

Métodos de exploración y sistemas geotérmicos en Colombia con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz, proyecto geotérmico Valle de Nereidas

Luis Alvaro Botero-Gómez^{1,2*} ; Hugo Murcia^{1,3} ; John J. Sánchez⁴ ;
Martha Gabriela Gómez-Vasconcelos⁵ ; Julián López-Palacio⁶ 

¹Instituto de Investigaciones en Estratigrafía, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. (*)
luis.botero@ucaldas.edu.co; hugo.murcia@ucaldas.edu.co

²Doctorado en Ciencias - Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

³Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

⁴Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jjsanchezag@unal.edu.co

⁵Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. gabriela.gomez@umich.mx

⁶Central Hidroeléctrica de Caldas, Manizales, Colombia. julian.lopez@chec.com.co

Resumen

Un modelo conceptual geotérmico de sistemas convencionales en general comprende cuatro elementos esenciales: una fuente de calor, un reservorio, una fuente de fluidos y una cobertura impermeable. Así, el modelo geotérmico de un área será definido cuando exista la información relevante para su concepción. Para esto, se realizan estudios de diferentes tipos, como: geofísicos, geológicos, hidrogeoquímicos y de anomalías de calor. Colombia dispone de importantes recursos geotérmicos asociados preferencialmente con el arco volcánico activo que se manifiesta a lo largo de la Cordillera Central, sin descartar la importancia de las demás localizaciones no volcánicas. El principal uso de energía geotérmica en Colombia corresponde al aprovechamiento de sistemas de baja entalpía en la balneología y el ecoturismo. Actualmente, se exploran áreas de sistemas de media-alta entalpía con potencial de generación eléctrica. El presente trabajo describe los métodos más comunes para realizar exploración geotérmica y evidencia el avance de la geotermia en Colombia, con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz como modelo de un sistema geotérmico usado como fuente de energía alternativa. Adicionalmente, se muestra cómo en el proyecto más avanzado del país, el proyecto Valle de Nereidas, en el flanco oeste del volcán Nevado del Ruiz, se encuentran fuentes termales que han derivado en un proyecto geotérmico de alta entalpía. Estos nuevos aportes indican que las fuentes termales están estrechamente relacionadas con un aumento de permeabilidad en las rocas, asociado con la interacción de sistemas de fallas en dirección NW-SE, que son cortados por fallas regionales N-S como la falla San Jerónimo. A su vez, el patrón de circulación de fluidos geotérmicos en el área de interés se propone desde el SEE hacia el NWW, de acuerdo con el patrón estructural de la zona correspondiente al sistema de fallas Nereidas-Río Claro.

Palabras clave: Energía renovable; Prospección geotérmica; Recursos energéticos.

Forma de citar: 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>

Exploration methods and geothermal systems in Colombia with emphasis on the Nevado del Ruiz volcano, Valle de Nereidas geothermal project

Abstract

Geothermal conceptual models generally comprise four essential elements in convective geothermal systems: a heat source, a reservoir, a fluid source, and an impermeable rock. A comprehensive geothermal model is developed based on the available data at a given stage, which involves various studies such as geophysical surveys, heat anomaly mapping, geological analysis, and hydrochemical assessments. In Colombia, geothermal resources are predominantly associated with the active volcanic arc along the Central Cordillera, although non-volcanic areas also hold potential. The main application of geothermal energy in the country has been low-enthalpy systems, primarily for balneology and ecotourism. However, exploration efforts are currently underway to identify medium- to high-enthalpy systems with potential for electricity generation. This work outlines common methods in geothermal exploration and highlights the exploration progress in Colombia, with emphasis on the Nevado del Ruiz volcano as a case study for geothermal energy use. Additionally, this work demonstrates how in the most advanced project in the country, the Valle de Nereidas, on the western flank of the Nevado del Ruiz volcano, thermal springs have led to a high-enthalpy geothermal project. These hot springs are related to an increase in permeability in the rocks, associated with the interaction of fault systems in a NW-SE direction that are intersected by regional N-S faults such as the San Jerónimo fault. The circulation pattern of geothermal fluids in the area of interest is proposed to follow the SEE to the NWW, according to the structural pattern of the area related to the Nereidas-Río Claro fault system.

Keywords: Renewable energy; Geothermal prospecting; Energy resources.

Introducción

La energía geotérmica hace referencia al calor en el interior de la Tierra, que se encuentra comúnmente en zonas anómalas como los volcanes y en ocasiones en las fallas; estos lugares conforman sistemas geotérmicos (*cf.*, Wohletz y Heiken, 1992; Calvache-Proañño y Toapanta-Chanatasig, 2022). Los sistemas geotérmicos convectivos específicamente (Donaldson, 1970; Jalili *et al.*, 2018; Freedon y Nutz, 2024) corresponden a zonas cuya configuración geológica permite el transporte de fluidos a través de volcanes (Aguilera-Bustos *et al.*, 2022) o fallas geológicas (Liotta *et al.*, 2021), y pueden aprovecharse tanto para usos directos como para obtener energía eléctrica (Lamy-Chappuis *et al.*, 2022). Sin embargo, existen también áreas geotérmicas con ausencia de vulcanismo asociadas a cuencas sedimentarias que forman sistemas conductivos (*e. g.*, Canadá, Kazemi *et al.*, 2019; China, Li *et al.*, 2022; Rusia, Novikov *et al.*, 2022). Ambos albergan recursos geotérmicos, que corresponden a la anomalía superficial que se puede utilizar en actividades industriales como generación de electricidad, uso agrícola como calefacción de invernaderos o doméstico como calefacción de interiores (Fridleifsson, 2001).

Este trabajo presenta: 1) una recopilación de los métodos convencionales para la exploración geotérmica, 2) las áreas geotérmicas conocidas actualmente en Colombia, 3) el estado del arte del sistema geotérmico asociado con

el volcán Nevado del Ruiz y 4) un modelo conceptual del proyecto geotérmico Valle de Nereidas, el cual se encuentra en etapa previa de perforaciones. Este trabajo compila el conocimiento de la geología y la información hidrogeoquímica de la zona, para contribuir al entendimiento del sistema geotérmico Valle de Nereidas, enfocado hacia la generación de energía eléctrica en Colombia.

Energía geotérmica

El incremento poblacional en el mundo ha resultado en la búsqueda de energías verdes con bajas emisiones de CO₂ como respuesta al aumento constante de la demanda de energía en general (Borenstein, 2012; Bayer *et al.*, 2013; Pizzi *et al.*, 2021). La energía geotérmica es una de las energías renovables con más potencial para generación eléctrica, junto con la energía solar, eólica, biomasa e hidroeléctrica (Juliussen y Bjornsson, 2021; Hernández-Ochoa *et al.*, 2021; Soltani *et al.*, 2021; Krieger *et al.*, 2022). Específicamente, la energía geotérmica representa una mínima cantidad (~1 %) de la combinación de las energías anteriores (Skoglund *et al.*, 2010; Timmons *et al.*, 2014; Lund y Toth, 2021).

Un sistema geotérmico o yacimiento geotérmico convencional se define como el conjunto de una fuente de calor (*e. g.*, anomalía magmática-volcánica), un reservorio (*e. g.*, rocas porosas o fracturadas) y una capa sello, además de un fluido que transfiere el calor a niveles superficiales (*e. g.*, el agua de un acuífero)

(Quintanilla y Suárez, 1994). El fluido geotérmico en un yacimiento puede estar constituido de una fase líquida (Park *et al.*, 2021; Pasvanoğlu, 2021; Benamar *et al.*, 2023) o de una combinación de vapor y agua (Altmann *et al.*, 2014; Sánchez-Ávila *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2022; Khaled *et al.*, 2023) dependiendo de las condiciones de temperatura y presión del sistema. La generación de energía está relacionada con su extracción (Fokker *et al.*, 2021; Ezekiel *et al.*, 2022; Fadel *et al.*, 2022). Así, el vapor y el agua pueden ser extraídos del subsuelo a través de pozos, de modo similar a la explotación petrolera (Aragón-Aguilar *et al.*, 2009; Tomasini-Montenegro *et al.*, 2017). La fase gaseosa pasa por una turbina como un generador eléctrico que permite producir electricidad (Bertani, 2005; Clauser y Ewert, 2018; Bustaffa *et al.*, 2020).

Usos de la energía geotérmica: La propuesta de generación de electricidad condiciona la cantidad de materiales logísticos, económicos y humanos para desarrollarlo, y está restringida a encontrar temperaturas suficientes que dependen principalmente de la profundidad del fluido en el sistema geotérmico (Gerber y Maréchal, 2012; Majer *et al.*, 2012; Molavi y McDaniel, 2016; Gondal *et al.*, 2017; Lu, 2018). Durante las propuestas para la instalación de un generador, es indispensable tener en cuenta características físico-químicas del fluido, y el flujo y la temperatura del recurso geotérmico (Feng *et al.*, 2020; Jolie *et al.*, 2021; Zayed *et al.*, 2023), así como las características de resistencia y fragilidad de la roca (Sawayama *et al.*, 2021; Shamoushaki *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2022). El flujo y la temperatura son importantes porque definen el posible uso de la energía (Saar, 2011), mientras que la resistencia y la fragilidad pueden afectar la permeabilidad de la roca reservorio, así como la estabilidad de los pozos (Bauer *et al.*, 2019).

El uso directo de la energía geotérmica es muy común en países como China, Estados Unidos y Suecia, principalmente para calefacción (Lebbihiat *et al.*, 2021), sin embargo, en Latinoamérica, el uso directo ha sido orientado principalmente a la recreación (*e. g.*, baños termales y turismo). En México y algunos países de Centroamérica (Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica) se cuenta con plantas geotérmicas que abastecen en promedio el 7,7 % (SICA, 2021) de la producción de electricidad (Strout, 1977; Laughlin y Goff, 1991; Barbier, 2002; Lund y Boyd, 2007; Rodríguez, 2008; Lund *et al.*, 2011; Dickson y Fanelli, 2013; Meza, 2014; Rojas-Navarrete, 2014; Wong y Tan, 2015; Giordano *et al.*, 2016; Gude, 2016; Norini *et al.*, 2019; Reyes-Martínez *et al.*, 2021). Específicamente en Colombia, los baños termales y el turismo son las formas de aprovechamiento geotérmico, aunque la posibilidad de uso potencial para la generación de energía eléctrica

ha sido reconocida ampliamente desde finales del siglo pasado (Velandia-Ramos, 2016; Moreno-Rendón *et al.*, 2020; Alfaro *et al.*, 2021; Martínez-Martínez, 2021; Martínez-Ruiz *et al.*, 2021).

En el territorio colombiano las anomalías termales principalmente asociadas con la actividad tectónica por la subducción y el arco volcánico actual activo se han agrupado en 21 áreas geotérmicas, relacionadas con 21 volcanes activos y 80 *clusters* como aproximación al potencial geotérmico de Colombia (Alfaro *et al.*, 2021). Por medio de inteligencia artificial se ha propuesto un mapa de gradiente geotérmico que muestra la distribución espacial del potencial geotérmico en todo el país, en el cual se resaltan regiones donde se deben realizar más exploraciones y recopilación de datos (Mejía-Fragoso *et al.*, 2024). Algunas de estas áreas geotérmicas pueden agruparse o detallarse, de acuerdo con la información existente. Así, proyecciones propuestas para el año 2025, con los proyectos geotérmicos Valle de Nereidas y Tufiño-Chiles-Cerro Negro en operación, sugieren que la energía geotérmica representaría el 1,65 % de la generación de energía eléctrica en el país (Salazar *et al.*, 2017). De acuerdo con estos autores, con el apoyo de legislación, incentivos y generación de conocimientos en proyectos en desarrollo, la generación de energía eléctrica geotérmica podría aumentar su participación en el sistema de generación en el país con áreas como Paipa-Iza, San Diego y Azufral.

Métodos para la exploración geotérmica

La metodología para realizar exploración geotérmica se inspira en el planteamiento de un modelo general del sistema geotérmico, conocido como modelo geotérmico conceptual, que comprende los siguientes elementos esenciales: 1) la existencia de una fuente de calor relativamente somera con una capacidad térmica suficiente para calentar un volumen importante de rocas de la zona superficial de la corteza terrestre, lo cual es evidente con la presencia de fuentes termales, fumarolas y volcanes. 2) La existencia de un reservorio en el cual circulen fluidos geotérmicos, suficientemente superficiales para ser alcanzados por perforaciones de profundidad moderada (~3 km). Este reservorio presenta permeabilidad elevada que puede estar asociada con intenso fracturamiento. 3) El sistema de recarga de fluidos para el reservorio. Y 4) una cobertura impermeable encima del reservorio lo suficientemente espesa para proteger el reservorio de la infiltración de aguas frías meteóricas. Así, el modelo geotérmico de un área será definido cuando exista la información relevante referente a: 1) la presencia y origen de anomalías térmicas, 2) las características de la formación de cobertura o roca sello, 3) el modelo de

circulación general de agua, y 4) el tipo y características del reservorio. Un modelo robusto permitiría planificar un programa de perforación adecuado dirigido a probar la validez del modelo.

Con base en lo anterior, existen varias metodologías para obtener información del subsuelo y caracterizar áreas de interés como posibles sistemas geotérmicos. En general, se propone que las metodologías se basen en estudios geológicos de superficie, cartografía detallada y análisis geofísicos desarrollados en un área general, lo cual permite profundizar en el conocimiento de áreas de interés geotérmico para posteriores análisis sistemáticos detallados. La información técnica y científica puede incluir datos generales como la delimitación geográfica (ubicación y extensión), anomalías geofísicas, y datos estructurales y geoquímicos. A continuación, se mencionan los estudios principales que permiten caracterizar un sistema geotérmico.

Estudios geológicos

En la exploración geotérmica se llevan a cabo estudios geológicos como estratigrafía y geología estructural, para delimitar la extensión de unidades geológicas y mineralógicas presentes, lo cual permite aportar al entendimiento del modelo del yacimiento en el subsuelo (van der Meer *et al.*, 2014). Los análisis de discontinuidades tectónicas (fracturas y fallas) buscan caracterizar los flujos de calor y masa en el sistema con respecto a las estructuras geológicas y la distribución de permeabilidad (Altmann *et al.*, 2014). Por ejemplo, para el caso del área geotérmica Lahendong, Indonesia, existe un mapeo geológico-estructural, muestreo hidroquímico y análisis de datos de pozos que se usaron para comprender de manera integral la dinámica del yacimiento desde el inicio de la producción (Suherlina *et al.*, 2022). Este estudio validó abundantes tendencias de fallas controlando el flujo de fluidos en el campo. Una falla inversa con tendencia NW-SE permite que los fluidos ingresen a una zona de producción cerca de los pozos en el yacimiento sur. Por otro lado, una falla de rumbo NE-SW parece ser una barrera para el flujo de fluidos. Las fallas menos dominantes en dirección NS y EW permiten el flujo hacia los pozos de producción en el área norte.

Conforme avanza el entendimiento de cualquier sistema geotérmico en determinada área, se implementan mejoras técnicas en los procesos. Por ejemplo, para el caso de campos geotérmicos de Ahuachapán y Berlín, El Salvador, estudios asociados con la estimulación química en muestras de núcleos de diferentes rocas volcánicas fracturadas (Salalá *et al.*, 2023), demostraron que la permeabilidad de las rocas volcánicas fracturadas

puede mejorar rápida y sustancialmente, hasta cuatro veces por medio de estimulación química mediante la disolución selectiva de fenocristales minerales ricos en Fe (e. g., piroxeno, olivino y hematita), lo que creó cavidades resistentes a los esfuerzos.

