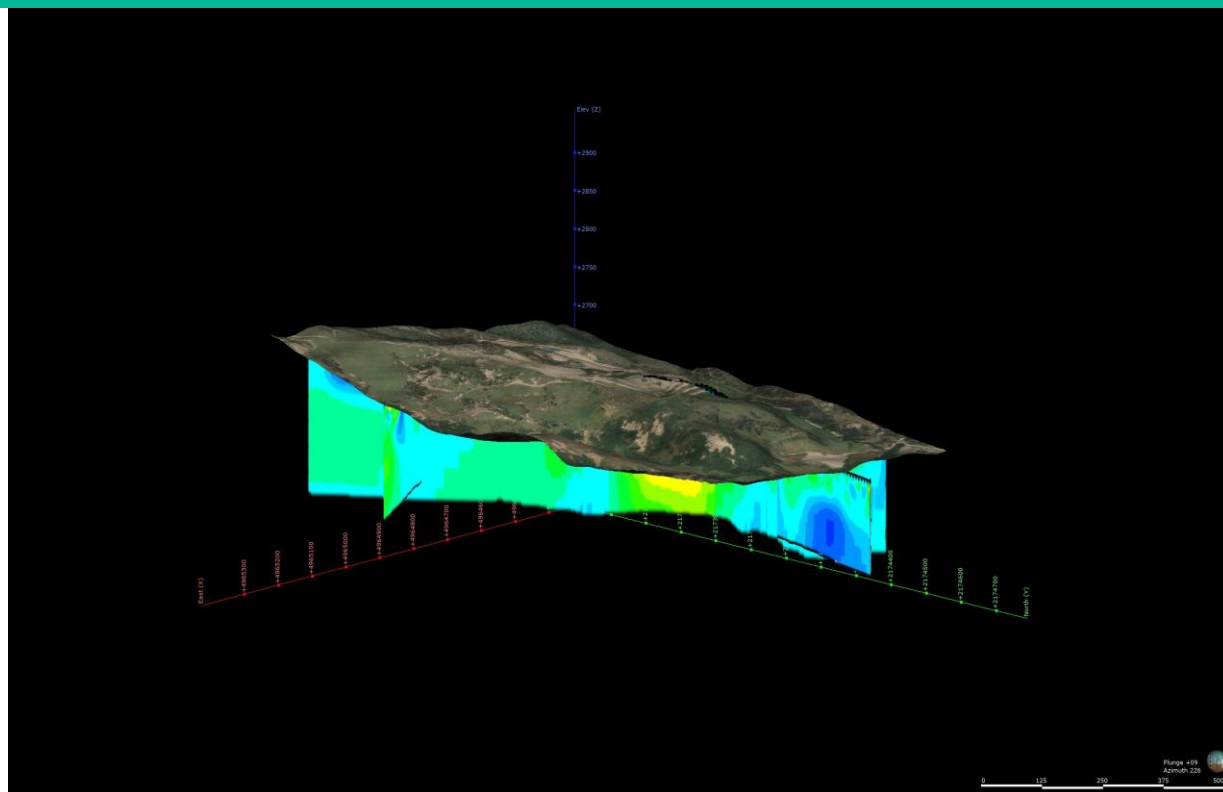
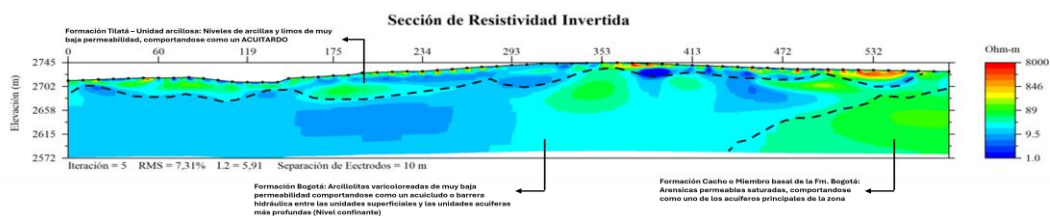




MODELO HIDROGEOLÓGICO

Parque Tecnológico y Ambiental de Pírgua

Tunja, Boyacá — Colombia



Elaborado por

I N G E O M A D

Fecha

2 0 2 6

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 2 de 105

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	7
1.1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	8
1.2.1.	General.....	8
1.2.2.	Específicos	8
1.3.	LOCALIZACIÓN	9
1.4.	ANTECEDENTES	13
2.	MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.	MARCO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO	15
2.2.	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	16
2.3.	FUNDAMENTOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA APLICADA A HIDROGEOLOGÍA 17	
2.3.1.	Principios generales de la Tomografía Eléctrica	18
2.3.2.	Principios generales del Sondeo Magnetotelúrico.....	23
3.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDROCLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
3.1.	GEOMORFOLOGÍA Y FISIOGRAFÍA.....	26
3.2.	CLIMATOLOGÍA.....	27
3.3.	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....	28
3.3.1.	Red de drenaje y drenajes locales.....	28
3.3.2.	Régimen de escorrentía superficial.....	29
3.3.3.	Intermitencia de los cauces y relación con el agua subterránea	29
3.3.4.	Influencia de los suelos y la pendiente.....	30
3.3.5.	Manejo antrópico del drenaje.....	30
4.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA	30
4.1.	CONTEXTO GEOLÓGICO	31
4.1.1.	Marco estructural regional	33
4.1.2.	Estratigrafía y litología	34
4.2.	CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL	41
5.	EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	42
5.1.	TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS.....	42

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 3 de 105

5.1.1.	Malla de adquisición de tomografías eléctricas	42
5.1.2.	Equipo y parámetros de adquisición de tomografías.....	45
5.1.3.	Resultados e interpretación	46
5.2.	SONDEOS MAGNETOTELÚRICOS	54
5.2.1.	Malla de adquisición de sondeos magnetotelúricos	54
5.2.2.	Equipo y parámetros de adquisición de Sondeos MT	58
5.2.3.	Resultados e interpretación	61
6.	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	65
6.1.	RED DE PUNTOS EVALUADOS EN LA CAMPAÑA ACTUAL	66
6.2.	ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA EN LA CAMPAÑA ACTUAL	67
7.	ANÁLISIS PIEZOMETRICO	71
7.1.	Análisis piezométrico campañas 2023 y 2026	73
8.	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	76
8.1.1.	Conductividad hidráulica y permeabilidad	77
8.1.2.	Interpretación hidráulica integrada y esquema de flujo subterráneo	79
9.	ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA	80
10.	ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO	82
11.	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	86
11.1.	INTRODUCCIÓN AL MODELO CONCEPTUAL	86
11.2.	MODELO GEOLÓGICO - MARCO HIDROESTRATIGRÁFICO DEL SISTEMA	86
11.3.	COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y NIVELES PIEZOMÉTRICOS.....	94
11.4.	DIRECCIONES DE FLUJO Y DINÁMICA DEL SISTEMA.....	95
11.5.	INTEGRACIÓN CON RESULTADOS GEOFÍSICOS	95
11.6.	SÍNTESIS CONCEPTUAL DEL MODELO	96
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	104
14.	ANEXOS	105

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 4 de 105

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1. Localización general del Parque Tecnológico Ambiental PIRGUA.	10
Figura 1-2. Definición de áreas de estudio y área de influencia hidrogeológica en el Parque Ambiental PIRGUA.	12
Figura 2-1. Tipos de arreglo para adquisición geoelectrica.	20
Figura 2-2. Inyección de corriente (Electrodos de Corriente y Voltaje).	21
Figura 2-3. Arreglo eléctrico de dos electrodos de potencial y dos electrodos de corriente.	22
Figura 2-4. Configuración típica adquisición de Sondeo Magnetotelúrico	23
Figura 4-1. Geología regional	32
Figura 4-2. Formación Tilatá – Material plástico.	33
Figura 4-3. Formación Cacho	34
Figura 4-4. Formación Bogotá	35
Figura 4-5. Columna estratigráfica de Formación Bogotá – Formación Cacho.	36
Figura 4-6. Columna estratigráfica de depósitos Cuaternarios – Formación Tilatá.	38
Figura 4-7. Geología local.	40
Figura 5-1. Malla de adquisición Tomografías Eléctricas	43
Figura 5-2. Fotografía Adquisición / Tomografías eléctricas – Parque tecnológico y ambiental de Pírgua.	44
Figura 5-3. Fotografía Adquisición / Tomografías eléctricas - Parque tecnológico ambiental Pírgua.	45
Figura 5-4. Equipo utilizado para la adquisición de tomografías eléctricas.	46
Figura 5-5. Resistividades de Geomateriales	47
Figura 5-6. Diagrama esquemático de sedimentos y escala de Udden-Wentworth.	48
Figura 5-7. Escala de resistividad eléctrica utilizada en interpretación de tomografías	49
Figura 5-8. Tomografía 01 - Parque tecnológico Parque tecnológico ambiental Pírgua.	51
Figura 5-9. Tomografía 02 - Parque tecnológico Parque tecnológico ambiental Pírgua.	52
Figura 5-10. Tomografía 03 - Parque tecnológico Parque ambiental Pírgua.	53
Figura 5-11. Ubicación de MTs adquiridos en área de interés	56
Figura 5-12. Esquema de perfiles MT	57
Figura 5-13. Equipo utilizado para la adquisición de sondeos MT – PTA Pírgua.	59
Figura 5-14. Curva raw, sin procesamiento de adquisición MT02a	60
Figura 5-15. Parámetros de adquisición y mapa preliminar.	61
Figura 5-16. Escala de resistividad empleada sondeos MT – PTA Pírgua	62
Figura 5-17. Interpretación de Perfil 1 Magnetotelúrico	63
Figura 5-18. Interpretación de Perfil 2 Magnetotelúrico	64
Figura 6-1. Fotografía de inventario de puntos agua.	65
Figura 6-2. Inventario de puntos de agua actualizado.	68
Figura 7-1. Mapa de isopiezas del área de estudio.	73
Figura 7-2. Mapa de isopiezas del área del Parque ambiental de PIRGUA 2023.	75

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 5 de 105

Figura 8-1. Mapa de perforaciones 2023 – puntos de pruebas Slug, PMD-1 – PA24 y PMR-1-PA15.....	78
Figura 9-1. Mapa de recarga del área de interés	81
Figura 9-2. Recarga y descarga del sistema Acuífero de Tunja	82
Figura 10-1. Vulnerabilidad metodología GOD – Zona de estudio hidrosuelos 2016 – Parque Ambiental Pírgua	83
Figura 10-2. Vulnerabilidad metodología DRASTIC – Zona de estudio hidrosuelos 2016 – Parque Ambiental Pírgua	85
Figura 11-1. Modelo geológico local	87
Figura 11-2. Formación Tilatá – excavaciones.....	88
Figura 11-3. Afloramiento local – Formación Tilatá	89
Figura 11-4. Recorte Tomografías 1-2-3, zona operativa.....	89
Figura 11-5. Mapa de unidades hidrogeológicas final	93
Figura 11-6. Perfil hidrogeológico	94
Figura 11-7. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA	97
Figura 11-8. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA - BLOQUEDIAGRAMA.....	98
Figura 11-9. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA – piezometría vista en dirección SW	99
Figura 11-10. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA – piezometría vista en dirección NE	99
Figura 11-11. Modelo hidrogeológico conceptual área de operación	101

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 6 de 105

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1. Valores de K para las principales configuraciones electródicas	19
Tabla 5-1. Coordenadas Electroodos – Tomografías Eléctricas.....	44
Tabla 5-2. Características / Tomografías eléctricas – Parque tecnológico ambiental Pírgua... 45	45
Tabla 5-3. Características / Tomografías eléctricas.	46
Tabla 5-4. Coordenadas de Sondeos MT - PTA Pírgua	58
Tabla 5-5. Parámetros de inversión conjunta 2D.	62
Tabla 6-1. Inventario y monitoreo de Visita de Campo INGEOMAD 2026	66
Tabla 6-2. Resumen inventario de puntos de agua.....	69
Tabla 7-1. Niveles estáticos – campaña 2026.....	71
Tabla 8-1. Parámetros hidráulicas pruebas Slug-2023.....	77
Tabla 11-1. Unidades hidrogeológicas del área de estudio.....	91

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 7 de 105

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y operación de infraestructuras para la disposición final de residuos sólidos exige una comprensión detallada del entorno hidrogeológico, particularmente cuando estas se localizan en áreas con presencia de acuíferos regionales. En este sentido, el Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua se emplaza en un contexto geológico e hidrogeológico complejo, asociado al sistema acuífero regional de Tunja, lo que ha motivado la realización de múltiples estudios técnicos, procesos de seguimiento ambiental y actuaciones administrativas por parte de la autoridad competente.

Diversos estudios hidrogeológicos como El plan de manejo ambiental del acuífero de Tunja realizado por Corpoboyacá (2017-2020), El modelo hidrogeológico de Boyacá centro realizado por el Servicio Geológico Colombiano y Corpoboyacá (2014) y los modelos hidrogeológicos del parque realizados por Hidrosuelos (2016) e Inco (2021) se ha observado que la posición geográfica entre el relleno sanitario está en la estructura del acuífero de Tunja, este último se encuentra confinado a profundidades significativas, separado de la superficie por un paquete de formaciones arcillosas de muy baja permeabilidad (formaciones Tilatá y Bogotá), que se comportan como un acuitardo a escala regional. Esta condición geológica constituye una barrera natural que limita el flujo subterráneo dentro de estas y desde superficie, reduciendo sustancialmente el riesgo potencial de afectación del acuífero profundo.

No obstante, en el marco del seguimiento ambiental y de las medidas cautelares derivadas de la Acción Popular 2021-00424-00, la autoridad ambiental Corpoboyacá ha requerido la actualización y ajuste del modelo hidrogeológico conceptual local, enfatizando la necesidad de definir el área de influencia hidrogeológica del proyecto, la estratigrafía de la Formación Tilatá, el análisis estructural e integrando información de estudios previos como pruebas hidráulicas, piezometría local y la actualización inventario de puntos de agua.

En respuesta a estos requerimientos, y con base en la información geológica, geofísica, estratigráfica, piezométrica y de actualización de inventario de puntos de agua recientemente generada, el presente informe desarrolla el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio. Este modelo constituye una herramienta fundamental para interpretar el funcionamiento del sistema hidrogeológico local en el área del relleno sanitario.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 8 de 105

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1. General

Desarrollar y documentar un modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia del Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua, a partir de adquisición de información geofísica, reconocimientos de campo e información existente, que permita caracterizar el comportamiento del sistema hidrogeológico local, como soporte técnico para la gestión ambiental y el cumplimiento de los requerimientos de la autoridad ambiental, dando respuesta a la resolución 1972 de 2025 en los apartados relacionados a la actualización de los estudios hidrogeológicos.

1.2.2. Específicos

- Adquisición, procesamiento e interpretación de 8 sondeos magnetotélúricos y 4 líneas de tomografía eléctrica de resistividad, que permitan tener una imagen del subsuelo continua y a una profundidad considerable con el fin de evaluar hidrogeológicamente el área.
- Realizar la actualización del inventario de puntos de agua subterránea con el fin de observar y monitorear los puntos establecidos anteriormente e incorporar nuevos puntos construidos recientemente.
- Realizar visitas de campo de observación y control geológico que me permitan realizar la interpretación de la información y su correlación con la información existente y adquirida.
- Delimitar técnicamente el área de influencia hidrogeológica del proyecto, sin limitarse con el área de influencia ambiental general.
- Caracterizar el marco geológico e hidro estratigráfico del área de estudio, identificando las unidades litológicas relevantes y su papel en el comportamiento hidrogeológico del subsuelo, enfocándose en la Formación Tilatá determinando una estratigrafía local a partir de la información directa de campo, perforación y geofísica .
- Analizar la presencia, profundidad, continuidad y disposición estructural de los niveles acuíferos y acuitados, con énfasis en las formaciones Tilatá, Bogotá y Cacho, establecer su clasificación hidrogeológica en el sistema, determinando su comportamiento en la zona donde se ubica el relleno sanitario de Pírgua, determinando la presencia de barreras hidráulicas según la disposición de la unidades determinadas.
- Incorporar caracterización hidráulica de la Formación Tilatá a partir de la pruebas hidráulicas realizadas anteriormente y observar su comportamiento local frente al estudio regional del SGC de 2014.
- Definir el esquema conceptual de recarga, flujo y descarga del agua subterránea a escala local, incorporando la información del presente estudio e información existente, actualizando lo establecido en modelo hidrogeológicos anteriores y correlacionando dicho concepto con el Plan de manejo ambiental del Acuífero de Tunja (2017-2020).

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 9 de 105

- Integrar los resultados de análisis piezométrico como soporte del modelo conceptual y actualizar el inventario de puntos de agua establecido para realizar futuros monitoreos.

1.3. LOCALIZACIÓN

El área de estudio corresponde al sector donde se localiza el Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua, ubicado en jurisdicción del municipio de Tunja, departamento de Boyacá. El proyecto se encuentra emplazado en la zona rural del municipio y hace parte de la cuenca alta del río Chicamocha, dentro del contexto hidrográfico regional del altiplano Cundiboyacense. La localización del área de estudio se presenta en la Figura 1-1 , donde se indica la posición del proyecto, la delimitación del parque y las celdas de operación.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 10 de 105

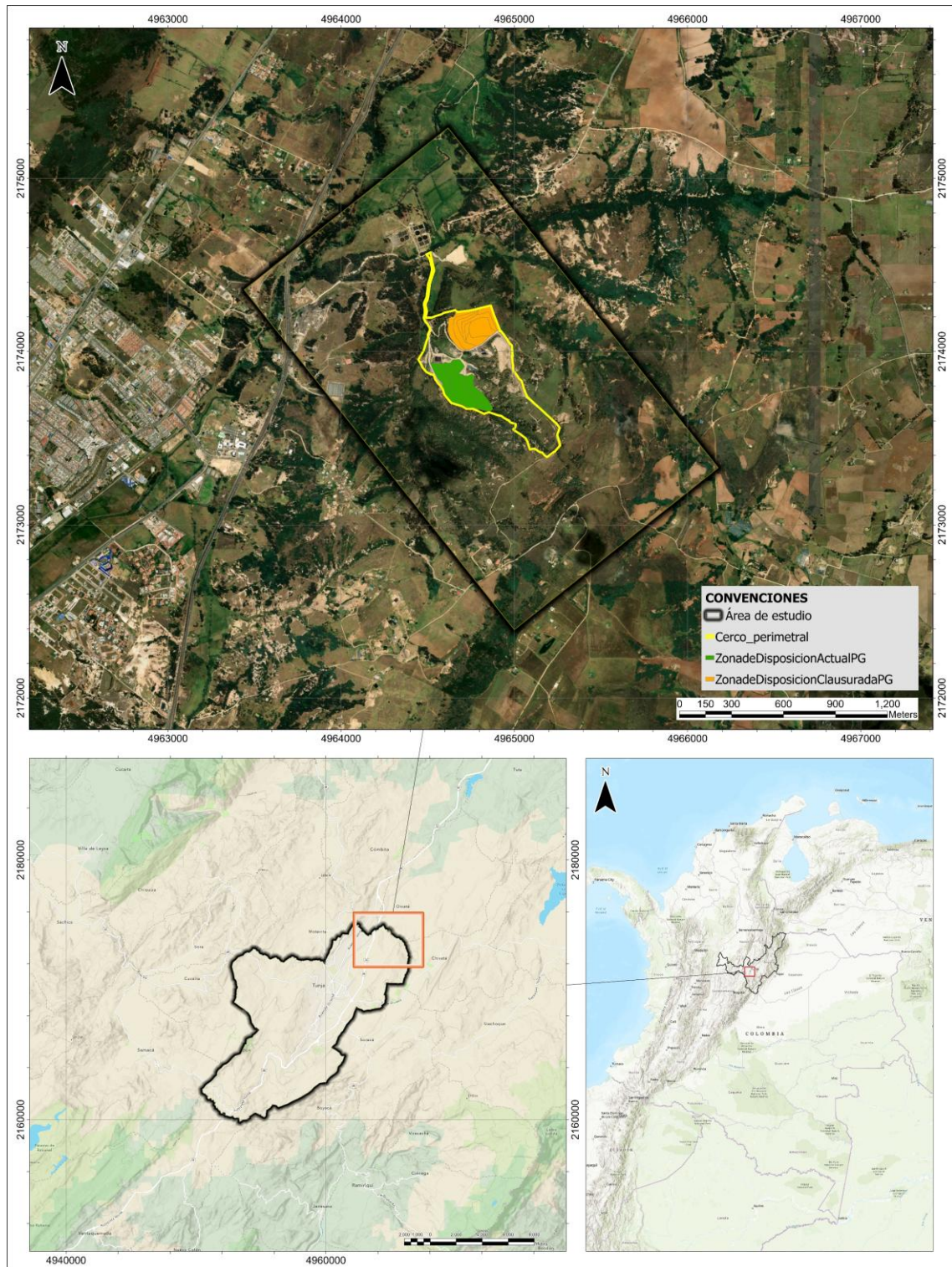


Figura 1-1. Localización general del Parque Tecnológico Ambiental PIRGUA.
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 11 de 105

A partir del desarrollo del estudio se genera la definición de 2 áreas claves para el desarrollo del documento, donde se establece el área de estudio y el área de estudio hidrogeológica o área de influencia hidrogeológica.

Donde el área de estudio hidrogeológica comprende un polígono rectangular limitado por las área del Valle del Rio Jordán, divisoria de aguas de las quebradas Salada y Cebollas y el eje del anticlinal de la secuencia plegada del sinclinal de Tunja, determinando esta geometría como la zona de estudio en la realización de las actividades en el marco del presente estudio hidrogeológico.

El área de influencia hidrogeológica o área de estudio hidrogeológica se define a partir de las observaciones de campo realizadas y de los resultados obtenidos en dicho estudio los cuales se irán desarrollando en el presente documento, dicha área se definió como:

- Limite Nor-este: Cauce de la quebrada Cebollas
- Limite Nor-oeste: Unión de las quebradas Salada y La Cebolla en el valle del Rio Jordán.
- Limite Suro-este: Cauce de la quebrada Salada
- Limite Sur-este: Eje del flanco oriental del Sinclinal de Tunja, en el contacto de la Formación Bogotá y la Formación Cacho.

Esta área de influencia hidrogeológica del parque fue determinada como los limites superficiales relevantes en el sistema hídrico superficial y subterráneo.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 12 de 105

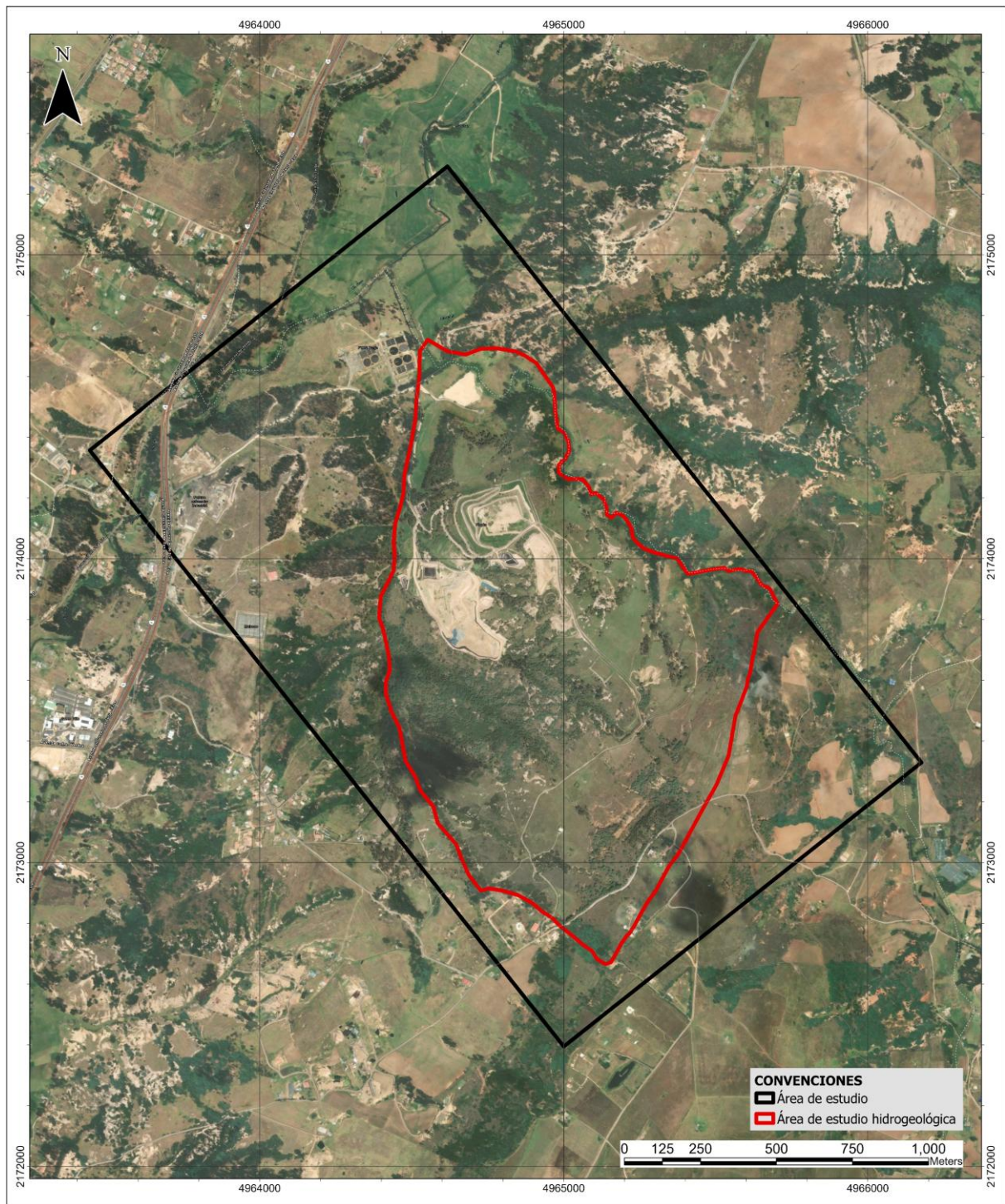


Figura 1-2. Definición de áreas de estudio y área de influencia hidrogeológica en el Parque Ambiental PIRGUA.
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 13 de 105

1.4. ANTECEDENTES

La elaboración y actualización de estudios hidrogeológicos en el área del Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua se enmarca en un conjunto de antecedentes legales, técnicos y administrativos que han condicionado el alcance y el nivel de detalle exigido actualmente por la autoridad ambiental. Estos antecedentes están asociados principalmente a procesos judiciales, al historial del licenciamiento ambiental del proyecto y a los resultados del seguimiento realizado por la autoridad competente, mencionando los siguientes documentos relevantes del proceso:

- Res.1970 Art.5 a–i
- Rad. 005010 (01/03/2023)
- Concepto INFSEG0208-25 (08/05/2025, num. 3.6.28)
- Auto 0399 (09/05/2023), Res. 1970 (requerimiento de ajuste),
- Res. 1599 (11/09/2020) (Plan Acuífero Tunja)
- Rad. 32998 (14/12/2023) (Piezometría 8 piezómetros)

Donde a partir de esta información se busca la integración de la información existente y junto con información adquirida, dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por la autoridades.

El antecedente más relevante corresponde a la Acción Popular No. 2021-00424-00, interpuesta con el propósito de proteger los derechos colectivos al medio ambiente sano y a la salubridad pública. En el marco de este proceso, se planteó como conflicto central la posible afectación del acuífero regional de Tunja por la operación del relleno sanitario. Como resultado, el Tribunal Administrativo de Boyacá ordenó en 2022 la adopción de una medida cautelar que obligó a la realización de estudios hidrogeológicos detallados, incluyendo la construcción de nuevos pozos de monitoreo y la revisión de los modelos hidrogeológicos existentes, con el fin de evaluar la existencia de conexión hidráulica y riesgos de contaminación del agua subterránea.

En cumplimiento de dicha orden judicial, se desarrollaron investigaciones técnicas especializadas y se contó con un peritaje independiente que concluyó que, aunque existe superposición geográfica entre el proyecto y el sistema acuífero regional, no se evidencia una conexión hidráulica directa entre las zonas operativas del relleno y el acuífero profundo, debido a la presencia de un espeso paquete de materiales de baja permeabilidad que actúan como barrera natural. Asimismo, se indicó que el riesgo de afectación del recurso hídrico subterráneo es prácticamente nulo, determinando que no hay evidencia concluyente de alguna afectación, debido a la heterogeneidad de los materiales, disposición estructural y flujos verticales muy improbables en las condiciones y alcances evaluados.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 14 de 105

De manera paralela, el proyecto ha operado históricamente bajo una Licencia Ambiental otorgada inicialmente en 1998, la cual ha sido objeto de múltiples modificaciones asociadas a cambios en el diseño, ampliaciones y variaciones en la titularidad. En 2021 se formalizó el cambio de titular de la licencia a Urbaser S.A. E.S.P., entidad responsable de la operación actual del relleno sanitario. Adicionalmente, en 2018 se otorgó el permiso de vertimientos para la descarga de aguas residuales tratadas al río Jordán, sujeto a condiciones específicas de control de caudal y calidad.

En el marco del licenciamiento ambiental y de la defensa técnica presentada durante la Acción Popular, el operador del sitio (Urbaser / Servigenerales) ha sustentado su posición en estudios hidrogeológicos desarrollados por firmas consultoras especializadas. Entre estos se destacan los trabajos realizados por **Hidrosuelos**, los cuales constituyen el soporte histórico y reciente del modelo hidrogeológico conceptual del área. En 2016, esta firma elaboró el primer modelo conceptual para Servigenerales S.A. E.S.P., incorporando inventario de puntos de agua, prospección geofísica mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) y ensayos de permeabilidad, concluyendo la presencia de materiales de muy baja permeabilidad en el subsuelo inmediato del proyecto. Posteriormente, en el periodo 2022–2023, Hidrosuelos ejecutó la construcción y puesta en operación de los pozos de monitoreo exigidos por el tribunal (PR1, PD1 y PD2) como respuesta a la medida cautelar, concluyendo en su informe sobre la incidencia del relleno que el acuífero profundo asociado a la Formación Cacho se encuentra a profundidades superiores a 80–100 m y separado del sitio por unidades arcillosas de carácter impermeable, por lo que no existiría una afectación directa derivada de la operación del relleno.

De manera complementaria, los estudios desarrollados por **INCO A&J S.A.S.** en 2021, en el marco de los estudios proyectados para presentar aprobación de Corpoboyacá en la actualización del Plan de Manejo Ambiental, aportaron una caracterización hidrogeológica local de mayor detalle espacial. Esta consultora elaboró el mapa hidrogeológico del área a escala 1:4.000 y redefinió las unidades geológicas e hidroestratigráficas relevantes para el proyecto. En su modelo conceptual, INCO clasificó la Formación Tilatá —unidad directamente subyacente al área de disposición— como un acuitardo regional, mientras que las formaciones infrayacentes, particularmente la Formación Bogotá, fueron interpretadas como acuíferos de porosidad secundaria asociados a fracturamiento. Dicha interpretación reforzó la hipótesis de una desconexión hidráulica vertical entre los residuos y el acuífero regional profundo, la cual ha sido utilizada por el operador como argumento central de seguridad hidrogeológica del sitio.

No obstante, en el ejercicio de sus funciones de seguimiento y control, Corpoboyacá ha identificado oportunidades de mejora técnicas para refinar el modelo hidrogeológico local, determinando una mejor delimitación del modelo y la integración de información existente. Estas observaciones quedaron consignadas de manera formal en la Resolución No. 1972 del 12 de junio de 2025.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 15 de 105

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

El agua subterránea corresponde a la fracción del recurso hídrico que se infiltra a través del suelo y las formaciones geológicas, almacenándose y circulando en los poros, fracturas o cavidades de los materiales del subsuelo. Su dinámica está controlada principalmente por las características físicas y estructurales de las unidades geológicas, así como por las condiciones de recarga, descarga y confinamiento. En el contexto del presente estudio, la comprensión del comportamiento del agua subterránea es fundamental para interpretar los procesos hidrogeológicos que ocurren en el área de interés.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el subsuelo se clasifica en unidades con diferente capacidad para almacenar y transmitir agua, denominadas unidades hidrogeológicas. Estas unidades determinan el flujo subterráneo y condicionan la disponibilidad y vulnerabilidad del recurso.

