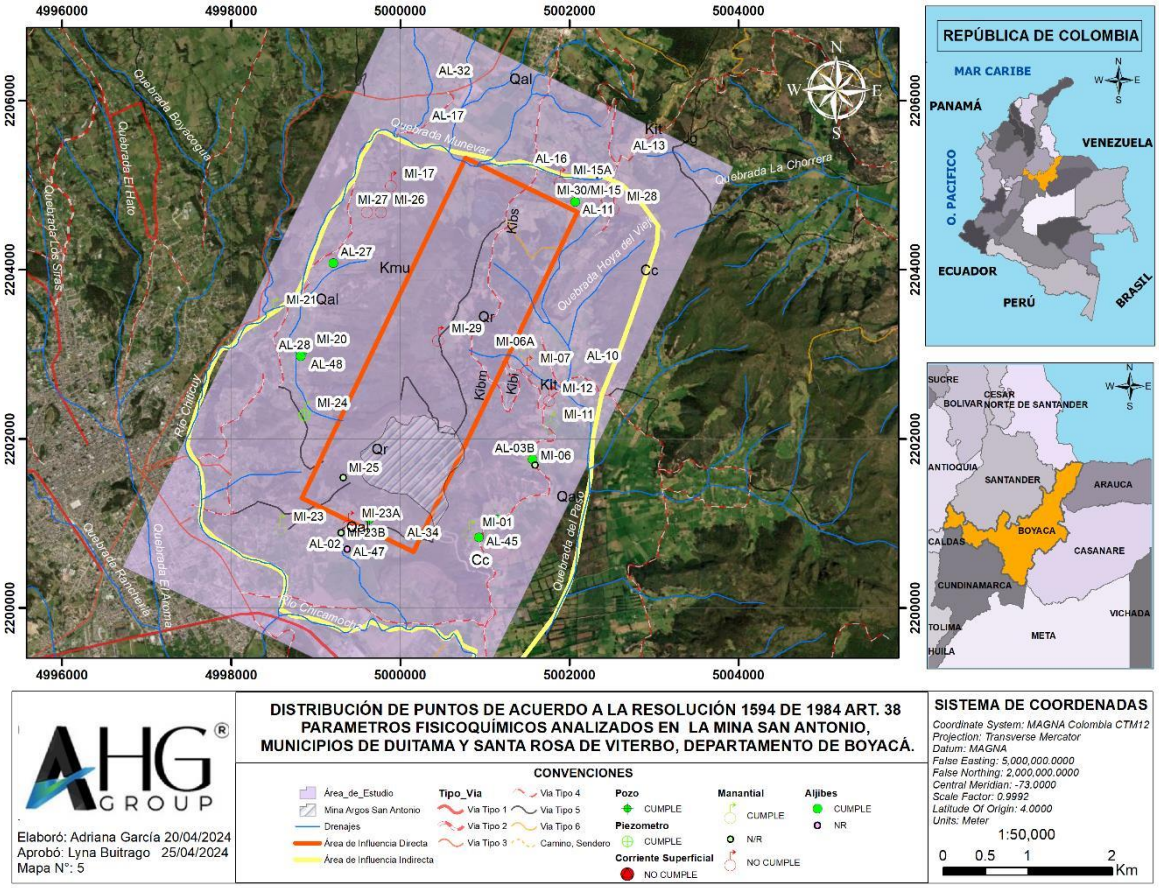
en temporada seca se registraron descensos similares. No obstante, no se identificaron descensos críticos que comprometieran la disponibilidad del recurso hídrico, lo que indica que los acuíferos mantienen una dinámica de recarga adecuada.

4.2 Comparación con la normativa ambiental vigente

Una parte fundamental del trabajo consistió en contrastar los resultados con la legislación colombiana, en particular:

- Análisis bajo el Decreto 1594 de 1984 Art. 38: Representa los puntos de monitoreo comparados con los límites de calidad exigidos para agua de consumo humano. La mayoría de los puntos presentaron cumplimiento, especialmente aquellos ubicados en las formaciones calcáreas del sector norte de la mina. Sin embargo, algunos puntos localizados en la Formación Belencito mostraron concentraciones elevadas de sulfatos y cloruros cercanas a los valores máximos permitidos, indicando posibles zonas de mayor mineralización natural o influencia antrópica.