Estudios hidrogeoquímicos

Los métodos geoquímicos se utilizan ampliamente en la prospección preliminar, exploración y explotación de recursos geotérmicos (Marini, 2000). El principal objetivo es obtener las propiedades físico-químicas de los fluidos que brindan información de la temperatura, el origen, la dirección de flujo de las aguas termales en profundidad y la interacción roca-fluido (Shah *et al.*, 2015). Los manantiales termales en superficie son la principal conexión con los sistemas geotérmicos en profundidad. Algunas áreas geotérmicas se utilizan con fines de balneario y calefacción geotérmica, como es el caso del campo geotérmico de Reşadiye en Turquía, desde 1992, el cual cuenta con temperaturas en superficie entre 38 y 49 °C. Estudios geoquímicos realizados en sus aguas termales permiten clasificarlo como un sistema de zona de fractura de baja temperatura con flujo ascendente convectivo y transferencia de calor conductiva dominante con residencia corta (Pasvanoğlu, 2021).

Los sistemas geotérmicos convectivos están asociados con la actividad volcánica y tectónica en el Cuaternario, principalmente, como es el caso de Cerro Galán, Argentina, donde se ubican algunas fuentes termales sobre fallas dentro de la estructura de caldera. Análisis isotópicos (Chiodi *et al.*, 2024) indican que se presenta una mezcla entre fluidos manto/magmáticos y agua meteórica superficial, lo cual genera un acuífero hidrotermal que alcanza temperaturas de hasta 187 °C en profundidad.

Estudios detallados pueden ser usados para delimitar y comprender mejor el acuífero, como es el caso de áreas geotérmicas en Indonesia, en donde se encuentran agrupados en el borde de la falla de Java Occidental. Estudios geoquímicos (Shoedarto *et al.*, 2021) han mostrado, por ejemplo, cómo en los límites de un acuífero geotérmico a menudo se tiene una mayor concentración de estroncio (Sr) debido a la intensa interacción agua-roca con tiempos de residencia más largos o trayectorias de flujo más profundas. Para este caso, se considera que una zona permeable probablemente se formó por una intersección de las fallas regionales.

Algunos manantiales geotérmicos se encuentran generalmente a lo largo de las principales tendencias tectónicas como límites de placas, márgenes continentales

y estructuras fracturadas, como es el caso de áreas geotérmicas en la India (Das *et al.*, 2022). De acuerdo con estos autores, las aguas termales de casi todos los sistemas hidrotermales de la India, a pesar de ser consideradas jóvenes (~60 años), tienen un movimiento lento en su circulación subsuperficial (>50 años).

Estudios geofísicos

La información base del subsuelo se obtiene por medio de estudios geofísicos relacionados principalmente con análisis geológicos y estructurales (Sáez-Blázquez *et al.*, 2022). Estudios de gravimetría permiten delimitar fallas regionales y el basamento (Yáñez *et al.*, 2015), mientras que los de magnetometría permiten definir el espesor y cobertura sedimentaria (Irumhe *et al.*, 2019). También, los métodos eléctricos permiten definir el área y la geometría del yacimiento geotérmico (Thanassoulas, 1991), y los sismológicos, la estratigrafía y geología estructural que enmarcan la zona (Liu y Long, 2022).

En general, estos estudios han sido realizados en zonas geotérmicas de diferentes partes del mundo, incluida Latinoamérica. Por ejemplo, en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes, en México, se han realizado estudios cartográficos de la geología superficial desde el año 1983, los cuales han permitido definir la geología y estratigrafía de la zona (Avellán *et al.*, 2019; Sosa-Ceballos *et al.*, 2019). Estudios geofísicos realizados en este campo han delimitado áreas de mayor interés asociadas con fallas, que permitieron la propuesta y perforación de pozos desde el año 2001 (Ortiz-Prieto y Lorenzo-Pulido, 2009). Perfiles de reflexión sísmica y nuevos datos de gravimetría correlacionados con el pozo exploratorio El Azufre, han permitido proponer tres áreas de oportunidad para expandir el potencial geotérmico en este complejo volcánico (Casallas-Moreno *et al.*, 2021).

En Argentina, estudios geofísicos de gravedad y magnetismo realizados en el eje energético de la Puna Central han permitido relacionar máximos de anomalía de gravedad regionales con depósitos de ignimbritas y depósitos volcánicos indiferenciados; de hecho, los mínimos de las anomalías magnéticas se han correlacionado con depósitos de ignimbrita dacítica con alteración argílica, que permiten delimitar áreas de mayor interés geotérmico en un entorno volcánico (Ahumada *et al.*, 2023).

En Chile, análisis de tomografía de resistividad eléctrica y métodos de ruido sísmico relacionados con las propiedades físicas del agua, como la temperatura, han permitido realizar interpretaciones geológicas de centenas de metros del subsuelo y proponer relaciones entre sistemas geotérmicos con sistemas de fallas (Pérez-Estay *et al.*, 2022).

También, se han realizado diversos análisis detallados de lineamientos en volcanes asociados con campos geotérmicos como Eritrea (Caldera Nabro, Gauntlett *et al.*, 2022), Nueva Zelanda (Caldera Okataina, Pearson-Grant *et al.*, 2022) e Indonesia (volcán Monte Sinabung, Tampubolon *et al.*, 2023); esto permite sugerir explicaciones para anomalías geofísicas y contrastes interpretados en estudios geofísicos. En la Caldera Nabro, la relación entre velocidades sísmicas VP/VS muy baja se interpreta como una roca intrusiva, mientras que una relación alta se interpreta como una región de almacenamiento de magma (Gauntlett *et al.*, 2022). En la Caldera Okataina, modelos de resistividad MT han permitido delinear anomalías y fuentes de calor a 5 km de profundidad (Pearson-Grant *et al.*, 2022). En el volcán Monte Sinabung, anomalías del campo magnético bajo son correlacionadas con manifestaciones volcánicas en el sistema geotérmico (Tampubolon *et al.*, 2023).

Estudios térmicos

La temperatura en superficie y fuentes termales son usadas para delimitar áreas de interés geotérmico, ya que estudios superficiales de temperatura permiten priorizar zonas de análisis (Bodvarsson *et al.*, 1986; Beier, 2021). También, esta información obtenida en pozos permite modelar gradientes de temperatura en determinada área (Agemar *et al.*, 2012; Shahdi *et al.*, 2021; Mejía-Fragoso *et al.*, 2024). De esta manera, se han llevado a cabo diversos modelamientos con perfiles de temperatura y mapas de distribución de anomalías de calor en áreas geotérmicas de interés internacional, por ejemplo, en el sistema geotérmico del volcán Kuju, suroeste de Japón (Kitamura *et al.*, 2023). Estos modelamientos fueron realizados teniendo en cuenta estudios geofísicos (Mogi y Nakama, 1993) que permitieron proponer la estructura térmica mediante la compilación de datos de registro de pozos existentes junto con la estructura de resistividad eléctrica reportada (Kitamura *et al.*, 2023). Estos autores integran la información existente y proponen una región de alta temperatura como un reservorio geotérmico candidato para una zona desarrollable entre 2 y 4 km de profundidad.

En sistemas geotérmicos conductivos asociados principalmente con cuencas sedimentarias, se han realizado también caracterizaciones de gradientes geotérmicos y datos de flujo de calor acorde con registros de pozos y características litológicas (Brown, 2022). Un caso exitoso ocurrió en la cuenca de Erlan, China, la cual se caracteriza por un alto gradiente geotérmico (29,6 °C/km y 51,4 °C/km) y flujo de calor (Xu *et al.*, 2021). De acuerdo con estos autores, los patrones espaciales de gradiente geotérmico y flujo de calor muestran que se producen zonas anómalas (40 a 60 °C/km) en las depresiones de Manite, Uliastai y Chuanjing.

Estas anomalías son consistentes con la distribución de los volcanes Cenozoicos y un cuerpo intrusivo, los cuales proporcionan una fuente de calor al sistema.

En países pioneros con desarrollo geotérmico como Italia (Parri *et al.*, 2021; Montanari *et al.*, 2023), se ha integrado información existente para realizar campañas de exploración de recursos geotérmicos. Estudios recientes, por medio de huellas de fisión en rocas superficiales, realizan termocronología, y han obtenido edades que se pueden relacionar con la edad de cuerpos intrusivos, lo cual permite sugerir la edad del aporte de calor asociado con intrusiones y circulación hidrotermal asociada (Montanari *et al.*, 2023). Por medio de modelado geológico y térmico, y geofísicos de gravedad, se generan mapas de temperatura y flujo de calor (Florida *et al.*, 2022). Como resultado de esta correlación, se propone que algunas anomalías térmicas presentes en un basamento cristalino sugieren una elevada producción de calor radiogénico dentro de estas rocas como proceso geotérmico. Además, el aumento del gradiente térmico por debajo de los 5 km puede correlacionarse con una elevada producción de calor radiogénico a partir de un basamento cristalino relativamente grueso.

Métodos y caso de estudio

Caracterización geotérmica regional

Para evaluar adecuadamente el estado térmico de una región, es fundamental tener una imagen completa de su configuración geológica. De acuerdo con lo descrito anteriormente, se realizó una revisión de literatura técnica y científica conformada por artículos e informes públicos, lo cual permitió la categorización de las áreas geotérmicas propuestas en el país de acuerdo con su origen y ubicación geográfica.

Caso de estudio

En este ítem se presenta el área geotérmica volcán Nevado del Ruiz (Figura 1) como caso de estudio, de acuerdo con trabajos previos. Estos trabajos corresponden principalmente a artículos científicos con reportes de análisis químicos en aguas, medidos entre 1982 y 2014 (Material Suplementario 1) y publicados entre 1983 y 2022 (*e. g.*, CHEC *et al.*, 1983; Taborda *et al.*, 2022). Cada dato fue ubicado geográficamente para esclarecer a qué referencia geográfica se relaciona, y se presenta en los resultados de manera ordenada.

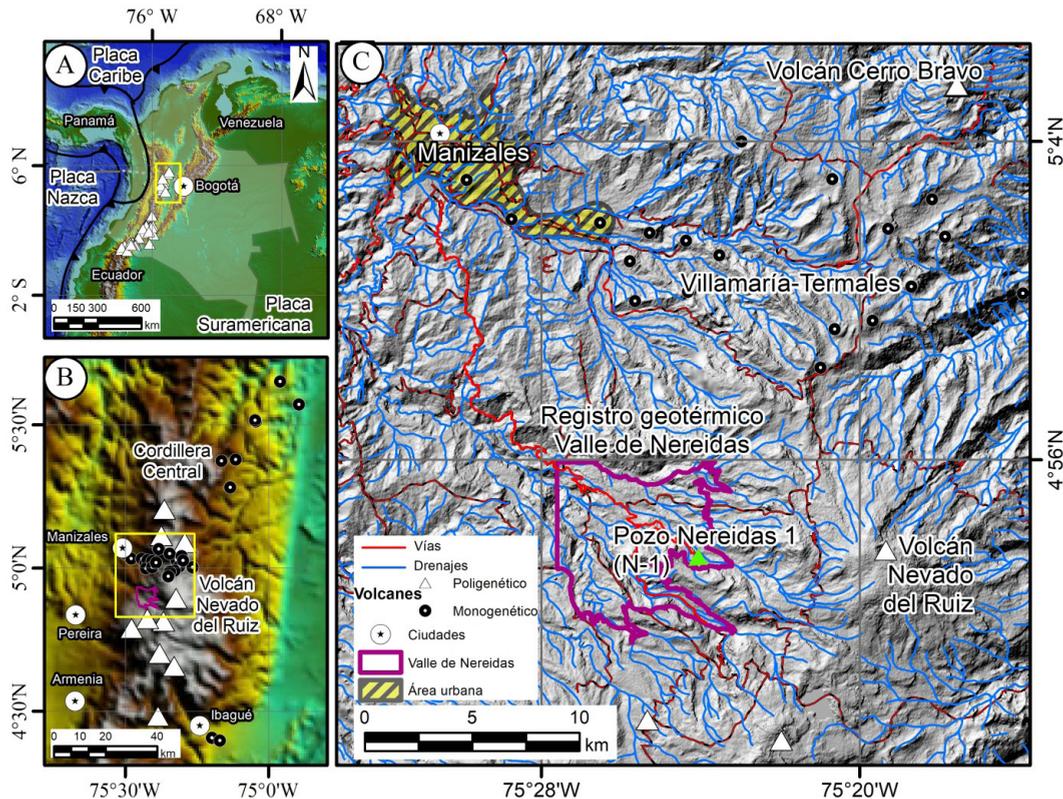


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. **A.** Configuración tectónica del norte de Suramérica (el polígono amarillo delimita la figura B). **B.** Provincia volcánico-tectónica San Diego-Cerro Machín (el polígono amarillo delimita la figura C). **C.** Zona de interés donde se ubica la ciudad de Manizales y los volcanes Nevado del Ruiz y Cerro Bravo como referentes geográficos. Círculos negros: volcanes monogenéticos; triángulos blancos: volcanes poligenéticos; triángulo verde: Pozo Nereidas 1 (N-1). Las líneas rojas representan vías, mientras que las líneas azules representan los drenajes.

Posteriormente, se analizan estos datos y se presenta una síntesis composicional de las características químicas y físicas (Material Suplementario 1) de las aguas alrededor del volcán Nevado del Ruiz, de acuerdo con los sectores asociados a sus flancos como punto de partida para posteriores investigaciones.

Modelo conceptual

En este ítem se propone un modelo conceptual del sector NWW, correspondiente al Valle de Nereidas. Para comprender el sistema geotérmico se tuvo en cuenta: 1) la geología del macizo rocoso, donde se resaltan los espesores de las rocas y depósitos superficiales, así como los sistemas de fallas y las alteraciones hidrotermales cartografiadas en el área. La geología superficial y el trazo de las fallas geológicas fueron tomadas de Botero-Gómez *et al.* (2023). 2) Datos hidrogeoquímicos existentes en el área relacionados con pH, temperatura y valores de aniones y cationes, lo que permitió delimitar sectores con base en características geográficas y fisicoquímicas del agua. 3) Datos geofísicos publicados asociados con la delimitación de los sistemas de conductos volcánicos y actividad sísmica; los primeros corresponden a la fuente de calor y los segundos, a rocas fracturadas permeables. La integración de esta información permitió proponer áreas con mayor permeabilidad, alteraciones hidrotermales y patrones de flujo geotérmico que aportaron a la conceptualización del sistema geotérmico: roca reservorio, ubicación de anomalías termales, roca sello y circulación general de agua.

Recursos geotérmicos en Colombia

Colombia cuenta con recursos energéticos, evidenciados en el desarrollo de termoeléctricas e hidroeléctricas que suministran el 29 y 67 %, respectivamente, de la energía eléctrica que el país genera (Boada-Herrera *et al.*, 2018). De esta manera, el potencial eléctrico colombiano está dominado por energías renovables, que hasta hace poco representaba alrededor del 80 %, asociado principalmente a la producción hidroeléctrica (Gómez-Navarro y Ribó-Pérez, 2018). Además, Colombia cuenta con recursos adicionales de energía eólica, fotovoltaica solar, biomasa y geotérmica (Gómez-Navarro y Ribó-Pérez, 2018; Raihan, 2023). El potencial geotérmico está asociado principalmente con el arco volcánico activo (Lequerica-Torres, 2008; Vieira y Hamza, 2014; Aguilera *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2019; Moreno-Rendón *et al.*, 2020; Rodríguez-Pantano *et al.*, 2020; Bravo-López *et al.*, 2022; Sánchez *et al.*, 2022), pero también en zonas alejadas de este, como es el Área Geotérmica Paipa-Iza, ubicada en la Cordillera Oriental (*e. g.*, Alfaro *et al.*, 2017). En su mayoría, estas áreas

están asociadas con sistemas convectivos, pero también pueden estar asociadas con zonas de fallas y cuencas sedimentarias (sistemas conductivos) relacionadas con anomalías geotérmicas.

