

Análisis del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá para su aprovechamiento en climatización mediante bomba de calor

Marco del proyecto de investigación

Recursos geotérmicos para la transición energética: usos directos y energía de carga base limpia y renovable

Presentado por

Luis Manuel Escalona Molina

Trabajo de investigación para optar al título de

Magíster en Ingeniería Ambiental

Directora

Ph.D. Daniela Blessent



Universidad de Medellín
Facultad de Ingenierías
Maestría en Ingeniería Ambiental

2025

RESUMEN

La presente investigación determina el potencial geotérmico somero del acuífero libre del Valle de Aburrá para su aprovechamiento mediante sistemas de bomba de calor de circuito abierto (GWHP), como una alternativa de climatización energéticamente eficiente. Para ello, se analizó el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero a partir de información oficial y estudios previos, caracterizando sus propiedades hidráulicas, extensión, espesor, recarga y régimen térmico. Con base en estos datos se elaboró un mapa de transmisividad mediante técnicas geoestadísticas y se estimó el caudal máximo de agua extraíble utilizando la herramienta QGeoTherTools. Dichos insumos permitieron calcular el potencial geotérmico somero del acuífero en términos de potencia térmica disponible. Posteriormente, se evaluó la implementación de un sistema GWHP en dos pozos existentes en Medellín, determinando las cargas térmicas transferibles, la potencia de la bomba de calor y el área potencial a climatizar. Finalmente, se propone una guía de recomendaciones técnicas, ambientales y regulatorias para el diseño e instalación de sistemas GWHP en Colombia. Los resultados evidencian que el acuífero libre constituye un recurso viable para la climatización sostenible, con potencial para reducir el consumo energético y apoyar las estrategias de eficiencia energética en la región. Este estudio contribuye a ampliar el conocimiento del recurso geotérmico somero local y a promover tecnologías innovadoras para la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: geotermia somera, acuífero libre del Valle de Aburrá, bomba de calor geotérmica, GWHP, potencial geotérmico, hidrogeología, transmisividad, eficiencia energética, mitigación del cambio climático

ABSTRACT

This research assesses the shallow geothermal potential of the unconfined aquifer in the Aburrá Valley and its feasibility for use through open-loop Groundwater Heat Pump (GWHP) systems as an energy-efficient alternative for building cooling. The study analyzed the conceptual hydrogeological model of the aquifer using official datasets and previous studies, characterizing its hydraulic properties, extension, thickness, recharge, and thermal regime. Based on this information, a transmissivity map was generated through geostatistical interpolation, and the maximum extractable groundwater flow rate was estimated using the QGeoTherTools model. These inputs enabled the calculation of the shallow geothermal potential in terms of available thermal power. A practical evaluation was then conducted using two existing wells in Medellín, estimating the thermal loads that could be exchanged, the required heat pump capacity, and the potential cooling building area. Additionally, a set of technical, environmental and regulatory recommendations is proposed to guide the design and implementation of GWHP systems in Colombia. The results show that the unconfined aquifer represents a viable resource for sustainable climatization, with the capacity to reduce energy consumption and support regional energy-efficiency strategies. This study enhances the understanding of local shallow geothermal resources and promotes innovative technologies for climate change mitigation.

Keywords: shallow geothermal energy, Aburrá Valley unconfined aquifer, groundwater heat pump, GWHP, geothermal potential, hydrogeology, transmissivity, energy efficiency, climate change mitigation

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, por concederme la salud, la sabiduría y la fortaleza necesarias para culminar satisfactoriamente este proceso de formación.

A mi esposa, María Virginia, por su apoyo incondicional, su amor y su paciencia a lo largo de mis estudios de maestría y durante la elaboración de esta tesis. Este logro también es tuyo.

A mis padres, por su permanente respaldo, por su amor y por la sabiduría con la que han guiado cada etapa de mi vida. Gracias por ser un ejemplo de disciplina, entrega y superación.

A Daniela Blessent, por su dedicación, orientación y apoyo desde el inicio de la maestría y especialmente en los momentos más retadores durante la elaboración de la presente investigación.

A la profesora Alejandra Balaguera, por su acompañamiento y gestión desde la coordinación del programa.

A la empresa Postobón S.A., por facilitar información hidrogeológica, la cual fue fundamental para el desarrollo de parte del análisis técnico de esta investigación.

Al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, autoridad ambiental, por proporcionar datos esenciales sobre el sistema acuífero del Valle de Aburrá, que permitieron enriquecer este trabajo.

A la empresa Servicios Ambientales y Geográficos S.A., por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de maestría y por la oportunidad de continuar creciendo profesionalmente dentro de la organización.

Finalmente, a la Universidad de Medellín, por abrirme sus puertas para cursar la Maestría en Ingeniería Ambiental y por la huella que deja en mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	Planteamiento del problema	9
1.2	Justificación	10
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo general	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	14
3.1	Marco teórico	14
3.1.1	Generalidades.....	14
3.1.2	Mecanismos de transferencia de calor	16
3.1.3	Ecuación de transferencia de calor en medio poroso	17
3.1.4	Parámetros térmicos	17
3.1.5	Uso directo de la energía geotérmica	19
3.1.6	Bomba de calor geotérmica	19
3.1.7	Sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP)	21
3.1.8	Sistema acuífero del Valle de Aburrá.....	23
3.1.9	Eficiencia energética	25
3.2	Estado del arte	26
4	METODOLOGIA	29
4.1	Análisis del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero libre del Valle de Aburrá	29
4.2	Estimación del potencial geotérmico del acuífero	30
4.3	Propuesta de implementación de un sistema GWHP en un pozo de agua existente (Uso industrial), para el aprovechamiento del recurso geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá	32
4.4	Proposición de guía de recomendaciones para el aprovechamiento del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá, mediante un sistema GWHP	33
5	RESULTADOS	34
5.1	Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero libre del Valle de Aburrá.....	34
5.1.1	Unidad hidrogeológica	34
5.1.2	Dimensiones del acuífero	35

5.1.3	Propiedades hidráulicas.....	37
5.1.4	Recarga potencial por precipitación.....	46
5.1.5	Temperatura del agua subterránea.....	47
5.2	Estimación del potencial geotérmico del acuífero	49
5.3	Propuesta de implementación de un sistema GWHP en un pozo de agua existente (Uso industrial), para el aprovechamiento del recurso geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá	55
5.4	Guía de recomendaciones para el aprovechamiento del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá, mediante un sistema GWHP	59
5.4.1	Consideraciones ambientales, técnicas y de regulación.....	59
5.4.2	Recomendaciones y buenas prácticas	62
6	CONCLUSIONES.....	69
7	REFERENCIAS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del recurso geotérmico según la temperatura	14
Tabla 2 Profundidad de la geotermia somera según diferentes autores	16
Tabla 3 Área del acuífero libre del Valle de Aburrá	36
Tabla 4 Propiedades hidráulicas obtenidas en pruebas de bombeo en el Valle de Aburrá	37
Tabla 5 Transmisividad a partir de reevaluación de datos de pruebas de bombeo	37
Tabla 6 Coordenadas de pozos de Postobón	38
Tabla 7 Datos de transmisividad según Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá.....	38
Tabla 8 Características y parámetros del modelo geoestadístico	44
Tabla 9 Errores obtenidos en el modelo geoestadístico.....	44
Tabla 10 Valores de recarga potencial en el acuífero libre del Valle de Aburrá	46
Tabla 11 Valores de parámetros para calcular el caudal máximo extraíble	49
Tabla 12 Valores de parámetros para calcular el potencial geotérmico	49
Tabla 13 Resultados de potencial geotérmico en el área de análisis.....	50
Tabla 14 Resultados de potencial geotérmico en zonas de control	53
Tabla 15 Pozos existentes en la planta de Postobón.....	55
Tabla 16 Datos del Pozo 5	56
Tabla 17 Datos del Pozo 4	56
Tabla 18 Características de la bomba de calor propuesta	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Consumo energético mundial de energías renovables y otras fuentes	9
Figura 2 Histórico de existencias de equipos acondicionadores de aire a nivel mundial y la proyección de su incremento hasta el año 2050	10
Figura 3 Diagrama esquemático de una bomba de calor en modo refrigeración ..	20
Figura 4 Esquema del sistema GWHP	23
Figura 5 Perfil hidrogeológico del Valle de Aburrá – sector municipio de Medellín	25
Figura 6 Unidades hidrogeológicas del sistema acuífero del Valle de Aburrá.....	35
Figura 7 Espesor del acuífero libre del Valle de Aburrá	36
Figura 8 Transmisividad del acuífero	42
Figura 9 Área de análisis definida para obtener capa de transmisividad	43
Figura 10 Transmisividad del acuífero libre del valle de Aburrá	45
Figura 11 Temperatura in situ agua subterránea del acuífero libre del valle de Aburrá	48
Figura 12 Caudal máximo de agua extraíble.....	50
Figura 13 Potencial geotérmico somero	51
Figura 14 Áreas de control definidas	52
Figura 15 Diagrama de cajas y bigotes área total de análisis	53
Figura 16 Diagrama de cajas y bigotes área de Depósitos Aluviales.....	54
Figura 17 Diagrama de cajas y bigotes área radio de abatimiento pozo 5.....	54
Figura 18 Bomba de calor ecoGEO+ HP 20-85	58

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático consiste en variaciones a largo plazo de los patrones climáticos y las temperaturas del planeta, los cuales se pueden generar por causas naturales, tal como puede ser el caso de alteraciones o modificaciones en las erupciones volcánicas o la actividad solar; sin embargo, desde el siglo XIX, debido al uso de combustibles fósiles tales como el petróleo, gas y carbón, las actividades humanas se consideran el principal impulsor del cambio climático [1]. Hasta el momento, dentro de los esfuerzos por combatirlo, se le ha dado la relevancia necesaria a la oferta energética mediante el incremento en el uso de energías renovables, sin embargo, no se ha abordado de manera adecuada la creciente demanda mundial de energía (Figura 1).

Por otro lado, para hacer más efectivo el papel que juegan los recursos renovables en la canasta energética mundial resulta indispensable reducir la demanda de energía. Lo anterior, se debe a un acelerado incremento de la demanda desde el año 1800, lo cual ha generado una gran diferencia entre el consumo de fuentes renovables y de otras fuentes [2].

Dentro del uso de energía eléctrica, uno de los mayores consumos se debe a la climatización [3]. Solo para el año 2021, a nivel mundial, la refrigeración de espacios requirió aproximadamente 2.000 tera vatios hora (TWh) de electricidad, lo cual representa el 16% del total de energía utilizada en edificios. Así mismo, la refrigeración puede representar más del 70% de la demanda eléctrica residencial máxima en días de calor extremo en algunos países [2].

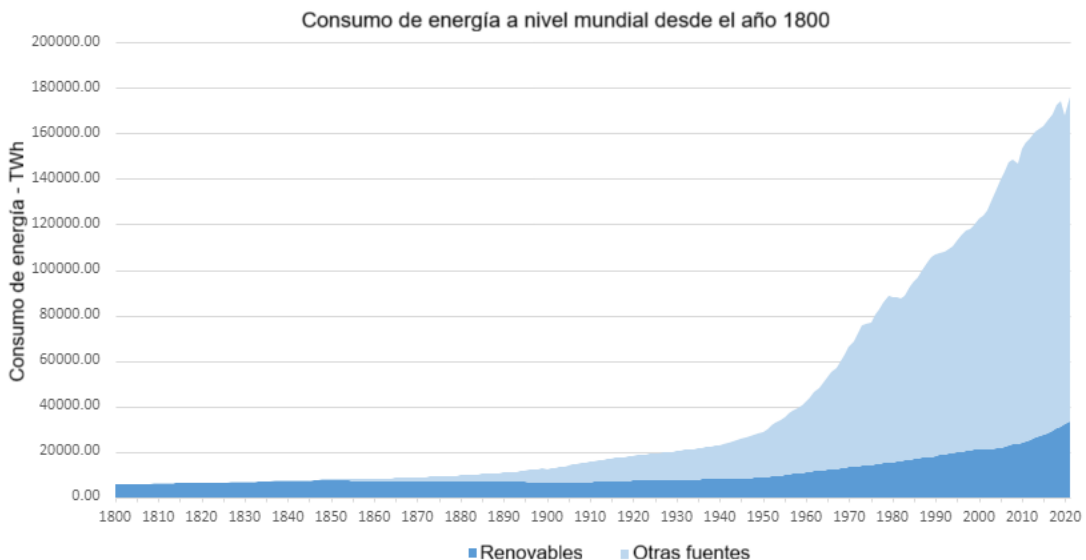


Figura 1 Consumo energético mundial de energías renovables y otras fuentes

Fuente: Modificado de Foro Económico Mundial [2]

Con el crecimiento de las economías y su adaptación a climas más cálidos, especialmente en países del hemisferio sur, ha habido un aumento en la demanda energética para climatización de espacios (Figura 2) [2]. La climatización es indispensable en muchos lugares del mundo, ya que permite mantener ambientes laborales y educativos sanos y productivos; así como ambientes familiares cómodos. Así mismo, es necesaria para refrigeración, transporte y almacenamiento de alimentos y medicamentos [2]. Durante el año 2021, el consumo de energía en América Latina y el Caribe alcanzó los 1.378 GWh, valor que, de acuerdo con estimaciones, para el año 2040 podría aumentar un 100% [4].

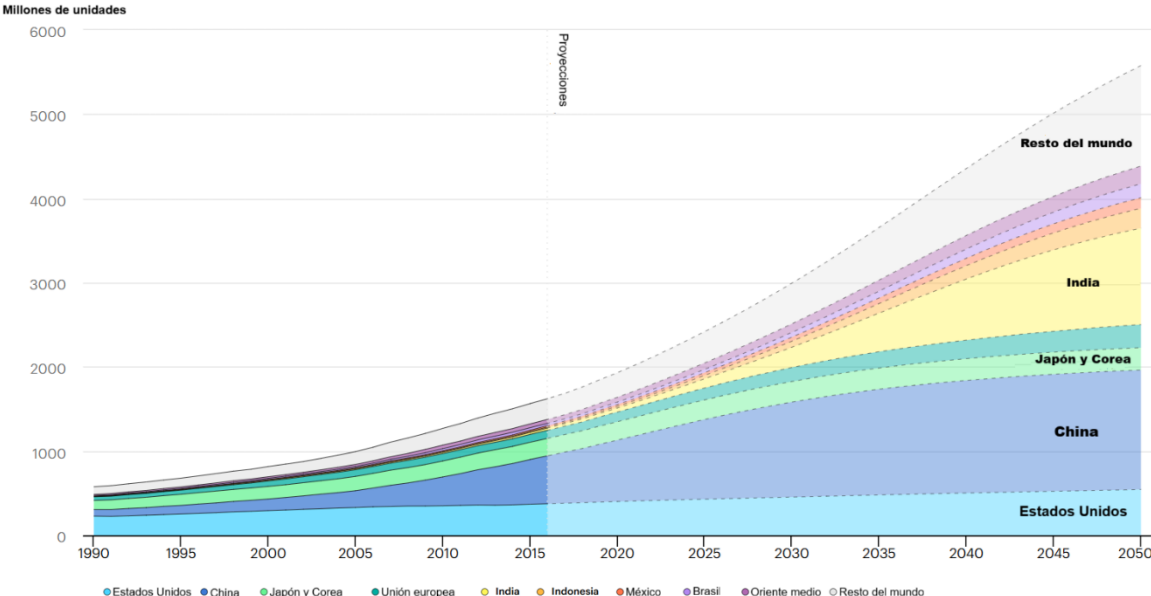


Figura 2 Histórico de existencias de equipos acondicionadores de aire a nivel mundial y la proyección de su incremento hasta el año 2050

Fuente: Modificado de Foro Económico Mundial [2]

En Colombia, en el año 2022 se presentó una demanda de energía eléctrica que alcanzó 208 GWh-d, mientras que la generación fue de 213,7 GWh-d. Este dato representa una relación bastante ajustada entre generación y demanda. Se estima que entre 2022 y 2036 la demanda puede sufrir un incremento por año comprendido entre 2,22% y el 3,33% [5]. Sin embargo, de acuerdo con un reporte de la gerencia del Centro Nacional de Despacho de la empresa XM, en el mes de marzo de 2022 la demanda creció un 4,83% con respecto al mismo mes del año 2021, presentándose la necesidad de importar desde Ecuador 62 GWh que, sumados a los 6.468 GWh que se generaron en el país, lograron cubrir la demanda [6].

1.2 Justificación

Una de las estrategias para mitigar el cambio climático, que resulta más costo efectiva, es la eficiencia energética, la cual promueve la productividad y competitividad de los diferentes sectores económicos, contribuyendo a la seguridad

energética. La adopción de nuevas tecnologías, aunado a la implementación de buenas prácticas, así como de sistemas de gestión integral de la energía, pueden representar ahorros de entre el 5% y el 50% del consumo [5]. Avanzar en este campo permitirá cumplir los compromisos ambientales que Colombia adquirió en el marco de la COP21 [7].

De acuerdo con Ürge-Vorsatz y Metz [8], la eficiencia energética es fundamental como medida de mitigación del cambio climático. Su mejora en sectores como la industria, el transporte y las edificaciones puede reducir significativamente las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); ya que disminuye la demanda, reduce la dependencia de combustibles fósiles y mejora la seguridad energética.

Las actuales soluciones de eficiencia energética permiten reducir significativamente las emisiones generadas por la refrigeración. Los equipos de aire acondicionado presentan una considerable variabilidad en su consumo, con diferencias que pueden alcanzar hasta el 70%. Optar por alternativas más eficientes podría disminuir el consumo global de energía para refrigeración en casi un 50%. Además, es posible optimizar la refrigeración para que se adapte mejor a las necesidades del usuario [2].

Un recurso que puede contribuir a aumentar la eficiencia energética es la geotermia, debido a que la energía geotérmica se considera renovable porque el calor que se extrae se regenera constantemente a través de procesos naturales al interior de la Tierra. Este tipo de energía contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y las partículas contaminantes que suelen generarse con el uso de combustibles fósiles, además de ofrecer independencia energética al ser un recurso local. La geotermia se puede aprovechar de manera directa, indirecta (generación eléctrica) o, incluso, combinada (usos en cascada) [9].

De acuerdo con Lund [9], el uso directo de la energía geotérmica se refiere al aprovechamiento inmediato del calor, sin necesidad de transformarlo en otro tipo de energía, como la eléctrica. Entre sus aplicaciones se encuentra el uso de bombas de calor para generar tanto calefacción como refrigeración.

Según Bloomfield et al., citado en Milenic et al. [10], las bombas de calor geotérmicas (GHP por su nombre en inglés - Geothermal Heat Pumps) son amigables con el medio ambiente ya que ofrecen un gran potencial para disminuir las emisiones de CO₂, lo cual se puede evidenciar al compararlas con la calefacción de edificios empleando diferentes fuentes de energía. Además, los autores indican que la cantidad de emisiones generadas depende tanto de la eficiencia energética del equipo como de la combinación de combustibles y la eficiencia en la producción de electricidad. Estas bombas requieren energía eléctrica para funcionar, y la cantidad de CO₂ emitido depende del tipo de fuente utilizada para generar dicha electricidad (si se emplean fuentes renovables, las emisiones son nulas).

Las GHP aprovechan las temperaturas constantes del terreno a profundidades entre los 10 m y 400 m para ofrecer calefacción y refrigeración en edificaciones, aprovechando que el régimen térmico del suelo a dicha profundidad se mantiene constante, con valores cercanos a dos grados Celsius por encima de la temperatura media anual del aire en la localidad considerada [11]. En este tipo de sistema, el

suelo circundante, el agua subterránea, u otras fuentes de agua próxima actúan como fuente de calor durante el invierno y como disipador de calor en el verano. Su aplicación como disipador de calor puede ser replicada en países de clima tropical para la climatización de espacios [12].

Según Lund, citado en Taqwim et al. [12], el rápido desarrollo de la tecnología de GHP para calefacción y refrigeración ha demostrado un notable avance a gran escala. Para el año 2020, las GHP constituyen el mayor empleo de la energía geotérmica a nivel global, representando el 71.6% de la capacidad instalada y el 59.2% del consumo energético anual. La capacidad total instalada es de 77,547 MWt, mientras que el consumo energético asciende a 599,981 TJ al año. Aunque la mayoría de las instalaciones se concentran en América del Norte, Europa y China, la cantidad de países con estas instalaciones ha crecido de 26 en el año 2000, a 33 en 2005, a 43 en 2010, a 48 en 2015, y a 54 en 2020. El número estimado de unidades instaladas de 12 kW (comunes en hogares de EE. UU. y Europa Occidental) es de aproximadamente 6.46 millones. Esto implica un incremento del 54% en comparación con las unidades reportadas en 2015 y más del doble de las registradas en 2010. No obstante, el tamaño de las unidades varía desde 5.5 kW para uso residencial hasta unidades de más de 150 kW destinadas a instalaciones comerciales e institucionales [13].

Los países que lideran en cuanto a unidades de bombas de calor geotérmicas instaladas (MWt) son China, Estados Unidos, Suecia, Alemania y Finlandia, abarcando el 77.4% del total. De manera similar, estos mismos países encabezan la producción de energía (TJ/año), representando el 83.5% del total generado [13]. En los Estados Unidos, la mayor aplicación del uso directo de la geotermia corresponde con las GHP, las cuales representan el 98% de la capacidad instalada y el 95% del uso directo anual de energía. Sus aplicaciones más relevantes en dicho país corresponden con piscicultura, uso en balnearios y la calefacción individual de espacios [13]. En Europa, se prevé un crecimiento exponencial en la adopción de soluciones geotérmicas en las próximas décadas, incluyendo los sistemas GHP, los cuales representan una tecnología consolidada para la climatización de espacios y la generación de agua caliente sanitaria [14].

En Colombia, así como en la mayoría de los países de Latino América, aún no se emplean las GHP. Sin embargo, su uso representa una oportunidad para el sector energético en el país. El Plan Energético Nacional 2020-2050 destaca que, según el Balance de Energía Útil (BEU), solo el 31% de la energía final en Colombia se utiliza de manera eficiente, mientras que el 67% se pierde debido a la ineficiencia en el consumo. Esta situación genera un costo anual para el país que oscila entre 6.600 y 11.000 millones de USD [15].

El estudio "Eficiencia energética en Colombia: identificación de oportunidades" propone 12 estrategias para mejorar la eficiencia energética y optimizar el consumo de energía en el país. Una de estas, es la optimización del consumo energético en los sistemas de aire acondicionado [16].

En el Valle de Aburrá se ha reportado el incremento de la temperatura ambiente debido al efecto isla de calor generado por la falta de arborización y el cambio de

las coberturas naturales del suelo por superficies de concreto, las cuales absorben el calor durante el día y lo liberan en la noche. Este efecto puede generar complicaciones en la salud de diferentes poblaciones de habitantes, especialmente de adultos mayores y niños. A su vez, el incremento de la temperatura puede producir un aumento en el uso de sistemas de refrigeración para la climatización de espacios [17]. En la actualidad, en el Valle de Aburrá, existen pozos de agua subterránea concesionados principalmente para usos industriales y de gran consumo, los cuales conforman la red de monitoreo del acuífero [18]. Sin embargo, más allá de su función actual en la red de monitoreo, estos pozos representan una oportunidad para implementar sistemas de climatización, mediante bomba de calor geotérmica de tipo Groundwater Heat Pump (GWHP), que contribuyan al crecimiento de la eficiencia energética en la región.