Un **acuífero** es una formación geológica que posee suficiente porosidad y permeabilidad para almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades aprovechables. Los acuíferos constituyen las principales unidades de interés hidrogeológico, ya que permiten el movimiento del agua bajo gradientes hidráulicos naturales y pueden alimentar manantiales, cuerpos de agua superficiales o captaciones subterráneas.

Un **acuitardo** corresponde a una unidad geológica de baja permeabilidad que, aunque puede almacenar agua, restringe significativamente su flujo. Estas unidades actúan como capas semiconfinantes, retardando el movimiento del agua subterránea entre acuíferos y controlando los tiempos de tránsito y la comunicación hidráulica vertical.

Un **acuicludo** o **acuífugo** es una formación geológica con permeabilidad muy baja o prácticamente nula, que impide el flujo significativo de agua subterránea. Su función principal es actuar como barrera hidráulica, limitando la circulación del agua y definiendo los límites de los sistemas acuíferos.

El comportamiento del agua subterránea dentro de estas unidades está gobernado por ciertas propiedades hidrogeológicas básicas. La **porosidad** representa la proporción de espacios vacíos dentro de un material geológico y determina su capacidad de almacenamiento. La **permeabilidad** define la facilidad con la que el agua puede circular a través de dichos espacios interconectados, mientras que la **transmisividad**, cuando aplica, expresa la capacidad de un acuífero para transmitir agua a lo largo de todo su espesor saturado.

En el área de estudio, estos conceptos permiten interpretar la relación entre las características geológicas del subsuelo y el comportamiento hidrogeológico observado, facilitando la identificación de zonas con mayor o menor capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea. Este marco conceptual constituye la base para el análisis hidrogeológico posterior

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 16 de 105

y para la evaluación de los procesos de recarga, flujo y posible interacción entre el agua subterránea y los cuerpos de agua superficiales presentes en el área.

2.2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual es una herramienta interpretativa que permite representar, de manera integrada y cualitativa, el funcionamiento del sistema de aguas subterráneas en un área determinada. Su formulación se basa en la síntesis coherente de la información geológica, hidrogeológica, hidrológica y geofísica disponible, con el fin de describir la disposición espacial de las unidades hidrogeológicas, sus relaciones hidráulicas y los procesos que controlan el almacenamiento y el flujo del agua subterránea. Este modelo constituye el marco de referencia fundamental para la interpretación del sistema y para la evaluación de posibles interacciones entre el medio subterráneo y las actividades antrópicas presentes en el área de estudio.

Desde una perspectiva conceptual, el modelo hidrogeológico no se limita a una descripción litológica del subsuelo, sino que incorpora el comportamiento hidráulico de los materiales. En este sentido, la definición de las unidades hidrogeológicas considera tanto su geometría y continuidad espacial como sus propiedades hidrodinámicas, las cuales condicionan la capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea. Entre los parámetros más relevantes se incluyen la conductividad hidráulica, la transmisividad y, de manera complementaria, el almacenamiento específico, los cuales permiten diferenciar unidades acuíferas de unidades de baja permeabilidad o acuitardos.

La construcción del modelo conceptual se apoya en la identificación de un conjunto limitado de componentes esenciales que permiten explicar el funcionamiento general del sistema hidrogeológico. De manera integrada, estos componentes corresponden a:

1. **Las unidades hidrogeológicas**, definidas a partir de su litología, continuidad lateral y vertical, y de sus propiedades hidrodinámicas, distinguiendo acuíferos y acuitardos.
2. **La geometría del sistema**, entendida como el arreglo espacial de las unidades, sus espesores aproximados y su relación estratigráfica.
3. **Las condiciones de recarga y descarga**, que controlan las entradas y salidas de agua subterránea dentro del sistema.
4. **El sentido general del flujo subterráneo**, condicionado por la topografía, la estructura geológica y los contrastes de permeabilidad entre las unidades.

La correcta definición de estos elementos permite establecer los límites conceptuales del sistema hidrogeológico, tanto en sentido horizontal como vertical junto a los criterios técnicos de delimitación del modelo. En contextos donde existen actividades potencialmente generadoras de impacto ambiental, como infraestructuras de disposición de residuos, el modelo conceptual resulta especialmente relevante para evaluar la existencia de rutas preferenciales de flujo y la potencial función de atenuación hidráulica de barreras naturales o construidas frente a la posible presencia de contaminantes.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 17 de 105

Los parámetros hidrodinámicos incorporados en el modelo conceptual se sustentan en información secundaria, resultados de ensayos hidráulicos y correlaciones con la exploración geofísica, la cual permite inferir contrastes de permeabilidad a partir de variaciones en las propiedades eléctricas del subsuelo. Aunque estos parámetros no se emplean en esta etapa para simulaciones numéricas, su inclusión es fundamental para respaldar la interpretación del comportamiento hidráulico del sistema y para reducir la incertidumbre asociada a la evaluación del riesgo hidrogeológico.

2.3. FUNDAMENTOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA APLICADA A HIDROGEOLOGÍA

La exploración geofísica constituye una herramienta fundamental para la delimitación y caracterización del subsuelo en estudios hidrogeológicos, que permite ser el soporte para definir unidades, límites y disposición de las estructuras correlacionándola con información directa. A partir de la medición de propiedades físicas del terreno y su variación espacial, los métodos geofísicos permiten inferir la geometría, continuidad y contraste entre las unidades geológicas, complementando la información obtenida mediante registros litológicos y ensayos hidráulicos.

En el ámbito hidrogeológico, la exploración geofísica no permite identificar de manera directa la presencia de agua subterránea ni cuantificar parámetros hidráulicos, pero sí aporta información clave sobre la distribución de materiales, la presencia de capas de baja o alta resistividad y la existencia de estructuras que pueden influir en el flujo subterráneo. Estas inferencias resultan particularmente útiles para delimitar unidades acuíferas y acuitardos, estimar espesores relativos y reconocer posibles zonas de confinamiento o barreras hidráulicas.

La correcta interpretación de los resultados geofísicos requiere su integración con el contexto geológico e hidrogeológico del área de estudio. En este sentido, los datos obtenidos mediante métodos eléctricos y electromagnéticos adquieren valor técnico cuando son correlacionados con información de pozos, registros de perforación y observaciones de campo, evitando interpretaciones aisladas o sobreestimaciones de su alcance. Bajo este enfoque, la exploración geofísica se incorpora como un componente complementario del modelo hidrogeológico conceptual, contribuyendo a realizar conceptos concluyentes y llegar a determinaciones de soporte para la caracterización del subsuelo y a fortalecer el análisis hidrogeológico.

La información geofísica es el componente principal del presente estudio con el fin de dar soporte y apoyo en la definición de los niveles hidro estratigráficos, disposición estructural, geometría de la unidades y sus posibles rutas de flujo y la delimitación del modelo, correlacionándola con información existente directa, esta información juega un papel importante al combinar dos métodos de resistividad generando una cobertura continua y amplia con el fin de observar la unidades de manera más controlada y precisa.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 18 de 105

2.3.1. Principios generales de la Tomografía Eléctrica

Cuando se introduce corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno). La conducción electrolítica es el modo de propagación más importante, y en el que se basa los métodos de resistividad.

En un semiespacio homogéneo e isótropo de resistividad ρ , y sometido a una intensidad I , el valor del potencial V de un punto situado a una distancia r con respecto a un electrodo puntual es:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi}$$

Partiendo de la expresión, para una disposición electródica como la mostrada anteriormente, el potencial medido por los electrodos de medida M y N será:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right]; V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]$$

Por lo que la diferencia de potencial ΔV_{MN} entre ambos puntos será:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]$$

Si ahora se despeja ρ , se obtiene el valor de la resistividad para el punto medio del dispositivo. La resistividad no es más que una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso por un material determinado.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K$$

En donde ρ a se mide en Ohmios-metro, I en Amperios, y V en Voltios. El término K es el “factor de penetración” o “coeficiente del dispositivo” y dependerá de las distancias entre los electrodos (

Tabla 2-1).

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]}$$

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 19 de 105

Tabla 2-1. Valores de K para las principales configuraciones electródicas

Arreglo	Factor K
Wenner	$K=2 \pi a$
Schlumberger	$K= ((b+a)^2 - a^2) / a$
Wenner-Schlumberger	$K= \pi n (n+1)a$

Fuente: Orellana 1982

Ahora bien, la resistividad calculada en general corresponderá a la resistividad aparente del terreno y no a la resistividad real. Ello se debe a que el subsuelo está compuesto generalmente por distintos materiales, por lo que el campo eléctrico introducido en el terreno afectará simultáneamente a diversas capas, de forma que la resistividad medida corresponderá a un valor intermedio de todas ellas. Solo para suelos homogéneos o para profundidades de investigación muy superficiales, el valor de resistividad medido coincidirá con el de la resistividad real.

El cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza a través de técnicas de inversión utilizando un sistema iterativo, tal que el modelo de resistividades aparentes que generaría sea lo más similar posible a la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo.

– Método de tomografía de resistividad eléctrica

La Tomografía eléctrica (Electrical Resistivity Tomography; ERT) es un método de resistividad multielectródico que se basa en obtener modelos 2D y 3D de la resistividad del terreno. Esta técnica de exploración tiene un amplio abanico de aplicaciones: en geología, en geotecnia, en hidrogeología o medioambiente.

El procedimiento para obtener los modelos de resistividad del terreno consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente al subsuelo y medir la diferencia de potencial entre dos puntos. El proceso se repite en toda el área de inspección y, una vez obtenidas estas medidas se dispone de una distribución de resistividades experimentales a lo largo del subsuelo. Dado que el subsuelo es heterogéneo, este conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real, sino que representa una amalgama de ellas; el cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza a través de técnicas de inversión utilizando un sistema iterativo.

En las distintas configuraciones de adquisición existentes, dos electrodos son usados para inyectar una determinada intensidad de corriente en el suelo (electrodos A y B) y dos electrodos para medir la diferencia de potencial (electrodos M y N). La correlación entre la corriente inyectada, la diferencia de potencial medida y un coeficiente geométrico relativo a la disposición de los 4 electrodos determina el valor de la resistividad aparente en el sitio. Este valor de

resistividad aparente corresponde a una cierta profundidad en función de la separación entre los electrodos y configuración usada (**Figura 2-1**).

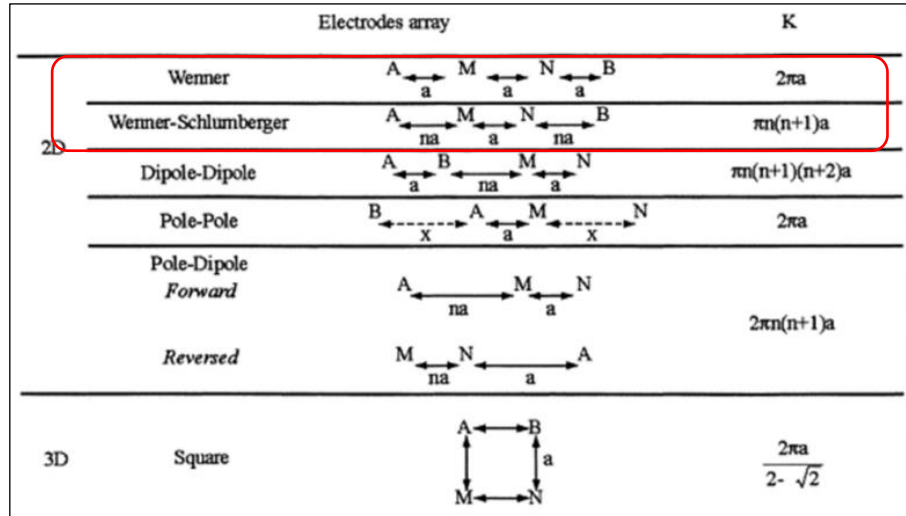


Figura 2-1. Tipos de arreglo para adquisición geoelectrica.
Fuente: Geophysical Exploration, Philip Kearey.

Se estudia a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se inyecta una corriente eléctrica y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, siendo el resultado, datos de resistividades aparentes. Se caracteriza por ser una técnica de resistividad multielectródica, cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objetivo de estudio.

Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica. Imagen que será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del subsuelo.

Este método geofísico fue desarrollado para la investigación de áreas de geología compleja (Griffiths, 1993). Su aplicación es diversa, como en la exploración de recursos naturales y actualmente en numerosas aplicaciones ambientales, hidrogeológicas, arqueológicas y geotécnicas.

El principio físico en el que se basa esta metodología está relacionado con el siguiente concepto: mediante un dispositivo electródico, se inyecta una corriente estacionaria a través de un par de electrodos puntuales [C1 y C2], y se lee la diferencia de potencial entre otro par de electrodos [P1 y P2]. La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad aparente que depende de la resistencia de los materiales presentes en el subsuelo (**Figura 2-2**).

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 21 de 105

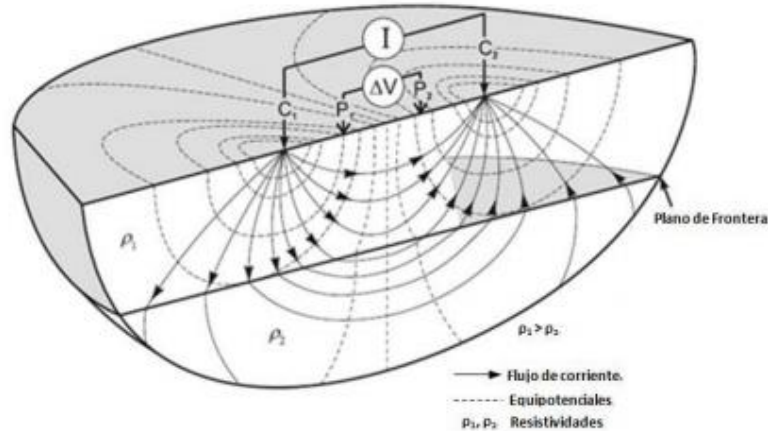


Figura 2-2. Inyección de corriente (Electrodos de Corriente y Voltaje).
Fuente: Orellana, 1982.

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell (Orellana, 1982; Telford, 1992)

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r})}{\partial t} \quad ; \quad \text{Ley de Faraday}$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r})}{\partial t} \quad ; \quad \text{Ley de Ampere}$$

Para el caso de prospección eléctrica se considera un campo estacionario, por tanto, las derivadas temporales se anulan, quedando expresadas las ecuaciones:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r})$$

La ecuación, nos indica que se trata de un campo conservativo e irrotacional, puede ser descrito mediante el gradiente de una función escalar, en este caso el potencial U .

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r})$$

En la práctica se utilizan al menos dos electrodos en la superficie, uno positivo que inyecta corriente al subsuelo y a su vez uno negativo que colecta la corriente de regreso. Además, los valores de potencial tienen un patrón simétrico con respecto al punto medio entre los electrodos.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 22 de 105

Sin embargo, prácticamente todos los estudios se realizan con un arreglo geométrico de cuatro o más electrodos, como la tomografía eléctrica que se caracteriza por ser multielectródica, que finalmente están basados en el mismo principio.

El arreglo geométrico consta de dos electrodos por donde se inyecta la corriente, llamados C1, C2 y dos electrodos P1, P2 que miden el potencial. La configuración geométrica puede variar dependiendo del objetivo, lo cual se explicará más adelante.

Al tener dos electrodos de potencial P1 y P2, la diferencia de potencial se expresa como en función del arreglo geométrico (Figura 2-3).

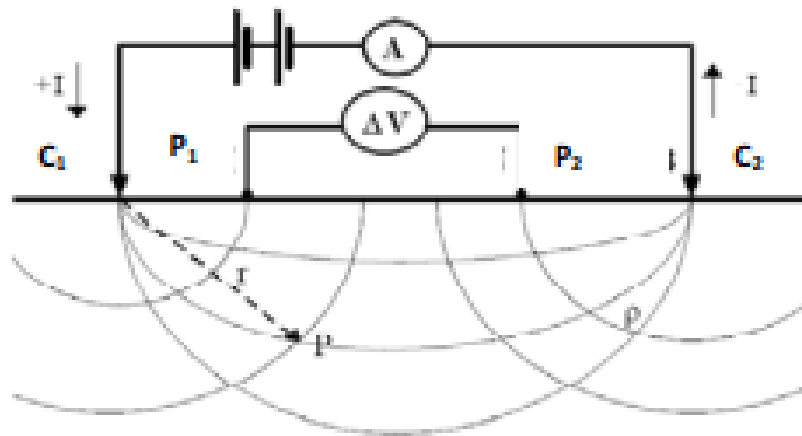


Figura 2-3. Arreglo eléctrico de dos electrodos de potencial y dos electrodos de corriente.
Fuente: Orellana, 1982.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right).$$

De acuerdo con la Ley de Ohm se resuelve para la resistividad:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} [\Omega \cdot m] \quad \dots\dots\dots$$

$$\text{donde } k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right)}$$

De la ecuación anterior ρ_a representa la resistividad aparente y k el factor geométrico.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 23 de 105

Los valores de resistividad obtenidos en un medio heterogéneo son llamados de resistividad aparente, ρ_a [$\Omega \cdot m$]. Esta se define dividiendo el voltaje recibido por la corriente y multiplicado por el factor geométrico.

Para explicar el concepto de resistividad aparente, supondremos dos cuerpos de diferente resistividad en el semiespacio. Para poder detectarlos midiendo la diferencia de potencial en diferentes posiciones sobre la superficie $z=0$, la resistividad obtenida no será constante y tampoco tendrá el valor solo de alguno de los cuerpos. Se debe a que el campo eléctrico total del semiespacio es la suma del campo eléctrico primario y los campos secundarios generados por las diferentes heterogeneidades que se presenten, reflejándose en el potencial medido.

El factor geométrico k , determina el comportamiento del dispositivo, que representa el “alejamiento” del campo eléctrico respecto a la fuente que lo genera, mostrado en la ecuación anterior. Además, la resistividad medida será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian, es el principio de reciprocidad, que se cumple tanto en un medio homogéneo como heterogéneo (Orellana,1982).

2.3.2. Principios generales del Sondeo Magnetotelúrico

Un sondeo MT consiste en la medición de las tres componentes del campo magnético H_x , H_y y H_z y de las componentes horizontales del campo eléctrico E_x y E_y . Estas componentes se miden en la forma de series de tiempo individuales que son transformadas al dominio de la frecuencia (H_x , H_y , H_z , E_x , y E_y).

Magnetotelluric (Passive EM)

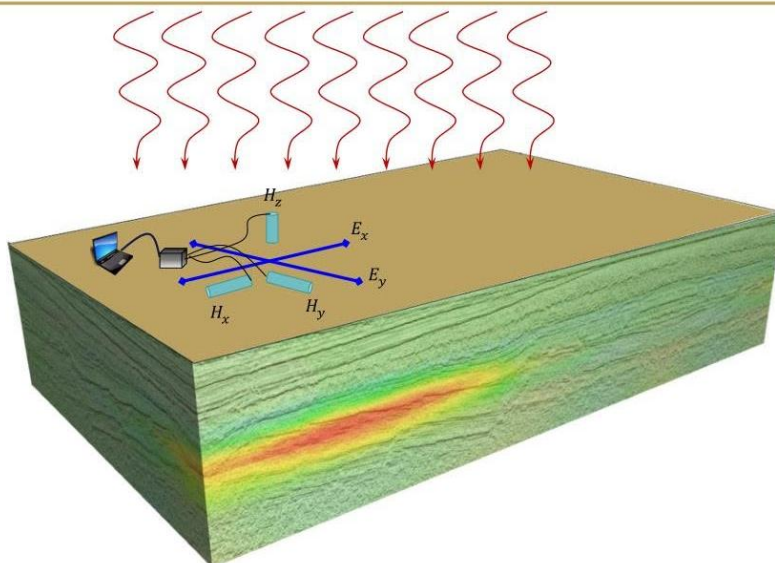


Figura 2-4. Configuración típica adquisición de Sondeo Magnetotelúrico
Fuente: The University of Queensland

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 24 de 105

Luego de hacer las transformaciones anteriores se aplica una convolución de dos señales, en donde se multiplican dos funciones de campo eléctrico y magnético, una función desplazada un pequeño intervalo de tiempo respecto a la otra y luego se suman sus productos. A partir de esta operación se obtiene lo que se denomina cross- correlation o —correlación cruzada, la cual se considera mejor cuando el producto es grande (próximo a la unidad) y es cero cuando no existe similitud entre las señales. La correlación cruzada en el dominio de frecuencias recibirá el nombre de cross-powers o productos cruzados. Esta correlación es sumamente útil para determinar una señal conocida dentro de una señal —ruidosa, ya que maximiza la señal respecto a los ruidos al hacer el producto (Simpson, 2005).

El tensor de impedancia Z , que es el operador que relaciona de forma lineal las componentes horizontales del campo eléctrico (E) y del campo magnético (H), se relaciona a través de la ecuación:

$$E = Z.H$$

Que, como se describió anteriormente, en forma matricial se expresa como:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

Los elementos del tensor Z_{ij} se calculan como promedios en diferentes bandas de frecuencias a partir de los productos cruzados entre las componentes del campo relacionadas utilizando las siguientes ecuaciones (Madden y Nelson, 1964):

$$\begin{aligned} \langle E_x H_y^* \rangle &= Z_{xx} \langle H_x H_y^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y H_y^* \rangle \\ \langle E_x H_x^* \rangle &= Z_{xx} \langle H_x H_x^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y H_x^* \rangle \\ \langle E_y H_y^* \rangle &= Z_{yy} \langle H_y H_y^* \rangle + Z_{yx} \langle H_x H_y^* \rangle \\ \langle E_y H_x^* \rangle &= Z_{yy} \langle H_y H_x^* \rangle + Z_{yx} \langle H_x H_x^* \rangle \end{aligned}$$

En donde H_x^* y H_y^* son los complejos conjugados de H_x y H_y . En este sistema de ecuaciones las componentes Z_{ij} son las incógnitas en tanto que las componentes horizontales del campo, medidas en superficie, son los coeficientes.

A partir de la estimación de la impedancia para cada una de las frecuencias analizadas, se procede a calcular las resistividades y los ángulos de fase correspondientes utilizando las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \rho_{ij}(\omega) &= \left(\frac{1}{\omega \mu} \right) |Z_{ij}(\omega)|^2 \\ \varphi_{ij}(\omega) &= \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} Z_{ij}(\omega)}{\text{Re} Z_{ij}(\omega)} \right) \end{aligned}$$

($i, j = x$ o y , e Im y Re son las partes imaginaria y real de Z_{ij} respectivamente).

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 25 de 105

Estrictamente hablando, a partir de los cuatro elementos del tensor de impedancia es posible obtener cuatro resistividades del medio (ρ_{xx} , ρ_{xy} , ρ_{yy} , y ρ_{yx}) y sus correspondientes fases (ϕ_{xx} , ϕ_{xy} , ϕ_{yy} , y ϕ_{yx}) con las cuales es posible evaluar la estructura del subsuelo en el sitio de medición (Simpson, 2005).

Sin embargo, es posible hacer simplificaciones basadas en la naturaleza resistiva del medio. El caso más simple es el de un medio homogéneo o unidimensional (1D), que geológicamente puede corresponder a una cuenca sedimentaria estable o una plataforma marina, en donde Z tiene la forma:

$$Z_{1D} = \begin{bmatrix} 0 & -Z_n \\ -Z_n & 0 \end{bmatrix}$$

En este caso hay solamente un valor de resistividad ρ_a y uno de fase ϕ_a para cada frecuencia, los cuales dependen solamente de variaciones verticales de la conductividad del subsuelo.

Cuando el medio es bidimensional (2D), pueden ocurrir dos casos, según si la dirección de las estructuras coincide o no con el sistema de referencia de la medición. Si la medición se lleva a cabo en la dirección de los ejes principales, es decir a lo largo y perpendicularmente a una estructura resistiva regional (por ejemplo, un plano de falla), entonces el tensor de impedancia está representado por:

$$Z_{2D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

De acuerdo con lo anterior, se definen dos resistividades y dos fases: una a lo largo de la estructura regional y la otra perpendicular a ésta. Esto determina dos modos de polarización de los campos, uno cuando el flujo de corriente máximo (mínima resistividad) es paralelo a la estructura regional, el cual se define como el modo Transverso Eléctrico (TE); y otro, cuando el flujo magnético máximo es paralelo a la estructura, el modo de polarización se conoce como Transverso Magnético (TM). Si el eje coordenado en el que fue realizado el sondeo no coincide con los ejes de la estructura regional principal entonces el tensor Z tiene que ser girado a los ejes principales utilizando:

$$Z = RZ_m R^T$$

Con

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

En donde R es el operador de rotación y R^T su transpuesta, Z_m es la impedancia medida en un sistema de referencia diferente al de la estructura principal y el ángulo θ corresponde al acimut del rumbo regional de dicha estructura. Lo anterior si las mediciones fueron realizadas a lo largo de los ejes magnéticos NS y EW.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 26 de 105

Cuando la distorsión de los campos es importante (debido a la presencia de estructuras más complejas o 3D), entonces hay otros métodos para probar si el sondeo puede todavía ser considerado o no como 2D.

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDROCLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La caracterización física del área de estudio establece el contexto territorial y ambiental de la zona de estudio analizada y dentro de ella la zona de estudio hidrogeológica o zona de influencia hidrogeológica definida (1.3 LOCALIZACIÓN). En este capítulo se describen los principales rasgos fisiográficos, geomorfológicos y climáticos que influyen en los procesos hidrológicos superficiales.

3.1. GEOMORFOLOGÍA Y FISIOGRAFÍA

La geomorfología y fisiografía del área donde se localiza el Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua están estrechamente condicionadas por el contexto estructural regional y por la dinámica de los drenajes superficiales que han modelado el relieve. El área se enmarca en el flanco oriental del Sinclinal de Tunja, una estructura geológica amplia de geometría cóncava y orientación general suroeste–noreste. Esta configuración estructural ejerce un control directo sobre la topografía, la disposición de las geoformas y el patrón de drenaje superficial, en el área de estudio determinada (1.3 LOCALIZACIÓN).

El relieve presenta una topografía variable, controlada principalmente por la competencia mecánica de las unidades geológicas aflorantes. En las zonas topográficamente más altas predominan relieves más abruptos, asociados a unidades arenosas más competentes, mientras que en el sector donde se desarrollan las terrazas del relleno sanitario se observan formas suavizadas, correspondientes a materiales finos de comportamiento plástico. En términos generales, se identifican zonas planas a suavemente onduladas, con pendientes entre 0 y 6 %, asociadas a depósitos cuaternarios y superficies de terraza, así como sectores de ladera con pendientes superiores al 18 %, donde se favorecen procesos de escorrentía superficial y erosión. Desde el punto de vista geomorfológico, en el área de influencia se reconocen tres tipos principales de formas del terreno que explican la configuración actual del paisaje:

1. **Laderas y colinas denudacionales**, desarrolladas predominantemente sobre la Formación Tilatá, compuesta por arcillas y limos con intercalaciones arenosas locales. Estas geoformas corresponden a la mayor parte del área del proyecto y han sido modificadas de manera significativa por actividades antrópicas asociadas a la conformación de terrazas y celdas del relleno sanitario. En los taludes de corte, estos materiales se comportan como suelos residuales de alta plasticidad, susceptibles a procesos de erosión hídrica, evidenciados por la presencia de cárcavas en sectores desprotegidos.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 27 de 105

2. **Escarpes rocosos**, localizados principalmente en el sector nororiental del área de estudio, donde afloran bancos de areniscas friables de la Formación Bogotá y niveles arenosos basales de la Formación Tilatá. Estas geoformas generan relieves más abruptos y se desarrollan de manera subparalela a algunos cauces superficiales, marcando contrastes topográficos claros respecto a las zonas de ladera arcillosa.
3. **Valles y planicies aluviales**, correspondientes a las zonas topográficamente más bajas, asociadas a depósitos fluvio-lacustres cuaternarios. Estas áreas actúan como zonas de acumulación de materiales transportados desde las partes altas y presentan una mayor susceptibilidad a inundaciones temporales durante periodos de lluvias intensas, debido a su baja pendiente y posición topográfica.

La relación entre el relieve, la litología y el drenaje superficial favorece un patrón de escurrimiento desde las zonas altas hacia los valles aluviales. La predominancia de materiales finos de baja permeabilidad en las laderas promueve la escorrentía superficial frente a la infiltración profunda, dirigiendo rápidamente el agua lluvia hacia los cauces naturales. Esta condición geomorfológica resulta relevante para la comprensión de los procesos hidrológicos superficiales y para la contextualización del análisis hidrogeológico desarrollado en los capítulos posteriores.

3.2. CLIMATOLOGÍA

La caracterización climatológica del área de estudio se realizó a partir de información secundaria proveniente de registros meteorológicos disponibles para la región de Tunja donde se encuentra el Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua. Esta caracterización tiene como objetivo describir las condiciones generales de precipitación y evaporación que condicionan los procesos hidrológicos superficiales, sin desarrollar estimaciones formales de balance hídrico ni de recarga subterránea.

La información climática se fundamenta principalmente en los registros de la estación meteorológica UPTC (código 24035130), en los registros históricos comprendidos hasta el año 2016 (Hidrosuelos, 2016), estación la cual es administrada por el IDEAM y localizada a una altitud aproximada de 2.690 m s. n. m., la cual se considera representativa para el área del proyecto debido a su cercanía espacial y similitud en altitud.

El régimen de precipitación anual presenta un comportamiento característico de la región andina, con una distribución bimodal bien definida. La precipitación media anual es del orden de 647,9 mm, valor que indica una oferta hídrica moderada a baja en términos regionales. Los periodos de mayor precipitación se concentran durante los meses de abril y octubre, con valores medios mensuales cercanos a 90 mm, extendiéndose parcialmente hacia mayo y noviembre. En contraste, los meses de enero, febrero y diciembre registran las menores precipitaciones, con valores inferiores a 35 mm, evidenciando periodos secos marcados a lo largo del año.

Un rasgo climático relevante del área es la elevada evaporación potencial en relación con la precipitación recibida. Los registros indican una evaporación anual aproximada de 1.258 mm, medida mediante tanque clase A, lo que supera ampliamente la precipitación total anual. Esta relación genera un déficit hídrico persistente durante gran parte del año, reflejando una alta

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 28 de 105

demanda evaporativa de la atmósfera, asociada a condiciones de radiación solar elevada propias de la alta montaña, pese a temperaturas medias relativamente bajas.

Desde el punto de vista hidrológico superficial, esta combinación de baja precipitación efectiva y alta evaporación condiciona una respuesta rápida del sistema ante eventos de lluvia. Estudios previos estiman que una proporción significativa de la precipitación anual se transforma en escorrentía superficial, debido a la baja capacidad de infiltración inmediata de los suelos arcillosos y a la presencia de pendientes moderadas a altas en sectores del área de estudio. Esta condición explica el carácter predominantemente intermitente de los drenajes locales, los cuales presentan caudales únicamente durante o inmediatamente después de eventos de precipitación.

En conjunto, el clima del área de Pírgua se caracteriza por un régimen de lluvias bimodal, una oferta hídrica anual limitada y un déficit hídrico marcado, factores que favorecen la escorrentía superficial frente a la infiltración profunda. Estas condiciones climáticas constituyen un elemento de contexto para la interpretación del funcionamiento hidrológico superficial y su relación con el sistema hidrogeológico.

3.3. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

Las condiciones hidrológicas superficiales del área del Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua están controladas principalmente por la ocurrencia de precipitaciones concentradas en eventos discretos. Estas condiciones favorecen una **respuesta hidrológica rápida**, dominada por escorrentía superficial directa y por la presencia de drenajes de carácter intermitente.

Desde el punto de vista regional, el área de estudio hace parte de la cuenca alta del **Río Chicamocha**, específicamente de la subcuenca del río Jordán (también conocido como río Chulo), la cual define el nivel base regional del sistema de drenaje. A escala local, el predio del relleno se encuentra drenado por microcuencas de corto recorrido, cuya dinámica está estrechamente vinculada a la precipitación y a las condiciones físicas del terreno.