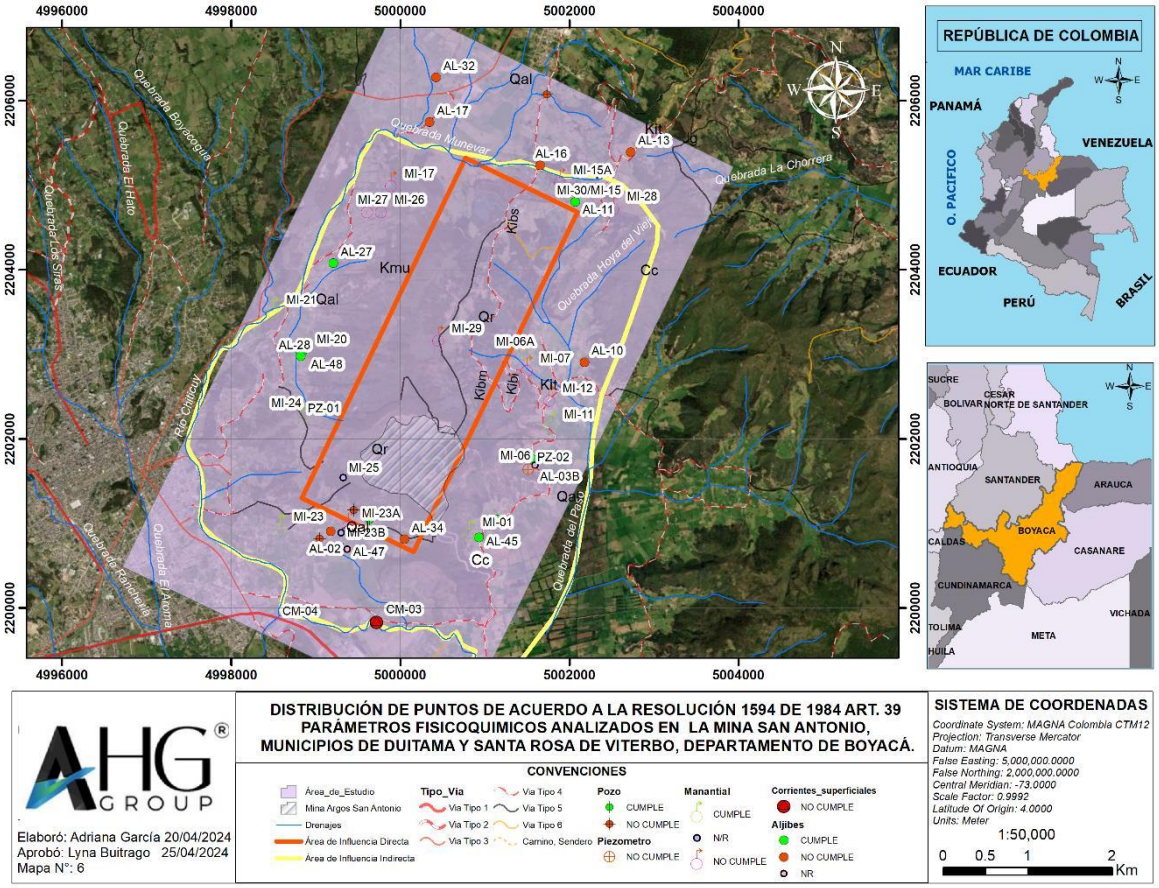
Figura 3. Mapa de la distribución de puntos de acuerdo a la resolución 1594 de 1984 Art. 38 parámetros fisicoquímicos analizados en el Área de la Mina San Antonio.



Fuente: (AHG GROUP, 2024).

- Análisis bajo el Decreto 1594 de 1984 Art. 39: En este mapa se evidenció que casi todos los puntos cumplen los límites para riego y uso pecuario, con excepción de algunos pozos ubicados en los depósitos aluviales, donde se registraron valores altos de conductividad y sólidos disueltos totales. Esto sugiere procesos de acumulación de sales y posibles aportes de materia orgánica o fertilizantes provenientes de actividades agropecuarias cercanas.