Con base en lo descrito anteriormente, se considera que el acuífero libre del Valle de Aburrá no solo constituye una alternativa para satisfacer la demanda hídrica del territorio, sino que también representa una oportunidad para la implementación de sistemas innovadores de climatización con alta eficiencia energética, como los sistemas GWHP.

Tomando en cuenta el problema planteado y la importancia que tiene la eficiencia energética como medida de mitigación del cambio climático, el cual tiene relación directa con el consumo energético, la pregunta de investigación que se quiere responder es la siguiente: ¿Cuál es el potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá, aprovechable mediante bomba de calor geotérmica de tipo Groundwater Heat Pump (GWHP)?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar el potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá para su aprovechamiento mediante un sistema abierto de bomba de calor (GWHP), con el propósito de fomentar la adopción de sistemas de climatización energéticamente más eficientes.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero libre del Valle de Aburrá, desde la óptica de la geotermia somera.
- Estimar el potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá para sistemas GWHP.
- Evaluar la implementación de un sistema GWHP en un pozo de agua existente en el Valle de Aburrá.
- Proponer una guía de recomendaciones para la implementación de sistemas GWHP en el área de estudio.

3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Marco teórico

3.1.1 Generalidades

En el sentido termodinámico y general, la energía geotérmica se puede definir como la energía calórica contenida en los materiales propios de la Tierra, tales como magma, sedimentos, rocas, agua subterránea, entre otros [11].

Es conveniente detallar las diferentes categorías de energía geotérmica de acuerdo con la temperatura del recurso aprovechable. De acuerdo con Moeck [19], la temperatura resulta la característica esencial mediante la cual se han clasificado los recursos geotérmicos. A lo largo de los años se han desarrollado diferentes clasificaciones que varían entre uno y otro autor (Tabla 1).

Tabla 1 Clasificación del recurso geotérmico según la temperatura

Categoría	Autor			
	Muffler (°C)	Hochstein (°C)	Benderitter and Cormy (°C)	Haenel et al. (°C)
Baja entalpía	<90	<125	<100	<150
Media entalpía	90–150	125–225	100–200	–
Alta entalpía	>150	>225	>200	>150

Fuente: Moeck [19]

Existe otra manera de clasificar la geotermia, la cual se enfoca en la profundidad del aprovechamiento del recurso. La industria geotérmica diferencia entre la explotación de energía geotérmica somera, media y profunda. Existe una línea divisoria conceptual alrededor de los 400 metros de profundidad [11]. En cuanto a la geotermia profunda, se distingue entre reservorios de alta y baja entalpía. La separación entre ambos tipos de reservorios se establece de forma teórica en una temperatura de 200 °C [20].

Generalmente, cuando se habla de geotermia somera, se hace referencia a los primeros cientos de metros de profundidad [21]. Por otro lado, García et al. [11] indican que los primeros 400 metros del subsuelo actúan como un reservorio térmico excepcional que permite el intercambio y el almacenamiento de energía térmica. Este tipo de energía, que puede ser transferida hacia el subsuelo en forma de calor o extraída de él mediante procesos de disipación o absorción, se conoce como energía geotérmica somera (*Shallow geothermal energy*). Los autores indican, además, que en este caso las capas superficiales del suelo, junto con las masas de agua y la atmósfera, constituyen las principales fuentes de energía térmica ambiental. Así mismo, se indica que un reservorio geotérmico somero se distingue por mantener una temperatura estable durante todo el año y por ser una fuente de energía renovable. Este tipo de energía tiene un gran potencial, no solo para su uso en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) en edificaciones residenciales y comerciales, sino también en la generación de calor en instalaciones industriales y otras infraestructuras.

Sanner [22] menciona que las aplicaciones de geotermia somera se pueden desarrollar de manera adecuada en los primeros 100 m de profundidad, debido a que a partir de 15m-20m de profundidad, según las condiciones climáticas locales, la influencia de la temperatura ambiente disminuye y el subsuelo alcanza un régimen térmico prácticamente estable respecto a la temperatura media anual de la zona de estudio. Por otro lado, a mayores profundidades la temperatura aumenta a razón de 3°C por cada 100 m, aproximadamente, a causa del gradiente geotérmico promedio del planeta.

La geotermia somera puede implementarse de diversas maneras. Se puede emplear algún tipo de intercambiador de calor subterráneo (*GHE - Ground Heat Exchanger*), que está acoplado a un sistema de distribución de calor, generalmente utilizando una bomba de calor. Estos sistemas geotérmicos someros pueden alcanzar profundidades de hasta 200 metros [23]. En el contexto de la climatización de edificaciones, la profundidad del intercambiador de calor se encuentra alrededor de los 100 m de profundidad [24].

De acuerdo con Manzella et al. [25] la geotermia somera se puede aprovechar a profundidades comprendidas entre los 10 m y los 200 m, mediante GHP en aplicaciones de calefacción y refrigeración.

Tomando en cuenta la literatura disponible, la clasificación de la geotermia somera, por su profundidad, presenta variaciones entre un autor y otro (Tabla 2).

Tabla 2 Profundidad de la geotermia somera según diferentes autores

Característica	Autor				
	García et al (2022)	Stober y Bucher (2021)	Manzella et al (2019)	Vieira et al (2017)	Sanner (2001)
Profundidad (m)	<400	<400	<200	<200	<100

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Mecanismos de transferencia de calor

En el subsuelo, los mecanismos de transferencia de calor más importantes son la conducción, la convección y la dispersión [26].

3.1.2.1 Conducción

La conducción se refiere al proceso por el cual el calor se difunde por medio de procesos de interacción molecular principalmente en los sólidos [27]. Cuando un medio se ve expuesto a una fuente de calor, sus moléculas comienzan a vibrar causando que las moléculas vecinas vibren igualmente con lo cual se genera la difusión de calor a través del medio [26].

3.1.2.2 Convección

La transferencia de calor por convección implica un intercambio de masa entre dos sistemas. En sistemas naturales, cuando una región transfiere calor, se producen cambios de densidad debido a la expansión o contracción térmica, lo que genera movimientos de masa conocidos como convección natural. Por otro lado, si el movimiento de masa es resultado de un trabajo mecánico externo o del flujo del agua subterránea, como en el caso considerado en este trabajo, se clasifica como convección forzada o advección [11].

3.1.2.3 Advección

De acuerdo con Lines et al. [28], la advección consiste en el proceso mediante el cual el flujo de agua subterránea, influenciado por el gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica, mejora significativamente las propiedades de transferencia de calor del suelo.

3.1.2.4 Dispersión

La dispersión térmica es el proceso mediante el cual la transferencia de calor en un medio poroso se ve influenciada simultáneamente por el flujo de agua subterránea y por la heterogeneidad del material geológico. Aunque se origina a escala de poro, este fenómeno se manifiesta con mayor claridad en escalas mayores, donde las variaciones en la estructura del medio generan una mezcla hidrodinámica que modifica la forma del pulso térmico en movimiento. Como resultado, el frente de calor transportado por convección deja de avanzar de manera nítida y definida,

diluyéndose gradualmente hasta transformarse en un frente más difuso que se dispersa a lo largo del trayecto [11].

3.1.3 Ecuación de transferencia de calor en medio poroso

La ecuación de transferencia de calor en un acuífero en la cual se relacionan los elementos de conducción, convección, fuente o sumidero de calor y variación de la temperatura con el tiempo, se define como en la ecuación (1) [11]:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

λ : Conductividad térmica del medio (W/m·K)

∇T : Gradiente térmico

v : velocidad de flujo del agua subterránea o velocidad de Darcy (m/s)

ρ_f : densidad del agua (kg/m³)

c_f : capacidad calorífica específica del agua (J/kg·K)

T : temperatura (K)

Q : tasa de generación o absorción de calor por unidad de volumen (W/m³)

ρc : Capacidad calorífica volumétrica (J/m³·K)

$\partial T/\partial t$: Variación de la temperatura en el tiempo

A la izquierda de la expresión, se encuentran los elementos de conducción, convección y fuente o sumidero de calor, que representan las condiciones estacionarias del sistema. Del lado derecho de la expresión, se encuentra el elemento que representa la variación de la temperatura en el tiempo, lo cual representa las condiciones transitorias del sistema.

3.1.4 Parámetros térmicos

3.1.4.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica (λ) es una propiedad intrínseca de los materiales que describe su habilidad para transferir calor mediante conducción [26]. Además, sirve como coeficiente de proporcionalidad que relaciona el flujo de calor que atraviesa una unidad de área de un material con el gradiente térmico existente, en condiciones estacionarias. Esta se puede definir como se indica en la ecuación (2) [11]:

$$\lambda = \frac{q \cdot l}{\Delta T} \quad (2)$$

Donde:

q: Flujo de calor a través de un área (W/m^2)

l: Distancia (m)

ΔT : Variación en la temperatura ($^{\circ}K$)

3.1.4.2 Capacidad calorífica específica

La capacidad de un material, en estado sólido, líquido o gaseoso, para acumular energía térmica se conoce como capacidad calorífica específica (c) [26]. Esta describe la cantidad de calor Q (J) requerido para aumentar en un Kelvin la temperatura de un kilogramo de un material. Usualmente se define mediante la siguiente ecuación (3) [11]:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Donde:

Q: Calor (J)

m: masa (kg)

ΔT : Variación en la temperatura ($^{\circ}K$)

3.1.4.3 Capacidad calorífica volumétrica

La capacidad calorífica volumétrica es una propiedad térmica que expresa la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen unitario de un material. En sistemas compuestos, este parámetro corresponde a un valor promedio ponderado de las capacidades caloríficas de sus componentes y determina en qué medida la liberación de calor puede incrementar la temperatura del material [29].

La capacidad calorífica volumétrica (C) se define con la siguiente ecuación (4) [11].

$$C = \rho c \quad (4)$$

Donde:

C: Capacidad calorífica volumétrica ($J/m^3 \cdot K$)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

c: Capacidad calorífica específica ($J/kg \cdot K$)

3.1.4.4 Difusividad térmica

La difusividad térmica (α) representa la tasa, en términos de área y tiempo, a la cual se propaga el calor a través de un medio [26].

Cuando el calor se transfiere predominantemente por conducción, resulta útil considerar esta propiedad, asociada a la conductividad térmica, la cual se define mediante la siguiente ecuación (5) [11]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (5)$$

Donde:

λ : Conductividad térmica (W/m·K)

ρc : corresponde a la capacidad calorífica volumétrica (C) (J/m³·K)

3.1.5 Uso directo de la energía geotérmica

Entre las aplicaciones principales del uso directo se encuentran el calentamiento de piscinas y baños, la balneología con fines terapéuticos, la climatización de espacios, con bombas de calor o con distritos térmicos, así como la agricultura, donde se utiliza para calentar invernaderos, secar cultivos y en algunos casos, para la ganadería. También se emplea en la acuicultura para calentar estanques y canales destinados a la piscicultura. En general, las temperaturas de los fluidos o del subsuelo con el cual se realiza el intercambio de calor necesarias para estas aplicaciones son más bajas que las requeridas para la generación de electricidad, lo que hace que estos recursos estén disponibles en la mayoría de los países [9].

3.1.6 Bomba de calor geotérmica

La bomba de calor es un dispositivo que, como su nombre lo indica, permite bombear calor, elevando la temperatura del calor disponible en un entorno, de un nivel no aprovechable a uno aprovechable, mediante el desarrollo de un trabajo mecánico, para lo cual requiere un suministro de energía [26]. Este dispositivo permite generar, en modo calefacción, un gradiente térmico capaz de inducir la transferencia de energía desde un sistema termodinámico llamado reservorio o fuente de calor hacia un sumidero de calor, también llamado sistema doméstico. Sin embargo, si el ciclo se invierte, la bomba de calor puede pasar de modo calefacción a modo refrigeración, invirtiendo la fuente de calor y el sumidero [11].

Tomando como referencia valores típicos de temperatura y presión (Figura 3), en modo refrigeración, el circuito primario de la bomba de calor opera en un ciclo de compresión de vapor por medio de un compresor. En este último, el gas aumenta temperatura y presión, desde 3 °C y 1,7 bar hasta 73 °C y 13,5 bar, respectivamente. El gas caliente comprimido, circula por el circuito primario hasta ser introducido en un intercambiador de calor conectado con el reservorio identificado como Outdoor en la Figura 3. Este intercambiador de calor (condensador) permite el contacto entre el fluido contenido en el circuito primario de la bomba de calor (refrigerante) y el circuito secundario que está conectado al reservorio (Outdoor); en refrigeración, este reservorio se encuentra a una temperatura más baja del refrigerante. En este

proceso, el gas refrigerante caliente transfiere calor al circuito secundario, lo cual a su vez permite que el gas alcance la temperatura de condensación, en función de su composición química (53 °C en el ejemplo de la Figura 3). En el proceso de condensación del gas, la temperatura permanece constante hasta el final de la condensación. El fluido del circuito Outdoor ingresa al condensador aproximadamente a 45 °C y sale a 50 °C, descargando el calor en el subsuelo (sumidero). Posteriormente, el refrigerante pasa a una válvula de expansión sufriendo un cambio de presión de 13,5 bar a 1,7 bar, lo cual lleva la temperatura a -2 °C, permaneciendo en estado líquido. El fluido frío del circuito primario pasa a un evaporador donde absorbe calor del sistema doméstico (Interior) con el fin de refrescar el edificio, elevando su temperatura hasta el punto de ebullición a 1,7 bar. Durante el proceso de ebullición, el refrigerante absorbe calor, lo cual permite que el proceso se mantenga a temperatura constante. Finalmente, el fluido gaseoso aproximadamente a 3 °C y 1,7 bar, regresa al compresor, cerrando el ciclo [11] (Figura 3).

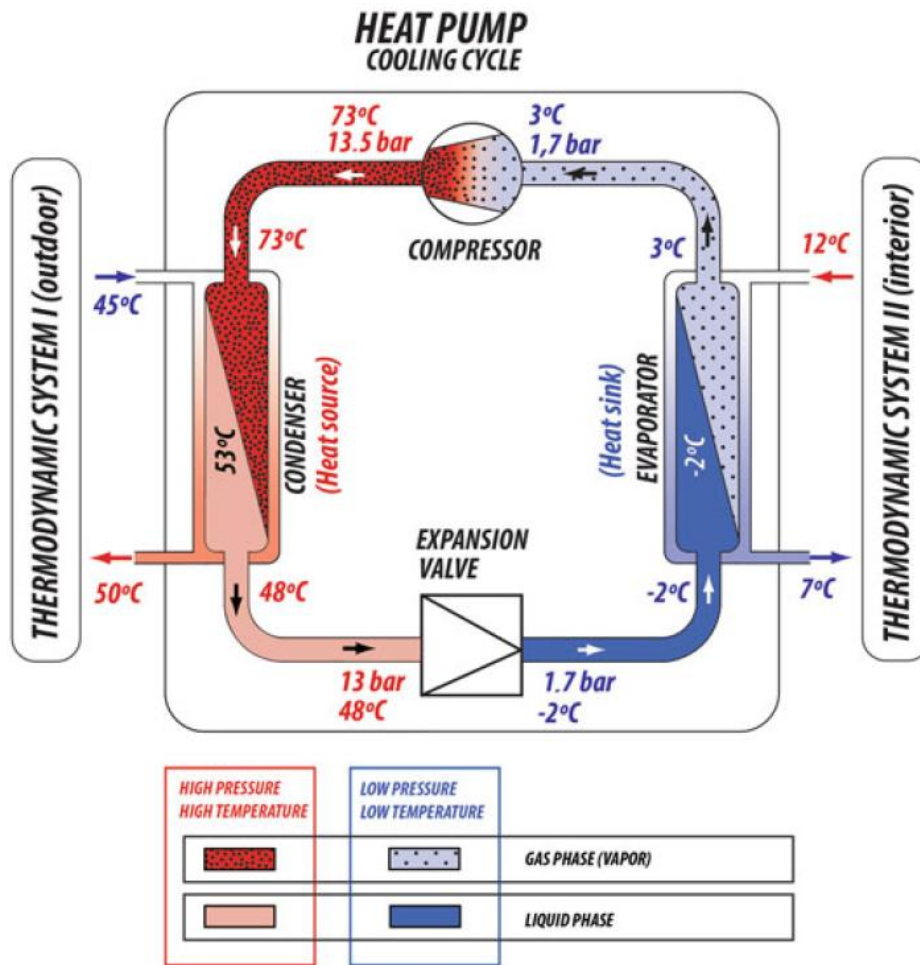


Figura 3 Diagrama esquemático de una bomba de calor en modo refrigeración

Fuente: García et al. [11]

3.1.7 Sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP)

De acuerdo con Rafferty [30], el término Geothermal Heat Pump (GHP) es equivalente a Ground Source Heat Pump (GSHP), solo que el primero es más utilizado para fines comerciales, mientras que el segundo (GSHP) es el término más utilizado desde el punto de vista técnico y de la ingeniería.

La bomba de calor geotérmica (GSHP) es un término que agrupa diferentes sistemas diseñados para usar el suelo, agua subterránea o superficial como fuentes y sumideros de calor. Estos sistemas se clasifican en función del método de intercambio térmico externo. Entre ellos se encuentran las bombas de calor acopladas al suelo (GCHP, por su nombre en inglés - Ground Coupled Heat Pump), que emplean tuberías cerradas enterradas, las bombas de calor con agua subterránea (GWHP), que operan con tuberías de circuito abierto conectadas a pozos, y las bombas de calor con agua superficial (SWHP, por su nombre en inglés - Surface Water Heat Pump), que pueden utilizar espirales de tuberías en circuito cerrado o sistemas de circuito abierto, los cuales se conectan a cuerpos de agua como lagos o ríos. Estos sistemas retiran el calor del interior del edificio y lo transfieren al circuito externo en modo refrigeración (producción de aire acondicionado) [31].

De acuerdo con Gutiérrez et al. [21], las GHP se pueden aplicar en el rango de profundidad de la geotermia somera (<400 m), debido al aislamiento térmico con que cuenta el subsuelo en ese rango de profundidad. Así mismo, resalta la posibilidad de instalación local, en casi cualquier lugar, de sistemas de refrigeración y calefacción con bomba de calor, como una ventaja de dichas aplicaciones. Los sistemas GSHP resultan muy interesantes considerando que pueden generar un ahorro del 70% del consumo energético comparados con los sistemas de refrigeración convencionales [32].

3.1.7.1 Sistemas de bomba de calor de circuito abierto (GWHP)

Estos sistemas implican, además de la captación de agua subterránea, la reinyección del agua captada a una temperatura levemente mayor o menor a la temperatura inicial del acuífero, utilizándolo como sumidero o como fuente de calor, según la necesidad, dependiendo si se trata de refrigeración o calefacción, respectivamente [33].

Las instalaciones geotérmicas someras de circuito abierto (Open-loop) aprovechan el agua subterránea como medio de transporte de calor, facilitando el intercambio térmico entre una bomba de calor geotérmica y el acuífero. La razón principal por la que el agua subterránea resulta ideal para estos sistemas es su alta densidad energética, debido a su elevada capacidad calorífica ($4.200 \text{ J/m}^3\text{K}$), que es aproximadamente cuatro veces superior a la de otros materiales sólidos generalmente presentes en el subsuelo. Cuando se dispone de cuerpos de agua subterránea con concentraciones adecuadas de iones disueltos que no favorezcan procesos de corrosión ni la formación de incrustaciones en las tuberías, bombas e intercambiadores de calor, es posible obtener una cantidad significativa de energía térmica mediante uno o dos pozos, superando el rendimiento de los

intercambiadores de calor de circuito cerrado. Este mayor rendimiento se debe a que el transporte de calor por advección en los acuíferos es mucho más eficaz que el transporte por conducción y los sistemas GWHP aprovechan al máximo la advección [11].

Antes del reciente desarrollo de los GCHP, los GWHP predominaban en el ámbito de la geotermia. El surgimiento de las GCHP se debió, en parte, a los problemas de calidad del agua que se presentaron en los sistemas residenciales de GWHP a partir de las décadas de 1960 y 1970 [31]. En el sector comercial, se utilizan intercambiadores de calor de placas para evitar que el circuito del edificio entre en contacto directo con el agua subterránea, lo que previene problemas relacionados con la calidad del agua. Mientras que el costo del intercambiador de calor del suelo es relativamente fijo por tonelada de capacidad en un sistema GCHP, el costo de los sistemas de agua de pozo resulta menor en instalaciones de gran tamaño, ya que un solo pozo de gran volumen puede abastecer un edificio completo. Sin embargo, los sistemas GWHP requieren un mayor mantenimiento en comparación con los sistemas GCHP o SWHP, pero este gasto se puede compensar con el ahorro potencial en costos de capital [31].

En sistemas de pozos someros, del orden de 46 m de profundidad, se observa que los sistemas GWHP presentan costos inferiores a los de los sistemas GCHP para cualquier capacidad. Por ejemplo, para una instalación de 300 toneladas (1056 kW), la construcción del sistema GWHP puede representar ahorros alrededor de los 450.000 dólares respecto a un sistema GCHP. Al incrementar la profundidad, por ejemplo, en pozos de aproximadamente 92 m, la diferencia económica entre los sistemas GWHP y GCHP tiende a disminuir, especialmente en aplicaciones de capacidad igual o menor a 75 toneladas (264 kW). Sin embargo, para capacidades superiores a 100 toneladas (528 kW), los sistemas GWHP continúan ofreciendo ventajas; por ejemplo, un sistema GWHP de 300 toneladas (1.056 kW) puede generar ahorros alrededor de los 420.000 dólares en comparación con un sistema GCHP [31]. Diversos sistemas de GWHP se pueden implementar. Un diseño común emplea un intercambiador de calor agua-agua central que conecta el agua subterránea con un circuito de agua cerrado, el cual está vinculado a bombas de calor aire-agua dentro del edificio. En edificios pequeños (<70 kW), el agua subterránea puede circular directamente a través de las bombas de calor, aunque existe el riesgo de corrosión y generación de incrustaciones si se utiliza agua sin tratar [31].

Las GWHP tienen ventajas, en comparación con las GCHP, tales como menores costos y una instalación compacta que permite que el requerimiento de espacio sea mínimo [31]. Además, su impacto ambiental sobre la oferta hídrica subterránea es menor, ya que, en la mayoría de los casos, el agua subterránea captada se reinyecta en el subsuelo tras extraer el calor [9]. El esquema de la configuración de un sistema GWHP, presenta un pozo de captación de agua, el cual suministra agua a la bomba de calor, y un pozo de inyección, el cual retorna el agua al acuífero (Figura 4).