3.3.1. Red de drenaje y drenajes locales

El sistema de drenaje superficial que influye directamente sobre el proyecto está conformado por dos cauces principales de carácter local:

- **Quebrada La Salada**, localizada al occidente y suroccidente del área del proyecto, constituye el drenaje más cercano al parque y presenta una dirección general de flujo hacia el noroccidente, drenaje de corto recorrido y flujo intermitente, iniciando en la misma ladera del parque (límite sur occidental del área de estudio o influencia hidrogeológica).
- **Quebrada La Cebolla**, ubicada al oriente y noreste del área de influencia, recibe las escorrentías del costado oriental del predio y drena hacia el sistema mayor en dirección predominante al nororiente, drenaje que proviene de las zonas más altas de la estructura de la zona del parque, con flujo continuo (límite nororiental del área de estudio o influencia hidrogeológica).

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 29 de 105

Ambos drenajes corresponden a cauces de baja jerarquía, de muy poca longitud de recorrido, con cuencas de aporte reducidas y alta sensibilidad a los eventos de lluvia.

3.3.2. Régimen de escorrentía superficial

Aunque el área presenta un marcado déficit hídrico climático, producto de que la evaporación potencial anual supera ampliamente la precipitación, la respuesta hidrológica superficial es elevada durante los eventos de lluvia. Los estudios disponibles (Hidrosuelos, 2016) indican según el balance de masas en la estación regional analizada en promedios mensuales, multianuales (UPTC-COD-24035130) indica que cerca del **49,2 % de la precipitación anual** se transforma en escorrentía superficial directa, el 36.4% se infiltra en el subsuelo, generando flujos subsuperficiales y en zonas de recarga generando infiltración al sistema hidrogeológico regional (el área de estudio o influencia hidrogeológica del parque no se considera un área de recarga, expuesto en capítulos siguientes), resepecto al 14.4 % adicional se considera como el agua que queda retenida en depresiones del terreno o es almacenado, recalando que de la totalidad del agua superficial entrante el 79.2% se evapora y solo el 20.8% se mantiene como agua superficial disponible.

Este comportamiento se ve reflejado en el **Número de Curva (CN)** calculado para la zona, cuyo valor ponderado de **86,72** es característico de superficies con **baja capacidad de infiltración y retención**, donde el agua precipitada escurre rápidamente sin almacenarse de forma significativa en el suelo (Hidrosuelos, 2016).

3.3.3. Intermitencia de los cauces y relación con el agua subterránea

Una característica fundamental del sistema hidrológico superficial del área de estudio definida (Cap. 1.3 LOCALIZACIÓN) es el régimen intermitente y continuo de sus drenajes. La quebrada La Salada permanece seca durante gran parte del año y únicamente presentan caudal inmediatamente después de eventos de lluvia, incluso en periodos considerados húmedos. La quebrada La Cebolla si presenta un flujo constante en el tiempo con caudal variable, ya que esta proviene de partes altas hacia Chivatá.

Este comportamiento en la quebrada La Salada la cual es el drenaje más cercano al parque y que esta limitada a la estructura geológica y geomorfológica del área de estudio está directamente relacionada con la ausencia de flujo base, consistente con los datos de niveles freáticos (7. ANÁLISIS PIEZOMETRICO) que no están cercanos a superficie. El nivel freático se localiza a profundidades significativas, lo que impide que el acuífero alimente de manera permanente los cauces superficiales o de manera inversa. En consecuencia, estos drenajes dependen exclusivamente de la precipitación directa y de la escorrentía generada en superficie.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 30 de 105

3.3.4. Influencia de los suelos y la pendiente

El patrón de escorrentía observado está fuertemente condicionado por las características geomorfológicas y edáficas del área de estudio definida. Los suelos predominantes, asociados a materiales arcillosos y limosos de la Formación Tilatá, con comportamiento predominantemente de baja permeabilidad, funcionando como un acuitardo local en el área de estudio hidrogeológica para el parque, lo que limita la infiltración y favorece el escurrimiento superficial.

Si bien existen sectores localmente planos (pendientes entre 0 % y 6 %) donde el agua puede acumularse temporalmente, las laderas con pendientes superiores al 18 % incrementan la velocidad del flujo, reducen el tiempo de concentración y aumentan el potencial erosivo. Como resultado, se han identificado procesos de erosión superficial y formación de cárcavas, especialmente en zonas con cobertura vegetal reducida o en áreas intervenidas, como algunos taludes asociados a las terrazas operativas.

3.3.5. Manejo antrópico del drenaje

Dadas las condiciones naturales de alta escorrentía, el relleno sanitario cuenta con un sistema de manejo de aguas lluvias independiente del sistema de lixiviados, diseñado para interceptar y conducir el agua superficial antes de que entre en contacto con los residuos. Este sistema incluye cunetas perimetrales, zanjas de coronación y estructuras de sedimentación para la retención de sólidos.

4. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

El presente capítulo reúne y analiza la información disponible sobre las condiciones geológicas e hidrogeológicas del medio subsuperficial en el área del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua. La caracterización se fundamenta en la integración de información secundaria existente, resultados de perforaciones y registros de pozos de monitoreo, así como en los datos obtenidos a partir de métodos de exploración geofísica aplicados en campo.

El objetivo de este capítulo es describir la disposición estratigráfica y las propiedades físicas de las unidades subsuperficiales, con énfasis en aquellas que controlan el flujo del agua subterránea y la posible transmisión vertical de fluidos. Para ello, se presentan de manera descriptiva y de caracterización de las unidades del área donde ya su comportamiento hidrogeológico se desarrolla posteriormente en el Modelo Hidrogeológico Conceptual.

La información aquí presentada constituye a una descripción de la diferente unidades geológicas, hidrogeológicas y sus características determinadas de información primaria y secundaria que juegan un papel importante en la formulación del modelo hidrogeológico conceptual.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 31 de 105

4.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

Con base en la información técnica del Servicio Geológico Colombiano, peritajes especializados y estudios hidrogeológicos previos, el contexto geológico del área del Parque Tecnológico está definido por su localización dentro de una estructura plegada regional, rellena por una potente secuencia de sedimentos continentales de distinta competencia mecánica y comportamiento hidráulico. Esta configuración controla de manera directa la disposición estratigráfica, la geometría de las unidades subsuperficiales y sus propiedades físicas.

La Figura 4-1 representa la geología regional del área de estudio en una escala 1:100.000, tomado y modificado de la plancha del Servicio Geológico Colombiano, la cual permite tener un contexto de ubicación del Parque Tecnológico Ambiental dentro de estructuras regionales como el Sinclinal de Tunja.

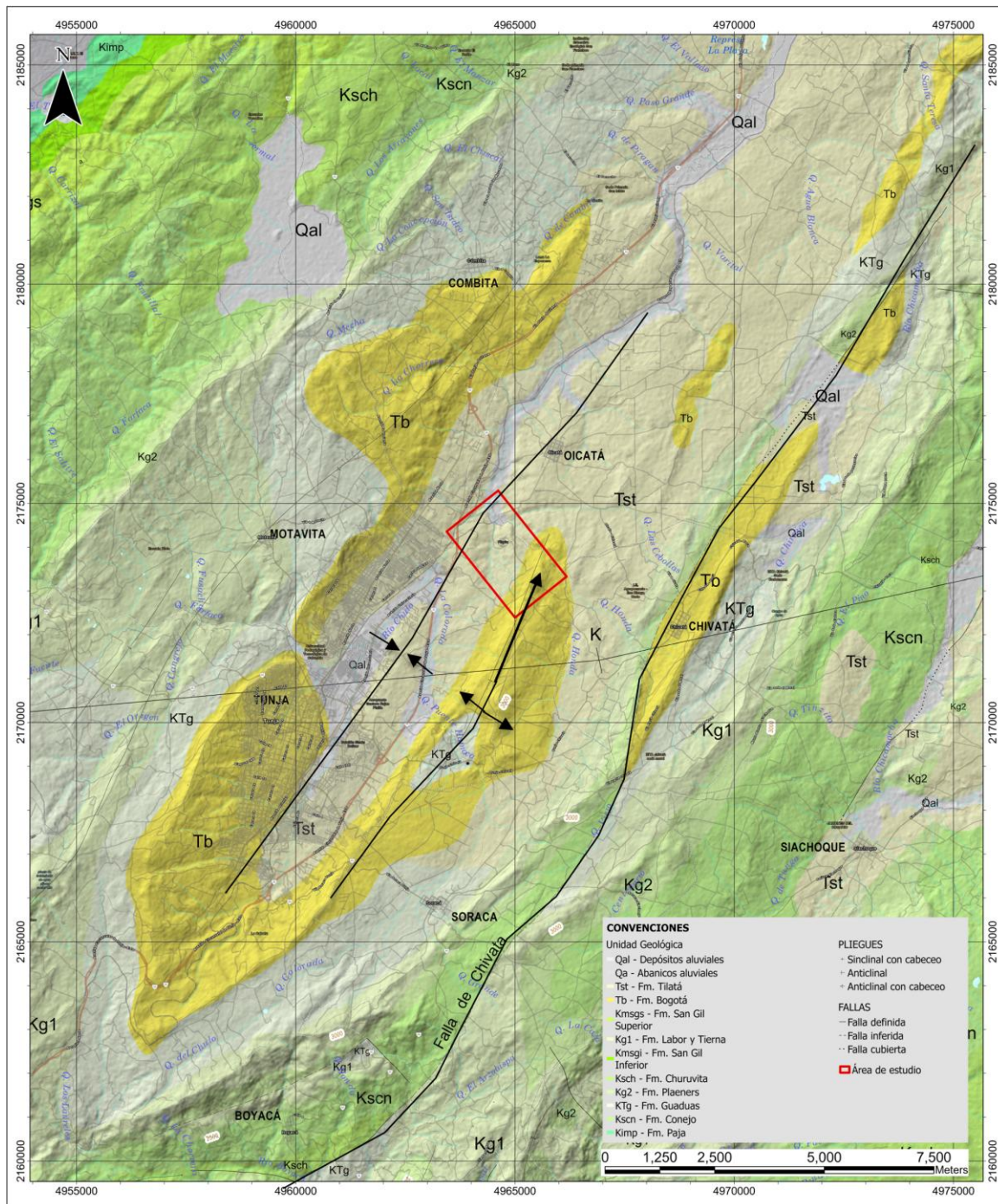


Figura 4-1. Geología regional
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 33 de 105

4.1.1. Marco estructural regional

El rasgo estructural dominante corresponde al **Sinclinal de Tunja**, un pliegue amplio de geometría cóncava, con eje de orientación general suroeste–noreste (SW–NE) y extensión regional del orden de decenas de kilómetros. El Parque Tecnológico se localiza sobre el flanco oriental de esta estructura, próximo a su eje, donde las unidades más antiguas se encuentran a mayor profundidad y son cubiertas por sedimentos más recientes.

Hacia el oriente, el área está estructuralmente condicionada por la **Falla de Chivatá**, una falla inversa regional de orientación similar (SW–NE) que levanta el bloque oriental. No obstante, en el área específica del Parque Tecnológico no se reconoce una afectación directa de esta estructura sobre los materiales superficiales, los cuales corresponden a depósitos más jóvenes que recubren la estructura plegada.

Por consiguiente en el área de estudio determinada se presentan unidades geológicas recientes aflorantes como la Formación Tilatá principalmente, con algunas zonas de la Formación Bogotá y Depósitos cuaternarios, las cuales presentan una característica en común que es el bajo grado de diagénesis, lo que hace que los materiales no sean Rocas compactas y tenga un comportamiento plástico, esto da como resultado la ausencia de fracturas y patrones de diaclasas, lo cual descarta una porosidad secundaria en dichas unidades y por consiguiente zonas de infiltración asociadas a fracturas o zonas de debilidad estructural.

A continuación se observa un afloramiento antrópico reciente de la Formación Tilatá, en la cual el parque ha sido desarrollado, denotando la ausencia de macizos rocosos donde se puedan presentar presencia de fracturas y Diaclasas.



Figura 4-2. Formación Tilatá – Material plástico
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 34 de 105

4.1.2. Estratigrafía y litología

Desde el punto de vista del comportamiento físico del subsuelo, la columna estratigráfica está conformada por una secuencia que abarca desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario, organizada de la siguiente manera, de base a techo:

- La **Formación Guaduas y Grupo Guadalupe (KTg)** constituye las unidades más profundas reconocidas regionalmente en el sistema de acuífero de Tunja. Están compuestas por potentes estratos de areniscas con esporádicas apariciones de lodolitas negras para el grupo Guadalupe, y para la Formación Guaduas se presentan predominantemente lodolitas grises a negras, con intercalaciones subordinadas de areniscas y niveles carbonosos. Estas unidades no está aflorante en el área de estudio determinada, se presume su presencia en profundidades mayores a 600 m.
- La **Formación Cacho (Tpc)** corresponde a una secuencia de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, localmente conglomeráticas. Esta unidad se encuentra a profundidades considerables bajo el Parque Tecnológico, generalmente superiores a 60–100 m, y constituye el **Acuífero de Tunja**, debido a su litología arenosa y al desarrollo de fracturamiento que le confiere porosidad secundaria.



Figura 4-3. Formación Cacho
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 35 de 105

- **Formación Bogotá (Tb)**, Se dispone sobre la Formación Cacho la cual está conformada mayoritariamente por arcillolitas y lodolitas, con intercalaciones menores y discontinuas de niveles arenosos. En el contexto del área de estudio, esta formación presenta un comportamiento predominantemente arcilloso, lo que se refleja en valores de baja resistividad eléctrica identificados en la exploración geofísica y en los muestreos de perforación realizados en el parque.

En las zonas topográficas más altas se evidencian afloramientos de la Formación denotando su comportamiento arcilloso y coloración particular rojiza, unidad meteorizada en superficie y que no muestra patrones de fracturamiento y diaclasamiento

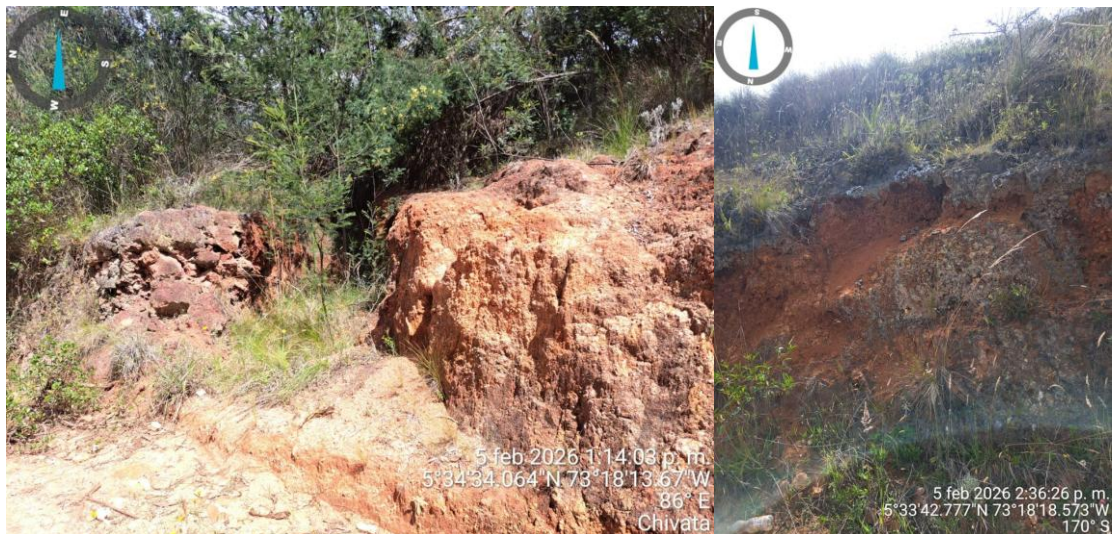


Figura 4-4. Formación Bogotá
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

A continuación se observa la columna estratigráfica local de la Formación Bogotá y parte de Cacho en el área de estudio dentro de la instalaciones del parque, la cual se realizó a partir de los registros de perforación del pozo de monitoreo PR-1 por Hidrosuelos en el año 2022. La cual se constituye por litologías arcillosas predominantes, con esporádicas capas de arenas, y en profundidad denotando principalmente el contacto con la Formación Cacho donde se observa el cambio de predominio litológico a un estrato de arenisca potente.

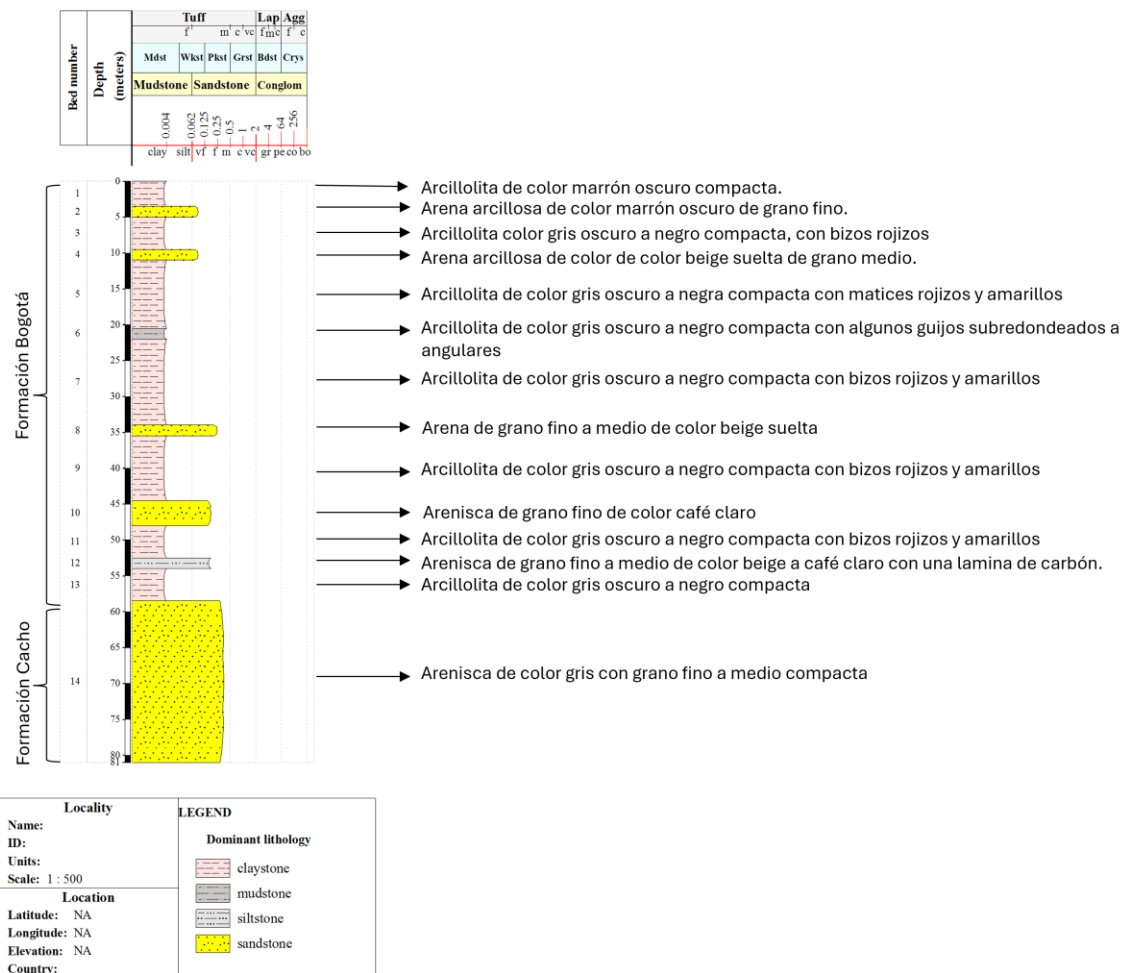


Figura 4-5. Columna estratigráfica de Formación Bogotá – Formación Cachó
Fuente: Tomado y modificado de HIDROSUELOS, 2022

- La **Formación Tilatá (Tst)** es la unidad aflorante predominante y sobre la cual se asienta el Parque Ambiental de Pírgua. Está compuesta por una sucesión de arcillolitas y limos de colores abigarrados, poco consolidados, con intercalaciones lenticulares y discontinuas de arenas y conglomerados. Esta formación cubre de manera discordante a las unidades más antiguas, rellenando el núcleo del Sinclinal de Tunja, con espesores variables que pueden superar los 80 m. Su comportamiento es principalmente arcilloso, aunque existe la presencia de niveles arenosos en algunas zonas de la Formación en su extensión regional, dicha unidad en el área de estudio determinada presenta principalmente niveles arcillosos con un total de espesor de la unidad hasta de 60 metros en las zonas más espesas, los cuales son interpretados en las imágenes de exploración geofísica desarrolladas en el capítulo 5. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA.y correlacionados con las perforaciones de los pozos de monitoreo realizados por Hidrosuelos en 2022.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 37 de 105

La unidad de Formación Tilatá se describe localmente en la columna estratigráfica realizada a partir de los registros de perforación del pozo de monitoreo PD-2, donde dicha perforación atraviesa parte de la secuencia de la Formación en la parte baja del parque teniendo 24 m aproximadamente de la secuencia, teniendo una representación de dicha unidad ya que para el área de estudio determinada o para el área de influencia o estudio hidrogeológica no es posible observar la secuencia de manera continua debido a los pocos afloramientos de la zona y sus posibles cambios faciales y discontinuidades laterales.

A continuación se observa en la columna estratigráfica (Figura 4-6) los depósitos cuaternarios sobre recientes sobre la Formación Tilatá donde esta presenta una secuencia predominante arcillas grises oscuras potentes de estratos del orden de 15 metros aproximadamente y esporádicas apariciones de arenas en capas de 1 a 2 metros, las cuales pueden corresponder a lentes arenosos o zonas corrientes, ya que según el material de dicha unidad e interpretando los ambientes de depósito estas apariciones de arenas tienden a ser discontinuas o locales debido a una depositación de baja energía con algunas corrientes que aportan material arenoso en muy pocas cantidades respecto a la depositación de arcillas.

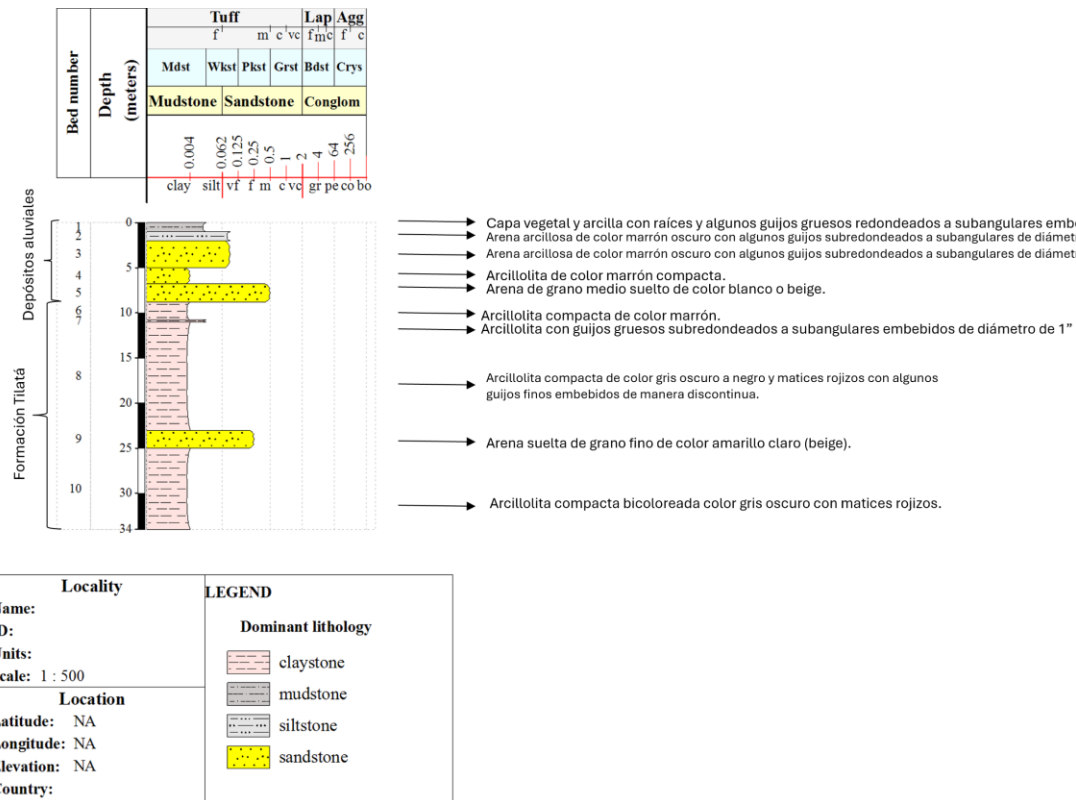


Figura 4-6. Columna estratigráfica de depósitos Cuaternarios – Formación Tilatá
Fuente: Tomado y modificado de HIDROSUELOS, 2022

La Formación Tilatá al presentar un ambiente continental reciente posterior al levantamiento de la Cordillera Oriental está configurada de manera heterogénea y discontinua, sin embargo, de manera local para el área de estudio determinada en el parque se evidencia que la Formación Tilatá presenta una secuencia arcillosa espesa con capas de arenas delgadas probablemente discontinuas y que según las secciones de resistividad el comportamiento de esta es homogénea y no presenta contrastes fuertes.

Debido a ello y según las secciones de resistividad de la exploración geofísica se clasifico a esta unidad en dos subunidades, las unidades Tst1 y Tst2 las cuales se diferencian por su comportamiento resistivo, textural y geomorfológico evidenciado en campo, donde la subunidad Tst1 obedece a la secuencia de la Formación Tilatá en el parque dentro del área de influencia hidrogeológica la cual se describió anteriormente con una configuración predominantemente arcillosa, para la subunidad Tst2 se diferenció en el cambio geomorfológico, siendo un alto topográfico dentro de la ladera y teniendo resistividades levemente mayores a la secuencia dentro del parque. En la Figura 4-7 se observa la distribución espacial de las subunidades de la Formación Tilatá.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 39 de 105

- **Depósitos cuaternarios aluviales y fluvio-lacustres (Qal/Qfl):** En las zonas bajas asociadas a las zonas de los drenajes superficiales se reconocen, constituidos por materiales no consolidados de arenas, gravas y arcillas, de espesor y extensión limitado.

Usando como referencia la geología regional del Servicio Geológico Colombiano junto a datos de control tomados en trabajo de campo, se construyó el mapa de Geología local, plasmado en la Figura 4-7.

A continuación, se presenta la cartografía de la geología local mostrando su distribución en la zona de estudio y la ubicación de las celdas de operación y clausuradas las cuales se ubican sobre la Formación Tilatá en la subunidad Tst1. También las unidades más antiguas hacia el culeo del anticlinal (Sur-este) y los depósitos cuaternarios hacia las partes baja del valle del Sinclinal de Tunja.

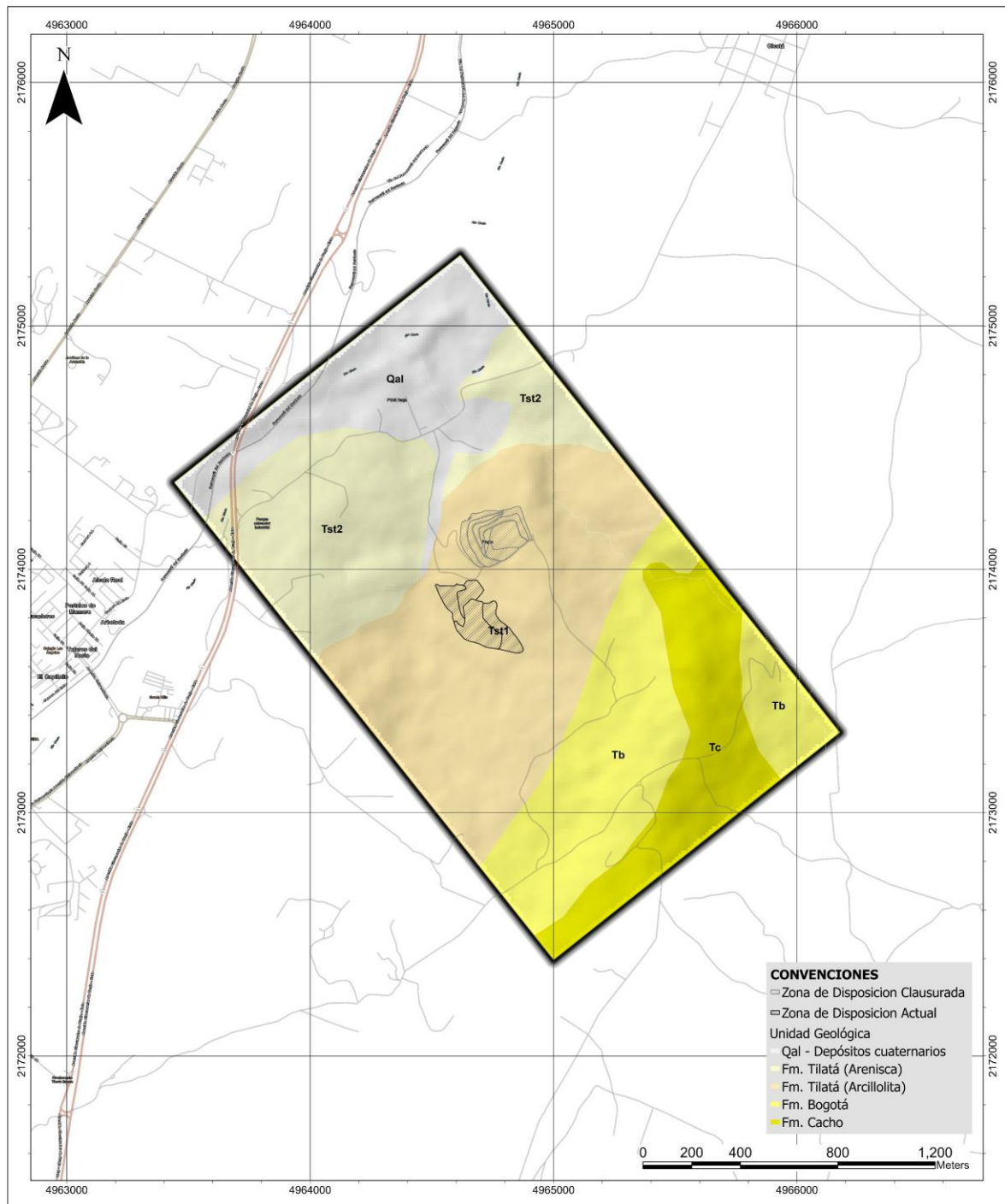


Figura 4-7. Geología local
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 41 de 105

4.2. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

El contexto hidrogeológico regional en el que se encuentra el área de estudio determinada, se centra en el Sistema acuífero de Tunja, denominado así en el informe de diagnóstico realizado por Corpoboyacá y el Consorcio Hidroboyacá (2016).

En el sistema acuífero de Tunja existen dos complejos acuíferos bien diferenciados: el primero (superficial) corresponde a un acuífero compuesto por rocas del Terciario, integrado por niveles de areniscas de la Formación Cacho.

El segundo correspondiente al acuífero de mayor profundidad, integrado en la zona de estudio por el Miembro Arenisca Tierna de la Formación Labor y Tierna (de acuerdo con la descripción litológica, el Miembro Labor en la zona de estudio es predominantemente arcillolítico), y La Formación Plaeners.

El sistema hidrogeológico en la zona se divide en dos unidades principales: un acuífero superficial (Formaciones Cacho) y un acuífero de mayor profundidad (Formaciones Labor y Tierna, y Plaeners), estructurados por la geometría sinclinal que configuran la geología de la región.

- **Acuífero Superficial**

Se localiza principalmente en la subcuenca del Sinclinal de Tunja compuesto principalmente por la Formación Cacho (Tic) funcionando como Acuífero regional continuo con niveles de areniscas que se extienden por kilómetros (dirección NE-SW). Aflora en las partes altas y se profundiza hacia el eje del sinclinal, alcanzando los 150 m a 244 m de profundidad en pozos como Cooservicios II, con un espesor promedio de 25 m de niveles productivos captados.

- **Acuífero de Mayor Profundidad**

Es la unidad de mayor importancia hidrogeológica del sistema de Tunja debido a su gran extensión y continuidad regional, esta compuesto por el miembro Tierna de la Formación Labor y Tierna (Klt) y la Formación Plaeners, con una extensión desde el cierre sinclinal al sur de Tunja hasta el sector de El Manzano al norte, donde es limitado por la Falla de Boyacá. En los flancos (zonas altas) se encuentra en superficie (afloramientos). Se encuentra a profundidades en el eje del sinclinal, el techo de la formación se profundiza drásticamente: entre 750 m (sector sur) y 1000 m (sector norte). (Corpoboyacá y el Consorcio Hidroboyacá (2016).)