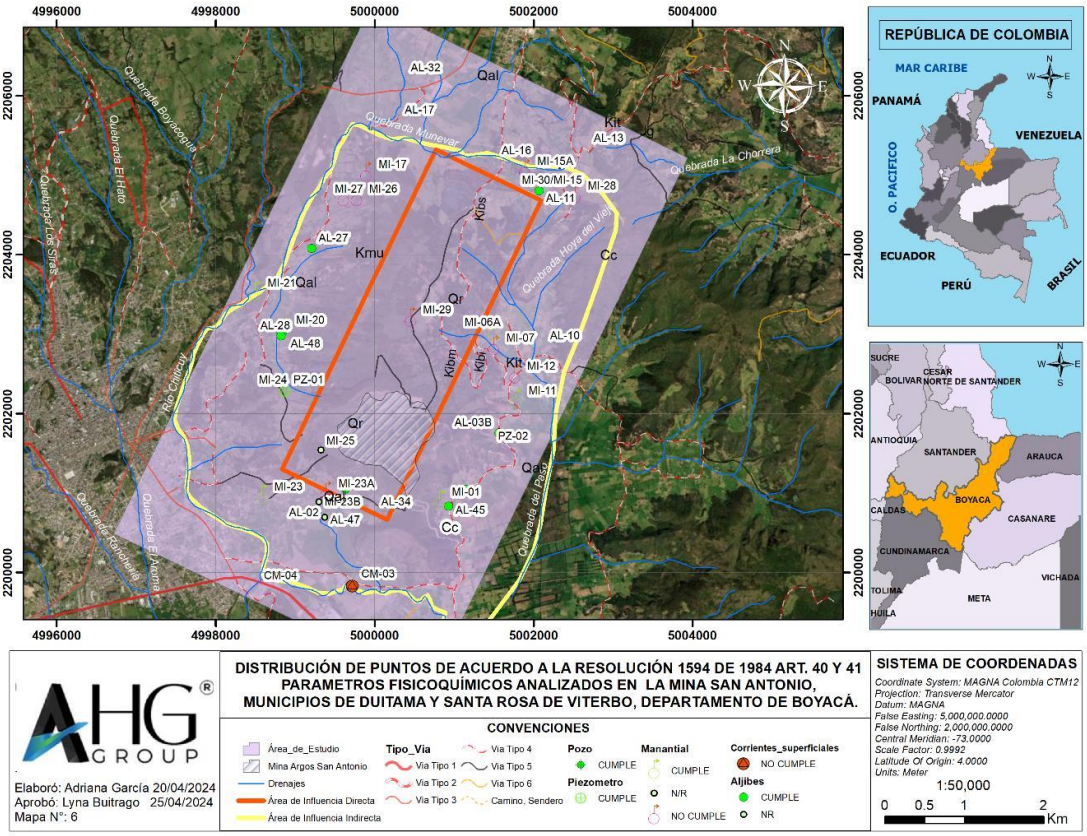
Figura 4. Mapa de la distribución de puntos de acuerdo a la resolución 1594 de 1984 Art. 39 parámetros fisicoquímicos analizados en el Área de la Mina San Antonio.



Fuente: (AHG GROUP, 2024).

