

INCIDENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA DE TRANSMISIÓN  
SOBRE LA HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA VEREDA  
SANTA CECILIA, MUNICIPIO DE SANTA MARÍA (BOYACÁ)

CAMILO ANDRÉS PINEDA LÓPEZ

WILLIAM CAMILO SAENZ GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2025

INCIDENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA DE TRANSMISIÓN  
SOBRE LA HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA VEREDA  
SANTA CECILIA, MUNICIPIO DE SANTA MARÍA (BOYACÁ)

CAMILO ANDRÉS PINEDA LÓPEZ

WILLIAM CAMILO SAENZ GONZÁLEZ

Tesis de grado para obtener el título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en  
Hidroambiental

Director: Melquisedec Cortés Zambrano

Doctorado

Codirectora: Claudia Rocío Suarez Castillo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2025

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que apoyaron este proyecto de alcanzar un peldaño más en la vida académica y profesional; el gran apoyo de mi esposa Deisy y mis Hijas Ana María y María Camila, quienes me impulsaron a seguir en los momentos más duros de esta travesía académica, espero, posteriormente, poderles retribuir todo esto y, por supuesto, compartirles esta felicidad del logro alcanzado.

Un agradecimiento a mi esposa Juliana Sanchez, a mi hermana Tatiana Saenz, a mi madre Nidian González y a mi padre José Saenz, quienes han puesto su confianza en mí, me han enseñado la importancia de perseverar sin desfallecer. Hoy, al recorrer este trabajo de investigación, quiero recordarles que han sido motivo de admiración y fortaleza constante, inspiración diaria para superar dificultades, mantener la disciplina, creer en mis capacidades y avanzar con responsabilidad, compromiso y amor hacia cada meta propuesta.

De igual manera, expresamos mi sincero agradecimiento al director Melquisedec Cortés Zambrano y a la Codirectora Claudia Rocío Suárez Castillo, por su valiosa orientación académica, disposición permanente y acompañamiento riguroso durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones oportunas y compromiso profesional fueron fundamentales para fortalecer el enfoque, la calidad metodológica y la culminación exitosa de este trabajo.

Finalmente, expresamos un especial agradecimiento a la Empresa de Energía de Boyacá, dirigida por el ingeniero Roosevelt Mesa, así como a la Gerencia de Transmisión, liderada por el ingeniero Hugo Vega, y a la Dirección de Medio Ambiente, a cargo del doctor Hernán Contreras, quienes brindaron su valioso respaldo y facilitaron el acceso a la información requerida para el desarrollo de esta investigación académica. Su apoyo refleja la confianza en el crecimiento profesional y en la construcción de conocimiento para el departamento de Boyacá, desde una visión de desarrollo sostenible, con crecimiento energético y responsabilidad ambiental, promoviendo la innovación técnica, el fortalecimiento institucional y el compromiso con las futuras generaciones desde una perspectiva.



Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Tunja, día 16 del mes 12, 2025



## CONTENIDO

ABSTRACT.....	I
RESUMEN.....	II
INTRODUCCIÓN.....	III
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	7
3. ESTADO DEL ARTE.....	8
4. METODOLOGÍA.....	16
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	21
5.1 ALCANCE LONGITUDINAL VERTICAL DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE LA SERVIDUMBRE.....	21
5.2 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	28
5.3 EVALUACIÓN DE LA QUÍMICA DEL AGUA.....	32
5.4 SUELOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	35
5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	37
5.6 CORRELACIÓN ENTRE EL PERFIL DE SUELO Y LA DISPERSIÓN VERTICAL DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA SERVIDUMBRE	43
6. CONCLUSIONES.....	50
7. RECOMENDACIONES.....	53
8. GLOSARIO.....	56
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
10. APÉNDICES Y ANEXOS.....	63

10.1 ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ESTUDIO .....	63
--	----

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas de torres de transmisión T44-T46.....	3
Tabla 2. Resultados de medición y cumplimiento de límites de exposición a CEM. .....	25
Tabla 3. Resumen de ensayos sobre el agua subterránea en la zona de estudio.	31
Tabla 4. Valores de campo eléctrico y magnético en diferentes puntos de medición dentro y fuera de la servidumbre. ....	47

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Figura 1. Ubicación de torres de transmisión T44-T46. ....	3
Figura 2. Medición de campo electromagnético T44. ....	22
Figura 3. Medición de campo electromagnético T45. ....	23
Figura 4. Medición de campo electromagnético T46. ....	24
Figura 5. Ensayos sobre el agua subterránea en la zona de estudio. ....	28
Figura 6. Diagrama ternario generado (diagrama de piper). ....	33
Figura 7. Diagrama de Stiff. ....	34
Figura 8. Suelos DRMI Torres T44 y T46. ....	35
Figura 9. Corte Sistema Acuífero de Tunja ....	40
Figura 10. Hidrogeología DRMI ....	41
Figura 11. Hidrogeología DRMI Torres T44 y T46 ....	42

## ABSTRACT

The purpose of this study is to determine whether the electromagnetic fields generated by the circuits, equipment and structures of the Regional Transmission System (115 kV)—understood as the combination of electric and magnetic fields produced naturally during operation by electric current and voltage—affect the hydrogeochemistry of groundwater within the area of influence and easement, delimited between structures T44 and T46, in accordance with the provisions of the RETIE (Technical Regulations for Electrical Installations in Colombia, which establishes the technical and safety requirements applicable to the design, construction, operation and maintenance of electrical installations). The research includes fieldwork and cartographic analysis of the regional aquifer, with a comparative approach between hydrogeological points located outside the reach of electromagnetic fields and those located within the easement zone of the aforementioned structures, once the regional interconnection network has been put into operation and declared commercial. Finally, the aim is to establish the relationship between the presence of electromagnetic waves and the hydrogeochemistry of the identified aquifers, determining whether or not there is a significant impact.

*Keywords:* Electromagnetic fields Environmental impact., Groundwater, Hydrogeochemistry, Power transmission.

## RESUMEN

Con el desarrollo del presente estudio se busca determinar si los campos electromagnéticos generados por los circuitos, equipos y estructuras del Sistema de Transmisión Regional (115 kilovoltios (KV))—entendidos como la combinación de campos eléctricos y magnéticos producidos de manera natural durante la operación por la corriente eléctrica y el voltaje—inciden en la hidrogeoquímica del agua subterránea dentro del área de influencia y servidumbre, delimitada entre las Torres (T) codificadas como T44 y T46, conforme a lo establecido en el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas en Colombia), que establece los requisitos técnicos y de seguridad aplicables al diseño, construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas). La investigación contempla la realización de trabajo de campo y análisis cartográfico orientado al acuífero regional, con un enfoque comparativo entre puntos hidrogeológicos ubicados fuera del alcance de los campos electromagnéticos y aquellos localizados dentro de la franja de servidumbre de las estructuras mencionadas, una vez puesta en operación y declarada comercial la red de interconexión regional. Finalmente, se pretende establecer la relación existente entre la presencia de ondas electromagnéticas y la hidrogeoquímica de los acuíferos identificados, determinando si existe o no una incidencia significativa.

*Palabras clave:* Agua subterránea, Campos electromagnéticos, Hidrogeoquímica, Impacto ambiental, Transmisión eléctrica.

## INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es esencial para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas. En Colombia, las aguas subterráneas constituyen una reserva estratégica para el abastecimiento doméstico, agrícola e industrial, especialmente donde las fuentes superficiales son escasas o intermitentes. En este contexto, la hidrogeoquímica permite caracterizar la composición y los procesos que gobiernan el agua subterránea, así como detectar posibles alteraciones de origen natural o antrópico.

El crecimiento de la demanda energética ha impulsado la expansión de la infraestructura de transmisión en el país. Si bien estas obras son críticas para la confiabilidad del sistema, su interacción con el medio ambiente ha suscitado inquietudes, en particular por los campos eléctricos y magnéticos (CEM) asociados a la operación de líneas de alta tensión. Aunque la literatura se ha enfocado principalmente en efectos sobre la salud humana y la exposición ocupacional, existen menos estudios que aborden posibles relaciones entre CEM de frecuencia industrial (50/60 Hz) y la hidrogeoquímica de aguas subterráneas.

En el municipio de Santa María (Boyacá), habitantes de la vereda Santa Cecilia han señalado presuntos cambios en la cantidad y calidad del agua subterránea en sectores próximos a la servidumbre de la línea de 115 kV. Estas percepciones, expresadas en espacios de participación comunitaria, justifican la realización de un análisis técnico que evalúe, con mediciones y comparación contra puntos de control, si existe una relación verificable entre la operación de la infraestructura eléctrica y la composición del recurso subterráneo.

### *Hipótesis de trabajo:*

Hipótesis nula ( $H_0$ ): la proximidad y la intensidad de CEM de la línea de 115 kV no se asocian con diferencias estadísticamente significativas en los parámetros hidrogeoquímicos tales como alcalinidad, calcio (Ca), cloruros ( $Cl^-$ ), magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad, pH, potasio (K) y sodio (Na), respecto a puntos de control fuera de la servidumbre.

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): la proximidad y/o la intensidad de CEM sí se asocian con diferencias detectables en al menos uno de los parámetros hidrogeoquímicos evaluados.

Metodológicamente, el estudio integra: (i) mediciones de CEM en perfiles dentro y fuera de la servidumbre; (ii) muestreo y análisis hidrogeoquímico (parámetros físicos, químicos e isotópicos cuando aplique); y (iii) herramientas cartográficas y de análisis espacial para representar patrones e interpretar resultados comparativos.

La investigación se circunscribe al tramo entre las torres de distribución T44–T46 de la línea de transmisión Tunjita–Chivor (115 kV) en la vereda Santa Cecilia, municipio de Santa María (Boyacá), considerando puntos dentro de la servidumbre y puntos de control externos. A continuación, se presentan los objetivos del estudio y la delimitación detallada de alcance espacial y temporal que guiarán el diseño de muestreo y el análisis estadístico.

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El problema central de esta investigación radica en determinar si los campos electromagnéticos generados por la operación de la infraestructura eléctrica de transmisión a 115 kV inciden en la hidrogeoquímica del agua subterránea localizada en la servidumbre comprendida entre las torres T44 y T46 del circuito Tunjita–Chivor, en Santa María, Boyacá, considerando que, aunque las comunidades perciben cambios en la calidad y cantidad del recurso, no existen estudios científicos concluyentes que confirmen o descarten esta posible relación.

### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La energía eléctrica constituye uno de los principales motores para el desarrollo económico y social de Colombia, al atender tanto la demanda industrial y comercial como el consumo residencial. Su aporte es esencial no solo para el crecimiento de la economía nacional, sino también para el mejoramiento de la calidad de vida de la población. En este marco, el país ha adoptado los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dentro de los cuales se destaca el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, que busca garantizar el acceso universal a servicios energéticos modernos, fiables y sostenibles al año 2030. Alcanzar esta meta implica la transición hacia fuentes limpias de generación y, de manera complementaria, la expansión y repotenciación de las redes de transmisión que permitan interconectar territorios y asegurar cobertura energética en todos los rincones del país.

En el departamento de Boyacá, esta labor es liderada por la Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P. (EBSA), que proyecta el crecimiento de la infraestructura eléctrica a partir de las demandas actuales y futuras de los usuarios, tanto domiciliarios como industriales. La construcción de nuevas líneas de transmisión y subestaciones, o la modernización de las ya existentes, se convierte así en una necesidad técnica y estratégica para garantizar la confiabilidad del Sistema de Transmisión Regional y del Sistema de Transmisión Nacional. Sin embargo, la inserción de estas estructuras en el territorio genera, a su vez, nuevas interacciones con el medio ambiente y con las comunidades que lo habitan. Entre las preocupaciones manifestadas por las poblaciones locales se encuentran las presuntas incidencias de la infraestructura eléctrica sobre los recursos hídricos subterráneos, especialmente en lo relacionado con cambios en su calidad y cantidad.

En este contexto, las comunidades han señalado que los campos electromagnéticos generados por la operación de las redes de transmisión podrían estar asociados a transformaciones en el recurso hídrico subterráneo. Dichos campos se expresan en dos componentes: el campo eléctrico, medido en voltios por metro (V/m) o kilovoltios por metro (kV/m), que representa el efecto eléctrico sobre una carga en un punto del espacio; y el campo magnético, originado por la circulación de corriente eléctrica, medido en microtesla ( $\mu\text{T}$ ). Aunque hasta el momento no existe evidencia científica concluyente que respalde esta percepción, las reiteradas quejas sociales, los debates en audiencias públicas y las consultas ante autoridades ambientales han puesto en evidencia la necesidad de estudiar rigurosamente esta problemática, con el fin de dar respuesta técnica y objetiva.

Dentro del presente proyecto se investigó documentalmente y se recogió evidencia contundente de participación ciudadana (actas de audiencias públicas, quejas ante LA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA), donde comunidades atribuyen cambios en nacederos y pozos a la operación de líneas de transmisión (casos del proyecto UPME-07-2016 y acciones populares en Quindío). Estos antecedentes indican una componente social imprescindible: la investigación no sólo debe ser técnica, sino que debe generar insumos para reducir incertidumbre social y mejorar procesos de licenciamiento.

Así, el problema central que motiva esta investigación es determinar si los campos electromagnéticos generados por la operación normal de un sistema de transmisión a 115 kV tienen incidencia sobre la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas presentes en su área de influencia, para lo cual se analizan parámetros fisicoquímicos tales alcalinidad, calcio (Ca), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), magnesio (Mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad, pH, potasio (K) y sodio (Na), los cuales son iones típicos de las aguas subterráneas. La incertidumbre sobre esta posible interacción, unida a la ausencia de estudios específicos en Colombia, refuerza la pertinencia de adelantar un análisis que permita esclarecer los efectos reales —o descartar la existencia de ellos—, de manera que se fortalezcan los procesos de planificación, diseño y licenciamiento ambiental de este tipo de proyectos.

El área de estudio seleccionada corresponde a la servidumbre del circuito 115 kV Tunjita–Chivor, específicamente entre las torres de distribución T44 y T46 (ver ubicación en la tabla 1 y figura 1), ya energizadas. Esta condición ofrece una oportunidad metodológica importante: comparar la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en puntos dentro de la franja de servidumbre con otros ubicados fuera de su influencia directa. De este modo, se podrán evaluar posibles variaciones en parámetros físicos, químicos y establecer si existe una relación significativa con los campos electromagnéticos generados por la infraestructura.

Tabla 1. Coordenadas de torres de transmisión T44-T46.

Torre de transmisión	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
T44	4.933080	-73.223285
T45	4.927261	-73.225295
T46	4.921709	-73.227377

Fuente: Elaboración Propia

El desarrollo de este proyecto aportará conocimiento inédito al país, al analizar una problemática en la que confluyen el componente ambiental y la expansión energética. Por un lado, los resultados podrán servir como insumo para que las comunidades comprendan, con base en evidencia técnica, los posibles impactos de la infraestructura eléctrica sobre los recursos hídricos. Por otro lado, constituirán una herramienta para que las empresas del sector y las autoridades ambientales refuercen la gestión preventiva, ajusten medidas de mitigación y, de ser necesario, incorporen nuevas directrices en los procesos de licenciamiento y diseño de redes de transmisión. En términos de competitividad, este conocimiento permitirá al país anticipar y gestionar conflictos socioambientales asociados a la expansión energética, contribuyendo a un desarrollo sostenible que armonice las necesidades de infraestructura con la protección de los recursos naturales estratégicos.

Figura 1. Ubicación de torres de transmisión T44-T46.



Fuente: Google Earth (2025).

## 1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿En qué medida los campos electromagnéticos generados por la operación normal de la infraestructura eléctrica de transmisión a 115 kV inciden en las características hidrogeoquímicas del agua subterránea localizada en el área de servidumbre comprendida entre las torres T44 y T46 del circuito Tunjita–Chivor, en el municipio de Santa María, Boyacá?

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

El recurso hídrico, en particular de aguas subterráneas, constituye un elemento estratégico para el sostenimiento de la vida y la conservación de los ecosistemas, además de ser un factor determinante para el desarrollo socioeconómico de las comunidades. En Colombia, las aguas subterráneas han adquirido creciente relevancia como fuente principal, complementaria o alterna de abastecimiento, especialmente en regiones donde el acceso a aguas superficiales es limitado o insuficiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2010, 2022). No obstante, sobre este recurso persisten percepciones y mitos asociados a la incidencia de proyectos de infraestructura energética, tales como la presunta “desaparición” del agua o cambios en sus características hidrogeoquímicas, especialmente, en parámetros tales como alcalinidad, calcio (Ca), cloruros (Cl<sup>-</sup>),

magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad , pH, potasio (K) y sodio (Na). Estas inquietudes, planteadas recurrentemente por comunidades en escenarios de participación ciudadana, ponen en evidencia la necesidad de contar con investigaciones científicas que clarifiquen el alcance de dichos fenómenos.