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 42 de 105

5. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

5.1. TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

5.1.1. Malla de adquisición de tomografías eléctricas

Para el presente estudio se llevaron a cabo la adquisición de 5 líneas de tomografía eléctrica divididas de la siguiente manera:

- Tomografías 01, 02, 03, realizadas sobre el área de interés, adquiridas en sentido predominante NW-SE, se unieron en el procesamiento para formar una tomografía de 1200 metros de longitud.
- Tomografías 04 y 05, realizadas sobre el área de interés adquiridas en sentido predominante NE-SW, siendo la 05 la línea ubicada más al NW y la 04 la línea ubicada más al SE, las cuales cortan las primeras tres tomografías.

La Figura 5-1 plasma la malla de adquisición mediante tomografías eléctricas en el área de estudio perteneciente al Parque Tecnológico Ambiental Pirgua.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 43 de 105



Figura 5-1. Malla de adquisición Tomografías Eléctricas
Fuente: INGEOMAD SAS.

Se realizaron cinco (5) tomografías eléctricas de resistividad con longitudes aproximadas de 600 metros y profundidad de investigación entre 60 y 120 metros, realizando un merge entre las tomografías 1,2,3 teniendo una línea continua de 1200 metros para llevar a cabo la correlación de parámetros resistivos con características geológicas – geofísicas e hidrogeológicas del Parque Tecnológico Ambiental Pigua.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 44 de 105

En la Tabla 2 se presentan parte de las coordenadas de las tomografías eléctricas del primer y último electrodo de cada línea adquirida:

Tabla 5-1. Coordenadas Electrodo – Tomografías Eléctricas

TOMO-ID	ELECTRODO	CTM12		WGS84	
		POINT_X	POINT_Y	LAT	LONG
T1-T2-T3	1	4965183.46	2173567.77	5.57076	-73.31449
	240	4964422.47	2174479.72	5.57901	-73.32137
T4	1	4964757.83	2173597.67	5.57103	-73.31833
	120	4965289.22	2173883.97	5.57362	-73.31353
T5	1	4964510.33	2174050.43	5.57512	-73.32057
	120	4964638.88	2174644.33	5.58050	-73.31941

Fuente: INGEOMAD SAS.

A continuación, se presentan algunas fotografías de la adquisición de campo.



Figura 5-2. Fotografía Adquisición / Tomografías eléctricas – Parque tecnológico y ambiental de Pírgua
Fuente: INGEOMAD SAS.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 45 de 105



Figura 5-3. Fotografía Adquisición / Tomografías eléctricas - Parque tecnológico ambiental Pirgua
Fuente: INGEOMAD SAS.

Las tomografías eléctricas presentan las siguientes longitudes y separación entre electrodos:

Tabla 5-2. Características / Tomografías eléctricas – Parque tecnológico ambiental Pirgua.

TOMOGRAFÍA	LONGITUD (m)	EQUIESPACIADO	ELECTRODOS
1, 2, 3	1200	5	240
2	600	5	120
3	600	5	120

Fuente: INGEOMAD SAS.

5.1.2. Equipo y parámetros de adquisición de tomografías

Las tomografías eléctricas se adquirieron con equipo DZD-8^a Multi-electrode Electrical Resistivity Tomography – 60 - 120 Channel, utilizando el arreglo de electrodos simétrico tipo Wenner (Figura 5-4)



Measuring unit (ZDZ-6A)

- Maximum Measuring Voltage: -6000mV~+6000mV
- Measuring Voltage Resolution: 0.01 mV
- Measuring Voltage Error: (at $V_p > 10\text{mV}$) $\pm 5\%$, ± 1 digit; (at $V_p < 10\text{mV}$) $\pm 1\%$, ± 1 digit
- Suppression on 50Hz Power Frequency: 80dB
- Measuring Current: 0~5000 mA
- Measuring Current Resolution: 0.01 mA
- Measuring Current Error: (at $I_p > 10\text{mA}$) $\pm 5\%$, ± 1 digit; (at $I_p < 10\text{mA}$) $\pm 1\%$ $\pm$ Letter
- Input Impedance $\geq 50\text{ M}\Omega$
- Measured Apparent Polarizability Error: $\pm 1\%$, ± 1 digit
- Maximum Power Supply Voltage 900V
- Maximum Power Supply Current: 5A

*Figura 5-4. Equipo utilizado para la adquisición de tomografías eléctricas
Fuente: INGEOMAD SAS. 2025.*

Los parámetros de adquisición se muestran en la **Tabla 5-3**:

Tabla 5-3. Características / Tomografías eléctricas.

PARAMETRO	#
Tiempo de descanso entre medida	2 sg
Apilados de datos de resistividad por punto	6
Voltaje maximo inducido (v)	200V
Amperaje Maximo Inducido (Amp)	2.5 Amp
Resolución de ventana (mv)	0.1 mv
Frecuencia de poder (db)	80 db

Fuente: INGEOMAD SAS. 2025.

5.1.3. Resultados e interpretación

– Correlación Geofísica – Geológica Tomografía Eléctrica

El suelo es una mezcla de partículas sólidas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos.

Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo.

Diferentes contenidos de humedad en un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

En la Figura 5-5 se encuentra un conjunto de valores típicos de resistividad de geomateriales, observando un rango aproximado para cada uno de ellos.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 47 de 105

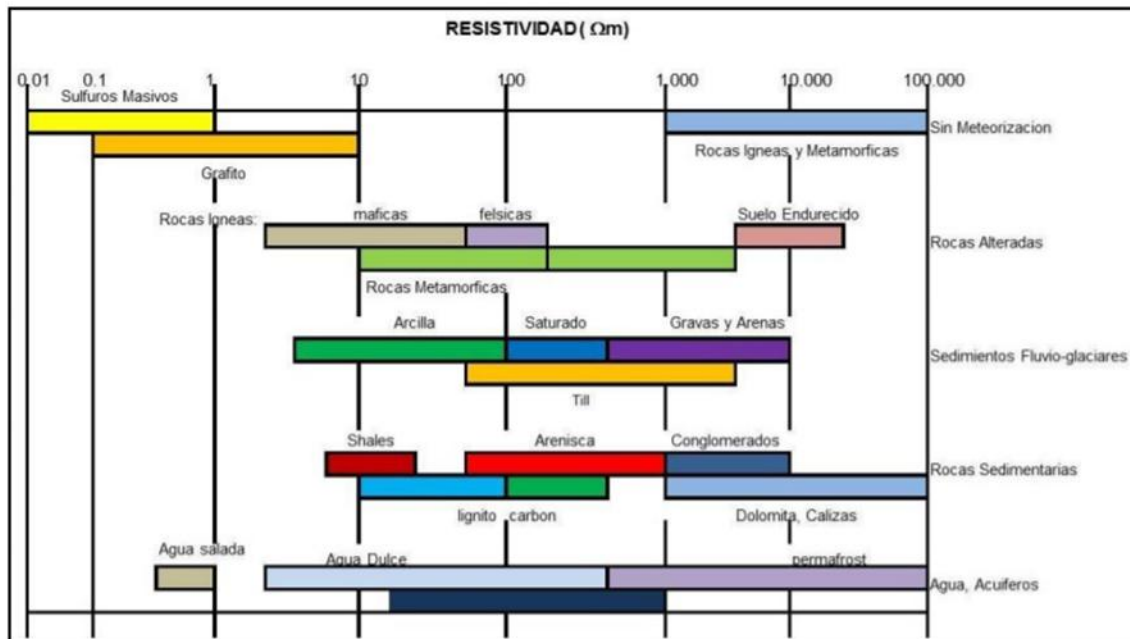


Figura 5-5- Resistividades de Geomateriales
Fuente: Palacky, 1987.

De acuerdo con el tipo de unidades sedimentarias que se localizan en el área de estudio, es importante considerar una escala de grados para clasificar los diámetros de los sedimentos y de esta manera asociar el grado de porosidad y permeabilidad que tiene cada litología. Las partículas de más de 64 mm de diámetro se clasifican como bloques (característicos en conglomerados gruesos y clasto soportados). Los menores de 0,0039 mm son arcilla. La escala de tamaño de grano comúnmente utilizada en geología es la de Udden-Wentworth (**Figura 2-18**). Para la zona de estudio se presentan principalmente tamaño arcillas y arenas.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 48 de 105

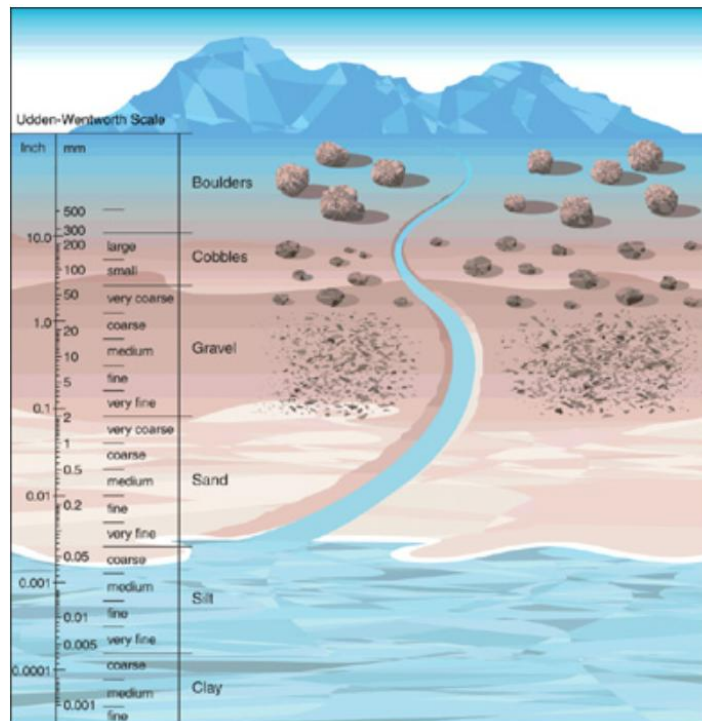


Figura 5-6. Diagrama esquemático de sedimentos y escala de Udden-Wentworth
Fuente: © 2021 Schlumberger Limited.

A continuación, se presenta el modelo geológico – geofísico identificado en cada perfil generado mediante Tomografías eléctricas de resistividad. En la Figura 5-7, se presenta la escala de resistividad asignada como paleta general, para efectuar la evaluación comparativa entre las diferentes secciones de tomografías en los diferentes sitios de adquisición, estos rangos de resistividad fueron determinados a partir de correlaciones con la geología local de superficie y calibrados con perforaciones hechas en la zona de estudio las cuales son el soporte directo a la clasificación determinada de resistividad para el estudio.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 49 de 105

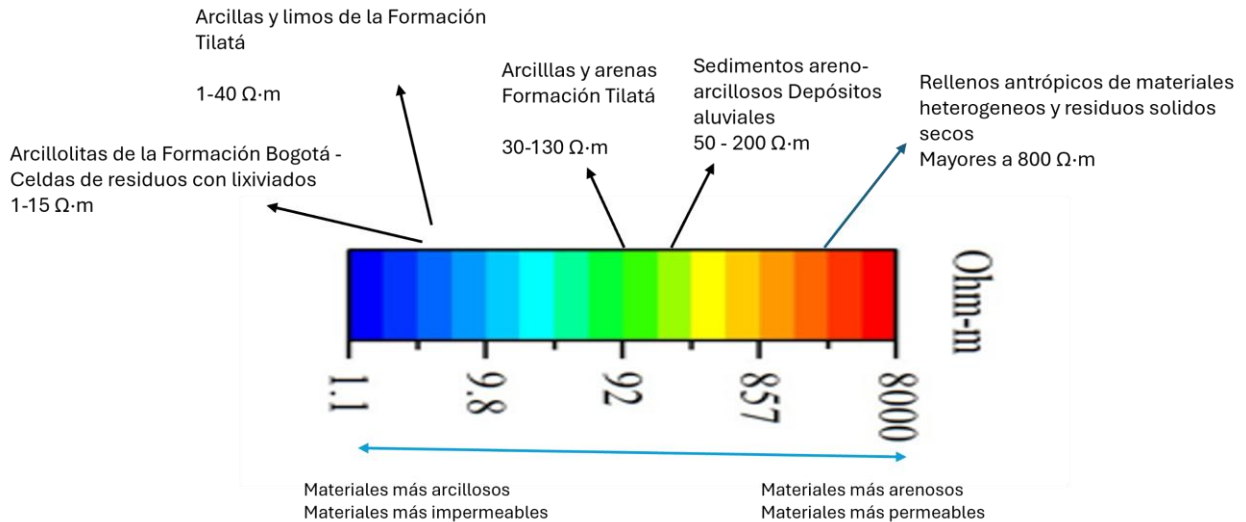


Figura 5-7. Escala de resistividad eléctrica utilizada en interpretación de tomografías
Fuente: INGEOMAD SAS. 2026.

– Resultados de Tomografías eléctricas de resistividad

La adquisición geofísica permitió identificar y clasificar las unidades geológicas subsuperficiales en varios rangos de resistividad relativa, asociándolos a las unidades litológicas presentes y sus litologías y variaciones litológicas, esto fue producto de la integración de los datos de resistividad correlacionados con la estratigrafía de la zona, la disposición estructural de las unidades, registros de perforaciones y su contexto hidrogeológico, a partir de ello se determinó:

- **Rango de Arcillas Formación Bogotá (1.0 a 15 $\Omega \cdot m$)**
- **Rango de arcillas y limos Formación Tilatá (1.0 a 40.00 $\Omega \cdot m$)**
- **Rango de arcillas, limos y arenas de la Formación Tilatá (30.0 a 130.0 $\Omega \cdot m$) Tst2**
- **Rango de areniscas de la Formación Cacho saturadas (30.0 a 120.0 $\Omega \cdot m$)**
- **Rango de depósitos aluviales cuaternarios (50 a 200 $\Omega \cdot m$)**
- **Rango de Secuencias Cretácicas, areniscas potentes con intercalaciones de lodolitas (mayores a 150 $\Omega \cdot m$)**

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 50 de 105

Con base en estos rangos se interpretaron los perfiles generados a partir de las tomografías eléctricas, los cuales nos dan el insumo local de la disposición de la unidades de manera más localizada con una mayor resolución, principalmente la diferenciación de los niveles litológicos de las unidades en el área de estudio, también verificar y observar si hay subniveles dentro de estas unidades con el fin de determinar el comportamiento hidrogeológico de estos. A partir de estos datos se hace un correlación con la geología, local, con datos de piezometría, ensayos hidráulicos y demás para obtener una buena correlación entre la resistividad y el material interpretado.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 51 de 105

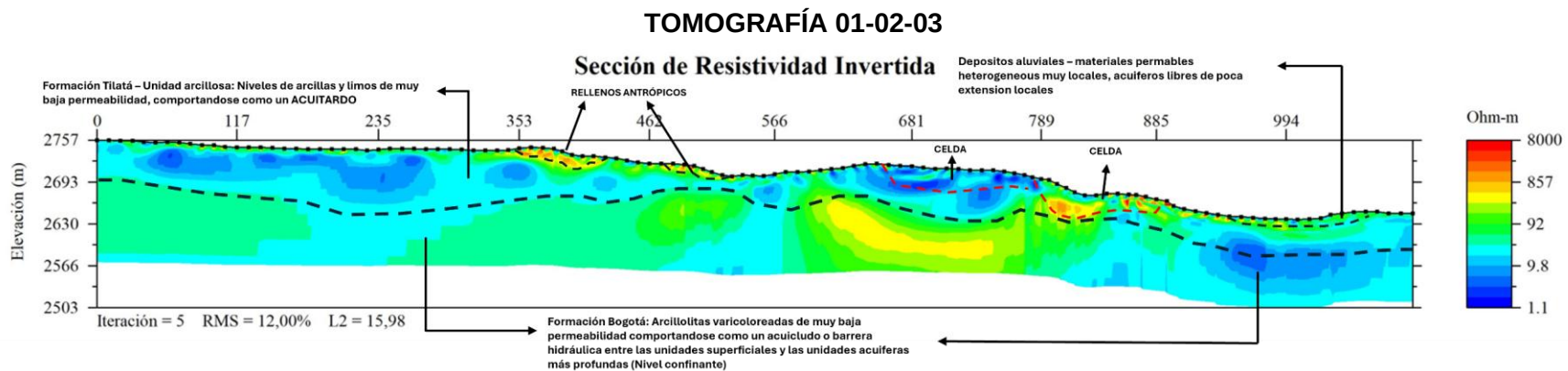


Figura 5-8. Tomografía 01 - Parque tecnológico Parque tecnológico ambiental Pírgua.
Fuente: INGEOMAD SAS. 2025.

Interpretación

En la tomografía 1-2-3 se observan Resistividades bajas hacia superficie denotando la continuidad de las arcillas de La Formación Tilatá, en profundidad se observan la resistividad baja de la Formación Bogotá, en superficie se observan algunas zonas de altas y bajas resistividades asociadas a rellenos antrópicos de la actividad del parque.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 52 de 105

TOMOGRAFÍA 04

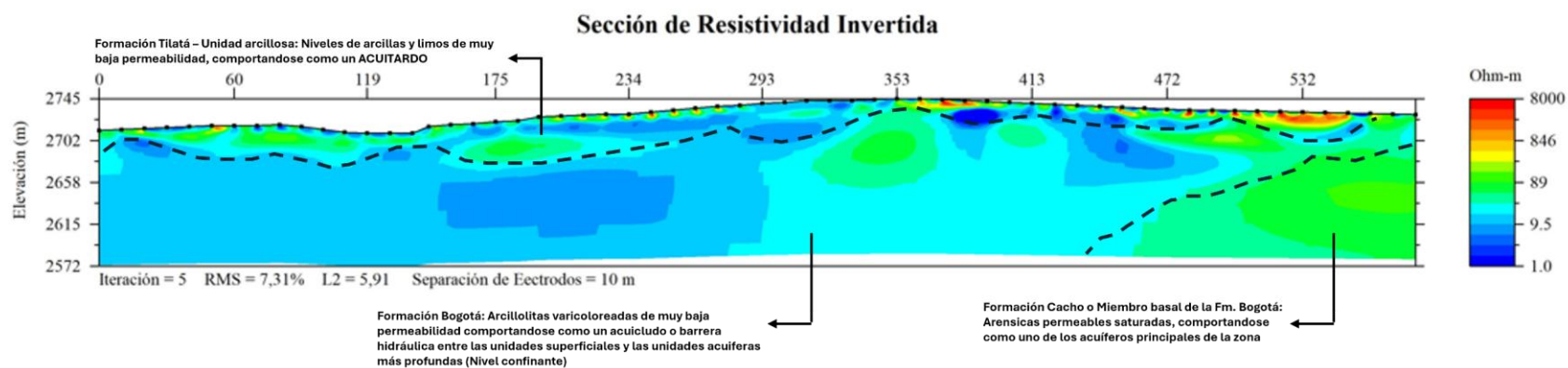


Figura 5-9. Tomografía 02 - Parque tecnológico Parque tecnológico ambiental Pirgua.
Fuente: INGEOMAD SAS. 2025

Interpretación

La tomografía 4 muestra los niveles arcillosos de la Formación Tilatá y de la Formación Bogotá en profundidad, denotando un aumento de la resistividad hacia el oriente en profundidad donde se asocia a la Formación Cacho

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 53 de 105

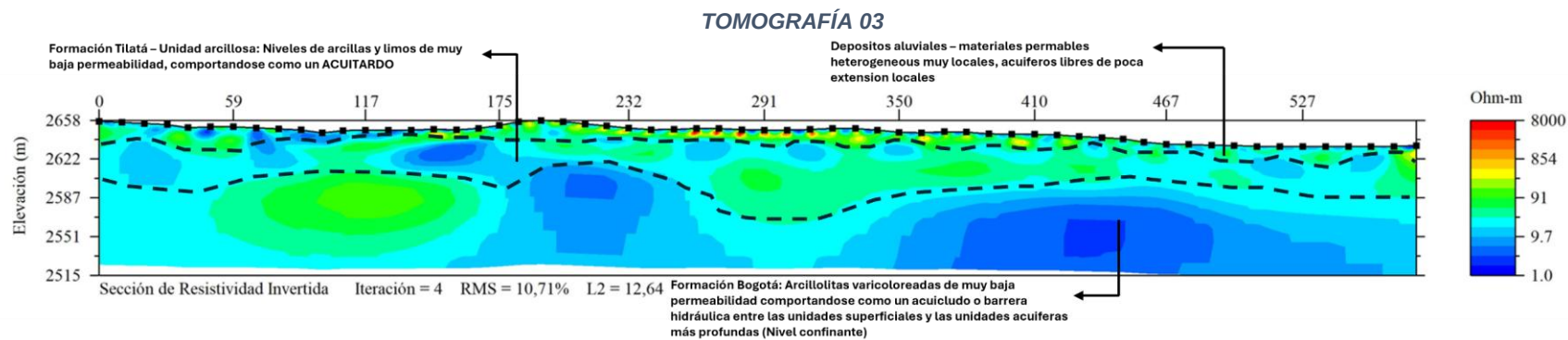


Figura 5-10. Tomografía 03 - Parque tecnológico Parque ambiental Pirgua.
Fuente: INGEOMAD SAS. 2025.

Interpretación

En la tomografía 5 se identifican los niveles de depósitos cuaternarios seguidos de los niveles arcillosos de la Formación Tilatá y en profundidad los niveles de arcillolitas de la Formación Bogotá

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 54 de 105

5.2. SONDEOS MAGNETOTELÚRICOS

5.2.1. Malla de adquisición de sondeos magnetotelúricos

Se realizó la adquisición de 10 sondeos magnetotelúricos con el fin de realizar perfiles de inversión 2D los cuales me generan secciones de resistividad con profundidades mayores a los 500 metros, se ubicaron de manera lineal en dos direcciones, una perpendicular a la estructura principal (perfil 1) con el fin de cortar las estructuras y tener una visión de la disposición de las capas, su buzamiento y su continuidad lateral, la otra dirección fue definida paralela a la estructura con el fin de observar las variaciones de espesor y dar control de estructuras respecto al otro perfil. Los sondeos se ubicaron respecto a los límites de la zona de estudio, la cual comprende del SE al NW entre el eje del anticlinal de la secuencia plegada y el Valle del Río Jordan, respecto al SW -NE se limitan por la divisoria de agua de la quebrada Salada y el cauce de la quebrada La Cebolla, esto con el fin de darle cobertura a toda la zona de estudio determinada como el polígono que cubre toda la extensión de la ladera, observando si hay cambios o discontinuidades en la estructura mapeada superficialmente.

Inicialmente se planearon 8 sondeos MT de los cuales surgieron dos más con el fin de densificar la red de puntos especialmente en la zona operativa del parque ya que en la zona de enfoque principal y además la actividad e infraestructura me podría generar ruido en la adquisición, por ellos se agregaron las estaciones MT02a y MT03a. Donde la totalidad de los perfiles fueron utilizados para generar la inversión 2D para cada perfil.

La toma de los sondeos magnetotelúricos se realizó siguiendo unos lineamientos predefinidos con el fin de asegurar la calidad de la información.

- Instalación y Acondicionamiento del Sistema de Electrodo

Para la adquisición de datos, se dispuso una configuración de dipolos ortogonales (Norte-Sur y Este-Oeste) con una longitud de 35 a 50 metros para cada brazo. El procedimiento de instalación consistió en la excavación de cinco puntos de contacto de aproximadamente 20 cm de profundidad, incluyendo el electrodo de referencia (polo a tierra). Con el fin de optimizar el acoplamiento galvánico y minimizar la resistencia de contacto, los electrodos fueron acondicionados mediante la aplicación de una mezcla de lodo salino o bentonita activada (favigel), asegurando así una relación señal-ruido adecuada para la captura de las variaciones del campo eléctrico natural.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 55 de 105

- **Criterios de Calidad y Reubicación**

La ubicación de los sondeos estuvo sujeta a una evaluación previa del entorno electromagnético. En sectores donde la infraestructura antrópica o fuentes de interferencia externa comprometían la integridad de la señal, o donde la impedancia de contacto no cumplía con los estándares de estabilidad necesarios, se procedió a la reubicación de la estación. Este ajuste se realizó bajo criterios estrictos de calidad de datos, garantizando que el ruido electromagnético no solapara la respuesta geoelectrica del subsuelo.

En la Figura 5-11 se puede observar el Diseño de adquisición de los Sondeos MT para el área de interés del Parque Tecnológico Ambiental Pírgua, donde se observan la ubicación de los puntos ejecutados.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 56 de 105

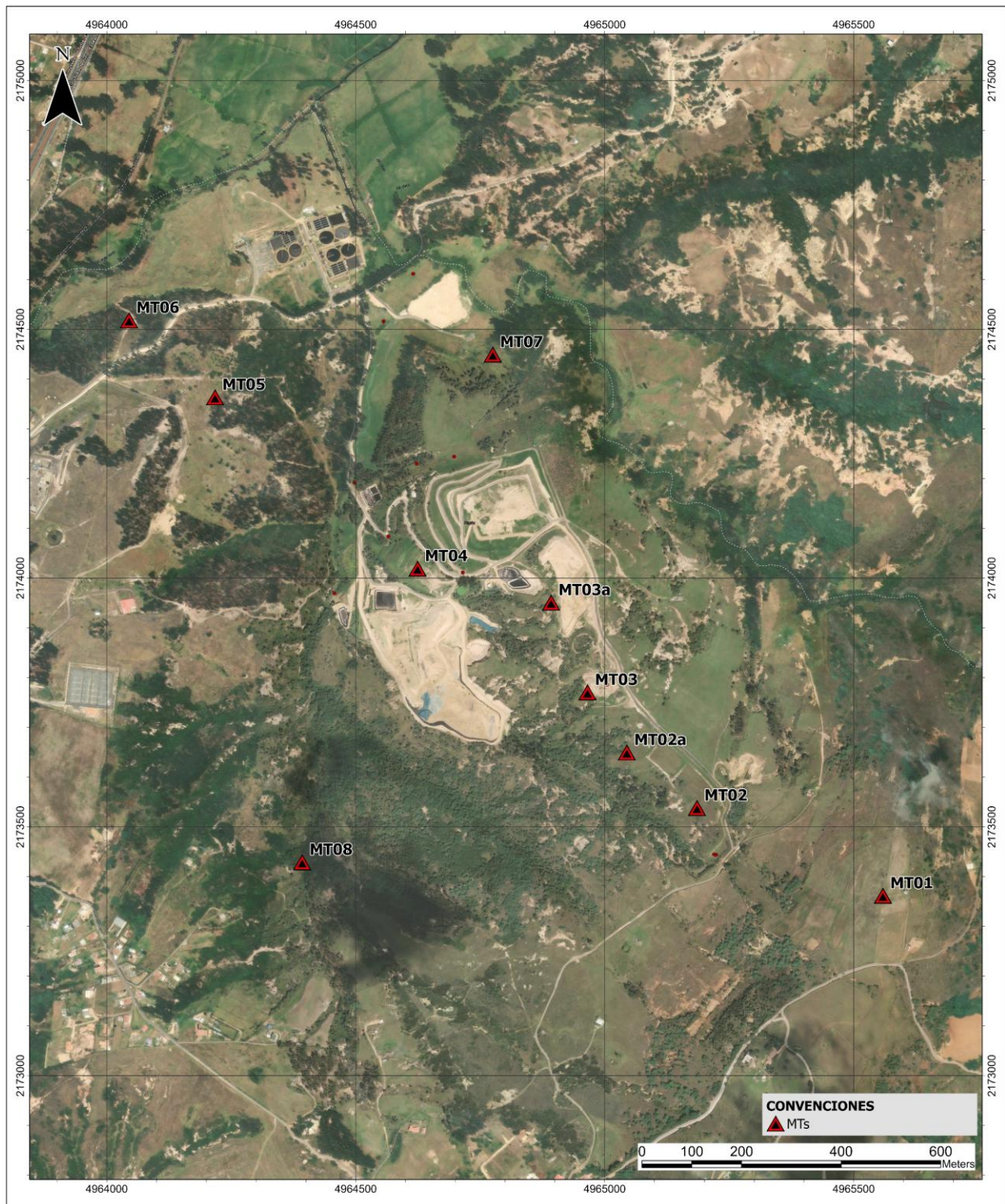


Figura 5-11. Ubicación de MTs adquiridos en área de interés
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 57 de 105

La Figura 5-12, muestra los dos perfiles realizados con base en los datos de resistividad generados por los sondeos magnetotelúricos. El perfil 1 empieza desde el MT01, al suroriente y finaliza en el MT06, usando datos de 8 sondeos en total. El Perfil 2 va desde el MT07 hasta el MT08, teniendo en común el MT04 con el Perfil 1.

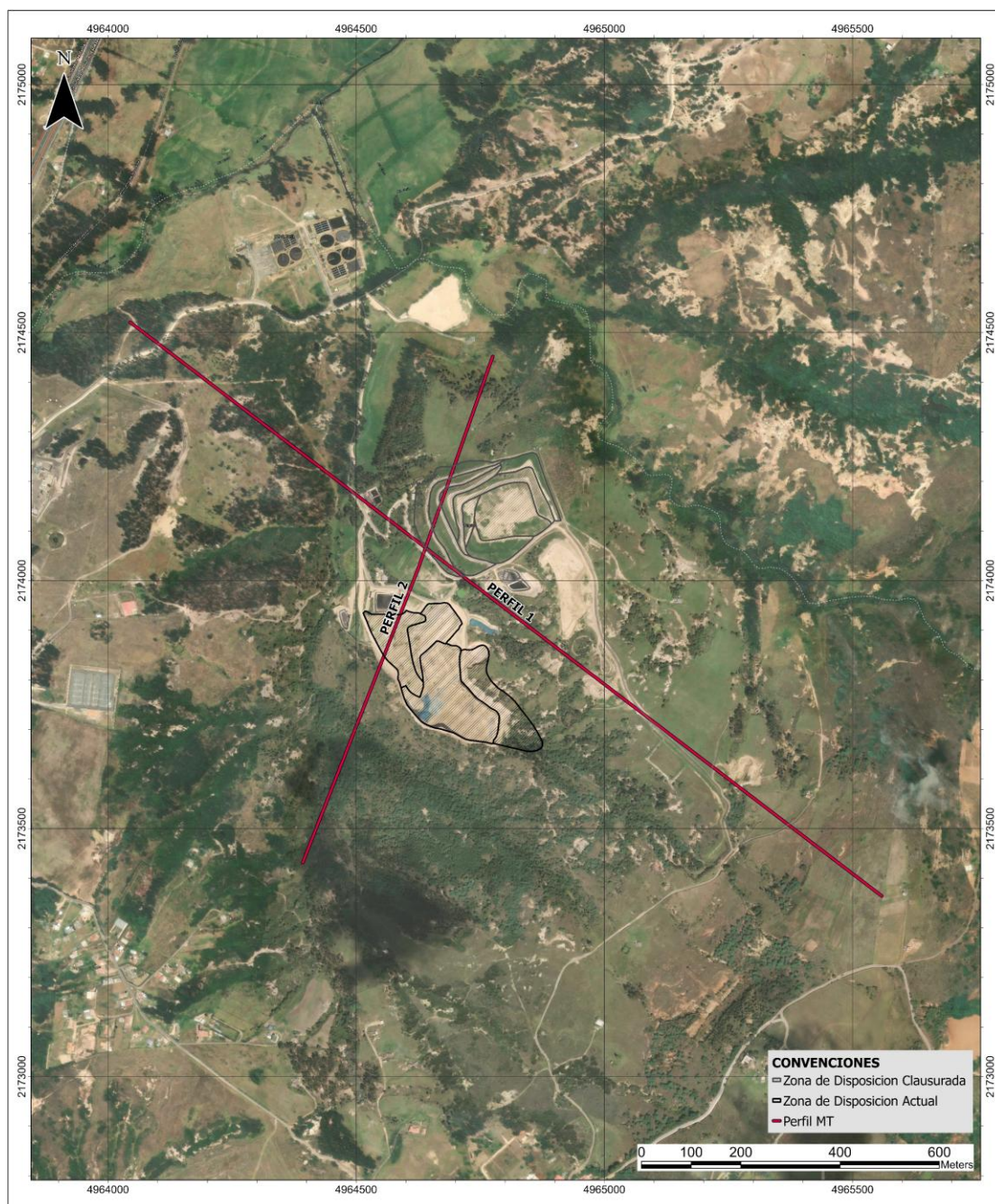


Figura 5-12. Esquema de perfiles MT

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 58 de 105

Fuente: INGEOMAD SAS. 2026

A continuación en la Tabla 5-4 se encuentran plasmadas las coordenadas finales en coordenadas geográficas y coordenadas planas en el sistema de coordenadas CTM12 – Origen Nacional

Tabla 5-4. Coordenadas de Sondeos MT - PTA Pírgua

MT-ID	CTM12		WGS84	
	POINT_X	POINT_Y	LAT	LONG
MT01	4965558.614	2173364.256	5.56892	-73.31110
MT02	4965185.281	2173540.588	5.57051	-73.31447
MT02a	4965044.407	2173652.155	5.57152	-73.31574
MT03	4964965.314	2173772.972	5.57261	-73.31646
MT03a	4964892.231	2173953.344	5.57424	-73.31712
MT04	4964624.130	2174021.776	5.57486	-73.31954
MT05	4964217.461	2174366.089	5.57798	-73.32322
MT06	4964044.729	2174520.771	5.57938	-73.32478
MT07	4964775.148	2174451.864	5.57876	-73.31818
MT08	4964392.425	2173431.511	5.56952	-73.32163

Fuente: INGEOMAD SAS. 2026

5.2.2. Equipo y parámetros de adquisición de Sondeos MT

Para la adquisición de los sondeos magnetoteléuricos se utilizó un equipo de la marca y referencia MTU – 5C de la empresa Phoenix Geophysics, el presenta un rango de frecuencias de 0.001 a 10000 Hz, con muestreos de 24000 Samples/s.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 59 de 105



MAIN ADVANTAGES

- Powerful database manager:
keep track of your survey progress
- Diagnose, QC operations and data
- Multi Core MT parameter calculation
- Results delivered immediately
- Advanced editing and processing features
- Open ended development path
- Continuous improvements in processing techniques

UMT ULTRA-WIDEBAND MT SYSTEM



MTU-5C / 5D



MTU-8A



MTC-150 / 180

- Simultaneous recording of high and low bands
- MT-AMT-BMT-LP (long period)
- 10,000 Hz to >50,000 seconds

Figura 5-13. Equipo utilizado para la adquisición de sondeos MT – PTA Pírgua
Fuente: INGEOMAD SAS. 2026

Se ubicaron los tres sensores magnéticos, uno en la dirección N/S, otro E/W y uno vertical. Si las bobinas registraban campos magnéticos que afectarían la calidad de los datos se tomó la decisión de reubicarlas o en su defecto mover el equipo completo a una zona más limpia de ruido electromagnético. Esto solo se determinó cuando empezaba el sondeo y los datos mostraban saturación.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 60 de 105

Se estableció registrar un mínimo de 3 horas por sondeo y una vez se inició el sondeo se realizó control de calidad en tiempo real, con el fin de verificar que los datos eran seguros y que el sondeo se podría tomar sin ningún inconveniente.