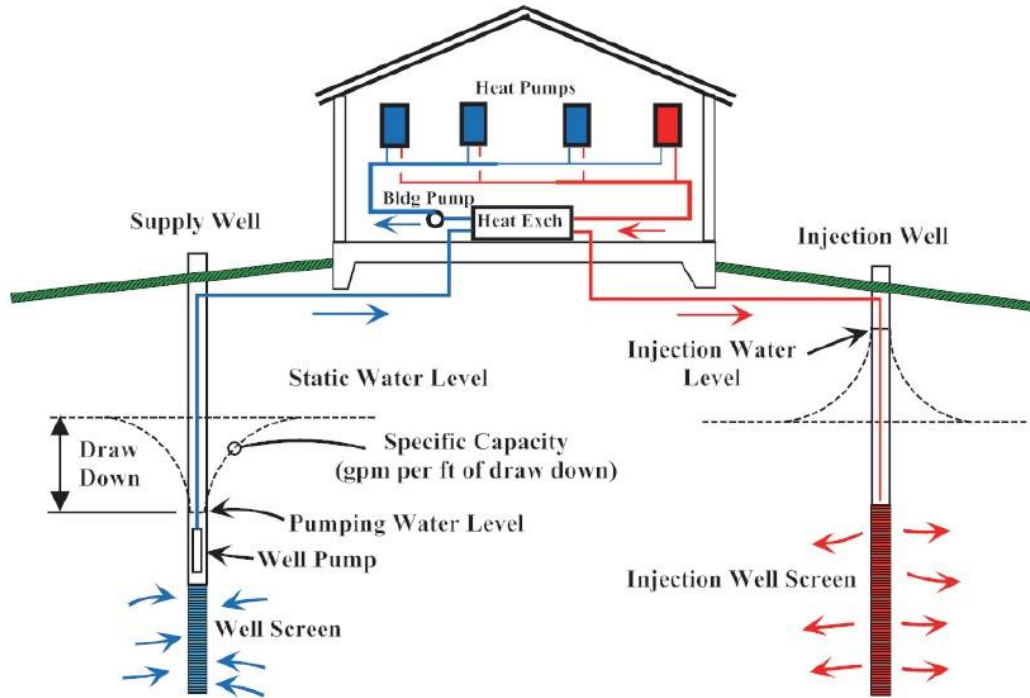


Figura 4 Esquema del sistema GWHP

Fuente: Kavanaugh [31]

Tomando en cuenta que el aprovechamiento de acuíferos con fines de geotermia somera depende de las características del mismo, y con el fin de diseñar sistemas que cuenten con viabilidad técnica y ambiental, se deben considerar y evaluar aspectos tales como: propiedades hidráulicas del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad), litología, mineralogía, dirección de flujo, recarga, localización de cuerpos de agua superficial, profundidad y fluctuación del nivel freático [33].

3.1.8 Sistema acuífero del Valle de Aburrá

De acuerdo con el modelo hidrogeológico del Valle de Aburrá, se han identificado tres unidades que desde el punto de vista hidrogeológico presentan mayor interés: el acuífero libre, el acuífero semiconfinado y el acuífero de la Dunita de Medellín. El nivel de conocimiento que se tiene de dichas unidades hidrogeológicas se considera suficiente para el acuífero libre e insuficiente para el acuífero semiconfinado y para la Dunita de Medellín [34].

A continuación, se describen las unidades acuíferas mencionadas.

3.1.8.1 Acuífero Libre del Valle de Aburrá

Consiste en una unidad hidrogeológica compuesta por depósitos aluviales asociados al río Aburrá y sus afluentes, así como por depósitos de vertiente, clasificados como flujos de lodo y escombros cuyas edades se encuentran comprendidas entre el Neógeno y el Cuaternario. Estos depósitos presentan una granulometría que varía desde gravas, arenas y cantos en una matriz arenosa-arcillosa, la cual hacia la base aumenta su contenido de arcilla y presenta lentes de grava y arcilla [18].

El conocimiento actual sobre el acuífero libre del Valle de Aburrá ofrece una base sólida para desarrollar investigaciones multidisciplinarias que profundicen en su estudio y promuevan la implementación de tecnologías que permitan su aprovechamiento sostenible. En el numeral 5.1, correspondiente a los resultados, se desarrollan aspectos de extensión, espesor, propiedades hidráulicas, recarga y temperatura del acuífero libre, a partir de datos disponibles.

3.1.8.2 Acuífero semiconfinado del Valle de Aburrá

Esta unidad hidrogeológica está compuesta por depósitos de origen aluvial, separados del acuífero libre por una capa semiconfinante. Esta formación se encuentra principalmente en las zonas central y sur del valle y está integrada por materiales como gravas, arenas y cantos, dispuestos en una matriz arcillo-arenosa con la presencia de pequeños lentes de arena y arcilla. Sin embargo, aún no se dispone de suficiente información detallada para definir con precisión la geometría de esta unidad hidrogeológica [18]. El acuitardo que actúa como capa de sellamiento entre el acuífero semiconfinado y el acuífero libre presenta un espesor promedio cercano a los 12 m [35].

3.1.8.3 Acuífero de la Dunita de Medellín

Litológicamente, la unidad acuífera de la Dunita de Medellín consiste en una roca ígnea ultramáfica de edad Triásico que ha desarrollado porosidad secundaria como resultado de procesos de disolución intensificados por su elevado nivel de fracturamiento [36].

Su significativo grado de fracturamiento, junto con características de pseudokarst observadas en ciertos sectores, tal como en el corregimiento de Santa Elena, y registros de caudales en afloramientos y obras de control geotécnico, sugiere que esta formación podría almacenar un volumen considerable de agua subterránea [35]. Este recurso potencialmente podría ser aprovechado para abastecer algunas áreas urbanas o rurales de los municipios de Bello, Medellín y Envigado. Sin embargo, el potencial de la Dunita de Medellín como reservorio acuífero aún no ha sido adecuadamente explorado [18]. De acuerdo con el Plan de Manejo Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) del Valle de Aburrá, es crucial continuar con estudios detallados sobre el acuífero semiconfinado y la Dunita de Medellín [34].

A continuación, se presenta un perfil hidrogeológico del Valle de Aburrá, específicamente del sector correspondiente al municipio de Medellín, en el cual se puede observar la relación estratigráfica entre las unidades hidrogeológicas descritas (Figura 5). Se aprecia que el acuífero semiconfinado se ubica de manera infrayacente al acuífero libre y ocupa únicamente la zona correspondiente al fondo del valle, mientras que el acuífero libre presenta mayor extensión lateral, ocupando ambas vertientes del valle y su fondo. Por otro lado, se aprecia que existe un flujo regional desde el acuífero de la Dunita de Medellín hacia los acuíferos semiconfinado y libre [35].

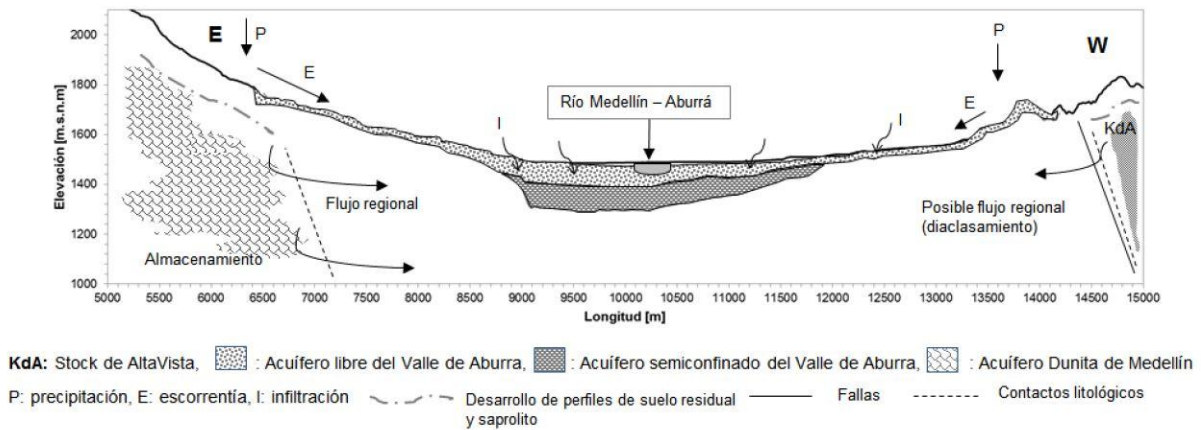


Figura 5 Perfil hidrogeológico del Valle de Aburrá – sector municipio de Medellín

Fuente: Bastidas [35]

3.1.9 Eficiencia energética

La eficiencia energética se define como la cantidad de trabajo útil generado por cada unidad de energía consumida durante un proceso de conversión. Dado que las conversiones de energía implican un costo termodinámico, esta eficiencia se cuantifica comparando la energía aprovechada con la energía total suministrada al sistema, ya sea en un proceso o dispositivo de conversión energética. Cuanto más se acerque esta relación al valor de uno, mayor será la eficiencia del sistema. En términos generales, la eficiencia está relacionada con la capacidad de transformar una forma de energía en otra más útil, minimizando al mismo tiempo las pérdidas energéticas que, según las leyes de la termodinámica, se manifiestan como calor residual de baja calidad y que no puede aprovecharse para fines útiles. Además, las mejoras en la eficiencia implican avances técnicos que optimizan los dispositivos o procesos, reduciendo los costos de entrada y manteniendo el mismo nivel de prestación de energía en un periodo determinado [37].

La eficiencia de un sistema de calefacción está condicionada por varios factores: el consumo energético del edificio, el tipo de sistema de calefacción empleado y las instalaciones interiores seleccionadas. Los sistemas GHP de circuito abierto agua-

agua alcanzan los niveles más altos de eficiencia, con un COP que oscila entre 3.0 y 5.0. Se logra una mayor eficiencia energética cuando el sistema de calefacción GHP utiliza paneles radiantes en el suelo o las paredes como componentes secundarios. De hecho, reemplazar radiadores de alta temperatura con paneles de pared puede generar un ahorro energético de hasta el 30%. Este ahorro se debe a la reducción en la temperatura del fluido de alimentación, una distribución más uniforme del calor en la habitación (en el caso de la calefacción radiante) y una notable disminución en la diferencia de temperaturas entre las zonas superior e inferior del ambiente. Además, la acumulación de calor en los sistemas de calefacción radiante, a diferencia de los sistemas convectivos, también contribuye a estos ahorros. La eficiencia del sistema GHP está determinada por el caudal del pozo y la temperatura del agua. El COP mejora con el aumento del caudal y de la temperatura del agua subterránea en la entrada. Sin embargo, el caudal depende del rendimiento de la bomba del pozo, lo cual implica un consumo de energía eléctrica que, hasta cierto punto, puede afectar la eficiencia energética del sistema [38].

Las GWHP, vinculadas a pozos de agua subterránea, pueden operar de manera reversible para generar refrigeración y climatizar edificios durante el verano y calefacción durante la temporada fría. En modo de refrigeración, desde el espacio exterior al edificio, la bomba de calor enfría el agua para acondicionar el edificio, mientras que, desde el espacio interior del edificio, se encarga de calentar el agua del pozo a la salida del sistema. En el modo de refrigeración, estas GWHP ofrecen mayores ahorros que en el modo de calefacción [10].

3.2 Estado del arte

Villafán-Sierra et al. [32] realizaron un estudio de factibilidad de sistemas SWHP y GCHP, con el fin de reducir los costos operativos asociados con la refrigeración a 3°C de una sala de preservación de flores en el municipio de La Ceja, Antioquia. Debido a las condiciones de temperatura, extensión y profundidad limitadas del cuerpo de agua superficial considerado, el sistema SWHP presenta una mejor relación de eficiencia energética que el sistema de refrigeración tradicional actual; sin embargo, un sistema de refrigeración convencional nuevo podría ser más eficiente que el SWHP analizado. Sin embargo, se resalta la mayor vida útil que presentan las bombas de calor geotérmicas comparado con un sistema de refrigeración convencional. Se propone entonces un GCHP como alternativa al SWHP, indicando que el suelo presenta mejores condiciones de aislamiento térmico comparado con el reservorio de agua superficial considerado para el SWHP.

Gutiérrez et al. [21] elaboraron un estudio en el cual presentan un prototipo de sistema horizontal GCHP, con el fin de proporcionar aire acondicionado en la Universidad EIA, ubicada en Envigado, Antioquia. Los autores calcularon las cargas por refrigeración, seleccionaron la bomba de calor, el intercambiador de calor y el sistema de emisión. Así mismo, determinaron las dimensiones del sistema de zanjas necesario para instalar el intercambiador de calor acoplado al suelo.

Alcaráz et al. [39] definieron una metodología para cuantificar el potencial geotérmico somero, la cual tiene en cuenta la advección y la dispersión como mecanismos de transporte de calor. La metodología desarrollada por los autores está orientada a determinar el potencial geotérmico somero para su aprovechamiento mediante sistemas GCHP.

El Área de Energías Renovables del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) de Argentina [40], desarrolló la herramienta QGeoTherTools, el cual emplea datos de entrada en formato ráster y desarrolla los cálculos de potencial geotérmico somero, mediante la metodología de álgebra de mapas, tanto para sistemas GCHP como para sistemas GWHP.

Alcaráz et al. [41] realizaron un estudio en regiones de siete (7) países, entre las cuales se encuentra el Valle de Aburrá, con miras a determinar el potencial geotérmico somero aprovechable mediante sistemas de bomba de calor GCHP tomando en cuenta la advección, dispersión y difusión como mecanismos de transporte de calor en el acuífero. Para el Valle de Aburrá, se determinó un potencial geotérmico comprendido entre 54.6 W/m y 246.8 W/m, en el cual los mayores valores se encontraron en el municipio de Medellín, sin embargo, los valores máximos obtenidos corresponden a valores teóricos. Los resultados presentados por los autores corresponden a un potencial geotérmico por metro lineal de intercambiador de calor, por lo cual, al considerar el máximo espesor del acuífero libre correspondiente a 148 m, se obtiene un potencial geotérmico somero máximo de 36 kW. En el resto de las regiones analizadas en dicho estudio se obtuvieron menores valores de potencial geotérmico somero, tal como es el caso de Quito (55-117 W/m), Santiago de Chile (57-174 W/m), Córdoba-Argentina (20-57 W/m) y Salto-Uruguay (72-95 W/m).

Aun cuando el potencial geotérmico somero en el Valle de Aburrá ha sido estimado para su aprovechamiento mediante sistemas de circuito cerrado de bomba de calor acoplado al suelo GCHP, este no ha sido estudiado para GWHP, los cuales aprovechan directamente las propiedades térmicas del agua del acuífero y, por lo tanto, requieren de un estudio más profundo de la hidrogeología de la zona de estudio, tomando en cuenta que se estos involucran de manera directa el acuífero y alteran su régimen hidráulico.

Las GHP presentan características sobresalientes en cuanto a eficiencia energética en comparación con otras tecnologías disponibles. Debido a dichas características, en los últimos años, las GHP han adquirido una relevancia creciente tanto en el sector de climatización de edificios como en el ámbito industrial, donde se utilizan en aplicaciones que requieren la producción de calor, conocidas como "heating and cooling", tal como es el caso de las Islas Canarias, España [11].

El uso de sistemas individuales de bombas de calor geotérmicas GWHP, para la calefacción y refrigeración de espacios en edificios nuevos, en el área urbana de Nuevo Belgrado [38], así como también los casos en operación en lugares como Zaragoza, España (García-Gil et al. [42]) y Múnich, Alemania (Böttcher et al. [43]) y (Halilovic et al. [44]), constituyen un ejemplo de eficiencia energética y sostenibilidad económica y ambiental.

Considerando lo expuesto anteriormente por los distintos autores, se concluye que el uso de GWHP constituye una alternativa de alta eficiencia energética, capaz de reducir significativamente la demanda de energía destinada a la climatización de espacios.

Por medio de la presente investigación se pretende ampliar el conocimiento sobre el acuífero libre del Valle de Aburrá, promoviendo su reconocimiento como un recurso aprovechable desde la perspectiva de la geotermia somera. Así mismo, se busca incentivar el uso de tecnologías innovadoras que contribuyan al desarrollo de la eficiencia energética en el país.

4 METODOLOGIA

4.1 Análisis del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero libre del Valle de Aburrá

Partiendo de información de estudios hidrogeológicos realizados en la zona de estudio y de información oficial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se analizó la información disponible relacionada con el modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero.

Entre los estudios que se analizaron, se encuentran: Red de Monitoreo de la Calidad del río Aburrá-Red Río [45], Plan de Manejo Ambiental de Acuífero del Valle de Aburrá [18] y POMCA del río Aburrá [46].

De dichos trabajos se extrajeron, se manejaron y se analizaron datos relacionados con puntos de agua subterránea, parámetros hidráulicos y térmicos del acuífero libre del Valle de Aburrá, tal como: características de tipo y diseño de los puntos de agua subterránea, conductividad hidráulica, transmisividad y temperatura del agua.

Adicionalmente se reevaluaron datos de pruebas de bombeo de los pozos de Gaseosas Lux-Postobón con el fin de establecer su transmisividad.

La transmisividad se calculó mediante la aplicación de la fórmula de Cooper-Jacob, la cual se presenta en la ecuación (6) [47].

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot s} \quad (6)$$

Donde:

s: Abatimiento (m)

Q: Caudal (m³/d)

T: Transmisividad (m²/d)

Finalmente, para la presentación de datos de coordenadas y las salidas gráficas contenidas en el estudio, se empleó el sistema de coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional (CTM12).

- Mapa de transmisividad

Para elaborar el mapa de transmisividad del área de análisis se tomaron en cuenta los datos puntuales de transmisividad provenientes del estudio del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero del Valle de Aburrá [18]. Posteriormente fue necesario realizar el análisis estadístico de los datos, para conocer su comportamiento y poder elaborar un modelo geoestadístico.

El modelo geoestadístico se elaboró en la herramienta ArcGIS Pro, por medio del cual fue posible establecer los parámetros de interpolación que permitieran obtener un bajo error en la interpolación.

Los pasos para crear un modelo de interpolación son los siguientes:

- Cargar los datos y visualizarlos en ArcGIS Pro.
- Explorar datos: examinar las propiedades estadísticas y espaciales de los datos usados, con el fin de determinar su comportamiento estadístico.
- Elegir un método de interpolación adecuado, tomando en cuenta los objetivos del estudio, la distribución espacial de los datos y la comprensión del fenómeno.
- Ajustar el modelo: realizar la interpolación configurando parámetros para que se ajusten a las propiedades estadísticas de sus datos.

El modelo geoestadístico de interpolación se realiza mediante la herramienta Geostatistical Wizard, que incluye un conjunto dinámico y está diseñado para la gestión en el proceso de construcción y evaluación de la efectividad del modelo de interpolación [48].

4.2 Estimación del potencial geotérmico del acuífero

Para el cálculo del máximo caudal de agua extraíble del acuífero del Valle de Aburrá, se empleó la herramienta QGeoTherTools desarrollada por el Área de Energías Renovables del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) de Argentina, el cual emplea datos de entrada en formato ráster y desarrolla los cálculos mediante la metodología de álgebra de mapas [40].

Para la obtención del potencial geotérmico somero fue necesario emplear el mapa de transmisividad obtenido mediante el análisis de los datos del modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero del Valle de Aburrá, debido a que este mapa constituye una entrada para la herramienta QGeoTherTools. Empleando el mapa de transmisividad fue posible calcular el máximo caudal de agua extraíble, el cual a su vez representa un insumo para el cálculo del mapa de potencial geotérmico somero.

- Máximo caudal de agua extraíble

El máximo caudal de agua extraíble estará condicionado por el abatimiento máximo permitido. En condiciones de flujo estacionario, es posible utilizar la fórmula de Thiem para su cálculo, como se indica en la ecuación (7).

$$s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (7)$$

Donde:

s: Abatimiento (m)

Q: Caudal (m³/d)

T: Transmisividad (m²/d)

R: Radio de abatimiento (m)

r: Radio del pozo (m)

Esta fórmula se considera válida bajo las siguientes condiciones:

- El acuífero se supone infinito, isótropo y homogéneo.
- El régimen es estacionario.
- No existen recargas exteriores.
- El pozo de bombeo es de diámetro nulo y atraviesa completamente la formación permeable.
- El flujo de agua hacia el pozo es radial y no tiene componentes verticales.
- El caudal de bombeo es constante.

El radio de abatimiento se calculó mediante la aplicación de la fórmula de radio equivalente que se desprende de la fórmula de Cooper-Jacob, la cual se presenta en la ecuación (8) [47].

$$R = \sqrt{\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{S}} \quad (8)$$

Donde:

R: Radio de abatimiento (m)

T: Transmisividad (m²/d)

t: Tiempo de bombeo (d)

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

- Mapa de potencial geotérmico

El potencial geotérmico, mediante el uso de la herramienta QGeoTherTools, se calculó a través de la aplicación de la siguiente ecuación (9):

$$P = Q \cdot \rho_w c_w \cdot \Delta T \quad (9)$$

Donde:

P: Potencia extraída (W)

Q: Caudal de agua extraído (m³/s)

$\rho_w c_w$: Capacidad calorífica volumétrica del agua (J/m³·K)

ΔT : Incremento de temperatura (°K)

4.3 Propuesta de implementación de un sistema GWHP en un pozo de agua existente (Uso industrial), para el aprovechamiento del recurso geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá

A partir de datos disponibles de pozos profundos existentes en el Valle de Aburrá, específicamente en las instalaciones de la planta de Postobón de la ciudad de Medellín, se analizó la implementación de un sistema de climatización empleando un sistema GWHP que permita el aprovechamiento del potencial geotérmico somero del acuífero.

Los datos empleados de pozos existentes incluyen su diseño mecánico, profundidad, diámetro, caudal bombeado, conductividad hidráulica y transmisividad.

Dado que el sistema GWHP requiere un (1) pozo de captación y un (1) pozo de inyección, se procedió a definir estos, tomando en cuenta sus características hidráulicas.

Para calcular las cargas térmicas que se pueden transferir al edificio, se emplearon las fórmulas presentadas por Banks [26] en las ecuaciones (10) y (11).

$$q_{suelo} = Q \cdot \Delta T \cdot C_v \quad (10)$$

Donde,

q_{suelo} : Potencial del suelo (W)

Q = Caudal (m^3/s)

ΔT = Delta de temperatura ($^{\circ}K$)

C_v : Capacidad calorífica volumétrica del agua ($J/m^3 \cdot ^{\circ}K$)

$$q_{edificio} = \frac{q_{suelo}}{\frac{COP_{cooling} + 1}{COP_{cooling}}} \quad (11)$$

Donde,

$q_{edificio}$: Cargas térmicas a transferir al edificio (W)

q_{suelo} : Potencial del suelo (W)

$COP_{cooling}$ = Coeficiente de rendimiento (adimensional)

Partiendo de las cargas térmicas del edificio, se calculó el área que se podría climatizar, tomando en cuenta las fórmulas que se presentan en la ecuación (12) y (13) [49].

$$q_{edificio(cooling)} = A \cdot SB \cdot Pc \quad (12)$$

$$A = \frac{q_{edificio}}{0,5 \cdot 0,168} \quad (13)$$

Donde,

A: Área edificio (m²)

SB: porcentaje del edificio de oficinas que requiere una refrigeración efectiva (%)

Pc: Factor de energía requerida según clima (BTU/h·m²); BTU/h = kW

Pc (Para Medellín): 0,161 – 0,175 [49]

Teniendo en cuenta las cargas térmicas del edificio se investigó y seleccionó una bomba de calor apta para sistemas GWHP que presente características idóneas de potencia térmica y coeficiente de rendimiento (COP). La bomba de calor seleccionada resultó del análisis de las fichas técnicas de bombas de calor de la marca Ecoforest [50].

