

Análisis de las aguas termales en la cuenca alta del río Chinchiná y su relación con la variabilidad climática y la salud humana

Analysis of thermal waters in the upper Chinchiná River basin and their relationship with climate variability and human health

PhD(c). Ángela María Alzate Alvarez ¹, MSc. Erika Juliana Aldana Arcila ¹,
María del Mar Guerra Hurtado ¹, Silvana Castaño Largo ¹

¹ Universidad Católica de Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Programa de Ingeniería Ambiental.

E-mail: {aalzate, ealdana, mariadelmar.guerra, silvana.castano}@ucm.edu.co

Cómo citar: Alzate Alvarez, A. M., Aldana Arcila, E. J., Guerra Hurtado, M. del M., & Castaño Largo, S. (2025). Análisis de las aguas termales en la cuenca alta del río Chinchiná y su relación con la variabilidad climática y la salud humana. *Ingeniería, Sostenibilidad Y Sociedad*, 1(6), 45–56. <https://doi.org/10.24054/iss.v1i6.4413>

Editorial: Universidad de Pamplona.

Recibido: 01/04/2025

Aprobado: 01/10/2025

Publicado: 14/11/2025



Resumen: Este estudio tuvo como objetivo caracterizar fisicoquímicamente las aguas termales localizadas en el flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, así como analizar su comportamiento espacial y temporal en relación con la variabilidad climática del área de estudio. Para ello, se desarrolló una investigación de enfoque mixto que integró revisión documental, campañas de muestreo in situ y análisis de laboratorio, complementados con herramientas estadísticas y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados evidencian que los parámetros fisicoquímicos no presentan cambios significativos con el paso de los años ni debido a las variaciones en los patrones climáticos, asimismo se muestra como el otorgamiento del 100% en las fuentes termales para uso recreativo puede resultar en un aspecto insostenible a largo plazo. Estos hallazgos aportan elementos técnicos para la gestión, el monitoreo y el fortalecimiento del marco normativo asociado a las aguas termales en Colombia.

Palabras clave: Aguas termales, variabilidad climática, salud humana, geología médica.

Abstract: The objective of this study was to characterize the physicochemical properties of the hot springs located on the northwest flank of the Nevado del Ruiz volcano, as well as to analyze their spatial and temporal behavior in relation to climate variability in the study area. To this end, a mixed-method research approach was developed that integrated documentary review, in situ sampling campaigns, and laboratory analysis, complemented by statistical tools and Geographic Information Systems (GIS). The results show that the physicochemical parameters do not change significantly over the years or due to variations in climatic patterns. They also show that granting 100% of thermal waters for recreational use may be unsustainable in the long term. These findings provide technical elements for the management, monitoring, and strengthening of the regulatory framework associated with thermal waters in Colombia.

Keywords: Hot springs, climate variability, human health, medical geology.

1. INTRODUCCIÓN

La principal fuente de las aguas subterráneas es la infiltración de agua lluvia. La mineralización y la temperatura de las aguas termales se deben a la circulación de estas aguas a diversas profundidades, donde interactúan con materiales del basamento más calientes, generando movimientos convectivos (Pinuaga Espejel, 1992); dando paso a aguas ricas en minerales y elementos químicos que están estrechamente relacionados con la medicina natural.

Según Rangel Montoya et al., (2015), la interacción entre los minerales, el agua y la salud, se convierte en una clave para evolucionar en áreas de estudio que trabajan la relación ambiente-ser humano, un ejemplo de esto es la geología médica, “*ciencia que relaciona diferentes factores presentes en los ecosistemas, con su efecto en la salud humana*” (SGC, 2023).

Por otro lado, la variabilidad climática tiene un rol decisivo dentro de los procesos naturales, un fenómeno que puede tener repercusiones tanto positivas como negativas en el ciclo hidrológico. En esta investigación se explora cómo este factor puede tener incidencias significativas en las aguas termales, en términos de cambio de temperatura, así como la composición química del agua y su disponibilidad.

Hasta el momento en Colombia, no existe una normativa que defina los estándares de calidad o las medidas de control y seguimiento ante el uso de aguas hidrotermales, que eviten efectos adversos en la salud, contaminación o alteración de las propiedades (Molina Carvajal et al., 2023). En la actualidad, en el departamento de Caldas se concede el 100% del recurso termal y se entrega bajo estándares de fuentes superficiales, lo cual demuestra la carencia de una estructura legal que

acoja este recurso y ayude a las autoridades ambientales a facilitar sus procesos.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la composición fisicoquímica y el comportamiento espacial y temporal de las aguas termales del flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, con el fin de aportar evidencia técnica que contribuya a su adecuada gestión ambiental y a la discusión normativa asociada a este recurso.

2. AGUAS HIDROTERMALES

En el presente estudio, el término *aguas termales* se refiere a aquellas aguas subterráneas cuya temperatura es superior a la media anual del lugar de emergencia, mientras que el concepto de *aguas hidrotermales* se emplea para enfatizar su origen profundo y su interacción con sistemas geotérmicos, procesos de circulación subterránea y la transferencia de calor desde formaciones geológicas activas.