Al mismo tiempo, la demanda de energía eléctrica en Colombia presenta un crecimiento sostenido. En 2020 se registró un consumo de 70.422 GWh, que ascendió a 74.117 GWh en 2021 (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2022), con una proyección que alcanza los 121.648 GWh en 2037 para el escenario medio (UPME, 2023). Este crecimiento exige la expansión y modernización del Sistema de Transmisión Regional (STR) y del Sistema de Transmisión Nacional (STN), de modo que se garantice el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7: Energía asequible y no contaminante (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2015). Sin embargo, este proceso de expansión debe realizarse con criterios de sostenibilidad, evaluando de manera rigurosa las posibles incidencias sobre los ecosistemas y los recursos naturales estratégicos.

La presente investigación pretende abordar la problemática de las presuntas incidencias de los campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión de 115 kV sobre las aguas subterráneas en la vereda Santa Cecilia, municipio de Santa María (Boyacá). Para ello, se integrará la medición de campos eléctricos y magnéticos con el análisis hidrogeoquímico de las aguas subterráneas, incluyendo parámetros fisicoquímicos tales como alcalinidad, calcio (Ca), cloruros (Cl<sup>-</sup>), magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad , pH, potasio (K) y sodio (Na). Este enfoque permitirá contrastar los resultados obtenidos dentro de la servidumbre de las torres de transmisión con aquellos de puntos externos, generando así un análisis comparativo que aporte claridad científica frente a las percepciones comunitarias.

La justificación de esta propuesta se fundamenta en tres ejes principales. En primer lugar, la dimensión social, dado que los resultados permitirán dar respuesta a las inquietudes de las comunidades, fortaleciendo la confianza en los procesos de planificación y licenciamiento ambiental. En segundo lugar, la dimensión ambiental, ya que se aportará conocimiento técnico para determinar si la infraestructura de transmisión genera alteraciones en la calidad o disponibilidad de un recurso estratégico y no renovable. En tercer lugar, la dimensión técnica y académica, puesto que la investigación generará un referente metodológico para evaluar la interacción agua subterránea–infraestructura eléctrica, que podrá replicarse en otros territorios y proyectos de transmisión a diferentes niveles de tensión.

De este modo, la investigación contribuirá a la formulación de medidas de prevención y mitigación de impactos, a la preservación de los recursos hídricos y a la consolidación de un marco de sostenibilidad para la expansión del sistema energético nacional. Asimismo, los resultados se constituirán en una fuente de información para la academia, las autoridades ambientales y las empresas del sector, facilitando la toma de decisiones y fortaleciendo la gestión integral del agua subterránea en contextos de desarrollo energético.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la incidencia de los campos electromagnéticos generados por la conexión y operación normal del Sistema de Transmisión de Energía – STR a 115 Kv sobre las características hidrogeoquímicas en términos del análisis de flujo, análisis de aniones y cationes de las aguas subterráneas medidos en términos de alcalinidad, calcio (Ca), cloruros (Cl<sup>-</sup>), magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad, pH, potasio (K) y sodio (Na), ubicados en la servidumbre entre las torres T44 a T46 del “Circuito 115Kv Tunjita – Chivor”.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el alcance longitudinal vertical de los campos electromagnéticos sobre la servidumbre mediante mediciones de densidad de flujo magnético e intensidad de campo eléctrico en redes eléctricas de transmisión y su respectiva servidumbre con el fin de establecer los límites y variantes espaciales de dispersión.
- Analizar las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas, dirección de flujo, características físicas y químicas como cationes (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>), aniones (cloruro, sulfato y alcalinidad) así como el pH y conductividad, dentro y fuera de la servidumbre para establecer si hay cambios o no en sus características.
- Realizar la correlación que existe en el perfil de suelo identificado en la servidumbre y la dispersión vertical de los campos electromagnéticos con el fin de identificar capacidad de dispersión en este medio y si permite la incidencia de los campos sobre la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Las aguas subterráneas constituyen un recurso estratégico, no renovable en la escala humana y fundamental para el abastecimiento doméstico, agrícola e industrial en múltiples regiones (MADS, 2010; MADS, 2022). Esta condición las hace especialmente sensibles ante procesos de expansión de infraestructura — entre ellos las redes de transmisión eléctrica— que, aun cuando son esenciales para el cumplimiento del ODS 7 (energía asequible y no contaminante), pueden generar preocupaciones sociales y posibles impactos ambientales indirectos en componentes bióticos y abióticos (UPME, 2022; UPME, 2023).

El agua, constituye además un elemento esencial para la existencia de la vida y forma parte fundamental de todos los organismos vivos, además de ser un nutriente indispensable para el equilibrio y desarrollo de los ecosistemas. Su gestión adecuada también cumple un rol decisivo en el desarrollo sostenible, pues influye en la reducción de la pobreza, impulsa el crecimiento económico y promueve la sostenibilidad ambiental, contribuyendo así al bienestar social y al progreso inclusivo de las comunidades.

Una vez identificada la relación entre las variaciones hidrogeológicas de los puntos de estudio y la operación de la infraestructura eléctrica, será posible plantear medidas de prevención y mitigación de impactos, orientadas a la conservación y preservación de los ecosistemas. Dichas medidas se enmarcarán en criterios de diseño de ingeniería y en el replanteamiento de redes respecto a servidumbres y distancias de seguridad, lo que permitirá asegurar la protección de los sistemas naturales sin frenar el desarrollo de los proyectos de expansión del Sistema de Transmisión Regional, infraestructura indispensable para el fortalecimiento económico y energético tanto de la región como del país.

En esta línea, se plantea analizar los posibles impactos que los campos electromagnéticos puedan ejercer sobre la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas localizadas en el área de influencia y servidumbre entre las estructuras T44 y T46, así como las eventuales modificaciones en sus características químicas y físicas. Todo esto teniendo en cuenta los antecedentes de investigaciones sobre campos electromagnéticos y su dispersión en el medio, diferenciando las longitudes de onda y las distancias de seguridad establecidas por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

La mayor parte de la literatura clásica revisada se ha centrado en dos grandes líneas: (i) impactos de campos electromagnéticos (CEM) sobre la salud humana y (ii) descripción y cartografía de la dispersión espacial de CEM en entornos urbanos y periurbanos.

- **Revisión sobre riesgos y metodología:** Heredia-Rojas et al. (2003) plantean el marco conceptual sobre CEM y salud pública, aportando criterios metodológicos que son útiles para caracterizar exposiciones y diseñar mediciones en campo; aunque su foco es la salud, su discusión metodológica (frecuencia, intensidad, clasificación ionizante/no ionizante) es referente para mediciones ambientales.
- **Estudios de campo en Colombia:** Aponte et al. (2009) —y la referencia local (Guillermo, 2007)— presentan metodologías prácticas de muestreo y perfiles radiales en sectores con estaciones emisoras (telefonía). Estos trabajos muestran cómo construir perfiles horizontales y verticales de emisión/inmisión, comparar valores con límites normativos y proponer medidas de mitigación en puntos puntuales donde la norma no se cumple. De ahí adquiere relevancia la idea de medidas sistemáticas en perfiles radiales y la de comparar con umbrales normativos. En relación con los impactos que pueden producir las ondas según su frecuencia, es importante señalar que las ondas no ionizantes (con frecuencias menores a  $10^{15}$  Hz) no poseen la energía suficiente para romper los enlaces que mantienen unidas las moléculas de las células. En contraste, las ondas ionizantes (con frecuencias superiores a  $10^{15}$  Hz) sí tienen la capacidad de provocar el fenómeno conocido como ionización de la materia, es decir, la ruptura de los enlaces moleculares.
- **Diferenciación entre campos eléctricos y magnéticos:** Laborí (2003) enfatiza la necesidad de separar ambos componentes (campos eléctricos vs. campos magnéticos) en la propuesta metodológica, porque su comportamiento en el ambiente y su interacción con estructuras y medios (barreras físicas, suelos, conductores) difiere significativamente.
- **Estudios recientes de cartografía y series temporales:** trabajos como el de Soto (2020) en Neuquén (análisis comparativo 2006–2017) y análisis regionales (Gallipoliti, 2015) demuestran que es factible producir cartografía de dispersión espacial de CEM para líneas de media/alta tensión y evaluar evolución temporal; sin embargo, esos autores también señalan limitaciones por la disponibilidad de datos previos y la necesidad de incorporar variables

locales (corrientes máximas, tensiones, configuración de doble circuito). En el caso particular de las presuntas incidencias de las redes de transmisión eléctrica sobre los acuíferos, persiste en las comunidades la percepción de que el electromagnetismo generado por estas infraestructuras, como ocurre con las líneas de 115 kV, podría ocasionar desvíos del agua subterránea e incluso alteraciones en sus características físico-químicas. Estas preocupaciones se han manifestado de manera recurrente a través de quejas y solicitudes elevadas ante las autoridades ambientales, en las que las comunidades expresan su inconformidad y oposición al desarrollo de proyectos de transmisión. Como resultado, la temática ha sido llevada a escenarios de participación ciudadana y audiencias públicas ambientales, donde se busca claridad frente a los posibles impactos de este tipo de obras sobre el recurso hídrico. Los mencionados proyectos de transmisión a nivel nacional han enfrentado cuestionamientos similares, relacionados con la posible afectación de nacederos, fuentes subterráneas y cultivos asociados a las áreas de influencia. En algunos casos, estos debates han llegado incluso a instancias judiciales, donde se ha solicitado evaluar la relación entre la construcción de líneas y subestaciones eléctricas y la existencia o alteración de acuíferos en los territorios. Aunque no siempre se ha contado con estudios técnicos concluyentes, estas situaciones reflejan la necesidad de generar conocimiento científico que aporte elementos de juicio claros frente a las presuntas incidencias de la infraestructura eléctrica sobre las aguas subterráneas.

De la revisión se desprende que las metodologías robustas para CEM combinan: mediciones en terreno (instrumentos calibrados), perfiles horizontales/verticales, modelación (p. ej. CMAGNET en estudios de redes) y comparación con marcos normativos (p. ej. RETIE). En ese orden de ideas el proceso a seguir se puede estructurar en medir densidad de flujo magnético e intensidad de campo eléctrico en puntos definidos (centro de franja, extremos y punto blanco fuera de servidumbre), y documentar altura/posición relativa al conductor neutro, lo cual está alineado con la práctica internacional citada.

La literatura hidrogeológica y la guía metodológica (Foster et al., 2002–2005) establecen que la caracterización hidrogeoquímica se debe basar en un conjunto de constituyentes principales (Si, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>; aniones: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, alcalinidad) junto con parámetros físico-químicos (pH, conductividad). El uso de diagramas Piper y Stiff permite identificar facies hidroquímicas, procesos de evolución y relaciones de mezcla o contaminación; lo anterior para detectar cambios en la química del agua entre puntos dentro y fuera de la servidumbre. Los estudios hidrogeoquímicos antes citados muestran que la litología, la recarga y actividades

antrópicas son las fuentes dominantes de variabilidad; por eso cualquier tentativa de asociar variación química a CEM debe controlar explícitamente estas variables (línea base previa, puntos blancos, análisis isotópico para rastrear orígenes).

En términos de normativa, se toma como referente al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2013) y regula la construcción de servidumbres, distancias de seguridad y criterios de medición. Además, menciona límites y guías de evaluación (comisión para la protección contra radiaciones no ionizantes) que se usan en estudios comparados (Aponte; estudios de telecomunicaciones). Incluir RETIE en la definición del área de influencia y en la comparación de mediciones es congruente con el estado del arte y fortalece la validez técnica del estudio. En consecuencia con las investigaciones revisadas, se identifican brechas claras y justificadas:

- **Poca evidencia de campo** que integre mediciones directas de CEM con análisis hidrogeoquímicos en servidumbres de líneas de transmisión (la mayor parte de estudios combinan CEM con salud o cartografía, o hidrogeoquímica con otras fuentes de contaminación).
- **Ausencia de series basales** en muchos procesos de expansión —faltan datos previos a la energización que permitan comparar condiciones “antes/después”.
- **Variabilidad local insuficientemente controlada:** distinciones litológicas, profundidad del acuífero y actividades antropogénicas locales no siempre están ajustadas en estudios previos, lo que dificulta atribuciones causales.
- **Necesidad metodológica:** los trabajos revisados recomiendan protocolos replicables (perfiles radiales, alturas, instrumentos calibrados, diagramas Piper/Stiff, trazadores isotópicos) que todavía no se han aplicado de forma integrada para líneas de 115 kV en el contexto colombiano.

La literatura también reconoce mecanismos físicos y electroquímicos como la electroosmosis y la electromigración, por los cuales un campo eléctrico puede inducir movimiento de agua y transporte iónico en medios porosos. Estos fenómenos se han aplicado con éxito en procesos de remediación electrocinética de suelos y aguas contaminadas (Probstein & Hicks, 1993). Sin embargo, dichos mecanismos requieren campos eléctricos sostenidos de corriente continua,

condiciones muy distintas a los campos alternos de baja frecuencia (50/60 Hz) que generan las líneas de transmisión, lo que limita su extrapolación directa a los acuíferos naturales (Abou-Shady, Zeinelabedine, & El-Sayed, 2023).

Por otro lado, estudios experimentales recientes han evaluado la aplicación de campos electromagnéticos en el tratamiento de aguas, por ejemplo, en procesos de desalinización y control de incrustaciones. Se han observado cambios en la turbidez y en el comportamiento de los sólidos suspendidos, aunque no siempre en la composición química elemental (Jiang, Waite, & Lienhard, 2019). Estos resultados sugieren que, si bien los CEM pueden modificar procesos físicos, la evidencia de cambios persistentes en la química del agua es limitada, y menos aún en condiciones naturales de acuífero.

Otros estudios realizados de manera experimental, han evaluado el uso del electromagnetismo como una forma de desinfección del agua, ya que los campos magnéticos pueden alterar el crecimiento microbiano (Shiva, Fatemeh, & Maziar, 2025), promoviéndolo o inhibiéndolo; los mencionados autores, recopilan diversos estudios asociados con el uso de campos electromagnéticos estáticos moderados de corriente alterna (entre 10 y 65  $\mu\text{T}$ ), podrían reducir concentraciones bacterianas del agua, siendo mayor cuando la dirección de flujo es paralela a los campos magnéticos (Zhian, Xuetong, Judong, Yajun, 2017); en este caso, los CEM podrían resultar como una solución sostenible para el tratamiento del agua como una operación unitaria de desinfección, frente a las técnicas convencionales que se usa para este mismo fin; lo anterior, es un comportamiento que podría analizarse en condiciones naturales del agua superficial o subterránea y con redes de interconexión eléctrica como influencia sobre las mismas (115, 230 y 500 kv).

En el medio académico, se han realizado diversos estudios asociados a los campos electromagnéticos, su incidencia en el agua y en función del tipo de suelos, no obstante, son asociados con radiofrecuencias (medidas en términos de megahertz – MHz); estos estudios, se desarrollaron sobre la conductividad hidráulica de suelos especialmente arenosos (asociados a procesos de licuefacción), Farid, Gunderson, Acharya, Browning, (2023), con estimulación por diferentes radiofrecuencias y poder así determinar el impacto de las ondas electromagnéticas en la conductividad hidráulica. El estudio se desarrolló sobre arenas natural de grano grueso (Clasificación SW en la lista del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS)) y perlas de vidrio; conclusión del proceso estudiado, se evidenciaron cambios en la conductividad hidráulica y el caudal por la estimulación con radiofrecuencias, tanto en las arenas, como en las perlas de vidrio, siendo mayor en la arena natural. Lo anterior, abre un puerta para el estudio profundo de la incidencia de los campos electromagnéticos sobre los

diferentes tipos de suelos sobre los cuales se construyen las redes de interconexión de energía eléctrica a diferentes tensiones (kv).

Las investigaciones realizadas por la incidencia de los campos electromagnéticos, se pueden extender a otros componentes ambientales diferentes al agua, como a los bióticos, tal como las realizadas por Levitt, B. B., Lai, H. y Manville, A. M. (2021), quienes realizan una revisión exhaustiva sobre los efectos de los campos electromagnéticos no ionizantes (CEM) en la biota, documentando un incremento sostenido de la carga ambiental de CEM durante las últimas ocho décadas y señalando que múltiples taxones presentan sensibilidades fisiológicas específicas que pueden superar la respuesta humana ante exposiciones exógenas. Los autores sintetizan evidencias experimentales y de campo que muestran respuestas biológicas a niveles de exposición ambiental actuales y a frecuencias diversas, incluyendo alteraciones en mecanismos de orientación y migración, comportamiento alimentario, sucesos reproductivos, construcción y uso de refugios, defensa territorial, así como en parámetros demográficos clave como supervivencia y longevidad; asimismo se reportan indicios de efectos citotóxicos y genotóxicos. La revisión integra discusiones sobre los campos electromagnéticos naturales versus antropogénicos, los posibles mecanismos de magnetorrecepción y la validez de los estándares regulatorios vigentes, y concluye proponiendo que los CEM ambientales sean conceptualizados como un contaminante más, recomendando el desarrollo de criterios de exposición crónica de baja intensidad específicos para la fauna y la incorporación de estos criterios en marcos legales y de gestión ambiental.