4.4 Proposición de guía de recomendaciones para el aprovechamiento del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá, mediante un sistema GWHP

Tomando en cuenta las características hidrogeológicas del Valle de Aburrá, su potencial geotérmico, el sistema GWHP propuesto, los sistemas GWHP en operación en otros países (Halilovic et al. [44], García-Gil et al. [42], Böttcher et al. [43]) y la bibliografía relacionada con el diseño de sistemas GWHP [31], se elaboró una guía de recomendaciones para el aprovechamiento del potencial geotérmico del acuífero, mediante sistemas GWHP, la cual propone las mejores prácticas desde el punto de vista técnico y ambiental.

5 RESULTADOS

5.1 Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero libre del Valle de Aburrá

En el sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá se han identificado tres unidades que desde el punto de vista hidrogeológico presentan mayor interés: el acuífero libre, el acuífero semiconfinado y el acuífero de la Dunita de Medellín. El nivel de conocimiento de dichas unidades hidrogeológicas es variable; para el acuífero libre se considera suficiente, mientras que para el acuífero semiconfinado y para la Dunita de Medellín se considera insuficiente [34].

En el marco del presente estudio, la unidad hidrogeológica de interés es el acuífero libre, razón por la cual la caracterización hidrogeológica se enfoca en esta unidad.

5.1.1 Unidad hidrogeológica

El acuífero libre del Valle de Aburrá está compuesto por depósitos aluviales asociados al río Aburrá-Medellín y sus tributarios, así como por depósitos de vertiente los cuales a su vez se encuentran compuestos por flujos de lodo y escombros, cuya edad se atribuye al Neógeno o Cuaternario. Desde el punto de vista textural, estos depósitos están conformados por una mezcla de gravas, arenas y cantos, inmersos en una matriz areno-arcillosa que tiende a volverse más arcillosa en la base, con la presencia intercalada de lentes de grava y arcilla [18].

Tomando en cuenta el POMCA del río Aburrá [46] es válido afirmar que el acuífero libre del Valle de Aburrá corresponde a sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular, de lo cual se infiere que la unidad hidrogeológica posee porosidad primaria.

En esta sección se presentan los análisis y precisiones necesarios sobre el acuífero libre del Valle de Aburrá, incluyendo sus dimensiones, espesor, propiedades hidráulicas, recarga y temperatura del agua. Estos parámetros se derivan del análisis y reprocesamiento de información proveniente de estudios previamente realizados. Los datos de área y espesor permiten caracterizar la unidad acuífera en estudio y evaluar el estado de la información hidrogeológica disponible.

Adicionalmente, la información hidráulica contenida en el Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá fue examinada con el fin de determinar su cobertura espacial. Los valores puntuales de transmisividad fueron reprocesados para posibilitar su interpolación y, de este modo, generar una capa espacializada de transmisividad para el área de análisis definida.

A continuación, se presenta el mapa de unidades hidrogeológicas del sistema acuífero del Valle de Aburrá, en el cual se aprecia la relación entre la unidad hidrogeológica del acuífero libre y las unidades hidrogeológicas de acuífero semiconfinado y acuífero Dunita de Medellín. Se aclara que la unidad correspondiente al acuífero semiconfinado se ubica de manera infrayacente al acuífero libre (Figura 6).

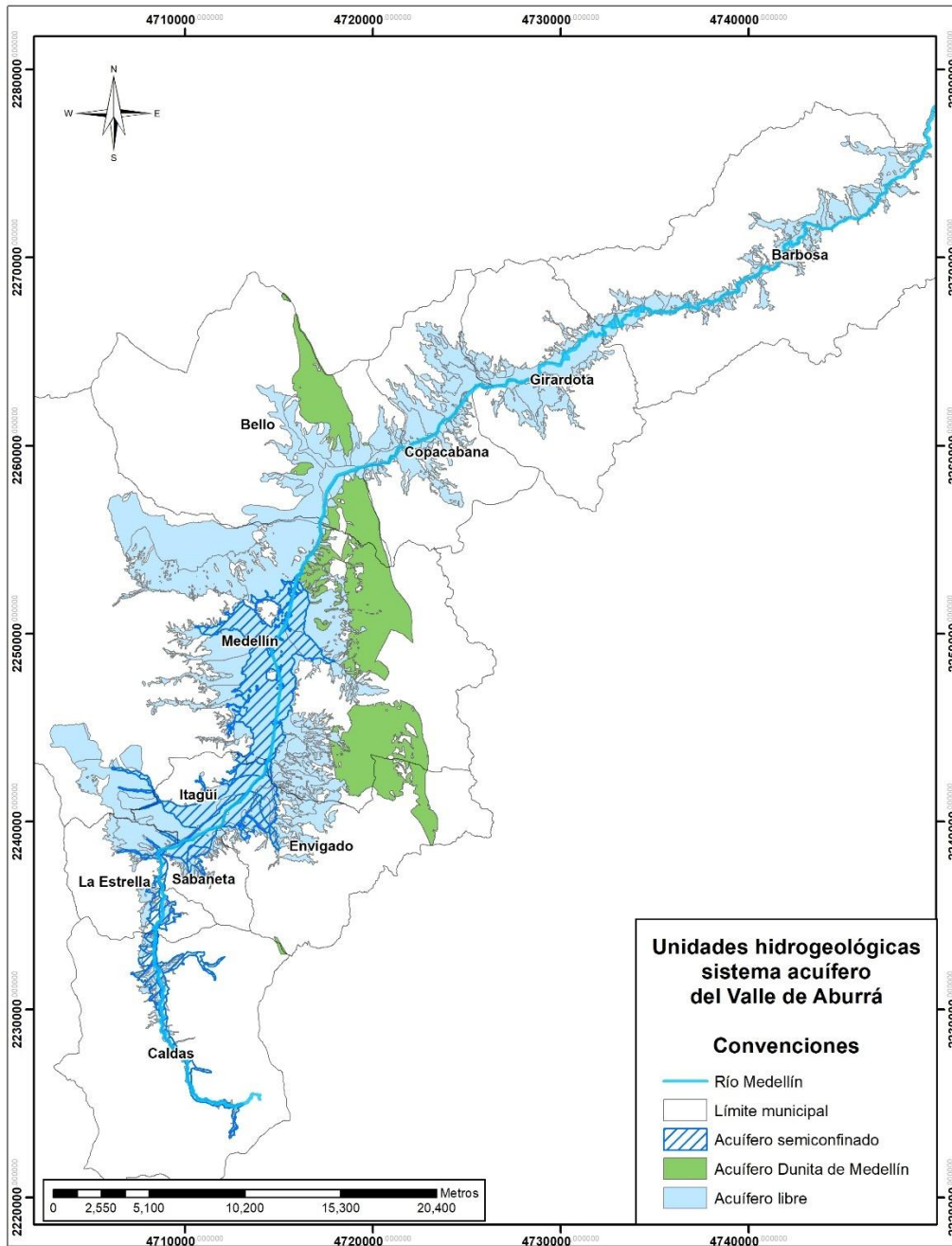


Figura 6 Unidades hidrogeológicas del sistema acuífero del Valle de Aburrá

Fuente: Adaptado de [18]

5.1.2 Dimensiones del acuífero

Al analizar la información espacial del sistema hidrogeológico considerado, contenida en el Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá [18], fue posible determinar el área del acuífero libre la cual resulta en 23.527,83 ha (Tabla 3).

Tabla 3 Área del acuífero libre del Valle de Aburrá

Unidad hidrogeológica	Área (Ha)
Acuífero Libre	23.527,83

Fuente: Elaboración propia a partir de [18]

Por otro lado, a partir de los datos de la geodatabase del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá [18], se determinó que el espesor del acuífero se encuentra ente 1 m y 148,2 m, como se puede apreciar a continuación (Figura 7).

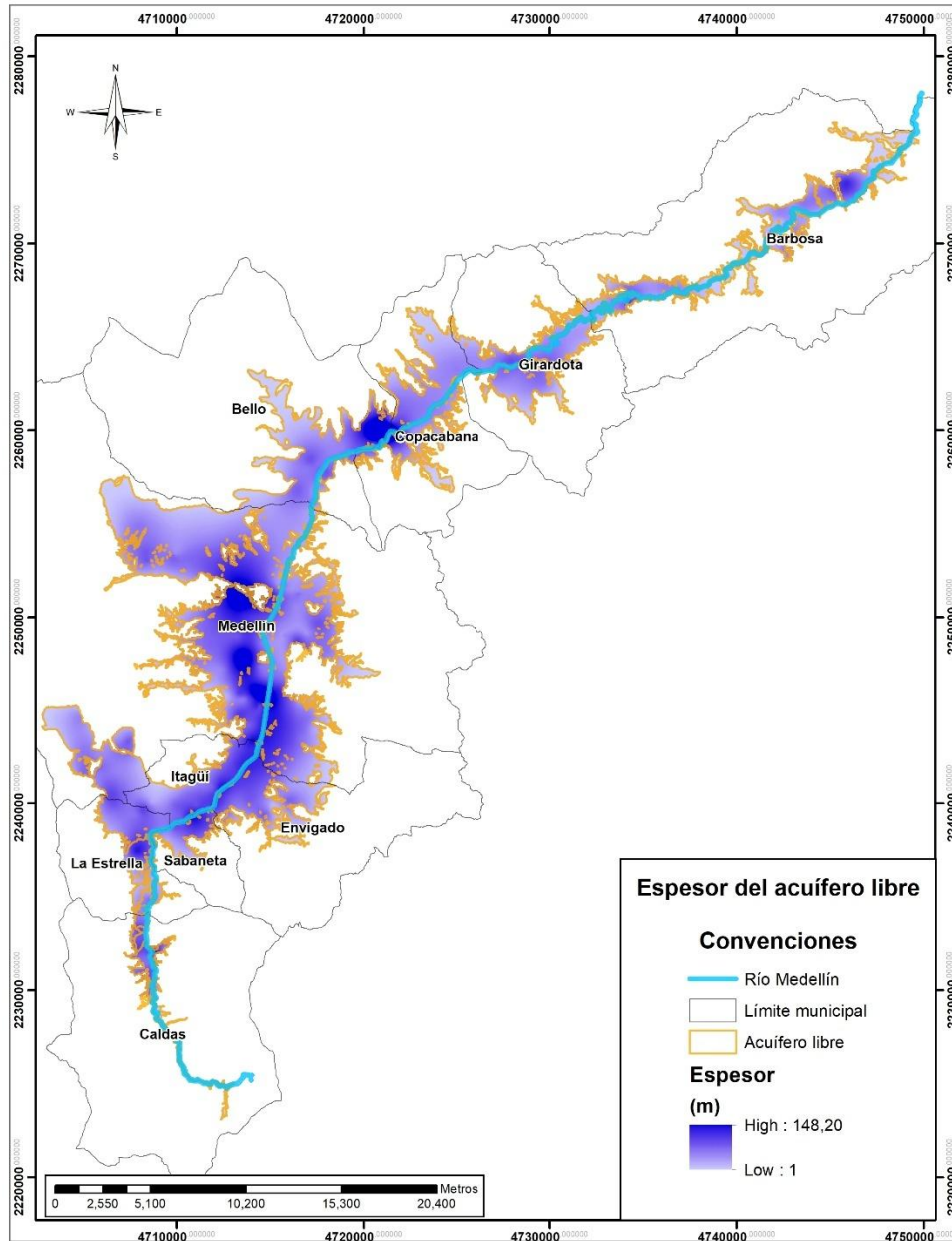


Figura 7 Espesor del acuífero libre del Valle de Aburrá

Fuente: Adaptado de [18]

5.1.3 Propiedades hidráulicas

A partir de la revisión del Plan de Ordenamiento de la Cuenca del Río Aburrá, se desprenden los siguientes datos de propiedades hidráulicas, obtenidos en pruebas de bombeo en pozos (Tabla 4) [46].

Según lo establecido en el POMCA del río Aburrá [46], los parámetros estimados presentan un grado considerable de incertidumbre, en especial el coeficiente de almacenamiento (S), debido a que las pruebas de bombeo, por lo general, se ejecutan sin contar con valores de descensos del nivel del agua obtenidos en pozos de observación, los cuales se requieren para un cálculo técnicamente correcto de este parámetro. Se aclara que el coeficiente de almacenamiento no es utilizado en la estimación del potencial geotérmico del acuífero.

Tabla 4 Propiedades hidráulicas obtenidas en pruebas de bombeo en el Valle de Aburrá

Pozo	Método	T (m ² /d)	S	K (m/d)
Delmaíz	Theis	5,71	2,7 x 10 ⁻⁶	0,18
Postobón	Theis	12,04	7,1 x 10 ⁻⁵	0,54
Invatex	Theis	10,04	5,8 x 10 ⁻⁶	0,25
Qca Amtex	Theis	0,23	2,6 x 10 ⁻⁶	-
Terpel la 65	Recuperación	91,7	-	4,6
Motel Motivos	Recuperación	5,71	-	0,32

Fuente: POMCA río Aburrá [46]

Con base en la reevaluación de datos de pruebas de bombeo realizadas en seis (6) pozos de la planta de Gaseosas Lux-Postobón en el año 2003, ubicada en la ciudad de Medellín, fue posible calcular la transmisividad, de acuerdo con la ecuación 6 del numeral de metodología, obteniéndose valores comprendidos entre 1,23 m²/d y 68,84 m²/d. Se destaca que de las seis (6) pruebas de bombeo solo una (1) presenta valor de transmisividad menor a 10 m²/d. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Transmisividad a partir de reevaluación de datos de pruebas de bombeo

Parámetros	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Pozo 6
T (m ² /d) - Bombeo	1,19	82,61	19,47	76,42	40,06	14,98
T (m ² /d) - Recuperación	1,26	55,08	10,38	57,32	46,22	17,79
T (m ² /d) promedio bombeo-recuperación	1,23	68,84	14,93	66,87	43,14	16,38

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [51]

Las coordenadas y profundidad de los pozos de Postobón se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Coordenadas de pozos de Postobón

Pozo	Profundidad (m)	Coordenadas	
		Coordenada X	Coordenada Y
Pozo 1	22,6	4.714.870,57	2.246.527,71
Pozo 2	25,6	4.714.903,12	2.246.553,04
Pozo 3	22,8	4.714.888,16	2.246.573,46
Pozo 4	31,4	4.714.932,78	2.246.636,96
Pozo 5	36	4.714.854,89	2.246.685,32
Pozo 6	40	4.714.881,50	2.246.346,71

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [51] y [18]

Al comparar los valores de transmisividad obtenidos a partir de la reevaluación de datos de las pruebas de bombeo de los pozos de Gaseosas Lux-Postobón, se observa coherencia entre los resultados obtenidos y el valor de transmisividad reportado en el POMCA del río Aburrá [46] para el pozo identificado como “Postobón”.

Los valores de transmisividad provenientes del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá [18] se presentan a continuación (Tabla 7).

Tabla 7 Datos de transmisividad según Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá

ID	Tipo de punto	Transmisividad (m ² /d)	Coordenada X	Coordenada Y
Be_A_019	Aljibe	9,06	4.719.304,53	2.258.413,72
Be_A_030	Aljibe	7,63	4.718.133,30	2.258.797,60
Be_A_034	Aljibe	1,13	4.717.242,45	2.256.544,17
Be_A_037	Aljibe	432	4.716.540,36	2.259.826,17
Be_A_051	Aljibe	4	4.716.344,54	2.259.896,57
Be_A_054	Aljibe	22,80	4.718.073,48	2.258.157,02
Be_A_057	Aljibe	77,70	4.718.050,67	2.258.775,18
Es_A_001	Aljibe	0,30	4.707.575,09	2.239.408,39
Es_A_001	Aljibe	0,30	4.707.575,09	2.239.408,39
Es_A_012	Aljibe	2	4.708.740,64	2.238.556,43
Es_A_019	Aljibe	0,19	4.708.226,03	2.238.768,15
Es_A_026	Aljibe	27,21	4.708.957,92	2.238.855,26
Es_A_031	Aljibe	1,22	4.708.928,85	2.238.126,50
Es_A_032	Aljibe	3,20	4.709.082,51	2.237.965,21
Es_A_033	Aljibe	4,04	4.707.533,42	2.239.320,19
Es_A_034	Aljibe	1	4.708.804,65	2.238.019,77
Es_A_035	Aljibe	2	4.708.814,65	2.238.019,74
Es_A_037	Aljibe	116	4.708.997,63	2.235.736,34
Es_GEO_0016	Piezómetro	0,48	4.708.197,67	2.239.616,75
Es_P_036	Pozo	1	4.708.808,68	2.238.035,76
Es_P_038	Pozo	5	4.708.935,49	2.235.661,17
Gi_A_008	Aljibe	22,14	4.726.407,36	2.263.416,04

ID	Tipo de punto	Transmisividad (m ² /d)	Coordenada X	Coordenada Y
Gi_P_006	Pozo	2,46	4.726.581,10	2.263.307,69
It_A_002	Aljibe	12,42	4.709.147,05	2.240.267,32
It_A_004	Aljibe	5	4.712.952,88	2.241.448,56
It_A_011	Aljibe	0,23	4.713.003,07	2.241.792,62
It_A_030	Aljibe	15,67	4.710.598,88	2.239.327,59
It_A_036	Aljibe	12	4.711.477,40	2.239.932,04
It_A_040	Aljibe	0,86	4.710.434,82	2.240.129,83
It_A_054	Aljibe	8	4.709.598,53	2.240.380,49
It_A_060	Aljibe	67,76	4.710.310,13	2.240.424,14
It_A_061	Aljibe	3,19	4.710.330,92	2.240.372,21
It_A_073	Aljibe	7,35	4.713.539,27	2.242.905,49
It_A_076	Aljibe	177,88	4.713.800,47	2.243.022,94
It_A_080	Aljibe	5,03	4.711.857,89	2.240.543,90
It_A_081	Aljibe	28,42	4.714.016,19	2.242.751,04
It_A_082	Aljibe	17,60	4.714.089,51	2.242.714,90
It_A_087	Aljibe	9	4.713.569,11	2.242.832,14
It_A_092	Aljibe	4,22	4.713.255,02	2.242.865,57
It_A_097	Aljibe	2,87	4.713.034,18	2.241.651,37
It_A_098	Aljibe	1,96	4.713.003,21	2.241.612,74
It_A_100	Aljibe	2,07	4.711.560,94	2.240.748,97
It_A_103	Aljibe	0,9	4.713.247,14	2.243.022,27
It_A_108	Aljibe	3,52	4.712.806,47	2.242.564,22
It_A_110	Aljibe	1,97	4.712.102,71	2.242.199,79
It_A_112	Aljibe	6	4.712.965,49	2.242.339,13
It_A_113	Aljibe	9,85	4.712.763,80	2.241.546,04
It_A_114	Aljibe	6,81	4.712.712,24	2.241.558,94
It_A_122	Aljibe	1.160,90	4.708.098,35	2.240.307,93
It_A_123	Aljibe	10,64	4.710.152,42	2.239.171,01
It_A_126	Aljibe	14,80	4.711.852,83	2.240.270,34
It_A_129	Aljibe	5	4.715.070,10	2.252.357,32
It_A_132	Aljibe	4,16	4.712.079,65	2.248.492,25
It_A_134	Aljibe	4,98	4.711.764,77	2.240.233,52
Me_A_005	Aljibe	13,99	4.714.635,98	2.242.886,66
Me_A_007	Aljibe	0,02	4.715.007,00	2.244.735,06
Me_A_010	Aljibe	9,70	4.715.327,03	2.245.215,05
Me_A_023	Aljibe	32,94	4.715.382,97	2.246.462,37
Me_A_024	Aljibe	26,80	4.715.696,52	2.246.068,98
Me_A_036	Aljibe	5,40	4.715.485,48	2.246.915,80
Me_A_049	Aljibe	1	4.715.459,91	2.247.270,50
Me_A_054	Aljibe	48,10	4.715.535,43	2.247.334,34
Me_A_076	Aljibe	31	4.715.194,77	2.247.917,96
Me_A_078	Aljibe	123,50	4.715.297,23	2.247.908,25
Me_A_083	Aljibe	21,26	4.715.558,87	2.248.090,69
Me_A_085	Aljibe	10	4.715.277,62	2.248.292,34
Me_A_095	Aljibe	10,62	4.715.280,35	2.249.429,28
Me_A_104	Aljibe	0,50	4.717.224,11	2.248.464,63
Me_A_105	Aljibe	8,72	4.716.652,91	2.248.768,56
Me_A_105	Aljibe	8,72	4.716.652,91	2.248.768,56