Una vez terminado el sondeo, se verificó la calidad de las curvas de fase y de resistividad, con el fin de asegurar los datos adquiridos y determinar si era necesario repetirlo. Definiendo 10 Hz como el límite de frecuencia de inversión, la cual nos da la profundidad objetivo teniendo buena resolución en superficie.

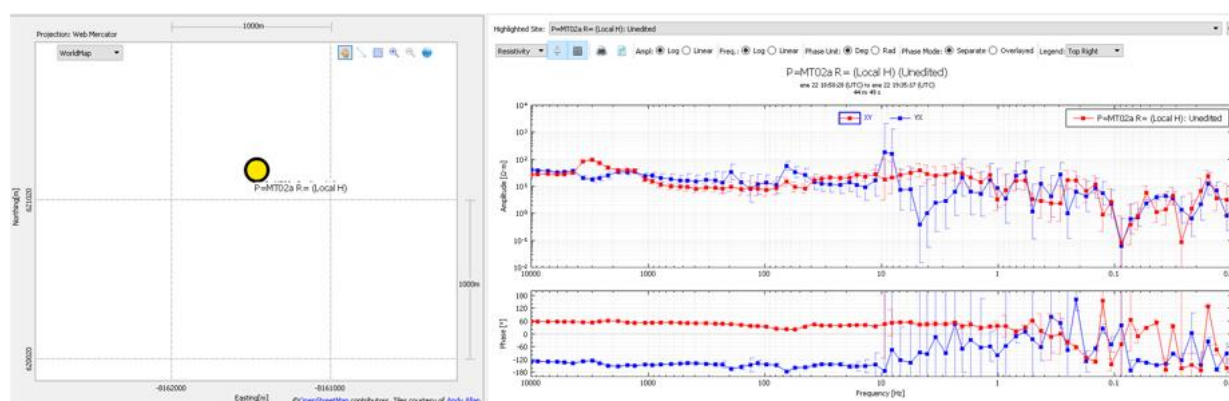
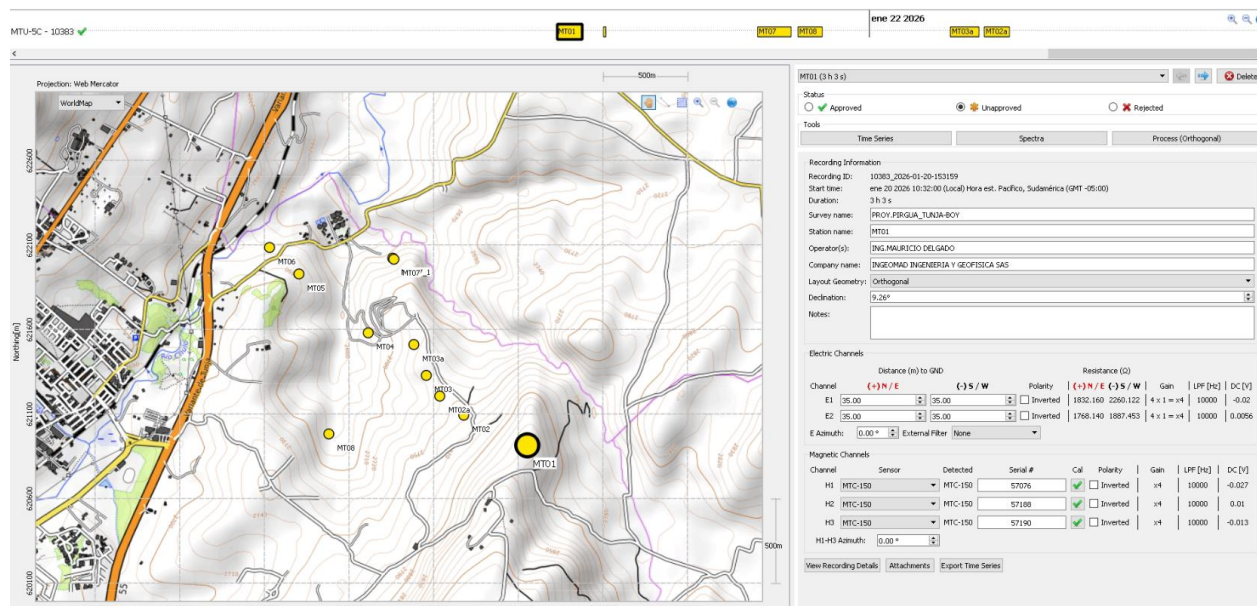


Figura 5-14. Curva raw, sin procesamiento de adquisición MT02a
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

En la Figura 5-15 se muestran los parámetros de adquisición y mapa de adquisición donde se observan los sondeos adquiridos en el software de procesamiento.



5.2.3. Resultados e interpretación

En las secciones de resistividad generadas a partir de la inversión conjunta de los sondeos MT se muestran patrones compatibles con la geología regional, sujetos a verificación mediante correlación geológica, perforaciones y demás evidencia disponible de la zona, este método presenta una mayor cobertura y profundidad, lo cual es el insumo base para observar todas la unidades de interés y su disposición en la estructura.

La inversión 2D fue realizada para 2 perfiles en direcciones SE-NW y NE-SW los perfiles y sondeos fueron invertidos entre 500 y 600 metros de profundidad, en los registros de frecuencias se aseguró datos de 10Hz lo cual se logra con mínimo 3 horas de registro con las condiciones de la zona, con esto obtener inversión hasta la profundidad requerida, con ayuda de procesamiento, y filtraje de datos. Con ello se obtuvieron curvas planas de fase entre 0 a 90° y se logran ángulos en amplitud menores a 45°.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 62 de 105

Tabla 5-5. Parámetros de inversión conjunta 2D.

Parámetros	
Método	Gauss - Newton
Algoritmo de inversión	Occam
Variables	Rho TM, Rho TE, Phs TM, Phs TE
Iteraciones	25 - 30
Optimización	Full
Rango de frecuencias	10000 – 10 Hz
Software	Zond 2D MT

Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

En la Figura 5-16 se observa la escala de resistividad para la interpretación de las secciones de inversión 2D a partir de los sondeos Magnetotelúricos adquiridos. La cual se determino a partir de la geología definida, registros de perforaciones, comparación de datos con loas tomografías eléctricas y demás datos correlacionables, esto con el fin de definir las unidades y su comportamiento resistivo, ya que la resistividad depende del contexto geológico donde se estén adquiriendo los datos.

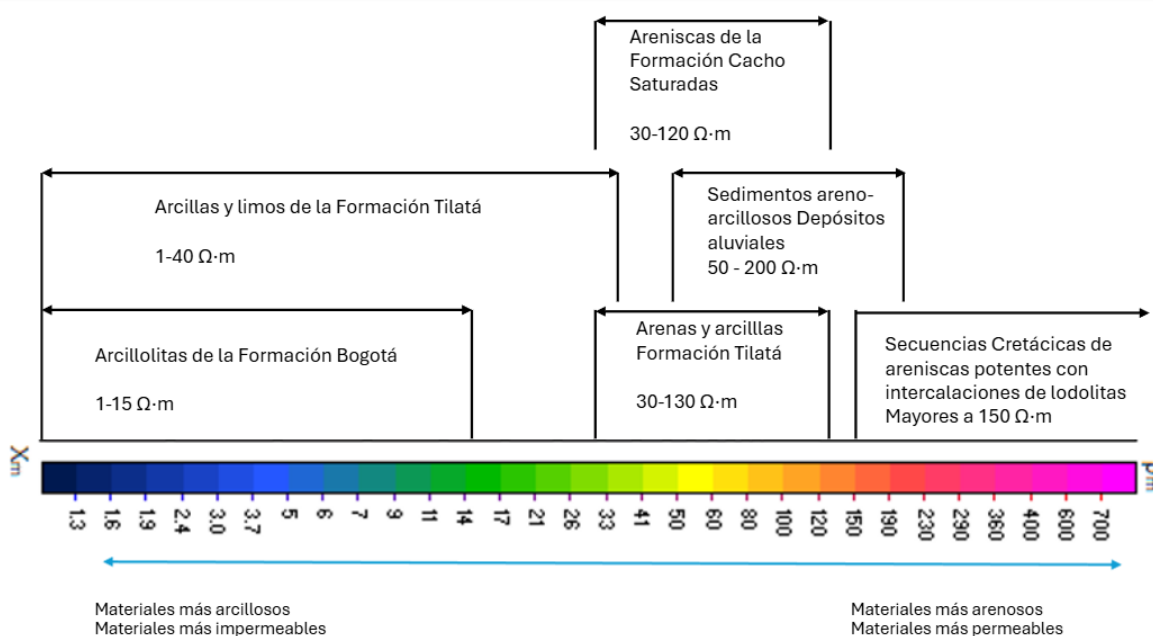


Figura 5-16. Escala de resistividad empleada sondeos MT – PTA Pírgua

Fuente: INGEOMAD SAS. 202

A continuación se observan los resultados obtenidos y sus interpretaciones.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 63 de 105

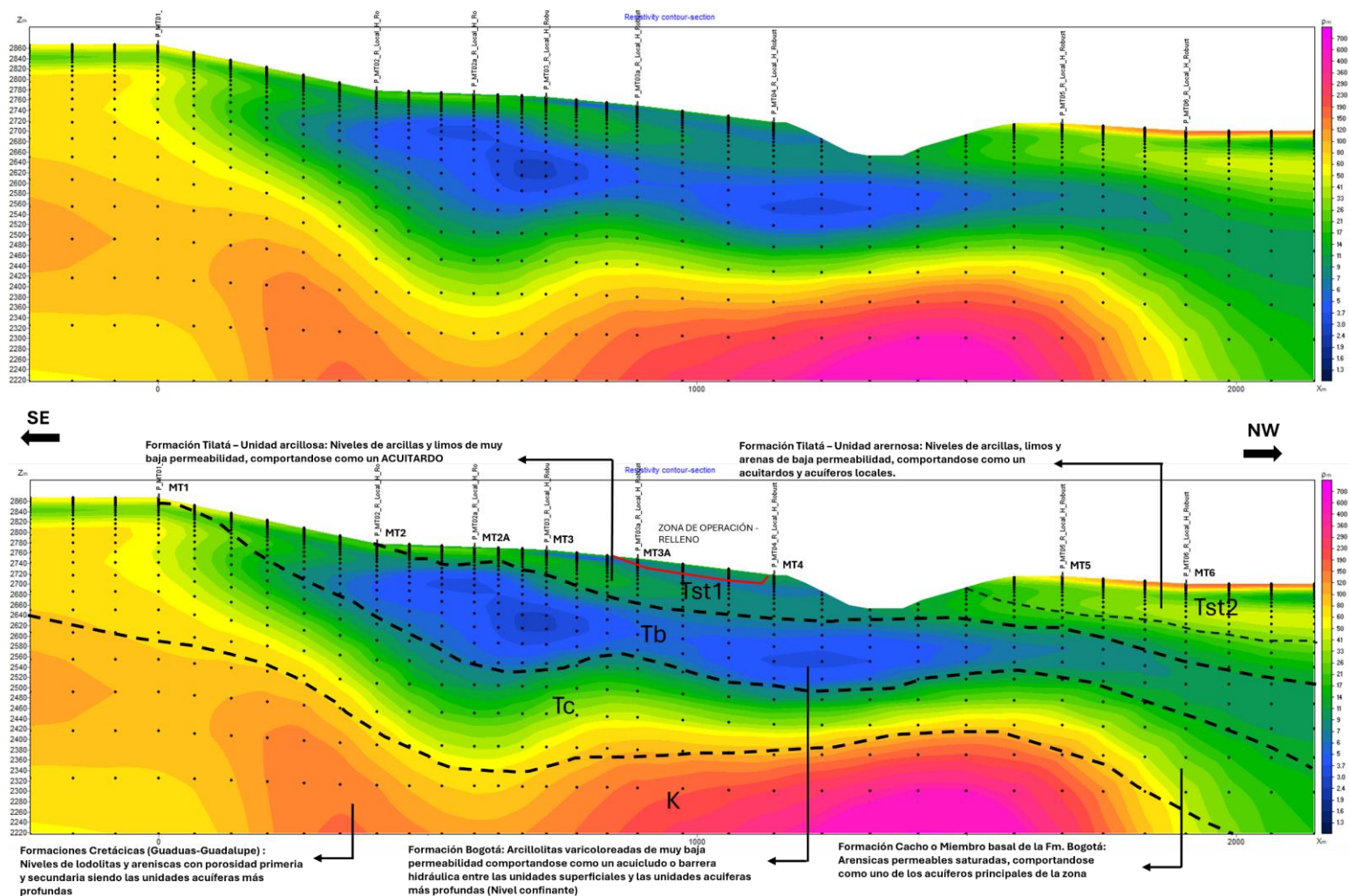


Figura 5-17. Interpretación de Perfil 1 Magnetotelúrico

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 64 de 105

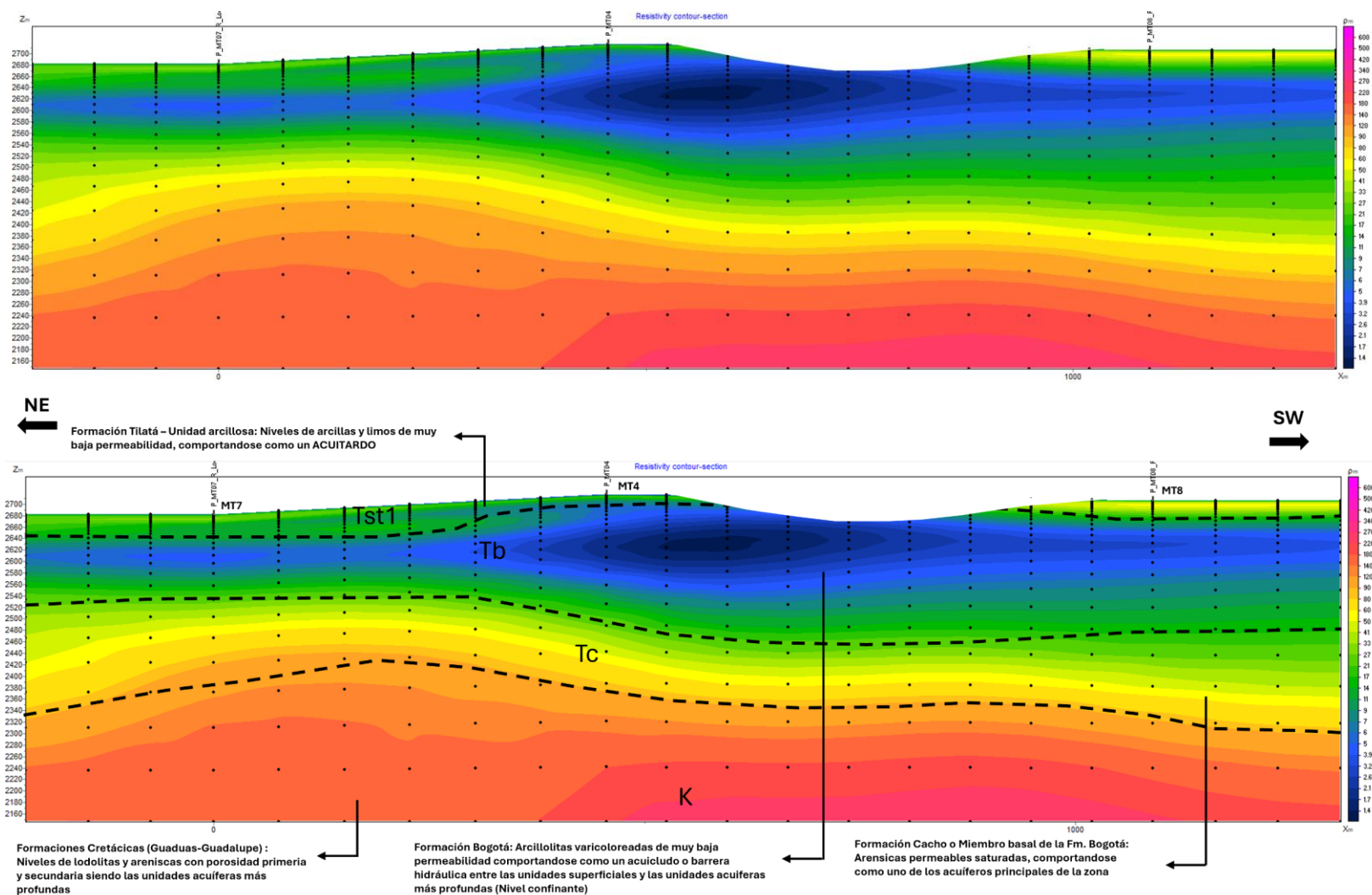


Figura 5-18. Interpretación de Perfil 2 Magnetotelúrico

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 65 de 105

6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

El inventario de puntos de agua subterránea constituye una de las herramientas para la interpretación hidrogeológica del Parque Ambiental de Pírgua. En este capítulo se integran los antecedentes documentales disponibles con los resultados directos de la campaña de campo ejecutada en el presente estudio, reportando la visita de los 16 puntos establecidos en las campañas anteriores y llevando a cabo la actualización y definición respecto al área de influencia hidrogeológica.

Si bien existen registros históricos asociados al seguimiento ambiental y a estudios previos, el análisis que se presenta a continuación se centra en la red de puntos suministrada por el cliente y evaluada en campo, incluyendo las limitaciones reales encontradas durante la medición (lugares secos, inaccesibles o con condiciones no aptas para lectura).



*Figura 6-1. Fotografía de inventario de puntos agua
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026*

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 66 de 105

6.1. RED DE PUNTOS EVALUADOS EN LA CAMPAÑA ACTUAL

La red de puntos evaluada corresponde a pozos y piezómetros existentes, originalmente construidos con distintos objetivos (monitoreo ambiental, control interno y medida cautelar). Para efectos de este estudio, se adoptó una nomenclatura propia PA como consecutivo en el orden de visita, manteniendo entre paréntesis la denominación histórica, con el fin de asegurar la trazabilidad de la información.

Tabla 6-1. Inventario y monitoreo de Visita de Campo INGEOMAD 2026 .

ID PUNTO	ID ESTUDIOS ANTERIORES	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE PUNTO
PA01	P1	2175777.047	4967281.547	POZO PROFUNDO
PA02	MN5	2175581.787	4965334.893	MANANTIAL
PA03	MN6	2175494.303	4965094.942	BAJO INUNDABLE
PA04	MN1	2174185.874	4966500.318	PREDIO SECO
PA05	MN4	2175188.703	4965567.969	MANANTIAL
PA06	MN3	2174926.433	4966386.773	PUNTO SECO
PA07	MN2	2174642.346	4966570.092	MANANTIAL
PA08	A2	2172170.79	4965869.191	RESERVORIO MANANTIAL
PA09	A5	2173347.201	4963985.979	RESERVORIO CLAUSURADO
PA10	A3	2172375.282	4964953.363	RESERVORIO CLAUSURADO
PA11	MN7	2173331.153	4965114.967	PREDIO SECO
PA12	A1	2174059.242	4965266.166	QUEBRADA
PA13	A4	2172860.55	4964574.579	RESERVORIO
PA14	PM8	2173443.973	4965224.009	PIEZOMETRO
PA15	PMR1	2173444.62	4965219.735	PIEZOMETRO
PA16	PM7	2173786.143	4965004.893	PIEZOMETRO
PA17	PM5	2174011.224	4964715.078	PIEZOMETRO
PA18	PM6	2173969.62	4964457.286	PIEZOMETRO
PA19	PM1	2174244.261	4964697.552	PIEZOMETRO
PA20	PM2	2174229.692	4964622.508	PIEZOMETRO
PA21	PM4	2174083.527	4964565.598	PIEZOMETRO
PA22	PM3	2174192.037	4964497.417	PIEZOMETRO
PA23	PMD2	2174516.194	4964556.053	PIEZOMETRO
PA24	PMD1	2174611.712	4964615.457	PIEZOMETRO

Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 67 de 105

Durante la campaña se intentó medir el nivel estático en la totalidad de los puntos suministrados; sin embargo, no todos presentaron condiciones hidráulicas medibles, lo cual constituye un resultado relevante en sí mismo, principalmente en puntos que eran reportados como manantiales o puntos reconocidos por la comunidad, donde en la visita de campo se evidencio la perdida de estos por actividades antrópicas (ajenas al parque) o naturales. También agregando puntos nuevos construidos recientemente.

A partir de ello se estableció la actualización del inventario de puntos de agua para futuros estudios o monitoreos, donde se tienen en cuenta los puntos activos que presentan agua y los puntos nuevos los cuales son puntos de monitoreo dentro del parque.

6.2. ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA EN LA CAMPAÑA ACTUAL

Se realizo la actualización del inventario de puntos de agua debido a que de los 16 puntos reportados inicialmente algunos de los puntos reportados estaban secos, tapados o clausurados y en el caso especial del P1 correspondiente al pozo profundo del municipio de Oicata el cual es inaccesible para la toma de nivel o muestras de agua, adicionalmente se encuentra a una distancia considerable, fuera del área de estudio y del área de influencia hidrogeológica, además se presentan nuevos puntos de monitoreo correspondientes a la red piezométrica de monitoreo del parque la cual en los últimos años ha venido construyendo, mencionando los puntos de monitoreo PM1 Y PM2 los cuales se presentan secos por una posible colmatación.

Con esto se define la actualización del inventario de puntos de agua y se establecen los puntos de monitoreo en el área de influencia hidrogeológica correspondiente a la red interna del parque y algunos de los puntos fuera de ella que hacían parte del inventario inicial los cuales se establecen como puntos de control, que son reconocidos por la comunidad e identificados desde los estudios anteriores.

En la Figura 6-2, se observa la distribución espacial de los puntos de agua y el área de influencia hidrogeológica definida.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 68 de 105

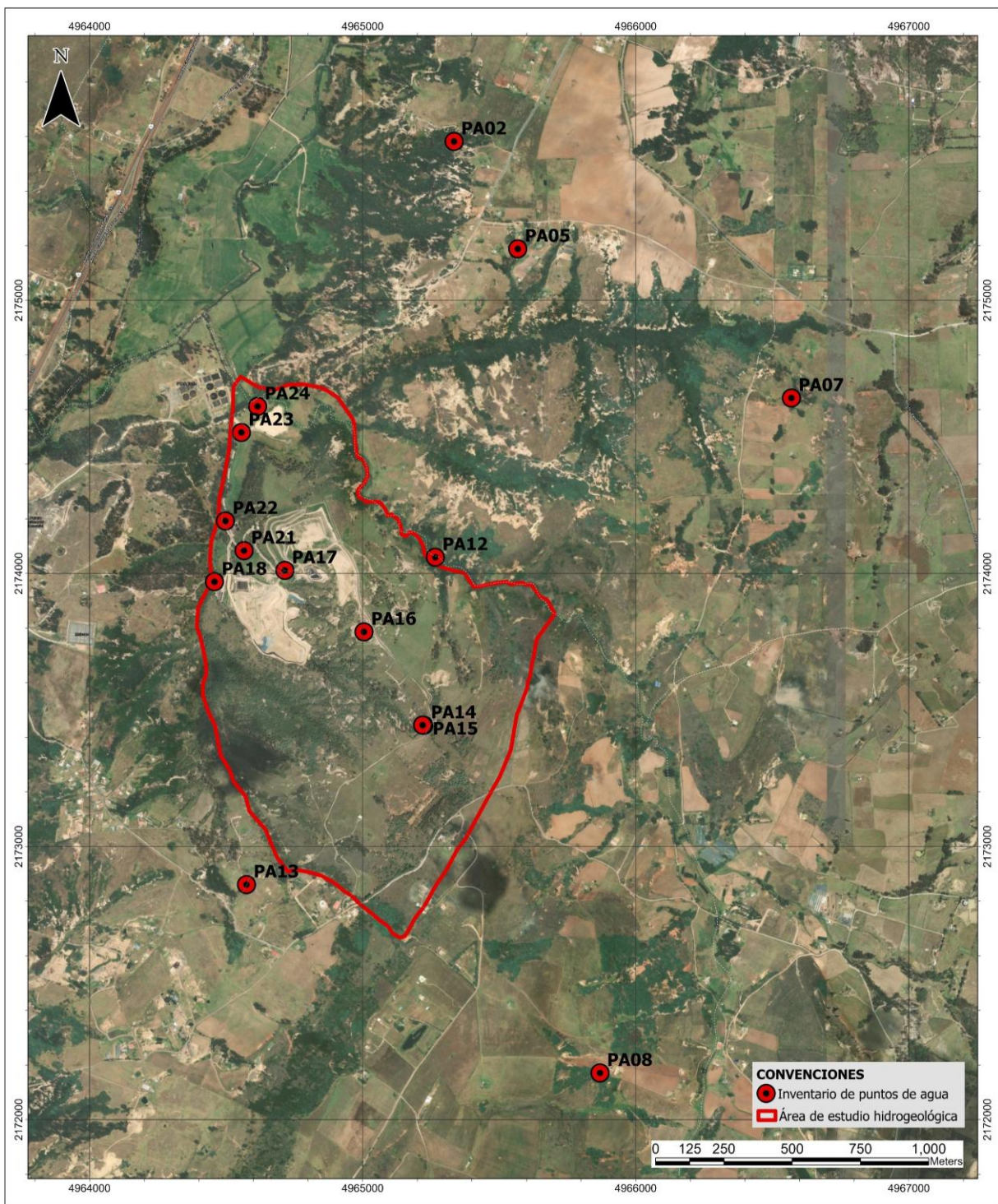


Figura 6-2. Inventario de puntos de agua actualizado
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 69 de 105

La Tabla 6-2 muestra el resumen del inventario de puntos de agua levantado en fase de campo, enfatizando en los puntos a los que se les pudo medir nivel estático.

Tabla 6-2. Resumen inventario de puntos de agua

ID PUNTO	ID ESTUDIOS ANTERIORES	NORTE (CTM12)	ESTE (CTM12)	TIPO DE PUNTO	NIVEL ESTÁTICO	ESTADO DEL PUNTO
PA02	MN5	2175581.787	4965334.893	MANANTIAL	N/A	Activo
PA05	MN4	2175188.703	4965567.969	MANANTIAL	N/A	Activo
PA07	MN2	2174642.346	4966570.092	MANANTIAL	N/A	Activo
PA08	A2	2172170.79	4965869.191	MANANTIAL	N/A	Activo
PA12	A1	2174059.242	4965266.166	QUEBRADA	N/A	Activo
PA13	A4	2172860.55	4964574.579	RESERVORIO	N/A	Activo
PA14	PM8	2173443.973	4965224.009	PIEZOMETRO	N/A	Activo
PA15	PMR1	2173444.62	4965219.735	PIEZOMETRO	24.54	Activo
PA16	PM7	2173786.143	4965004.893	PIEZOMETRO	8.13	Activo
PA17	PM5	2174011.224	4964715.078	PIEZOMETRO	7.74	Activo
PA18	PM6	2173969.62	4964457.286	PIEZOMETRO	0.71	Activo
PA21	PM4	2174083.527	4964565.598	PIEZOMETRO	8.65	Activo
PA22	PM3	2174192.037	4964497.417	PIEZOMETRO	2.66	Activo
PA23	PMD2	2174516.194	4964556.053	PIEZOMETRO	0.20	Activo
PA24	PMD1	2174611.712	4964615.457	PIEZOMETRO	1.24	Activo

Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

*PA23-PMD2 punto de revisión, ya que se encontró un nivel piezométrico en superficie posterior a una fuerte precipitación presentada, lo que deja incógnitas en si existe presión del acuífero o una posible infiltración del lluvia desde superficie.

Los puntos medidos muestran, en general, niveles profundos o columnas de agua reducidas, compatibles con un comportamiento de baja saturación en sectores evaluados y con ausencia de evidencia de un nivel freático somero continuo en los puntos medidos.

Una proporción significativa de los puntos evaluados no presentó nivel de agua medible al momento de la campaña. Esta condición se debió a:

- Ausencia total de columna saturada (pozos secos).
- Columna de agua insuficiente para una lectura confiable.
- Problemas operativos documentados en campo (obstrucciones, colmatación, acceso limitado).

Estos puntos no fueron descartados del análisis, sino clasificados explícitamente como secos o no medibles dentro de la campaña, ya que su comportamiento refuerza la interpretación hidrogeológica del sitio. La recurrencia de pozos secos, especialmente en profundidades

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 70 de 105

someras, es consistente con un comportamiento de baja saturación en puntos someros y con materiales de permeabilidad reducida, hipótesis que debe interpretarse junto con la estratigrafía, piezometría y ensayos hidráulicos.

Los niveles medidos durante la campaña actual fueron comparados cualitativamente con los rangos reportados en el informe de piezometría de Hidrosuelos del año 2023, observándose una consistencia general en el comportamiento hidráulico, aunque con variaciones puntuales atribuibles a condiciones locales, estacionales y constructivas.

No obstante, es importante enfatizar que las interpretaciones desarrolladas en este estudio se fundamentan exclusivamente en los datos obtenidos en campo, y no en la extrapolación directa de registros históricos.

Los resultados del inventario y de las mediciones realizadas permiten concluir, exclusivamente con base en los datos de la presente campaña, que:

- No se identificó evidencia de un nivel freático somero continuo en los puntos evaluados durante la campaña actual en el Parque Tecnológico.
- La mayoría de los puntos someros evaluados se encuentran secos o con saturación mínima.
- Los niveles de agua medidos corresponden a condiciones puntuales, profundas o semiconfinadas, sin indicios concluyentes, en la campaña actual, de conectividad hidráulica vertical efectiva entre la superficie y los niveles más profundos. La heterogeneidad observada es consistente con un subsuelo estratificado, dominado por materiales de baja transmisividad.