Figura 1. Registro fotográfico visita de reconocimiento de fuentes termales.
(Fuente: Elaboración propia, 2025)

Los factores climatológicos, hidrogeológicos, geológicos, antrópicos y químicos son los causantes de dar la composición química a las aguas naturales, por medio de la precipitación, la percolación y el contacto de rocas de diferente composición (García, 2006).

En cuanto al criterio de clasificación para las aguas termales, se pueden adoptar diferentes perspectivas: física, química, fisicoquímica, bacteriológica, entre otras; sin embargo, el enfoque más aceptado a nivel global se basa en la mineralización predominante y las propiedades especiales, dando lugar a categorías como aguas sulfuradas, cloruradas, sulfatadas, ferruginosas, bicarbonatadas, carbónicas, radioactivas y oligominerales (Maxe Malca, 2015).

3. ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA ALTA DEL RÍO CHINCHINÁ, FLANCO NOROCCIDENTAL DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

La cuenca alta del río Chinchiná se localiza en el centro de la región cafetera de Colombia, en estrecha relación con el Volcán Nevado del Ruiz (VNR), ambos elementos intrínsecamente vinculados desde el punto de vista geográfico y ecológico. El río Chinchiná nace en la Laguna Negra del páramo de Letras y, de acuerdo con Bedoya Paniagua (2016), el 14 % de su cuenca se encuentra bajo la jurisdicción del Parque Nacional los Nevados (PNNN), específicamente en su zona de amortiguamiento, la cual cumple un papel clave en la provisión de diversos servicios ecosistémicos estratégicos para la región.

Este territorio mantiene una relación estrecha con el Volcán Nevado del Ruiz (VNR), cuya dinámica geológica y volcánica condiciona la presencia de sistemas hidrotermales asociados. Las fuentes termales analizadas en esta investigación se localizan en el flanco noroccidental del VNR, sector caracterizado por la emergencia de manantiales termales vinculados a

estructuras geológicas activas y a procesos de circulación profunda del agua. La selección de esta zona responde a criterios de accesibilidad, a las propiedades fisicoquímicas de las fuentes y al interés que estas representan para las autoridades ambientales, particularmente Corpocaldas, en el marco de la gestión y monitoreo del recurso hídrico termal.

La zona geotérmica de Villamaría-Termal, ubicada en el flanco noroccidental del VNR, posee relevancia geotérmica, debido a la composición del agua y los gases presentes en sus manantiales de aguas ácidas sulfatadas, como el Hotel Termal del Ruiz, Quebrada Agua Caliente y Río Azufrado (Botero-Gómez et al., 2018).

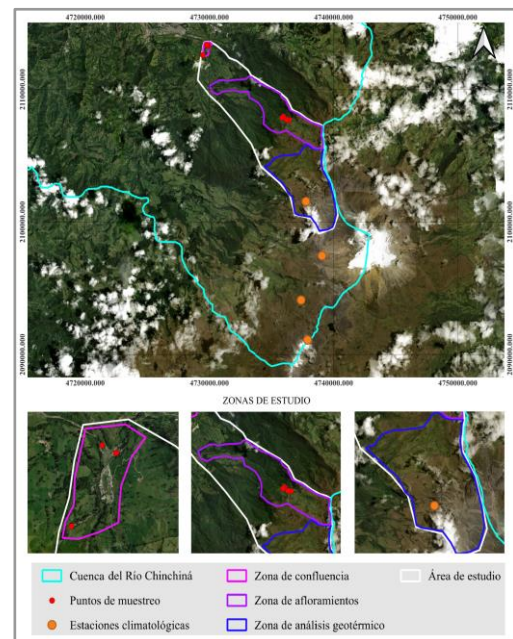


Figura 2. Área de estudio y zonas de análisis.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Acerca del comportamiento y dinámica del recurso relacionado a la falla Villamaría-Termal, se entiende que el sistema hidrotermal en el cráter del VNR, posee la existencia de una envoltura extensa bifásica (vapor y salmuera) rodeando el sistema magmático que proporciona el ambiente para una intensa interacción fluido-roca que promueve la conversión de los fluidos inicialmente ácidos y oxidantes, del sistema magmático, a

fluidos neutros y reductores, del sistema hidrotermal (Alfaro Valero et al., 2020). Una capa selladora hidrotermal recubre la zona bifásica, impidiendo la liberación del exceso de presión y promoviendo un gradiente geotérmico elevado. Fluidos notablemente inmaduros, emergen en la parte superior del edificio volcánico, donde se encuentra el Hotel Termales del Ruiz.

El área de estudio y las distintas zonas de análisis se definieron a partir de la localización de las fuentes termales de interés y de los objetivos de la investigación. En este sentido, se establecieron tres zonas diferenciadas: (i) una zona de confluencia, orientada a determinar el estado de las fuentes superficiales al mezclarse con los vertimientos de aguas termales provenientes de los balnearios; (ii) una zona de afloramientos, donde se concentra la mayoría de los manantiales a caracterizar, entre los cuales destaca el ubicado en el Hotel Termales del Ruiz; y (iii) una zona de análisis geotérmico, en la que se busca establecer la conexión entre las fuentes termales y el sistema geotérmico asociado al Volcán Nevado del Ruiz (VNR).