ID	Tipo de punto	Transmisividad (m ² /d)	Coordenada X	Coordenada Y
Me_A_109	Aljibe	11,39	4.716.956,84	2.248.606,86
Me_A_114	Aljibe	2,73	4.716.433,27	2.248.634,13
Me_A_116	Aljibe	2	4.716.528,24	2.249.361,63
Me_A_122	Aljibe	10	4.716.097,59	2.250.233,30
Me_A_122	Aljibe	10	4.716.097,59	2.250.233,30
Me_A_148	Aljibe	11,57	4.715.699,98	2.250.639,26
Me_A_156	Aljibe	2	4.716.328,29	2.251.268,58
Me_A_158	Aljibe	7,90	4.715.895,97	2.250.890,12
Me_A_159	Aljibe	60	4.715.828,72	2.250.961,05
Me_A_163	Aljibe	4,27	4.716.116,58	2.251.054,75
Me_A_166	Aljibe	1,35	4.716.613,43	2.251.260,60
Me_A_169	Aljibe	4,30	4.716.574,90	2.251.292,37
Me_A_170	Aljibe	4,33	4.716.638,22	2.251.304,14
Me_A_171	Aljibe	0,12	4.716.554,81	2.251.292,41
Me_A_195	Aljibe	1,79	4.714.521,48	2.246.216,06
Me_A_196	Aljibe	3,42	4.714.599,02	2.246.387,28
Me_A_236	Aljibe	1,50	4.713.829,43	2.244.086,35
Me_A_253	Aljibe	2,73	4.713.310,88	2.244.718,82
Me_A_272	Aljibe	0,69	4.714.571,04	2.245.466,16
Me_A_277	Aljibe	7,36	4.714.783,59	2.245.895,17
Me_A_278	Aljibe	42	4.714.607,09	2.245.636,96
Me_A_279	Aljibe	11,84	4.714.616,57	2.245.631,94
Me_A_288	Aljibe	0,09	4.714.579,55	2.246.793,67
Me_A_298	Aljibe	5,60	4.714.759,83	2.246.845,59
Me_A_318	Aljibe	3,11	4.714.566,26	2.246.945,17
Me_A_325	Aljibe	4,60	4.713.020,59	2.246.762,35
Me_A_331	Aljibe	8,71	4.711.690,55	2.247.443,69
Me_A_332	Aljibe	7,80	4.712.078,40	2.247.349,01
Me_A_333	Aljibe	9,50	4.712.078,81	2.247.353,90
Me_A_334	Aljibe	2,84	4.712.082,42	2.247.356,70
Me_A_337	Aljibe	17,24	4.712.079,64	2.248.492,26
Me_A_346	Aljibe	2	4.711.613,88	2.249.360,61
Me_A_369	Aljibe	65,88	4.712.510,54	2.247.341,52
Me_A_389	Aljibe	3,16	4.714.354,15	2.248.978,24
Me_A_390	Aljibe	6	4.713.190,92	2.248.891,04
Me_A_390	Aljibe	6	4.713.190,92	2.248.891,04
Me_A_392	Aljibe	7	4.712.812,87	2.248.791,42
Me_A_397	Aljibe	6,61	4.712.143,48	2.248.613,32
Me_A_411	Aljibe	1,30	4.714.590,06	2.249.874,94
Me_A_413	Aljibe	0,19	4.712.905,36	2.250.695,19
Me_A_423	Aljibe	29,78	4.713.826,17	2.250.562,62
Me_A_443	Aljibe	1,91	4.715.511,62	2.251.814,39
Me_A_448	Aljibe	13,75	4.715.111,20	2.252.117,37
Me_A_451	Aljibe	0,14	4.715.321,21	2.253.978,99
Me_A_455	Aljibe	4,01	4.715.786,30	2.252.646,81
Me_A_456	Aljibe	8,56	4.715.630,82	2.252.261,08
Me_A_456	Aljibe	8,56	4.715.630,82	2.252.261,08
Me_A_458	Aljibe	2,82	4.715.157,24	2.252.334,45

ID	Tipo de punto	Transmisividad (m ² /d)	Coordenada X	Coordenada Y
Me_A_461	Aljibe	99,90	4.715.566,99	2.248.345,34
Me_A_463	Aljibe	13,91	4.715.017,69	2.252.640,29
Me_A_464	Aljibe	156,45	4.714.629,40	2.243.141,34
Me_A_465	Aljibe	9,81	4.714.306,06	2.246.927,51
Me_A_466	Aljibe	3	4.714.440,85	2.247.174,90
Me_A_472	Aljibe	1,80	4.714.922,91	2.243.506,30
Me_A_473	Aljibe	0,20	4.714.579,53	2.242.707,60
Me_A_474	Aljibe	1,89	4.715.212,45	2.246.687,59
Me_A_477	Aljibe	65,40	4.715.377,51	2.247.219,28
Me_A_480	Aljibe	20	4.715.148,68	2.252.160,09
Me_A_481	Aljibe	4,45	4.714.499,30	2.247.059,09
Me_A_482	Aljibe	2,64	4.716.208,34	2.250.217,37
Me_A_483	Aljibe	4,76	4.716.095,52	2.248.736,60
Me_A_485	Aljibe	1,15	4.706.538,64	2.242.142,19
Me_A_486	Aljibe	0,86	4.711.882,01	2.247.242,42
Me_A_486	Aljibe	0,86	4.711.882,01	2.247.242,42
Me_A_492	Aljibe	119,62	4.711.501,99	2.249.797,09
Me_A_493	Aljibe	6,86	4.714.809,86	2.251.738,84
Me_A_496	Aljibe	118	4.715.728,94	2.247.448,53
Me_A_500	Aljibe	3,30	4.718.236,12	2.247.707,37
Me_A_510	Aljibe	1,51	4.713.630,93	2.243.682,20
Me_A_511	Aljibe	660,08	4.716.989,28	2.244.955,40
Me_A_516	Aljibe	1	4.715.279,36	2.251.527,90
Me_A_518	Aljibe	1,18	4.715.725,72	2.250.759,09
Me_A_521	Aljibe	17,24	4.713.307,95	2.247.298,50
Me_A_523	Aljibe	0,74	4.715.414,76	2.244.892,51
Me_A_525	Aljibe	28	4.716.643,71	2.251.252,34
Me_A_526	Aljibe	22	4.716.645,11	2.251.252,33
Me_A_529	Aljibe	4,26	4.716.618,15	2.251.511,15
Me_A_532	Aljibe	14	4.715.236,87	2.247.870,48
Me_GEO_0108	Piezómetro	0,48	4.713.539,96	2.247.700,68
Me_P_226	Aljibe	5,44	4.714.028,14	2.243.859,97
Me_P_270	Pozo	9,04	4.714.781,88	2.245.644,90
Me_P_271	Pozo	195,95	4.714.779,49	2.245.601,81
Me_P_282	Pozo	76,42	4.714.881,50	2.246.346,71
Me_P_283	Pozo	14,97	4.714.932,78	2.246.636,96
Me_P_284	Pozo	40,10	4.714.854,89	2.246.685,32
Me_P_285	Pozo	19,47	4.714.888,16	2.246.573,46
Me_P_286	Pozo	82,60	4.714.903,12	2.246.553,04
Me_P_287	Pozo	11,90	4.714.870,57	2.246.527,71
St_A_018	Aljibe	5,27	4.711.016,87	2.238.604,53
St_A_037	Aljibe	4,87	4.710.559,94	2.238.762,14
St_P_005	Aljibe	2,90	4.711.502,57	2.239.128,19
St_P_034	Pozo	19,99	4.712.888,85	2.251.127,87

Fuente: Adaptado de [18]

A partir del análisis de la información espacial del sistema hidrogeológico considerado [18], fue posible determinar que en el área del acuífero libre se cuenta

con valores de transmisividad puntuales, obtenidos a través de pruebas hidráulicas, comprendidos entre $0,03 \text{ m}^2/\text{d}$ y $1.160,89 \text{ m}^2/\text{d}$ (Figura 8).

Tomando en cuenta la distribución espacial de los datos puntuales de transmisividad en el área del acuífero libre del Valle de Aburrá, se definió un área de análisis con suficiente cobertura de datos, la cual permita elaborar un modelo geoestadístico de interpolación. El área de análisis definida cuenta con un área de 10.059 ha . (Figura 9).

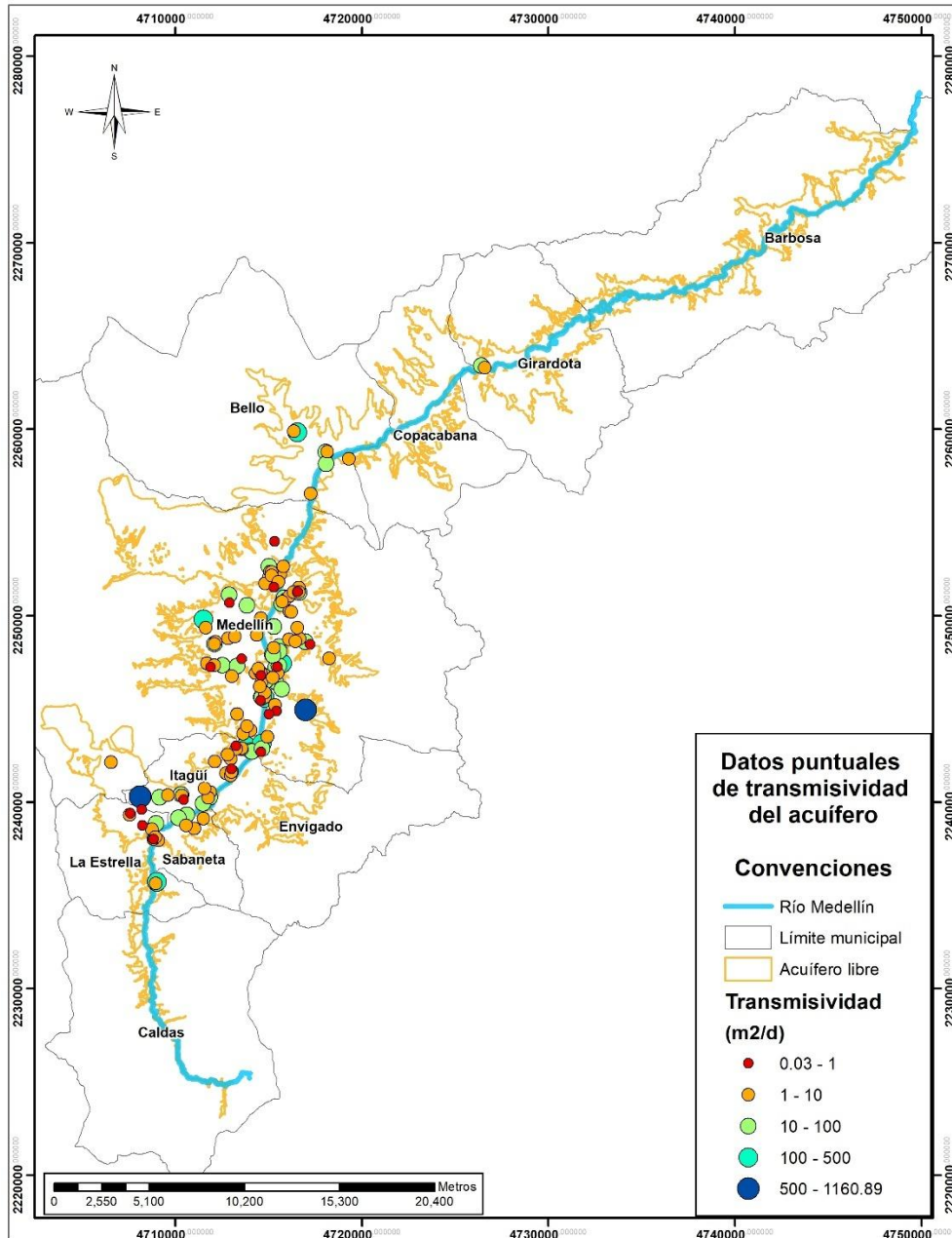


Figura 8 Transmisividad del acuífero

Fuente: Adaptado de [18]

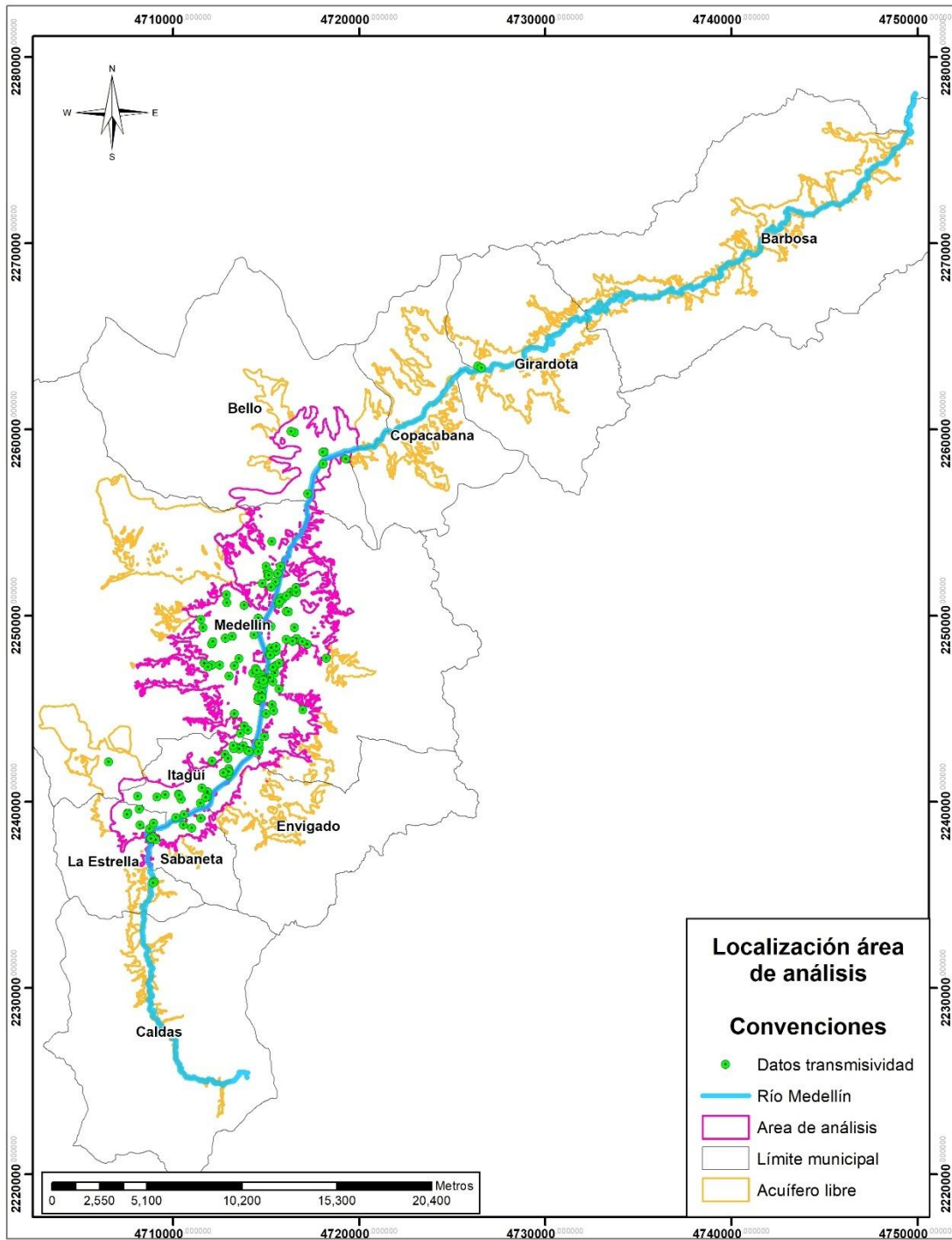


Figura 9 Área de análisis definida para obtener capa de transmisividad

Fuente: Elaboración propia

Empleando los datos puntuales de transmisividad [18], fue posible realizar un modelo geoestadístico Kriging. El modelo geoestadístico elaborado presenta las características y parámetros siguientes (Tabla 8).

Tabla 8 Características y parámetros del modelo geoestadístico

Característica / Parámetro	Tipo/Valor
Tipo de método	Kriging ordinario
Transformación	Logarítmica
Orden	Segundo
Nugget	0,47
Sill	2,95
Rango	121,4
Tamaño de celda establecido para el ráster resultante	50 m

Fuente: Elaboración propia

La interpolación se basa en la estructura de dependencia espacial definida por el variograma, el cual determina el rango, la continuidad y la suavidad espacial del fenómeno modelado. En este estudio se utilizó un tamaño de celda de 50 m, el cual resulta inferior al rango que se obtuvo en el variograma, lo cual permite obtener una resolución suficiente para reflejar los patrones espaciales definidos por el modelo geoestadístico ajustado.

Los errores obtenidos indican una leve subestimación en las predicciones del modelo con respecto a los valores reales de transmisividad; además, indican que no hay un sesgo relevante en las predicciones y, finalmente, indican una ligera subestimación de la variabilidad de los datos (Tabla 9).

Tabla 9 Errores obtenidos en el modelo geoestadístico

Característica / Parámetro	Tipo/Valor
Error medio	1,83
Error medio estandarizado	-0,09
Error cuadrático medio estandarizado	1,1

Fuente: Elaboración propia

Con el modelo geoestadístico de interpolación elaborado, fue posible obtener una aproximación del comportamiento espacial de la transmisividad en el área de análisis, la cual resultó con valores comprendidos entre 0,33 m²/d y 405 m²/d, lo cual se puede considerar una transmisividad media a alta, para los valores mayores

a $100 \text{ m}^2/\text{d}$, baja para los valores comprendidos entre $10 \text{ m}^2/\text{d}$ y $100 \text{ m}^2/\text{d}$ y muy baja para los valores menores a $10 \text{ m}^2/\text{d}$ (Figura 10).

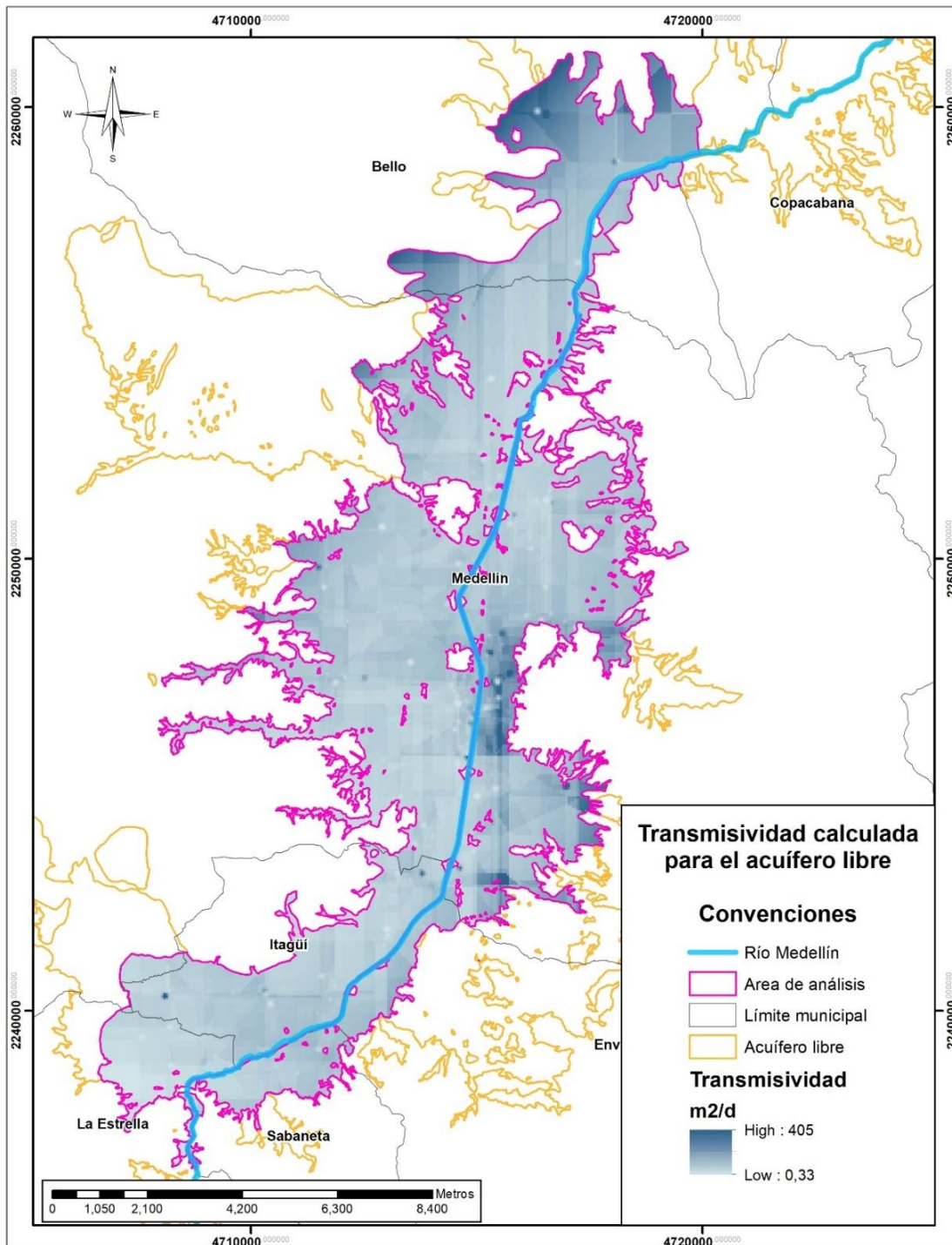


Figura 10 Transmisividad del acuífero libre del valle de Aburrá

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AMVA [18]

5.1.4 Recarga potencial por precipitación

El balance hídrico mensual para la estimación de la recarga directa en el Acuífero Libre del Valle de Aburrá fue calculado en el Plan de Manejo ambiental del Acuífero [18] utilizando el método SWB (Soil Water Balance), en el cual el suelo o la zona no saturada actúa como volumen de control. Este enfoque representa una adaptación del balance propuesto por Thornthwaite y Mather (1955), considerando el suelo como unidad de referencia y permitiendo la estimación de la escorrentía directa y la evapotranspiración real.

La aplicación del balance hídrico se fundamentó en datos provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades o directamente sobre el acuífero, y se realizaron cálculos para distintos escenarios hidrológicos: año húmedo, año seco y año promedio.

Basado en el análisis del índice multivariado ENSO para el período 1996-2016, se identificaron años representativos de las tres condiciones hidrológicas: Año promedio (2003-2004), año húmedo (2008-2009) y año seco (2015-2016).

Este enfoque permitió evaluar la variabilidad de la recarga del acuífero en distintos contextos hidrológicos, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica del sistema.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de recarga potencial, obtenidos para las diferentes estaciones empleadas en el análisis.

Tabla 10 Valores de recarga potencial en el acuífero libre del Valle de Aburrá

ESTACIÓN	RECARGA POTENCIAL / PRECIPITACIÓN	PERÍODO		
		2008-2009 AÑO HÚMEDO	2003-2004 AÑO MEDIO	2015-2016 AÑO SECO
La Cuchilla	Recarga potencial (mm/año)	742,59	417,36	281
La Iguaá	Recarga potencial (mm/año)	1.397,59	903,2	376,3
San Cristóbal	Recarga potencial (mm/año)	1.005,10	401,9	73,5
Olaya Herrera	Recarga potencial (mm/año)	527	194,8	49,1
Caldas	Recarga potencial (mm/año)	2.162,8	1.821,9	509,5
San Antonio	Recarga potencial (mm/año)	1.867,50	1.240,10	324,1
Promedio recarga potencial (mm/año)		1.283,76	829,88	268,92

Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia [18]

El potencial de recarga del acuífero libre del Valle de Aburrá se encuentra comprendido entre 527 mm/año y 2.162,8 mm/año en año húmedo, entre 149,33 mm/año y 1.821,9 mm/año, en año promedio y entre 49,1 mm/año y 509,5 mm/año en año seco. El promedio de la recarga para año húmedo, año promedio y año seco resulta de 1.283,76 mm/año, 829,88 mm/año y 268,92 mm/año, respectivamente.

En el contexto de la implementación de sistemas GWHP, resulta fundamental conocer la recarga potencial del acuífero, dado que estos sistemas requieren la captación de agua subterránea y, aunque esta es posteriormente reinyectada, es deseable que el acuífero cuente con una adecuada recarga natural. Este aspecto es esencial para garantizar un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico subterráneo.

En el caso particular del acuífero libre del Valle de Aburrá, se considera que se cuenta con una recarga potencial suficiente para realizar el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

5.1.5 Temperatura del agua subterránea

Al analizar datos de mediciones in situ de temperatura del agua subterránea [16], fue posible determinar que, en el área del acuífero libre, se han registrado valores de temperatura del agua comprendidos entre 16,50 °C y 30,70 °C, lo cual representa un rango total de temperatura de 14,2 °C (Figura 11).