Estos resultados constituyen la base directa para el análisis piezométrico y la interpretación hidráulica desarrollados en los capítulos siguientes, y representan el estado real del sistema al momento del levantamiento de campo, sin dependencia de supuestos históricos.

En base a la actualización de este inventario de puntos de agua, para un plan de monitoreo se establece que no hay forma de observar la descarga del sistema en el parque, ya que el acuífero principal está a bastante profundidad y la única manera sería un pozo profundo, el cual podría hacer correlación de las zonas altas de recarga que están por encima del parque y el agua captada en profundidad, no obstante en los piezómetros PMD1 (PA24) Y PMD2 (PA23) se pueden realizar monitoreos de escorrentías subsuperficiales e infiltraciones de corrientes superficiales las cuales se pueden infiltrar en los depósitos cuaternarios.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 71 de 105

7. ANÁLISIS PIEZOMETRICO

Los resultados piezométricos corresponden a las mediciones realizadas durante la fase de campo del presente estudio, a partir de pozos y piezómetros existentes que presentaron condiciones hidráulicas medibles. La información obtenida permite caracterizar el comportamiento del nivel de agua subterránea en el subsuelo somero y medio del Parque Tecnológico, así como evaluar la continuidad hidráulica entre los distintos puntos monitoreados.

Las mediciones evidencian desde el inicio un sistema heterogéneo, sin desarrollo de un nivel freático continuo, dominado por condiciones de muy baja saturación en superficie y por la presencia localizada de niveles confinados o semiconfinados en profundidad.

En varios puntos no fue posible registrar nivel de agua debido a la ausencia de columna saturada, particularmente en piezómetros y pozos de baja profundidad ubicados directamente dentro del Parque Tecnológico. Esta condición no se considera una limitación del estudio, sino un resultado relevante que es consistente con un comportamiento de baja saturación en puntos someros y con materiales de permeabilidad reducida, lo cual debe interpretarse junto con la estratigrafía y los ensayos hidráulicos.

En contraste, los pozos de mayor profundidad sí registraron niveles de agua a profundidades significativas, lo que pone en evidencia una marcada desconexión hidráulica vertical entre la superficie y los niveles saturados más profundos.

Tabla 7-1. Niveles estáticos – campaña 2026

ID PUNTO	ID ESTUDIOS ANTERIORES	NORTE (CTM12)	ESTE (CTM12)	TIPO DE PUNTO	NIVEL ESTÁTICO
PA15	PMR1	2173444.62	4965219.735	PIEZOMETRO	24.54
PA16	PM7	2173786.143	4965004.893	PIEZOMETRO	8.13
PA17	PM5	2174011.224	4964715.078	PIEZOMETRO	7.74
PA18	PM6	2173969.62	4964457.286	PIEZOMETRO	0.71
PA21	PM4	2174083.527	4964565.598	PIEZOMETRO	8.65
PA22	PM3	2174192.037	4964497.417	PIEZOMETRO	2.66
PA23	PMD2	2174516.194	4964556.053	PIEZOMETRO	0.20
PA24	PMD1	2174611.712	4964615.457	PIEZOMETRO	1.24

Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

Un caso particular corresponde al pozo PMD2, el cual presentó condición artesiana, con nivel piezométrico coincidente con la superficie del terreno. Esta respuesta hidráulica indica la interceptación de un nivel confinado con presión positiva, y constituye un rasgo puntual del sistema, no generalizable al resto del área, dado que pozos cercanos no presentan saturación.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 72 de 105

Para el análisis espacial, los niveles estáticos medidos fueron transformados a cotas piezométricas mediante la resta de la profundidad al nivel de agua respecto a la cota topográfica de cada punto. Este procedimiento permitió homogenizar la información y representar el potencial hidráulico real del sistema, independientemente de la topografía local.

Los puntos secos no fueron incorporados en la interpolación, ya que no representan niveles piezométricos definidos. Su exclusión es metodológicamente correcta y evita distorsiones en la superficie interpolada.

Con base en las cotas piezométricas disponibles, se elaboró el mapa de isopiezas mediante el método de interpolación **Inverse Distance Weighting (IDW)**. La selección de este método respondió al número limitado de puntos con nivel medible y a la necesidad de evitar sobreajustes estadísticos propios de técnicas geoestadísticas más complejas, como el Kriging, que requieren una mayor densidad de datos para su correcta aplicación.

El método IDW permite una representación conservadora del campo piezométrico, asignando mayor peso a los puntos más cercanos y reflejando de forma directa la influencia local de cada medición. En este contexto, su uso resulta metodológicamente adecuado para identificar gradientes hidráulicos y tendencias espaciales generales, sin introducir supuestos adicionales sobre la estructura de variabilidad del sistema.

Debe señalarse que el número reducido de puntos condiciona el alcance del resultado. En consecuencia, el mapa generado no pretende definir una superficie equipotencial regional, sino

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 73 de 105

representar tendencias hidráulicas locales coherentes con el modelo hidrogeológico conceptual del área y con las condiciones de desconexión vertical previamente identificadas.

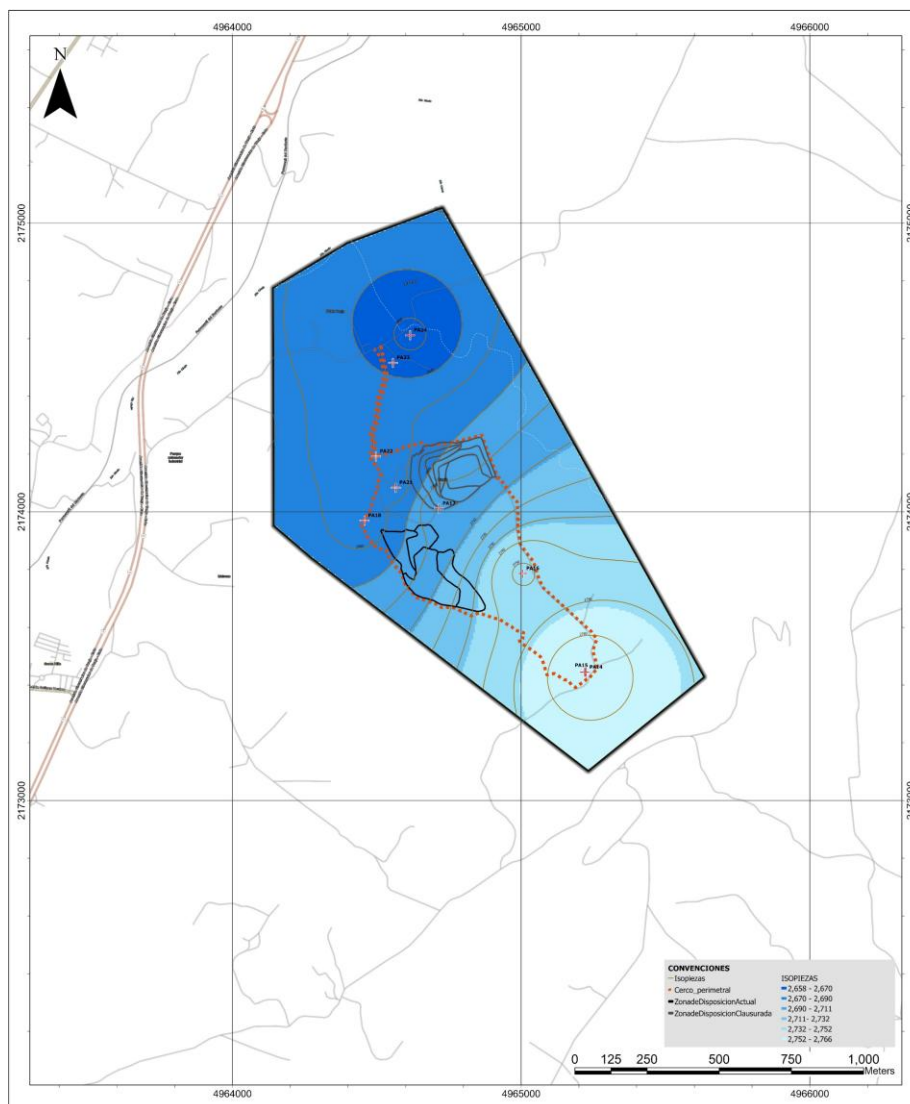


Figura 7-1. Mapa de isopiezas del área de estudio
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

El patrón de isopiezas obtenido no muestra convergencia de flujo hacia la zona del Parque Tecnológico, ni evidencia gradientes que sugieran migración vertical desde la superficie hacia niveles profundos. Por el contrario, los gradientes son suaves y consistentes con un sistema controlado por unidades de baja permeabilidad y niveles confinados aislados.

7.1. Análisis piezométrico campañas 2023 y 2026

	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 74 de 105

El análisis piezométrico en el área del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua se fundamenta en registros históricos y recientes de niveles de agua medidos en pozos y piezómetros de diferentes profundidades, contruidos con fines de monitoreo ambiental y verificación hidrogeológica (Hidrosuelos,2023) La información disponible permite evaluar no solo la presencia o ausencia de agua subterránea, sino también la dinámica vertical del sistema y el grado de conectividad hidráulica entre unidades. El estudio de Hidrosuelos en 2023 evaluó los puntos de monitoreo PM1,PM2,PM3,PM4,PM5,PM6, PM7 y PM8.

Uno de los rasgos más consistentes del sistema es la ausencia de un nivel freático continuo en los primeros metros del subsuelo. Los pozos superficiales PM1 y PM4, con profundidades cercanas a 12 m, han permanecido secos durante el monitoreo del 2023, donde el PM1 también se presenta seco en la campaña actual, a diferencia del PM4 que si presenta nivel actualmente, a esto se suma que en la campaña actual el PM2 se presenta seco donde se evalúa una posible colmatación ya que la sonda no llega a la profundidad total de construcción.

En contraste, algunos pozos someros sí registran niveles de agua, pero con columnas reducidas y alta variabilidad espacial, esto no aporta evidencia de un acuífero libre superficial continuo en los sectores evaluados. Pozos como PM2, PM3, PM5 y PM6 presentan niveles estáticos que oscilan aproximadamente entre 2.5 m y 11 m de profundidad, con espesores saturados generalmente bajos. Estos niveles no muestran continuidad lateral clara ni responden de forma homogénea a eventos climáticos, lo cual refuerza su carácter local y su escasa capacidad de almacenamiento.

A mayor profundidad, el comportamiento piezométrico cambia de manera significativa. Los pozos PM7 y PM8, ambos con profundidades cercanas a 41 m, presentan niveles de agua más profundos y, en el caso de PM7, fluctuaciones marcadas a lo largo del tiempo, con registros que varían desde valores someros hasta niveles significativamente más profundos según el periodo de medición. Esta variabilidad sugiere un sistema semiconfinado, sensible a cambios de presión más que a recarga directa desde superficie.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 75 de 105

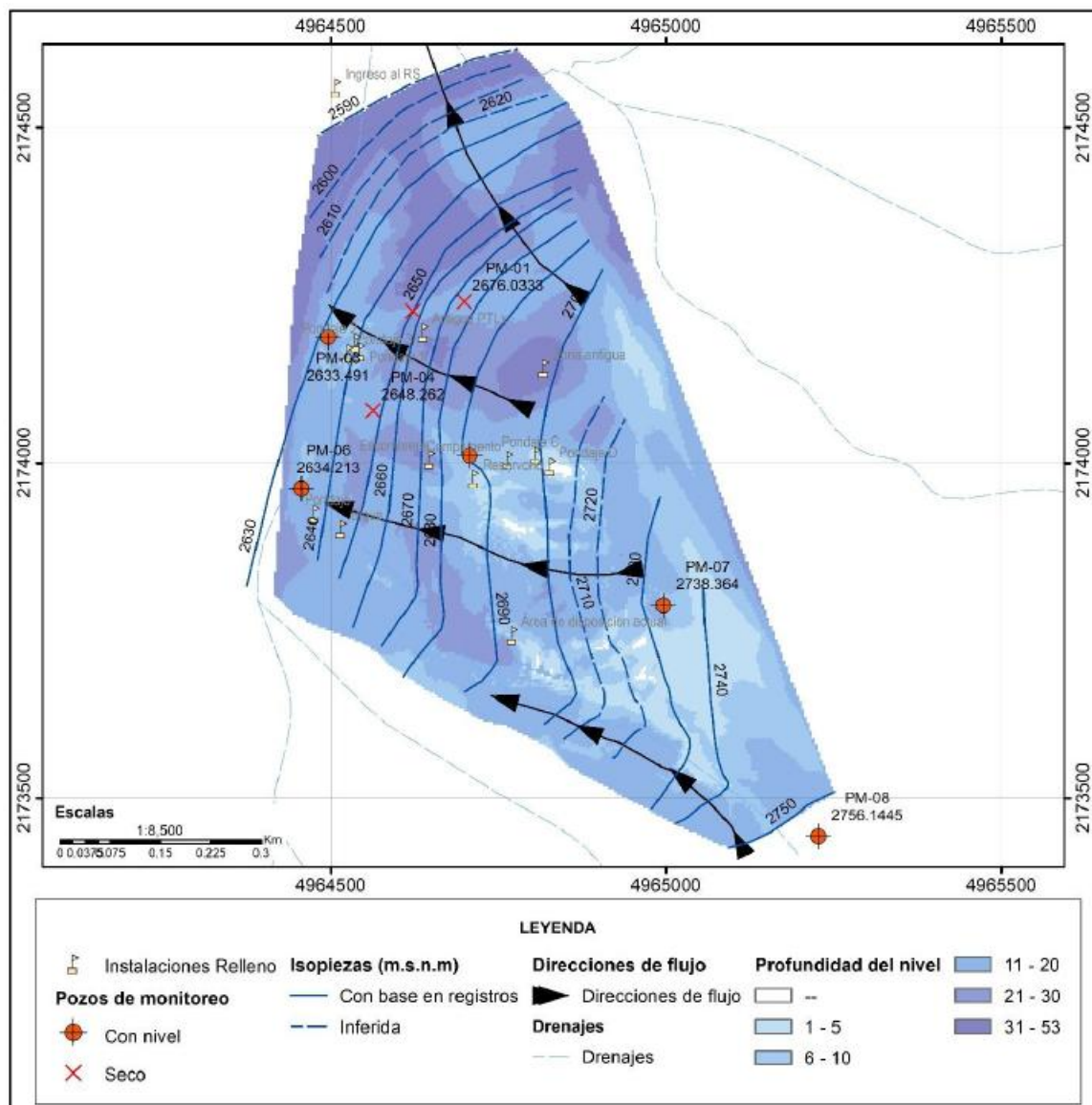


Figura 7-2. Mapa de isopiezas del área del Parque ambiental de PIRGUA 2023.
Fuente: Hidrosuelos, 2023

El mapa de isopiezas del 2023 tiene buena correlación con el mapa generado recientemente (Figura 7-1) donde las direcciones de flujo con consistentes y además se presentan profundidades similares con algunas variaciones locales.

El pozo PMR1 evaluado en el 2026, con una profundidad de 80 m, constituye el mejor indicador del comportamiento hidráulico profundo. El nivel estático registrado a aproximadamente 24.54 m confirma la presencia de un sistema confinado, hidráulicamente separado de los niveles someros. La profundidad del nivel, junto con la baja conductividad hidráulica medida, no sugiere una

 INGEOMAD INGENIERÍA, GEOFÍSICA Y MEDIO AMBIENTE	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 76 de 105

recarga directa desde la superficie en el área evaluada, bajo las condiciones observadas y apunta a un control estructural y regional del flujo subterráneo (Hidrosuelos, 2023).

En conjunto, la información piezométrica revela un sistema altamente estratificado, sin continuidad hidráulica vertical efectiva entre la superficie y las unidades profundas. La coexistencia de zonas secas, acuíferos colgados de baja potencia y niveles confinados profundos indica que el flujo subterráneo está controlado por la arquitectura geológica y no por infiltración directa desde el área del relleno sanitario. Esta lectura es coherente con los parámetros hidráulicos medidos y constituye un insumo clave para la construcción del modelo hidráulico conceptual del sitio.

La coexistencia de puntos secos, niveles profundos y una condición artesiana puntual confirma que el comportamiento piezométrico responde a un sistema discontinuo, sin acuífero libre superficial desarrollado. Este comportamiento es coherente con la interpretación hidrogeológica previa y refuerza la hipótesis de desconexión hidráulica vertical.

Finalmente, En conjunto, la información piezométrica es compatible con un sistema estratificado, con respuesta heterogénea y sin evidencia concluyente de continuidad hidráulica vertical efectiva entre la superficie y las unidades más profundas en los puntos evaluados. Esta interpretación debe integrarse con la estratigrafía, la caracterización hidráulica y el contexto estructural del área.

8. CARACTERIZACIÓN HIDRAÚLICA

La comprensión del comportamiento hidráulico del subsuelo en el área del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua es un elemento central para evaluar el riesgo potencial de interacción entre el relleno sanitario y los recursos hídricos subterráneos regionales.

A diferencia de aproximaciones puramente descriptivas, el análisis hidráulico aquí presentado se fundamenta en parámetros medidos directamente en puntos específicos, complementados con interpretaciones integradas a partir de piezometría, balance hídrico y modelo conceptual, junto con conductividades hidráulicas obtenidas mediante ensayos Lefranc y pruebas Slug, y cálculos de escorrentía e infiltración basados en datos meteorológicos locales. Esto permite evaluar la dinámica del sistema desde una perspectiva cuantitativa, identificando no solo la presencia o ausencia de agua, sino también las velocidades relativas de flujo, las condiciones de confinamiento y la conectividad vertical entre unidades geológicas.

El contexto hidroclimático del área introduce una condición adicional de complejidad. La marcada diferencia entre precipitación anual y evaporación potencial genera un déficit hídrico estructural, lo que condiciona la recarga efectiva y favorece una respuesta hidrológica rápida dominada por la escorrentía superficial. En este escenario, la infiltración profunda no es un proceso dominante, sino un fenómeno localizado y altamente dependiente de la litología y de la estructura del subsuelo.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 77 de 105

Finalmente, el análisis hidráulico se presenta como un insumo técnico clave para la gestión ambiental del sitio. No se limita a describir condiciones actuales, sino que permite discutir de manera conceptual trayectorias potenciales de flujo y órdenes de magnitud de movilidad hidráulica.

8.1.1. Conductividad hidráulica y permeabilidad

La caracterización hidráulica del subsuelo en el área del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua se basa en ensayos directos realizados en campo, seleccionados de acuerdo con la profundidad investigada y el tipo de material interceptado (Hidrosuelos, 2016). Los resultados permiten diferenciar con claridad el comportamiento hidráulico de los estratos superficiales respecto a las unidades profundas, confirmando una marcada disminución de la capacidad de transmisión de agua con la profundidad (INCO, 2021; Hidrogeocol, 2022).

En los niveles someros, correspondientes a depósitos superficiales y a la zona de alteración de la Formación Tilatá, se ejecutaron ensayos de permeabilidad in situ mediante el método Lefranc (Hidrosuelos, 2016). Los valores de conductividad hidráulica obtenidos oscilaron entre 2.42×10^{-4} m/s y 2.50×10^{-4} m/s. Aunque estos valores pueden considerarse moderados en términos absolutos, su interpretación debe hacerse con cautela: corresponden a suelos alterados, con influencia de raíces, fracturación superficial y materia orgánica, lo que favorece una permeabilidad aparente mayor que la del material intacto (Hidrosuelos, 2016).

En contraste, la evaluación hidráulica de los estratos profundos se realizó mediante pruebas Slug en los pozos de monitoreo construidos durante la medida cautelar (Hidrosuelos, 2022). En el pozo PMD1, con una profundidad total de 20 m y ubicado en zona de descarga, se estimó una conductividad hidráulica de 1.68×10^{-4} m/h (Hidrosuelos, 2022). Por su parte, el pozo PMR1, con 80 m de profundidad y representativo de condiciones profundas en zona de recarga teórica, arrojó un valor aún menor, del orden de 8.5×10^{-5} m/h (Hidrosuelos, 2022).

Tabla 8-1. Parámetros hidráulicas pruebas Slug-2023

PUNTO DE ENSAYO	Conductividad hidráulica m/h	Conductividad hidráulica m/d	Clasificación Vélez 2004
PMD-1	1.68×10^{-4}	4.03×10^{-3}	Mala permeabilidad - semimpermeable
PMR-1	8.5×10^{-5}	2.04×10^{-3}	Mala permeabilidad - semimpermeable

Fuente: Hidrosuelos, 2023

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 78 de 105

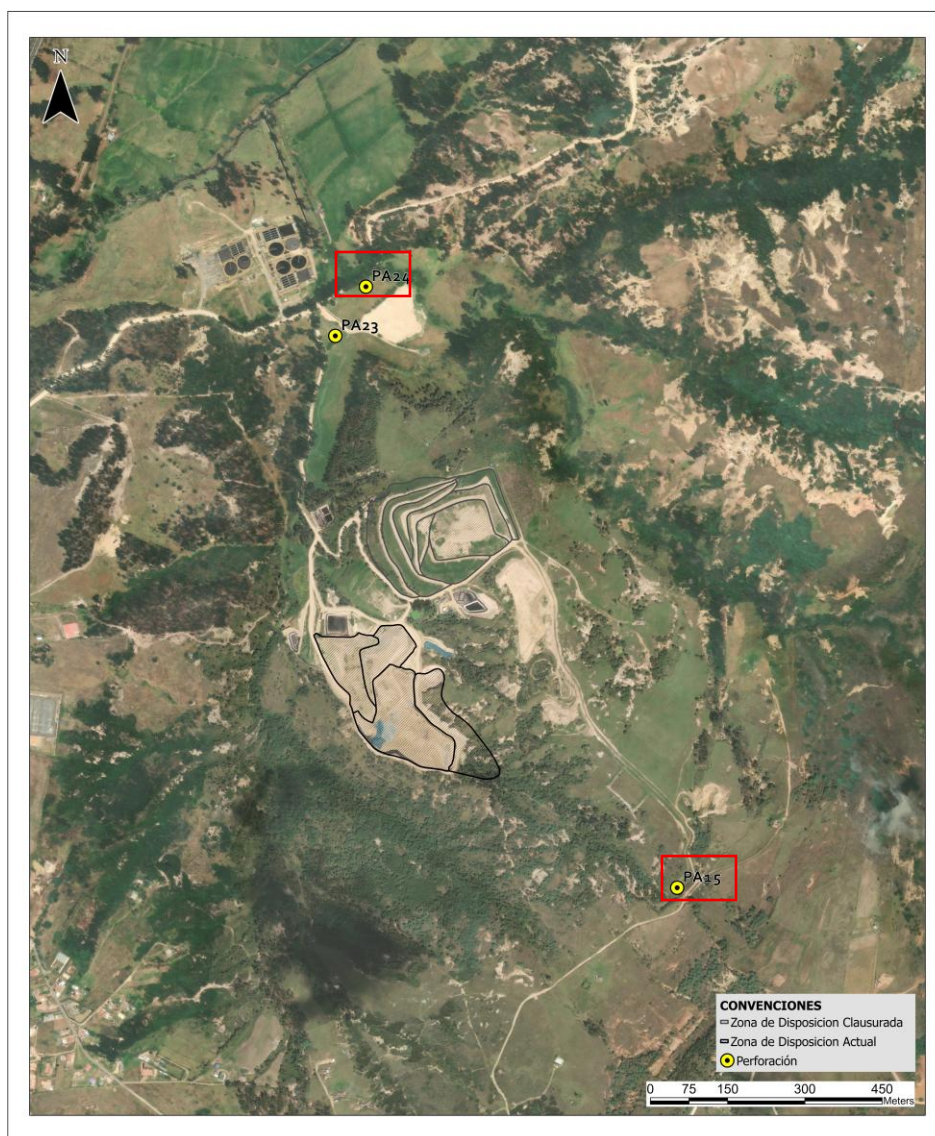


Figura 8-1. Mapa de perforaciones 2023 – puntos de pruebas Slug, PMD-1 – PA24 y PMR-1-PA15
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

La diferencia de unidades es crítica y no debe pasarse por alto. Mientras los valores superficiales se expresan en metros por segundo, las conductividades profundas están en metros por hora, lo que equivale aproximadamente a 10^{-8} m/s. Este orden de magnitud es consistente con materiales de carácter arcilloso y confirma el rol hidráulico dominante de la Formación Tilatá como unidad unidad predominantemente de baja transmisividad en los puntos evaluados.

La disminución progresiva de la conductividad con la profundidad, junto con la ausencia de niveles freáticos continuos en los primeros 10–15 m (Hidrogeocol, 2022), indica que el subsuelo no funciona como un acuífero libre continuo, sino como un sistema estratificado, dominado por

 INGEOMAD INGENIERÍA, GEOFÍSICA Y MEDIO AMBIENTE	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 79 de 105

barreras hidráulicas y transmisiones locales limitadas (INCO, 2021). Este comportamiento es coherente con los registros piezométricos y con la ausencia recurrente de agua en varios puntos de monitoreo superficial (Hidrosuelos, 2023).

En conjunto, los parámetros hidráulicos medidos descartan un escenario de flujo vertical desde la superficie hacia las unidades profundas bajo condiciones naturales.

8.1.2. Interpretación hidráulica integrada y esquema de flujo subterráneo

La integración de los parámetros hidráulicos medidos y de los registros piezométricos permite la interpretación integrada basada en ensayos puntuales, piezometría y contexto geológico como un sistema estratificado, de mala conductividad hidráulica según los valores de las pruebas Slug clasificado a partir de lo establecido por Velez 2002. y con circulación subterránea dominada por condiciones confinadas en profundidad.

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos en los ensayos Lefranc y en las pruebas Slug muestran una disminución de varios órdenes de magnitud con la profundidad, lo que limita de forma efectiva el flujo vertical descendente. Esta condición explica la ausencia de niveles freáticos continuos en los primeros metros del subsuelo y la presencia únicamente de saturaciones locales, poco potentes y sin continuidad lateral, asociadas a heterogeneidades superficiales.

Desde el punto de vista piezométrico, la coexistencia de pozos secos y niveles profundos confinados indica que el sistema no responde como un acuífero libre regional, sino como un conjunto de compartimentos hidráulicos parcialmente aislados. En este contexto, los niveles someros no constituyen una vía de transmisión sostenida hacia profundidad.

En términos hidráulicos, la Formación Tilatá cumple un rol dominante como unidad de baja conductividad hidráulica, que por consiguiente se infiere una baja transmisividad en la zona de estudio, esto restringe el intercambio vertical entre los niveles superficiales y los acuíferos más profundos. Aunque la presencia local de lentes arenosos introduce heterogeneidad al sistema, los valores medidos de conductividad y la respuesta piezométrica observada indican que estos cuerpos con la evidencia disponible no se ha demostrado una conectividad hidráulica efectiva a escala del sitio; su comportamiento debe evaluarse según continuidad lateral, posición estratigráfica, estructura y piezometría.

En consecuencia, el modelo hidráulico resultante descarta la recarga dentro del área de influencia y esta se presenta ubicada en los límites Surorientales del área de influencia en los afloramientos de la Formación Cacho.

 INGEOMAD INGENIERIA, GEOFÍSICA Y MEDIO AMBIENTE	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 80 de 105

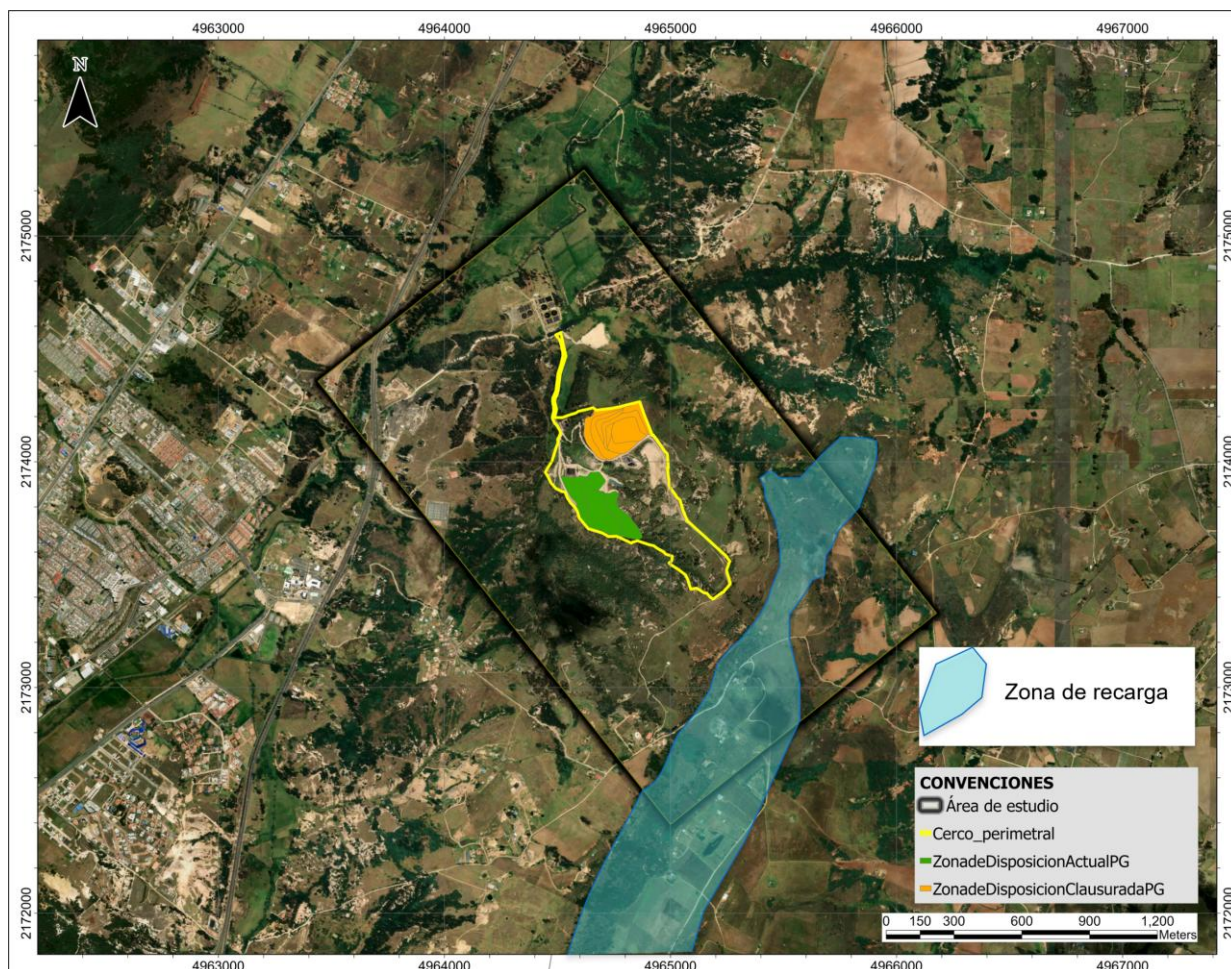
9. ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

Para el área de influencia hidrogeológica determinadas para este estudio en las zonas donde se presenta el parque, no se evidencia la existencia de una posible zona de recarga según los ensayos hidráulicos realizados (Hidrosuelos, 2023), la exploración geofísica y la geología local, ya que se presentan materiales arcillosos que dificultan la infiltración directa en el subsuelo y además las pendientes topográficas y cobertura vegetal que no son aptas para definir una zona de recarga en el sitio, dentro de la Formación Tilatá se presentan algunos niveles arenosos que en estudios anteriores se reportan como niveles continuos con extensión dentro de toda el área del parque, lo cual carece de sustento y análisis. Dentro del marco de este estudio se evidencia en la exploración geofísica y en reconocimientos de campo, dichos niveles arenosos son de espesores muy bajos, discontinuos que no generan un contraste de resistividad y no se evidencia continuidad en la geología de superficie, lo que indica que no son niveles acuíferos y no podrían representar una recarga del sistema acuífero en general.

A partir de ello las zonas de recarga que influenciarían al área de estudio son las zonas determinadas regionalmente en el Plan de manejo del sistema acuífero de Tunja. Donde la zonas de recarga en el área de estudio están comprendida como las zonas donde aflora principalmente la Formación Cacho y donde exista una cobertura vegetal y pendientes topográficas que permitan retener el agua y dar el tiempo suficiente a la infiltración de esta.