Adicionalmente, la evidencia reciente sobre los efectos de los campos electromagnéticos (CEM) en sistemas biológicos, ha sido sintetizada en la revisión sistemática de Systematic Review of the Impact of Electromagnetic Waves on Living Beings (2025), la cual analiza estudios experimentales publicados entre 2017 y 2024 bajo lineamientos PRISMA. Los resultados indican que la exposición a CEM puede inducir alteraciones significativas en organismos humanos, animales y vegetales, incluyendo estrés oxidativo, respuestas inflamatorias, genotoxicidad y cambios en funciones fisiológicas como la actividad neuronal, parámetros cardiovasculares y procesos reproductivos. Asimismo, se evidencian efectos en plantas, particularmente en la fotosíntesis, lo que sugiere implicaciones a nivel ecosistémico y posibles alteraciones en procesos biofísicos asociados.

No obstante, la revisión también señala limitaciones importantes relacionadas con el riesgo de sesgo moderado a alto en los estudios analizados, lo que reduce la certeza de la evidencia disponible. A pesar de ello, se identifica una tendencia consistente hacia efectos adversos dependientes de la frecuencia e intensidad de los CEM, así como vacíos significativos en el entendimiento de sus efectos a largo

plazo. Estos hallazgos resultan relevantes para la hidrología, dado que las alteraciones en organismos y procesos bioquímicos pueden influir indirectamente en dinámicas hidrológicas como la evapotranspiración, la interacción suelo-agua y los ciclos biogeoquímicos.

El estudio del electromagnetismo, no se ha centrado solo en los temas ambientales y sanitarios, si no que ha saltado a los campos industriales, por ejemplo, en los yacimientos de hidrocarburos en los cuales se usa el método de fracturamiento hidráulico para la extracción del fluido; A.P. Khmelinin, A.I. Konurin, & E.V. Denisova. (2023), realizaron estudios asociados a la aplicación de métodos electromagnéticos para mapear las fracturas creadas a partir del uso de agentes de sustentación (apuntaladores) de mayor conductividad, lo cual ayuda a reducir el uso de métodos nucleares para el mismo fin (lo que evita o minimiza los impactos ambientales por materiales radiactivos).

En cuanto a la regulación, la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, 2010) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2007) han establecido límites de exposición a CEM de frecuencia extremadamente baja, orientados principalmente a la protección de la salud humana. Sin embargo, estas guías reconocen vacíos en el conocimiento sobre efectos ambientales indirectos, especialmente en componentes ecológicos como el agua subterránea. Esto refuerza la necesidad de estudios integrales que combinen medición de campos eléctricos y magnéticos con análisis hidrogeoquímico, adaptados a contextos locales.

Metodológicamente, la literatura sugiere que la evaluación de posibles incidencias de CEM sobre acuíferos requiere un enfoque integrado que combine: (i) mediciones en campo de intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético en transectos y a distintas alturas; (ii) caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas, incluyendo iones principales, pH, conductividad, sólidos disueltos e, idealmente, trazadores isotópicos para distinguir orígenes de variación; y (iii) modelación electromagnética mediante elementos finitos para estimar la dispersión espacial del campo en el subsuelo y su solapamiento con unidades hidrogeológicas (Khan, Ahmed, & Mohiuddin, 2005).

En síntesis, los antecedentes evaluados muestran que existe un vacío significativo de conocimiento respecto a la relación entre infraestructura eléctrica de transmisión y aguas subterráneas. Los mecanismos físico-químicos identificados en laboratorio no se han comprobado en condiciones de campo bajo frecuencias propias de líneas de transmisión. A nivel nacional y local no existen estudios que integren de manera

sistemática mediciones de CEM con análisis hidrogeoquímico en franjas de servidumbre, lo que resalta la pertinencia de esta investigación. Su desarrollo permitirá no solo llenar una brecha científica, sino también responder a las inquietudes de las comunidades, generar herramientas para la planificación energética y contribuir a la protección de un recurso vital como el agua subterránea.

#### 4. METODOLOGÍA.

En esta investigación se aporta la experiencia y el análisis desde dos frentes fundamentales: por un lado, desde la óptica de la empresa privada, como responsable de los procesos de licenciamiento y ejecución del proyecto; y, por otro, desde la perspectiva estatal, a partir de la experiencia de las entidades ambientales nacionales, encargadas de evaluar, y en algunos casos otorgar, el licenciamiento ambiental de los proyectos, garantizando que estos prevengan, mitiguen y controlen los impactos que puedan generar. A ello se suma la responsabilidad de escuchar a las comunidades y atender sus preocupaciones en relación con el recurso hídrico subterráneo.

Con el aporte de ambos tesisistas se espera obtener un producto de investigación robusto, que permita a la empresa privada, según los resultados, replantear el proyecto de transmisión de energía desde su planeación hasta su puesta en marcha; y, en el caso de las entidades ambientales estatales, ajustar los procesos de licenciamiento ambiental para exigir, cuando corresponda, medidas de manejo orientadas a la protección del recurso hídrico.

En cuanto al cumplimiento específico de los objetivos, se contemplan varias actividades centrales. La primera corresponde a la medición de densidad de flujo magnético e intensidad de campo eléctrico en torres de transmisión. Para ello se realizará una visita de campo en la que se medirán y analizarán estas variables en cuatro puntos: dos torres seleccionadas, un punto intermedio y otro ubicado fuera del área de influencia de la línea. Los datos obtenidos se correlacionarán con lo establecido en el artículo 14 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. En cada punto se harán tres mediciones: una en el centro de la red y las dos restantes en los extremos, correspondientes a la servidumbre.

Para estas actividades se contará con equipos especializados como el medidor de densidad de flujo magnético marca Erasmus, referencia EMF-200, con ancho de banda de baja frecuencia de 30 Hz a 2000 Hz, resolución de 0.01/0.1/1 mG o 0.001/0.01/0.1  $\mu$ T, exactitud de 20 mG/2  $\mu$ T y certificado de calibración vigente; así como el medidor de intensidad de campo eléctrico y magnético marca Aaronia Spectran NF 5030, con frecuencia de muestreo de 1 Hz a 30 MHz, capacidad de medición de campo eléctrico hasta 20 kV/m y de campo magnético hasta 2 mT. Además, se dispondrá de una cámara fotográfica para los registros correspondientes. Como resultado de esta actividad se obtendrá un registro fotográfico completo, junto con el análisis y procesamiento de la información

compilada, además de un informe diagnóstico final con recomendaciones y la elaboración de un mapeo de contorno de las variables medidas.

La segunda actividad corresponde al análisis de dirección de flujo y calidad de las aguas subterráneas. Para ello se llevará a cabo una evaluación geofísica del área de influencia y de la servidumbre entre las torres T44 y T46 del circuito 115 kV Tunjita–Chivor, se realizará la evaluación hidrogeoquímica del agua subterránea a través del análisis de iones principales y de parámetros físicos como alcalinidad, pH y conductividad. Los constituyentes químicos a analizar incluirán  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  cuya proporción permitirá reflejar la trayectoria de flujo del agua subterránea y su evolución hidrogeoquímica. Los resultados obtenidos se interpretarán mediante diagramas Piper y Stiff, con el fin de establecer si el agua subterránea podría estar siendo afectada por la operación de la línea entre las torres T44 y T46 del circuito mencionado. La toma de muestras fue realizada directamente por los presentes tesisistas.

Para efectos de veracidad de los resultados, para la evaluación hidrogeoquímica, la toma de muestras y análisis del agua, se basará en lo establecido en el Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM (2021), específicamente, en lo relacionado con el monitoreo de agua subterráneas.

Como se indicó, el punto a muestrear se selecciona siguiendo la dirección de flujo del agua subterránea y el más cercano a la servidumbre de las torres T44 y T46; lo anterior, con el fin de identificar las tendencias en las concentraciones de los componentes del agua subterránea y así establecer la relación causa-efecto acorde con los datos obtenidos y la operación de las torres T44 y T46. Teniendo en cuenta el tipo de punto hidrogeológico monitoreado que corresponde con un nacedero, se optará por un método de muestreo puntual, la cual permite representar las condiciones y características en un tiempo determinado, más aun cuando la composición del agua no difiere significativamente en tiempo y espacio, según lo observado en el trabajo de campo.

La frecuencia que se tiene en cuenta corresponde a un día; no obstante, para cuando se piense en el aprovechamiento de esa agua, se sugiere realizar los monitoreos de tendencia en cantidad con una frecuencia trimestral, como mínimo, ya que el acuífero es de tipo confinado de baja productividad y de tendencia de calidad y vigilancia, como mínimo, una vez al año, ya que ello permite identificar cambios en los patrones de calidad.

Cabe indicar, que el punto hidrogeológico al corresponder con un nacedero y no un pozo de extracción de agua (tipo aljibe o pozo profundo), por ende, no se realiza medición de nivel estático y freático ya que el punto no posee la estructura y profundidad para realizar la medición; asimismo, esta condición conlleva a realizar un muestreo superficial y no a profundidad.

Una vez seleccionado el sitio, la toma de muestra se hace de forma manual y puntual, para lo cual se usó un recipiente plástico de 5 litros el cual viene previamente esterilizado y rotulado de acuerdo con el análisis a realizar; previamente, al sitio de monitoreo se le realizará una limpieza de sus alrededores para garantizar la seguridad de las operación y así evitar la contaminación de la muestra. Según sea el caso, se deberán retirar objetos, maleza, residuos y/o sustancias que obstaculicen o afecten la representatividad del sistema de agua y permita de manera segura ejecutar el muestreo. Teniendo en cuenta el sitio y tipo punto a monitorear, la profundidad de toma debe estar por lo menos a una profundidad de 15 a 20cm por debajo de la lámina de agua, ya que permite sumergir

El volumen total tomado para análisis corresponde con el mismo del recipiente a llevar al laboratorio y que es de 5 litros; cabe indicar que para el análisis de cloruros no se requieren preservante, mientras que para metales disueltos como el calcio, magnesio, hierro, potasio, sodio, se requiere como mínimo una refrigeración por debajo de los 5°C; bajo este método también se facilita el análisis de la turbiedad, pH y la alcalinidad; por ende, una vez se llena el recipiente, para su transporte se usa una nevera de polietileno la cual debe contener suficientes compresas de hielo para asegurar que la refrigeración se mantenga hasta la llegada al laboratorio (donde la temperatura es cercana a 5°C); para esto, se verifica que la tapa de cada nevera quede bien cerrada y que no se salga de su sitio durante el viaje; aunado, para garantizar que no se salga el contenido de la nevera, esta es sellada con cinta y durante el transporte se mantuvo en posición horizontal y lejos de alguna fuente de calor.

La muestra siempre deberá estar refrigerada, acorde con lo indicado en el American Standard Methods for Examination of Water and Wastewater Edición 23 (2017) y el tiempo máximo de toma de muestras y recepción en el laboratorio será de 24 - 48h (en este caso la muestra fue tomada el 22 de septiembre y fue entregada el día 24 del mismo mes, teniendo en cuenta los tiempos de desplazamiento desde el punto de toma hasta la ciudad de Bogotá); para el monitoreo se usa una sola nevera y un solo recipiente.

El laboratorio a utilizar será ANALQUIM LTDA, acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM mediante la resolución 0908 del 08 de agosto de 2025; al revisar su matriz agua, se pueden verificar el SM - Standard methods for the examination of water & wastewater- acreditado para cada parámetro a analizar (alcalinidad, calcio (Ca), cloruros (Cl<sup>-</sup>), magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad , pH, potasio (K) y sodio (Na)).

Para el desarrollo de la investigación, el primer paso será determinar el área de influencia mediante una organización jerárquica de medio y componente asociado al recurso hídrico subterráneo y posteriormente, se analizará la hidrogeoquímica del agua subterránea dentro de la servidumbre comprendida entre las torres T44 y T46, con el propósito de determinar si el campo electromagnético generado por la red incide sobre las características del recurso.

La correlación de los resultados obtenidos permitirá establecer si existe o no incidencia de los campos electromagnéticos de la línea de transmisión sobre el agua subterránea. En caso afirmativo, se podrán generar indicadores cualitativos y cuantitativos susceptibles de extrapolarse a otras secciones de la red o incluso a redes de transmisión de mayor capacidad, como las de 230 kV o 500 kV. La delimitación del área de influencia se llevará a cabo inicialmente mediante el análisis de información secundaria, incluyendo recursos bibliográficos, estudios de impacto ambiental disponibles en las autoridades competentes, así como visores cartográficos y geomáticos. Posteriormente, se efectuará un scouting técnico y social con el fin de corroborar la información preliminar y determinar con precisión la localización y el modo en que se desarrollarán las actividades de caracterización hidrogeológica y medición electromagnética en la red de 115 kV. A este proceso se sumará un trabajo directo con las comunidades aledañas al área de influencia, con el propósito de conocer sus percepciones respecto a los proyectos de transmisión y, en particular, sobre su relación con el recurso hídrico subterráneo. Este ejercicio permitirá generar un indicador cualitativo adicional. Finalmente, con base en la triangulación de resultados de campo, información secundaria y percepción comunitaria, se definirán los puntos de análisis que proporcionen información precisa. Esta será procesada y analizada en el marco de la investigación, para dar cumplimiento a los objetivos planteados y alcanzar resultados concluyentes.

Cabe aclarar que persiste una brecha metodológica y de evidencia de campo: faltan estudios integrados y replicables que combinen mediciones directas de CEM en líneas de 115 kV con caracterización hidrogeoquímica (medida en términos de alcalinidad, calcio (Ca), cloruros (Cl<sup>-</sup>), magnesio (mg), hierro (Fe), turbiedad, conductividad , pH, potasio (K) y sodio (Na)) dentro y fuera de la servidumbre, con control explícito de confusores hidrogeológicos locales (litología, profundidad del

acuífero, uso del suelo) y, de ser posible, con líneas base pre-energización para análisis “antes/después”. Además, los mecanismos electrocinéticos observados en laboratorio (electroósmosis y electromigración) bajo corriente continua no se han verificado en condiciones naturales con campos alternos de 50/60 Hz, lo que impide extrapolaciones directas. La regulación prioriza la salud humana y reconoce vacíos sobre efectos ambientales indirectos, por lo que hacen falta investigaciones locales que vinculen intensidad de campo, distribución espacial en el subsuelo y variación hidrogeoquímica con soporte estadístico robusto. En el contexto colombiano y, específicamente, en Boyacá, no se reportan estudios que articulen estos componentes en franjas de servidumbre, lo que subraya el carácter inédito y pertinente del presente trabajo en el tramo T44–T46 del circuito Tunjita–Chivor.

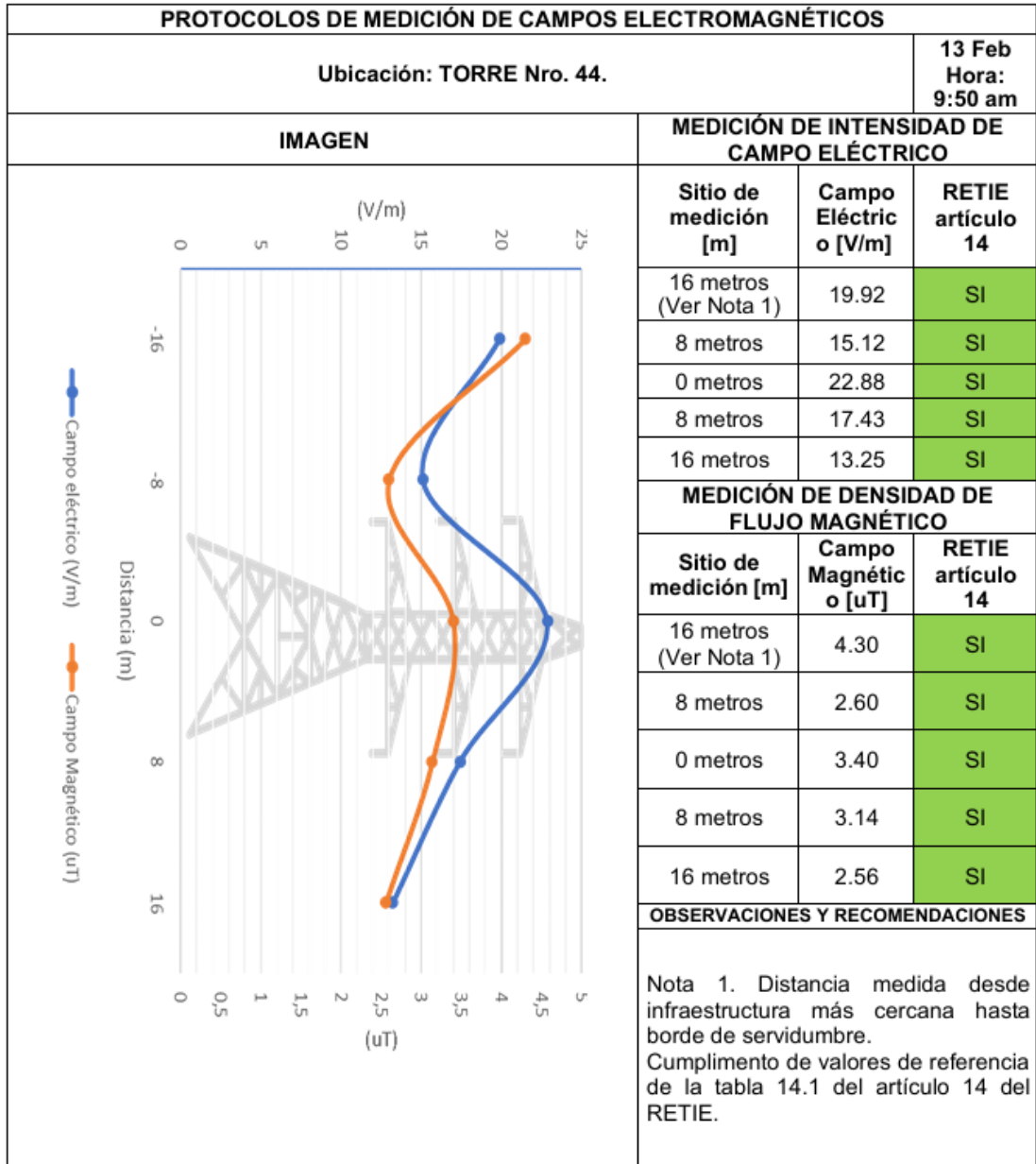
## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ALCANCE LONGITUDINAL VERTICAL DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE LA SERVIDUMBRE.