Específicamente, el aprovechamiento de esta energía generada en zonas volcánicas se ha limitado al uso privado a pequeña escala (*e. g.*, calefacción, piscinas termales y turismo); no obstante, existen también proyectos geotérmicos para la generación de energía como el del Valle de Nereidas en el volcán Nevado del Ruiz (Figura 1C), con décadas de ejecución en la zona y que ha sido pionero en el país.

Áreas geotérmicas relacionadas con el vulcanismo Neógeno-Cuaternario

Las áreas geotérmicas reconocidas en el país están relacionadas con anomalías geotérmicas asociadas con el vulcanismo. Así, teniendo en cuenta que las fuentes termales reconocidas en el territorio colombiano son la representación directa en superficie de recursos y potencial geotérmico, estas se pueden agrupar de acuerdo con su origen o cercanía a sus anomalías de calor. En sentido norte a sur, estas corresponden a las áreas geotérmicas: Paipa-Iza, San Diego-Puente Linda, Cerro Bravo-Cerro Machín, Huila-Sucubún y Las Ánimas-Chiles.

Área geotérmica Paipa-Iza: ubicada en la Cordillera Oriental, incluye tanto el área geotérmica de Paipa como el área geotérmica de Iza. En el área de Paipa existen manifestaciones geotérmicas superficiales asociadas con seis áreas prospectivas (Alfaro *et al.*, 2017; Calderón-Chaparro y Vargas-Cuervo, 2019). En general, se conoce que existen cuerpos conductores al centro-oeste del área, aparentemente controlados por fallas de bajo ángulo asociadas con el tránsito de fluidos hidrotermales hacia las zonas de descarga (González-Idárraga, 2020). En el área de Paipa el aporte de calor está asociado a domos de lava y depósitos volcánoclasticos que tuvieron actividad entre 5,8 y 1,8 Ma atrás (Bernet *et al.*, 2016; Rueda-Gutiérrez, 2020; García *et al.*, 2022). En el área de Iza se encuentra una brecha intrusiva y un criptodomo (Monsalve *et al.*, 2011b), los cuales explicarían el aporte de calor. Ambas áreas, ubicadas en un ambiente dominante de rocas sedimentarias Cretácicas (Alfaro *et al.*, 2010), tienen la fuente de calor asociada con el magmatismo que generó los productos volcánicos presentes en la zona.

Área geotérmica San Diego-Puente Linda: esta área geotérmica se encuentra ubicada al norte de la Provincia volcano-tectónica San Diego-Cerro Machín (Murcia *et al.*, 2019) y ha sido relacionada con los volcanes San Diego (Borrero *et al.*, 2017) y El Escondido (Sánchez-

Torres *et al.*, 2019). En el área se conocen estudios sobre el potencial geotérmico con potencias eléctricas de 141,85 MWe (Rueda-Gutiérrez y Rodríguez, 2016; Alfaro *et al.*, 2021). Adicional a esta, se incluye el área geotérmica Puente Linda, la cual ha sido relacionada con una roca intrusiva del mismo nombre, y su anomalía geotérmica, con rocas fracturadas por zona de falla NE-SW Río Dulce (Moyano *et al.*, 2018; Alfaro *et al.*, 2021). Para ambas áreas el aporte de calor se asocia con el magmatismo asociado al vulcanismo monogenético presente en la zona (Samaná, Sánchez-Torres *et al.*, 2022).

Área geotérmica Cerro Bravo-Cerro Machín: se encuentra ubicada en la Cordillera Central (Alfaro-Valero y Aguirre-Corrales, 2006) y está asociada a volcanes poligenéticos activos y a la manifestación en superficie de fuentes termales denominadas áreas geotérmicas (*e. g.*, volcán Cerro Bravo, Nevado del Ruiz y Cerro Machín). Para el caso del volcán Nevado del Ruiz, estudios en zonas de fallas (Mejía *et al.*, 2012) proponen que el actual campo de esfuerzos y las distintas fracturas asociadas con la deformación frágil favorecen el tránsito de fluidos, como el agua termal. En la zona se ha propuesto el área geotérmica Villamaría-Termal (Alfaro *et al.*, 2021), la cual ha sido relacionada con el sistema de fallas NW-SE Villamaría-Termal (González y Jaramillo, 2002; Gómez-Zamorano, 2014). El área se encuentra bajo la influencia del campo volcánico monogenético Villamaría-Termal (<2 Ma) (Botero-Gómez *et al.*, 2018; Osorio *et al.*, 2018; Salazar-Muñoz *et al.*, 2021) y del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (Ceballos-Hernández *et al.*, 2020), y presenta fuentes termales asociadas de hasta 60 °C de temperatura (Alfaro *et al.*, 2002). Estas fuentes termales las cuales se encuentran ubicadas en zonas de dilatancia estructural (Botero-Gómez *et al.*, 2023) están emplazadas en rocas metamórficas Triásicas, y el aporte de calor se asocia además con el vulcanismo monogenético presente en la zona (Villamaría-Termal, Botero-Gómez *et al.*, 2023); se resalta además otras posibles áreas de interés con campos volcánicos recientemente reconocido en el país (*e. g.* Tapias-Guacaica, Vargas-Arcila *et al.*, 2023). Para el Cerro Machín (Piedrahita *et al.*, 2018; Rodríguez-Pantano, 2021; Londoño, 2022; Pedraza *et al.*, 2022) se relacionan zonas fracturadas con mezcla de aguas termales y meteóricas o superficiales (Cerpa-Londoño, 2018; Gómez-Díaz, 2020; Gómez-Díaz y Mariño-Arias, 2020). En general, el conjunto de las áreas incluidas (*e. g.*, Santa Rosa, Otún, Nevado del Tolima) se encuentra emplazado en rocas metamórficas Triásicas, y el aporte de calor se asocia con las cámaras magmáticas de dichos volcanes.

Área geotérmica Huila-Sucubún: esta área geotérmica se encuentra ubicada en la Cordillera Central, asociada con volcanes poligenéticos como el volcán Nevado del Huila (Cardona *et al.*, 2009; Londoño y Cardona, 2010; Monsalve *et al.*, 2011a, 2015; Pulgarín *et al.*, 2015; García *et al.*, 2019), las calderas Gabriel López, Paletará y el Complejo Volcánico Sotará-Sucubún (Pulgarín *et al.*, 2010; Alpala *et al.*, 2017; Alfaro *et al.*, 2021) y las fuentes termales denominados como áreas geotérmicas. Para el volcán Puracé (López-Castro, 2009; Monsalve y Arcila, 2009; Meza-Maldonado *et al.*, 2017; Alpala *et al.*, 2018; Gómez-Díaz y Marín-Cerón, 2018; Londoño, 2018; Torres-Cerón *et al.*, 2019; Inguaggiato *et al.*, 2020), ubicado dentro de la Caldera Paletará (Torres *et al.*, 1999; Samacá-Torres, 2016), el potencial geotérmico total estimado es de 360 MW, el cual se puede comparar con otros sistemas geotérmicos (Meza-Maldonado *et al.*, 2017). En general, el conjunto de estas áreas se encuentra emplazado en rocas metamórficas Triásicas y granodioritas Pérmicas, y el aporte de calor se asocia con cámaras magmáticas de dichos volcanes.

Área geotérmica Las Ánimas-Chiles: esta región de interés está en las cordilleras Central y Occidental en el sur del país, y engloba las áreas geotérmicas asociadas con los volcanes de esta región (Escobar-Ramos, 2020) y las fuentes termales denominados como áreas geotérmicas. Acorde con Velandia *et al.* (2008), los depósitos volcánicos aflorantes en el Altiplano Nariñense han sido el producto de diversos focos, tanto colombianos como de la Cordillera Real Ecuatoriana. Algunos de estos volcanes son: Doña Juana (Navarro *et al.*, 2009; Bucheli-Olaya, 2020; Calderón-Zamudio, 2021), Las Ánimas (García-Gamba, 2020; Aldana-Lozano, 2022), Galeras-Morasurco (Fischer *et al.*, 1996, 1997; Sano *et al.*, 1997; Duque-Trujillo *et al.*, 2010; Londoño *et al.*, 2020; Alfaro *et al.*, 2021; Taussi *et al.*, 2023; Bolaños-Cabrera *et al.*, 2024), Sibundoy (Ramírez-Espitia, 2021; Rivera-Lara, 2021; Murillo-Orobio *et al.*, 2024; Toro *et al.*, 2025), Azufral (Alfaro *et al.*, 2008, 2015; Carvajal *et al.*, 2008; Moreno-Alfonso *et al.*, 2021; Rodríguez-Rodríguez, 2023), Cumbal (Lewicki *et al.*, 2000) y Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro (García y Sánchez, 2019). Este último Complejo actualmente se asocia con un sistema geotérmico de interés internacional (Ecuador-Colombia, Coviello, 2020; Taussi *et al.*, 2023). En general, estas áreas se encuentran emplazadas en rocas metamórficas Triásicas, y el aporte de calor se asocia con cámaras magmáticas de dichos volcanes.

Áreas relacionadas con sistemas conductivos o cuencas sedimentarias

Estas áreas se asocian a cuencas sedimentarias y, por ende, a su gradiente geotérmico. Este gradiente geotérmico puede ser aprovechado por medio de aguas de coproducción en los sistemas de perforación de hidrocarburos que presentan temperaturas entre 42 y 179 °C (Cano *et al.*, 2022). Estas áreas presentan ventaja respecto a las anteriores, por ejemplo: 1) infraestructura petrolera existente, 2) tecnologías de producción ya establecidas, 3) experiencia del campo e información del reservorio, 4) uso futuro en explotación geotermal que incrementaría tanto la vida del campo petrolero como la recuperación del hidrocarburo, y 5) interés por parte de compañías petroleras en el uso de energía geotérmica. Las principales cuencas de interés son: Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental y Llanos Orientales (González *et al.*, 2020; Urueña-Suárez *et al.*, 2020; Macellari, 2021). Para el caso de esta última, Parex Resources Inc., en Yopal, utiliza un proceso pionero en Colombia, que da lugar a la extracción de hidrocarburos y a la generación de electricidad (Céspedes *et al.*, 2022). En general, estas áreas pueden tener alto potencial en lugares con pozos de petróleo y gas, debido a la información que se obtiene (Aguilera *et al.*, 2019; López-Ramos *et al.*, 2022).

Para terminar, se presenta una tabla resumen (Material Suplementario 2), en la cual se enlista la anterior información y se compara con la información generada de otras áreas geotérmicas del país.

Área geotérmica Volcán Nevado del Ruiz

Este proyecto geotérmico está ubicado en la Cordillera Central de Los Andes Colombianos, norte de América del Sur, a 35 km de la ciudad de Manizales, Caldas. El proyecto, cuenta con un área aproximada de 54 km², y es fácilmente accesible desde vías conectadas a la Ruta Nacional 50 en dirección al Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. La zona de interés se encuentra localizada en el sector del Valle de Nereidas, municipio de Villamaría, Caldas, en el flanco occidental del Complejo (Figura 1).

Este proyecto se encuentra debidamente licenciado para las actividades de exploración por el Ministerio de Medio Ambiente, mediante la Resolución 211 de 1994, y posee una restricción cercana a la cota 3600 m s. n. m., que corresponde a la línea de Páramo la cual es una zona de conservación (Figura 1). Este proyecto inició la etapa de reconocimiento desde inicios de los años 70. En 1994 se obtuvo la licencia ambiental que permitió la primera perforación, en 1997, en el sector de Nereidas, Villamaría (Caldas) (Alfaro *et al.*, 2021). En este año, la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), empresa encargada de la generación y suministro de

energía eléctrica de la región, realizó la perforación del primer pozo geotérmico en el país, que alcanzó una profundidad de 1469 m (Monsalve *et al.*, 1998), con un registro de temperatura en fondo de pozo de 200 °C.

Posterior a la perforación mencionada, se han llevado a cabo consultorías, alianzas institucionales y vinculaciones con universidades locales que han permitido avanzar en temas geológicos y ambientales, y proponer modelos geológicos conceptuales. Así, actualmente se sugiere la existencia de varias cámaras magmáticas a 2 km, 4 km, 9 km y 11 km de profundidad respecto a la superficie del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (Zollweg, 1990; Londoño y Sudo, 2001, 2003; Rojas-Sarmiento, 2012; Almaguer-Rodríguez, 2013; González-García *et al.*, 2015; Lundgren *et al.*, 2015; González-García y Jessell, 2016; Londoño, 2016).

El análisis de fracturas en esta misma área permite afirmar que las redes de fracturas presentes en las rocas favorecen el flujo de fluidos del subsuelo, lo que podría evidenciarse con fuentes termales que en su mayoría se ubican en áreas de alta conectividad (Urrea *et al.*, 2024). De acuerdo con estos autores, las rocas metamórficas en el área presentan mayor conectividad e intensidad de fractura, lo que, combinado con la foliación presente, incrementa su permeabilidad efectiva. A su vez, se sugiere que las diferentes fracturas presentes en la región, como facilitadoras para el transporte de fluidos geotérmicos en el área (Pareja y García, 2013; Macías-Villarraga y Granja-Rodríguez, 2020). Específicamente, las fuentes termales conocidas como La Gruta y Aguas Calientes, se asocian con fluidos que ascienden debido a la interacción de las fallas Villamaría-Termales con la falla Picoterrible, las cuales generan sintaxis tectónica dilatacional en la zona (Botero-Gómez *et al.*, 2023).

El sistema hidrotermal se asocia con intrusiones magmáticas de acuerdo con estudios geofísicos (González-García *et al.*, 2015; Londoño y Kumagai, 2018) y el registro litológico del pozo Nereidas 1 (N-1) (Monsalve *et al.*, 1998; González-García y Jessell, 2016). De acuerdo con estudios de las propiedades de las rocas en el flanco oeste del volcán, en el área del Valle de Nereidas, las rocas metamórficas presentan baja permeabilidad y mayor conductividad en relación con las demás rocas del área (Oviedo *et al.*, 2023). En este mismo sentido, se han realizado estudios de caracterización de alteraciones hidrotermales que resaltan la alteración argílica avanzada e intermedia en el sector NE del volcán (Forero *et al.*, 2011; Forero-Herrera, 2012). De acuerdo con los autores, en rocas del área de interés se evidencian minerales como sulfuros, mercallita, cuarzo y cristobalita, asociados con alteración ácida y neutral.

Recientemente, se han desarrollado nuevas investigaciones que han permitido estimar caudales (Román-González, 2021; Cardona-Cardona, 2023), cartografiar alteraciones hidrotermales (Forero-Herrera, 2012), fuentes de aguas termales (González-Partida *et al.*, 1997; Inguaggiato *et al.*, 2015), fallas geológicas (Botero-Gómez *et al.*, 2023) y unidades geológicas en general (Díaz-Gil y Aguirre-Hoyos, 2014; Vega-Salazar, 2014; Ossa, 2018; Ordóñez *et al.*, 2022; Oviedo *et al.*, 2023; Quiroz-Yandun, 2024). Análisis geofísicos como sismológicos y gravimétricos realizados en la zona (Londoño, 1996, 2016; González-García *et al.*, 2015; González-García y Jessell, 2016; Vargas *et al.*, 2017, 2019; Londoño y Kumagai, 2018), así como análisis puntuales de magnetotelúrica en zonas de daño de falla (Almaguer-Rodríguez, 2013; Ayala, 2014), permiten sugerir porosidades más altas en el sector suroriental de la falla Nereidas en comparación con el sector noroccidental (Ayala, 2014). Asimismo, se han desarrollado análisis químicos y de temperatura alrededor del complejo volcánico, principalmente en fuentes termales y en gases (González-Partida *et al.*, 1997; Cervantes, 2019), lo que ha permitido proponer un potencial para generación de electricidad de por lo menos 50 MW, con un factor de planta del 90 %, que genera 32,4 GWh-mes o 394,2 GWh-año, para un poco más de 350.000 familias por mes (Velásquez-Piedrahita, 2015; Ortiz y López, 2023; Ortiz-González, 2023; Ortiz-González y López-Palacio, 2023).

Valle de Nereidas

Geología del macizo rocoso

La morfología del territorio es de alta montaña, entre 2500 y 3600 m s. n. m., tiene fuertes pendientes y están matizadas por zonas planas formadas por productos volcánicos del Nevado del Ruiz (Figura 2A). Las zonas escarpadas (Figura 2B) corresponden en algunos casos a zonas de daño asociadas con sistemas de fallas reconocidas regionalmente. Las unidades de rocas que afloran en el área de estudio y sus alrededores son, en el orden de la más antigua a la más joven, rocas metamórficas Triásicas asociadas con el Complejo Cajamarca, rocas Cretácicas sedimentarias del Complejo Quebradagrande y productos Cenozoicos como flujos de lava, domos de lava, depósitos volcánoclasticos y depósitos no consolidados fluviales y coluviales (Figura 2C). Las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, compuestas por esquistos verdes y negros, y también cuarcitas, se encuentran suprayacidas por rocas volcánicas de flujos de lava y depósitos volcánoclasticos con espesores entre 400 y 600 m, mientras que las rocas sedimentarias del Complejo Quebradagrande, compuestas de meta-lodolitas negras y grises, principalmente, se encuentran suprayacidas por depósitos volcánoclasticos con espesores de al menos 100 m.

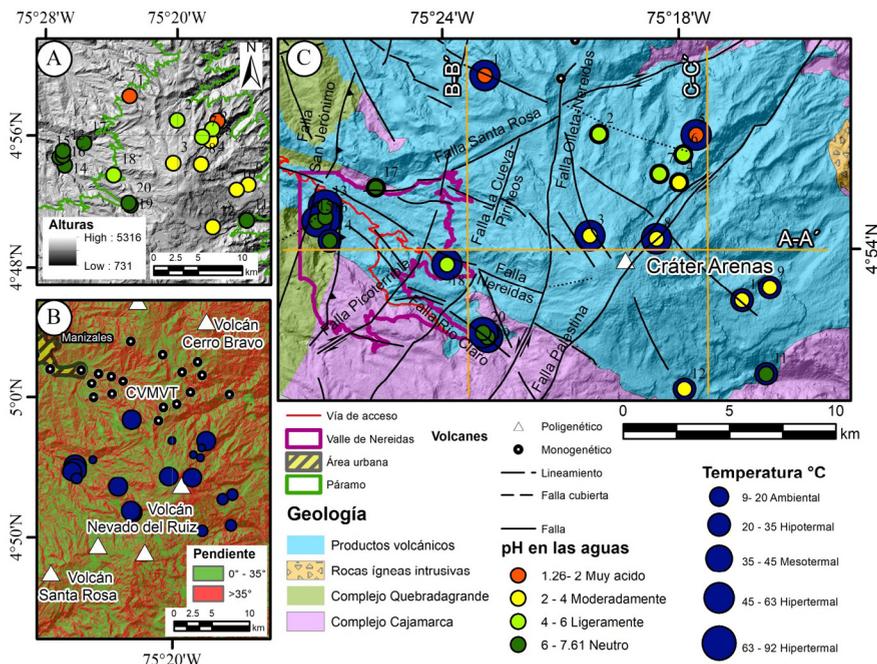


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio y fuentes termales reportadas. **A.** Modelo de elevación digital del terreno con una resolución de 12,5 m sobre el que se ubican las fuentes termales: coloración de acuerdo al pH de las aguas. Zona de páramo en inmediaciones con el volcán Nevado del Ruiz. **B.** Mapa de pendientes donde se ubican los volcanes en la zona; además se presentan de color rojo las pendientes altas (>35°) sobre el que se ubican las fuentes termales. El tamaño del círculo se relaciona con el rango de temperatura de las aguas. **C.** Mapa geológico de la zona de interés donde se presentan fallas y unidades litológicas (adaptado de Botero-Gómez *et al.*, 2023).

Estructuralmente, en la zona se presentan dos sistemas de fallas predominantes: un sistema con orientación NW-SE, el cual tiene cinemática transcurrente sinistral y una componente en buzamiento probablemente normal; a este sistema pertenecen las fallas Villamaria-Termalés, Río Claro y Nereidas. Y un sistema con orientación NE-SW, el cual tiene cinemática transcurrente dextral; a este sistema pertenecen las fallas Santa Rosa, Picoterrible, La Cueva-Pirineos y Palestina.

En conjunto, la litología y la presencia de fallas sugiere que un posible reservorio geotérmico se encuentra emplazado en estas unidades fracturadas y muy probablemente está asociado a un control estructural y de

permeabilidad relacionados con sistemas de fallamiento en dirección NW-SE que son cortados por fallas regionales N-S como la falla San Jerónimo (Figura 2C). Las intersecciones de estos sistemas de fallas permiten el aumento de permeabilidad en las rocas.

Hidrogeoquímica

Teniendo en cuenta la altura de la zona y la delimitación geográfica de páramo (Figura 2A), la recarga de agua corresponde a lluvias en la zona, es decir, a aguas meteóricas (Figura 3), lo cual no está restringido a la zona de páramo, sino a la región en general y al subsuelo cerca de superficie; esto se denomina flujo meteórico.

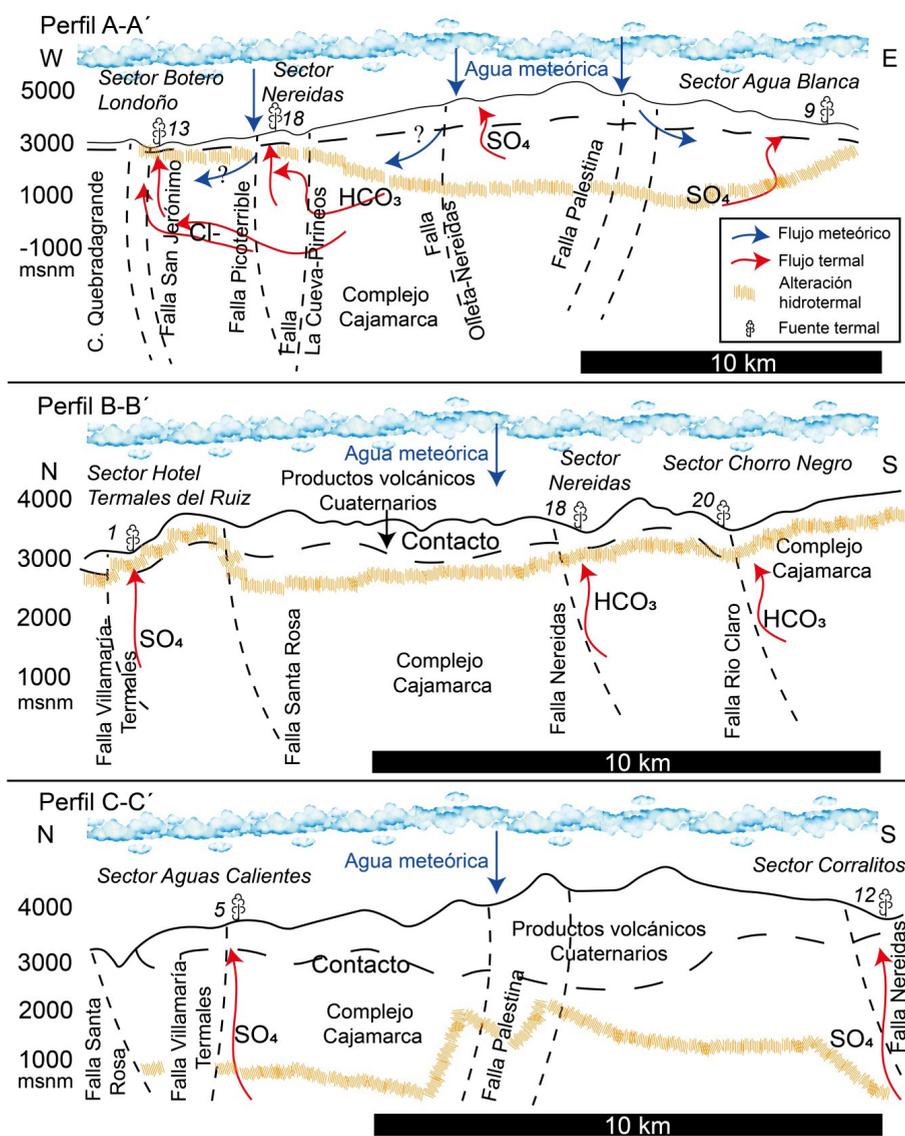


Figura 3. Patrón de circulación en el sistema geotérmico Nevado del Ruiz, en el cual se ubican fallas y fuentes termalés como sistema de circulación geotérmico. La ubicación geográfica de los perfiles se relaciona en la Figura 2. La numeración corresponde a las fuentes termalés de la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las características físicas promedio de los manantiales termales en inmediaciones del volcán Nevado del Ruiz basado en información registrada en [CHEC et al. \(1983\)](#), [Giggenbach et al. \(1990\)](#), [Sturchio y Williams \(1990\)](#), [INGEOMINAS \(1995\)](#), [González-Partida et al. \(1997\)](#), [Garzón \(2001\)](#), [Alfaro et al. \(2002\)](#), [Alfaro-Valero y Aguirre-Corrales \(2006\)](#) y [CHEC \(2014\)](#). La numeración corresponde al de las figuras. Información completa en el Material Suplementario 1.

Sector	ID	Nombre fuente	Temperatura promedio H ₂ O (°C)	pH (promedio)
NNW	1	Hotel Termales El Ruiz	63	1,71
	2	Hacienda Nieto	13	5,62
	3	Río Guali	48	2,72
NNE	4	La Hedionda	14	2,84
	5	Aguas Calientes	61	1,26
	6	Fuente Fría Aguas Calientes I	12	5,05
	7	Arenales	9	5,77
	8	El Calvario	57	2,77
E	9	Agua Blanca	35	2,81
	10	El Coquito	33	2,99
SE	11	El Oso	22	6,11
	12	Corralitos	29	3,9
NWW	13	Botero Londoño	92,25	7,61
	14	El Bosque	34	6,16
	15	La Piscina	58,05	6,79
	16	El Billar	88,59	7,27
	17	La Poa	12	6,42
	18	Nereidas	46,33	5,98
SW	19	El Recodo	55	7,26
	20	Chorro Negro	51	6,31

Entre las manifestaciones superficiales que indican la existencia de un recurso geotérmico se evidencian zonas de alteración hidrotermal, fumarolas y fuentes termales ([Figura 2A](#)). De acuerdo con las manifestaciones termales en la zona ([Tabla 1](#); [Figura 2](#)), al menos 13 manantiales presentan temperaturas superiores a 30 °C. En los sectores NNW y NNE del volcán, las fuentes termales presentes en superficie son particularmente ácidas y presentan temperaturas de hasta 63 °C. En los sectores E y SE, se presentan fuentes termales con temperatura de hasta 35 °C. Hacia el flanco NW y SW se presentan fuentes termales con temperatura de hasta 92 °C. En general, los valores más altos de temperatura y, por ende, los de mayor interés con fines de generación eléctrica en la zona, se encuentran en el sector NW y SW. Estos manantiales se conocen como Botero Londoño, La Piscina, El Billar, Las Nereidas, El Recodo y Chorro Negro ([Figura 2C](#)), todos dentro del polígono con licencia ambiental y fuera de la línea de páramos ([Figura 2A](#)).

Por otro lado, de acuerdo con el pH ([Tabla 1](#); [Figura 2](#)), los sectores NNW y NNE presentan aguas ácidas asociadas con el sistema de fallas Villamaría-Termales. Los sectores E y SE presentan aguas moderada a ligeramente ácidas. Los sectores NWW y SW presentan aguas ligeramente ácidas a neutras.

Las zonas con aguas ácidas se relacionan con un flujo termal que tiene aporte magmático o con un tránsito hasta superficie que atraviesa rocas con alteración hidrotermal argílica avanzada ([Figura 3](#), Sector E, perfil A-A'). En el flanco W se presentan dos flujos termales: el más somero asociado con aguas carbonatadas en el área de Nereidas y el más profundo relacionado con aguas cloruradas en el área de Botero Londoño (Sector W, perfil A-A'). Todos los flujos termales se relacionan con aporte de aguas meteóricas. El aporte de calor regional se relaciona con una fuente de calor profunda que corresponde a las cámaras magmáticas del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. A su vez, la

existencia de roca fundida que rodea parcialmente las cámaras magmáticas y centros de emisión recientes como el volcán La Olleta (~ 0,1 Ma, [Ceballos-Hernández et al., 2020](#)) aporta calor en el Valle de Nereidas. De esta manera, el patrón de circulación de fluidos geotérmicos puede establecerse desde el SEE hacia el NWW, de acuerdo con los gases y las aguas presentes en las manifestaciones de Botero Londoño, resultado que está en concordancia con el patrón estructural de la zona, asociado con el sistema de fallas Nereidas-Río Claro. Se recomiendan estudios hidrogeológicos dentro de la cuenca hidrográfica del río Claro que permitan aportar al entendimiento de las direcciones de flujo.

El flujo termal de las aguas del sector NNW asciende por medio de fracturas buzando hacia el S, relacionadas con el sistema de fallas Villamaría-Termal, en cuya zona se evidencia alteración hidrotermal cerca de la superficie, asociada con precipitación de sulfatos, silicatos y pH ácidos de aguas termales que afloran (Sector N, perfil B-B'). De acuerdo con el pH ([Figura 2C](#)) y la composición química de las aguas termales Nereidas y Chorro Negro, estas provienen de dos flujos termales diferentes, pero el ascenso hacia superficie de ambos es facilitado por fracturas asociadas con el sistema de fallas Nereidas-Río Claro (Sector S, perfil B-B'). Se recomiendan estudios de alteraciones en rocas de superficie dentro de la cuenca hidrográfica del río Claro para entender patrones de flujo actuales o fósiles, que permitan aportar al entendimiento de las direcciones de flujo hidrotermal.

El flujo termal de las aguas del sector NNE también asciende por medio de fracturas relacionadas con el sistema de fallas Villamaría-Termal (sector N, perfil C-C'). El flujo termal del sector SE es facilitado por fracturas asociadas con el sistema de fallas Nereidas-Río Claro (sector S, perfil C-C'). En ambos sectores, las aguas termales en superficie presentan pH moderados a muy ácidos asociados con zonas de alteración hidrotermal argílica avanzada y aporte de fluidos magmáticos cercanos al cráter Arenas, centro de emisión actual activo del complejo volcánico.

Modelo conceptual del sistema geotérmico

Con base en la información geocientífica revisada y el análisis de los datos realizado en el área de estudio, el modelo geotérmico conceptual integrado para el área geotérmica del Valle de Nereidas ([Figura 4](#)) se podría definir con base en los siguientes elementos principales:

1) Rocas reservorio: actualmente se conoce que el sistema se encuentra emplazado en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca ([Figura 4](#)), las cuales, para el caso de un modelo conceptual de sistema geotérmico, cumplen la función de roca reservorio. Teniendo en cuenta la profundidad del pozo Nereidas 1 (1469 m), el techo del reservorio está ubicado entre 2000 y 2500 m de profundidad en rocas metamórficas asociadas con fallamiento y deformación cataclástica.

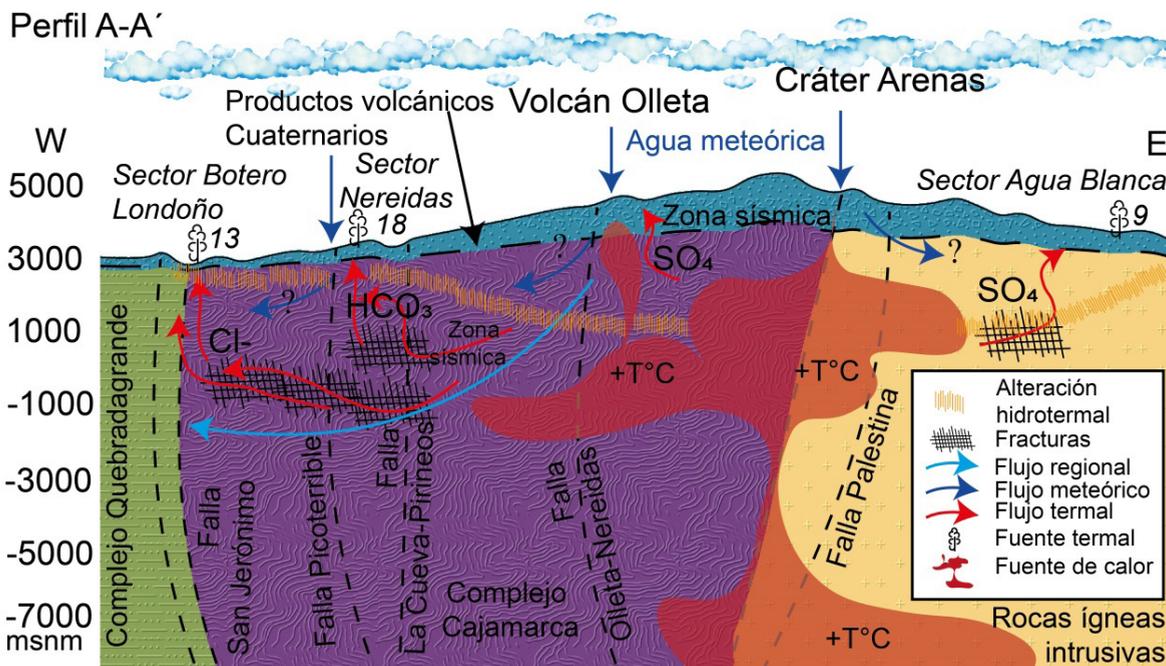


Figura 4. Modelo conceptual esquemático en el cual se ubican fallas y fuentes termales como sistema de circulación geotérmico. La numeración corresponde a las fuentes termales de la [Tabla 1](#).

2) Presencia y origen de anomalías térmicas: análisis geofísicos permiten sugerir la delimitación de una fuente de calor irregular asociada principalmente con las cámaras magmáticas del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz y centros de emisión presentes en la zona, evidenciada en superficie con fuentes hidrotermales.

3) Características de la formación de cobertura o roca sello: la capa sello se encuentra ubicada en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y productos volcánicos Cuaternarios del Nevado del Ruiz, con presencia de alteración moderada a fuerte. Estas alteraciones hidrotermales están asociadas también con el sistema volcánico del Nevado del Ruiz.

4) Modelo de circulación general de agua: el ascenso del recurso geotérmico ubicado en el flanco oeste del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz se encuentra asociado con las fallas Nereidas, Río Claro y Río Molinos, agrupadas como sistema de fallas Nereidas-Río Claro. El patrón de circulación regional se asocia con sistemas de fallas y fracturas con rumbo NWW-SEE, mientras que el ascenso de fluidos se asocia con la interacción de otros sistemas de fallas de acuerdo con las fuentes termales cartografiadas. El recurso geotérmico asociado al flanco este del volcán también se asocia con la anomalía de calor del complejo volcánico, pero la ruta de ascenso está controlada por el sistema de fallas Villamaría-Termale. La zona de recarga está ubicada en la parte alta del complejo volcánico y está asociada a la permeabilidad de las rocas fracturadas, al cráter Arenas y a las fallas asociadas a la cadena volcánica (e. g., falla Palestina). Adicionalmente, muchos flujos de lava presentan disyunción columnar variable, es decir, fracturamiento no-tectónico, asociado con contracción térmica (e. g., [Rave-Bonilla y Sánchez, 2021](#)) que puede favorecer las zonas de recarga. La zona de descarga podría estar ubicada en la zona de las fuentes termales.

Conclusiones

Colombia tiene recursos geotérmicos relativamente abundantes de baja entalpía que son viables para aplicaciones de uso directo y se han desarrollado en torno al ecoturismo. La generación de conocimiento en estas áreas permitiría sugerir dinámicas o herramientas favorables para las comunidades como usos directos en procesos agrícolas. Del mismo modo, el país tiene recursos de alta entalpía asociados preferencialmente al vulcanismo del arco volcánico activo, por lo que proporciona una alternativa de energía limpia para ampliar la canasta energética y reducir su impacto negativo en el medioambiente.

Para la mayoría de los casos en Colombia, el reservorio geotérmico está relacionado con rocas metamórficas y sedimentarias, junto con rocas volcánicas Cuaternarias que han sido impermeabilizadas por el efecto prolongado de manifestaciones termales y alteraciones a arcillas. Sin embargo, este documento resalta la posibilidad del aporte de calor asociado con el vulcanismo monogenético, como se ha referenciado en diversas áreas geotérmicas (e. g. Samaná; Villamaría-Termale, Guamuéz-Sibundoy).

Un análisis sistemático de las discontinuidades tectónicas (e. g., fallas, foliaciones, fracturas, pliegues) en la zona permitiría profundizar más en el macizo rocoso aportándole no solamente al proyecto Valle de Nereidas, sino también a la comprensión de los sistemas geotérmicos en ambientes geológicos similares.

Para el caso de las fuentes termales asociadas con el sistema geotérmico Complejo Volcánico Nevado del Ruiz, adicional al aporte de calor generado por las cámaras magmáticas del Complejo, se incluye el posible aporte de calor del campo volcánico monogenético en el área. De este sistema geotérmico sobresale el Valle de Nereidas, el cual se encuentra fuera del área administrativa de Páramo, se relacionan fuentes termales con pH intermedios o neutros, y cumple con las características de sistemas geotérmicos convectivos.

La zona del Valle de Nereidas muestra actividad geotérmica asociada con la actividad volcánica, la cual ha sido continua durante los últimos 2 Ma. Esta actividad está relacionada tanto al vulcanismo poligenético como monogenético, pero también a varios patrones de fallamiento, dentro de los cuales resalta aquel que parece controlar la permeabilidad secundaria en dirección SE-NW.

Un sistema geotérmico como el del Valle de Nereidas está compuesto por rocas metamórficas como reservorio, una fuente de calor de geometría irregular proveniente del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz, una capa sello en rocas metamórficas y productos volcánicos, y un patrón de circulación de agua controlado por sistemas de fallas. Este sistema geotérmico muestra cómo la interacción de diversos factores geológicos puede formar un entorno geotérmico eficiente y aprovechable.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas, como parte de las actividades del programa Vulcanismo y Geotermia. En este mismo sentido, se

agradece a la Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas por apoyo con recursos económicos al Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología (GIEV) Cumanday. Además, el estudio se realizó en el marco de los proyectos: 1) “Formación de capital humano de alto nivel para atender las demandas territoriales de la región Eje Cafetero” – Código SIGP 90388, código BPIN 2022000100055, Doctorado en Ciencias - Geología, Universidad de Caldas; y 2) proyecto MINCIENCIAS, convocatoria 890: “Vulcanismo en el centro y suroccidente del país: Implicaciones de origen, evolución, amenaza, relación con el desarrollo de suelos volcánicos y potencial geoturístico”, otorgado al Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología (GIEV) Cumanday de la Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, Grupo de Investigación en Recursos Naturales Amazónicos (GRAM) en el Instituto Tecnológico del Putumayo, Sibundoy, Colombia, y Grupo de Gestión y Turismo, Universidad del Pacífico, Buenaventura, Colombia; los fondos fueron administrados por el Instituto Colombiano de Crédito Educativo y Estudios Técnicos en el Exterior - Mariano Ospina Pérez (ICETEX), Colombia. Por último, se agradecen los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos, que permitieron mejorar el manuscrito.

Referencias

- Agemar, T.; Schellschmidt, R.; Schulz, R. (2012). Subsurface temperature distribution in Germany. *Geothermics*, 44, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.07.002>
- Aguilera, P.; Alfaro, C.; Arcila-Rivera, A.; Blessent, D.; Rueda, J.; Llamasa, O. (2019). Colombia - A geothermal opportunity. *41st New Zealand Geothermal Workshop*. Auckland, Nueva Zelanda.
- Aguilera-Bustos, J.P.; Taroni, M.; Adam, L. (2022). A robust statistical framework to properly test the spatiotemporal variations of the b-Value: an application to the geothermal and volcanic zones of the Nevado del Ruiz volcano. *Seismological Research Letters*, 93(5), 2793-2803. <https://doi.org/10.1785/0220220004>
- Ahumada, M.F.; Sánchez, M.A.; Vargas, L.; Filipovich, R.; Martínez, P.; Viramonte, J.G. (2023). Joint interpretation of gravity and airborne magnetic data along the Calama-Olacapato-Toro fault system (Central Puna, NW Argentina): Structural and geothermal significance. *Geothermics*, 107, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102597>
- Aldana-Lozano, C.A. (2022). Caracterización geoquímica de la Formación La Cruz, Complejo Volcánico Las Ánimas, Nariño-Cauca, Colombia. Tesis de grado, Universidad de Los Andes, Colombia.
- Alfaro, C.; Aguirre, A.; Jaramillo, L.F. (2002). Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados. *Ministerio de Minas y Energía, INGEOMINAS, Bogotá*, 101.
- Alfaro, C.; Garzón, G.; Bobadilla, L. (2008). Geoquímica preliminar de gases del sistema geotérmico del volcán Azufral. *Geología Colombiana*, 33, 91-98.
- Alfaro, C.; Velandia, F.; Cepeda, H.; Pardo, N. (2010). Preliminary conceptual model of the Paipa geothermal system, Colombia. *World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia.
- Alfaro, C.; Ponce, P.; Monsalve, M.L.; Ortiz, I.; Franco, J.V.; Ortega, A.; Torres, R.; Gómez, D. (2015). A preliminary conceptual model of Azufral geothermal system, Colombia. *World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia.
- Alfaro, C.; Matiz, J.C.; Rueda, J.; Rodríguez, G.; González, C.; Beltrán, M.; Rodríguez, G.; Malo, J. (2017). Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa. Informe Técnico, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Alfaro, C.; Rueda-Gutiérrez, J.B.; Casallas, Y.; Rodríguez, G.; Malo, J. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 102169. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>
- Alfaro-Valero, C.; Aguirre-Corralles, A. (2006). Geoquímica de fuentes minerales y termales del Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín, Colombia. *Boletín Geológico*, 41, 76-120. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.41.2006.167>
- Almaguer-Rodríguez, J.L. (2013). Estudio magnetotérmico con fines de interés geotérmico en el sector norte del Nevado de Ruiz, Colombia. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, México.
- Alpala, J.; Alpala, R.; Battaglia, M. (2017). Monitoring remote volcanoes: the 2010–2012 unrest at Sotará volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.021>

- Alpala, R.; Londoño, J.M.; Torres, R.; Cadena, Ó. (2018). Análisis de posibles fuentes generadoras de eventos sísmicos tipo “tornillo” en el volcán Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 44, 57-73. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.34>
- Altmann, J.B.; Müller, B.I.R.; Müller, T.M.; Heidbach, O.; Tingay, M.R.P.; Weißhardt, A. (2014). Pore pressure stress coupling in 3D and consequences for reservoir stress states and fault reactivation. *Geothermics*, 52, 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.004>
- Aragón-Aguilar, A.; Izquierdo-Montalvo, G.; Pal-Verma, M.; Santoyo-Gutiérrez, S.; Moya-Acosta, S.L. (2009). Análisis del influjo en pozos geotérmicos para la determinación de sus flujos máximos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(1), 73-83.
- Avellán, D.R.; Macías, J.L.; Arce, J.L.; Saucedo-Girón, R.; Garduño-Monroy, V.H.; Jiménez-Haro, A.; Sosa-Ceballos, G.; Cisneros, G.; Bernal, J.P.; Layer, P.W.; García-Sánchez, L.; Reyes-Agustín, G.; Rangel, E.; Navarrete, J.A.; López-Loera, H. (2019). Geology of the late Pleistocene Tres Virgenes Volcanic Complex, Baja California Sur (México). *Journal of Maps*, 15(2), 227-237. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1576552>
- Ayala, L.C. (2014). Aplicación de técnicas de magnetotelúrica en un área de interés geotérmico en cercanías a la Falla Nereidas al occidente del Volcán Nevado del Ruiz. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)
- Bauer, J.F.; Krumbholz, M.; Luijendijk, E.; Tanner, D.C. (2019). A numerical sensitivity study of how permeability, porosity, geological structure, and hydraulic gradient control the lifetime of a geothermal reservoir. *Solid Earth*, 10(6), 2115-2135. <https://doi.org/10.5194/se-10-2115-2019>
- Bayer, P.; Rybach, L.; Blum, P.; Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>
- Beier, R.A. (2021). Analysis of thermal response tests on boreholes with controlled inlet temperature versus controlled heat input rate. *Geothermics*, 94, 102099. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102099>
- Benamar, M.A.; Azzaz, H.; Khaldi, A. K. (2023). Chemical geothermometers and mixing models to understand the thermal aptitudes in the management of Bouhanifia and Saida geothermal resources, northwest of Algeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 20, 100863. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100863>
- Bernet, M.; Urueña, C.; Amaya, S.; Peña, M.L. (2016). New thermo and geochronological constraints on the Pliocene-Pleistocene eruption history of the Paipa-Iza volcanic complex, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.08.013>
- Bertani, R. (2005). World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics*, 34(6), 651-690. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.005>
- Boada-Herrera, M.; Cabrera-Ottaviani, C.; Meza-Múnera, E. (2018). Modelo de adopción de energías renovables en Uruguay y su comparación con Ecuador y Colombia. *ENERLAC. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 2(1), 92-135.
- Bodvarsson, G.; Pruess, K.; Lippmann, M. (1986). Modeling of geothermal systems. *Journal of Petroleum Technology*, 38(9), 1007-1021. <https://doi.org/10.2118/13613-PA>
- Bolaños-Cabrera, G.; Murcia, H.; Llano-Montenegro, D.; Thouret, J.C.; Córdoba, G.; Botero-Gómez, L.A.; Sánchez-Torres, L. (2024). New evidence of Holocene pyroclastic density currents at Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 455, 108203. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108203>
- Borenstein, S. (2012). The private and public economics of renewable electricity generation. *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 67-92. <https://doi.org/10.1257/jep.26.1.67>
- Borrero, C.; Murcia, H.; Agustín-Flores, J.; Arboleda, M.T.; Giraldo, A.M. (2017). Pyroclastic deposits of San Diego maar, central Colombia: an example

- of a silicic magma-related monogenetic eruption in a hard substrate. *Geological Society, London, Special Publications*, 446, 361-374. <https://doi.org/10.1144/SP446.10>
- Botero-Gómez, L.A.; Osorio, P.; Murcia, H.; Borrero, C.; Grajales, J.A. (2018). Campo volcánico monogenético Villamaría-Termale, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*, 40(3), 85-102. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018005>
- Botero-Gómez, L.A.; Murcia, H.; Hincapié-Jaramillo, G. (2023). 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>
- Bravo-López, M.; Marín, S.; Terreros-Barreto, J.R.; Garcés, A.; Molina, A.; Rivera, M.; Wheeler, P. (2022). An overview of the Colombian power system. *International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control*. Curicó, Chile. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10006289>
- Brown, C.S. (2022). Regional geothermal resource assessment of hot dry rocks in Northern England using 3D geological and thermal models. *Geothermics*, 105, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102503>
- Bucheli-Olaya, C.A. (2020). Condiciones pre-eruptivas del edificio volcánico Santa Helena, Complejo Volcánico Doña Juana, Colombia. Tesis de grado, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Bustaffa, E.; Cori, L.; Manzella, A.; Nuvolone, D.; Minichilli, F.; Bianchi, F.; Gorini, F. (2020). The health of communities living in proximity of geothermal plants generating heat and electricity: A review. *Science of the Total Environment*, 706, 135998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135998>
- Calderón-Chaparro, R.A.; Vargas-Cuervo, G. (2019). Determination of hydrothermal prospects in Paipa geothermal region (Boyacá, Colombia), using remote sensing and field data. *Earth Sciences Research Journal*, 23(4), 265-282. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.77810>
- Calderón-Zamudio, A.C. (2021). Comparación de datos SEM-EDX vs. EPMA en anfíboles e implicaciones geotermobarométricas: caso de estudio en piroclastos del Volcán Doña Juana, Nariño. Tesis de grado, Universidad de los Andes, Colombia.
- Calvache-Proano, F.D.; Toapanta-Chanatisig, E.J. (2022). Diseño de un sistema centralizado de calefacción para el Parque Industrial “El Obraje” ubicado en la ciudad de Machachi. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Cano, N.A.; Céspedes, S.; Redondo, J.; Foo, G.; Jaramillo, D.; Martínez, D.; Gutiérrez, M.; Pataquiba, J.; Rojas, J.; Cortés, F.B.; Franco, C.A. (2022). Power from geothermal resources as a co-product of the oil and gas industry: A review. *ACS Omega*, 7(45), 40603-40624. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04374>
- Cardona, C.; Santacoloma, C.; White, R.; McCausland, W.; Trujillo, N.; Narváez, A.; Bolaños, R.; Manzo, O. (2009). Sismicidad tipo “drumbeat” asociada a la erupción y emplazamiento de un domo en el volcán Nevado del Huila, noviembre de 2008. *XII Congreso Colombiano de Geología*, Paipa, Colombia.
- Cardona-Cardona, M. (2023). Estimación de caudales de descarga de aguas termales en el área de Nereidas y revisión del ciclo hidrológico para el área de estudio. Tesis de grado, Universidad de Caldas.
- Carvajal, D.; Alfaro, C.; Mendoza-Mendoza, J.C.; Romero, D.; Mojica, J. (2008). Contribución al modelo geotérmico del volcán Azufral a partir de identificación de zonas de alteración hidrotermal. *Geología Colombiana*, 33, 99-108.
- Casallas-Moreno, K.L.; González-Escobar, M.; Gómez-Arias, E.; Mastache-Román, E.A.; Gallegos-Castillo, C.A.; González-Fernández, A. (2021). Analysis of subsurface structures based on seismic and gravimetric exploration methods in the Las Tres Vírgenes volcanic complex and geothermal field, Baja California Sur, Mexico. *Geothermics*, 92, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102026>
- Ceballos-Hernández, J.A.; Martínez-Tabares, L.M.; Valencia-Ramírez, L.G.; Pulgarín-Álzate, B.A.; Correa-Tamayo, A.M.; Narváez-Marulanda, B.L. (2020). Geological evolution of the Nevado del Ruiz Volcanic Complex. In: J. Gómez, A.O. Pinilla-Pachón (eds.). *The Geology of Colombia*

- (pp. 267-296). Volume 4, Chapter 7, Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.07>
- Cerpa-Londoño, A.C. (2018). Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el Volcán Cerro Machín, Colombia. Tesis de grado, Universidad EIA, Colombia.
- Cervantes, C.A.M. (2019). 3D modelling of faulting and intrusion of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Tesis de maestría, Reykjavik University, Islandia.
- Céspedes, S.; Cano, N.A.; Foo, G.; Jaramillo, D.; Martínez, D.; Gutiérrez, M.; Pataquiba, J.; Rojas, J.; Cortés, F.B.; Franco, C.A. (2022). Technical and environmental feasibility study of the co-production of crude oil and electrical energy from geothermal resources: First field trial in Colombia. *Processes*, 10(3), 568. <https://doi.org/10.3390/pr10030568>
- CHEC; ICEL; CONTECOL; Geotérmica Italiana. (1983). Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A. Vol. I, II, III y IV. Bogotá. Central Hidroeléctrica de Caldas, Instituto Colombiano de Energía Eléctrica, Consultoría Técnica Colombiana Ltda., Geotérmica Italiana.
- CHEC. (2014). Informe final resultados análisis de aguas proyecto geotérmico nereidas v1. Informe Técnico, Central Hidroeléctrica de Caldas, Manizales, Colombia.
- Chiodi, A.; Báez, W.; Tassi, F.; Bustos, E.; Filipovich, R.; Murray, J.; Rizzo, A.; Vaselli, O.; Giordano, G.; Viramonte, J.G. (2024). Fluid geochemistry of the Cerro Galán geothermal system (Southern Puna, Argentina): Implications for the geothermal potential of one of the youngest giant calderas in the Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 450, 108089. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108089>
- Clauser, C.; Ewert, M. (2018). The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy - Review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(Part 3), 3683-3693. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.095>
- Coviello, M. (2000). Estudio para la evaluación del entorno del Proyecto Geotérmico Binacional “Tuffiño-Chiles-Cerro Negro”. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Das, P.; Maya, K.; Padmalal, D. (2022). Hydrogeochemistry of the Indian thermal springs: Current status. *Earth-Science Reviews*, 224, 103890. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103890>
- Díaz-Gil, A.; Aguirre-Hoyos, L.M. (2014). Análisis estructural detallado de un sector del Valle de Nereidas, Macizo Volcánico Nevado del Ruiz, MVNR. Aporte al proyecto geotérmico EPM-CHEC. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Dickson, M.H.; Fanelli, M. (2013). *Geothermal energy: utilization and technology*. Routledge.
- Donaldson, I.G. (1970). The simulation of geothermal systems with a simple convective model. *Geothermics*, 2(Part 1), 649-654. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(70\)90065-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90065-9)
- Duque-Trujillo, J.F.; Toro-Villegas, G.E.; Cardona-Molina, A.; Calvache-Velazco, M. (2010). Geología, geocronología y geoquímica del volcán Morasurco, Pasto, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 27, 25-36.
- Escobar-Ramos, J.F. (2020). Geomorfología del complejo volcánico Las Ánimas, Nariño-Cauca, Colombia. Tesis de grado, Universidad de los Andes, Colombia.
- Ezekiel, J.; Ebigbo, A.; Arifianto, I.; Daniilidis, A.; Finkbeiner, T.; Mai, P.M. (2022). Techno-economic performance optimization of hydrothermal doublet systems: Application to the Al Wajh basin, Western Saudi Arabia. *Geothermics*, 105, 102532. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102532>
- Fadel, M.; Reinecker, J.; Bruss, D.; Moeck, I. (2022). Causes of a premature thermal breakthrough of a hydrothermal project in Germany. *Geothermics*, 105, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102523>
- Feng, G.; Wang, X.; Wang, M.; Kang, Y. (2020). Experimental investigation of thermal cycling effect on fracture characteristics of granite in a geothermal-energy reservoir. *Engineering Fracture Mechanics*, 235, 107180. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107180>

- Fischer, T.P.; Arehart, G.B.; Sturchio, N.C.; Williams, S.N. (1996). The relationship between fumarole gas composition and eruptive activity at Galeras Volcano, Colombia. *Geology*, 24(6), 531-534. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0531:TRBFGC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0531:TRBFGC>2.3.CO;2)
- Fischer, T.P.; Sturchio, N.C.; Stix, J.; Arehart, G.B.; Counce, D.; Williams, S.N. (1997). The chemical and isotopic composition of fumarolic gases and spring discharges from Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 229-253. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00096-0)
- Florida, G.; Cacace, M.; Scheck-Wenderoth, M.; Bott, J.; Viccaro, M. (2022). 3D thermal model of Sicily (Southern Italy) and perspectives for new exploration campaigns for geothermal resources. *Global and Planetary Change*, 218, 103976. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103976>
- Fokker, P.A.; Borello, E.S.; Viberti, D.; Verga, F.; van Wees, J.D. (2021). Pulse testing for monitoring the thermal front in aquifer thermal energy storage. *Geothermics*, 89, 101942. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101942>
- Forero-Herrera, J.A. (2012). Caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Forero, J.; Zuluaga, C.; Mojica, J. (2011). Alteration related to hydrothermal activity of the Nevado del Ruiz Volcano (NRV), Colombia. *Boletín de Geología*, 33(1), 59-68.
- Freedon, W.; Nutz, H. (2024). Geothermal energy and exploration. In: *Exploratory Potential Methods in Geothermal Power Generation* (pp. 1-20). Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54412-5_1
- Fridleifsson, I.B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299-312. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00002-8)
- Gao, X.; Zhang, Y.; Cheng, Y.; Yu, Z.; Huang, Y. (2022). Impact of fractures with multi-scale aperture variability on production observations of geothermal reservoir units. *Journal of Hydrology*, **Boletín de Geología - vol. 47, n.º 1**
- 615(Part A), 128693. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128693>
- García, Y.K.; Sánchez, J.J. (2019). Contribuciones geológicas al modelo conceptual geotérmico en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro (Colombia-Ecuador). *Boletín de Geología*, 41(1), 151-171. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019008>
- García, M.A.; Vargas, C.A.; Koulakov, I.Y. (2019). Local earthquake tomography of the Nevado del Huila Volcanic Complex (Colombia): Magmatic and tectonic interactions in a volcanic-glacier complex system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2), 1688-1699. <https://doi.org/10.1029/2018JB016324>
- García, A.V.; Sánchez, J.J.; Torio, E.; Bonilla, G.E.; Rodríguez, A.I. (2022). Caracterización de minerales de alteración en domos y depósitos piroclásticos del área geotérmica de Paipa, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 219-233. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022010>
- García-Gamba, A.S. (2020). Perfil de variación geoquímica-XRF de elementos mayores en el paleosuelo marcador del Holoceno para el volcán Ánimas (Nariño). Tesis de grado, Universidad de los Andes, Colombia.
- Garzón, G. (2001). Catálogo de fuentes termales del Parque Nacional Natural de los Nevados. INGEOMINAS. Informe Técnico.
- Gauntlett, M.; Hudson, T.S.; Kendall, J.M.; Rawlinson, N.; Blundy, J.D.; Lapins, S.; Goitom, B.; Hammond, J.; Oppenheimer, C.; Ogubazghi, G. (2022). Seismic tomography of Nabro caldera, Eritrea: insights into the magmatic and hydrothermal systems of a recently erupted volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(5). <https://doi.org/10.1002/essoar.10512608.1>
- Gerber, L.; Maréchal, F. (2012). Environomic optimal configurations of geothermal energy conversion systems: Application to the future construction of Enhanced Geothermal Systems in Switzerland. *Energy*, 45(1), 908-923. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.068>
- Giggenbach, W.F.; García, N.; Londoño, A.; Rodríguez, L.; Rojas, N.; Calvache, M.L. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges

- from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1-2), 13-39. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90067-P](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90067-P)
- Giordano, G.; Ahumadab, F.; Aldegac, L.; Baezb, W.; Becchiob, R.; Bigic, S.; Caricchi, C.; Chiodi, A.L.; Corrado, S.; De Benedetti, A.A.; Favetto, A.B.; Filipovich, R.E.; Fusari, A.; Groppelli, G.; Invernizzi, C.; Maffucci, R.; Norini, G.; Pinton, A.; Pomposiello, M.C.; Tassi, F.; Taviani, S.; Viramonteb, J.M. (2016). Preliminary data on the structure and potential of the Tocomar geothermal field (Puna plateau, Argentina). *Energy Procedia*, 97, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.055>
- Gómez-Díaz, E.; Marín-Cerón, M.I. (2018). Preliminary geochemical study of thermal waters at the Puracé volcano system (South Western Colombia): an approximation for geothermal exploration. *Boletín de Geología*, 40(1), 43-61. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018003>
- Gómez-Díaz, E.; Mariño-Arias, O.M. (2020). Structural assessment and geochemistry of thermal waters at the Cerro Machin Volcano (Colombia): An approach to understanding the geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 400, 106910. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106910>
- Gómez-Díaz, E. (2020). Geochemical Interpretation of Bicarbonate Thermal Springs for the Comprehension of a Geothermal System: A Case Study at Cerro Machin Volcano, Colombia. *World Geothermal Congress*. Reykjavik, Iceland.
- Gómez-Navarro, T.; Ribó-Pérez, D. (2018). Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>
- Gómez-Zamorano, D. (2014). Procesamiento de datos GNSS aplicados a la falla Villamaría-Termal en el sector noroccidental del volcán Nevado del Ruiz. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Colombia.
- Gondal, I.A.; Masood, S.A.; Amjad, M. (2017). Review of geothermal energy development efforts in Pakistan and way forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 687-696. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.097>
- González-García, J.; Hauser, J.; Annetts, D.; Franco, J.; Vallejo, E.; Regenauer-Lieb, K. (2015). Nevado del Ruiz Volcano (Colombia): a 3D model combining geological and geophysical information. *World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia.
- González-García, J.; Jessell, M. (2016). A 3D geological model for the Ruiz-Tolima Volcanic Massif (Colombia): Assessment of geological uncertainty using a stochastic approach based on Bézier curve design. *Tectonophysics*, 687, 139-157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.09.011>
- González-Idárraga, C.E. (2020). Caracterización resistiva 3D del área geotérmica de Paipa, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 81-97. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020003>
- González, L.; Jaramillo, C.M. (2002). Estudio neotectónico multidisciplinario aplicado a la Falla Villamaría Termal. Tesis, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- González-Partida, E.; Arellano-Gómez, V. M.; Barragán-Reyes, R.M.; Birkle, P.; Torres-Rodríguez, V. (1997). Comportamiento geoquímico de las manifestaciones geotérmicas en el flanco oriental del volcán El Nevado del Ruiz (Río Claro-Las Nereidas), Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(3), 5-13.
- González, R.E.; Suárez, C.O.; Higuera, I.C.; Rojas, L.E. (2020). Alternative workflow for three-dimensional basin modeling in areas of structural complexity: Case study from the Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 104(1), 1-19. <https://doi.org/10.1306/0415191612917185>
- Gude, V.G. (2016). Geothermal source potential for water desalination – Current status and future perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1038-1065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.186>
- Hernández-Ochoa, A.F.; Aragón-Aguilar, A.; Franco-Nava, J.M. (2021). An up-to-date perspective of geothermal power technology. In: S. Dutta, C.M. Hussain (eds.). *Sustainable Fuel Technologies Handbook* (pp. 201-238). Section 6. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00008-1>
- INGEOMINAS. (1995). Boletín Semestral Actividad de los volcanes colombianos. Vol. 1. No. 1. 89 p. Bogotá.

- Inguaggiato, C.; Censi, P.; Zuddas, P.; Londoño, J.M.; Chacón, Z.; Alzate, D.; Brusca, L.; D'Alessandro, W. (2015). Geochemistry of REE, Zr and Hf in a wide range of pH and water composition: The Nevado del Ruiz volcano-hydrothermal system (Colombia). *Chemical geology*, 417, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.09.025>
- Inguaggiato, C.; García, M.Á.P.; Maldonado, L.F.M.; Peiffer, L.; Pappaterra, S.; Brusca, L. (2020). Precipitation of secondary minerals in acid sulphate-chloride waters traced by major, minor and rare earth elements in waters: The case of Puracé volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107106. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107106>
- Irumhe, P.E.; Obiadi, I.I.; Obiadi, C.M.; Ezenwaka, C.K.; Mgbolu, C.C. (2019). Estimating sedimentary pile thickness, structural lineaments and heat flow in parts of North Central Nigeria from aeromagnetic data. *Solid Earth Sciences*, 4(3), 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.06.001>
- Jalili, P.; Ganji, D.D.; Nourazar, S.S. (2018). Investigation of convective-conductive heat transfer in geothermal system. *Results in Physics*, 10, 568-587. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.06.047>
- Jolie, E.; Scott, S.; Faulds, J.; Chambefort, I.; Axelsson, G.; Gutiérrez-Negrín, L.C.; Regenspurg, S.; Ziegler, M.; Ayling, B.; Richter, A.; Zemedkun, M.T. (2021). Geological controls on geothermal resources for power generation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(5), 324-339. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00154-y>
- Juliusson, E.; Bjornsson, S. (2021). Optimizing production strategies for geothermal resources. *Geothermics*, 94, 102091. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102091>
- Kazemi, A.R.; Mahbaz, S.B.; Dehghani-Sani, A.R.; Dusseault, M.B.; Fraser, R. (2019). Performance evaluation of an enhanced geothermal system in the Western Canada Sedimentary Basin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109278>
- Khaled, M.S.; Wang, N.; Ashok, P.; van Oort, E. (2023). Downhole heat management for drilling shallow and ultra-deep high enthalpy geothermal wells. *Geothermics*, 107, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102604>
- Kitamura, K.; Fujii, Y.; Inagaki, H.; Aizawa, K.; Ishibashi, J. I.; Saito, H.; Fujimitsu, Y. (2023). Evaluation of a potential supercritical geothermal system in the Kuju region, central Kyushu, Japan. *Geothermics*, 107, 102602. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102602>
- Krieger, M.; Kurek, K.A.; Brommer, M. (2022). Global geothermal industry data collection: A systematic review. *Geothermics*, 104, 102457. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102457>
- Lamy-Chappuis, B.; Yapparova, A.; Driesner, T. (2022). Advanced well model for superhot and saline geothermal reservoirs. *Geothermics*, 105, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102529>
- Laughlin, A.W.; Goff, S.J. (1991). Recent geothermal investigations in Honduras: An overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 45(1-2), 1-9. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(91\)90018-U](https://doi.org/10.1016/0377-0273(91)90018-U)
- Lebbihiat, N.; Atia, A.; Arıcı, M.; Meneceur, N. (2021). Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures. *Journal of Cleaner Production*, 302, 126950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126950>
- Lequerica-Torres, R.E. (2008). Geotermia: otra fuente de energía para Colombia. Tesis de grado, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Lewicki, J.L.; Fischer, T.; Williams, S.N. (2000). Chemical and isotopic compositions of fluids at Cumbal Volcano, Colombia: evidence for magmatic contribution. *Bulletin of Volcanology*, 62, 347-361. <https://doi.org/10.1007/s004450000100>
- Li, J.; Wu, Z.; Tian, G.; Ruan, C.; Sagoe, G.; Wang, X. (2022). Processes controlling the hydrochemical composition of geothermal fluids in the sandstone and dolostone reservoirs beneath the sedimentary basin in north China. *Applied Geochemistry*, 138, 105211. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105211>
- Liotta, D.; Brogi, A.; Ruggieri, G.; Zucchi, M. (2021). Fossil vs. active geothermal systems: A field and laboratory method to disclose the relationships between geothermal fluid flow and geological structures at depth. *Energies*, 14(4), 933. <https://doi.org/10.3390/en14040933>

- Liu, F.; Long, X. (2022). Investigation on geological structure and geothermal resources using seismic exploration. *Geothermics*, 106, 102572. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102572>
- Londoño, J.M. (1996). Temporal change in coda Q at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73(1-2), 129-139. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00084-4)
- Londoño, J.M. (2016). Evidence of recent deep magmatic activity at Cerro Bravo-Cerro Machín volcanic complex, central Colombia. Implications for future volcanic activity at Nevado del Ruiz, Cerro Machín and other volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 324, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.003>
- Londoño, J.M. (2018). Variación temporal de la atenuación de ondas sísmicas en la región del volcán Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 44, 75-88.
- Londoño, J.M. (2022). Variación espacio-temporal del valor *b* en el Volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 143-158. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022006>
- Londoño, J.M.; Sudo, Y. (2001). Spectral characteristics of volcano-tectonic earthquake swarms in Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 112(1-4), 37-52. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00233-5)
- Londoño, J.M.; Sudo, Y. (2003). Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119(1-4), 61-87. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00306-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00306-2)
- Londoño, J.; Cardona, C. (2010). Seismicity associated to the reactivation of Nevado del Huila Volcano, Colombia. *Cities on Volcanoes*, Tenerife, España.
- Londoño, J.M.; Kumagai, H. (2018). 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015>
- Londoño, J.M.; Kumagai, H.; Torres, R. (2020). Temporal change of the magma plumbing system at Galeras volcano, Colombia, revealed by repeated seismic tomography in 2009–2018. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 406, 107075. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107075>
- López-Castro, S.M. (2009). Estratigrafía, petrología y geoquímica de las rocas volcánicas del flanco occidental del volcán Puracé, alrededores de Coconuco. Tesis de maestría, Universidad EAFIT, Colombia.
- López-Ramos, E.; González-Penagos, F.; Patiño, C.A.; López, A. (2022). Low - medium enthalpy geothermal resource assessment in deep reservoirs of the Llanos Basin - Colombia. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 12(1), 13-44. <https://doi.org/10.29047/01225383.380>
- Lu, S.M. (2018). A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 2), 2902-2921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>
- Lund, J.W.; Boyd, T. (2007). Geothermal Energy Uses. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 28(2), Complete Bulletin.
- Lund, J.W.; Freeston, D.H.; Boyd, T.L. (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40(3), 159-180. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>
- Lund, J.W.; Toth, A.N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Lundgren, P.; Samsonov, S.V.; López-Vélez, C.M.; Ordóñez, M. (2015). Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. *Geophysical Research Letters*, 42(12), 4816-4823. <https://doi.org/10.1002/2015GL063858>
- Macellari, C.E. (2021). Recent uplift and the origin of hydrodynamic traps in the Llanos Basin of Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 132, 105198. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105198>
- Macías-Villarraga, P.A.; Granja-Rodríguez, G. (2020). Cinemática, análisis deformativo y configuración estructural, del sector Laguna Baja; entre el río Claro y el río Molinos, Villamaría (Caldas). Tesis de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

- Majer, E.; Nelson, J.; Robertson-Tait, A.; Savy, J.; Wong, I. (2012). Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. US Department of Energy, 52(10.2172), 1219482.
- Marini, L. (2000). *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*. Università degli Studi di Genova.
- Martínez-Martínez, J.A. (2021). Marco jurídico sobre la generación de energía geotérmica en Colombia. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Martínez-Ruiz, Y.; Manotas-Duque, D.F.; Ramírez-Malule, H. (2021). Análisis de opciones reales para la valoración financiera de proyectos de energía geotérmica en Colombia. *Revista CEA*, 7(15), e1944. <https://doi.org/10.22430/24223182.1944>
- Mejía, E.L.; Velandia, F.; Zuluaga, C.A.; López, J.A.; Cramer, T. (2012). Análisis estructural al noreste del volcán Nevado del Ruiz, Colombia – aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.
- Mejía-Fragoso, J.C.; Flórez, M.A.; Bernal-Olaya, R. (2024). Predicting the geothermal gradient in Colombia: a machine learning approach. *Geothermics*, 122, 103074 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.05184>
- Meza, C. (2014). A review on the Central America electrical energy scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 566-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.022>
- Meza-Maldonado, L.F.; Inguaggiato, S.; Jaramillo, M.T.; Valencia, G.G.; Mazot, A. (2017). Volatiles and energy released by Puracé volcano. *Bulletin of Volcanology*, 79, 84. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1168-y>
- Mogi, T.; Nakama, S. (1993). Magnetotelluric interpretation of the geothermal system of the Kuju volcano, southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56(3), 297-308. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90022-J](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90022-J)
- Molavi, J.; McDaniel, J. (2016). A review of the benefits of geothermal heat pump systems in retail buildings. *Procedia Engineering*, 145, 1135-1143. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.147>
- Monsalve, M.L.; Rodríguez, G.I.; Méndez, R.A.; Bernal, N.F. (1998). Geology of the well Nereidas 1, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, 263-268.
- Monsalve, M.L.; Arcila, M. (2009). Contexto tectónico de la zona volcánica del Puracé y provincia Alcalina del Valle superior del Magdalena. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 8(1), 35-41.
- Monsalve, M.L.; Pulgarín, B.A.; Mojica, J.; Santacoloma, C.C.; Cardona, C.E. (2011a). Interpretación de la actividad eruptiva del volcán Nevado del Huila (Colombia), 2007-2009: análisis de componentes de materiales emitidos. *Boletín de Geología*, 33(2), 73-93.
- Monsalve, M.L.; Rojas, N.R.; Velandia, F.A.; Pintor, I.; Martínez, L.F. (2011b). Caracterización geológica del cuerpo volcánico de Iza, Boyacá-Colombia. *Boletín de Geología*, 33(1), 117-130.
- Monsalve, M.L.; Tamayo, A.M.C.; Arcila, M.; Dixon, J. (2015). Firma Adakítica en los productos recientes de los volcanes Nevado del Huila y Puracé, Colombia. *Boletín Geológico*, 43, 23-39. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.43.2015.27>
- Montanari, D.; Ruggieri, G.; Bonini, M.; Balestrieri, M. L. (2023). First application of low temperature thermochronology as a tool for geothermal exploration: A promising, preliminary test from the Larderello-Travale geothermal field (Italy). *Geothermics*, 107, 102603. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102603>
- Moreno-Alfonso, S.C.; Sánchez, J. J.; Murcia, H. (2021). Evidences of an unknown debris avalanche event (<0.58 Ma), in the active Azufral volcano (Nariño, Colombia). *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103138. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103138>
- Moreno-Rendón, D.A.; López-Sánchez, I.J.; Blessent, D. (2020). Geothermal energy in Colombia as of 2018. *Ingeniería y Universidad*, 24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic>
- Moyano, I.; Lara, N.; Ospina, D.; Salamanca, A.; Arias, H.; Gómez, E.; Puentes, M.; Rojas, O. (2018). Mapa de anomalías geofísicas de Colombia para recursos minerales, versión 2018. Servicio Geológico Colombiano.

- Murcia, H.; Borrero, C.; Németh, K. (2019). Overview and plumbing system implications of monogenetic volcanism in the northernmost Andes' volcanic province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 383, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.013>
- Murillo-Orobio, L.T.; Chapuel-Cuasapud, D.L.; Botero-Gómez, L.A.; Murcia, H. (2024). Análisis morfoestructural del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz Sibundoy (sur de Colombia). *Geofísica Internacional*, 63(4), 1283-1314. <https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2024.63.4.1762>
- Navarro, S.; Pulgarín, B.; Monsalve, M.L.; Cortés, G.P.; Calvache, M.L.; Pardo, N.; Murcia, H. (2009). Geología e historia eruptiva del complejo volcánico Doña Juana (CVDJ) Nariño. *Boletín de Geología*, 31(2), 109-118.
- Norini, G.; Carrasco-Núñez, G.; Corbo-Camargo, F.; Lermo, J.; Hernández-Rojas, J.; Castro, C.; Bonini, M.; Montanari, D.; Corti, G.; Moratti, G.; Piccardi, L.; Chávez, G.; Zuluaga, M.C.; Ramírez, M.; Cedillo, F. (2019). The structural architecture of the Los Humeros volcanic complex and geothermal field. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 381, 312-329. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.06.010>
- Novikov, D.; Dultsev, F.; Filippov, Y. (2022). Geothermal model of the Fore-Yenisey Sedimentary Basin—Transitional structure between the Ancient Siberian Platform and the Young West Siberian Plate. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 96(2), 582-590. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14799>
- Ordóñez, M.; Laverde, C.; Battaglia, M. (2022). The new lava dome growth of Nevado del Ruiz (2015–2021). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 430, 107626. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107626>
- Ortiz, J.A.; López, J. (2023). Recorrido y perspectivas de desarrollo del proyecto geotérmico Valle de Nereidas. *Revista Energía & Geociencias*, 36, 22-24.
- Ortiz-González, J.A. (2023). Aplicación del enfoque de desarrollo en cascada en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 109-128. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023010>
- Ortiz-González, J.A.; López-Palacio, J. (2023). Analysis of different electricity generation scenarios in the “Macizo Volcánico del Ruiz” geothermal project. *Renewable Energy Focus*, 46, 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.07.003>
- Ortiz-Prieto, I.; Lorenzo-Pulido, C. (2009). Quince años de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 22(2), 28-34.
- Osorio, P.; Botero-Gómez, L.A.; Murcia, H.; Borrero, C.; Grajales, J.A. (2018). Campo volcánico monogenético Villamaría-Termalés, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte II): Características composicionales. *Boletín de Geología*, 40(3), 103-123. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018006>
- Ossa, J.A. (2018). Cartografía detallada de un área del proyecto geotérmico. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Manizales.
- Oviedo, M.J.; Blessent, D.; López-Sánchez, J.; Raymond, J. (2023). Contribution to the characterization of the Nevado del Ruiz geothermal conceptual model and rock properties dataset. *Journal of South American Earth Sciences*, 124, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104259>
- Pareja, E.R.; García, R.D. (2013). Análisis estructural de la falla Nereidas, en el sector de Nereidas, Villamaría – Caldas. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Park, D.; Lee, E.; Kaown, D.; Lee, S.S.; Lee, K.K. (2021). Determination of optimal well locations and pumping/injection rates for groundwater heat pump system. *Geothermics*, 92, 102050. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102050>
- Parri, R.; Basile, P.; Favaro, L.; Mazzoni, T.; Orlando, S. (2021). The history of geothermal electric power plants on the Island of Ischia, Italy. *Geothermics*, 89, 101977. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101977>
- Pasvanoğlu, S. (2021). Geochemical Survey of low-temperature geothermal resource of the Reşadiye Spa (Tokat, Northern Turkey). *Geothermics*, 94, 102088. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102088>
- Pearson-Grant, S.C.; Miller, C.A.; Carson, L.B.; Bertrand, E.A.; Leonard, G.S. (2022). Influences on geothermal circulation in the Okataina Volcanic Centre, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432, 107705. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107705>

- Pedraza, N.F.; Velázquez, J.D.; Molina, I.; Pedraza, A. (2022). Gravity studies at Cerro Machín Volcano, Colombia. *Boletín Geológico*, 49(1), 55-65. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.619>
- Pereira, M.L.; Matias, D.; Viveiros, F.; Moreno, L.; Silva, C.; Zanon, V.; Uchôa, J. (2022). The contribution of hydrothermal mineral alteration analysis and gas geothermometry for understanding high-temperature geothermal fields – The case of Ribeira Grande geothermal field, Azores. *Geothermics*, 105, 102519. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102519>
- Pérez-Estay, N.; Molina-Piernas, E.; Roquer, T.; Aravena, D.; Vargas, J.A.; Morata, D.; Arancibia, G.; Valdenegro, P.; García, K.; Elizalde, D. (2022). Shallow anatomy of hydrothermal systems controlled by the Liquiñe-Ofqui Fault System and the Andean Transverse Faults: Geophysical imaging of fluid pathways and practical implications for geothermal exploration. *Geothermics*, 104, 102435. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102435>
- Piedrahita, D.A.; Aguilar-Casallas, C.; Arango-Palacio, E.; Murcia, H.; Gómez-Arango, J. (2018). Estratigrafía del cráter y morfología del volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), 29-48. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018002>
- Pizzi, S.; Corbo, L.; Caputo, A. (2021). Fintech and SMEs sustainable business models: Reflections and considerations for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125217>
- Pulgarín, B.A.; Navarro, S.; Monsalve, M.L.; Murcia, H.; Téllez, L.; Correa, A.M.; Martínez Tabares, L.M.; Martínez, L. (2010). Geología e historia eruptiva del Complejo Volcánico Sotará, Colombia. INGEOMINAS.
- Pulgarín, B.; Cardona, C.; Agudelo, A.; Santacoloma, C.; Monsalve, M.L.; Calvache, M.; Murcia, C.; Cuéllar, M.; Medina, E.; Balanta, R.; Calderón, Y.; Leiva, Ó.; Ordóñez, M.; Ibáñez, D. (2015). Erupciones recientes del Volcán Nevado del Huila: Lahares asociados y cambios morfológicos del glaciar. *Boletín Geológico*, 43, 75-87. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.43.2015.21>
- Quintanilla, A.L.; Suárez, F. (1994). Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. *Geofísica Internacional*, 33(4), 575-584. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1994.33.4.593>
- Quiroz-Yandun, A.P. (2024). Caracterización geológica-estructural del área de influencia de la falla San Jerónimo en el municipio de Villamaría-Caldas, como aporte investigativo al proyecto geotérmico, Valle de Nereidas-CHEC. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Raihan, A. (2023). The influences of renewable energy, globalization, technological innovations, and forests on emission reduction in Colombia. *Innovation and Green Development*, 2(4), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100071>
- Ramírez-Espitia, C. (2021). Preliminary conceptual geothermal model of the Sibundoy thermal area, volcanic arc of southwestern Colombia: ¿a conventional or unconventional geothermal play? Tesis de grado, Universidad EAFIT, Colombia.
- Rave-Bonilla, Y.P.; Sánchez, J.J. (2021). Estructuras de disyunción columnar en lavas asociadas al Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (Colombia): facies, dimensiones y geometría. *Boletín de Geología*, 43(2), 45-62. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n2-2021003>
- Reyes-Martínez, C.S.; González-Escobar, M.; Montalvo-Arrieta, J.C.; Velasco-Tapia, F.; Jenchen, U. (2021). Extension in geothermal fields between the Imperial and Mexicali Valleys revealed by 2D seismic imaging and joint gravity-aeromagnetic modeling. *Geothermics*, 89, 101984. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101984>
- Rivera-Lara, V.C. (2021). Estudio morfométrico y geomorfológico del campo volcánico monogenético Guamuez-Sibundoy, Colombia. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Colombia.
- Rodríguez, J.A. (2008). *Lectures on geothermal in Central America*. United Nations University, Geothermal Training Programme.
- Rodríguez-Rodríguez, G. (2023). Aportes a la investigación del sistema geotérmico del volcán Azufral en Colombia mediante modelos 2D de magnetotelúrica. *Boletín de Geología*, 45(2), 51-63. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023003>

- Rodríguez-Pantano, H.E. (2021). Simulación técnico-económica de un sistema de generación de energía geotérmica en el volcán Cerro Machín. Tesis de maestría, Universidad ECCI, Colombia. and void formation by chelating agent in volcanic rocks (Ahuachapán and Berlín geothermal fields, El Salvador). *Geothermics*, 107, 102586. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102586>
- Rodríguez-Pantano, H.E.; Betancourt, V.; Solís-Chaves, J.S.; Rocha-Osorio, C.M. (2020). Techno-economic simulation of a geothermal energy generation system at the Machin Volcano in Colombia. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Santo André, Brasil. <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2431>
- Rojas-Navarrete, M. (2014). Centroamérica: estadísticas de producción del subsector eléctrico, 2013.
- Rojas-Sarmiento, O.E. (2012). Contribución al modelo geotérmico asociado al sistema volcánico Nevado del Ruiz-Colombia, por medio del análisis de la relación entre la susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica del sistema. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Román-González, L.F. (2021). Aporte de aguas termales proyecto Valle de Nereidas-zona Botero Londoño. Municipio de Villamaría Caldas. Tesis de grado, Universidad de Caldas.
- Rueda-Gutiérrez, J.B. (2020). Nuevas evidencias del magmatismo asociado con el sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 51-79. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020002>
- Rueda-Gutiérrez, J.; Rodríguez, G. (2016). Geología del área geotérmica de San Diego. Informe Técnico, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Saar, M.O. (2011). Geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields. *Hydrogeology Journal*, 19(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0657-2>
- Sáez-Blázquez, C.; Nieto, I.M.; Maté González, M.; García, P.C.; Martín, A.F.; González-Aguilera, D. (2022). Geophysical exploration for shallow geothermal applications: A case study in Artá, (Balearic Islands, Spain). *Geothermics*, 105, 102517. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102517>
- Salalá, L.; Takahashi, R.; Argueta, J.; Wang, J.; Watanabe, N.; Tsuchiya, N. (2023). Permeability enhancement
- Salazar-Muñoz, N.; de la Ossa, C.A.R.; Murcia, H.; Schonwalder-Ángel, D.; Botero-Gómez, L.A.; Hincapié, G.; da Silva, J.C.; Sánchez-Torres, L. (2021). Andesitic (SiO₂: ~60 wt%) monogenetic volcanism in the northern Colombian Andes: Crystallisation history of three Quaternary volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 412, 107194. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107194>
- Salazar, S.S.; Muñoz, Y.; Ospino, A. (2017). Analysis of geothermal energy as an alternative source for electricity in Colombia. *Geothermal Energy*, 5, 27. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0084-x>
- Samacá-Torres, W. (2016). Análisis morfométrico y Geomorfológico de la Caldera de Paletará (Cauca), Colombia. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Sánchez-Avila, J.I.; García-Sánchez, B.E.; Vara-Castro, G.M.; Kretzschmar, T. (2021). Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field. *Geothermics*, 89, 101980. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101980>
- Sánchez, N.; Pérez-Drago, G.; Pérez, J.; Negre, A.; Medellín, F. (2022). Geothermal-Hydrothermal Modeling of Volcano-Hosted System, Cordillera Central Colombia: Insights for Deep Geothermal Energy Resource Assessment. *EAGE GET*. The Hague, The Netherlands. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202221021>
- Sánchez-Torres, L.; Toro, A.; Murcia, H.; Borrero, C.; Delgado, R.; Gómez-Arango, J. (2019). El Escondido tuff cone (38 ka): a hidden history of monogenetic eruptions in the northernmost volcanic chain in the Colombian Andes. *Bulletin of Volcanology*, 81, 71. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1337-2>
- Sánchez-Torres, L.; Murcia, H.; Schonwalder-Ángel, D. (2022). The Northernmost Volcanoes in South America (Colombia, 5–6° N): The Potentially Active Samaná Monogenetic Volcanic Field. *Frontiers in Earth Science*, 10, 880003. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.880003>

- Sano, Y.; Gamo, T.; Williams, S.N. (1997). Secular variations of helium and carbon isotopes at Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 255-265. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00098-4)
- Sawayama, K.; Ishibashi, T.; Jiang, F.; Tsuji, T.; Nishizawa, O.; Fujimitsu, Y. (2021). Scale-independent relationship between permeability and resistivity in mated fractures with natural rough surfaces. *Geothermics*, 94, 102065. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102065>
- Shah, M.; Sircar, A.; Vaidya, D.; Sahajpal, S.; Chaudhary, A.; Dhale, S. (2015). Overview of geothermal surface exploration methods. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 1(4), 55-64.
- Shahdi, A.; Lee, S.; Karpatne, A.; Nojabaei, B. (2021). Exploratory analysis of machine learning methods in predicting subsurface temperature and geothermal gradient of Northeastern United States. *Geothermal Energy*, 9, 18. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00200-4>
- Shamoushaki, M.; Fiaschi, D.; Manfrida, G.; Niknam, P. H.; Talluri, L. (2021). Feasibility study and economic analysis of geothermal well drilling. *International Journal of Environmental Studies*, 78(6), 1022-1036. <https://doi.org/10.1080/00207233.2021.1905309>
- Shoedarto, R.M.; Tada, Y.; Kashiwaya, K.; Koike, K.; Iskandar, I.; Malik, D.; Bratakusuma, B. (2021). Investigation of meteoric water and parent fluid mixing in a two-phase geothermal reservoir system using strontium isotope analysis: A case study from Southern Bandung, West Java, Indonesia. *Geothermics*, 94, 102096. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102096>
- SICA (2021). Estado actual de la geotermia en la región de los países miembros del SICA. Unidad de Coordinación Energética (UCE-SG SICA). Sistema de Integración Centroamericana, Consejo de Ministros de Energía del SICA, Grupo Técnico de Geociencias.
- Skoglund, A.; Leijon, M.; Rehn, A.; Lindahl, M.; Waters, R. (2010). On the physics of power, energy and economics of renewable electric energy sources-Part II. *Renewable Energy*, 35(8), 1735-1740. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.031>
- Soltani, M.; Kashkooli, F.M.; Souri, M.; Rafiei, B.; Jabarifar, M.; Gharali, K.; Nathwani, J.S. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Sosa-Ceballos, G.; Macías, J.L.; Avellán, D.R.; Arce, J.L.; Saucedo, R.; Boijseauneau-López, M.; García-Sánchez, L.; Reyes-Agustín, G.; Osorio-Ocampo, S. (2019). Genesis of magmas from the Tres Virgenes volcanic complex, Baja California Sur, Mexico. *Lithos*, 350-351, 105240. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105240>
- Strout, A.M. (1977). Energy and economic growth in Central America. *Annual Review of Energy*, 2(1), 291-305. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.02.110177.001451>
- Sturchio, N.C.; Williams, S.N. (1990). Variations in chemistry of acid-sulfate-chloride springs at Nevado del Ruíz volcano, Colombia: November 1985 through December 1988. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1-2), 203-210. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90077-S](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90077-S)
- Suherlina, L.; Newson, J.; Kamah, Y.; Brehme, M. (2022). The dynamic evolution of the Lahendong geothermal system in North-Sulawesi, Indonesia. *Geothermics*, 105, 102510. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102510>
- Taborda, A.; Portela, J.P.; López-Sánchez, J.; Daniele, L.; Moreno, D.; Blessent, D. (2022). Temperature estimation of the Nevado del Ruiz Volcano geothermal reservoir: Insight from western hot springs hydrogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 240, 107049. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107049>
- Tampubolon, T.; Yanti, J.; Juliani, R.; Hutahaean, J. (2023). The influence of Mount Sinabung eruption on the geothermal in Tinggi Raja Simalungun. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103290>
- Taussi, M.; Tardani, D.; Tassi, F.; Gorini, A.; Aguilera, E.; Capaccioni, B.; Renzulli, A. (2023). A conceptual model for the Tufiño-Chiles-Cerro Negro (TCCN) geothermal system (Ecuador-Colombia): New insights into geothermal exploration from chemical and isotopic composition of hydrothermal fluids.

- Journal of Geochemical Exploration*, 249, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107214>
- Thanassoulas, C. (1991). Geothermal exploration using electrical methods. *Geoexploration*, 27(3-4), 321-350. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(91\)90005-W](https://doi.org/10.1016/0016-7142(91)90005-W)
- Timmons, D.; Harris, J.M.; Roach, B. (2014). *The economics of renewable energy: A GDAE teaching module on social and environmental issues in economics*. Tufts University.
- Tomasini-Montenegro, C.; Santoyo-Castelazo, E.; Gujba, H.; Romero, R.J.; Santoyo, E. (2017). Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1119-1136. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.074>
- Toro, A.; Murcia, H.; Sánchez-Torres, L. (2025). Magmatic evolution of basaltic rear-arc monogenetic volcanism in southern Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 462, 108312. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108312>
- Torres, M.P.; Monsalve, M.L.; Pulgarín, B.; Cepeda, H. (1999). Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). *Boletín Geológico*, 37(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol37.1-3.1999.35>
- Torres-Cerón, D.A.; Acosta-Medina, C.D.; Restrepo-Parra, E. (2019). Geothermal and mineralogic analysis of hot springs in the Puracé-La Mina sector in Cauca, Colombia. *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2019/3191454>
- Urrea, D.; Moreno, D.; López-Sánchez, J.; Blessent, D. (2024). Analysis of fractures generated by faults at micro-and macro-scale and the influence on the secondary permeability: application to the Nevado del Ruiz area (Colombia). *Environmental Earth Sciences*, 83(8), 253. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11512-6>
- Urueña-Suárez, C.L.; Peña-Urueña, M.L.; Muñoz-Rocha, J.A.; Rayo-Rocha, L.P.; Villamizar-Escalante, N.; Amaya-Ferreira, S.; Ibáñez-Mejía, M.; Bernet, M. (2020). Zircon U–Pb and fission-track dating applied to resolving sediment provenance in modern rivers draining the Eastern and Central Cordilleras, Colombia. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 469-490). Volume 3, Chapter 16. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.16>
- van der Meer, F.; Hecker, C.; van Ruitenbeek, F.; van der Werff, H.; de Wijkerslooth, C.; Wechsler, C. (2014). Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 255-269. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.007>
- Vargas-Arcila, L.; Murcia, H.; Osorio-Ocampo, S.; Sánchez-Torres, L.; Botero-Gómez, L.A.; Bolaños, G. (2023). Effusive and evolved monogenetic volcanoes: two newly identified (~ 800 ka) cases near Manizales City, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 85(7), 42. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01655-y>
- Vargas, C.; Koulakov, I.; Jaupart, C.; Gladkov, V.; Gómez, E.; El Khrepy, S.; Al-Arifi, N. (2017). Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography. *Scientific Reports*, 7(1), 46094. <https://doi.org/10.1038/srep46094>
- Vargas, C.A.; Ochoa, L.H.; Caneva, A. (2019). Estimation of the thermal structure beneath the volcanic arc of the Northern Andes by coda wave attenuation tomography. *Frontiers in Earth Science*, 7, 208. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00208>
- Vega-Salazar, E.J. (2014). Aporte al modelo geológico del Valle de las Nereidas. Tesis de grado, Universidad de Caldas, Colombia.
- Velandia, F.; Salazar, E.; Pulgarín, B.; Forero, H.; Hincapié, G. (2008). Estratigrafía de los depósitos volcánicos del Altiplano Nariñense, Colombia. *Geología Colombiana*, 33, 57-68.
- Velandia-Ramos, J.F. (2016). Propuesta de mapa de ruta para la incursión de la energía geotérmica en la canasta energética colombiana. Tesis de grado, Universidad de Los Andes, Colombia.
- Velásquez-Piedrahita, A. (2015). Formulación de una propuesta de aprovechamiento de la energía geotérmica del proyecto nereidas del macizo volcánico del Ruiz como estrategia de mitigación del cambio climático. Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

- Vieira, F.P.; Hamza, V.M. (2014). Advances in assessment of geothermal resources of South America. *Natural Resources*, 5(14), 897. <https://doi.org/10.4236/nr.2014.514077>
- Wohletz, K.; Heiken, G. (1992). *Volcanology and geothermal energy*. Vol. 432. University of California Press.
- Wong, K.V.; Tan, N. (2015). Feasibility of using more geothermal energy to generate electricity. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(4), 041201. <https://doi.org/10.1115/1.4028138>
- Xu, W.; Huang, S.; Zhang, J.; Zuo, Y.; Zhou, Y.; Ke, T.; Yu, R.; Li, Y. (2021). Geothermal gradient and heat flow of the Erlian Basin and adjacent areas, Northern China: geodynamic implication. *Geothermics*, 92, 102049. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102049>
- Yáñez, G.; Muñoz, M.; Flores-Aqueveque, V.; Bosch, A. (2015). Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology*, 42(2), 147-172. <http://doi.org/10.5027/andgeoV42n2-a01>
- Zayed, M.E.; Shboul, B.; Yin, H.; Zhao, J.; Zayed, A.A. (2023). Recent advances in geothermal energy reservoirs modeling: Challenges and potential of thermo-fluid integrated models for reservoir heat extraction and geothermal energy piles design. *Journal of Energy Storage*, 62, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106835>
- Zollweg, J.E. (1990). Seismicity following the 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 355-367. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90096-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90096-X)

Fecha de recibido: 03 de noviembre de 2023

Fecha de aceptado: 24 de octubre de 2024