A continuación se observa el mapa con la posible zona de recarga en el área de estudio (polígono general), determinada como la zona donde aflora la Formación Cacho. Esta posible área de recarga se presenta en el límite oriental de lo que se denomina el área de influencia hidrogeológica, donde esta posible zona de recarga no estaría entrando en conflicto con las operaciones del parque.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 81 de 105



Ya a nivel regional se observa que el acuífero de Tunja según su plan de manejo, establece que las zonas de recarga para los acuíferos profundos (Grupo Guadalupe – Cretácico) y su acuífero somero (Formación Cacho) son las zonas donde estos estratos afloran a superficie, y se establece que como zonas de descarga en la zona, los pozos aljibes y demás captaciones subterráneas, según el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja, no se reporta evidencia concluyente de conexión directa con cuerpos hídricos superficiales a escala regional en los sectores analizados.

En la Figura 9-2 se observan las zonas de recarga del sistema acuífero de Tunja, donde se observan las zonas aflorantes de las Formaciones Cretácicas (acuíferos profundos) y donde aflora la Formación Cacho (acuífero superficial), donde hacia la zona de estudio se presenta una parte donde aflora la Formación Cacho hacia el eje de la estructura limite de la zona determinada como de influencia hidrogeológica.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 82 de 105



Figura 9-2. Recarga y descarga del sistema Acuífero de Tunja
Fuente: Plan de manejo Acuífero de Tunja Copoboyacá

10. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

La vulnerabilidad de un acuífero se define como el conjunto de características intrínsecas de los estratos geológicos que separan la zona saturada de la superficie, determinando su sensibilidad ante posibles cargas contaminantes. Para el área de influencia del Relleno Sanitario Parque Ambiental Pirgua, se evaluó el riesgo de contaminación mediante la aplicación de los índices internacionales GOD y DRASTIC.

- **Evaluación mediante el Modelo GOD**

El método GOD fue seleccionado por su estructura pragmática, ideal para zonas con información limitada sobre la recarga neta y la topografía detallada. Este índice evalúa la resistencia de la zona saturada a partir de tres parámetros: Grado de confinamiento (G), Sustrato litológico (O) y Profundidad del nivel freático (D).

Resultados por Unidades:

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 83 de 105

- **Acuífero libre en depósitos aluviales:** Presenta una vulnerabilidad **Baja a Moderada** (Índice total: 0,39). Su naturaleza de acuífero libre con niveles freáticos someros y litología de gravas y arenas les confiere una mayor susceptibilidad frente a vertimientos superficiales.
- **Acuífero confinado - Formaciones Bogotá y Cacho:** Presenta una vulnerabilidad **Insignificante** (índice total: 0,056). Al estar conformado por rocas arenosas cubiertas por capas arcillosas de baja permeabilidad, el acuífero se encuentra protegido de la contaminación superficial.
- **Acuitardo - Formación Tilatá** Presenta una vulnerabilidad **Insignificante** (Índice total: 0,084). Su predominancia arcillosa actúa como una barrera natural efectiva contra la infiltración.

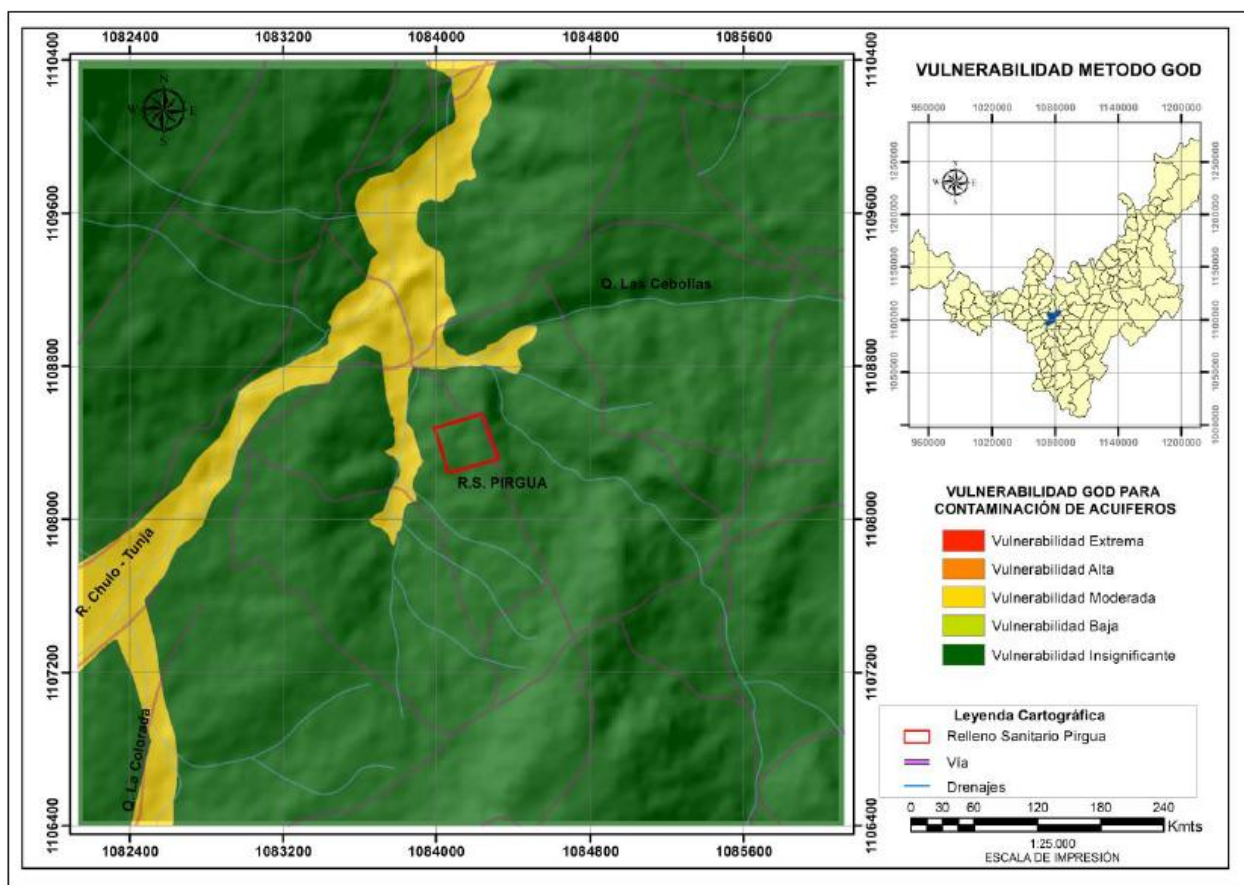


Figura 10-1. Vulnerabilidad metodológica GOD – Zona de estudio hidrosuelos 2016 – Parque Ambiental Pirgua
Fuente: Hidrosuelos 2016.

 INGEOMAD INGENIERIA, GEOFÍSICA Y MEDIO AMBIENTE	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 84 de 105

- **Evaluación mediante el Modelo DRASTIC**

El método DRASTIC permitió una zonificación más detallada al involucrar siete variables: Profundidad del agua (D), Recarga neta (R), Litología del acuífero (A), Suelo (S), Topografía/Pendiente (T), Impacto de la zona vadosa (I) y Conductividad hidráulica (C).

Análisis Espacial de la Vulnerabilidad:

- **Vulnerabilidad Alta y Muy Alta:** Se restringe a las zonas de depósitos aluviales. La presencia de litología granular, acuíferos libres, niveles freáticos someros y topografía plana facilita la rápida infiltración de posibles trazas contaminantes.
- **Vulnerabilidad Moderada:** Se ubica hacia el sector sur del área, asociada a las Formaciones Cacho y Bogotá (miembro inferior). Aunque poseen espesores de areniscas que favorecen la infiltración, los suelos arcillosos suprayacentes brindan un grado de protección.
- **Vulnerabilidad Insignificante a Muy Baja:** Abarca la mayor extensión del área de estudio, dominada por las formaciones Tilatá, Guaduas y el miembro superior de Bogotá. Estas unidades actúan como acuitardos debido a su nula permeabilidad y relieves moderados que favorecen la escorrentía sobre la infiltración.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 85 de 105

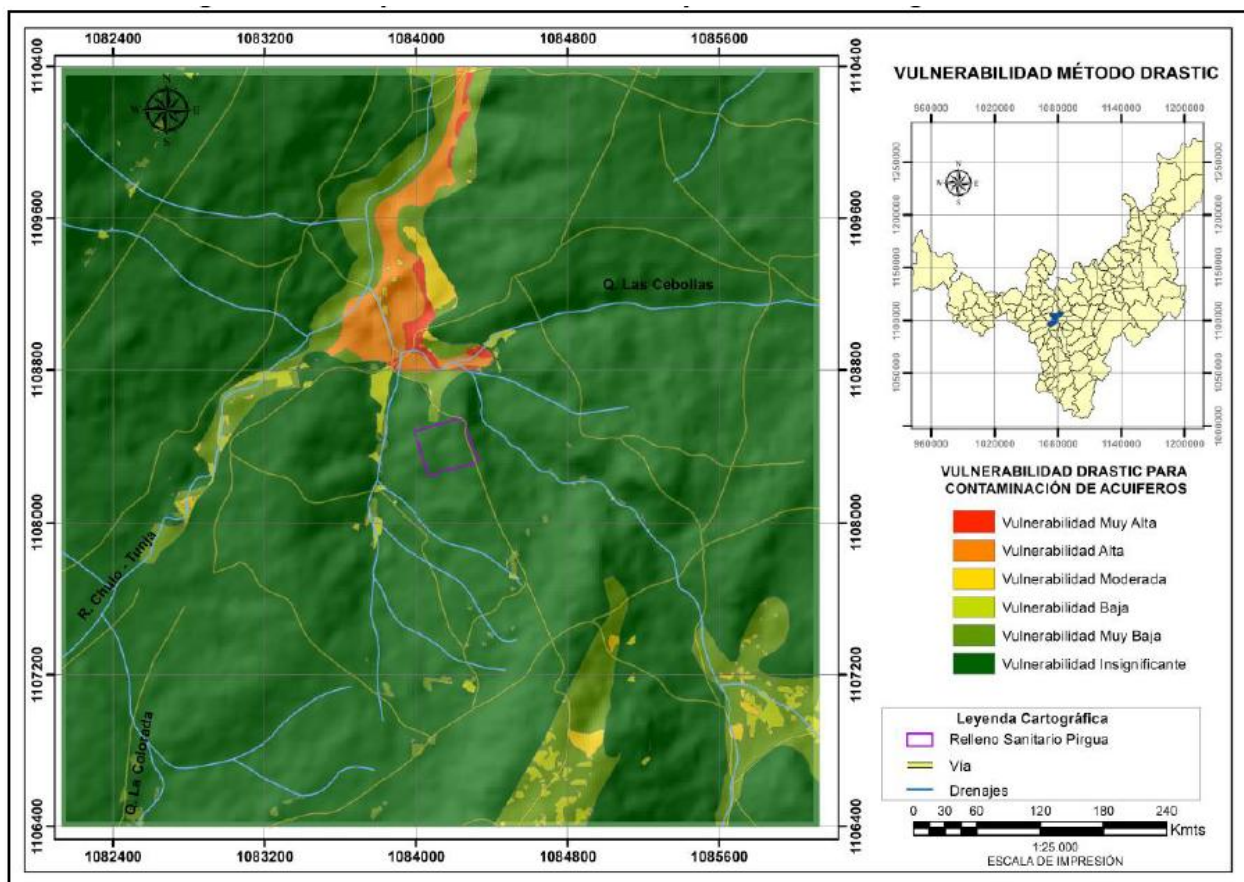


Figura 10-2. Vulnerabilidad metodología DRASTIC – Zona de estudio hidrosuelos 2016 – Parque Ambiental Pirgua
Fuente: Hidrosuelos 2016.

La superposición de ambos modelos hidrogeológicos (GOD y DRASTIC) concluye de manera consistente que **el predio intervenido por el Relleno Sanitario Parque Ambiental Pirgua se encuentra localizado sobre una zona de vulnerabilidad insignificante a la contaminación.** Las características litológicas y estructurales del subsuelo en el vaso de disposición actúan como una barrera natural imperante. En consecuencia, no se espera una afectación directa a los recursos hídricos subterráneos regionales por cuenta de las actividades de disposición final. No obstante, el estudio recomienda mantener medidas de ingeniería preventivas (geomembranas, filtros de lixiviados) y establecer un monitoreo hidroquímico periódico en las zonas planas aledañas (quebrada Las Cebollas), dada su alta vulnerabilidad natural frente a cualquier alteración superficial.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 86 de 105

11. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

11.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua integra la información geológica, hidrogeológica, hidráulica, piezométrica y geofísica disponible, junto con los resultados obtenidos durante la campaña de campo del presente estudio. Su objetivo es representar de manera simplificada pero técnicamente consistente el funcionamiento del sistema de aguas subterráneas, identificando las unidades hidroestratigráficas, los mecanismos de recarga y descarga, las direcciones de flujo y los posibles controles naturales que condicionan la movilidad del agua en el subsuelo.

Este modelo no pretende describir un acuífero homogéneo o continuo, sino un sistema **estratificado, heterogéneo y altamente condicionado por barreras hidráulicas**, donde la presencia de agua subterránea es discontinua y depende de niveles confinados, lentes arenosos locales y condiciones estructurales específicas. La construcción del modelo se apoya de forma prioritaria en los datos de campo obtenidos recientemente, los cuales permiten validar, ajustar o descartar hipótesis planteadas en estudios anteriores.

11.2. MODELO GEOLÓGICO - MARCO HIDROESTRATIGRÁFICO DEL SISTEMA

Desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, el subsuelo del área de estudio se organiza en tres dominios funcionales claramente diferenciados:

En superficie, los depósitos cuaternarios aluviales recientes, son depósitos arcillosos y arenosos que presentan una permeabilidad relativamente mayor, atribuida a procesos de meteorización superficial y presencia de materia orgánica. Estos materiales permiten infiltración puntual y la formación de acuíferos colgados de muy baja potencia, de carácter local y no persistente. La evidencia de campo muestra que estos niveles no desarrollan un nivel freático continuo y se secan rápidamente en ausencia de eventos de lluvia.

Subyaciendo a estos materiales se encuentra la Formación Tilatá y la Fm. Bogotá, dominada por arcillolitas y limolitas de muy baja permeabilidad, con intercalaciones lenticulares de arenas y conglomerados de continuidad limitada. Esta unidad constituye el elemento hidráulico clave del sistema, actuando mayoritariamente como un acuitardo regional que restringe el flujo vertical. Los valores de conductividad hidráulica medidos en profundidad, del orden de 10^{-3} m/d, confirman que la transmisión de agua a través de esta unidad es extremadamente lenta bajo condiciones naturales.

En profundidad se localiza el acuífero regional asociado a la Formación Cacho y Formaciones Cretácicas, separado del sistema superficial por la potente secuencia arcillosa de la Formación Tilatá y Fm. Bogotá. Este acuífero profundo no aflora en el área del Parque Tecnológico y su

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 87 de 105

recarga ocurre en zonas topográficamente más altas, por fuera del área de influencia directa del proyecto.

En la Figura 11-1 se observa la disposición de las unidades de manera local donde se observan la secuencia estratigráfica debajo del parque y su distribución en el modelo geológico construido a partir de la adquisición geofísica y su correlación con perforaciones y datos de campo, denotando la extensión de la Formación Tilatá en toda la superficie como la unidad aflorante y la poca extensión de los depósitos cuaternarios localizados en la zona topográfica más baja, también la secuencia de las Formaciones terciarias (Fm. Bogotá y Cacho) dispuestas encima de las formaciones Cretácicas.

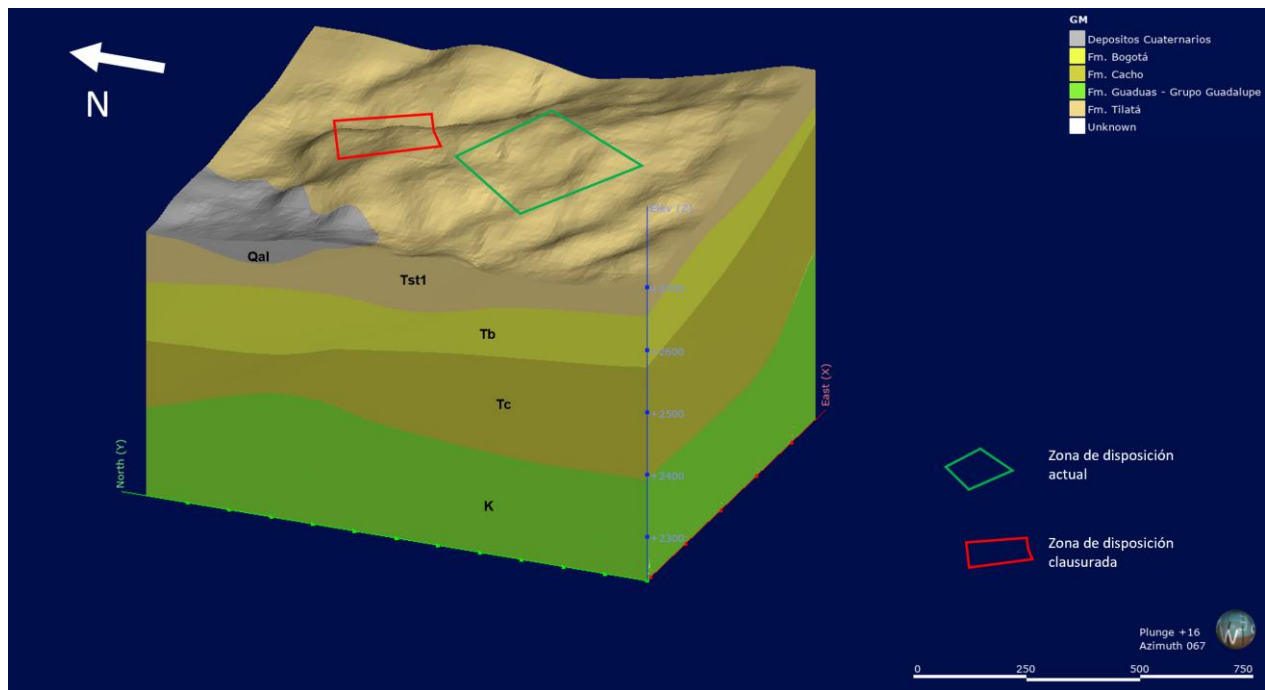


Figura 11-1. Modelo geológico local
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

Dentro del modelo geológico se hace el enfoque dentro de la Formación Tilatá donde se evalúa la Formación a detalle con el fin de definir su litología de manera local en la zona del parque donde dichas litologías son de predominancia de arcillas caolinitas y arcillas grises que se presentan de manera homogénea, con el fin de descartar estratos arenosos continuos regionales dentro de dicha Formación, a continuación se evidencian Fotografías de las excavaciones profundas de construcción de celdas donde se observa dicha unidad de manera aflorante, denotando su coloración y textura de manera continua, con algunos tonos amarillentos de oxidación identificados en campo.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 88 de 105



*Figura 11-2. Formación Tilatá – excavaciones
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.*

En los afloramientos de la Formación Tilatá se evidencia su textura arcillosa y variaciones limosas con variaciones de color entre las arcillas caoliniticas, grises y algunos rojizas con tonos de oxidación, esto que indica que la presencia de arenas de manera masiva o continua dentro de dicha unidad no es conforme con lo observado y expuesto. También se menciona que en dicha unidad sobre la cual esta construida en parque se observa la ausencia de fracturas o diaclasas desarrolladas debido a su comportamiento plástico y su proceso de baja diagénesis lo que hace que no sea una roca consolidada estratificada que pueda fracturarse o generar patrones de diaclasamiento, en la Figura 11-3 se observa el afloramiento de dicha Formación y su ausencia de patrones de fracturamiento o patrones de Diaclasas, también su textura arcillosa y limosa con sus diferentes tonalidades.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 89 de 105



Figura 11-3. Afloramiento local – Formación Tilatá
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

Dentro de esta caracterización de la Formación Tilatá se observa en las tomografías 1-2-3 en la zona de operación denotando que se presenta un comportamiento generalizado de baja resistividad con algunos contraste en zonas de rellenos antrópicos o escombreras, denotando que la secuencia de resistividad no muestra la continuidad de contrastes con resistividades mas altas lo que indica que son cambios locales que pueden ser producto de rellenos antrópicos, zonas de disposición clausuradas o cambios texturales locales.

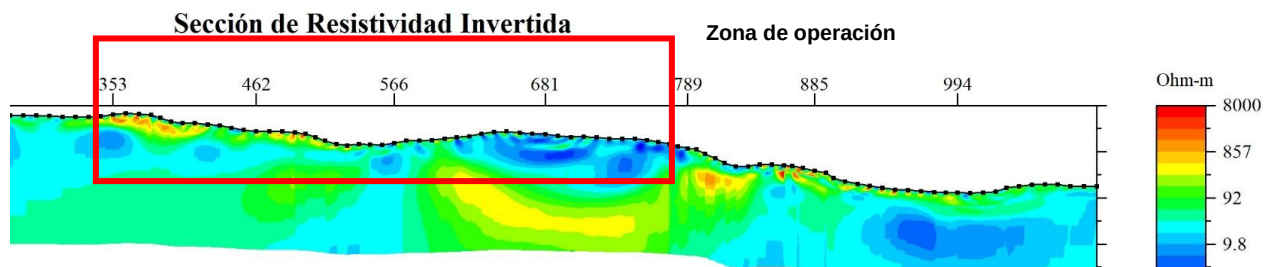


Figura 11-4. Recorte Tomografías 1-2-3, zona operativa
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

Para las unidades más profundas de la zona de estudio, en el Capítulo de contexto geológico en la Pg. 34 se observa la descripción de estas unidades, recalcando que la para Formación Bogotá no se evidencias fracturamiento o diaclasas en los afloramientos para la parte alta ya que presenta un comportamiento más plástico, respecto a la Formación Cacho se observa que esta si puede presentar un grado de fracturamiento bajo lo que indica algo de porosidad secundaria, aunque es la unidad acuífera más profunda dentro de la zona de estudio y que esta aísla de la zona de operación por una columna de litologías arcillosas de gran espesor.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 90 de 105

Desde el punto de vista hidrogeológico, se identifican las siguientes unidades, diferenciadas por su comportamiento hidráulico y su rol dentro del sistema:

- **Unidad Hidrogeológica I2 – Acuífero libre superficial (porosidad primaria)**

Corresponde a los depósitos cuaternarios de origen aluvial y fluvio-lacustre (Qal/Qfl), conformados por arenas, gravas y arcillas no consolidadas. Esta unidad presenta circulación de agua subterránea por porosidad intergranular y se comporta como un acuífero libre de extensión local, restringido a los valles y zonas bajas asociadas a los drenajes superficiales. Su continuidad lateral y espesor son variables, y su influencia se limita a los niveles más someros del subsuelo. Unidad la cual no se presenta en la zona de influencia hidrogeológica determinada en el estudio, siendo unidades hacia los límites NW.

- **Unidad Hidrogeológica III2 – Acuitardo regional (Formación Tilatá)**

La Formación Tilatá (Tst) constituye la unidad hidrogeológica dominante en el área del Parque Ambiental y corresponde al material sobre el cual se desarrollan las celdas del proyecto. Litológicamente está compuesta principalmente por arcillolitas y limolitas de muy baja permeabilidad, con intercalaciones arenosas y de carácter lenticular, discontinuo y de alcance local. Sin embargo en estudios regionales como el Modelo hidrogeológico conceptual de Boyacá Centro 2016 hecho por SGC, esta unidad se determina como acuíferos de mediana a baja productividad, lo cual es una afirmación regional ya que es una Formación muy cambiante según su disposición y configuración donde se encuentre, donde para la zona de estudio presenta un predominio arcilloso por lo cual se evidencia su comportamiento como un acuitardo.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la Formación Tilatá se comporta localmente como un acuitardo, limitando de manera efectiva el flujo vertical. Si bien algunos niveles arenosos pueden permitir circulación de agua local y temporal, estos no conforman un acuífero continuo ni garantizan conectividad hidráulica vertical sostenida hacia las unidades profundas.

- **Unidad Hidrogeológica III3 - (Formación Bogotá)**

La Formación Bogotá (Tb) está constituida predominantemente por arcillolitas y lodolitas de baja permeabilidad, con presencia subordinada y discontinua de niveles arenosos. En el contexto hidrogeológico regional, esta formación se comporta como una **unidad confinante**, reforzando el aislamiento del acuífero profundo.

La alta proporción de materiales finos y su respuesta geofísica de baja resistividad son consistentes con un comportamiento hidráulico restrictivo, lo que limita de manera significativa la

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 91 de 105

transmisión vertical de agua subterránea. En consecuencia, la Formación Bogotá actúa como una **barrera natural efectiva** entre la Formación Tilatá y el acuífero profundo subyacente.

- **Unidad Hidrogeológica I1 – Acuífero confinado (Formación Cacho)**

La Formación Cacho (Tpc) conforma el principal acuífero regional, conocido como el **Acuífero de Tunja**. Está integrada por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, localmente conglomeráticas. A partir de las registros de perforación y de la exploración geofísica se evidencia su presencia en profundidad y presenta un comportamiento confinado, controlado por la superposición de las formaciones arcillosas Tilatá y Bogotá, que impiden su recarga directa desde la superficie.

- **Unidad Hidrogeológica II1 – Acuífero profundo confinado (Formaciones Cretácicas)**

Las secuencias cretácicas principalmente el grupo Guadalupe presenta principalmente el acuífero más profundo del sistema el cual se evidencia en la exploración geofísica por su alto contraste de resistividades altas debido a su alto grado de compactación y diagénesis, estas secuencias son acuíferos profundos regionales confinados.

A continuación en la Tabla 11-1 se observan las unidades hidrogeológicas determinadas para el área de estudio y su síntesis en el marco del actual estudio.

Tabla 11-1. Unidades hidrogeológicas del área de estudio.

	Unidad hidrogeológica	Unidad geológica	Litología	Descripción hidrogeológica	Espesor (m)	Resistividad
I	I1	Formación Cacho	Niveles arenosos porosos	Acuíferos confinados de extensión regional	130 - 200	30 - 120 Ohm.m
	I2	Depósitos aluviales (Qal)	Sedimentos arcillo arenosos intercalados, niveles de arcillas plásticas y niveles arenosos	Acuíferos libres de extensión local, asociados a los drenajes	6.0 -10.0	50 - 200 Ohm.m
II	II1	Formaciones Cretácicas/ Fm. Guaduas-Grupo Guadalupe	Grandes estratos de Areniscas con intercalaciones de lodolitas	Acuífero confinado de porosidad secundaria y primaria, de extensión regional multicapa	?	Mayores a 150 Ohm.m
III	III1	Formación Tilatá - Tst2 unidad arenosa	Niveles de arenas, arcillas y limos, con mayor	Acuíferos - acuitardos multicapa de extensión regional	60 -30	30-130 Ohm.m

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 92 de 105

	Unidad hidrogeológica	Unidad geológica	Litología	Descripción hidrogeológica	Espesor (m)	Resistividad
			proporción de arenas	limitados a los valles intramontanos		
III2		Formación Tilatá - Tst1 unidad arcillosa	Arcillas caoliniticas blancas-grisáceas con pintas amarillas con algunos niveles de limos y esporadic apariciones de arenas en posibles lentes	Acuitardo superficial de extensión regional	40 - 100	1-40 Ohm.m
III3		Formación Bogotá	Arcillolitas varicoloreadas con pintas rojizas compactas y espesas con esporadic apariciones de arenitas de muy poco espesor	Rocas con limitados recursos hídricos funcionando como acuícludos, funcionando como barrera hidráulica confinante de la estructura	60 -120	1-15 Ohm.m

Fuente: INGEOMAD SAS, 2026

En la Figura 11-5 se observa la distribución de las unidades hidrogeológicas en superficie, denotando la predominancia de unidades de III orden las cuales son de poco interés hidrogeológico.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 93 de 105

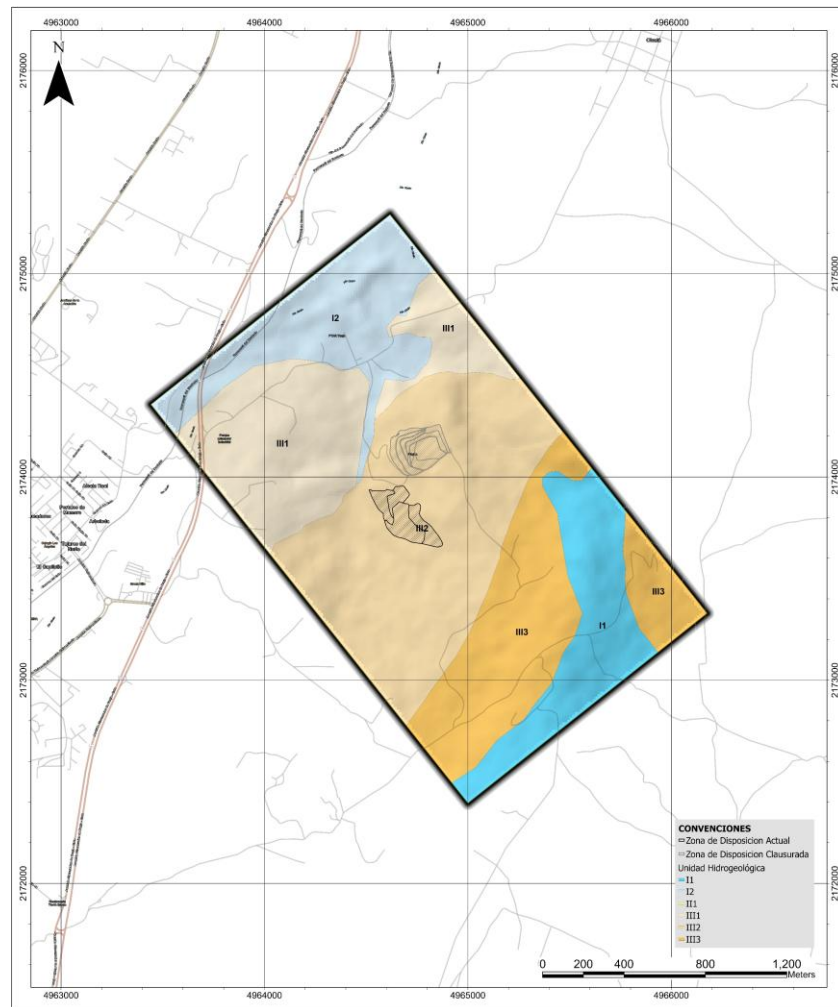


Figura 11-5. Mapa de unidades hidrogeológicas final
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

A partir de la distribución de las unidades hidrogeológicas en superficie y con el insumo de las secciones de resistividad de la exploración geofísica se genera un perfil hidrogeológico el cual muestra la disposición de las unidades hidrogeológicas determinadas en profundidad y su disposición y geometría.