4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para esta investigación se fundamenta en un enfoque integral que combina la revisión documental, el trabajo de campo y el análisis espacial. Se estructura en tres fases principales explicadas a continuación:

4.1 Recopilación de datos e información

Para realizar un levantamiento de información secundaria, se optó por un enfoque multidisciplinario, integrando conocimientos de diversas áreas, como las propiedades de las fuentes termales, sus posibles efectos en la salud humana y su vínculo con la variabilidad climática.

Por otro lado, se recopiló información secundaria de carácter climatológico e hidrogeológico, obtenida a partir de

estaciones meteorológicas del IDEAM y bases de datos internacionales, con series temporales comprendidas entre 2013 y 2023.

4.2 Diseño de campaña de muestreo

Con el propósito de comprender a fondo la composición y comportamiento de las aguas termales de interés, se planteó una etapa de muestreo en campo que permitió obtener datos precisos, actuales y representativos. Esta campaña definió los parámetros físico-químicos actuales en distintos manantiales, evaluando su recorrido cuenca abajo.

Como se muestra en la figura 3, se seleccionaron 9 puntos de muestreo, correspondientes a afloramientos termales, zonas de confluencia y cuerpos de agua superficial, definidos con base en criterios de accesibilidad, representatividad y relevancia ambiental.

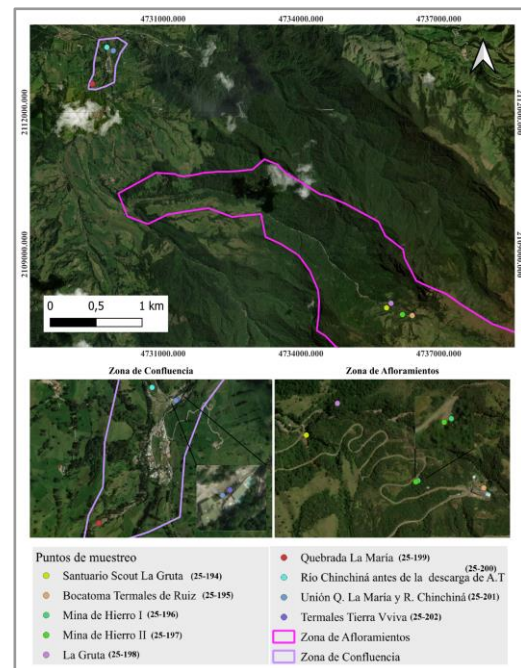


Figura 3. Puntos de muestreo.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

4.3 Generación de gráficos y conclusiones

En esta fase se realizó un análisis espacial y temporal de la información recolectada durante el estudio,

mediante el uso de herramientas estadísticas, métodos de interpolación espacial simple a través de promedios, implementados en entornos SIG, con el fin de identificar patrones espaciales en las variables analizadas. Este enfoque permitió identificar patrones, cambios y comportamientos relevantes asociados tanto a las aguas termales como a la variabilidad climática en el área de estudio. Como etapa final, se formularon conclusiones orientadas a ampliar la comprensión científica de estos sistemas y a aportar elementos de referencia para el fortalecimiento del conocimiento y la legislación relacionada con las aguas termales.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de datos climatológicos y variabilidad climática

En esta fase se identificaron las estaciones hidrometeorológicas con información relevante de precipitación y temperatura promedio para el área de estudio. A través de la plataforma SIMAC (Sistema Integrado de Monitoreo de Caldas) se revisaron las estaciones geográficamente aptas para la investigación y, de manera complementaria, en el CDIAC de la Universidad Nacional de Colombia se descargaron los datos de indicadores climatológicos asociados a cada estación. Como se muestra en la figura 4, se seleccionaron cuatro estaciones consideradas ideales para el análisis: Quebrada Molinos, Quebrada Nereidas, Río Claro y Santa Isabel, con series correspondientes a un periodo de 10 años (2013–2023), lo que permitió analizar los efectos de la variabilidad climática y sus posibles implicaciones en el comportamiento de las fuentes termales.

La selección de estas estaciones se realizó con base en criterios orientados a asegurar su representatividad y utilidad analítica, considerando: (i) proximidad al área de estudio, (ii) tiempo de funcionamiento acorde con el periodo requerido, (iii) disponibilidad de datos multianuales, (iv) densidad de datos, y (v) variables registradas por

cada estación. La localización espacial de las estaciones y su relación con el área de estudio se presentan en la figura 4, evidenciando su pertinencia para la caracterización climática de la zona de alta montaña analizada.