La temperatura en la superficie del Valle de Aburrá oscila entre los 16 °C y 29°C [18]. De acuerdo con datos de la Red de Monitoreo Ambiental del río Aburrá-Medellín [45] durante el año 2022, la temperatura promedio de la superficie resultó en 22,4 °C.

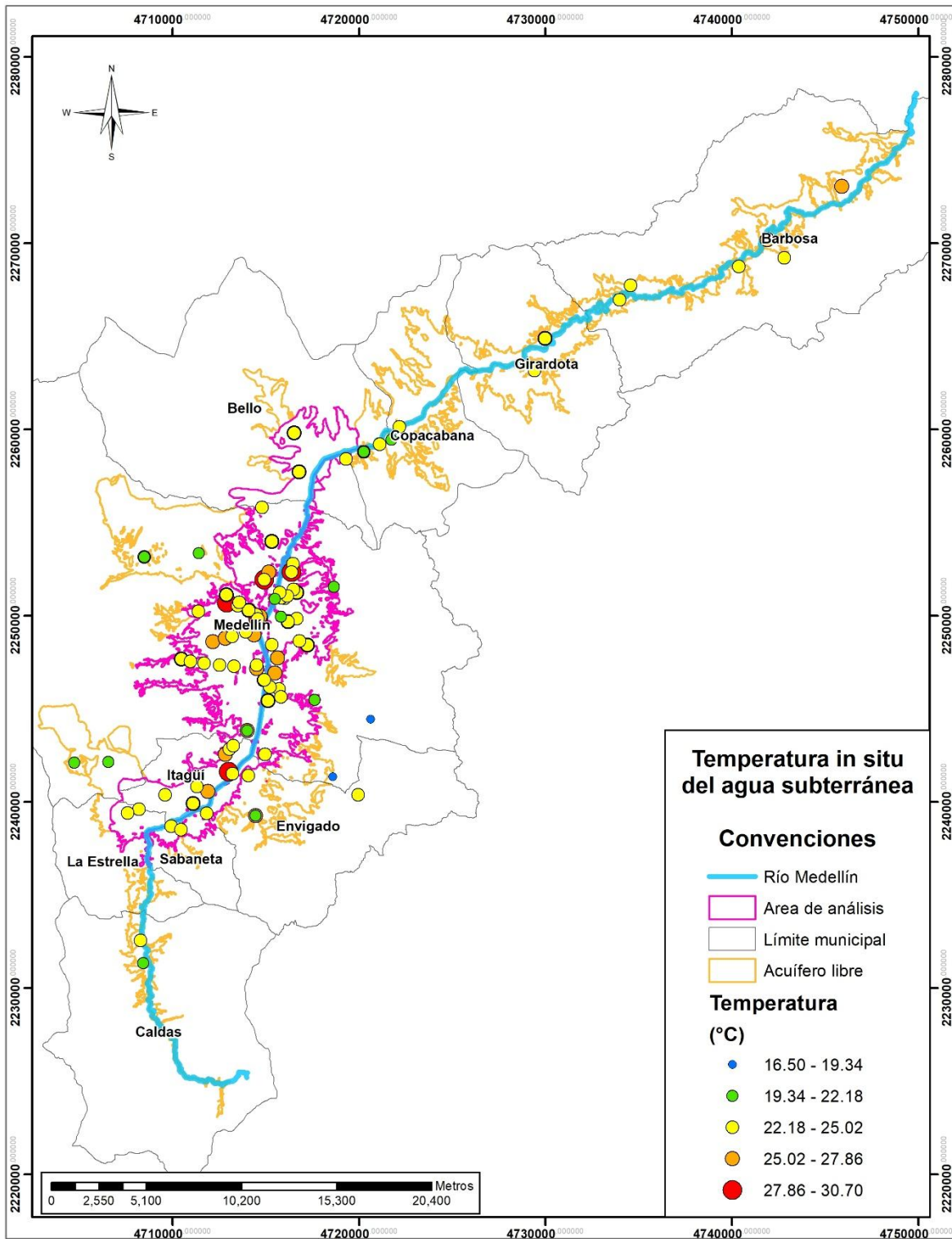


Figura 11 Temperatura in situ agua subterránea del acuífero libre del valle de Aburrá

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AMVA [18]

5.2 Estimación del potencial geotérmico del acuífero

El análisis del modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero del Valle de Aburrá permite contar con los insumos requeridos para estimar su potencial geotérmico. Por un lado, propiedades hidráulicas del acuífero, tales como transmisividad, radio de abatimiento, abatimiento de pozo, permiten determinar el máximo caudal extraíble de agua. El radio de abatimiento fue determinado tomando en cuenta la fórmula de Cooper-Jacob, el abatimiento se determinó a partir de datos conocidos de pruebas de bombeo realizadas en el acuífero libre del Valle de Aburrá.

Los valores establecidos para cálculo del máximo caudal de agua extraíble corresponden a datos de pruebas de bombeo realizadas en el pozo 5 de la empresa Postobón, los cuales en la herramienta QGeoTherTools se consideran constantes para determinar el caudal máximo extraíble en toda el área de análisis (Tabla 11) (Figura 12).

Tabla 11 Valores de parámetros para calcular el caudal máximo extraíble

Parámetro	Valor	Unidad
Radio de abatimiento	161,55	m
Abatimiento	21,45	m
Distancia del abatimiento	1	m

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los datos de temperatura in situ del agua del acuífero permiten establecer una línea base ambiental sobre la variabilidad natural de este parámetro en el acuífero, lo cual permite evaluar la intensidad del efecto que puede tener el delta de temperatura, o salto térmico, establecido; esta propiedad en conjunto con el caudal extraíble de agua permite estimar el potencial geotérmico del acuífero, mediante la aplicación de la ecuación 9. El valor del salto térmico se establece de manera discrecional, tomando en cuenta que en la regulación de países europeos este salto se ha establecido en máximo 7 °C [52]. Los valores establecidos se presentan a continuación (Tabla 12).

Tabla 12 Valores de parámetros para calcular el potencial geotérmico

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad calorífica volumétrica del agua	4.180.000	J/m ³ ·°K
Salto térmico establecido	5	°K

Fuente: Elaboración propia

El potencial geotérmico resultante se presenta en la Figura 13, en la cual se puede observar que los valores resultantes se encuentran entre 2 kW y 2.546 kW. Se aclara que el valor máximo de 2.546 kW, constituye un valor teórico que resulta muy elevado, que no representa el potencial típico del área de análisis, lo cual será discutido más adelante en la Tabla 14 y Figura 15. Los resultados indican que el 56,90% del área de análisis presenta potencial geotérmico en el rango comprendido entre 100 kW y 200 kW, seguido del rango de potencial menor a 100 kW el cual representa el 21,85% del área de análisis; así mismo el 18,50% del área de análisis

presenta un potencial geotérmico comprendido entre 200 kW y 500 kW, finalmente, los valores de potencial geotérmico mayores a 500 kW representan solo el 2,75% del área de análisis.

Tabla 13 Resultados de potencial geotérmico en el área de análisis

Potencial geotérmico (kW)	Área (ha)	% Área
2-100	2.197,75	21,85
100-200	5.724	56,90
200-500	1.860,75	18,50
500-1.000	274,25	2,73
1.000-2.546	2,5	0,02
Total	10.059,25	100

Fuente: Elaboración propia

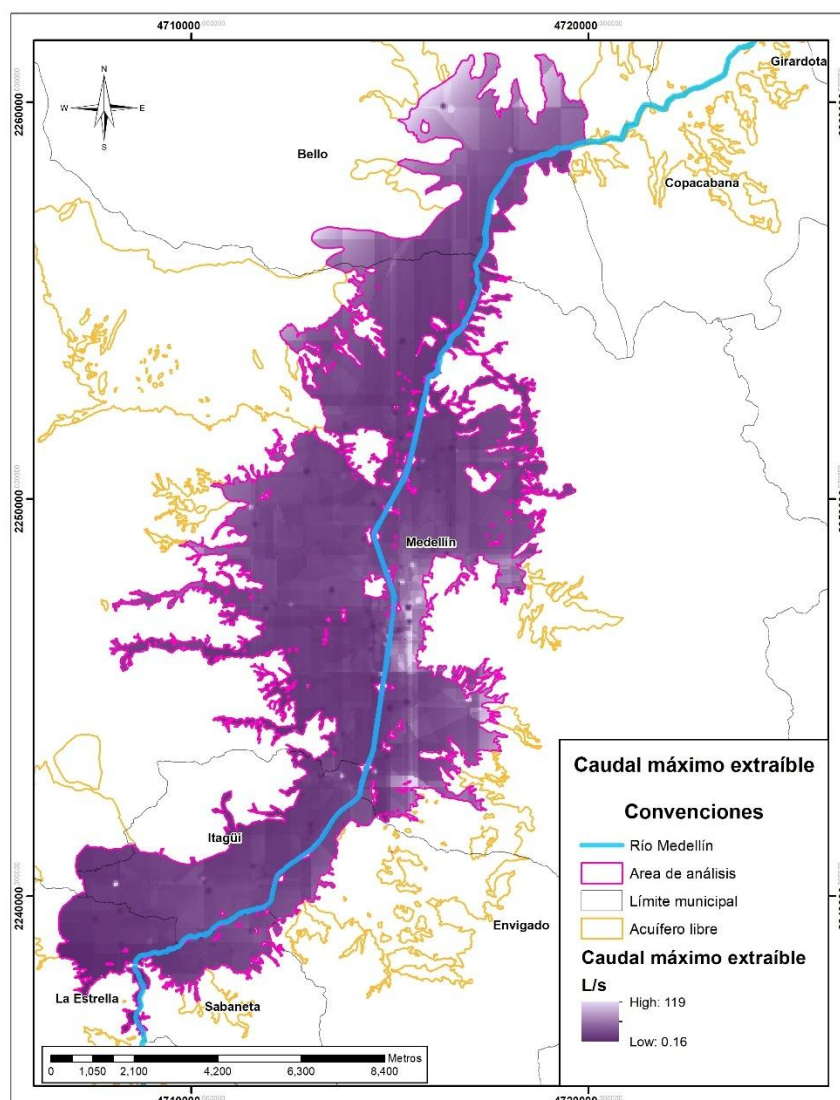


Figura 12 Caudal máximo de agua extraíble

Fuente: Elaboración propia

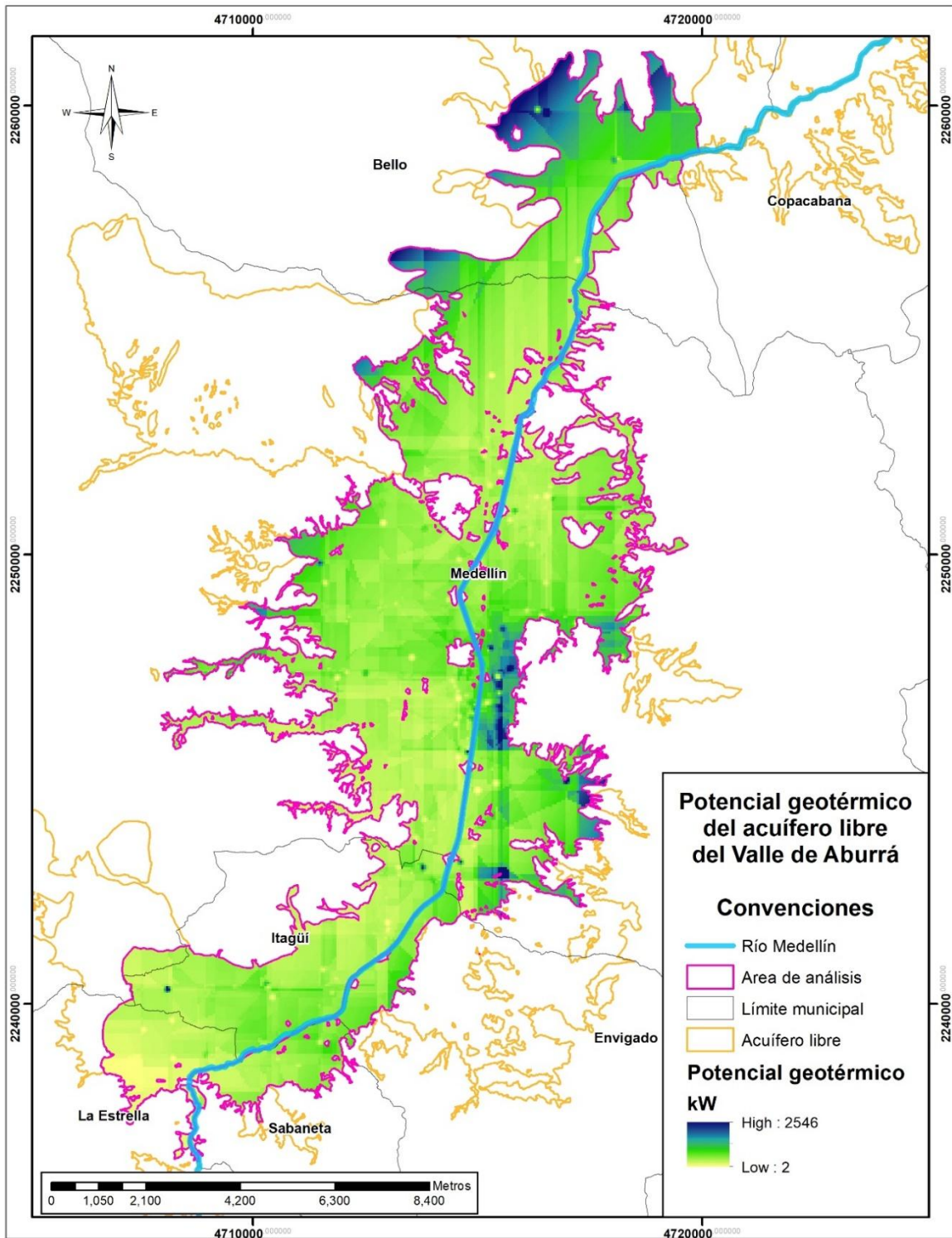


Figura 13 Potencial geotérmico somero

Fuente: Elaboración propia [53]

Con el fin analizar la distribución espacial de los resultados obtenidos, se determinaron dos áreas de control; la primera corresponde con el área de la unidad geológica sobre la cual se ubica el pozo 5 de Postobón, correspondiente a Depósitos Aluviales; la segunda consiste en el radio de abatimiento determinado para el área de análisis (161,55 m), aplicado alrededor del pozo 5 de Postobón (Figura 14).

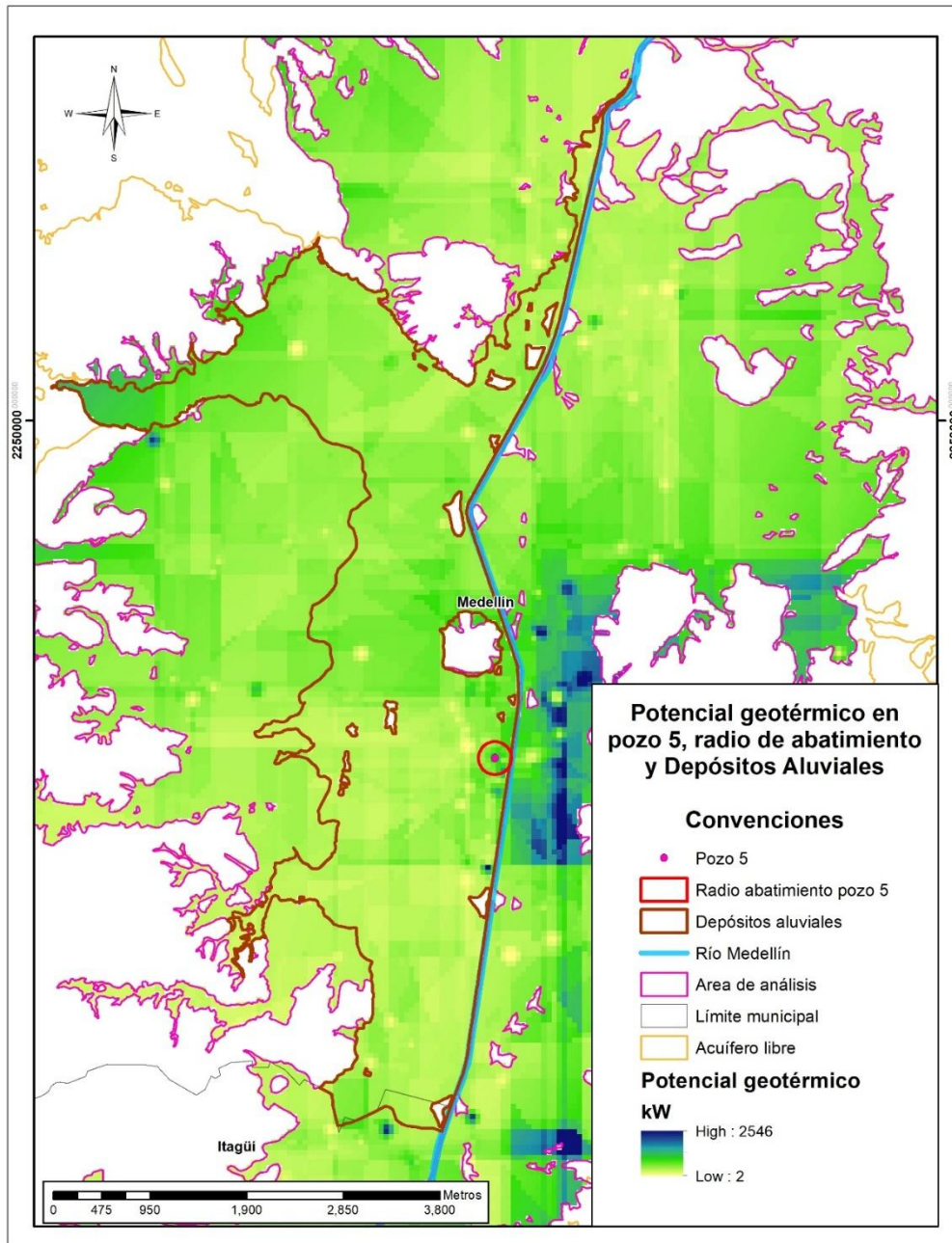


Figura 14 Áreas de control definidas

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los parámetros estadísticos para los resultados obtenidos en el área de análisis y las dos (2) zonas de control definidas (Tabla 14). Es posible observar que el potencial geotérmico en el área de análisis presenta un valor medio de 170,12 kW y una mediana de 140,74 kW, además que el 75% de los datos presentan valores iguales o menores a 186,4 kW. Por otro lado, se observa que en el área de la unidad Depósitos Aluviales, sobre la que se ubica el pozo 5 de Postobón, presenta un valor medio de 130,56 kW y una mediana de 125,51 kW, además que el 75% de los datos presentan valores iguales o menores a 151,44 kW. Finalmente, el área del radio de abatimiento presenta un valor medio de 200,27 kW y una mediana de 196,43 kW, además que el 75% de los datos presentan valores iguales o menores a 233,54 kW.

Tabla 14 Resultados de potencial geotérmico en zonas de control

Zona	Potencial geotérmico (kW)			Cuartiles (kW)		
	Mínimo	Máximo	Media	Q1	Q2	Q3
Totalidad del área de análisis (10.059 ha)	2,01	2546,33	170,12	104,54	140,74	186,40
Área de unidad geológica de la zona de pozo 5 de Postobón (Depósitos Aluviales)	2,07	746,78	130,56	93,85	125,51	151,44
Radio de abatimiento pozo 5	122,65	452,51	200,27	153,17	196,43	233,54

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se pueden observar gráficamente mediante los diagramas de cajas y bigotes del área total de análisis (Figura 15), polígono de los Depósitos Aluviales (Figura 16) y polígono del radio de abatimiento en la zona del pozo 5 (Figura 17).

Potencial geotérmico área total de análisis

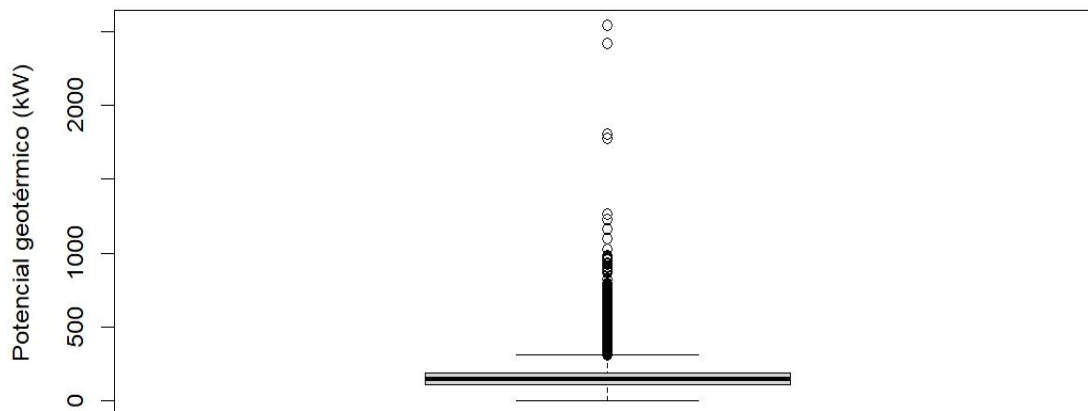


Figura 15 Diagrama de cajas y bigotes área total de análisis

Fuente: Elaboración propia

Potencial geotérmico Depósitos Aluviales

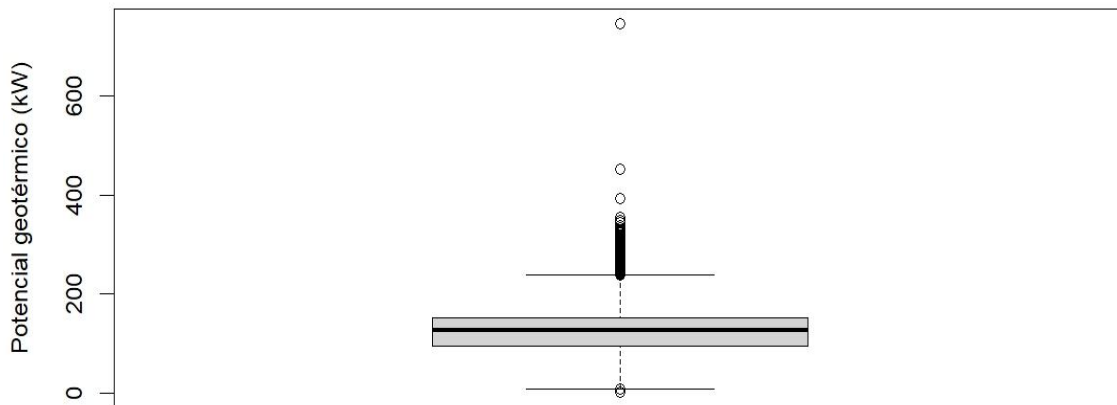


Figura 16 Diagrama de cajas y bigotes área de Depósitos Aluviales

Fuente: Elaboración propia

Potencial geotérmico radio de abatimiento pozo

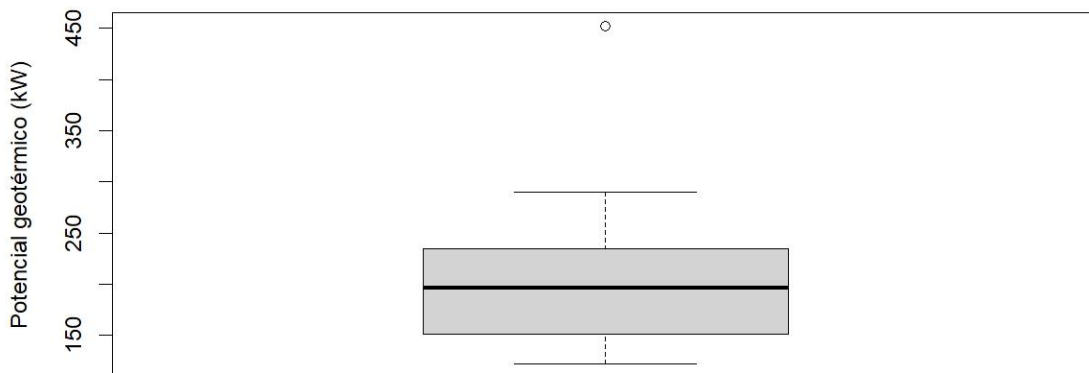


Figura 17 Diagrama de cajas y bigotes área radio de abatimiento pozo 5

Fuente: Elaboración propia

En el área de análisis, el mapa de potencial geotérmico incluye un total de 40.237 datos. De acuerdo con el diagrama de cajas y bigotes, el 75% de ellos (30.177) presentan un potencial geotérmico igual o inferior a 186,40 kW.