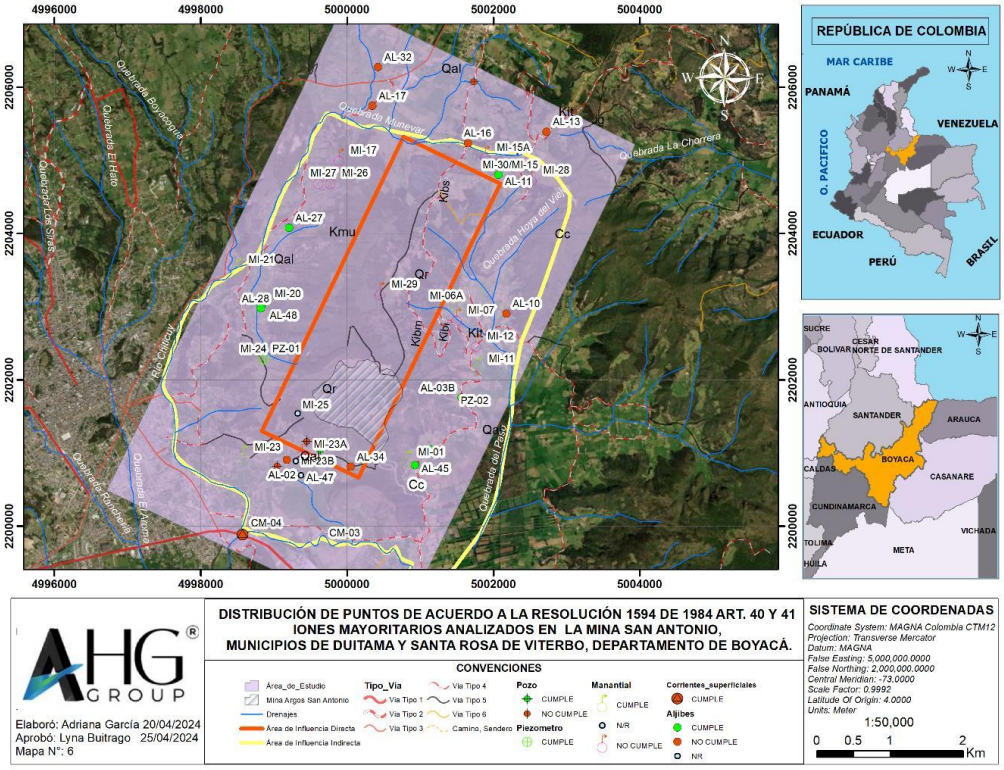
- Análisis bajo el Decreto 1594 de 1984 Art. 40 y 41: Los resultados muestran cumplimiento general en toda el área de estudio, lo que indica que las aguas no presentan restricciones significativas para estos usos. No obstante, en algunos puntos aislados se observaron valores de pH ligeramente fuera del rango óptimo, relacionados con procesos naturales de disolución de calizas.

Figura 5. Mapa de la distribución de puntos de acuerdo a la resolución 1594 de 1984 Art. 40 y 41 parámetros fisicoquímicos analizados en el Área de San Antonio.



Fuente: (AHG GROUP, 2024).

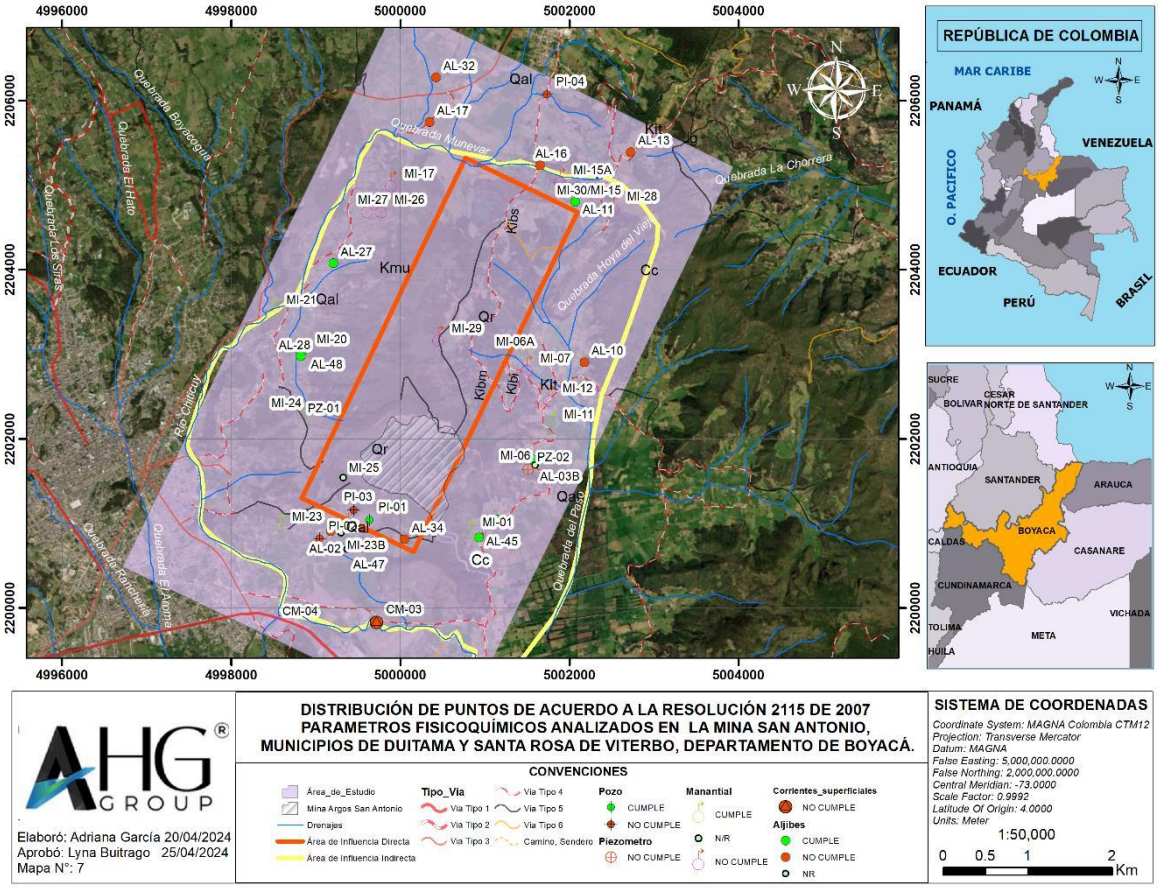
Figura 6. Mapa de la distribución de puntos de acuerdo a la resolución 1594 de 1984 iones mayoritarios analizados en el Área de la Mina San Antonio.