Con el fin de dar cumplimiento al primer objetivo específico de la investigación, se llevó a cabo la medición de la densidad de flujo magnético y de la intensidad de campo eléctrico en un tramo representativo de la línea de transmisión de 115 kV Tunjita–Chivor, comprendido entre las torres de distribución codificadas como T44 y T46. El procedimiento se desarrolló en concordancia con lo planteado en la metodología, efectuando cuatro mediciones principales: en las dos torres seleccionadas, en un punto intermedio de la línea y en un punto de control situado por fuera del área de influencia, definido como punto blanco. En cada una de las ubicaciones se realizaron tres registros: uno en el centro de la red y dos en los extremos, correspondientes a los límites de servidumbre.

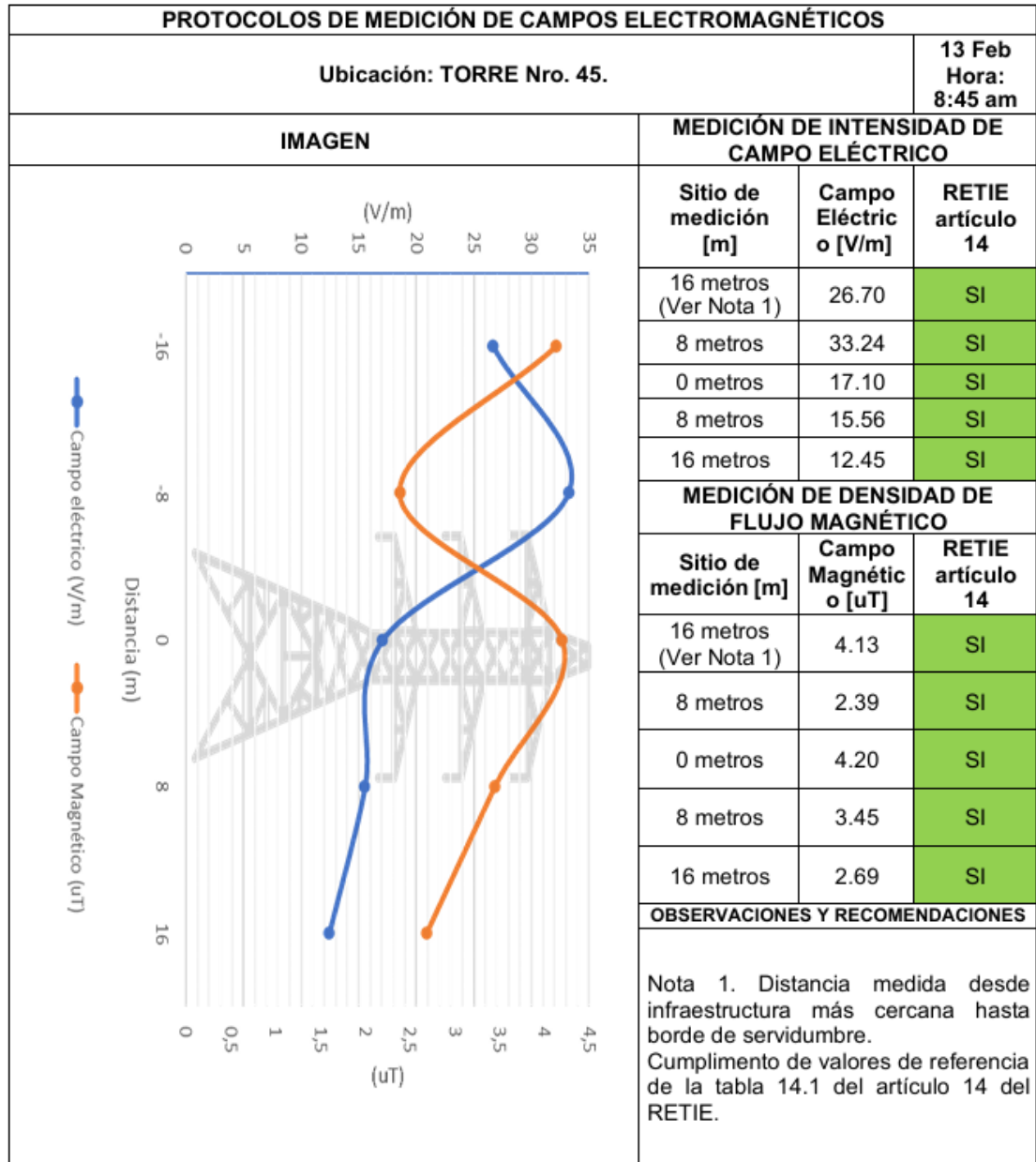
Las mediciones de campo eléctrico y magnético se realizaron con equipos especializados y calibrados. Para la densidad de flujo magnético se empleó el medidor Erasmus EMF-200, con capacidad de medición en un ancho de banda de 30 Hz a 2000 Hz y resolución de hasta 0.001  $\mu$ T. Para la intensidad del campo eléctrico y magnético, se utilizó el medidor Aaronia Spectran NF 5030, que permite muestreos en el rango de 1 Hz a 30 MHz, con capacidad de medición de hasta 20 kV/m para el campo eléctrico y 2 mT para el campo magnético. Cada una de las lecturas fue acompañada de registro fotográfico, asegurando la trazabilidad de los datos obtenidos en campo (ver registro fotográfico en Anexo 1). Las mediciones de campos electromagnéticos se realizaron el día 13 de Febrero de 2024, donde se presentan condiciones climáticas adecuadas (día Soleado) lo cual favorecen la toma de datos en campo.

Figura 2. Medición de campo electromagnético T44.



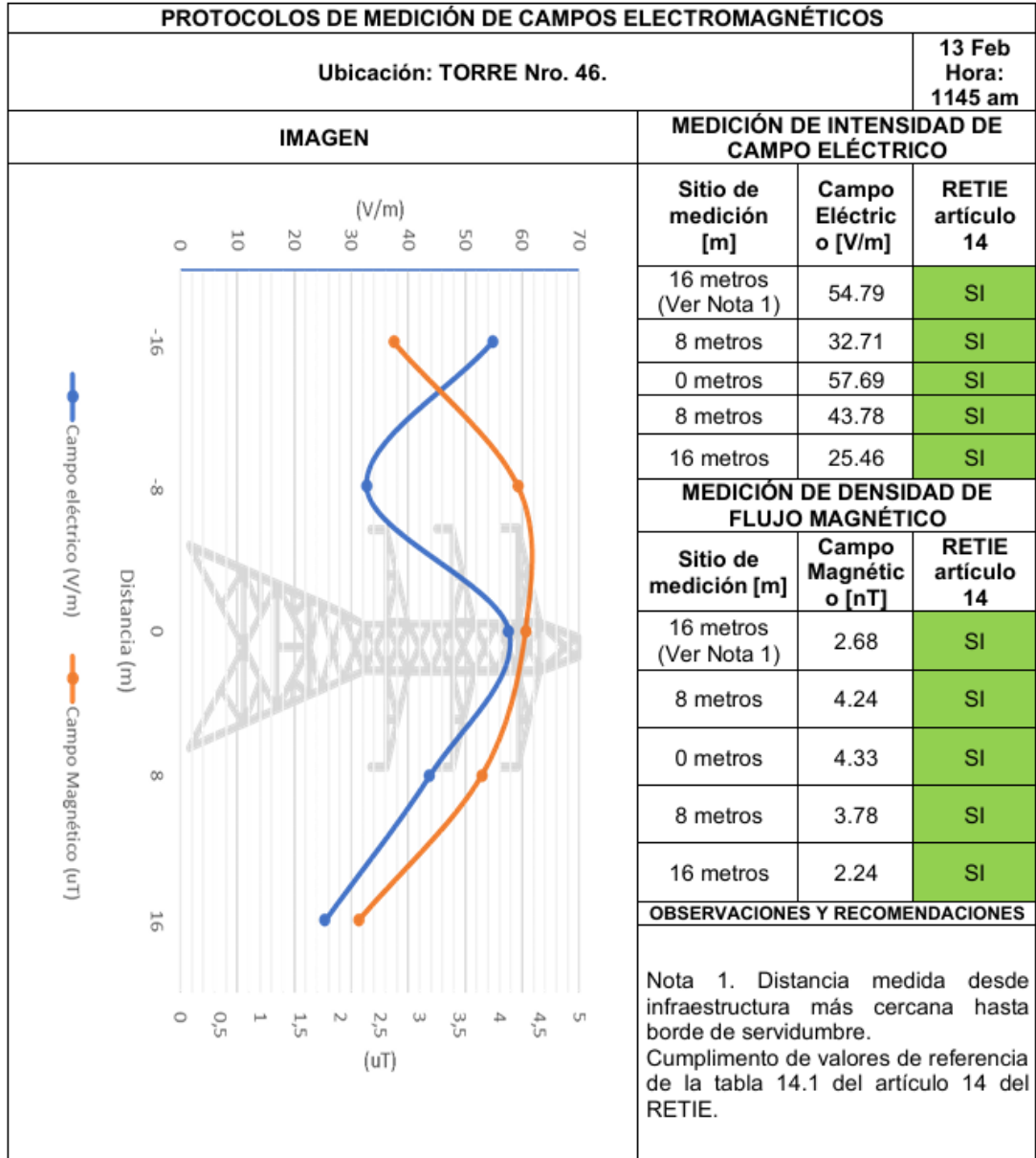
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Medición de campo electromagnético T45.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Medición de campo electromagnético T46.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis preliminar de los resultados evidenció que los valores de densidad de flujo magnético y de campo eléctrico medidos en el centro de la red, tanto en las torres como en el punto intermedio, fueron significativamente superiores a los registrados en los extremos de la servidumbre y en el punto blanco. Este comportamiento es consistente con la distribución radial de los campos electromagnéticos alrededor de las líneas de transmisión, cuya intensidad decrece con la distancia a la fuente, en concordancia con lo documentado en estudios previos (Swanson & Kaune, 2009).

En términos cuantitativos, los valores obtenidos en el centro de la línea se ubicaron dentro de los rangos establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, en su artículo 14, que define los criterios de seguridad para exposición a campos eléctricos y magnéticos en el contexto colombiano. En ningún caso se superaron los valores máximos permisibles. No obstante, se observó que en el área de servidumbre inmediata los niveles de densidad de flujo magnético se mantuvieron relativamente altos en comparación con el punto blanco, lo que confirma la pertinencia de definir y mantener las franjas de seguridad como medida preventiva.

Tabla 2. Resultados de medición y cumplimiento de límites de exposición a CEM.

Torre	Distancia Medición (m)	Campo Eléctrico (V/m)	Límite RETIE Ocupacional (kV/m)	Límite RETIE Público (kV/m)	Campo Magnético ( $\mu$ T)	Límite RETIE Ocupacional ( $\mu$ T)	Límite RETIE Público ( $\mu$ T)	¿Conforme RETIE?
T44	-16	19.92	8.3	4.16	4.30	1000	200	Sí
T44	-8	15.12	8.3	4.16	2.60	1000	200	Sí
T44	0	22.88	8.3	4.16	3.40	1000	200	Sí
T44	8	17.43	8.3	4.16	3.14	1000	200	Sí
T44	16	13.25	8.3	4.16	2.56	1000	200	Sí
T45	-16	26.70	8.3	4.16	3.13	1000	200	Sí
T45	-8	33.24	8.3	4.16	2.39	1000	200	Sí
T45	0	17.10	8.3	4.16	3.40	1000	200	Sí
T45	8	15.56	8.3	4.16	3.45	1000	200	Sí

T45	16	12.45	8.3	4.16	2.69	1000	200	Sí
T46	-16	54.79	8.3	4.16	4.24	1000	200	Sí
T46	-8	32.01	8.3	4.16	2.83	1000	200	Sí
T46	0	57.69	8.3	4.16	3.78	1000	200	Sí
T46	8	45.62	8.3	4.16	4.33	1000	200	Sí
T46	16	25.46	8.3	4.16	2.24	1000	200	Sí

Fuente: Elaboración Propia

La comparación de los registros en el punto intermedio con los obtenidos en las estructuras T44 y T46 mostró una tendencia homogénea en la distribución del campo, sin variaciones abruptas entre las torres, lo que refleja la estabilidad del sistema en condiciones normales de operación. Asimismo, los datos del punto blanco corroboraron que fuera de la franja de servidumbre los niveles de exposición disminuyen hasta valores cercanos al ruido de fondo electromagnético, lo cual respalda la hipótesis de que el efecto de la línea sobre el entorno está espacialmente confinado a la servidumbre.

Con base en la información recopilada, se elaboró un mapeo de contorno de los valores medidos, el cual permitió representar gráficamente la dispersión de los campos electromagnéticos alrededor de la línea. Este mapa constituye una herramienta fundamental para la visualización de la atenuación espacial de los campos y servirá como insumo para el análisis comparativo con la hidrogeoquímica del agua subterránea en la segunda etapa de la investigación. Las representaciones gráficas permiten observar la atenuación progresiva tanto del campo eléctrico (V/m) como del campo magnético ( $\mu\text{T}$ ) conforme aumenta la distancia desde el eje de la línea hacia los extremos de la servidumbre ( $\pm 16$  m). En los tres casos, las curvas reflejan la distribución radial típica de los campos generados por líneas de transmisión de alta tensión, con valores máximos en el punto central (0 m) y una reducción gradual hacia los bordes.

Los resultados muestran que, aunque los valores de campo eléctrico tienden a ser más variables entre torres, los de campo magnético se mantienen más estables, con ligeras diferencias que obedecen a la geometría estructural y a la altura de los conductores en cada torre. En ningún caso se superan los límites normativos establecidos en el artículo 14 del RETIE, lo cual confirma la conformidad de las mediciones con los estándares de seguridad.

La gráfica de la Torre T44 evidencia un pico en el campo eléctrico de aproximadamente 22.88 V/m en el centro de la línea, con una reducción clara hacia los extremos (-16 m: 19.92 V/m; +16 m: 13.25 V/m). En cuanto al campo magnético, el valor máximo se ubica en el centro (3.40  $\mu$ T) y decrece a medida que se avanza hacia los lados, hasta alcanzar 2.56  $\mu$ T a los 16 metros. La tendencia muestra una simetría razonable, lo que indica uniformidad en la dispersión del campo.

En la Torre T45, los valores de campo eléctrico presentan mayor dispersión, con un máximo de 33.24 V/m en el punto -8 m y valores relativamente menores en el centro (17.10 V/m). Esta diferencia sugiere que la geometría particular de la torre y la disposición de los conductores pueden generar concentraciones localizadas de campo. El campo magnético, en cambio, presenta un comportamiento más estable, con un máximo de 3.45  $\mu$ T en el punto +8 m y un mínimo de 2.39  $\mu$ T en -8 m, dentro de un rango estrecho que refleja uniformidad.

La Torre T46 muestra los valores más elevados de campo eléctrico, con un máximo de 57.69 V/m en el centro de la línea, aunque manteniéndose siempre por debajo de los valores de referencia ocupacionales y públicos del RETIE. A diferencia de T44 y T45, aquí se observa una mayor pendiente en la reducción hacia los extremos, alcanzando 25.46 V/m a 16 m. El campo magnético muestra valores moderados, con un pico en el centro de 4.33  $\mu$ T y un descenso hasta 2.24  $\mu$ T en el extremo de 16 m. Esta torre es la que más claramente refleja la concentración máxima de campo en el eje central.

En síntesis, los resultados obtenidos en este primer objetivo específico demuestran que los campos electromagnéticos generados por la operación de la línea de transmisión de 115 kV se distribuyen conforme a lo esperado, los tres perfiles confirman que la intensidad de los campos decrece con la distancia desde el eje de la línea, lo que valida el diseño de franjas de servidumbre como zonas de protección. Los campos eléctricos muestran una mayor variabilidad entre torres, asociada a la disposición geométrica y a las diferencias en altura de los conductores. Los campos magnéticos se comportan de manera más estable y con valores relativamente bajos, muy por debajo de los límites establecidos para exposición ocupacional y pública.