En el caso específico del área correspondiente a la unidad geológica del pozo 5 (Depósitos Aluviales), se registraron 5.680 datos, de los cuales el 75% (4.260) muestran un potencial geotérmico igual o inferior a 151,44 kW.

Finalmente, en el área delimitada por el radio de abatimiento del pozo 5, se registran 32 datos, y el análisis indica que el 75% de estos (24) presentan un potencial geotérmico igual o inferior a 233,54 kW.

Se puede observar que en el área de análisis se presenta una alta dispersión en los valores de potencial geotérmico, lo cual se debe al comportamiento del parámetro hidráulico de transmisividad del acuífero. Sin embargo, al disminuir la extensión del área en consideración, la dispersión de los datos de potencial geotérmico disminuye, lo cual indica que a medida que el área de análisis se hace menos extensa los resultados demuestran mayor concentración. Lo anterior se puede explicar por la compleja heterogeneidad geológica del área de análisis, lo cual define las características hidrogeológicas y los valores de la variable de transmisividad, la cual a su vez determina el potencial geotérmico.

Los resultados permiten establecer que, según el mapa de potencial geotérmico obtenido, el pozo 5 posee la capacidad de suministrar un mayor caudal de agua que el registrado en la prueba de bombeo conocida, lo que se traduce en un mayor potencial geotérmico aprovechable.

5.3 Propuesta de implementación de un sistema GWHP en un pozo de agua existente (Uso industrial), para el aprovechamiento del recurso geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá

A partir de la información hidráulica de pozos existentes en las instalaciones de la planta de Postobón de la ciudad de Medellín, el cual corresponde a la red de monitoreo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se plantea el cálculo de: las cargas térmicas que se podrían proporcionar a un edificio, el área máxima a climatizar y la bomba de calor que se podría emplear de acuerdo con las condiciones determinadas.

Las características de los pozos existentes en la planta de Postobón se presentan a continuación (Tabla 15).

Tabla 15 Pozos existentes en la planta de Postobón

ID	Profundidad (m)	Caudal (L/s)	Abatimiento (m)	Transmisividad (m ² /d)
Pozo 1	22,6	0,52	15,09	1,23
Pozo 2	25,6	2,09	11,06	68,84
Pozo 3	22,8	1,97	5,05	14,93
Pozo 4	31,4	2,9	13,04	66,87
Pozo 5	36	3,8	20,72	43,14
Pozo 6	40	1,8	21,45	16,38

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [51]

El punto definido como pozo de captación de agua subterránea para el sistema GWHP es el Pozo 5, el cual fue seleccionado tomando en cuenta su transmisividad, su profundidad y su localización. El pozo 5 se ubica aguas arriba del pozo inyector, su transmisividad es alta con respecto al resto de pozos de Postobón y su profundidad es similar a la del pozo inyector. Los datos del Pozo 5, empleados para el cálculo del sistema GWHP, se presentan a continuación (Tabla 16).

Tabla 16 Datos del Pozo 5

Caudal conocido de prueba de bombeo (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Profundidad (m)	Transmisividad (m ² /d)
3,8	0,0038	36	43,14

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el pozo definido como pozo inyector corresponde al Pozo 4, el cual fue seleccionado tomando en cuenta su transmisividad, su profundidad y su localización. El pozo 4 se ubica aguas abajo del pozo de captación, su transmisividad es la más alta con respecto al resto de pozos de Postobón y su profundidad es similar a la del pozo inyector, con lo cual se garantiza que el pozo cuenta con características favorables para almacenar y transmitir el caudal reinyectado. Los datos del Pozo 4 se presentan a continuación (Tabla 16).

Tabla 17 Datos del Pozo 4

Caudal conocido de prueba de bombeo (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Profundidad (m)	Transmisividad (m ² /d)
2,9	0,0029	31,4	66,87

Fuente: Elaboración propia

Las cargas térmicas que se pueden transferir al edificio se calculan a continuación en las ecuaciones (14) y (15).

$$q_{suelo} = Q \cdot \Delta T \cdot C_v \quad (14)$$

$$q_{suelo} = 0,0038 \frac{m^3}{s} \Delta 5^\circ K \cdot 4.180.000 \text{ J/m}^3/^\circ K = 79.420 \text{ W}$$

Donde,

q_{suelo} : Potencial del suelo (W)

Q= Caudal (m³/s)

ΔT = Delta de temperatura ($^{\circ}\text{K}$)

Cv : Capacidad calorífica volumétrica del agua ($\text{J}/\text{m}^3/^{\circ}\text{K}$)

El valor de q_{suelo} obtenido en este caso corresponde a un dato puntual, calculado a partir del caudal registrado en una prueba de bombeo realizada en el pozo 5. Sin embargo, dicho caudal no necesariamente representa el máximo caudal que se puede extraer del pozo, ya que este depende tanto de las características de la bomba instalada como de las propiedades hidráulicas del acuífero. En contraste con el cálculo analítico de potencial geotérmico del suelo (q_{suelo}), el mapa de potencial geotérmico presentado en este estudio representa una mejor aproximación debido a que toma en cuenta la transmisividad, parámetro que representa mejor las capacidades hidráulicas del acuífero y permite obtener su caudal máximo extraíble de manera confiable (Tabla 14).

$$q_{\text{edificio}} = \frac{q_{\text{suelo}}}{\frac{\text{COP}_{\text{cooling}} + 1}{\text{COP}_{\text{cooling}}}} \quad (15)$$
$$q_{\text{edificio}} = \frac{79.420 \text{ W}}{\frac{4,5 + 1}{4,5}} = 64.980 \text{ W}$$

Donde,

q_{edificio} : Cargas térmicas a transferir al edificio (W)

q_{suelo} : Potencial del suelo (W)

$\text{COP}_{\text{cooling}}$ = Coeficiente de rendimiento (adimensional)

A partir del valor de carga térmica que se puede aportar al edificio se calcula el área que se podría climatizar, como indica en las ecuaciones (16) y (17).

$$q_{\text{edificio(cooling)}} = A \cdot SB \cdot Pc \quad (16)$$

$$A = \frac{q_{\text{edificio}}}{0,5 \cdot 0,168} \quad (17)$$
$$A = \frac{q_{\text{edificio}}}{0,5 \cdot 0,168} = 773 \text{ m}^2$$

Donde,

A: Área edificio (m^2)

SB: Porcentaje del edificio que requiere una refrigeración efectiva (%)

SB (Para edificio de oficinas): 50% [49] (Valor estimado por el autor, como área efectiva la edificación que requiere climatización)

Pc: Factor de energía requerida según clima (BTU/h.m²); BTU/h = kW

Pc (Para Medellín): 0,161 – 0,175 [49]

Tomando en cuenta las cargas térmicas del edificio calculadas, se propone el uso de una bomba de calor apta para sistemas GWHP, cuyas características se presentan a continuación (Tabla 18) y (Figura 18). Esta bomba de calor permite el funcionamiento en cascada de hasta seis (6) equipos; además permite implementar la alimentación de energía a través de un sistema híbrido con energía solar fotovoltaica [50].

Tabla 18 Características de la bomba de calor propuesta

Marca	Modelo	Lugar de instalación	Sistema de captación	Potencia térmica (cooling)	COP (cooling)	Consumo máximo de energía	Cantidad de bombas en cascada que permite
Ecoforest	ecoGEO+ HP 20-85	Interior	Geotérmico /Freático	21,4 – 73,7 kW	4,5	16,3 kW	6

Fuente: Ecoforest [50]



Figura 18 Bomba de calor ecoGEO+ HP 20-85

Fuente: Ecoforest [50]

La bomba de calor propuesta permite generar una potencia térmica de hasta 73,7 kW, lo que implica que en el pozo 5, con un caudal de bombeo de 3,8 L/s, sería suficiente la instalación de una sola unidad. No obstante, dado que el acuífero puede

suministrar un caudal mayor y, en consecuencia, alcanzar una mayor potencia térmica, se consideró un escenario en el que se busca generar 196,43 kW, valor equivalente a la mediana de la potencia geotérmica estimada en el área comprendida dentro del radio de abatimiento del pozo 5. En este caso, sería necesaria la instalación de tres (3) bombas de calor en cascada, lo que permitiría alcanzar una capacidad conjunta de hasta 221 kW de potencia térmica.

5.4 Guía de recomendaciones para el aprovechamiento del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá, mediante un sistema GWHP

A continuación, se presentan una serie de consideraciones y recomendaciones orientadas a establecer buenas prácticas técnicas y ambientales para la implementación de sistemas GWHP en el Valle de Aburrá. Este conjunto de lineamientos también puede servir como referencia para su aplicación en otras regiones del país que dispongan de un conocimiento hidrogeológico suficiente.

5.4.1 Consideraciones ambientales, técnicas y de regulación

5.4.1.1 Posibles impactos sobre la temperatura natural del agua subterránea.

El efecto térmico que producen los sistemas de bomba de calor geotérmica, ya sean de circuito abierto o cerrado, está determinado fundamentalmente por las cargas térmicas del edificio y no tanto por la tipología del sistema. En los circuitos abiertos, la carga térmica se transfiere directamente al agua subterránea, mientras que en los circuitos cerrados los acuíferos interceptados actúan como sumideros preferenciales de calor, contribuyendo a mitigar el impacto térmico a largo plazo. Gracias al flujo natural de los acuíferos, aunque este puede ser de unos pocos metros hasta decenas de metros al día, el calor se disipa hacia los materiales circundantes, reduciendo efectos acumulativos [31].

En los sistemas GWHP, la restricción ambiental más relevante corresponde a la generación de una zona de afectación térmica (TAZ por su nombre en inglés Thermally Affected Zone) en los acuíferos, fenómeno que puede manifestarse incluso en periodos de operación correspondientes a días [54].

Durante el funcionamiento de un sistema GWHP, la temperatura del acuífero se puede ver modificada por la formación de plumas de calor o de frío, aguas arriba y aguas abajo del pozo inyector, lo cual puede producir interferencias en el régimen térmico natural del subsuelo. El área y forma de la pluma de contaminación térmica depende de factores como el gradiente hidráulico y la velocidad de Darcy, Para prevenir impactos sobre otros sistemas geotérmicos cercanos, se requiere una adecuada predicción de la extensión y comportamiento de la TAZ [55].

5.4.1.2 Posibles impactos sobre la oferta del recurso hídrico.

Los sistemas antiguos GWHP que descargaban el agua en superficie implicaban un consumo neto del recurso hídrico subterráneo y podían ocasionar impactos negativos sobre su oferta [31]. La reinyección del agua en el mismo acuífero de

extracción constituye una práctica esencial para garantizar la sostenibilidad del recurso. Esta medida previene el agotamiento del acuífero, la pérdida de presión y la ocurrencia de asentamientos diferenciales en el terreno [54].

5.4.1.3 Aspectos técnicos de los sistemas GWHP

El funcionamiento de los sistemas GWHP está condicionado por diversos factores. Entre ellos se destacan las cargas térmicas del edificio para calefacción y refrigeración, el diseño y la eficiencia de los componentes de la bomba de calor, así como las características hidrogeológicas del acuífero, incluyendo su temperatura natural, la conductividad térmica y el comportamiento hidráulico de las formaciones [54].

Los sistemas GWHP pueden enfrentar problemas asociados con la formación de incrustaciones y la obstrucción de tuberías, aspectos que requieren consideraciones técnicas y de mantenimiento adecuadas para asegurar la eficiencia del sistema [56].

5.4.1.4 Marco regulatorio

En Colombia se han registrado avances significativos en el marco regulatorio relacionado con la geotermia. La Ley 1715 de 2014 regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, incluyendo la energía geotérmica. Posteriormente, la Ley 2099 de 2021 introdujo disposiciones orientadas a la transición energética, la dinamización del mercado y la reactivación económica del país. En desarrollo de este marco legal, el Decreto 1318 de 2022 reglamentó los artículos 21 y 21-1 de la Ley 1715 de 2014, en lo referente a la generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos. Dicho decreto define los usos directos como el aprovechamiento del calor de los recursos geotérmicos para aplicaciones distintas de la generación eléctrica, precisando que estos no requieren permisos de exploración y explotación, aunque deben cumplir con la normativa ambiental vigente.

Más recientemente, el Decreto 1598 de 2024 modificó el Decreto 1073 de 2015, introduciendo una redefinición de los usos directos como aquellas aplicaciones de los recursos geotérmicos destinadas a fines distintos de la generación eléctrica, capaces de generar valor en otros sectores productivos, constituyendo así una alternativa eficiente y sostenible de aprovechamiento. Bajo esta definición se enmarcarían los sistemas GWHP; no obstante, el decreto no hace referencia explícita al uso de bombas de calor. Asimismo, establece que el Ministerio de Minas y Energía será la entidad encargada de definir lineamientos y procedimientos simplificados para la explotación, aprovechamiento y gestión de los recursos geotérmicos con fines energéticos distintos a la generación de electricidad.

En el contexto regulatorio colombiano, la Resolución 40302 de 2022 del Ministerio de Minas y Energía establece los lineamientos técnicos asociados al Registro Geotérmico y a los permisos de exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de generación eléctrica. Esta normativa precisa los requisitos para el desarrollo de actividades geotérmicas, incluyendo los criterios de diseño, operación

e integridad de pozos, así como las obligaciones de información y seguimiento técnico. Si bien su ámbito se orienta principalmente a proyectos de generación eléctrica, constituye un referente normativo relevante para el aprovechamiento ordenado y seguro del recurso geotérmico en el país, aportando un marco de soporte para iniciativas que involucren el uso energético de acuíferos, como los sistemas GWHP.

Desde la perspectiva ambiental, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) emitió en 2022 los Términos de Referencia TdR-019 para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en proyectos de exploración de fuentes de energía geotérmica con fines de generación eléctrica. Sin embargo, estos términos de referencia no contemplan lineamientos para aplicaciones de usos directos ni para sistemas de bomba de calor.

En este contexto, se hace evidente la necesidad de recurrir a normativas y guías internacionales que orienten la evaluación ambiental y técnica de los sistemas de bomba de calor geotérmica, en particular los sistemas GWHP, a fin de garantizar su implementación sostenible en el país.

5.4.1.5 Marcos normativos de referencia

En Estados Unidos, en general, los GWHP son una alternativa permitida y viable. La regulación suele basarse en criterios como caudal máximo por pozo, espaciamiento y función de las perforaciones. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) incluye de forma explícita a los pozos de inyección geotérmica dentro de la normativa de control de inyección subterránea, y en varios estados las normas aplicables a los sistemas GWHP provienen de las regulaciones tradicionales sobre pozos de agua [31].

Los países que han alcanzado un mayor grado de avance en el desarrollo de estas tecnologías pertenecen, en su mayoría, a la Unión Europea. Este bloque ha formulado diversas políticas en el ámbito energético, entre las que se destaca el Marco de Clima y Energía 2030, orientado a fortalecer la competitividad, la seguridad y la sostenibilidad tanto de la economía como del sistema energético europeo. Dicho marco establece metas específicas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, fomenta la ampliación del uso de fuentes renovables y plantea un esquema renovado de gobernanza acompañado de indicadores de seguimiento del desempeño [57].

Entre los estados con normas para GWHP, Italia posee una trayectoria consolidada en el aprovechamiento de la energía geotérmica y cuenta con normas específicas para sistemas GWHP, como se describe a continuación [52].

- En el norte del país, las condiciones hidrogeológicas han favorecido la implementación predominante de sistemas de circuito abierto GWHP, los cuales requieren autorización provincial para las actividades de perforación, extracción y reinyección de agua subterránea. No obstante, su instalación se prohíbe en áreas de protección hídrica y se limita a acuíferos someros no destinados al consumo humano.

- En cuanto a los aspectos espaciales, la normativa establece distancias mínimas entre las instalaciones y los elementos del entorno construido o natural. Generalmente, se exige una separación de al menos 2 m respecto a edificaciones colindantes y límites de propiedad, aunque en Lombardía la distancia mínima se amplía a 4 m. Las guías del Piamonte establecen criterios más estrictos, como mantener entre 8 y 10 m de separación entre los intercambiadores geotérmicos, 5 m respecto a cimientos de edificaciones, 2 m frente a árboles de gran porte y 1 m en relación con redes de servicios públicos. Cabe destacar que los requerimientos técnicos en Italia se presentan principalmente como recomendaciones en guías, más que como regulaciones obligatorias.
- El proceso de autorización contempla criterios adicionales, tales como limitar a 7 °C la diferencia máxima de temperatura entre el pozo de captación y el pozo inyector y presentar un estudio predictivo de la pluma térmica durante el primer año de operación. A fin de evitar alteraciones en los niveles piezométricos, se promueve la reinyección en el mismo acuífero de origen. Además, existen lineamientos nacionales para el diseño y la instalación, dentro de los cuales se incluye el entubado de los primeros 5 m de perforación y la verificación de la hermeticidad del circuito. Estas medidas se aplican de manera obligatoria en regiones como Lombardía y Véneto.
- En materia constructiva, la normativa exige prácticas orientadas a la protección ambiental, tales como el sellado con concreto del espacio anular de las perforaciones, con un espesor mínimo de 30 mm, dejando expuesto únicamente el tramo correspondiente al acuífero somero. La sustitución de la bentonita por concreto debe efectuarse desde el fondo mediante un conducto especializado, con el fin de evitar conexiones hidráulicas entre diferentes acuíferos y prevenir posibles contaminaciones.

5.4.2 Recomendaciones y buenas prácticas

A continuación, se presentan recomendaciones y buenas prácticas orientadas al aprovechamiento del potencial geotérmico somero mediante sistemas de bomba de calor. Dichas propuestas se fundamentan, en parte, en los resultados obtenidos en la presente investigación y en el criterio de experto, complementándose con aportes documentados por diversos autores referenciados.

5.4.2.1 Caracterización del acuífero

- Caracterizar las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio, determinando el tipo de unidad, profundidad, nivel freático y piezométrico, extensión y grado de confinamiento.
- Realizar pruebas de bombeo y recuperación en la unidad hidrogeológica de interés del sistema GWHP, con el fin de obtener parámetros específicos tales como: caudal, conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- Calcular el radio de abatimiento del pozo propuesto para captación del agua subterránea.

- Determinar la dirección de flujo del agua subterránea.
- Realizar monitoreo de parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, temperatura, sólidos disueltos totales, dureza cálcica, alcalinidad total, calcio, carbonato, bicarbonato, sodio, magnesio, potasio, sulfato y cloruro.
- Calcular el índice de saturación de Langelier y el índice de estabilidad de Ryznar. El índice de Langelier corresponde a un indicador de saturación del carbonato de calcio, empleado para evaluar si un agua presenta tendencia a la incrustación o a la corrosión. Su determinación requiere la medición del pH del agua y la estimación del pH de saturación, el cual se obtiene a partir de los parámetros como alcalinidad total, dureza, sólidos disueltos totales y temperatura. Por otro lado, el índice de Ryznar, el cual se fundamenta igualmente en el pH de saturación del carbonato de calcio, permite estimar con mayor precisión no solo la tendencia, sino también la magnitud de los procesos de incrustación o corrosión en el agua [58].
- Se recomienda que las instituciones científicas y ambientales del país, promuevan la caracterización de los parámetros térmicos del subsuelo mediante la aplicación de test de respuesta térmica (TRT).
- Considerar como fuente de información los estudios hidrogeológicos desarrollados por la autoridad ambiental regional o instituciones nacionales.

5.4.2.2 Oferta del recurso hídrico subterráneo

- Analizar el potencial de recarga del acuífero.
- Realizar el inventario de puntos de agua subterránea en el área correspondiente al radio de abatimiento calculado para el pozo propuesto como pozo de captación, incluyendo datos de coordenadas, tipo de punto hidrogeológico, materiales, profundidad de la estructura y diseño mecánico, en caso de contar con este, profundidad del nivel freático, caudal captado y unidad hidrogeológica captada. Para el inventario de puntos de agua subterránea, en Colombia, se recomienda el uso del Formulario Único Nacional para Inventario de Puntos de Agua Subterránea [59].
- Realizar análisis de usos y usuarios del agua subterránea.

5.4.2.3 Diseño de sistemas GWHP

- Definir el valor de la diferencia de temperatura (ΔT) permitida entre el agua del acuífero captada y el agua a la salida del sistema GWHP a ser reinyectada. Para realizar esta definición, se debe dimensionar la variabilidad natural de la temperatura del acuífero a partir de datos in situ de temperatura del agua subterránea. Se recomienda un $\Delta T < 7 \text{ }^\circ\text{C}$ [52].
- Ubicar el pozo inyector aguas abajo del pozo de captación, teniendo en cuenta la dirección de flujo del agua subterránea.
- Los pozos de captación y de reinyección deben ubicarse a una distancia superior a la distancia crítica, con el fin de evitar procesos de interferencia

hidráulica y térmica que puedan comprometer la eficiencia y sostenibilidad del sistema GWHP.

La distancia crítica entre pozos se define como aquella separación mínima a partir de la cual, aun ubicándose el pozo de reinyección aguas abajo del pozo de captación, puede producirse interferencia térmica entre ambos. En este escenario, el flujo de agua reinyectada con una temperatura modificada alcanzaría el pozo de captación, comprometiendo la eficiencia operativa del sistema GWHP [26].