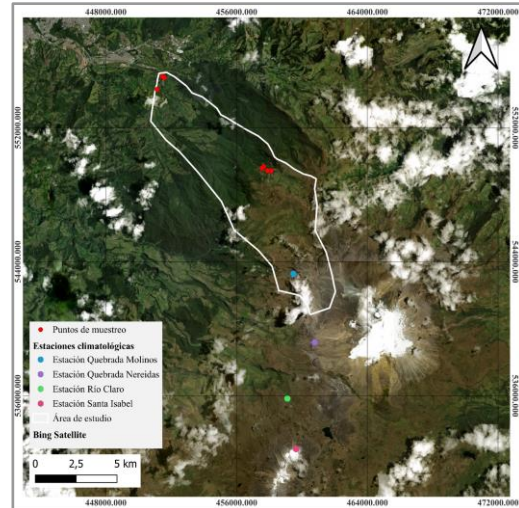


Figura 4. Ubicación estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Una vez obtenidos los registros, se identificaron limitaciones importantes para el análisis, principalmente vacíos extensos de información, dado que en las bases de datos se presentan múltiples meses con valores en cero o campos vacíos. Por esta razón, se realizó un proceso de depuración, eliminando periodos anuales que no presentaran suficientes datos mensuales (por ejemplo, con más de seis meses faltantes) o en los cuales no fuese posible reconocer una tendencia que permitiera aplicar una interpolación simple mediante promedios con años anteriores y posteriores. A partir de esta revisión, se analizaron las tendencias mensuales a lo largo del periodo 2013–2023, identificando patrones coherentes con la dinámica climática de la región Andina, caracterizada por un régimen bimodal, cuyos resultados se sintetizan en la figura 5.

Con la información depurada, se elaboró un mapa de isoyetas que representa el comportamiento espacial de la precipitación con base en las cuatro estaciones seleccionadas. Como se observa en la figura 5, los puntos de

muestreo más próximos a las estaciones, correspondientes en su mayoría a fuentes termales, evidencian una precipitación reducida durante el periodo analizado, mientras que los puntos más alejados, entre los cuales se incluyen tres fuentes superficiales, presentan mayor influencia de las lluvias registradas por la estación Río Claro. Si bien el mapa se construyó exclusivamente a partir de las estaciones seleccionadas, la figura 5 permite una aproximación válida para interpretar la distribución espacial de la precipitación y su posible incidencia sobre el comportamiento de las aguas termales en el área de estudio.

Al obtener los datos de las estaciones, se observaron ciertas problemáticas para su análisis, como grandes vacíos de información, ya que las bases de datos tienen múltiples meses con valores cero o espacios vacíos; por tal motivo se hizo una limpieza inicial, eliminando los periodos anuales que no presentaran los suficientes datos mensuales (mayor a 6 meses faltantes), o no se lograra percibir una tendencia para ejecutar una interpolación simple a través de promedios con años anteriores y posteriores; para esto fue necesario identificar los periodos anuales completos, los que poseen vacíos y aquellos que presentan similitudes de comportamiento con años previos o posteriores. A partir de esta revisión, se analizaron las tendencias mensuales a lo largo de los años, lo cual permitió establecer patrones. Este proceso se complementa con el conocimiento de la dinámica climática de la región Andina, caracterizada por un régimen bimodal. Ya con la información correctamente depurada y analizada, se obtiene como resultado un Mapa de Isoyeta, que refleja el comportamiento de la precipitación a partir de las 4 estaciones y cómo estas influyen en los puntos de muestreo.

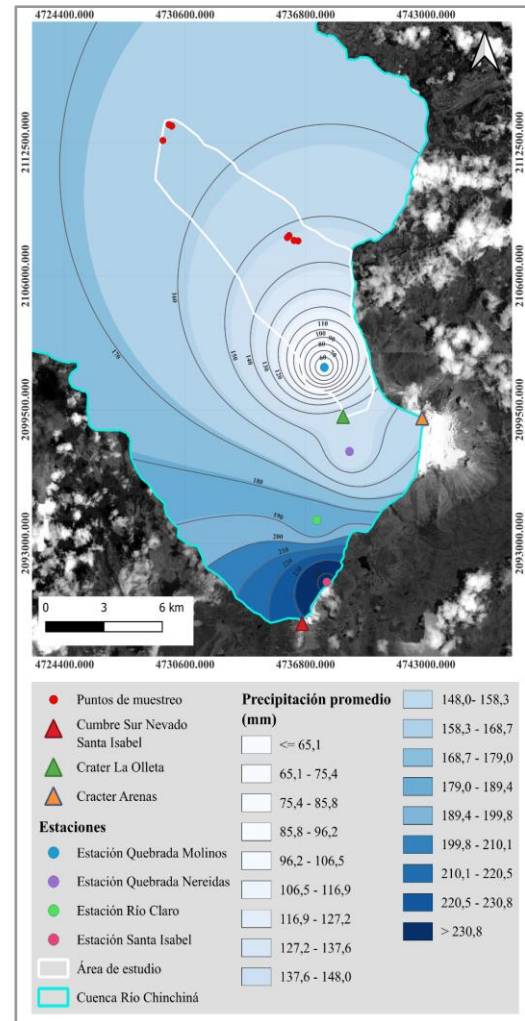


Figura 5. Mapa de isoyeta
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los puntos de muestreo más próximos a las estaciones, que corresponden a fuentes termales en su mayoría, reciben una precipitación reducida en el tiempo estudiado, mientras que los puntos más alejados, 3 de ellos fuentes superficiales, llegan a tener incluso una mayor influencia de las lluvias medidas por la estación Río Claro; cabe resaltar que la isoyeta está elaborada en torno a las 4 estaciones establecidas, sin embargo, en la ciudad de Manizales y los alrededores también se presentan condiciones de precipitación que pueden llegar a interferir las zonas que se muestran.

5.2 Caracterización de las fuentes de aguas termales identificadas en la zona de estudio

Gracias a la búsqueda de fuentes de información secundaria acerca de manantiales termales en la zona, partiendo del "Inventario de fuentes de agua termal en jurisdicción de CORPOCALDAS, con énfasis en la cuenca del río Chinchiná" basado en expedientes de concesión de agua y el inventario nacional de manifestaciones hidrotermales del Servicio Geológico Colombiano; se logra hacer un análisis multitemporal de cada parámetro, con el fin de identificar cambios drásticos con el paso de los años, al comparar con los resultados de la campaña de muestreo.

Posterior a la revisión bibliográfica y a la salida de reconocimiento, se desarrolla

la campaña de muestreo, en donde se llevó a cabo la caracterización de fuentes termales y fuentes superficiales de interés, con base en las propiedades desde el nacimiento del recurso geotérmico, hasta la disposición final. Se consideró la parte más alta de la cuenca, hasta río abajo en donde por acciones antrópicas de carácter turístico se presenta una mezcla del recurso hidrotermal con el recurso hídrico de origen superficial; se incluyeron mediciones in situ y el posterior análisis de laboratorio para variables físicas, químicas y metales realizado por el laboratorio de CORPOCALDAS.

Tabla 1: Puntos de muestreo, datos tomados in situ y resultados de laboratorio..

Punto de toma	Mediciones in situ			Resultados de los análisis a las muestras en el laboratorio										
	Conductividad $\mu\text{S.cm}^{-1}$	pH	T °C	Nitratos mg $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$	Nitritos mg $\text{NO}_2^- \cdot \text{l}^{-1}$	Cloruros mg $\text{Cl}^- \cdot \text{l}^{-1}$	Sulfatos mg $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{l}^{-1}$	Aluminio mg $\text{Al} \cdot \text{l}^{-1}$	Cromo mg $\text{Cr} \cdot \text{l}^{-1}$	Hierro mg $\text{Fe} \cdot \text{l}^{-1}$	Magnesio mg $\text{Mg} \cdot \text{l}^{-1}$	Manganeso mg $\text{Mn} \cdot \text{l}^{-1}$	Acidez Total mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$	Turbidez NTU
25-194	99,5 ± 0,8	7,28 ± 0,10	11,3 ± 0,2	4,37	0,027	5,99	23,7	1,2	<0,05	0,099	5,3	<0,09	<10 LCM	2,7
25-195	10390 ± 87	< 2	59,7 ± 0,8	0,35	0,014	922	4397	202	0,154	52,9	1414	4,67	>700	1,3
25-196	8890 ± 75	< 2	44,3 ± 0,6	1,38	0,039	783	2335	149	0,125	283	1347	3,82	>700	0,7
25-197	9310 ± 78	< 2	43,9 ± 0,6	1,37	0,038	841	2521	138	0,13	293	1260	3,74	>700	0,85
25-198	6410 ± 54	2,13 ± 0,03	31,2 ± 0,4	1,85	0,023	599	1634	120	0,104	250	1448	2,67	>700	0,6
25-199	292 ± 3	3,82 ± 0,05	14,9 ± 0,2	0,55	0,012	57,6	122	8,2	<0,05	1,48	8,9	0,187	36,0 ± 0,4	8,2
25-200	81,4 ± 0,7	7,80 ± 0,11	14,1 ± 0,2	1,78	0,017	2,77	4,56	0,2	<0,05	0,593	1,46	<0,09	< 10 LCM	9,4

25-201	116,8 ± 1,0	7,33 ± 0,10	14,0 ± 0,2	1,83	0,016	6,91	24,2	0,3	<0,05	0,853	4,52	<0,09	< 10 LCM	11
25-202	10540 ± 88	< 2	44,3 ± 0,6	1,34	0,022	588	7075	< 0,20	0,149	328	1439	4,825	>700	8,7

Fuente: Corpocaldas, 2025.

Las muestras corresponden a ubicaciones específicas en el municipio de Villamaría, fuentes termales como bocatoma Termas del Ruiz, La Gruta, Termas Tierra Viva (tubo de entrada), Mina de Hierro I y II; fuentes de agua superficial que interactúan con recursos hidrotermales como el Santuario Scout, Quebrada la María, Río Chinchiná antes de la desembocadura, unión de la Quebrada la María y el Río Chinchiná. Todas las muestras fueron de tipo puntual, bajo condiciones ambientales controladas, como temperaturas con valores entre 15-18°C y humedad relativa de 75-80%; no se reportaron desviaciones significativas en los métodos de ensayo, basados en estándares como los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

conductividades altas y pH extremadamente ácidos (no detectables por equipo convencional), en contraste con los cuerpos de agua superficiales que exhiben valores neutros; las incertidumbres de los resultados se expresan con un factor de cobertura $k=2$, correspondiente a un nivel de confianza del 95%, dado a los límites de detección para pH ácidos y aparición de concentraciones inferiores a los umbrales cuantificables.