Fuente: (AHG GROUP, 2024).

- Análisis bajo la Resolución 2115 de 2007: Este mapa permitió identificar los puntos que cumplen con los límites fisicoquímicos y microbiológicos establecidos para el agua destinada al consumo humano. Los resultados evidenciaron que la mayoría de fuentes presentan condiciones adecuadas, con excepción de algunos puntos donde se registraron excedencias de hierro (Fe) y manganeso (Mn), principalmente en zonas próximas al frente de explotación minera. Estos valores sugieren procesos de oxidación de minerales metálicos y posibles influencias locales de la actividad extractiva.

Figura 7. Mapa de la distribución de puntos de acuerdo a la resolución 2115 de 2007 parámetros fisicoquímicos analizados en el Área de la Mina San Antonio.



Fuente: (AHG GROUP, 2024).

El análisis mostró que la mayoría de parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los rangos permitidos. Sin embargo, se detectaron casos puntuales en los que algunos iones (como sulfatos y cloruros) presentaron valores cercanos a los límites normativos, lo cual requiere mantener un seguimiento continuo. Estos hallazgos resultan relevantes para la empresa minera, dado que constituyen alertas tempranas sobre posibles riesgos ambientales en la zona de influencia.

4.3 Contribución en la elaboración del informe técnico

Un resultado clave fue la participación en la redacción y estructuración del Informe Quinceavo de Monitoreo Hidrogeoquímico de la Mina San Antonio (INF_009_2024-A).

Durante este proceso se contribuyó en:

- La sistematización de tablas de resultados de campo y laboratorio.
- La preparación de gráficas comparativas para identificar variaciones entre diferentes unidades hidrogeológicas (Formación Girón, Tibasosa, Belencito, Une y Depósitos Aluviales).
- La redacción de apartados descriptivos en la sección de resultados, con énfasis en el cumplimiento normativo colombiano.
- La revisión de coherencia entre los resultados y las conclusiones preliminares.

Este producto técnico fue entregado tanto a la empresa minera como a las entidades ambientales aplicables, garantizando que la información reportada cumpliera con los estándares de calidad exigidos. Todas las actividades descritas se evidencian en el informe técnico *INF_009_2024-A_VF*, el cual se presenta como anexo y refleja los productos desarrollados durante la pasantía.

4.4 Formulación de conclusiones y recomendaciones técnicas

Finalmente, se participó en la construcción de conclusiones y recomendaciones orientadas a la interpretación integral de los resultados, lo que permitió:

- Identificar las unidades hidrogeológicas más sensibles a la recarga estacional.
- Reconocer la necesidad de mantener el programa de monitoreo como herramienta de gestión ambiental.
- Recomendar el fortalecimiento de medidas preventivas, como el control de vertimientos y la implementación de técnicas de tratamiento de aguas residuales o recirculación.