Para calcular la distancia crítica, se emplea la fórmula presentada por Banks [26] en la ecuación (18):

$$L_c = \frac{2 \cdot Q}{T \cdot \pi \cdot i} \quad (18)$$

Donde,

L_c : Distancia crítica (m)

Q: Caudal (m³/d)

T: Transmisividad (m²/d)

i: Gradiente hidráulico (adimensional)

Para evitar una interferencia térmica entre el pozo de inyección y el pozo de captación se debe cumplir la expresión (19).

$$L > L_c \quad (19)$$

Donde,

L: Distancia establecida entre pozos (m)

L_c : Distancia crítica (m)

- Calcular el tiempo de avance del frente hidráulico entre el pozo inyector y el pozo de captación.

El tiempo de avance del frente hidráulico se define como el periodo necesario para que el agua reinyectada alcance el pozo de captación. Este proceso puede comprometer la eficiencia del sistema GWHP, en la medida en que supondría la pérdida de su objetivo principal: garantizar la disponibilidad de agua subterránea fresca proveniente del acuífero [26].

En caso de que el gradiente hidráulico natural se pueda considerar nulo, como puede ocurrir en zonas llanas, se puede aplicar la ecuación (20).

$$t_{hyd} = \pi \cdot n_e \cdot D \cdot \frac{L^2}{3 \cdot Q} \quad (20)$$

Donde,

t_{hyd} : Tiempo de avance del frente hidráulico (días)

L: Distancia establecida entre pozos (m)

n_e : porosidad efectiva

D: Espesor del acuífero (m)

Q: Caudal de bombeo (m^3/d)

En caso de existencia de gradiente hidráulico natural, se puede aplicar la ecuación (21). El valor de β se calcula mediante la fórmula de la ecuación (22).

$$t_{hyd} = \frac{L \cdot n_e}{K \cdot i} \cdot \left[\frac{\beta}{\sqrt{\beta - 1}} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta - 1}} \right) - 1 \right] \quad (21)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot Q}{T \cdot \pi \cdot i \cdot L} \quad (22)$$

Donde,

t_{hyd} : Tiempo de avance del frente hidráulico (días)

L: Distancia establecida entre pozos (m)

n_e : porosidad efectiva (adimensional o m^3/m^3)

K: Conductividad hidráulica (m/d)

i: Gradiente hidráulico (adimensional)

Q: Caudal de bombeo (m^3/d)

T: Transmisividad (m^2/d)

- Calcular el tiempo de avance del frente térmico entre el pozo inyector y el pozo de captación.

El tiempo de avance del frente térmico se define como el periodo necesario para que la temperatura del agua reinyectada alcance el pozo de captación. El avance del frente térmico presenta un rezago respecto al avance hidráulico. Así mismo, este puede comprometer la eficiencia del sistema GWHP, debido a que conlleva a la pérdida del objetivo principal: disponer de agua subterránea a una temperatura determinada y adecuada para su aprovechamiento [26].

En caso de que el gradiente hidráulico natural se pueda considerar nulo, se puede aplicar la ecuación (23):

$$t_{the} = \pi \cdot D \cdot \frac{C_{aq} \cdot L^2}{3 \cdot C_w \cdot Q} \quad (23)$$

Donde,

t_{the} : Tiempo de avance del frente térmico (días)

L: Distancia establecida entre pozos (m)

C_{aq} : Capacidad calorífica volumétrica de la litología del acuífero ($J/m^3 \cdot K$)

C_w : Capacidad calorífica volumétrica del agua subterránea ($J/m^3 \cdot K$)

D: Espesor del acuífero (m)

Q: Caudal de bombeo (m^3/d)

En caso de existencia de gradiente hidráulico natural, se puede aplicar la ecuación (24). El valor de β se calcula mediante la fórmula de la ecuación (25):

$$t_{the} = \frac{L \cdot C_{aq}}{C_w \cdot K \cdot i} \cdot \left[\frac{\beta}{\sqrt{\beta - 1}} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta - 1}} \right) - 1 \right] \quad (24)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot Q}{T \cdot \pi \cdot i \cdot L} \quad (25)$$

Donde,

t_{the} : Tiempo de avance del frente térmico (días)

L: Distancia establecida entre pozos (m)

K: Conductividad hidráulica (m/d)

i: Gradiente hidráulico (adimensional)

Q: Caudal de bombeo (m^3/d)

T: Transmisividad (m^2/d)

C_{aq} : Capacidad calorífica volumétrica de la litología del acuífero ($J/m^3 \cdot K$)

C_w : Capacidad calorífica volumétrica del agua subterránea ($J/m^3 \cdot K$)

La transferencia de calor en un acuífero no ocurre únicamente a través del agua subterránea contenida en el espacio poroso, sino también mediante su absorción por la matriz mineral. Este proceso genera una desaceleración en el avance de la señal térmica respecto al flujo hidráulico. La proporción entre ambos tiempos de tránsito se conoce como factor de retardo térmico R_{the} , como se presenta en la ecuación (26):

$$R_{the} = \frac{t_{the}}{t_{hyd}} \quad (26)$$

Además, el factor de retardo térmico se puede calcular mediante la ecuación (27):

$$R_{the} = \frac{C_{aq}}{C_w \cdot n_e} \quad (27)$$

Donde,

R_{the} = Factor de retardo térmico (adimensional)

t_{the} = Tiempo de avance el frente térmico (días)

t_{hyd} = Tiempo de avance el frente hidráulico (días)

n_e : porosidad efectiva (adimensional o m^3/m^3)

C_{aq} : Capacidad calorífica volumétrica de la litología del acuífero ($J/m^3 \cdot K$)

C_w : Capacidad calorífica volumétrica del agua subterránea ($J/m^3 \cdot K$)

5.4.2.4 Modelación y herramientas de apoyo

- Elaborar modelo hidrogeológico numérico de flujo, con el fin de determinar la dirección de flujo y abatimientos en software especializado.
- Elaborar modelo hidrogeológico de transferencia de calor en software especializado.

De acuerdo con [54], en Italia, las autoridades locales suelen exigir la aplicación de modelos numéricos complejos en sistemas GWHP para analizar las perturbaciones térmicas de manera específica en cada caso. Esta práctica permite optimizar la planificación y el aprovechamiento de las plantas de intercambio geotérmico en contextos hidrogeológicos complejos. Para este fin, se dispone de diversos códigos numéricos que simulan el transporte de calor en aguas subterráneas, entre los que destacan MODFLOW-2000, FEFLOW, HST3D, SEAWAT y TOUGH2.

En la última década, la literatura científica italiana ha evidenciado un amplio uso de herramientas como FEFLOW y MT3DMS, en combinación con MODFLOW, para el desarrollo de modelos en escalas local y regional. Dichos modelos han permitido establecer estrategias de gestión que describen los cambios en acuíferos someros inducidos por la operación de sistemas GWHP y, además, facilitan la comprensión

de cómo estos impactos pueden mitigarse en función de las condiciones geológicas del subsuelo.

Cuando se reinyecta agua en un acuífero, se genera una pluma térmica cuya extensión y forma dependen de las características hidrogeológicas, de las condiciones de operación y de las necesidades de calefacción o refrigeración del sistema. La evaluación de diferentes esquemas horarios de operación diaria se presenta como una medida eficaz para reducir la retroalimentación térmica entre pozos de extracción e inyección, evitando pérdidas de eficiencia y rentabilidad en el sistema.

6 CONCLUSIONES

La estimación del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá constituye un insumo fundamental para la planificación y gestión del recurso hídrico subterráneo con fines energéticos. Este análisis permite delimitar las áreas con mayor factibilidad para la implementación de sistemas GWHP, ofreciendo una alternativa sostenible para la climatización de edificaciones. Además, su aplicación contribuye a la optimización del consumo energético y a la disminución de la dependencia de fuentes convencionales, en concordancia con los objetivos de mitigación del cambio climático en la región.

En la actualidad, el acuífero libre del Valle de Aburrá dispone de pozos de captación destinados principalmente a uso industrial, los cuales representan una oportunidad para ser evaluados en el marco de una posible implementación de sistemas GWHP. La factibilidad de dichos sistemas está condicionada por múltiples factores, entre los que se destacan la temperatura del agua subterránea, las propiedades hidráulicas del acuífero, el diseño y operación de los pozos existentes, así como las necesidades térmicas específicas de los usuarios.

La metodología aplicada en el presente estudio resulta replicable en otros sistemas acuíferos que cuenten con información hidrogeológica disponible. Así mismo, la actualización continua de los datos hidrogeológicos y térmicos constituye un elemento fundamental para incrementar la precisión en la estimación del potencial geotérmico de un acuífero y, en consecuencia, optimizar su aprovechamiento.

La articulación de estudios hidrogeológicos con análisis térmicos constituye un elemento clave para el diseño de estrategias orientadas al aprovechamiento sostenible de los recursos geotérmicos someros, fomentando a su vez la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático.

Los resultados obtenidos evidencian que el potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá presenta una marcada heterogeneidad espacial, asociada principalmente a la variabilidad en la transmisividad del sistema acuífero. No obstante, al focalizar el análisis en áreas más específicas, dicha variabilidad tiende a disminuir, lo que permite identificar condiciones más representativas y confiables del recurso. El análisis estadístico y cartográfico reveló que, si bien los valores se distribuyen en un rango amplio (2 kW a 2.546 kW), la mayor parte del área de estudio concentra su potencial entre 100 kW y 200 kW, con un valor predominante igual o inferior a 186,40 kW en el 75% de los datos. Estos hallazgos permiten comprender la influencia de las propiedades hidrogeológicas en la estimación del recurso y constituyen un insumo fundamental para la planificación del aprovechamiento energético a escala local.

En particular, la evaluación realizada en el pozo 5 de la empresa Postobón confirma que este presenta un potencial geotérmico superior al estimado analíticamente a partir de registros previos de pruebas de bombeo, lo que evidencia su viabilidad para el aprovechamiento mediante sistemas GWHP. Estos hallazgos constituyen un insumo valioso para la estimación del potencial energético del acuífero y aportan

elementos técnicos que respaldan la factibilidad de desarrollar proyectos piloto en la zona de estudio.

La selección de sitios específicos para la implementación de sistemas GWHP resulta clave, ya que un pozo bien ubicado puede superar significativamente los valores típicos de potencial geotérmico de su entorno.

El ejercicio de diseño aproximado realizado a partir de datos reales del acuífero libre del Valle de Aburrá permitió demostrar la factibilidad de implementar un sistema GWHP en condiciones locales. La caracterización hidráulica de los pozos de captación e inyección evidenció que el acuífero tiene la capacidad de sostener un caudal adecuado para climatizar edificaciones, garantizando un funcionamiento estable y eficiente del sistema. Estos resultados validan el potencial de la hidrogeología del Valle de Aburrá para soportar soluciones energéticas innovadoras basadas en la geotermia somera.

Este trabajo marca un precedente en Colombia al proponer, por primera vez, una guía de recomendaciones para la implementación de sistemas GWHP. Los resultados permiten no solo orientar la aplicación local de esta tecnología, sino también abrir el camino hacia su replicabilidad en otras regiones del país. De esta manera, se aporta al avance del conocimiento técnico, a la transición energética y a la incorporación de alternativas sostenibles en el sector energético nacional. Además, la guía representa un paso hacia la regulación de sistemas GWHP por parte de autoridades ambientales nacionales y regionales.

7 REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, «Acción por el Clima,» 16 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>.
- [2] Foro Económico Mundial, «Climate Action,» 10 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://es.weforum.org/agenda/2022/11/he-aqui-por-que-la-creciente-demanda-de-energia-es-un-punto-ciego-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/>.
- [3] M. Acosta, K. Correar, F. G. M. Morales, X. Soto y H. Hernández, «Estado del arte sobre los principales indicadores de consumo en el Sector Hotelero,» *Investigación y Desarrollo en TIC*, pp. 1-13, 2020.
- [4] Banco Interamericano de Desarrollo, «Energía para el futuro,» 17 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://blogs.iadb.org/energia/es/america-latina-y-el-caribe-pueden-mitigar-el-cambio-climatico-aprovechando-su-eficiencia-energetica/>.
- [5] FINDETER, «Planear el Territorio,» 17 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.findeter.gov.co/blog/planear-el-territorio/eficiencia-energetica-y-energias-renovables>.
- [6] Bolsa Mercantil de de Colombia, «Demanda de energía en Colombia creció 4,8% en marzo de 2022,» 17 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.bmcbec.com.co/publicaciones/posts/noticias/noticias/demanda-de-energia-en-colombia-crecio-48-en-marzo-de-2022>.
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Colombia hacia la COP 21,» 17 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/convencion-marco-de-naciones-unidas-para-el-cambio-climatico-cmnucc/colombia-hacia-la-cop-21-cop-22>.
- [8] D. Ürge-Vorsatz y B. Metz, «Energy efficiency: how far does it get us in controlling climate change?,» *Energy efficiency*, vol. 2, pp. 87-94, 2009.
- [9] J. Lund, «Direct Heat Utilization of Geothermal Resources Worldwide,» de *Power Stations Using Locally Available Energy Sources*, New York, Springer, 2018, pp. 297-325.
- [10] D. Milenic, P. Vasiljevic y A. Vranjes, «Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal,» *Energy and buildings*, pp. 649-657, 2010.

- [11] A. García, E. Garrido, M. Mejías y J. Santamarta, *Shallow geothermal energy: Theory and Application*, Cham, Suiza: Springer Hydrogeology, 2022.
- [12] S. Taqwim, N. Miryani y A. Ashat, «Mesuring the potential benefits of geothermal cooling and heating applications in Indonesia,» *Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition*, 2013.
- [13] J. Lund y A. Toth, «Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review,» *Geothermics*, p. Vol. 90, 2021.
- [14] C. Sáez, I. Martín, N. Nuño, M. Maté, F. Arturo y D. González, «Evaluation of different methodologies for calculating the energy demand,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments 60 (2023) 103528*, 2023.
- [15] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, «Eficiencia energética,» 18 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/eficiencia-energetica.aspx>.
- [16] CAF Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe, «12 medidas para la lograr la eficiencia energética de Colombia,» 25 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2016/10/12-medidas-para-la-lograr-la-eficiencia-energetica-de-colombia/>.
- [17] V. Tellez, «El Colombiano,» 12 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.elcolombiano.com/medellin/los-barrios-de-medellin-mas-afectados-por-islas-de-calor-ID22128725>. [Último acceso: 5 Octubre 2024].
- [18] Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia, «Formulación del Plan de Manejo Ambiental de Acuífero del Valle de Aburrá,» AMVA, Medellín, 2018.
- [19] I. S. Moeck, «Catalog of geothermal play types based on geologic controls,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 37, pp. 867-882, 2014.
- [20] I. Stober y K. Bucher, *Geothermal Energy, from theoretical models to exploration and development*, Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland, 2021.
- [21] F. Gutiérrez, D. Blessent y F. Rivas, «Prototype for a shallow geothermal installation for the air conditioning of spaces at a Colombian University,» *DYNA*, pp. 1-7, 2023.
- [22] B. Sanner, «Shallow Geothermal Energy,» *Geo-Heat Center Bulletin*, pp. 19-25, 2001.

- [23] A. Vieira, M. Alberdi-Pagola, P. Christodoulides, S. Javed, F. Loveridge, F. Nguyen y F. Cecinato, «Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications,» *Energies*, pp. 1-51, 2017.
- [24] S. Düber, R. Fuentes y N. Guillermo, «Exploiting heat gains along horizontal connection pipes in existing borehole heat exchanger fields,» *Geothermics*, n° 118, pp. 1-12, 2024.
- [25] A. Manzella, A. Alansdottir y A. Pellizzone, *Geothermal energy and society*, Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2019.
- [26] D. Banks, *An introduction to thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.
- [27] L. Pekař, «Introduction to heat exchangers,» de *Advanced Analytic and Control Techniques for Thermal Systems with Heat Exchangers*, Academic Press, 2020, pp. 3-20.
- [28] S. Lines, M. Llano-Serna y D. Williams, «Analysis of groundwater advection and ground-heat exchanger spacing on intermittent ground-source heat pump operation,» *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, vol. 0, pp. 19-26, 2018.
- [29] S. Lu y S. Feng, «Comprehensive overview of numerical modeling of coupled landfill processes,» *Waste management*, n° 118, pp. 161-179, 2020.
- [30] K. Rafferty, «An information survival kit for the prospective geothermal heat pump owner,» Geo-Heat Center-U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2001.
- [31] S. Kavanaugh y K. Rafferty, «Geothermal Heating and Cooling Design of Ground-Source Heat Pump Systems,» ASHRAE, Atlanta, 2014.
- [32] M. Villafán-Sierra, D. Blessent, J. Lopez-Sanchez, C. Arrieta-Gonzalez y M. Gonzalez-Palacio, «Feasibility of shallow geothermal installations for cooling purposes in tropical climate,» *Congress on Research, Development, and Innovation in Renewable Energies*, pp. 131-138, 2024.
- [33] F. Stauffer, P. Bayer, P. Blum, N. Molina-Giraldo y W. Kinzelbach, *Thermal use of shallow groundwater*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [34] T. Betancur, *Las aguas subterráneas en el departamento de Antioquia*, Medellín: Universidad de Antioquia, 2023.

- [35] B. Bastidas, Estudio hidrogeológico de los sistemas acuíferos del Valle de Aburrá (Antioquia - Colombia), Medellín: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea - FCIHS, 2017.
- [36] S. Patiño, M. Jaramillo, C. Espinoza y M. Arias, «Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America,» *Journal of South American Earth Sciences*, nº 112, pp. 1-12, 2021.
- [37] D. Martinez, B. Ebenhack y T. Wagner, *Energy Efficiency: Concepts and Calculations*, Elsevier, 2019.
- [38] A. Vranjes, D. Milenic y P. Dokmanovic, «Geothermal concept for energy efficient improvement of space heating and cooling in highly urbanized area,» *Thermal Science*, pp. 857-864, 2015.
- [39] M. Alcaraz, A. Garcia-Gil, E. Vásquez-Suñé y V. Velasco, «Advection and dispersion heat transport mechanisms in the quantification of shallow geothermal resources and associated environmental impacts,» *Science of the Total Environment*, pp. 536-546, 2016.
- [40] M. Alcaraz, «Manual para cálculo del potencial geotérmico somero con QGeoTherTools en QGIS,» Share Alike 4.0 International, Buenos Aires, 2016.
- [41] M. Alcaraz, E. Vásquez-Suñé, M. Pleitavino, L. Sheiber, O. Rivera y D. Blessent, «Ibero-American Atlas of Shallow Geothermal Energy by RIGS-CYTED,» RIGS-CYTED, Madrid, 2019.
- [42] A. García-Gil, C. Abesser, S. Gasco, M. Marazuela, J. Lázaro, E. Vázquez-Suñé, A. Hughes y M. Mejías, «Defining the exploitation patterns of groundwater heat pump systems,» *Science of the total environment*, pp. 1-12, 2020.
- [43] F. Böttcher, A. Casasso, G. Götzl y K. Zosseder, «TAP - Thermal aquifer Potential: A quantitative method to assess the,» *Renewable Energy*, pp. 85-95, 2019.
- [44] S. Halilovic, F. Böttcher, K. Zosseder y T. Hamacher, «Spatial analysis of thermal groundwater use based on optimal sizing and placement of well doublets,» *Energy*, pp. 1-11, 2024.
- [45] Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia, «Aunar esfuerzos para la Gestión Integral Del Recurso Hídrico Superficial Y Subterráneo, en el marco de la operación de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá – Medellín,» Red Río, Medellín, 2022.

- [46] CORANTIOQUIA, «Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Aburrá,» AMVA, Medellín, 2018.
- [47] Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Hidrogeología: conceptos básicos de hidrología subterránea, Barcelona: Comisión docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea, 2009.
- [48] Esri, «Introducción a Geostatistical Analyst en ArcGIS Pro,» [En línea]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.3/help/analysis/geostatistical-analyst/get-started-with-geostatistical-analyst-in-arcgis-pro.htm>. [Último acceso: 12 Abril 2025].
- [49] J. Ríos-Ocampo, Y. Olaya, A. Osorio, D. Henao, R. Smith y S. Arango-Aramburo, «Thermal districts in Colombia: Developing a methodology to estimate the cooling potential demand,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, pp. 1-7, 2022.
- [50] Ecoforest, «Ecoforest: Bombas de calor geotérmicas,» Ecoforest, 2025. [En línea]. Available: <https://ecoforest.com/es/bomba-de-calor/geotermia/>. [Último acceso: 23 Agosto 2025].
- [51] E. H. y Ambientales, «Informe Legalización de Pozos Gaseosas Lux S.A.,» Gaseosas Lux, Medellín, 2003.
- [52] K. Tsagarakis, L. Efthymiou, A. Michopoulos, A. Mavragani, A. Anđelković, F. Antolini, M. Bacic, D. Bajare, M. Baralis, W. Bogusz, S. Burlon, J. Figueira, M. Genç, S. Javed, A. Jurelionis, K. Koca, G. Rzyżyński, J. Urchueguia y B. Žlender, «A review of the legal framework in shallow geothermal energy in selected European countries: Need for guidelines,» *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 2256-2571, 2018.
- [53] L. Escalona y D. Blessent, «Análisis del potencial geotérmico del acuífero libre del Valle de Aburrá,» de *Memorias 7ª Reunión Nacional de Geotermia*, Bogotá, 2025.
- [54] M. Gizzi, F. Vagnon, G. Taddia y S. Lo Russo, «A Review of Groundwater Heat Pump Systems in the Italian Framework: Technological Potential and Environmental Limits,» *Energies*, n° 16, 2023.
- [55] B. Piga, A. Casasso, F. Pace, A. Godio y R. Sethi, «Thermal Impact Assessment of Groundwater Heat Pumps (GWHPs): Rigorous vs. Simplified Models,» *Energies*, vol. 10, n° 9, pp. 1-19, 2017.

- [56] S. Gjengedal, R. Ramstad, B. Hilmo y B. Frengstad, «Fouling and clogging surveillance in open loop GSHP systems,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 79, pp. 69-82, 2020.
- [57] F. Gutierrez, «Propuesta de instalación geotérmica somera a partir de bombas de calor para la climatización de espacios en la Universidad EIA (Trabajo de grado),» Universidad EIA, Envigado, 2021.
- [58] The Metro Group Inc., «The Metro Handbook of water treatment for HVAC systems,» New York, 2011.
- [59] IDEAM, «Aguas Subterráneas,» 31 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Aguas-subterr%C3%A1neas>. [Último acceso: 7 Septiembre 2025].
- [60] D. Vargas, «Geotermia de baja entalpía a partir de aguas asociada a la de producción crudo de un campo petrolero en la cuenca colombiana de los Llanos Orientales,» Universidad del Rosario [Tesis de Maestría], Bogotá, 2022.
- [61] J. Zuleta, «Acuíferos del Aburrá: ¿1.000 pozos son el alivio de una posible sequía?,» 5 Octubre 2024. [En línea]. Available: <https://www.elcolombiano.com/medellin/acuiferos-de-medellin-respuesta-a-sequia-NE25560184>.