Los análisis de laboratorio confirmaron concentraciones elevadas de compuestos en las muestras termales, destacando la influencia volcánica-mineral, con aniones como sulfatos y cloruros dominando en niveles significativos, mientras que nitratos y nitritos permanecieron generalmente bajos. En cuanto a metales, elementos como el aluminio, hierro, magnesio, manganeso y cromo se detectaron en concentraciones notables, con acidez total excediendo límites superiores en la mayoría de ellas y turbidez baja en general, excepto en los ríos.

Posteriormente, entre los mismos resultados de la campaña de muestreo, se elabora un análisis comparativo de las fuentes de agua termales, las fuentes superficiales y las zonas de convergencia de las mismas, con el propósito de identificar afectaciones a ríos o quebradas que sirven de abastecimiento a comunidades cuenca abajo. En el aspecto de la salud humana, se realiza una exploración de los efectos en la salubridad a partir de los datos exactos por parámetro, para concluir si aquellas propiedades pueden llegar a ser nocivas para las personas.

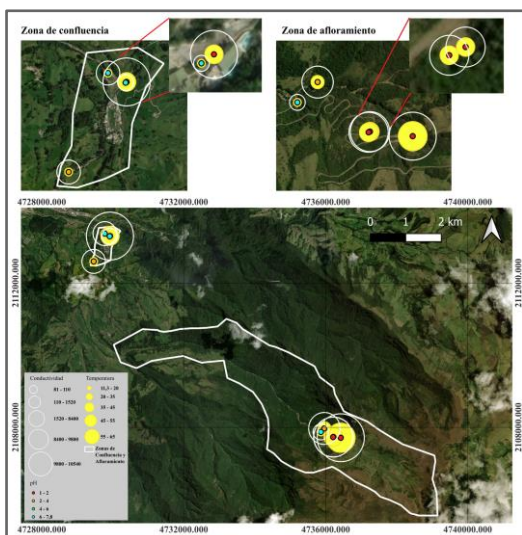


Figura 6. Resultados de parámetros fisicoquímicos IN SITU.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Las mediciones in situ mostraron variaciones notables en las propiedades físicas del agua, con fuentes termales mostrando temperaturas elevadas,



Figura 7. Registro fotográfico campaña de muestreo. **Fuente:** Elaboración propia, 2025.

5.3 Evaluación de la dinámica de las fuentes termales desde la interacción agua-roca y actividad volcánica.

Con base en la descripción y profundo análisis que elaboró Ceballos Hernández et al., (2020) sobre la evolución geológica de VNR, se determinó que el área de estudio se encuentra sobre 10 unidades litológicas, a las cuales se les atribuyen ciertas características físicas y químicas, las cuales se describen a continuación y se muestran más claramente en la figura 8.

1. *El Conjunto de lavas Periodo Eruptivo Pre-Ruiz* cubre un área considerable dentro de la zona de estudio, sobre todo cerca a los afloramientos termales, muestran una asociación mineral formada por plagioclasa, ortopiroxeno, clinopiroxeno, minerales opacos, anfíbol y biotita, alineada a lo largo de la Sistema de Fallas Villamaría-Termale.

2. *Los Depósitos de Avalancha de Escombros Villamaría-Termale*, se caracterizan por involucrar grandes volúmenes de roca. Estos eventos están asociados a tres formas de relieve, ubicados en las cabeceras de los ríos Romerales, Termale y Oliva, hacia la cuenca media del río Chinchiná. Probablemente están compuestos por lava andesítica/dacítica del VNR y/o Volcán Olleta, rica en biotita, plagioclasa, entre otros.

3. *Las zonas de Volcán monogenético* en el mapa corresponden al campo volcánico monogenético Villamaría - Termale, estos cuerpos se ubican al norte del VNR sobre el sistema de fallas Villamaría-Termale, y las características más típicas son el aumento del contenido de anfíboles y la disminución de piroxenos y la ausencia de biotita. Se clasifican como andesitas oxihornbléndicas.

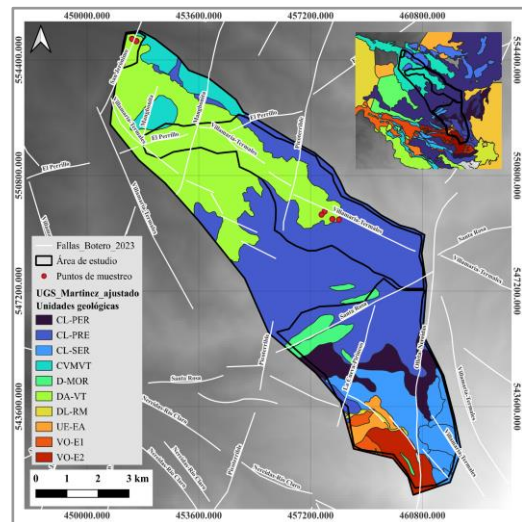


Figura 8. Unidades litológicas y fallas relacionadas al área de estudio.