Estas recomendaciones fueron incluidas en el informe técnico final, con el fin de servir como guía para la empresa minera en la toma de decisiones y la planeación de estrategias de gestión hídrica sostenible.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de la pasantía en AHG Group Hidrogeólogos SAS permitió cumplir con los objetivos propuestos y responder de manera efectiva al problema planteado en la propuesta inicial. Participar en la elaboración del informe de monitoreo hidrogeoquímico de la Mina San Antonio fue una oportunidad para aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, fortalecer competencias y aportar al producto final entregado a la empresa y a las autoridades ambientales.

Durante el proceso se apoyó directamente la elaboración del informe técnico INF_009_2024-A_VF, participando en la organización y análisis de los datos hidrogeoquímicos, la construcción de gráficas comparativas y la redacción de apartados que facilitaron la interpretación de los resultados. Este trabajo permitió integrar la información obtenida con los estándares técnicos de AHG Group Hidrogeólogos SAS y con la normativa ambiental vigente.

El procesamiento de los parámetros fisicoquímicos permitió comprender las variaciones en la calidad del agua en función de la actividad minera y de las condiciones climáticas locales. El análisis de los 40 puntos muestreados en la quinceava campaña hidrogeoquímica (abril de 2024) evidenció que la mayoría de las aguas se clasifican dentro de la facies bicarbonatada cálcica, típica de acuíferos en contacto con rocas carbonatadas. No obstante, se identificaron variaciones hacia facies sulfatadas y cloruradas en sectores específicos del sur y suroeste de la mina, donde las aguas presentaron mayor mineralización, posiblemente asociada a la influencia de la explotación minera.

Los parámetros que presentaron mayor fluctuación fueron el pH, el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), los cuales superaron los límites permisibles en algunos puntos, principalmente en captaciones cercanas a las zonas de extracción. Estos resultados sugieren una posible relación entre la actividad minera y el incremento de metales en el agua subterránea y superficial. Asimismo, las diferencias observadas en el río Chicamocha entre los puntos de monitoreo aguas arriba y aguas abajo reflejan una influencia antrópica, evidenciada en las variaciones del pH y en la presencia de sólidos y metales disueltos.

Como aporte adicional, se propuso y elaboró un capítulo sobre alternativas de tratamiento convencional del agua, el cual fue incorporado en el informe final. Este apartado representa un insumo importante tanto para la empresa como para las autoridades ambientales y la comunidad, al ofrecer opciones viables para mejorar la calidad del agua y mitigar los impactos detectados. Con ello, la pasantía no solo cumplió con sus objetivos, sino que amplió el alcance del informe, fortaleciendo su utilidad dentro de la gestión ambiental de la mina.

Finalmente, se recomienda mantener la continuidad del programa de monitoreo hidrogeoquímico como herramienta de prevención y seguimiento ambiental, complementándolo con el uso de herramientas estadísticas y de modelación hidrogeoquímica que permitan un análisis más profundo del comportamiento del acuífero. Igualmente, se sugiere socializar el capítulo de alternativas de tratamiento, de manera que sirva como base técnica para la toma de decisiones y como guía informativa para la comunidad local, promoviendo una gestión hídrica participativa y sostenible en el territorio.

6. ANEXOS

A continuación, se presenta el anexo del informe final y los anexos de este realizados y entregados por la empresa AHG Group Hidrogeólogos SAS.

ANEXOS: SAN ANTONIO

7. REFERENCIAS

Bunge, M. (1993), *La Investigación Científica*, Barcelona. Editorial Ariel.

Infante, C. (2010). Guía para la presentación de proyecto se investigación. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Méndez E., Vélez, R. (2009). *Metodología Diseño y desarrollo del Proceso de investigación*. Editorial McGraw-Hill.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.). CRC Press.

Álvarez, J. D. (2023). Informe de Pasantía Realizada en la Subdirección de Gestión Ambiental de la. Sahagún-Córdoba: Universidad Nacional Abierta y A Distancia -UNAD.

Castro Robles, Y. A. (2021). Participación en monitoreos, seguimientos y control ambiental sobre los componentes agua, aire y ruido en la empresa consultoría e ingeniería integral CONINTEGRAL S.A.S. Medallín: Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria.