

Calidad del agua termal en los municipios de Bochalema y Chinácota, Colombia

Leidys Jhoana Molina-Carvajal¹ ; María Esther Rivera¹ 
Jesús Ramón Delgado-Rodríguez^{1*} ; Ángela Maritza Cajiao-Pedraza² 

¹Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS), Ingeniería Ambiental, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. ljmolinacarvajal@gmail.com; maes@unipamplona.edu.co; (*) jramondr@gmail.com

²Grupo de Investigación en Microbiología y Biotecnología (GIMBIO), Programa de Microbiología, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. angelamaritzacajiao@gmail.com

Resumen

Las aguas termales son recursos que permiten generar escenarios de desarrollo turístico y proyectos de aprovechamiento e investigación, así como formular e implementar normativas. Por esto, es necesario conocer la composición, los factores condicionantes y sus relaciones en las fuentes termales de los municipios de Bochalema y Chinácota, para generar conocimiento, brindar herramientas para la mejora de las condiciones sanitarias y de manejo ambiental. La presente investigación tiene como objetivo realizar el estudio de las fuentes termales identificadas en los municipios de Bochalema y Chinácota, mediante el análisis de las variables fisicoquímicas, microbiológicas y de macroinvertebrados. Como metodología, se obtuvieron muestras de agua termal y se realizaron ensayos fisicoquímicos para determinar composición, alcalinidad y dureza, que se analizaron en diagramas de Schoeller, Piper y Stiff. También se analizaron componentes microbiológicos y de macroinvertebrados para clasificar la calidad del agua mediante la prueba ReadyCult 100 y medios nutritivos y selectivos para lo microbiológico y el índice IBMWP/Col para macroinvertebrados. Como resultados, se obtuvo que las aguas de las fuentes termales estudiadas tienen composición sódica y carbonatada y baja presencia de hierro; los diagramas de Piper y Stiff confirman la presencia de sodio y carbonatos, lo cual se puede asociar al flujo de las aguas a través de rocas evaporíticas y carbonatadas de las formaciones Tibú Mercedes, Cogollo, Capacho y Luna. La dureza de las aguas se relaciona con la presencia de carbonatos. Los análisis microbiológicos muestran la presencia de la bacteria *Escherichia coli*, *Klebsiella* spp, *Salmonella* spp en concentraciones de 110 bacterias/mL, indicativas de contaminación por aportes de materia orgánica. Al igual, al aplicar el índice IBMWP/Col se determina que las aguas termales son de baja calidad para la fuente R1 en el Raizón y C1 en Los Termales; y alta en Raizón R2 y Los Termales C2.

Palabras clave: Agua subterránea; Agua termal; Hidrogeología; Medioambiente acuático; Microorganismos.

Thermal water quality in the Bochalema and Chinácota municipalities, Colombia

Abstract

Thermal waters are resources that allow the generating of tourism development scenarios, research, and exploitation projects, formulate and implement regulations. It is necessary to know the information regarding the composition, conditioning factors and their relationships in the hot springs of the municipalities of Bochalema and Chinácota, to generate knowledge and provide tools for the

Forma de citar: Molina-Carvajal, L.J.; Rivera, M.E.; Delgado-Rodríguez, J.R.; Cajiao-Pedraza, A.M. (2023). Calidad del agua termal en los municipios de Bochalema y Chinácota, Colombia. *Boletín de Geología*, 45(2), 65-77. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023004>

improvement of sanitary conditions and environmental management. For this reason, this research aims to carry out the thermal source's studies identified in the municipalities through of the physicochemical, microbiological and macroinvertebrate analysis. As methodology, samples were obtained and physicochemical tests were carried out to determine composition, alkalinity, and hardness, which were analyzed in Schoeller, Piper and Stiff diagrams. Microbiological and macroinvertebrate components were also analyzed to classify water quality using the ReadyCult 100 test and nutritive and selective microbiological media and the IBMWP/Col index for macroinvertebrates. As a result, it was obtained that the hot springs have carbonated composition and a low presence of iron; the Piper and Stiff diagram confirm the presence of sodic and carbonates, which is associated with the flow of water through evaporitic and carbonate rocks of the Tibú Mercedes, Cogollo, Capacho and Luna formations; The hardness of the waters is related to the presence of sodic and carbonates. Microbiological analyzes show the presence of the bacteria *Escherichia coli*, *Klebsiella* spp, *Salmonella* spp at concentrations of 110 bacteria/mL. Indicative of contamination by contributions of organic matter. Likewise, when applying the IBMWP/Col index, it is determined that the thermal waters of are low quality for the R1 source in the Raizón and in Los Termales C1 and high in Raizón R2 and Los Termales C2.

Keywords: Underground water; Thermal water; Hydrogeology; Aquatic environment; Microorganisms.

Introducción

Para el desarrollo socioeconómico y ambiental, es importante la realización de estudios sobre la calidad, características y potencial de aprovechamiento de cada manifestación de agua termal. La riqueza de los recursos hidrotermales en el país, se ha identificado a partir de la diversidad en la composición y calidad de las manifestaciones hidrotermales reconocidas en superficie.

Las actividades humanas generan impactos ambientales que condicionan algunas de las características del recurso hidrotermal. Hasta el momento, en Colombia, no se conoce una regulación legal que establezca los estándares mínimos de calidad, las actividades de control que garanticen las condiciones óptimas para el aprovechamiento de aguas termales, o que eviten efectos negativos en la salud pública, la contaminación y alteración del recurso.

La información que se presenta en este artículo tiene como objetivo realizar el estudio de las fuentes termales identificadas en los municipios de Bochalema y Chinácota, mediante el análisis de las variables fisicoquímicas, microbiológicas y de macroinvertebrados, y forma parte de una investigación y análisis de la composición de las aguas termales en dos municipios del departamento de Norte de Santander, Colombia, en las fuentes termales del Raizón y Los Termales. La investigación se desarrolló entre 2019 y 2020.

Parámetros como la altitud, temperatura, tipo de suelo, manejo y aprovechamiento condicionan las características particulares de las aguas termales, que son estudiadas a partir de los análisis fisicoquímicos,

microbiológicos y de macroinvertebrados; estos estudios muestran como resultado la clasificación química de las fuentes y las relaciones de los parámetros estudiados, lo cual facilita la formulación de propuestas de manejo ambiental adecuadas para las condiciones específicas de la zona y la generación de información sobre el estado de las fuentes termales que pueda beneficiar a las comunidades en los municipios.

El estudio de las aguas termales es de vieja data. Sin embargo, en el presente artículo se mencionan algunos de los escritos más relevantes y recientes, como [Moreno et al. \(2008\)](#), quienes evaluaron los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos del agua termal concluyendo que presentaba condiciones para realizar el aprovechamiento. [González-Abraham et al. \(2012\)](#) y [Sánchez-Sánchez et al. \(2015\)](#) determinaron los factores que influyen en la varianza de la composición química y la calidad del agua, debido a la disolución de minerales, el intercambio iónico, la mezcla con agua marina y el aporte de nutrientes por actividades humanas. [García et al. \(2016\)](#) encontraron una especie de la familia *Hydrophilidae* (*Enochrus* sp) en un pequeño manantial sulfuroso que brotaba del suelo, y [Shi et al. \(2017\)](#) determinaron los factores que influyen en la composición química, lo cual concuerda con los resultados de los estudios anteriores. [Andrade-Arciniegas y Palma-Rueda \(2017\)](#) afirmaron la importancia de caracterizar los fluidos que emergen de las diferentes fuentes para optimizar el uso del agua termal.

Dentro de los estudios realizados a nivel nacional, se referencia a [Reyes-Secades \(2015\)](#), quien caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente seis fuentes termales del país, entre estas la fuente de Babega-Silos, la cual registró la presencia de coliformes fecales en el

agua termal, por lo cual concluyeron que es necesario desarrollar estudios con mayor envergadura en cuanto a la composición, caudal, pH y termalidad. Por otra parte, Chivatá-López (2017) afirmó que la presencia de *Pseudomonas aeruginosa* se debe a la inadecuada protección del acuífero o a las descargas de desechos en el manantial de una fuente termal de Cundinamarca, y propone la implementación de un sistema de control de ingreso. En este mismo departamento, Hernández-Romero (2018) estableció que las personas implicadas en el lugar son responsables de la calidad sanitaria del agua termal. Por otro lado, Ríos-Ramírez (2018) en su investigación, a partir muestras de suelo y agua, propone la identificación de amebas de vida libre termotolerantes, que puedan implicar un riesgo para la salud humana y animal de la población nortesantandereana, como indicador de resistencia de los microorganismos en los municipios de Bochalema, Chinácota y otros.

La zona de estudio comprende las fuentes termales del Raizón y Los Termales, ubicadas en los municipios de Bochalema y Chinácota (Figura 1). Se accede desde Pamplona o Cúcuta, por la vía pavimentada que comunica a los dos municipios.

Geológicamente, en los sitios de afloramiento se encuentran formaciones Cretácicas constituidas por areniscas, arcillolitas, sales y calizas de las formaciones Aguardiente y Capacho, cubiertas parcialmente por depósitos de ladera y depósitos fluvio-torrenciales.

Marco teórico

De acuerdo con el Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014), en la evaluación de este

recurso hídrico subterráneo se deben considerar todas las variables que intervienen en el ciclo hidrológico y los factores externos que puedan favorecer o colocar en riesgo su sostenibilidad en aspectos de oferta o disponibilidad, dado que hace parte el ciclo hidrológico.

Así mismo, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2015) considera que el aprovechamiento de aguas subterráneas requiere de implementación de obras ingenieriles como pozos, galerías filtrantes u otras similares. También considera la importancia de conocer las formaciones geológicas en las que fluyen, entre las que se encuentran unidades roca-sedimento porosas (arenas, gravas) o fracturadas (calizas, areniscas, lavas).

Las aguas hidrotermales tienen una composición en función de la fuente y de la interacción con el ambiente, la composición de la roca encajante, los elementos disponibles en la atmosfera, la materia orgánica, las emanaciones provenientes de magmas, las reacciones químicas entre sus componentes (Tabla 1) y los procesos físico-químicos que tienen lugar en el medio. Esta composición está influenciada por factores internos como sus componentes y propiedades, y externos como los rasgos geográficos, geológicos, hidrogeológicos y biológicos (Mijailov, 1989). Lo anterior se corrobora con lo mencionado por Güler *et al.* (2002), quienes sugieren que la composición química de las aguas subterráneas es controlada por factores que incluyen la composición de la precipitación, la mineralogía de las cuencas hidrográficas y los acuíferos, el clima y la topografía.

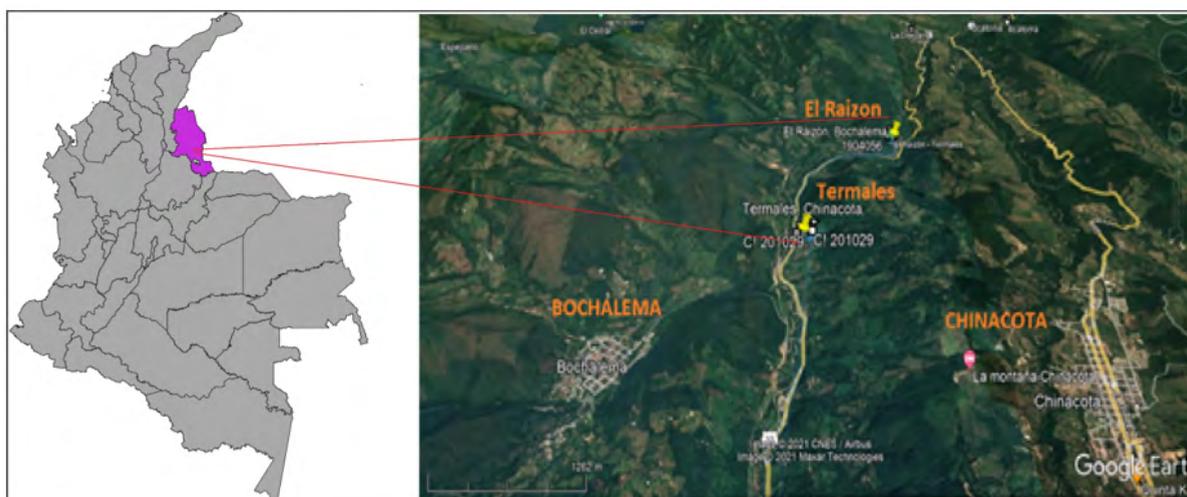


Figura 1. Localización de las fuentes termales en Los Termales y Raizón. Tomado de Google Earth.

Tabla 1. Principales reacciones químicas de los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química del agua. Tomado de Appelo y Postma (1995).

Mineral	Fórmula	Proceso geoquímico y formulación
Halita	NaCl	Disolución de cloruro de sodio $\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ Halita (NaCl)
Calcita	CaCO_3	Disolución – precipitación de calcita $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^{2-}$ Calcita
Biotita	$\text{KMg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2$	Meteorización de serpentinita $14 \text{CO}_2 + 15 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{KMg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{K}^+ + 6 \text{Mg}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4$ Caolinita
Olivino	$\text{MgFe}(\text{SiO}_4)$	Meteorización de olivino $4 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} + \text{MgFe}(\text{SiO}_4) \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{Fe}_2 + 4 \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$
Plagioclasas	$\text{Na}_x\text{Ca}_y\text{Al}_{x+2y}\text{Si}_{3x+2y}\text{O}_8$	Meteorización de plagioclasas: $(x \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + y \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8) = \text{Na}_x\text{Ca}_y\text{Al}_{x+2y}\text{Si}_{3x+2y}\text{O}_8 + (x+2y) \text{CO}_2 + (11/2x+3y) \text{H}_2\text{O}$ $= x \text{Na}^+ + y \text{Ca}^{2+} + (x+2y) \text{HCO}_3^- + 2x \text{H}_4\text{SiO}_4 + (x/2 + y) \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (x = moles de Na ⁺ ; y = moles de Ca ²⁺)
Feldespato potásico (microclina)	KAlSi_3O_8	Meteorización de feldespato potásico (microclina) $2 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2 \text{CO}_2 + 11 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{K}^+ + 2 \text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4 (\text{l}) + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Pirita	FeS_2	Oxidación de pirita $4 \text{FeS}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 11 \text{H}_2\text{O} + 28 \text{Fe}_2 = 2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 30 \text{Fe}^{2+} + 8 \text{SO}_4^{2-} + 34\text{H}^+$ Hematita
Sulfhídrico –Azufre	$\text{H}_2\text{S-S}$	Reducción del sulfato $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} = \text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3^-$ Formación de azufre a partir de H ₂ S $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2 \text{S} + \text{H}_2\text{O}$
$\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ $\text{Ca}^{2+} - \text{K}^+$	$\text{Ca} - \text{NaR}_2$ $\text{Ca} - \text{KR}_2$	Intercambio iónico Ca-Na y Ca-K $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{NaR}_2 = 2 \text{Na}^+ + \text{CaR}_2$; $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{KR}_2 = 2 \text{K}^+ + \text{CaR}_2$ R = Arcilla, zeolita, carbón u otro material intercambiable

Factores que condicionan y modifican la composición del agua subterránea

Una vez incorporados los constituyentes al agua subterránea, esta adquiere una configuración composicional determinada, pero no se mantiene invariable durante su recorrido. Por lo tanto, no se puede definir completamente la composición, solo se hace referencia a un lugar y momento determinado. Por esto, IGME (1985) considera que entre los factores que condicionan la composición del agua subterránea se encuentran la naturaleza, la disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, la superficie, la duración del contacto, la temperatura, la

presión, la existencia de gases, el grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables y los fenómenos modificadores más frecuentes como intercambio iónico, concentración, temperatura, reducción, mezclas y orden secuencial de la interacción. En consecuencia, la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal.

Composición de las aguas subterráneas

La composición de un agua puede analizarse desde diferentes puntos de vista, ya sea químico, bacteriológico, isotópico, geológico o físico:

Composición química: el agua subterránea podría estar constituida por sustancias, generalmente inorgánicas, incorporadas por procesos naturales, en las que sustancias orgánicas se encuentran disueltas, aunque frecuentemente aparecen en concentraciones menores que los constituyentes inorgánicos.

La composición se define a partir de los análisis de muestras recogidas adecuadamente, y se cuantifica por medio de la concentración de cada constituyente analizado. Sin embargo, son más de 60 los constituyentes y propiedades del agua subterránea natural que pueden encontrarse cuantificados en análisis químicos. Por lo general, en estudios convencionales sólo se determinan entre 10 y 20 parámetros fundamentales (IGME, 1985).

Para Mijailov (1989), en la mineralización y tipo químico del agua se tienen en cuenta como iones principales o macrocomponentes a Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_2^- , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , como también compuestos de nitrógeno y elementos como W, Si, Fe, Al y P, que en determinadas condiciones naturales forman tipos específicos de aguas subterráneas. También se encuentran elementos en cantidades pequeñas como Li, B, F, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Sr, Mo, Y, Ba y Pb, entre otros, que se encuentran en estado disperso.

Composición microbiológica: en las aguas termales se han identificado bacterias termófilas, que sobreviven en temperaturas mayores a los 37°C , cuya cantidad oscila entre 10 y 500 células por mililitro de agua. Las bacterias más difundidas son las patógenas de putrefacción y saprofitos, que descomponen las sustancias orgánicas de naturaleza albuminosa contaminando el agua; mientras que en las profundidades se desarrollan grupos de bacterias sulfato reductoras, metano génicas, desnitrificantes, entre otras. Producto de la actividad biológica de estas se pueden formar gases como H_2S , CO_2 , CH_4 , N_2 y H_2 (Mijailov, 1989).

Condición geológica

Existen condiciones geológicas que pueden afectar la calidad del agua termal, dada la presencia de diferentes tipos de unidades estratigráficas por las que fluyen, el origen de las aguas termales, la composición y disposición de las diferentes unidades litológicas y las fallas que permiten el aporte de sustancias provenientes desde la superficie.

Metodología

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se tuvo en cuenta:

Levantamiento de información general

Se realizaron 5 salidas de campo, en las que se referenciaron las fuentes de aguas termales con GPS marca Garmin GPSmap 76CSx, se describieron las condiciones físicas del entorno en cada sitio en la zona de estudio y, mediante registro fotográfico, se identificó la cobertura vegetal, cultivos cercanos y el tipo de litología. Los datos de estratificación y fractura de la roca se determinaron con brújula Brunton estructural azimutal, y se determinaron los caudales en cada una de las fuentes termales.

Análisis de calidad de agua

Para conocer la calidad del agua se realizaron los siguientes análisis:

Análisis fisicoquímico: se tomaron dos muestras de agua en recipientes de 500 mL, se transportaron al laboratorio para su procesamiento antes de las 24 h. Se determinaron cationes de calcio, magnesio, sodio, potasio, por medio de espectroscopia de absorción atómica (AA) con un coeficiente de determinación r^2 entre 0,9784 a 0,9998; conductividad y el pH utilizando un equipo multiparámetro WTW Inolab; la dureza total por volumetría con EDTA, alcalinidad y cloruros por volumetría; sulfatos mediante el método espectrofotométrico-turbidimétrico (BaCl_2), turbiedad por nefelometría; temperatura por termometría directa, con un termómetro de mercurio de sensibilidad de -10 a 110°C .

Análisis microbiológico: las muestras se recolectaron en frascos de vidrio de 300 mL esterilizados en autoclave, siguiendo las indicaciones de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1992); fueron transportadas hacia el laboratorio Gimbio de la Universidad de Pamplona, y fueron procesadas antes de las 24 h. Se aisló, identificó y evaluó la actividad metabólica de los microorganismos, mediante la siembra en superficie de medios selectivos, diferenciales y pruebas bioquímicas.

Se hizo una prueba rápida de detección de coliformes totales, en el medio Coliformes Readycult 100. Dado el crecimiento de los microorganismos, se observaron las características macroscópicas y microscópicas de la colonia.

Análisis de macroinvertebrados: para el análisis de los bioindicadores, se utilizó la guía de los macroinvertebrados acuáticos de Roldán (1996), teniendo en cuenta los procedimientos establecidos por el laboratorio de Entomología de la Universidad

de Pamplona. En campo, se tuvieron en cuenta los protocolos correspondientes para la toma de muestras; se utilizó una red de malla para aguas poco profundas, y también por levantamientos de rocas y sedimentos del fondo, se almacenaron en frascos de 40 ml con alcohol al 70%, y se trasladaron al laboratorio para ser identificados con estereoscopio. También, se utilizó el *Index Biological Monitoring Working Party* adaptado para Colombia (IBMWP/Col), planteado por Roldán (2003), cuyos puntajes varían de 1-10 dependiendo de la familia de macroinvertebrados acuáticos identificada.

Clasificación química del agua termal

Para esta clasificación se tuvo en cuenta el diagrama de Schoeller para los componentes Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y CHO_3^- . También se incluyeron diagrama Piper, de salinidad y de Stiff. Para la obtención de los gráficos se utilizaron los *softwares* EASY QUIM v5 y DIAGRAMMES.

Resultados

Los resultados y los gráficos que se presentan a continuación son puntuales, representativos del muestreo realizado.

Levantamiento de información general

El Raizón es la fuente termal más reconocida de Norte de Santander, por contar con seis piscinas a diferentes temperaturas. Presenta el mayor aprovechamiento de tipo recreacional; su cobertura vegetal está conservada. Sin embargo, es uno de los puntos donde se evidencia de forma significativa la disminución de la lámina de agua en el punto R2. Los Termales en Chinácota presenta una cobertura vegetal conservada alrededor de los afloramientos, y el agua termal es captada y llevada por manguera hasta sitios de uso recreativo.

Litología: en el Raizón se observaron depósitos de ladera con bloques de arenisca y arcillolita en una matriz heterogénea que puede variar en componentes arcillo-arenosa a gravosa. Sin embargo, en los alrededores se encuentran afloramientos de rocas sedimentarias constituidas por intercalaciones de areniscas y arcillolitas de la Formación Aguardiente. En Los Termales, quebrada Lobatía, se tiene presencia de rocas fracturadas, con afloramiento en areniscas, arcillolitas, shales y calizas de la Formación Capacho. Sobrepuesto, se encuentran depósitos de ladera con bloques y gravas de calizas, areniscas duras, cuarzosas y silicificadas, en una matriz areno-arcillosa o areno-

limosa. En los bordes del cauce de la quebrada se tienen pequeños afloramientos de agua termal, cubiertos parcialmente por depósitos fluvio-torrenciales constituidos por bloques de caliza y arenisca. En los afloramientos se encontró una estratificación 335/46 y fracturamiento con los siguientes buzamientos 112/60, 230/61, 130/48.

Ambos sitios se encuentran en la zona de influencia de fallas regionales de tipo inverso y de cabalgamiento, características de la falla de Pamplonita y la falla de Chitagá, lo cual es un factor que contribuye a la presencia de fracturas profundas, por las cuales están emergiendo gases y fluidos calientes. En ambos sitios se observó una vegetación característica de bosque húmedo tropical, pero en el Raizón hay una mayor intervención antrópica.

Análisis fisicoquímico

Las temperaturas de las aguas termales oscilan entre los 41-57°C, las cuales concuerdan con lo reportado por Molina (2019); estas varían según la altitud a la que afloran. En la Figura 2, se observa cómo incide la altitud en la temperatura del agua, es decir, cuanto más recorrido del agua al ascender, más libera energía, lo cual es coherente con lo mencionado por Hernández-Romero (2018). Werner (1996) menciona que hay una relación inversa entre la temperatura y la altura. El mayor registro de temperatura se presentó en la fuente R2 del Raizón, a una altura de 861 m.s.n.m., en cambio, en el punto R1 del mismo sitio, que está a mayor altura, se tiene una menor temperatura. En Los Termales, a pesar de encontrarse a mayor altura, se tienen unas temperaturas ligeramente mayores que en el punto R1, lo cual indica que las fuentes hidrotermales presentan mayores propiedades calóricas que en el Raizón.

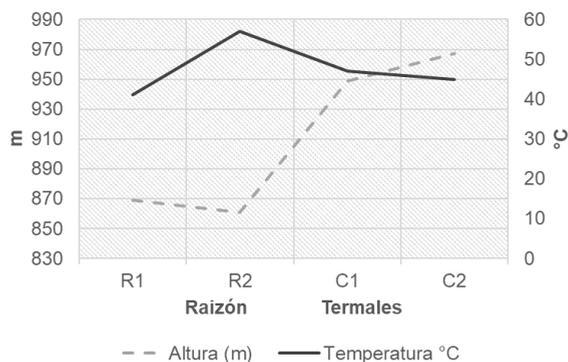


Figura 2. Relación entre temperaturas y alturas en Los Termales (C1, C2) y Raizón (R1, R2).

Como se observa en la **Figura 3**, el Raizón es la fuente con los valores más altos de turbiedad, conductividad, color; los valores de pH difieren muy poco, con un promedio de 7,12.

De acuerdo con el diagrama de Schoeller, **Figura 4**, el alto contenido de sodio (Na) y cloro (Cl) se evidencia en el Raizón y Los Termales. Aunque la variación en las concentraciones de hierro (Fe), magnesio (Mg) y potasio (K) es baja.

Los valores de alcalinidad evidencian las influencias de iones de carbonatos y bicarbonatos, que varía entre los 160-180 mg/L CaCO_3 ; la dureza indica la incidencia de los cationes Mg y Ca en las aguas termales, con rangos de 80-106 mg/L CaCO_3 .

En las **Figuras 5, 6 y 7** se observan los diagramas de Piper, salinidad y Stiff que muestran la composición de las aguas termales en las fuentes de Raizón y Los Termales.

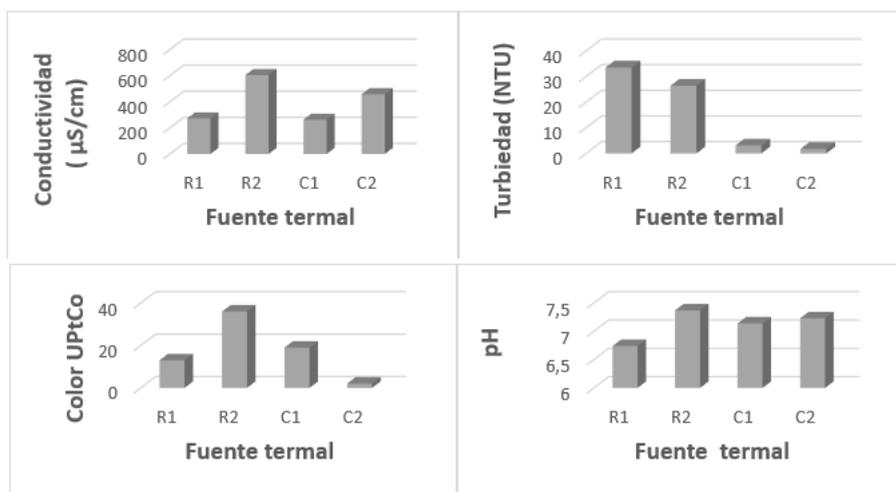


Figura 3. Propiedades fisicoquímicas en Los Termales (C1, C2) y Raizón (R1, R2).

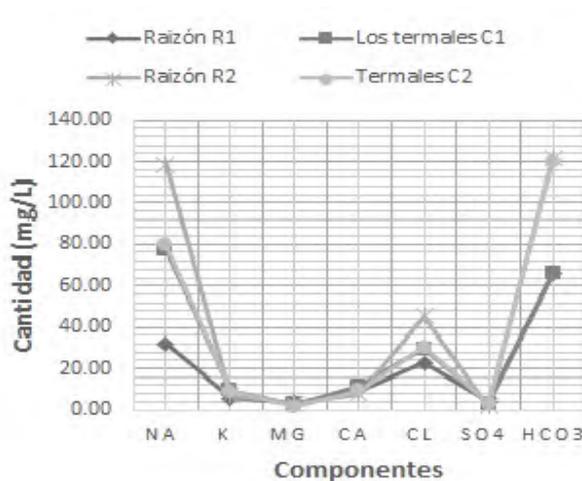


Figura 4. Propiedades y composición fisicoquímicas en Los Termales (C1, C2) y Raizón (R1, R2).

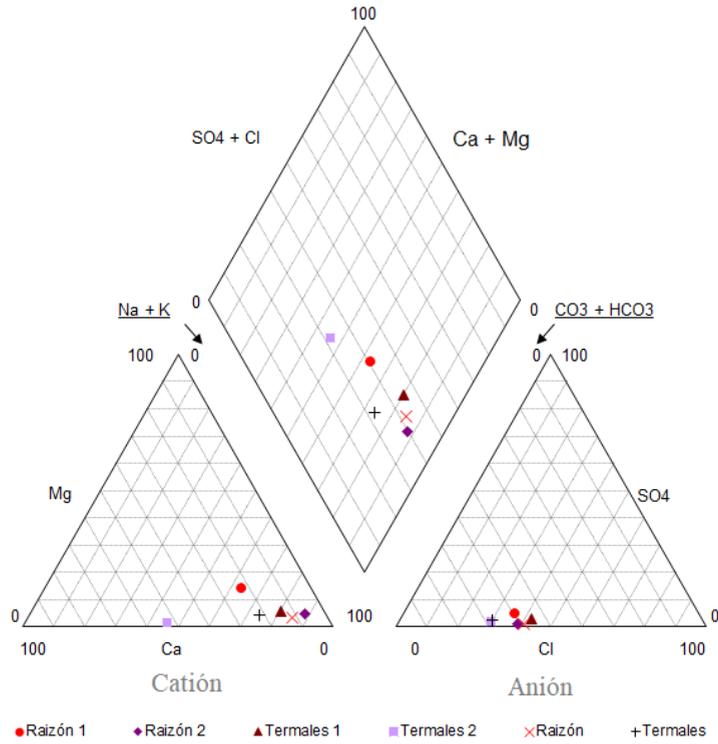


Figura 5. Diagrama de Piper para multicomponentes en Los Termales y Raizón.

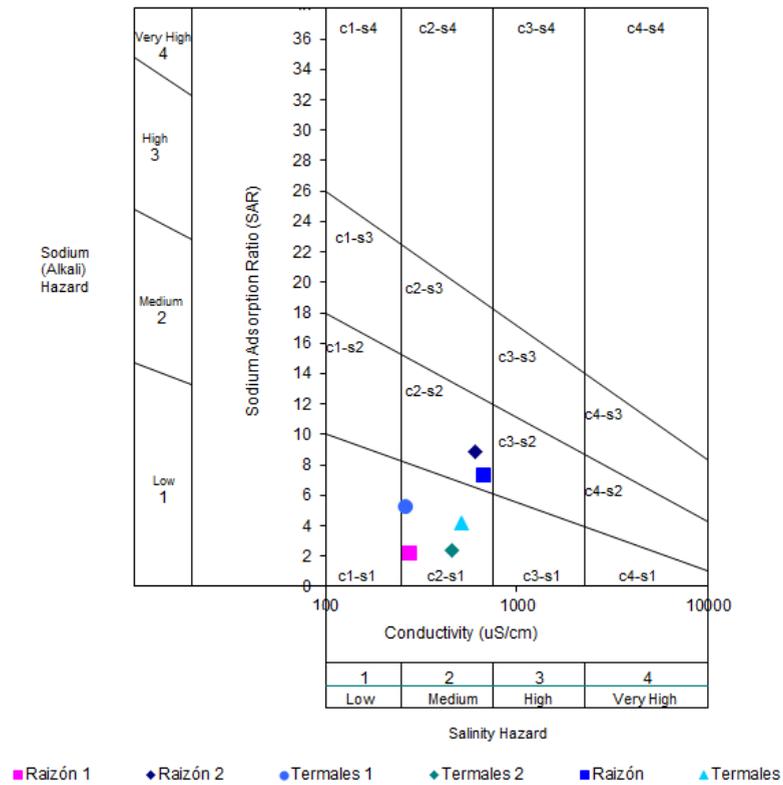


Figura 6. Diagrama de salinidad en Los Termales y Raizón.

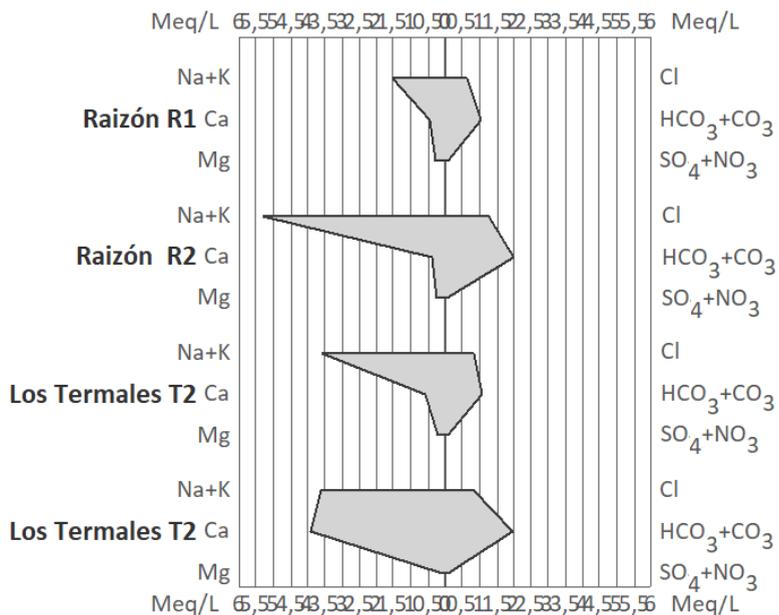


Figura 7. Diagrama de Stiff en Los Termales y Raizón.

Análisis microbiológico

A partir de los análisis de laboratorio, los aislados positivos en la prueba ReadyCult 100 y medios nutritivos y selectivos, se determinó la presencia de la bacteria *Escherichia coli*, *Klebsiella* spp, *Salmonella* spp, en concentraciones de 110 Bact/mL. También, se identificaron otros géneros bacterianos en un rango de 12

a 78 col/mL y con porcentajes de afinidad con los géneros respectivos que oscila entre 81,81-90,90%, [Tabla 2](#).

Análisis de macroinvertebrados

Se recolectaron 13 macroinvertebrados, de los cuales el 76,9% se tomaron en el Raizón y el 23,1% en Los Termales, como se muestra en la [Tabla 3](#).

Tabla 2. Microbiota presente en Los Termales (C2) y Raizón (R1, R2).

Fuente	Bacteria	Concentración (Bact/mL)	Porcentaje afinidad (%)
R1	<i>E. coli</i>	110	81,81
R2	<i>Klebsiella</i> spp	78	81,81-90,9
	<i>Salmonella</i> spp	12	81,81
C2	<i>Klebsiella</i> spp	67	90,9

Tabla 3. Macrobiota presente en Los Termales (C1, C2) y Raizón (R1, R2).

Fuente	Familia	Cantidad	Total	IBMW
R1	Muscidae	10	10	2
R2	-	0	0	0
C1	Tabanidae	1	3	5
	Staphylinidae	2		6
C2	-	0	0	

Se identificaron los órdenes Coleóptera y Díptera, correspondientes a las familias Staphylinidae, Muscidae, Tabanidae (CORTOLIMA, 2008; Hanson *et al.*, 2010). La primera familia predomina sobre las demás y está presente en la fuente R1 del Raizón, indicativa de presencia de material orgánico en descomposición (Roldán, 1996). De acuerdo con la clasificación de la calidad del agua BMWP/COL,

Tabla 4, en la fuente el Raizón (R1) y Los Termales C1 se tiene baja calidad. En R2 del Raizón y C2 de Los Termales no se identificaron macroinvertebrados.

Clasificación térmica

Según Chivatá-López (2017), las aguas termales en la zona de estudio corresponden a fuentes mesotermales a hipertermales, Tabla 5.

Tabla 4. Clasificación de la calidad de agua (tomado de Roldán, 2003).

Clase	Calidad	BMWP/COL	Significado	Color
		>150	Aguas muy limpias a limpias	
I	Buena	101 - 120	Aguas no contaminadas	
II	Aceptable	61 - 100	Aguas ligeramente contaminadas	
III	Dudosa	36 - 60	Aguas moderadamente contaminadas	
IV	Crítica	16 - 35	Aguas muy contaminadas	
V	Muy crítica	<15	Aguas fuertemente contaminadas	

Tabla 5. Clasificación por temperatura de las fuentes termales presentes en Los Termales (C1, C2) y Raizón (R1, R2).

Fuente	Temperatura (°C)	Clasificación
R1	41	Mesotermal
R2	57	Hipertermal
C1	47	Mesotermal
C2	45	Mesotermal

Discusión de resultados

Los valores de turbiedad, conductividad y color difieren entre las dos fuentes, mientras que los de pH son similares. Lo anterior evidencia que se presentan ambientes similares de composición y de circulación de las aguas termales, pero las fuentes del Raizón circulan por litologías diferentes a las que se encuentran en Los Termales. De acuerdo con el Decreto 1076 (2015), Andrade-Arciniegas y Palma-Rueda (2017), Hernández-Romero (2018) y Andueza *et al.* (2020), los valores de pH encontrados en ambas fuentes se consideran aceptables para uso recreativo.

De acuerdo con lo observado en el diagrama de Schoeller, las aguas termales presentan bajas concentraciones de Fe, lo cual es considerado por Freeze y Cherry (1979) como fuentes menores (concentraciones entre 0,01 hasta 10 mg/L), y no alcanzan a ser graficables, lo cual es consecuente con lo mencionado por Kovalevsky *et al.* (2004).

La alcalinidad se puede asociar con el paso de las aguas termales por rocas calcáreas de las formaciones subyacentes, y la diferencia de valores es reflejo de las diferencias litológicas presentes. La presencia de cationes de Mg es indicativa de que algunas de las rocas calcáreas pueden contener dicho elemento.

De acuerdo con el diagrama de Piper, se observa que las aguas termales del Raizón presentan valores que fluctúan entre 30% y 45% (SO₄ + Cl). Los valores de Ca + Mg fluctúan entre 10% y 40%, mientras que en Los Termales T2 se encontraron valores de 55%, lo cual sugiere que en Los Termales se puede estar presentando mayor disolución de carbonatos, o que las aguas probablemente atraviesan formaciones con mayores espesores de rocas calcáreas.

Los diagramas de salinidad indican que la conductividad de las aguas termales es media y que la salinidad es baja para las fuentes de Los Termales y media para las de Raizón. En el diagrama de Stiff

se observa que predomina una composición sódica, excepto en el Raizón R1; los porcentajes de calcio altos se presentan en Los Termales T2 y los de Mg, en general, son bajos, mientras que los porcentajes de Cl en mayor proporción se observaron en Raizón R2; los de SO_4 bajos y los de HCO_3 presentan mayores valores en Raizón R2 y Los Termales T2.

En términos generales, la dureza de las aguas está relacionada con la presencia de carbonatos y, en menor medida, de sulfatos, y por los valores composicionales se encuentra que las aguas están enriquecidas por sodio y carbonatos que probablemente están asociados a la disolución de las rocas evaporíticas y calcáreas que se encuentran en el subsuelo de las formaciones Tibú-Mercedes, Cogollo, Capacho y La Luna.

Las temperaturas medidas en los afloramientos indican condiciones mesotermiales e hipertermiales, de acuerdo con Chivatá-López (2017), que reflejan un importante recorrido entre el origen y el sitio de afloramiento, y muy seguramente relacionadas a la disipación de calor asociada con el aporte de aguas meteóricas por infiltración o condiciones de flujo subsuperficial.

En lo relacionado a sus componentes microscópicos, la presencia de bacterias gramnegativas en forma de bacilos permite clasificar estas aguas como de baja calidad. No es muy frecuente el reporte de esta microbiota, lo cual podría estar relacionado a actividades agropecuarias (Ramírez, 2018), pero se sugiere que su presencia podría asociarse a fugas de sistemas sanitarios cercanos a las fuentes. Sin embargo, en la fuente Los Termales no se evidenció presencia de microbiota que indique contaminación de las aguas, lo cual hace que estas aguas termales sean recomendables para uso con fines recreativos, de manera similar a lo encontrado en fuentes termales de Becerril y Ciénaga (Rojas *et al.*, 2014).

A partir del análisis de macroinvertebrados en campo, en las aguas termales de las fuentes R1 se encontraron especímenes de orden Coleóptera y Díptera, los cuales de acuerdo al índice IBMWP/COL corresponden a aguas de baja calidad, lo cual confirma lo mencionado en el análisis microbiológico, y se considera asociadas a la presencia de material orgánico en descomposición, según Roldán (1996); mientras que en R2 y T2 es de suponerse una buena calidad, al no encontrarse macroinvertebrados asociados.

Conclusiones

La fuente del Raizón presenta mayores afectaciones en la calidad del agua, dada la presencia de elementos alcalinos, turbiedad, cambios en el color del agua y la presencia de microbiota de origen orgánico.

En relación con las temperaturas, se hace evidente que en el Raizón se tienen más altas temperaturas que en Los Termales, lo cual es posiblemente causado por la mayor altura de los afloramientos, que implican un mayor recorrido del agua desde la fuente. Las temperaturas medidas en el Raizón varían entre 41 y 57°C, indicativa de fuentes mesotermiales a hipertermiales; mientras que en Los Termales se encontraron temperaturas entre los 35-50°C, que indican que estas fuentes son mesotermiales.

La alcalinidad está asociada al alto contenido de sodio y cloro, que son más altos en el Raizón que en Los Termales, y con variaciones de las concentraciones de Fe, Mg y K bajas. En las fuentes termales del Raizón se encontró mayor cantidad de especímenes de Muscidae, que dan cuenta de la mayor presencia de contaminantes por contenido de materia orgánica. En Los Termales se encuentran en menor proporción especímenes de Tabanidae y Staphylinidae.

En relación con la presencia de microorganismos, se encontró que en las fuentes termales del Raizón hay mayor presencia de la bacteria *E. coli*, y los géneros *Salmonella* y *Klebsiella*, lo cual confirma la mayor contaminación por materia orgánica. Esto se asocia al mayor uso de esta fuente con fines turísticos.

Por la composición y los organismos encontrados, se hace evidente la necesidad de mejorar la calidad de las aguas termales en el Raizón, en menor medida en Los Termales, para garantizar un uso óptimo con fines turísticos.

Agradecimientos

Se agradece muy especialmente a la Universidad de Pamplona, Vicerrectoría de Investigaciones, por el apoyo brindado en la realización de parte del proyecto; a los señores Arq. Juan Carlos Diez-Ortega, Fernando Hernández-Flórez, Ernesto Acevedo y Marco Antonio Cañas-Esquivel, por permitir el ingreso a los sitios de estudio y su colaboración en campo. Al profesor Biól. José Sierra por la colaboración en la identificación

de macroinvertebrados; a Yolanda Rico, auxiliar de laboratorio de calidad y de diagnóstico de la Universidad de Pamplona; a las administraciones municipales por el acceso y suministro de información.

Referencias

- Andrade-Arciniegas, P.I.; Palma-Rueda, A.F. (2017). Caracterización geoquímica de las fuentes de agua de Tangalí para su uso potencial como recurso natural, cantón Otavalo. Tesis, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.
- Andueza, F.; Chaucala, S.; Vinueza, R.; Escobar, S.; Medina-Ramírez, G.; Araque, J. (2020). Calidad microbiológica de las aguas termales del balneario “El Tingo”. Pichincha. Ecuador. *Ars Pharmaceutica*, 61(1), 15-23.
- APHA (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington DC.
- Appelo C.A.J.; Postma, D. (1995). Geochemistry, groundwater and pollution. *Geological Magazine*, 132(1), 124-125. <https://doi.org/10.1017/S0016756800011523>
- Chivatá-López, N. (2017). Determinación de presencia de Pseudomonas Aeruginosa y medidas de control en aguas termales. Tesis, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- CORTOLIMA (2008). Macroinvertebrados acuáticos.
- Decreto 1076 (2015). Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Presidencia de Colombia.
- Freeze, R.A.; Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Inc.
- García, M.; Vera, A.; Benetti, C.J.; Blanco, L. (2016). Identificación y clasificación de los microhábitats de agua dulce. *Acta Zoológica Mexicana*, 32(1), 12-31.
- González-Abraham, A.; Fagundo-Castillo, J.R.; Carrillo-Rivera, J.J.; Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333.
- Güler, C.; Thyne, G.D.; McCray, J.E.; Turner, K.A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455-474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- Hanson, P.; Springer, M.; Ramírez, A. (2010). Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de Biología Tropical*, 58(Suppl. 4), 3-37.
- Hernández-Romero, J.A. (2018). Calidad sanitaria de un agua termal. Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2015). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas*. Contenidos del Taller de Formación. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGME. (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Kovalevsky, V.S.; Kruseman, G.P.; Rushton, K.R. (2004). *Groundwater studies: an international guide for hydrogeological investigations*. UNESCO.
- MADS. (2014). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas-PNASUB*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mijailov, L. (1989). *Hidrogeología*. Mir Moscú.
- Molina, L. (2019). Estudio comparativo de las aguas termales en los municipios de Bochalema, Chinácota, Silos y Toledo del Norte de Santander-Colombia. Tesis, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- Moreno, C.; Díaz, J.C.; Caraballo, H.; Chacón, K.; Baptista, J.G. (2008). Caracterización hidrogeoquímica de las fuentes de aguas termales

- del estado Trujillo–Venezuela. *XI Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica*, Isla Margarita, Venezuela.
- Ramírez, L. (2018). Contaminación bacteriológica por coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* y *Salmonella sp.* en aguas termales de alcance turístico de la región San Martín–Perú. Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
- Reyes-Secades, G. (2015). Validación de los resultados finales de la caracterización físico química de seis termales colombianos para su uso terapéutico. Fontur.
- Ríos-Ramírez, Y. (2018). Identificación de amebas de vida libre termotolerantes a partir de muestras de suelo y agua de Norte de Santander. Acta Inicio Vicerrectoría de Investigaciones UDES N° 024-18.
- Rojas, E.; Fortich, M.; Pajaveau, H. (2014). Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. *Ingenium*, 8(21), 35-42.
- Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo FEN, Colciencias, Universidad de Antioquia.
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Uso del método BMWP/Col*. Universidad de Antioquia.
- Sánchez-Sánchez, J.A.; Álvarez-Legorreta, T.; Pacheco-Ávila, J.G.; González-Herrera, R.A.; Carrillo-Briebieza, L. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 62-76.
- Shi, Z.; Liao, F.; Wang, G.; Xu, Q.; Mu, W.; Sun, X. (2017). Hydrogeochemical characteristics and evolution of hot springs in Eastern Tibetan Plateau geothermal belt, Western China: Insight from multivariate statistical analysis. *Geofluids*, 6546014. <https://doi.org/10.1155/2017/6546014>
- Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*. 1ra ed. Universidad de Nuevo León.

Fecha de recibido: 21 de enero de 2022

Fecha de aprobado: 16 de marzo de 2023