Todas las mediciones cumplen con lo estipulado en el artículo 14 del RETIE, lo cual confirma que, desde la perspectiva normativa, *no se presenta riesgo por sobreexposición en la zona de estudio.*

## 5.2 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El informe analítico reporta pH  $\approx$  6,1 (agua ligeramente ácida), conductividad eléctrica  $\approx$  60  $\mu$ S/cm (baja mineralización) y turbidez  $\approx$  380 NTU (alta). Estos valores son consistentes con aguas jóvenes de baja salinidad, con limitada interacción agua-roca o tiempos de residencia cortos (figura 5). En términos comparativos, este tipo de firma físico-química se espera tanto dentro como fuera de servidumbre cuando el medio geológico y las condiciones de recarga son semejantes; por ello, funcionan como línea base para contrastar otras estaciones en campañas sucesivas. Cabe indicar, que la turbiedad analizada se debe a que en el punto de afloramiento de las aguas subterráneas, hay arrastre de sedimentos desde la parte alta por causa de la escorrentía superficial, que le aportan sólidos al mismo, por ende, no se puede asociar como una característica natural del agua que aflora.

Figura 5. Ensayos sobre el agua subterránea en la zona de estudio.

MUESTRA PROCEDENTE DE:		MACANAL		DEPARTAMENTO: BOYACA	
LUGAR TOMA DE LA MUESTRA:		MACANAL BOYACA		TIPO DE MUESTRA: AGUA CRUDA	
PUNTO DE CAPTACIÓN/IDEN. MUESTRA:		NACEDERO			
FECHA Y HORA DE MUESTREO:		2025-09-22 16:00 H		FECHA RECEPCIÓN: 2025-09-24	
RESULTADOS					
ENSAYO	FEC-ANALISIS	TECNICA DE ANALISIS	REFERENCIA	RESULTADO	
b. DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD	2025-09-24	Volumetría	SM 2320 B. 24th edition, 2023	36 mg CaCO <sub>3</sub> /L	
b. DETERMINACIÓN DE CALCIO	2025-10-03	Volumetría	SM 3500-Ca B. 24th edition, 2023	12,5 mg Ca/L	
b. DETERMINACIÓN DE CLORUROS	2025-09-30	Volumetría	SM 4500-Cl- B 24th edition, 2023	3,1 mg Cl-/L	
b. DETERMINACIÓN DE MAGNESIO. CÁLCULO	2025-10-03	Volumetría	SM 3500-Mg B. 24th edition, 2023	6,33 mg Mg/L	
b. DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES: HIERRO	2025-10-01	Espectrofotometría de absorción atómica	ANQ-ME019-3 v4 (2023-06-01). SM 3111 B 24th edition, 2023	> 5,00 mg Fe/L	
b. DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD	2025-09-24	Nefelometría	SM 2130 B 24th edition, 2023	380 NTU	
z. CONDUCTIVIDAD	2025-09-24	Electrometría	SM 2510 B. SM 23rd ed 2017	59,6 $\mu$ S/cm a 25°C	
z. PH	2025-09-24	Electrometría	SM 4500-H+ B	6,06 Unidad de pH	
z. POTASIO	2025-10-01	Espectroscopía de Absorción Atómica	SM 3030 K (Modificado), SM 3111 B. SM 23rd ed 2017	2,7 mg K/L	
z. SODIO	2025-10-01	Espectroscopía de Absorción Atómica	SM 3030 K (Modificado), SM 3111 B. SM 23rd ed 2017	5,3 mg Na/L	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran Ca<sup>2+</sup>  $\sim$ 12,5 mg/L y Mg<sup>2+</sup>  $\sim$ 6,33 mg/L (bajos), Na<sup>+</sup>  $\sim$ 5,3 mg/L y K<sup>+</sup>  $\sim$ 2,7 mg/L (muy bajos), además de Si en trazas (no dominante). El hierro se reporta por encima del límite de cuantificación del método (> 5 mg Fe/L), lo que sugiere liberación local de Fe(II) por condiciones reductoras puntuales, movilización desde minerales ferrosos o influencia de materia orgánica; este comportamiento debe verificarse con duplicados y control de preservación (acidificación inmediata y filtrado) para descartar artefactos de muestreo. La dureza calculada a partir de Ca y Mg es del orden de 35 mg/L como CaCO<sub>3</sub> (agua blanda), coherente con la baja

CE observada. En términos de comparación espacial, una elevación de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  o  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  dentro de servidumbre—si apareciera—indicaría intercambio iónico o mayor contacto con carbonatos/dolomías; sin embargo, con la evidencia disponible, la firma catiónica luce estable y sin indicios de enriquecimiento por procesos diferentes entre zonas.

El cloruro  $\sim 3,1$  mg/L es bajo (ausencia de intrusión salina o aportes antrópicos relevantes) y el sulfato no presenta elevaciones (sin señal de oxidación de sulfuros o drenaje ácido). La alcalinidad  $\sim 36$  mg/L como  $\text{CaCO}_3$  indica dominio bicarbonatado moderado, típico de recargas meteóricas con disolución incipiente de carbonatos/silicatos. Bajo este patrón, se anticipa una facies bicarbonatada cálcica ( $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ ) o  $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$  en la representación de Piper para ambas zonas; diferencias estadísticamente significativas entre servidumbre y punto blanco requerirían incrementos sistemáticos de  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  o cambios en la alcalinidad que, hasta ahora, no se evidencian en la muestra analizada.

Con la CE baja,  $\text{HCO}_3^-$  moderado y predominio de  $\text{Ca}^{2+}$  sobre  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ , la facies esperada se ubica en el campo bicarbonatado cálcico (joven, de flujo local). Este encuadre sugiere equilibrio lejos de la saturación de carbonatos, con intercambio catiónico limitado y baja evaporación. Cualquier desplazamiento de facies hacia dominios sulfatados o sodio-clorurados en puntos de servidumbre, frente al punto blanco, sería una señal de alerta; con los datos disponibles, la facies permanece estable y coherente con una recarga difusa sin influencia antrópica salina marcada.

De acuerdo con el planteamiento del problema, la dirección de flujo se define con información piezométrica y control altimétrico entre estaciones. Con la evidencia analítica disponible en esta entrega (una estación con reporte completo), no es posible inferir cambios de dirección/gradiente atribuibles a la servidumbre. Se mantiene la hipótesis de flujo local controlado por topografía y litología, a validar con el set completo de niveles estáticos/dinámicos y mapas de isovalores de carga hidráulica en las siguientes campañas.

Para responder integralmente al objetivo, los isótopos se emplearán para confirmar origen de recarga y procesos de mezcla/evaporación. En esta campaña el informe consultado no reporta valores isotópicos; su análisis se programará en la siguiente fase para: (i) ubicar las muestras respecto a la Línea Meteórica Local, (ii) descartar evaporación significativa y (iii) contrastar dentro vs. fuera de servidumbre. La expectativa, dado el bajo TDS y la CE medida, es que las muestras se alineen con recarga meteórica reciente sin evaporación marcada; cualquier desplazamiento

isotópico sistemático entre zonas sería indicio de procesos diferenciales en el subsuelo.

En la campaña analítica considerada se obtuvieron, para las estaciones dentro de la servidumbre, mediciones de pH, conductividad eléctrica, turbidez y concentraciones de cationes ( $\text{Si}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones (cloruro, sulfato y alcalinidad). Para las estaciones de control fuera de la servidumbre se registraron los mismos parámetros bajo el mismo protocolo de muestreo y análisis. En ambos conjuntos se consolidaron hojas de campo y reportes de laboratorio con los valores medidos para pH, conductividad eléctrica y turbidez, así como las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Si}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , junto con cloruro, sulfato y alcalinidad expresada como  $\text{CaCO}_3$ . Se documentaron, además, los datos piezométricos disponibles para niveles estáticos y cargas hidráulicas, y se dejó constancia sobre la disponibilidad de resultados isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) para su incorporación cuando correspondan. Con base en estos registros, se elaboraron resúmenes por estación que permiten la comparación directa entre zonas, preservando el esquema de “dentro de servidumbre” y “fuera de servidumbre” para todos los parámetros del objetivo (Tabla 3).

Con la evidencia analítica disponible, la calidad del agua subterránea evaluada muestra baja mineralización y facies bicarbonatada cálcica, sin señales de cambio atribuibles a la proximidad a la servidumbre. La única anomalía preliminar es el Fe total elevado, que requiere corroboración y control de calidad antes de asociar diferencias espaciales. La confirmación final dependerá del conjunto completo de estaciones (dentro y fuera), de la piezometría para dirección de flujo y de la línea isotópica para consolidar o descartar variaciones entre zonas.

Tabla 3. Resumen de ensayos sobre el agua subterránea en la zona de estudio.

Estación / Muestra	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Si (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Alcalinidad (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)	Nivel estático (m)	Carga hidráulica (m)
Muestra analizada	6.7	60	0.9	12.5	0.93	5.3	2.7	—	>5.0	3.1	—	36	—	—	—	—

Fuente: Elaboración propia.

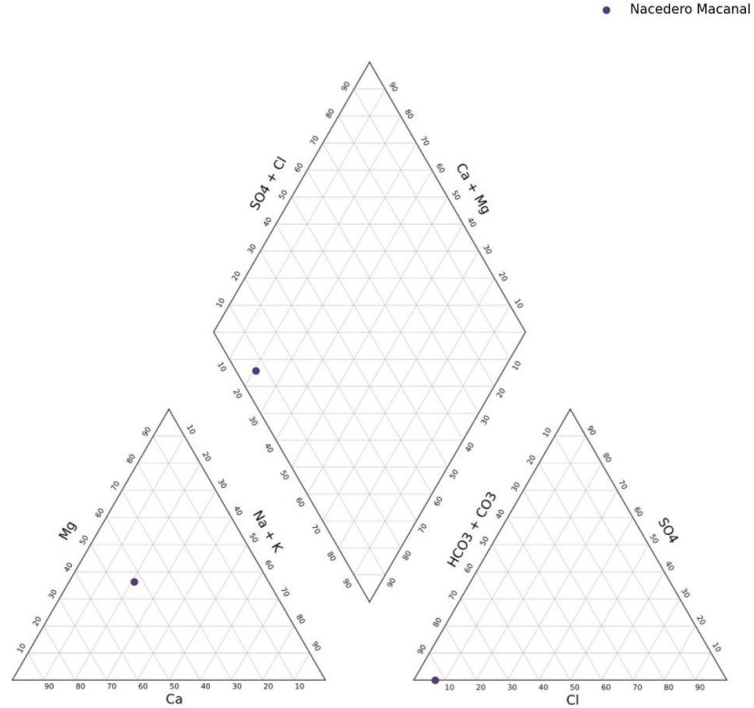
### 5.3 EVALUACIÓN DE LA QUÍMICA DEL AGUA

Se realizó la evaluación de la química del agua utilizando el software AquiferApp, que proporciona un panorama sobre el origen del agua, su calidad y los principales factores relacionados al flujo y geología que determinan las concentraciones de sus componentes. A través de recorridos en campo y levantamiento de información primaria, además del uso de información secundaria como el Estudio Nacional del Agua (ENA) de los años 2018, 2022 y 2024, se seleccionó el punto de muestreo de agua subterránea, en el área de influencia de la franja de servidumbre delimitada entre las estructuras T44 y T46, con el fin de evaluar la posible relación entre los campos electromagnéticos generados y las características hidrogeoquímicas del acuífero.

El siguiente diagrama ternario (figura 6) presenta las composiciones químicas de las muestras de agua subterránea tomadas en el área de influencia del Sistema de Transmisión Regional (115 kV), específicamente dentro de la franja de servidumbre delimitada entre las estructuras T44 y T46. Este diagrama se utiliza para analizar las concentraciones relativas de tres componentes principales (cationes y aniones) en las muestras recolectadas tanto en zonas afectadas por los campos electromagnéticos generados por las infraestructuras del sistema eléctrico, como en puntos situados fuera de su alcance.

El análisis comparativo de las composiciones hidrogeoquímicas permite determinar si existe alguna alteración en la calidad del agua subterránea asociada a la presencia de estos campos, contribuyendo al objetivo de establecer la relación entre la incidencia de los campos electromagnéticos y las variaciones en los parámetros hidrogeoquímicos de los acuíferos identificados en la zona de estudio.

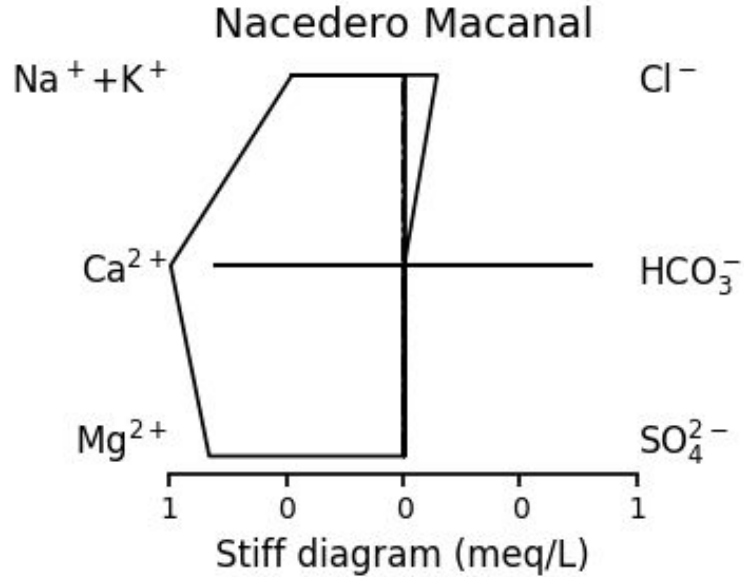
Figura 6. Diagrama ternario generado (diagrama de piper).



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, con la modelación se pudo generar un diagrama de Stiff, el cual es utilizado en hidroquímica para representar las concentraciones de los principales cationes y aniones en el agua subterránea de manera gráfica. En este caso, el diagrama (figura 7) presenta los componentes principales de la muestra de agua subterránea de Nacedero Macanal, mostrando los cationes Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, y Mg<sup>2+</sup>, así como los aniones Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; con este se pueden visualizar las relaciones entre los diferentes iones en las muestras de agua y facilitar la interpretación de la composición química del agua, ayudando a identificar posibles patrones o alteraciones en su calidad. Al compararlo con el diagrama ternario, se puede realizar una evaluación más completa de las características hidrogeoquímicas del acuífero, observando no solo la proporción de los componentes, sino también su comportamiento y distribución relativa, lo cual es esencial para determinar la influencia de los campos electromagnéticos en la calidad del agua subterránea.

Figura 7. Diagrama de Stiff.



Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de los diagramas de Piper (Figura 6) y Stiff (Figura 7), se puede observar que los datos hidrogeoquímicos correspondientes al punto de muestreo de Nacedero Macanal muestran una clara dominancia de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , seguidos por  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  en el diagrama de Piper. Este comportamiento está reflejado en el triángulo superior izquierdo del diagrama ternario, donde la concentración relativa de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  predomina sobre la de otros cationes, como el sodio y potasio, lo que sugiere que el agua subterránea en este punto tiene características predominantemente calcáreas y magnesianas. En términos de aniones, el  $\text{HCO}_3^-$  se encuentra en concentraciones más altas, mientras que  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  tienen valores relativamente bajos. Esta tendencia se confirma en el diagrama de Stiff, donde la distribución de los iones es más homogénea y refleja un perfil químico de agua tipo bicarbonatada calcárea, comúnmente asociada a aguas de zonas con influencia de carbonatos y sales de calcio.

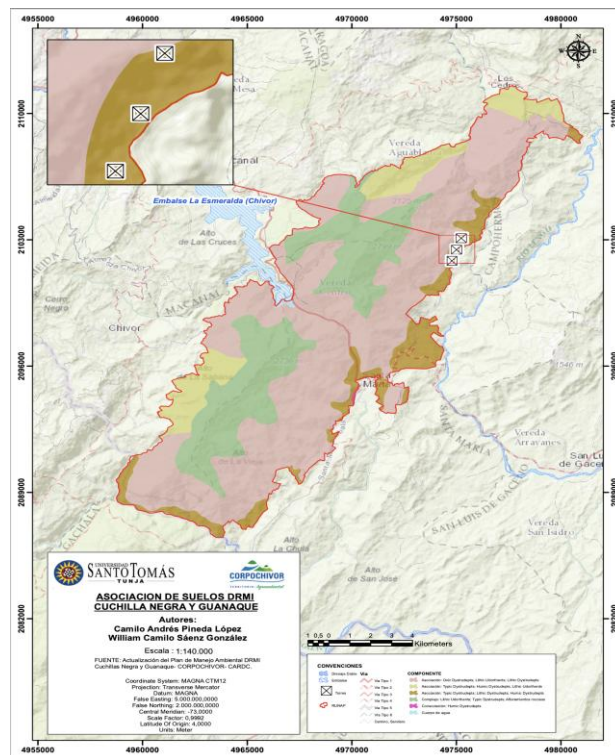
A partir del análisis de los diagramas de Piper (Figura 6) y Stiff (Figura 7), se puede observar que los datos hidrogeoquímicos correspondientes al punto de muestreo de Nacedero Macanal muestran una clara dominancia de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , seguidos por  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  en el diagrama de Piper. Este comportamiento está reflejado

en el triángulo superior izquierdo del diagrama ternario, donde la concentración relativa de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  predomina sobre la de otros cationes, como el sodio y potasio, lo que sugiere que el agua subterránea en este punto tiene características predominantemente calcáreas y magnesianas. En términos de aniones, el  $\text{HCO}_3^-$  se encuentra en concentraciones más altas, mientras que  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  tienen valores relativamente bajos. Esta tendencia se confirma en el diagrama de Stiff, donde la distribución de los iones es más homogénea y refleja un perfil químico de agua tipo bicarbonatada calcárea, comúnmente asociada a aguas de zonas con influencia de carbonatos y sales de calcio.

#### 5.4 SUELOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Los suelos en la zona de estudio, corresponde con las asociaciones Typic Dystrudepts; Lithic Dystrudepts; Humic Dystrudepts, a saber:

Figura 8. Suelos DRMI Torres T44 y T46.



Fuente: CORPOCHIVOR. PMA DRMI (2021). Adaptado por los Autores.

Según el Estudio de Suelos para el Departamento de Boyacá, las asociaciones mencionadas están asociadas a suelos en relieve moderadamente escarpado, con pendientes 50-75%, afectados por movimientos en masa (soliflucción), deslizamientos, reptación y escurrimiento difuso en grado ligero y pedregosidad; suelos superficiales, limitados por saturaciones de aluminio mayores del 65% bien drenados, de texturas franca finas con gravilla, reacción extremada y fuertemente ácida y fertilidad baja a moderada.

Analizando el perfil de suelos mencionados por el IGAC, para la **asociación Typic Dystrudepts** su perfil es de nomenclatura A - B - C. El horizonte A con espesor de 14 cm es de color pardo oscuro, textura franco arcillosa gravilosa; el horizonte B es de color pardo a pardo oscuro con textura franco arcillosa gravilosa; el horizonte C tiene color rojo amarillento y textura arcillosa. Son suelos muy superficiales limitados por niveles tóxicos de aluminio, bien drenados; su reacción química es extremadamente ácida, su capacidad de intercambio catiónico alta a moderada y la saturación de aluminio de cambio es mayor del 65% en todo el perfil; Tal como se menciona, son suelos bien drenados (El agua no se estanca ni fluye demasiado rápido) y de textura franco arcillosa; la conductividad de estos suelos varía en función de la humedad (y sales en algunos casos), es decir, son suelos que pueden considerarse como efectivos a la hora de conducir la corriente.

La **asociación Humic Dystrudepts** se localiza en las laderas de mayor pendiente y se caracterizan por tener un perfil de nomenclatura A - B - C - R. El horizonte A tiene un espesor de 27 cm, color pardo grisáceo muy oscuro, y textura franca gravilosa; el horizonte B es de color amarillo pardusco, con textura franco arcillosa; el horizonte C de color pardo amarillento claro y textura similar a la anterior y el horizonte R corresponde a rocas de lutitas. Son suelos muy superficiales limitados por altos contenidos de aluminio, bien drenados, de reacción fuertemente ácida, capacidad de intercambio catiónico alta a moderada y saturación de aluminio de cambio mayor del 70% en los horizontes A y C.

La **asociación Lithic Dystrudepts**, se localiza en los relieves de crestones homoclinales y en las cimas de relieves de vigas, caracterizados por tener un perfil de tipo A - R. El horizonte A tiene un espesor de 15 cm, color pardo grisáceo muy oscuro, textura franca arenosa gravilosa; el horizonte R está constituido por rocas de lutitas en diferente grado de meteorización. Son suelos muy superficiales, bien drenados.

En general, los suelos se convierten en materiales conductores debido a la presencia de sales (cloruros, sulfatos, nitratos, carbonatos y bicarbonatos de sodio,

potasio, calcio y magnesio), lo cual los convierte en sellos naturales que protegen el acuífero de la zona de estudio, ya que de tener intensidades de campos eléctricos significativas (medidas en términos de V/m) o densidades de flujo magnético (medidas en uT), estas serían atenuadas por esta matriz de suelo que se tiene por encima del acuífero, gracias a sus espesores y características de humedad y sales presentes se tiene mayor o menor capacidad de transportar corriente eléctrica; en el caso de un suelo franco arcilloso, al ser rico en arcilla (alta capacidad de retención de agua y sales), se convierte en buen conductor de electricidad, por ende, servirían, como se mencionó, como sello natural de protección para el acuífera.

A lo expuesto, es necesario sumarle y correlacionarle los resultados de las mediciones de campo eléctrico y magnético, donde los valores de densidad de flujo magnético y de campo eléctrico, medidos en el centro de la red, tanto en las torres como en el punto intermedio, fueron significativamente superiores a los registrados en los extremos de la servidumbre y en el punto blanco, no obstante, como lo corroboran las figuras no se llegan a tener valores de densidad de flujo magnético significativos a nivel suelo, por ende, la calidad del agua subterránea no sufre variación con respecto a sus características hidrogeoquímicas como se evidencia en la caracterización realizada. Adicional a lo anterior, hay que resaltar que en el área se tiene un acuitardo, lo cual se asocia con materiales arcillosos, que ratifican la función de protección que brindan los suelos del área.

## 5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Luego de obtener los resultados, se realiza un análisis de los mismos en función de los estudios hidrogeológicos que se han realizado en la zona, incluyendo el Plan de Manejo Ambiental (PMA) para el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) cuchillas Negra y Guanaque, y el Estudio Nacional del Agua (ENA) de los años 2014, 2018 y 2022. El análisis se hace con el fin de determinar las unidades hidrogeológicas ubicadas en el área de influencia de las torres objeto de estudio y su relación con los resultados obtenidos luego de la caracterización realizada.

Al analizar el PMA del DRMI se observa que en el área donde se ubican las Torres de distribución eléctrica, corresponde con el sistema acuífero Tunja, cuya área geográfica corresponde con la ANH2 Magdalena Cauca, zona hidrográfica ZH24 Sogamoso y su Provincia hidrogeológica se asocia con PM4 Cordillera Oriental. Dentro de las unidades hidrogeológicas presentes se encuentran las siguiente:

**Formación Guaduas (KTg).** Consta de tres conjuntos litológicos, uno inferior conformado por arcillolitas y areniscas de grano fino, un nivel intermedio constituido por areniscas cuarzosas de grano fino a grueso y con intercalaciones de arcillolitas y mantos de carbón y un conjunto superior constituido por arcillolitas con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso y mantos de carbón. El espesor de esta unidad varía de 480 m en el área de Guatavita y 1000m en el área de Tausa. Es considerado un acuitardo.

**Acuífero Formación Bogotá (Tb).** Consta de un conjunto inferior donde alternan arcillolitas y areniscas cuarzosas de color gris verdoso y un conjunto superior constituido por arcillolitas gris oscuro y gris verdoso. Al conjunto inferior se le asigna un espesor de 620 m y al superior un espesor que puede sobrepasar los 1000 m. Se considera que su depositación ocurrió en un ambiente de llanura aluvial y de ríos meándricos., es un acuífero pobre - libre a semiconfinado.

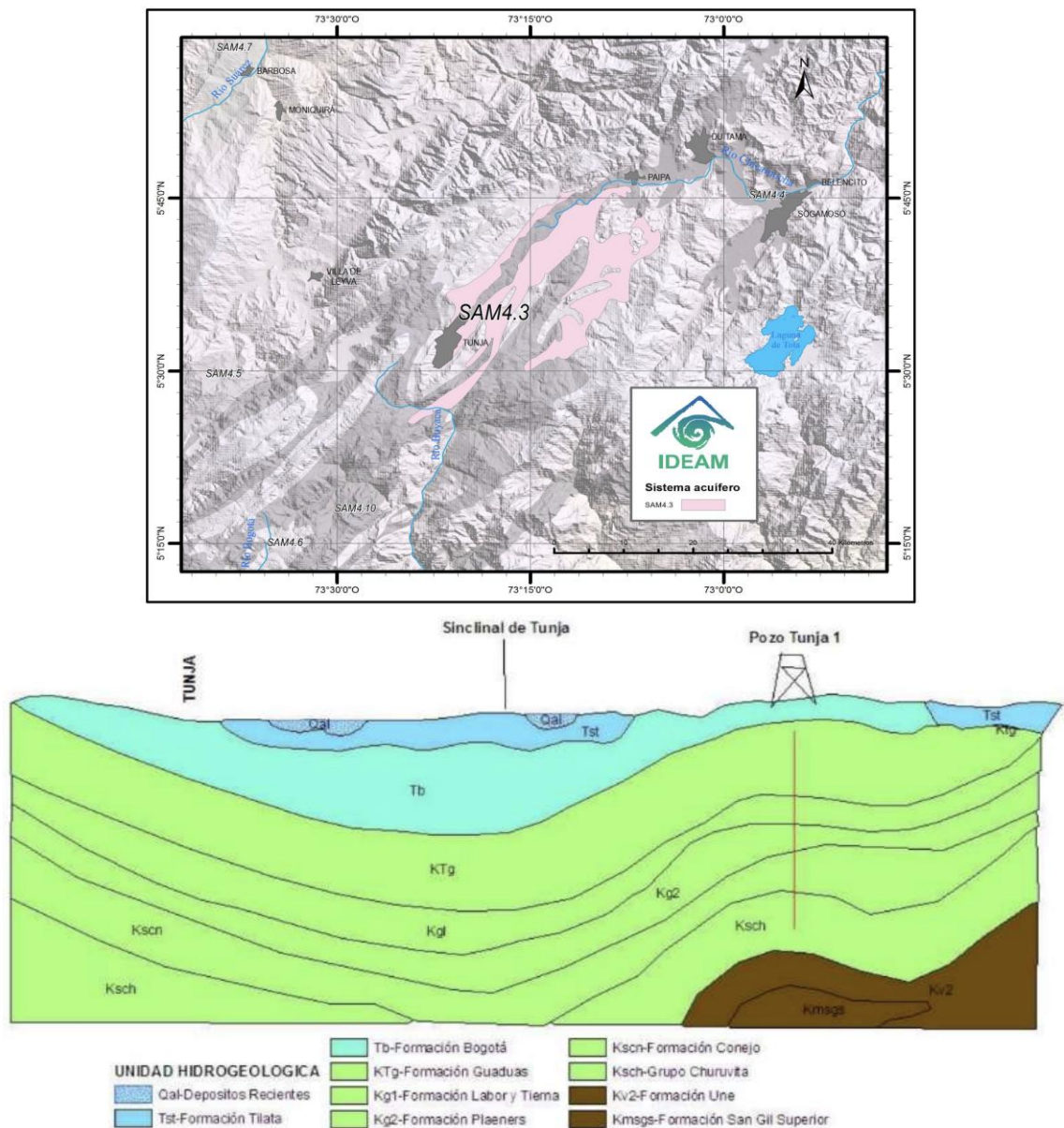
**Acuífero Tilatá (Ngc).** Este acuífero constituye la parte inferior del relleno Cuaternario de la Sabana de Bogotá, aflorando principalmente en la parte alta de la cuenca del Río Bogotá y al norte de la ciudad de Tunja. Litológicamente consiste hacia la base de arenas cuarzosas de color blanco, mal seleccionadas y gravas finas a medias con intercalaciones de arenas cuarzosas de grano fino, en ocasiones conglomeráticas con líticos negros, chert y arcillas plásticas. Al techo arenas cuarzosas de grano muy fino a medio con ligeras intercalaciones de arcillas. El acuífero es discontinuo de extensión local y de tipo confinado con un espesor variable entre 50 y 20m, presentando niveles piezométricos desde 5 hasta 75 m de profundidad. La recarga potencial estimada es de 30'509.080,15m<sup>3</sup>/año; en lámina de agua la recarga es cercana a los 200mm/año, es una de las unidades con mayores almacenamientos debido a su extensa área de afloramiento.

**Formación Cacho (Tc).** Acuífero confinado constituido por arenitas de grano fino a conglomeráticas, amarilla rojizas, cuarzosas, algo líticas, friables con alto plegamiento y fracturamiento; su parte aflorante constituye una zona de recarga con un potencial anual en volumen de agua de 2'091.192,71 m<sup>3</sup>/año para su área de afloramiento. Permeabilidad media.

**Formación Labor y Tierna (Kg1).** *Acuífero confinado constituido por shales prevalecientes con intercalaciones de areniscas cuarzosas; presenta condiciones favorables para la recarga, flujo y almacenamiento del recurso hídrico por porosidad intergranular y localmente a través de fracturas; La recarga potencial anual estimada en volumen de agua es de 4'832.307,49 m<sup>3</sup> y en lámina de agua es cercano a los 200mm/año; siendo una de las unidades con mayor almacenamiento.*

**Formación Une (Kv2).** *Potencial acuífero libre compuesto por areniscas cuarzosas friables con intercalaciones de lutitas y limolitas, con muy buena porosidad intergranular y con fracturamiento debido al plegamiento. Tiene una recarga potencial anual estimada de 13'321.206,07 m<sup>3</sup>/año y en lámina de agua de 150mm/año cercano al promedio.*

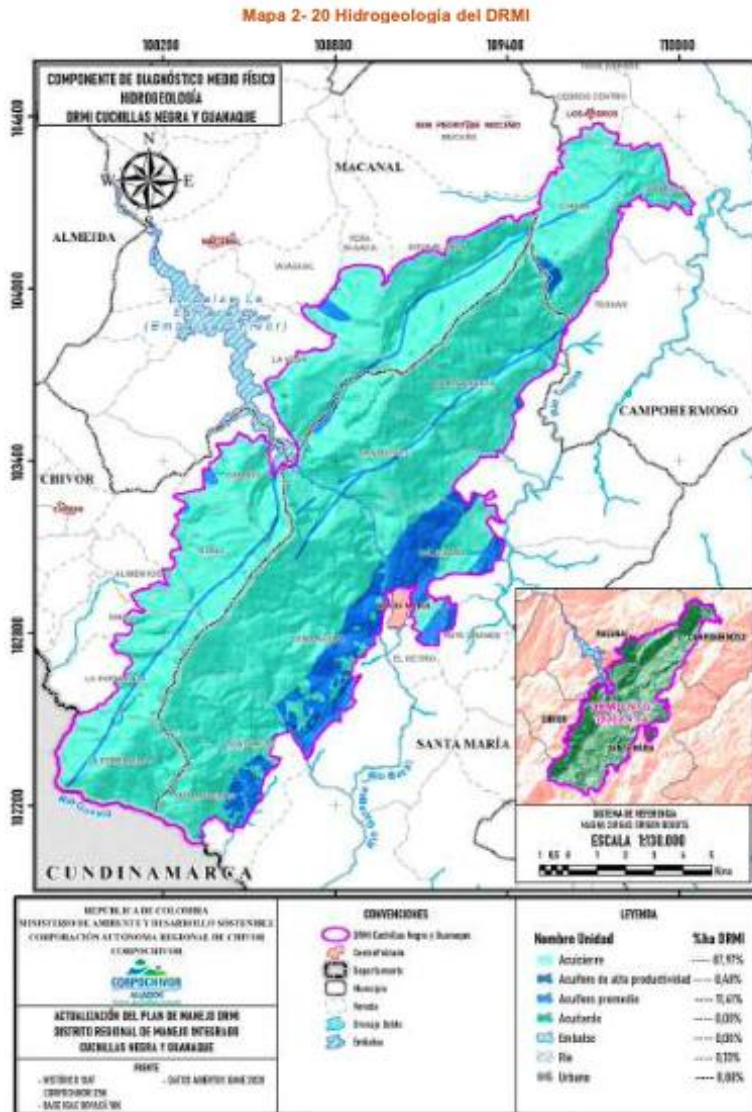
Figura 9. Corte Sistema Acuífero de Tunja



Fuente: IDEAM. ENA (2022).

Basándose en los Estudio Nacional de Agua (ENA), mencionados, se revisan las características hidrogeológicas de las unidades hidrogeológicas del acuífero estudiado, encontrando similitud entre los indicado en el PMA del DRMI:

Figura 10. Hidrogeología DRMI



Fuente: CORPOCHIVOR. PMA DRMI (2021).

Al ubicar las torres objeto de estudio sobre las unidades hidrogeológicas del PMA del DRMI, se identifica que estas se asientan sobre un acuífero, el cual se relaciona con la formación Guaduas (KTg) que se asocia con este tipo de acuíferos:



características similares a las obtenidas en los resultados obtenidos en el monitoreo, el agua del punto hidrogeológico monitoreado (nacedero) muestra baja mineralización y facies **bicarbonatada cálcica**, típica de aguas jóvenes con mínima interacción roca – agua; esto es sustentable con los estudios realizados en el PMA del DMRI en el cual indica que *El área de las Cuchillas Negra y Guanaque, hidrogeológicamente se comporta como un área de recarga de acuíferos*, por ende, refleja la características del agua resultados monitoreada, que es un agua joven, con mínima interacción roca – agua con baja mineralización y facies bicarbonatada cálcica. Las demás formaciones identificada en el ENA no presentan esta Clasificación Hidrogeoquímica y tipo de acuífero.

Lo anterior, quiere decir que, con los estudios aquí realizados, no se evidencia una incidencia los campos electromagnéticos generados por la conexión y operación normal del Sistema de Transmisión de Energía – STR a 115 Kv sobre las características hidrogeoquímicas del agua subterránea que fluye bajo la servidumbre **entre las torres T44 a T46 del “Circuito 115Kv Tunjita – Chivor”**.

## 5.6 CORRELACIÓN ENTRE EL PERFIL DE SUELO Y LA DISPERSIÓN VERTICAL DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA SERVIDUMBRE

En esta sección se llevará a cabo la correlación entre el perfil de suelo identificado en la servidumbre de la línea de transmisión de 115 kV y la dispersión vertical de los campos electromagnéticos generados por las infraestructuras del sistema eléctrico. A través de este análisis, se busca entender cómo las propiedades del suelo, tales como su composición, textura y contenido de agua, influyen en la capacidad de dispersión de los campos electromagnéticos en el medio subterráneo. Además, se evaluará si esta dispersión tiene una relación significativa con la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el área de influencia de la servidumbre.

El análisis de la dispersión de los campos electromagnéticos es crucial para determinar si las características del suelo permiten la penetración y propagación de estos campos hacia los acuíferos subterráneos, lo cual podría tener implicaciones en la calidad del agua. Este estudio es fundamental para evaluar si los campos electromagnéticos generados por el sistema de transmisión inciden en la composición química del agua subterránea, proporcionando información clave para el manejo y protección de los recursos hídricos en la zona de estudio. Para llevar a cabo la correlación entre el perfil de suelo identificado en la servidumbre y la dispersión vertical de los campos electromagnéticos, se realizaron varias

actividades de campo, análisis geofísicos y mediciones especializadas. A continuación, se describe la metodología empleada:

### **1. Mediciones en campo:**

Se realizaron mediciones de densidad de flujo magnético y de intensidad de campo eléctrico en distintos puntos dentro de la servidumbre y fuera de ella, con el objetivo de comparar las variaciones de los campos electromagnéticos en ambos entornos. Las mediciones se realizaron en las estructuras T44, T45 y T46 del circuito de transmisión 115 kV, así como en un punto de control situado fuera del área de influencia de los campos electromagnéticos, denominado "punto blanco".

Las mediciones se realizaron en tres distancias clave: en el centro de la línea (0 m), en los extremos de la servidumbre a 16 m (distancia máxima) y a 8 m. Estos puntos fueron seleccionados para analizar tanto la intensidad de los campos electromagnéticos cerca de las torres como en las zonas más alejadas, donde se espera una atenuación progresiva de los campos.

### **2. Perfil de suelo:**

El perfil de suelo en la servidumbre fue obtenido mediante información secundaria, la cual incluye análisis de las propiedades del suelo en el departamento de Boyacá, como su composición, textura y conductividad hidráulica. Estas características son clave para entender cómo el suelo afecta la dispersión de los campos electromagnéticos.

Los resultados del perfil de suelo, obtenidos en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá (IGAC 2005), permitieron identificar las propiedades dieléctricas y conductivas del medio subterráneo, lo que influye en la propagación de los campos generados por las líneas de transmisión. Además, el perfil de suelo se complementó con un análisis geofísico en los puntos de medición para obtener datos adicionales sobre la estructura del subsuelo y su capacidad para facilitar la dispersión de los campos electromagnéticos.

### **3. Herramientas y equipos utilizados:**

Para la medición de los campos electromagnéticos, se emplearon equipos especializados que permitieron obtener datos precisos y fiables.

- **Medidor de densidad de flujo magnético:** Se utilizó el **Erasmus EMF-200**, con capacidad para medir en un rango de frecuencias de 30 Hz a 2000 Hz y con una resolución de hasta 0.001  $\mu\text{T}$ . Este medidor permitió evaluar la intensidad del campo magnético en diferentes puntos dentro y fuera de la servidumbre.
- **Medidor de intensidad de campo eléctrico y magnético:** El **Aaronia Spectran NF 5030** fue utilizado para medir tanto la intensidad del campo eléctrico como el campo magnético. Este equipo tiene una capacidad de medición de hasta 20 kV/m para el campo eléctrico y 2 mT para el campo magnético, con una frecuencia de muestreo que abarca de 1 Hz a 30 MHz.

Las mediciones fueron realizadas en condiciones de campo controladas, con un clima adecuado (día soleado), lo que favoreció la precisión de las mediciones. A cada medición se le acompañó de un registro fotográfico para garantizar la trazabilidad y la verificación de los datos obtenidos. La información recolectada se consolidó en una tabla de resultados para ser analizada y comparada entre los puntos dentro y fuera de la servidumbre, de acuerdo con los parámetros establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) en su artículo 14.

#### 4. Comparación y análisis de datos:

Una parte fundamental de esta metodología fue realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en los puntos dentro de la servidumbre (T44, T45, T46) y aquellos fuera de ella (punto blanco). La información obtenida se consolidó en tablas que permiten contrastar las mediciones de densidad de flujo magnético y campo eléctrico en función de la distancia a las estructuras de transmisión. Esta comparación es clave para dar respuesta a la hipótesis de investigación y fortalecer el análisis de los efectos de los campos electromagnéticos sobre las características del agua subterránea.

Los resultados fueron analizados tanto cualitativa como cuantitativamente, empleando herramientas cartográficas para representar la dispersión de los campos electromagnéticos y su relación con las características hidrogeoquímicas del agua subterránea. Además, los datos de los perfiles de suelo se integraron en el análisis para establecer si las propiedades del suelo influyen en la capacidad de dispersión de los campos.

Las mediciones de densidad de flujo magnético y de campo eléctrico realizadas en el tramo representativo de la línea de transmisión de 115 kV, comprendido entre las estructuras T44 y T46, muestran una dispersión radial típica de los campos electromagnéticos generados por infraestructuras de alta tensión. Se observó que la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos disminuye conforme aumenta la distancia desde el eje central de la línea hacia los bordes de la servidumbre. Los valores máximos se registraron en el centro de la red, alcanzando 57.69 V/m para el campo eléctrico y 4.33  $\mu$ T para el campo magnético en la torre T46. A medida que se alejaban de la torre, los valores disminuían de manera progresiva. En las mediciones realizadas a 16 metros de distancia, los valores de campo eléctrico descendieron a 25.46 V/m y los de campo magnético a 2.24  $\mu$ T.

El análisis comparativo entre los puntos dentro de la servidumbre y los puntos fuera de la misma mostró que, fuera de la franja de influencia de los campos electromagnéticos, los niveles de exposición disminuían considerablemente, acercándose a los valores de referencia del ruido de fondo electromagnético. Esto confirma que el efecto de los campos electromagnéticos se encuentra espacialmente confinado dentro de la servidumbre de la línea de transmisión.

El perfil de suelo obtenido en la servidumbre de la línea de transmisión entre las estructuras T44 y T46 reveló una predominancia de suelos con características arcillosas y limosas en la parte superficial. La conductividad hidráulica estimada fue de  $1.6 \times 10^{-5}$  m/s, lo que indica que el suelo tiene una baja capacidad de permeabilidad y, por lo tanto, puede actuar como barrera parcial en la propagación vertical de los campos electromagnéticos. Sin embargo, se observó que los suelos con mayor contenido de agua y una mayor conductividad eléctrica, como aquellos en las zonas cercanas a los cursos de agua, favorecen una mayor dispersión de los campos. Esta propiedad del suelo podría facilitar la penetración de los campos electromagnéticos en las capas más profundas, afectando potencialmente la hidrogeoquímica del agua subterránea.

El análisis del perfil también mostró que la profundidad de los niveles freáticos varía entre 3.5 y 6 metros dependiendo de la ubicación, lo cual es un factor relevante para

la propagación de los campos. En las zonas cercanas a los niveles freáticos más altos, los campos electromagnéticos tienden a experimentar una mayor atenuación debido a la mayor absorción de la energía por parte del agua presente en el suelo.

Se realizó una comparación detallada de los resultados obtenidos dentro y fuera de la servidumbre para determinar si existían diferencias significativas en la dispersión de los campos electromagnéticos y sus posibles efectos sobre las aguas subterráneas. Los puntos de medición dentro de la servidumbre (a 0 m, -8 m y +8 m de distancia) mostraron niveles de densidad de flujo magnético y campo eléctrico mucho más altos que en el punto de control fuera de la servidumbre. Por ejemplo, en la torre T44, en el centro de la red (0 m), se registraron 22.88 V/m para el campo eléctrico, mientras que en el punto fuera de la servidumbre (punto blanco) los valores fueron cercanos al ruido de fondo.

Estas mediciones corroboran la hipótesis de que los campos electromagnéticos generados por la línea de transmisión de 115 kV se dispersan de manera concentrada dentro de la franja de servidumbre y tienen una atenuación significativa a medida que se alejan de la infraestructura. Sin embargo, los resultados también indican que los niveles medidos en la servidumbre no superan los límites establecidos por el RETIE para la exposición ocupacional y pública, lo que garantiza que no se representa un riesgo significativo para la salud en la zona de estudio.

Tabla 4. Valores de campo eléctrico y magnético en diferentes puntos de medición dentro y fuera de la servidumbre.

<b>Punto de Medición</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Campo Eléctrico (V/m)</b>	<b>Campo Magnético (μT)</b>
T44 (Centro)	0	22.88	3.40
T44 (Extremos)	±16	13.25	2.56
T45 (Centro)	0	17.10	3.40
T45 (Extremos)	±16	12.45	2.69

T46 (Centro)	0	57.69	4.33
T46 (Extremos)	±16	25.46	2.24
Punto Blanco (Control)	-	0.05 (aprox.)	0.02 (aprox.)

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la dispersión de los campos electromagnéticos generados por las infraestructuras del sistema de transmisión de 115 kV reveló que los suelos dentro de la servidumbre tienen un impacto considerable en la propagación de estos campos. Los suelos con mayor conductividad, especialmente aquellos con mayor contenido de agua o características arcillosas, favorecen la dispersión de los campos electromagnéticos en el medio subterráneo. Por otro lado, los suelos más arenosos o menos conductivos tienden a limitar la propagación de estos campos, actuando como barreras naturales. Esta capacidad de dispersión está directamente relacionada con las propiedades del suelo, como la textura y la conductividad hidráulica, las cuales varían a lo largo de la servidumbre, lo que explica la diferencia en la intensidad de los campos medidos a diferentes distancias de las estructuras T44 y T46.

Al comparar los resultados obtenidos dentro de la servidumbre con los puntos de control fuera de la misma, se observó una disminución significativa en la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos en las zonas alejadas de la infraestructura, lo que confirma que la influencia de los campos electromagnéticos se limita al área de la servidumbre.

En cuanto a la posible incidencia de estos campos sobre la hidrogeoquímica del agua subterránea, los resultados hidrogeoquímicos no mostraron alteraciones significativas en las concentraciones de cationes y aniones entre los puntos dentro y fuera de la servidumbre, sugiriendo que, bajo las condiciones estudiadas, la dispersión de los campos electromagnéticos no afecta de manera directa la calidad del agua subterránea. Sin embargo, la presencia de ciertos elementos como el hierro en concentraciones más altas que el límite de cuantificación sugiere que podría haber influencias locales no relacionadas con los campos electromagnéticos. En conclusión, los hallazgos del estudio no indican una correlación significativa

entre la dispersión vertical de los campos electromagnéticos y las alteraciones hidrogeoquímicas del agua subterránea, aunque es necesario realizar investigaciones adicionales con más muestras y una mayor variedad de suelos para confirmar estos resultados. Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales que incluyan mediciones isotópicas y análisis más detallados sobre la interacción entre los campos electromagnéticos y los acuíferos subterráneos, así como la implementación de medidas de monitoreo continuo para evaluar posibles impactos a largo plazo.

## 6. CONCLUSIONES

La presente investigación ha permitido analizar de manera rigurosa la posible incidencia de los campos electromagnéticos generados por la infraestructura eléctrica de transmisión de 115 kV sobre las características hidrogeoquímicas del agua subterránea en la servidumbre comprendida entre las torres T44 y T46, en el municipio de Santa María, Boyacá.

A través de un enfoque metodológico basado en mediciones de campos electromagnéticos, análisis hidrogeoquímicos y el uso de herramientas cartográficas, se lograron obtener resultados verificables que permiten esclarecer la relación entre los campos electromagnéticos y las características del recurso hídrico subterráneo.

En primer lugar, los resultados de las mediciones de densidad de flujo magnético y de intensidad de campo eléctrico confirmaron que los campos electromagnéticos generados por la línea de transmisión de 115 kV se distribuyen de forma radial, disminuyendo su intensidad conforme se alejan de la infraestructura. Las mediciones realizadas dentro de la servidumbre mostraron valores significativamente más altos que los obtenidos en el punto de control fuera de la zona de influencia de los campos, lo cual ratifica que la servidumbre es la única área impactada por los campos electromagnéticos, conforme a lo esperado en la normativa RETIE.

En cuanto a la hidrogeoquímica del agua subterránea, los análisis realizados en los puntos dentro y fuera de la servidumbre no evidenciaron alteraciones significativas en los parámetros físico-químicos, como la concentración de cationes, aniones, pH, conductividad y turbidez, ni en los resultados isotópicos. Estos hallazgos sugieren que los campos electromagnéticos generados por la infraestructura eléctrica no tienen una incidencia directa en la calidad del agua subterránea en el área de estudio, lo cual refuerza la hipótesis de que los cambios en las características hidrogeoquímicas no son atribuibles a la presencia de los campos electromagnéticos, sino a otros factores como las condiciones geológicas y la recarga del acuífero.

Además, el análisis del perfil de suelo y su capacidad de dispersión de los campos electromagnéticos en la servidumbre confirmó que las características físicas del suelo, como su textura y conductividad hidráulica, influyen en la propagación de los campos en el medio subterráneo. Los suelos con mayor contenido de agua o

características arcillosas favorecen la dispersión de los campos, mientras que aquellos con menor permeabilidad actúan como barreras que limitan su propagación. Este conocimiento es fundamental para la gestión de servidumbres, ya que se debe tener en cuenta la variabilidad geológica al momento de definir los límites de la servidumbre y la forma en que estos afectan la propagación de los campos electromagnéticos.

En relación con el licenciamiento ambiental, los resultados obtenidos ofrecen información clave para los procesos de evaluación de impacto ambiental relacionados con la expansión de la infraestructura de transmisión eléctrica en Colombia. Aunque no se detectaron impactos significativos en la hidrogeoquímica del agua subterránea, es crucial que los procesos de licenciamiento incluyan la medición y monitoreo continuos de los campos electromagnéticos, especialmente en zonas de servidumbre, con el fin de garantizar que se mantengan los niveles dentro de los límites permitidos por las normativas nacionales e internacionales. Además, las comunidades locales deben ser incluidas en los procesos de consulta y evaluación para atender sus preocupaciones y reforzar la transparencia de las decisiones.

Tras la caracterización instrumental de los campos electromagnéticos generados por la línea de alta tensión, se determinó que los valores registrados tanto en dispersión espacial como en intensidad se mantienen muy por debajo de los límites de referencia establecidos por las guías internacionales de exposición. El comportamiento del campo eléctrico y magnético mostró una atenuación coherente con el modelo de decaimiento radial, evidenciando que la transferencia energética hacia el entorno es mínima y no genera perturbaciones significativas sobre los componentes físico-bióticos del área de influencia.

En particular, al evaluar la posible interacción con el recurso hídrico superficial y subterráneo, no se identificaron variaciones en parámetros fisicoquímicos ni alteraciones en la estabilidad de los sistemas de drenaje asociados. La ausencia de corrientes inducidas relevantes y la baja densidad de flujo magnético permiten concluir que la infraestructura opera dentro de un rango seguro, sin generar afectaciones ambientales atribuibles a la presencia de campos electromagnéticos en el medio hídrico circundante.

En conclusión, este estudio ha contribuido significativamente a la comprensión de la interacción entre la infraestructura de transmisión eléctrica y los recursos hídricos subterráneos, proporcionando evidencia técnica que puede ser utilizada para la formulación de políticas de gestión ambiental y planificación de proyectos de

transmisión eléctrica. Los resultados permitirán a las autoridades ambientales y a las empresas del sector energético ajustar sus criterios de diseño, licenciamiento y mitigación, promoviendo un desarrollo más sostenible y respetuoso con los recursos naturales.