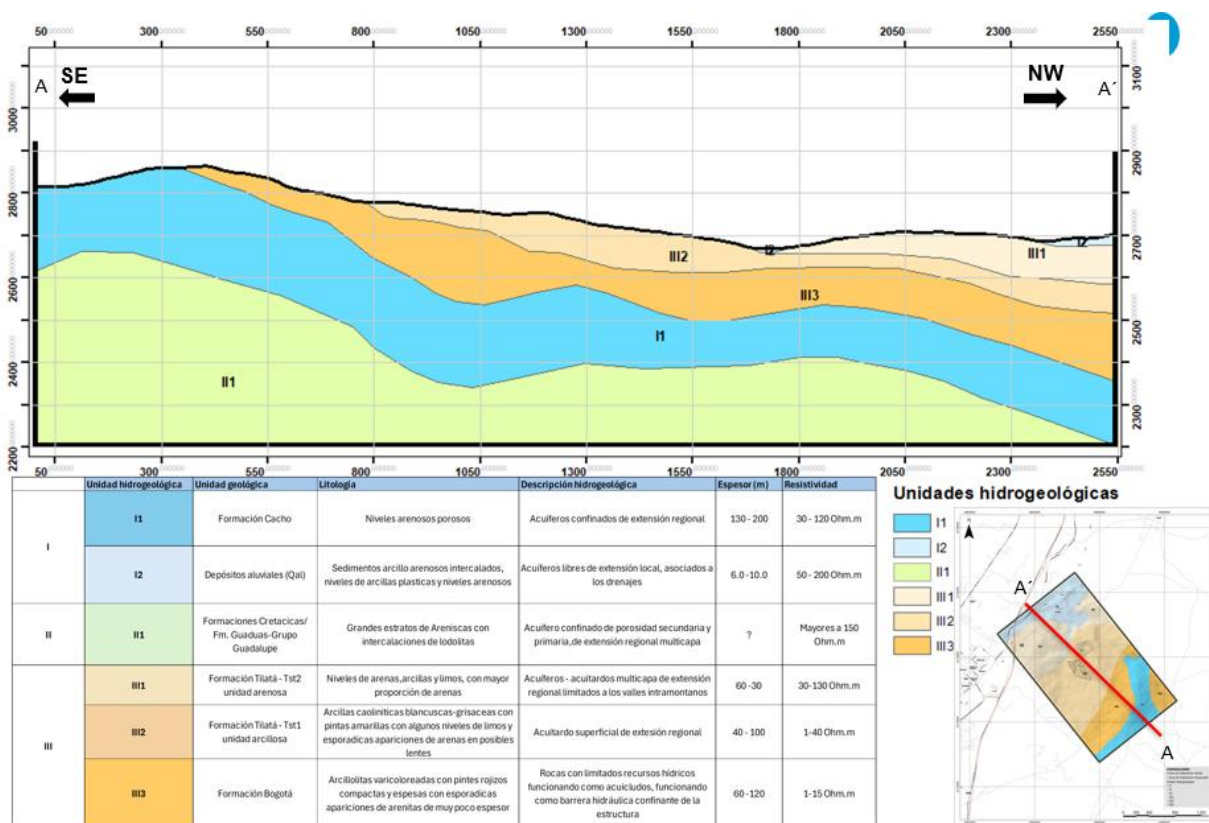


Figura 11-6. Perfil hidrogeológico
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

11.3. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Los resultados piezométricos obtenidos durante la campaña de campo indican que, en los puntos y periodos evaluados, no se identificó evidencia de un nivel freático superficial continuo. Una proporción significativa de los puntos monitoreados, especialmente aquellos con profundidades menores a 15 m y ubicados dentro del Parque Tecnológico, se encontraron secos o con columnas de agua mínimas, lo cual es consistente con el comportamiento de baja permeabilidad de la Formación Tilatá.

Los puntos que sí registraron nivel de agua muestran una marcada variabilidad en profundidad y comportamiento hidráulico. Los niveles someros identificados corresponden a acuíferos colgados de escasa potencia, sin evidencia de continuidad lateral. En contraste, los niveles profundos registrados en algunos pozos reflejan condiciones confinadas o semiconfinadas, aparentemente separadas hidráulicamente de la superficie inmediata bajo las condiciones evaluadas de la superficie, mencionado en el 6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 95 de 105

Un elemento relevante del sistema es la presencia puntual de condiciones artesianas, evidenciada en el pozo PD2. Este comportamiento indica la existencia de un nivel confinado con presión piezométrica positiva en el subsuelo medio, asociado probablemente a lentes arenosos o niveles permeables encapsulados dentro de la secuencia arcillosa. La ausencia de respuestas similares en puntos cercanos sugiere que se trata de un rasgo localizado en los puntos observados, aunque es un punto de estudio y revisión para descartar infiltraciones desde superficie

11.4. DIRECCIONES DE FLUJO Y DINÁMICA DEL SISTEMA

La dinámica del agua subterránea está controlada principalmente por la estructura geológica regional y por la topografía. A escala regional, el flujo subterráneo profundo sigue la geometría del Sinclinal de Tunja, con una componente predominante en sentido sureste–noroeste, desde las zonas de recarga ubicadas fuera del área del proyecto hacia los niveles base regionales.

Las direcciones de flujo subterráneas para el área de influencia hidrogeológica se observan según el análisis piezométrico en direcciones principalmente SE-NW siguiendo la disposición estructural, donde los flujos vienen desde las partes altas en zonas de recarga de manera confinada, ya que se evidenció según lo desarrollado en el estudio la baja a nula infiltración en el área donde las precipitaciones como escorrentía superficial directa, siendo las unidades superficiales en el área de estudio acuitados o barreras que impiden la infiltración y almacenamiento de agua.

En el sistema superficial, la dinámica está dominada por la escorrentía y no por la infiltración profunda. La combinación de suelos arcillosos, pendientes moderadas a fuertes y un régimen climático deficitario favorece respuestas rápidas de escurrimiento hacia las quebradas La Salada y La Cebolla, las cuales presentan un régimen intermitente y carecen de flujo base sostenido.

No se identifican evidencias de conexión hidráulica directa entre los niveles superficiales bajo el Parque y el acuífero profundo. La profundidad de los niveles piezométricos, la baja conductividad hidráulica medida y la persistencia de puntos secos respaldan un escenario de desconexión vertical efectiva bajo condiciones naturales.

11.5. INTEGRACIÓN CON RESULTADOS GEOFÍSICOS

Los resultados geofísicos obtenidos en fases previas y en el presente estudio son compatibles con el modelo conceptual propuesto, en la medida en que se correlacionan con geología, perforaciones, análisis piezométrico y ensayos hidráulicos. Las bajas resistividades identificadas en amplios sectores del subsuelo coinciden con la presencia de materiales arcillosos dominantes, reforzando la interpretación de la Formación Tilatá como una barrera hidráulica efectiva.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 96 de 105

Las anomalías puntuales de mayor resistividad se interpretan como posibles lentes arenosos o niveles más permeables de extensión limitada, compatibles con la ocurrencia localizada de niveles presurizados, pero insuficientes para establecer un sistema acuífero continuo o una vía preferencial de flujo regional.

11.6. SÍNTESIS CONCEPTUAL DEL MODELO

El modelo hidrogeológico conceptual del Parque Ambiental de Pírgua describe un sistema estratificado, heterogéneo y caracterizado por unidades predominantemente de baja permeabilidad y contrastes hidráulicos marcados, donde la mayor parte del subsuelo funciona como un medio de muy baja transmisividad. La presencia de agua subterránea es discontinua y localizada, controlada por condiciones estructurales y litológicas específicas.

Los datos de campo obtenidos en el presente estudio aportan elementos para refinar los modelos previos y no sugieren, con la evidencia disponible, un escenario de conectividad hidráulica vertical, descartando un escenario de conectividad hidráulica vertical entre la superficie y el acuífero profundo bajo condiciones naturales. No obstante, la identificación de niveles confinados presurizados en sectores puntuales subraya la importancia de mantener la integridad de los sellos naturales y antrópicos, así como de continuar con un monitoreo orientado a detectar cambios en la dinámica hidráulica del sistema.

En la Figura 11-7 se presenta un esquema en perfil del modelo hidrogeológico conceptual, construido a partir de información geofísica y otros datos disponibles. En este se ilustra la disposición de las capas, las cuales fueron clasificadas como unidades hidrogeológicas, diferenciando aquellas permeables de las poco permeables o consideradas como barreras hidráulicas dentro del sistema. Estas últimas adquieren especial relevancia en el contexto de la actividad de relleno sanitario del parque, ya que representan una separación hidráulica importante según la interpretación conceptual del modelo.

En la Figura 11-11 se observa con mayor detalle la disposición de las unidades de estudio y el área de operación del parque. Se evidencia que la operación se desarrolla principalmente en los niveles arcillosos de la Formación Tilatá, caracterizados por presentar bajas propiedades hidráulicas, como conductividad y transmisividad reducidas, lo que los clasifica como materiales de muy baja permeabilidad. Asimismo, actuando en conjunto como un paquete de baja transmisividad y espesor considerable, compatible con una separación hidráulica entre el sistema superficial y las unidades más profundas

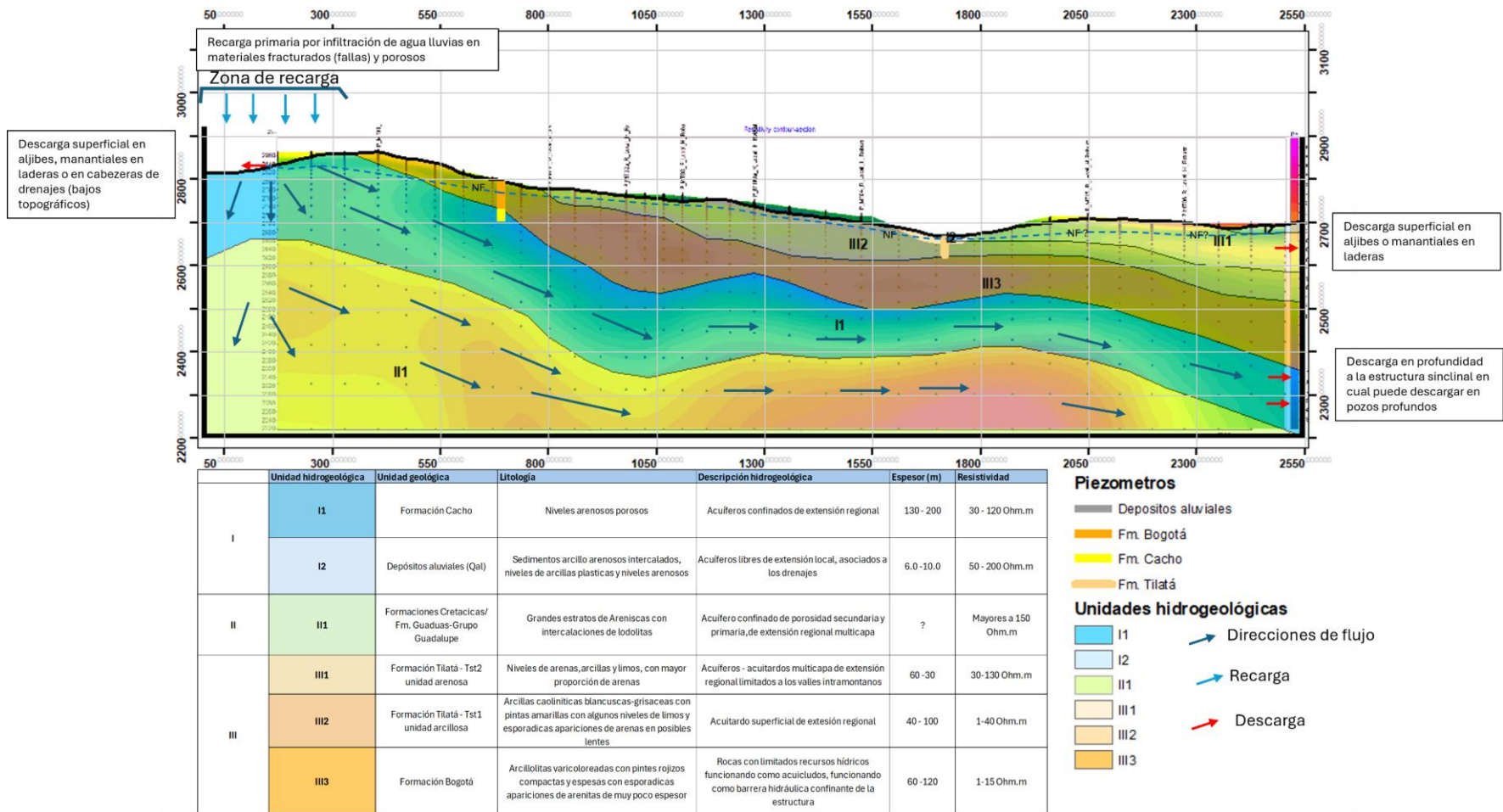


Figura 11-7. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 98 de 105

Con el fin de entender mejor el modelo se realiza una bloquedigrama con el fin de representar las unidades hidrogeológicas y los principales acuíferos con el fin de determinar las direcciones d eflujo y demás. A continuación, se observa el modelo hidrogeológico conceptual.

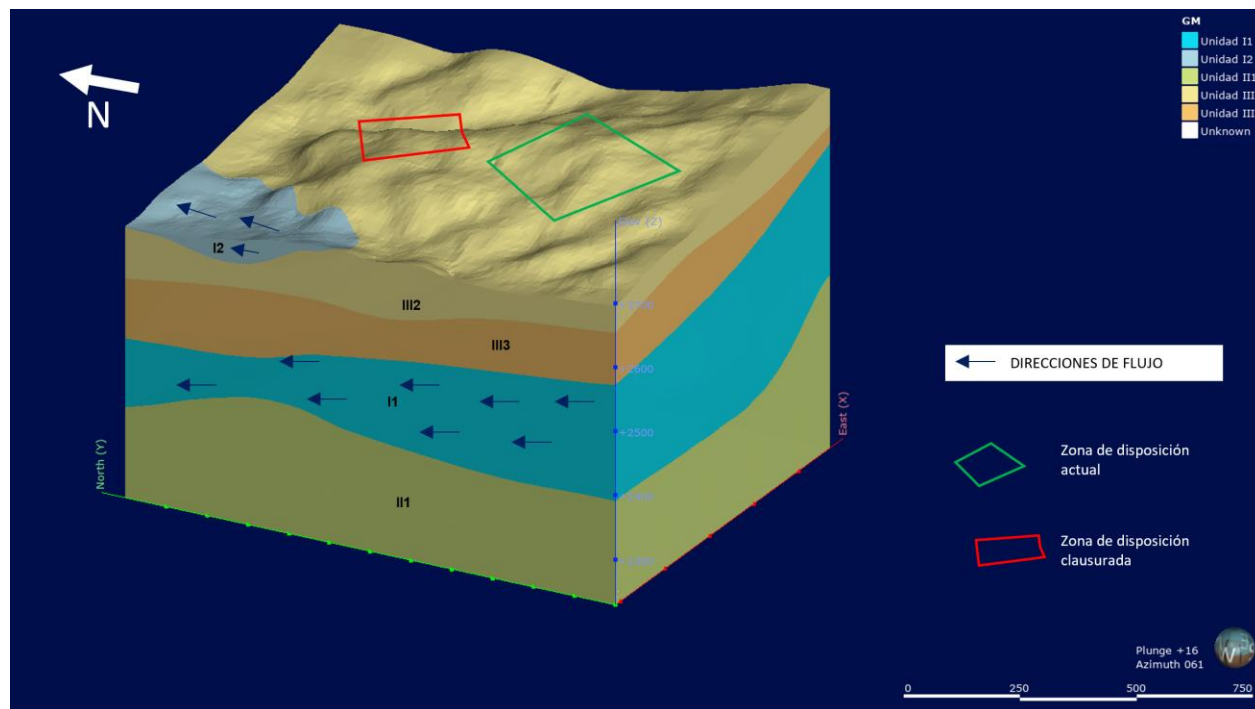


Figura 11-8. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA - BLOQUEDIAGRAMA
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

A manera de entender mejor el sistema y tener una representación clara de la superficie piezométrica se representa a continuación dos vistas del bloque con los piezómetros representados en el modelo, denotando una superficie piezométrica siguiendo la topografía siendo más profunda en las zonas altas y yéndose somerizando al llegar a las cotas topográficas mas bajas, allí existe una incógnita y es a conexión entre el nivel de la unidad Tilatá y el nivel de los depósitos cuaternarios ya que allí es muy somero en los piezómetros, teniendo las opciones de ser un nivel colgado independiente en los depósitos cuaternarios o un nivel piezométrico alto por presiones o confinamientos locales, también cabe la duda de corroborar filtraciones locales en los piezómetros en los depósitos aluviales. A continuación, se observan las figuras de la piezometría interpretada en el modelo.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 99 de 105

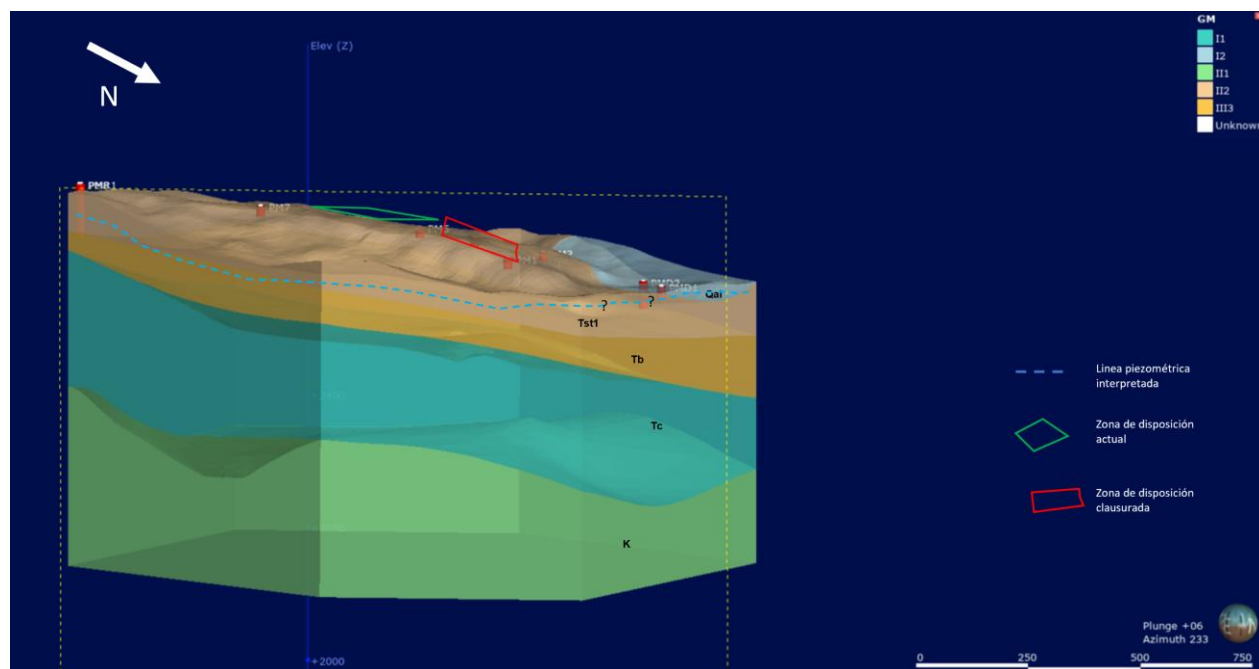


Figura 11-9. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA – piezometría vista en dirección SW
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

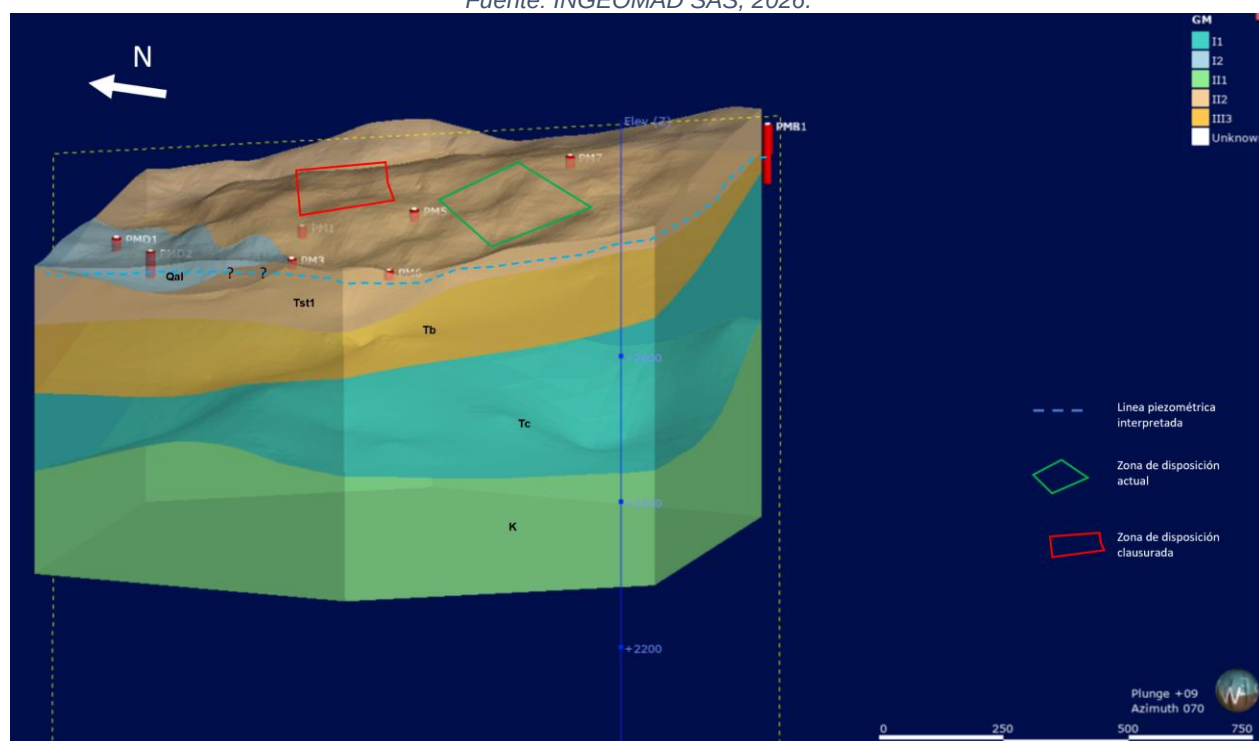


Figura 11-10. Modelo hidrogeológico conceptual PIRGUA – piezometría vista en dirección NE
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 100 de 105

Con el fin de ilustrar el modelo más enfocado en el área de operación del parque se presenta este modelo a mayor detalle ilustrando las columnas litológicas simplificadas y sus respectivos espesores, permitiendo una clara visualización de la secuencia estratigráfica. Se hace especial énfasis en las unidades de baja permeabilidad, las cuales actúan como barrera de protección entre el relleno sanitario y el acuífero principal (Formación Cacho). De acuerdo con los datos obtenidos mediante prospección geofísica (método MT), el espesor de estas unidades barrera es de aproximadamente 125 metros bajo la celda activa y de 175 metros bajo la celda clausurada.

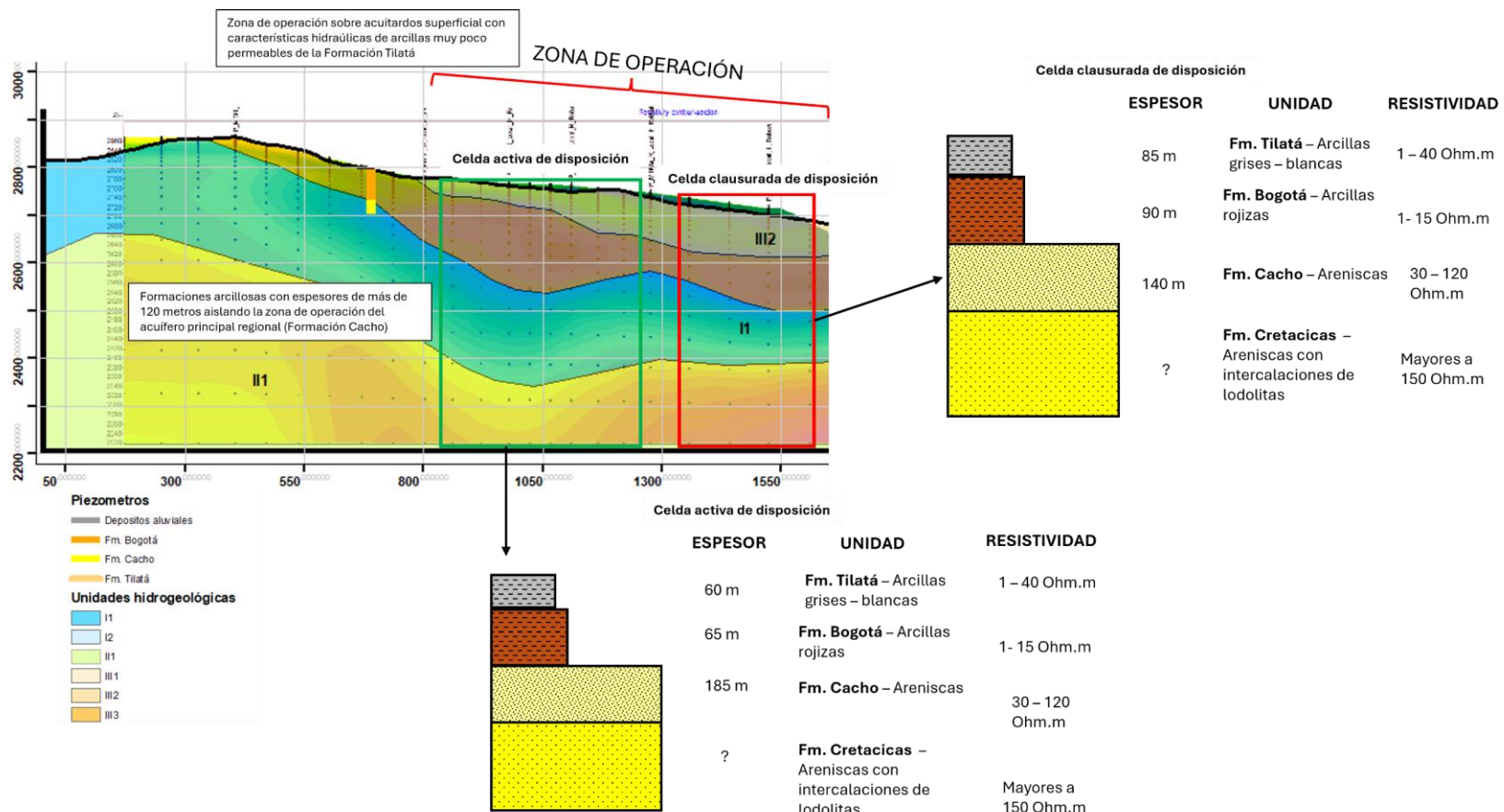


Figura 11-11. Modelo hidrogeológico conceptual área de operación
Fuente: INGEOMAD SAS, 2026.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 102 de 105

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La integración de la información geológica, geofísica, hidráulica y piezométrica obtenida durante la fase de campo del presente estudio, junto con la revisión crítica de antecedentes técnicos, permite concluir de manera consistente que el subsuelo bajo el Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua no presenta condiciones hidrogeológicas que favorezcan una conexión vertical efectiva con el acuífero profundo regional asociado a la Formación Cacho.
- Desde el punto de vista estratigráfico, el modelo hidrogeológico conceptual identifica una secuencia dominada por unidades de muy baja permeabilidad, en particular la Formación Tilatá y la Formación Bogotá, las cuales actúan como barreras se comportan predominantemente como unidades de baja permeabilidad con función confinante. La presencia del miembro arcilloso de la Formación Tilatá, con espesores significativos y continuidad lateral, constituye el principal elemento de confinamiento entre los niveles superficiales y los sistemas acuíferos profundos. Esta interpretación no es inferida únicamente a partir de literatura previa, sino que fue apoyada con la correlación geofísica – geológicas, la cual permitió reconocer contrastes eléctricos compatibles con materiales finos, saturados o parcialmente saturados, de comportamiento de acuitardo.
- Los resultados de los ensayos hidráulicos ejecutados en campo confirman esta interpretación estructural. Las conductividades hidráulicas obtenidas en los pozos profundos (del orden de 10^{-4} a 10^{-5} m/h, equivalentes a aproximadamente 10^{-8} m/s) son características de materiales arcillosos o arcillo-limosos de muy baja transmisividad. Estos valores descartan la presencia de un medio poroso o fracturado con capacidad de permitir flujos verticales significativos, incluso bajo gradientes hidráulicos favorables. La marcada diferencia de órdenes de magnitud respecto a las conductividades superficiales, asociadas a suelos alterados, refuerza la existencia de una discontinuidad hidráulica efectiva con la profundidad.
- El análisis piezométrico, basado exclusivamente en los niveles estáticos medidos durante la campaña de campo, evidencia un sistema claramente heterogéneo y estratificado. La ausencia reiterada de niveles de agua en piezómetros y pozos someros dentro del área del Parque Tecnológico no constituye una limitación del estudio, sino una evidencia directa de la condición no saturada del subsuelo superficial. Esta condición, persistente en el tiempo, confirma que no existe un nivel freático libre continuo que pueda actuar como vía de recarga vertical hacia niveles profundos.
- En contraste, la presencia puntual de niveles confinados con presión positiva, como el caso del pozo PD2 con comportamiento artesian, demuestra que el sistema profundo responde a un régimen hidráulico independiente de la superficie. Este tipo de respuesta es típica de acuíferos confinados, hidráulicamente aislados por unidades de baja permeabilidad, y no

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 103 de 105

representa una conexión vertical activa, sino precisamente lo contrario: un sistema presurizado separado por barreras efectivas.

- La comparación espacial de las cotas piezométricas medidas, aun considerando el número limitado de puntos disponibles, muestra que los gradientes hidráulicos no son coherentes con un flujo descendente desde la superficie del relleno hacia el acuífero profundo. Por el contrario, los datos son consistentes con flujos locales de muy baja energía y con sistemas confinados que responden a condiciones estructurales y regionales, no a recarga directa desde el área del Parque Tecnológico.
- En conjunto, la evidencia geológica, geofísica, hidráulica y piezométrica converge en un modelo hidrogeológico conceptual dominado por unidades que actúan como barreras naturales continuas, baja permeabilidad vertical y desconexión hidráulica efectiva entre los niveles superficiales y el acuífero profundo de la Formación Cacho. Bajo las condiciones naturales actuales, y considerando la integridad de los sellos geológicos identificados, no existe un mecanismo hidrogeológico plausible que permita la migración vertical de agua — y mucho menos de potenciales contaminantes— desde el Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua hacia el acuífero regional de Tunja.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 104 de 105

13. BIBLIOGRAFÍA

Corporación Autónoma Regional de Boyacá [Corpoboyacá]. (2025). *Resolución No. 1970 del 12 de junio de 2025: Por la cual se emite concepto de seguimiento y control ambiental*. Subdirección de Administración de Recursos Naturales, Tunja, Colombia.

Corpoboyacá & Consorcio Hidroboyacá. (2016). *Informe de diagnóstico: Formular el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja (Cuenca alta del Río Chicamocha), bajo el esquema de la estrategia de socialización y participación “Haz tuyo el acuífero”, en cumplimiento a lo establecido por el Decreto 1640 de 2012 (Contrato No. CCC 2015173)*. Tunja, Colombia.

Hidrogeocol S.A.S. (2022). *Informe Pericial – Complementos y Adiciones II. Acción Popular 2021-00424-00: Relleno Sanitario Parque Tecnológico Ambiental Pírgua* [Concepto final perito elaborado por el Ing. Carlos Molano]. Bogotá, Colombia.

Hidrosuelos S.A.S. (2016). *Informe Modelo Hidrogeológico Conceptual del Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua, de la ciudad de Tunja* (Código HS1716, Versión 2). Informe técnico elaborado para ServiTunja S.A. E.S.P.

Hidrosuelos S.A.S. (2022). *Construcción de pozos de monitoreo de aguas subterráneas en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua* (Código HS3222, Versiones 0 y 1). Informe técnico elaborado para Urbaser Tunja S.A. E.S.P., Tunja, Colombia.

Hidrosuelos S.A.S. (2023a). *Incidencia Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua en el Acuífero de Tunja* (Código HS0223, Versión 2). Informe técnico elaborado para Urbaser Colombia.

Hidrosuelos S.A.S. (2023b). *Piezometría Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua – Municipio de Tunja* (Código HS1923, Versión 0). Informe técnico elaborado para Urbaser Colombia.

INCO A&J S.A.S. (2021). *Estudios para la actualización del Plan de Manejo Ambiental de la Licencia Ambiental otorgada mediante resolución No. 0967 de 1998 para la construcción y operación del Parque Tecnológico Ambiental de Pírgua*. Informe técnico elaborado para Urbaser S.A. E.S.P., Tunja, Colombia.

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2016). *Modelo hidrogeológico conceptual de la zona Boyacá Centro*. Servicio Geológico Colombiano.

	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL PIRGUA TUNJA, BOYACÁ	
EDICIÓN: 0	CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA – HIDROGEOLOGÍA – 2026	Página 105 de 105

14. ANEXOS

A. TOMOGRAFIAS

A1. DATA_RAW

A2.PROCESAMIENTOS

A3.INTERPRETACIONES

A4.3D

A5. REGISTRO_FOTOGRAFICO

B. SONDEOS_MT

B1.DATA_RAW

B2. EDI

B3. INVERSIÓN_2D

B4. INTERPRETACIÓN

B5. REPORTE_ESTACIONES

B6. REGISTRO_FOTOGRAFICO

B7.3D

C. INVENARIO_PUNTOS_DE_AGUA

D. GIS

E. PRESENTACIÓN