Fuente: Unidades litológicas tomadas y adaptadas de Ceballos Hernández et al. (2020) y Martínez et al. (2014); fallas tomadas de Botero Gómez et al. (2023, 2025).

Las otras 7 unidades se encuentran en la zona de análisis geotérmico, ya que se relacionan más con la geología del VNR. Corresponden a:

- Conjunto de lavas Primer Periodo Eruptivo Ruiz
- El depósito de flujo de lava Segundo Periodo Eruptivo Ruiz
- Depósitos de morrena
- Depósito de Lahar Río Molinos
- Unidad eruptiva El Águila
- Volcán Olleta etapa 1
- Volcán Olleta Etapa 2

En la Figura 8, la codificación de las unidades es: (CL-PER) Conjunto de lavas Primer Periodo Eruptivo Ruiz; (CL-PRE) Conjunto de lavas Periodo Eruptivo Pre-Ruiz; (CL-SER) Depósito de flujo de lava Segundo Periodo Eruptivo Ruiz; (CVMVT)

Volcán monogénico; (D-MOR) Depósito de morrena; (DA-VT) Dep. de Avalancha de Escom. Villamaría-Termal; (DL-RM) Depósito de Lahar Río Molinos; (UE-EA) Unidad eruptiva El Águila; (VO-E1) Volcán Olleta etapa 1; (VO-E2) Volcán Olleta Etapa 2. Por otro lado, en la figura 8 también se logra percibir cómo la falla Villamaría-Termal atraviesa el área de estudio, justo por la zona de afloramiento donde se ubican algunas fuentes termales, reforzando la relación de este sistema de fallas con la generación de este recurso.

6. DISCUSIÓN

Se evidencia que, pese a la variabilidad climática registrada en el periodo de tiempo analizado, las aguas termales mantienen una estabilidad relativa en sus propiedades fisicoquímicas, lo que sugiere un sistema hidrotermal con una fuerte influencia de procesos profundos y una menor dependencia de las dinámicas climáticas superficiales. Este comportamiento respalda la hipótesis de que los sistemas geotérmicos asociados a volcanismo activo presentan una inercia térmica y geoquímica significativa, lo que los hace menos sensibles a fluctuaciones interanuales de precipitación y temperatura, a diferencia de los cuerpos de agua superficial.

No obstante, esta estabilidad no debe interpretarse como ausencia de vulnerabilidad, esta investigación evidencia que los procesos de recarga por infiltración de aguas lluvias siguen siendo un componente clave del sistema hidrogeológico, por lo que alteraciones sostenidas en los patrones climáticos como periodos prolongados de sequía o eventos extremos generarían impactos acumulativos a mediano y largo plazo. Este aspecto adquiere relevancia en escenarios de cambio climático, donde la intensificación de la variabilidad podría modificar las condiciones de equilibrio actualmente observadas.

Desde el punto de vista geoquímico, la marcada acidez y la elevada

concentración de sulfatos, cloruros y metales refuerzan la interpretación de una fuerte interacción agua-roca en un contexto volcánico activo; más allá de confirmar lo reportado en estudios previos, la investigación permite inferir que estas características condicionan de manera directa los usos potenciales del recurso, delimitando claramente los escenarios de aprovechamiento seguro y aquellos que implican riesgos ambientales o sanitarios. La coexistencia de fuentes termales con cuerpos de agua superficial en zonas de confluencia plantea un reto de gestión, ya que, aunque los procesos de dilución atenúan las concentraciones río abajo, la presión antrópica asociada al turismo podría amplificar impactos localizados.

En el alcance del presente estudio, y con base en los parámetros fisicoquímicos evaluados, no se identifican condiciones que, por sí solas, permitan establecer una relación directa entre el uso recreativo de las aguas termales analizadas y afectaciones a la salud humana. No obstante, se resalta la necesidad de implementar esquemas de monitoreo continuo y criterios diferenciados de uso, especialmente para poblaciones vulnerables.

7. CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos no presentan cambios significativos con el paso de los años, se afirma la estabilidad del recurso termal ante factores cambiantes como la precipitación y la temperatura; con parámetros como el pH, conductividad, nitritos, nitratos, fluoruros, sulfatos, cloruros y otros elementos, río abajo toman cifras dentro de los valores máximos permitidos por la Resolución 2115 de 2007, que establece los requisitos de calidad del agua para consumo humano. La comparación con los valores de referencia establecidos en la Resolución 2115 de 2007 se realiza con fines analíticos y comparativos, sin que ello implique que las aguas termales evaluadas sean aptas para consumo humano.

En relación con la variabilidad climática, los recursos geotérmicos

demonstraron una independencia parcial de los resultados meteorológicos en el periodo 2013-2023, es decir, hay una relación con el proceso de infiltración de aguas lluvias y en general el ciclo del agua, pero las propiedades que poseen las aguas termales no se ven modificadas ante cambios drásticos de precipitación.