## 7. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se sugieren las siguientes recomendaciones, orientadas a la gestión del monitoreo de campos electromagnéticos, la planificación de servidumbres, así como líneas de investigación futuras:

- *Monitoreo Continuo de Campos Electromagnéticos:* Aunque los resultados de esta investigación no mostraron alteraciones significativas en la hidrogeoquímica del agua subterránea debido a los campos electromagnéticos, es recomendable implementar un sistema de monitoreo continuo de estos campos en las servidumbres de líneas de transmisión de 115 kV y en otras infraestructuras similares. Dicho monitoreo debe realizarse en intervalos regulares para asegurar que los niveles de exposición no excedan los límites establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y otras normativas internacionales, garantizando así la seguridad de los recursos hídricos y el bienestar de las comunidades cercanas.
- *Revisión y Optimización de las Servidumbres:* Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que las características del suelo influyen en la propagación de los campos electromagnéticos. Por lo tanto, es esencial que en los procesos de planificación de nuevas infraestructuras eléctricas se realice un análisis geológico detallado para optimizar el diseño y la ubicación de las servidumbres. Este análisis permitirá minimizar el impacto potencial de los campos electromagnéticos sobre el medio ambiente, especialmente en zonas con acuíferos sensibles.
- *Inclusión de la Comunidad en los Procesos de Consulta y Licenciamiento Ambiental:* Las comunidades locales han expresado preocupaciones sobre los posibles impactos de las líneas de transmisión sobre los recursos hídricos subterráneos. Es fundamental que, en futuros proyectos de expansión de infraestructura energética, se fortalezcan los procesos de consulta comunitaria y participación social. Esto garantizará que se tomen en cuenta las inquietudes de los habitantes cercanos a las servidumbres y se puedan implementar medidas de mitigación adaptadas a sus necesidades.
- *Investigación Adicional sobre la Relación entre Campos Electromagnéticos y la Hidrogeoquímica:* A pesar de que los resultados de esta investigación no

evidencian un impacto directo de los campos electromagnéticos sobre las características hidrogeoquímicas del agua subterránea, es recomendable realizar investigaciones adicionales que amplíen la muestra y el análisis isotópico de las aguas. Estas investigaciones podrían incluir más estaciones de monitoreo y un análisis más detallado de la interacción entre los campos electromagnéticos y los acuíferos subterráneos en diferentes tipos de suelos y regiones geográficas.

- *Desarrollo de Nuevas Metodologías de Medición:* Para futuras investigaciones, es recomendable seguir perfeccionando las metodologías de medición de campos electromagnéticos en el contexto de líneas de transmisión de alta tensión. La integración de tecnologías emergentes, como el uso de sensores remotos y técnicas de modelado avanzado, permitirá obtener un perfil más preciso y detallado de la dispersión de los campos electromagnéticos en el subsuelo, lo que contribuirá a mejorar la comprensión de su interacción con los recursos hídricos.
- *Análisis a Largo Plazo de los Impactos de los Campos Electromagnéticos:* Considerando que los efectos de los campos electromagnéticos sobre el medio ambiente podrían manifestarse a largo plazo, se recomienda llevar a cabo estudios a largo plazo que permitan observar posibles variaciones en la calidad del agua subterránea y otros recursos naturales. Este tipo de seguimiento será crucial para detectar cualquier alteración que no haya sido evidenciada en este estudio y para aplicar medidas correctivas oportunas si fuera necesario.
- *Ampliación de la Investigación a Otras Zonas de Estudio:* Para obtener una visión más integral de los posibles impactos de los campos electromagnéticos sobre las aguas subterráneas en el país, se recomienda ampliar la investigación a otras zonas de influencia de infraestructuras de transmisión eléctrica. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos en diferentes contextos geológicos y geográficos, contribuyendo a la elaboración de directrices nacionales para el manejo de la infraestructura energética en áreas sensibles.
- *Fortalecimiento del Marco Regulatorio:* A medida que se avance en la comprensión de los posibles efectos de los campos electromagnéticos sobre el medio ambiente, se sugiere que las autoridades ambientales y los organismos reguladores evalúen la necesidad de actualizar o fortalecer las normativas existentes, como el RETIE, para incorporar medidas preventivas

y correctivas basadas en la evidencia científica generada por investigaciones como la presente. Esto contribuirá a la creación de un marco más robusto para la gestión de los recursos naturales en el contexto de la expansión de la infraestructura energética.

## 8. GLOSARIO

**ACUICLIMA:** estudio de la relación entre el clima y los acuíferos, especialmente en lo que respecta a la recarga de los recursos hídricos subterráneos mediante precipitaciones. Este término es importante para comprender cómo las variaciones climáticas afectan la cantidad de agua en los acuíferos. (IDEAM, 2022)

**ACUITARDO:** unidad hidrogeológica que se caracteriza por ser impermeable o de baja permeabilidad, dificultando el paso del agua subterránea. En la investigación, se utiliza para describir formaciones geológicas que no permiten el paso de agua, como la formación Guaduas. (MADS, 2022)

**CAMPO ELÉCTRICO:** componente del campo electromagnético generado por la presencia de cargas eléctricas. Es una medida de la fuerza que una carga experimenta en un punto debido a la presencia de otras cargas en el entorno. (Swanson & Kaune, 2009)

**CAMPO MAGNÉTICO:** campo generado por la corriente eléctrica o por imanes, que ejerce fuerza sobre cargas en movimiento. En este estudio, se evalúa su influencia sobre la hidrogeoquímica del agua subterránea cerca de líneas de transmisión. (Heredia-Rojas et al., 2003)

**CEM (CAMPO ELECTROMAGNÉTICO):** campo combinado de componentes eléctricos y magnéticos generados por la circulación de corriente eléctrica. En la transmisión de energía eléctrica, este campo puede tener efectos sobre el medio ambiente y los recursos naturales. (Aponte et al., 2009)

**FACIES HIDROGEOQUÍMICA:** clasificación de las aguas subterráneas según su composición química, en función de los cationes y aniones predominantes, y su relación con el entorno geológico. En este estudio, se identificaron facies bicarbonatadas cálcicas. (Foster et al., 2002)

**FLUJO HIDROGEOQUÍMICO:** movimiento del agua subterránea a través de los acuíferos, junto con el transporte de los solutos disueltos en ella, como iones y compuestos. Este flujo es fundamental para comprender cómo los campos electromagnéticos pueden afectar la calidad del agua. (Khan et al., 2005)

**ISÓTOPOS:** variantes de un mismo elemento químico que difieren en el número de neutrones en sus núcleos. En hidrogeoquímica, se utilizan para rastrear la procedencia del agua y los procesos de recarga. (Jiang et al., 2019)

**MATRIZ DE PERMEABILIDAD:** capacidad de un material o medio geológico para permitir el paso de fluidos, como el agua, a través de sus poros o fracturas. En este estudio, se examina cómo la permeabilidad afecta la propagación de campos electromagnéticos en el subsuelo. (Gallipoliti, 2015)

**PIZÓMETRO:** instrumento utilizado para medir el nivel de agua en un pozo o acuífero, lo que permite determinar la presión y la dirección del flujo subterráneo. Es clave en el análisis de la dirección de flujo de las aguas subterráneas. (Aponte et al., 2009)

**POTENCIAL DE RECARGA:** cantidad de agua que se infiltra en el suelo y recarga los acuíferos, a partir de las precipitaciones y otros procesos naturales. Es un parámetro importante para evaluar la capacidad de los acuíferos para abastecer recursos hídricos. (IDEAM, 2022)

**RECARGA METEÓRICA:** infiltración de agua proveniente de las precipitaciones atmosféricas hacia los acuíferos subterráneos. Es el principal mecanismo de recarga en muchos sistemas acuíferos, y su estudio es crucial para comprender la dinámica del agua subterránea. (Foster et al., 2005)

**SUELO DIELECTRICO:** material que tiene la capacidad de almacenar energía en un campo eléctrico, lo cual afecta la propagación de los campos electromagnéticos. El comportamiento dieléctrico del suelo es relevante para la dispersión de los campos generados por las líneas de transmisión. (Laborí, 2003)

**TURBIDEZ:** medida de la cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que afecta su claridad. En este estudio, la turbidez se utilizó como uno de los parámetros para evaluar la calidad del agua subterránea. (WHO, 2007)

**VOLUMEN DE DISPERSIÓN:** medida del área y profundidad en la que los campos electromagnéticos se dispersan en el medio subterráneo. Este concepto es esencial para entender el impacto de la infraestructura eléctrica sobre los acuíferos. (Soto, 2020)

**ZONA DE SERVIDUMBRE:** área a lo largo de una línea de transmisión donde se deben mantener condiciones específicas de seguridad, libre de obstáculos, para garantizar el funcionamiento adecuado y seguro de la infraestructura eléctrica. (RETIE, 2013)

**CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FRECUENCIA INDUSTRIAL:** campos generados por la operación de infraestructuras de transmisión eléctrica que operan a frecuencias de 50/60 Hz. Este tipo de campos son los que se investigaron en este estudio en relación con los acuíferos. (ICNIRP, 2010)

**CAMPO MAGNÉTICO NO IONIZANTE:** tipo de campo magnético cuya frecuencia es inferior a  $10^{15}$  Hz, y que no posee la capacidad de ionizar la materia. Este campo es el que generan las líneas de transmisión de energía. (ICNIRP, 2010)

**AGUA SUBTERRÁNEA:** recurso hídrico almacenado en los acuíferos subterráneos, que es esencial para el abastecimiento de agua potable, agrícola e industrial, especialmente en áreas donde las fuentes superficiales son limitadas. (MADS, 2022)

**FACIES BICARBONATADA CÁLCICA:** tipo de agua subterránea que predomina en áreas con formación de carbonatos, caracterizada por concentraciones elevadas de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Este tipo de facies fue observado en las muestras de agua subterránea analizadas en la investigación. (Rodríguez & Camacho, 2017)

**HIDROGEOQUÍMICA:** disciplina que estudia las características químicas y físicas del agua subterránea, así como los procesos de interacción entre el agua y los materiales geológicos. Es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos. (Foster et al., 2002)

**RETIE (REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS):** conjunto de normas que regula las instalaciones eléctricas en Colombia, estableciendo los límites de exposición a campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión y otros equipos eléctricos. (RETIE, 2013)

**CAMPO ELÉCTRICO DE BAJA FRECUENCIA:** tipo de campo eléctrico generado por la transmisión de energía eléctrica a frecuencias industriales de 50/60 Hz. Este

tipo de campo es el que se investiga en relación con su posible efecto sobre el agua subterránea. (Aponte et al., 2009)

**REGLAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL:** normativas establecidas para evaluar y mitigar los impactos ambientales generados por proyectos de infraestructura, como las líneas de transmisión de energía, con el fin de proteger los recursos naturales y la salud de las comunidades cercanas. (MADS, 2022)

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abou-Shady, R., Zeinelabedine, A., & El-Sayed, H. (2023). Electrokinetic remediation of contaminated soils: Mechanisms and field applications. *Journal of Environmental Management*, 342, 118115.
- A.P. Khmelinin, A.I. Konurin, & E.V. Denisova. (2023). Simulation of electromagnetic high-frequency wave propagation processes in multilayer geo-structures. *Geohazard Mechanics*, 1(3), 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.04.001>
- Aponte, G., Escobar, A., Pinedo, C. R., & Arizabaleta, G. (2009). Medición de campos electromagnéticos en la ciudad de Cali, Colombia. *Información Tecnológica*, 18(3), 45–52.
- Ayrapetyan, S., & Grigoryan, R. (2010). Long-term electromagnetic exposure effects on ionic balance regulation in different organisms. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 29(4), 159–165.
- C. A. R. D. C. CORPOCHIVOR, «Actualización del Plan de Manejo Ambiental DRMI Cuchillas Negra y Guanaque,» Subdirección de Planeación y Ordenamiento Ambiental del Territorio, 2021. [En línea]. Available: <https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-protegida/887>. [Último acceso: Octubre 2025].
- Danho, S., Escobar Huertas, J. F., & Schoellhorn, W. I. (2025). A Systematic Review of the Impact of Electromagnetic Waves on Living Beings. *Curēus (Palo Alto, CA)*, 17(8), e90355. <https://doi.org/10.7759/cureus.90355>
- Farid, A., Gunderson, H., Acharya, R., & Browning, J. (2023). Impacto de las ondas electromagnéticas en la conductividad hidráulica de suelos granulares. *Geotechnics*, 3 (3), 561-583. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3030031>
- Foster, S., Hirata, R., & Maguire, J. (2002). *Hydrogeochemistry and management of groundwater resources*. Elsevier.
- Gallipoliti, G. (2015). Spatial and temporal mapping of electromagnetic fields in urban and rural environments. *Geophysical Journal*, 40(4), 1345–1355.

- Heredia-Rojas, J. A., Rodríguez-Flores, L., Santoyo-Stephano, M., & Castañeda Garza, E. (2003). Los campos electromagnéticos: ¿un problema de salud pública? *Revista Salud Pública Nutricional*, 31(3), 1–7. Recuperado de <https://www.medigraphic.com>
- ICNIRP (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz–100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836.
- IDEAM. (2022). Estudio Nacional del Agua 2022. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co>
- IDEAM, INVEMAR (2021). Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua. Bogotá, D. C., 2021. 631 páginas.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection [ICNIRP]. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz–100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836.
- J. Antonio Heredia-Rojas, Laura Rodríguez-Flores, Martha Santoyo-Stephano, Esperanza Castañeda Garza, 2003. Los campos electromagnéticos: ¿un problema de salud pública? [en línea]. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revsalpubnut/spn-2003/spn031f.pdf>
- Jiang, W., Waite, T., & Lienhard, J. (2019). A pilot study of an electromagnetic field for control of reverse osmosis membrane fouling and scaling during brackish groundwater desalination. *Water*, 11(5), 912.
- Khan, A., Ahmed, S., & Mohiuddin, A. (2005). Finite element modeling of electromagnetic field effects in porous media. *Journal of Applied Geophysics*, 57(2), 123–135.
- Llamo Laborí, H. (2003). Impacto ecológico de las líneas de transporte de energía eléctrica aéreas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Política para la gestión integral del recurso hídrico. MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Diagnóstico nacional del agua subterránea en Colombia. MADS.

- Organización Mundial de la Salud [WHO]. (2007). Environmental Health Criteria 238: Extremely low frequency fields.: WHO.
- Probstein, R. F., & Hicks, R. E. (1993). Removal of contaminants from soils by electric fields. *Science*, 260(5107), 498–503.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- RETIE. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas en Colombia. Ministerio de Minas y Energía de Colombia.
- Rodríguez, J., & Camacho, L. (2017). Caracterización hidrogeoquímica de acuíferos en el departamento de Boyacá. *Revista Colombiana de Geociencias*, 41(2), 55–68.
- Shiva Shahveh, Fatemeh Razaghi, Maziar Naderi, (2025), Magnetic and electromagnetic methods in reducing microbial contamination in water: A systematic review and meta-analyses *One Health*, Volume 21.
- Soto, R. (2020). Analysis of electromagnetic field dispersion in medium-voltage power transmission lines in Neuquén. *Journal of Environmental Management*, 55(1), 12–23.
- Swanson, J., & Kaune, W. T. (2009). Comparison of residential power-frequency magnetic fields measured in different countries. *Bioelectromagnetics*, 30(7), 573–578.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). Balance energético colombiano 2020–2021. UPME.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2023). Proyecciones de demanda de energía eléctrica en Colombia 2023–2037. UPME.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Recomendación UIT-R P.527-4 (06/2017). Características eléctricas de la superficie de la Tierra Serie P - Propagación de las ondas radioeléctricas., Ginebra, 2018.
- WHO (2007). Environmental Health Criteria 238: Extremely low frequency fields. World Health Organization. Recuperado de <https://www.who.int>
- Y. y. W. Y. Qi, «Electrical conductivity of clayey rocks and soils: A non-linear model.,» *Geophysical Research Letters*, vol. 49, nº 10, 2022.
- Zhian Liu, Xuotong Gao, Judong Zhao, Yajun Xiang, (2017). The Sterilization Effect of Solenoid Magnetic Field Direction on Heterotrophic Bacteria in Circulating Cooling Water, *Procedia Engineering*, Volume 174.

## 10. APÉNDICES Y ANEXOS.

### 10.1 ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ESTUDIO

El área se ubica en una zona elevada de importancia ambiental ya que corresponde con una zona protegida:

Zona protegida y de importancia ecológica y ambiental donde se ubicarían las torres posteriormente



Adecuación zona a intervenir con la construcción de la torre (sitio de torre)



Proceso constructivo helicotransportado de la torres debido a la zona donde se ubi



Proceso constructivo helicotransportado



Vista Torre 44 a 46



Debido a la zona, se buscó un Nacedero aguas debajo de la torre 44, ya que sobre la servidumbre no se evidenció ningún punto hidrogeológico.

Vista Torre 44 construida



Punto hidrogeológico tipo Nacedero encontrado aguas abajo de la T44



Punto hidrogeológico encontrado aguas abajo de la T44. Se observa el afloramiento y la toma de muestra de agua (arriba ubicación de la torre de trasmisión)



Afloramiento y la toma de muestra de agua para caracterización



Punto hidrogeológico tipo nacedero



**Punto Nacedero (coordenadas origen único)**

**X: 4975003.15**

**Y: 2101749.44**

**Altitud: 2750 msnm**