Sobre los efectos en la salud humana, las fuentes hidrotermales no presentan una contaminación en los cuerpos de agua superficiales en las que son vertidas; sus componentes se ven neutralizados por la diferencia de caudales en comparación al Río Chinchiná, descartando la posibilidad de afectación a la salud de poblaciones río abajo por contaminación debido a este vertimiento.

No obstante, el otorgamiento del 100% en las fuentes recreativas puede ser una de las causas del uso desmedido y resultar en un aspecto insostenible a largo plazo. Por lo tanto, es crucial evaluar la capacidad de estas fuentes para soportar la demanda actual; así como ser diferenciadas de las aguas superficiales para su concesión, siendo un recurso que necesita de un manejo lo más fiel posible a sus requerimientos.

8. REFERENCIAS

- Alfaro Valero, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas Veloza, Y. P., Rodríguez Ospina, G. Z., & Malo Lázaro, J. E. (2020). Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Arengas Acosta, J. M., Lopez Ramirez, M., & Guzman Cabrera, R. (2024). Impacto del preprocesamiento en la clasificación automática de textos usando aprendizaje supervisado y reuters 21578. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(43), 110–118. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2506>
- Bedoya Paniagua, M. Á. (2016). Informe sobre valoración del servicio ecosistémico de retención de sedimentos cuenca del río Chinchiná – Parque Nacional Natural Los Nevados. Subdirección de Sostenibilidad y Negocios Ambientales, Parques Nacionales Naturales de Colombia. <https://www.parquesnacionales.gov.co/wp-content/uploads/2018/08/Informe-de-valoracion-SE-hidrologico-PNN-Nevados.pdf>
- Botero Gómez, L. A., Murcia, H., & Hincapié Jaramillo, G. (2023, Diciembre). The effect of fault systems on volcanic activity: Insights from the subduction-related, Quaternary Villamaría-Termale monogenetic volcanic field in Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 444(107969). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107969>
- Botero Gómez, L. A., Murcia, H., Sánchez, J. J., Gómez Vasconcelos, M. G., & López Palacio, J. (2025). Métodos de exploración y sistemas geotérmicos en Colombia con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz, proyecto geotérmico Valle de Nereidas. *Boletín de Geología*, 47(1), 63-91. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n1-2025003>
- Botero Gómez, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A. (2018, Septiembre - Diciembre). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termale, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*, 40(3). <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018005>
- Ceballos Hernández, J. A., Martínez Tabares, L. M., Valencia Ramírez, L. G., Pulgarín Alzate, B. A., Correa Tamayo, A. M., & Narváez Marulanda, B. L. (2020, Noviembre 27). Geological Evolution of the Nevado del Ruiz Volcanic Complex. *The Geology of Colombia*, 4, 267-296. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.07>

- Corpocaldas. (2025, Agosto 6). Informe N° 35 Toma de muestra y análisis a fuentes de agua termal, área Geotérmica Villamaría - Termales (25-194 a 25-202). Laboratorio Ambiental.
- Doria Alvarez, A., & Orozco Ospino, J. (2020). Evaluación de propiedades físico-químicas y mecánicas del adobe elaborado con cal para su uso en la construcción sostenible. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(35), 89-94. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i35.47>
- García, Á. (2006). Aguas mineromedicinales: Tipos, formas de aplicación, indicaciones y contraindicaciones. Termalismo y Deporte. <http://www.sld.cu/sitios/mednat/docs/aguas.pdf>
- Martínez, L. M., Valencia, L. G., Ceballos, J. A., Narváez, B. L., Pulgarín, B. A., Correa, A. M., Navarro, S. D. R., Murcia, H. F., Zuluaga, I., Rueda, J. B., & Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final. Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano., 853.
- Maxe Malca, M. R. (2015, Abril 9). Estudio de la calidad físico-química y mineromedicinal del agua termal de los Baños del Inca. UCV-HACER. *Revista de Investigación y Cultura*, 4(1), 38-42. Universidad César Vallejo. ISSN: 2305-8552.
- Mejía Rodríguez, C. A., Rincon Pinzon, M. A., Palmera Quintero, L. M., & Arevalo Vergel, L. M. (2024). Aplicación de machine learning y metodología CRISP-DM para la clasificación precisa de severidad en casos de dengue. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(43), 78-85. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2822>
- Molina Carvajal, L. J., Rivera, M. E., Delgado Rodríguez, J. R., & Cajiao Pedraza, Á. M. (2023, Agosto). Calidad del agua termal en los municipios de Bochalema y Chinácota, Colombia. *Universidad industrial de Santander*, 45(2).
- Pinuaga Espejel, J. I. (1992). Infraestructura hidrotermal. Instituto Geológico y Minero de España. https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/3_infraestructura.pdf
- Ruge Cárdenas, J. C., Vargas Villamizar, Ó. H., & Carmona Álvarez, J. E. (2022). Desafíos en la definición de factores de seguridad en el diseño de estructuras geotécnicas. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(40). <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i40.2354>