

# Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná

*Study of the impact of volcanic fluids in the water resource of Chinchiná watershed*

Denis Evelin Erazo Chamorro<sup>1</sup>  
Adela Londoño Carvajal<sup>2</sup>  
Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 20 de abril de 2015.*

*Aceptación: 9 de noviembre de 2015.*

*Recibido versión final: 16 de noviembre de 2015.*

## Resumen

La corriente superficial del río Rioclaro constituye uno de los principales tributarios del río Chinchiná y nace en la zona de influencia del volcán Nevado del Ruiz en el municipio de Villamaría, departamento de Caldas (Colombia). Teniendo en cuenta que el impacto de la actividad volcánica puede generar cambios en las condiciones ambientales, la geomorfología de la región y la calidad de elementos vitales como el agua, aire y suelo, en este estudio se busca analizar la variación de parámetros físico-químicos mediante una caracterización del agua a lo largo de la subcuenca de Rioclaro, mediante campañas de monitoreo en los puntos más representativos, seleccionados por la posible influencia volcánica, facilidad de acceso y las condiciones de seguridad de la zona. Los resultados que se obtienen permiten generar una mayor comprensión sobre el posible impacto derivado de los flujos del volcán Nevado del Ruiz y la influencia de fuentes termales sobre el recurso hídrico. Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos confirman la influencia del volcán Nevado del Ruiz en las corrientes de agua de la subcuenca de Rioclaro y se evidencia una variación en los valores comunes de las concentraciones de los compuestos analizados para la mayoría de corrientes superficiales de agua dulce.

## Palabras clave

Influencia volcánica, volcán Nevado del Ruiz, fuentes termales, recurso hídrico, río Rioclaro.

---

1. Ingeniera Química, Especialista en Ingeniería Ambiental - Área sanitaria, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Joven Investigadora Colciencias. Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Nacionalidad: colombiana. Email: deerazoc@unal.edu.co

2. Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Docente del Departamento de Ingeniería Química. Nacionalidad: colombiana. Email: adelondonoc@unal.edu.co

3. Ingeniera Química, Ph.D. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Docente del Departamento de Ingeniería Química. Nacionalidad: colombiana. Email: bharistizabalz@unal.edu.co

## Abstract

The Rioclaro River is one of the main tributaries of Chinchina River's basin, and it is born in the area of influence of the Nevado del Ruiz volcano in the municipality of Villamaría (Caldas department, Colombia). The impact of the volcanic activity may generate changes in the environmental conditions, the region's geomorphology and the quality of vital elements such as water, air and soil. Therefore, this study aims at analyzing the variation of physicochemical parameters through a characterization of water along the basin of Rioclaro by performing monitoring campaigns in the most representative points, which were selected based on possible volcanic influence, accessibility and safety conditions. The obtained results allow generating a greater comprehension of the possible impact derived from the flows of the Nevado del Ruiz volcano and the influence of thermal sources on the water resource. The results of the physiochemical analysis confirm the influence of this volcano in the water flows in the Rioclaro basin, and a variation in the regular values of the analyzed compounds' concentrations in most fresh water streams in the area.

## Keywords

Volcanic influence, Nevado Del Ruiz volcano, thermal sources, water resources, Rioclaro River.

## Introducción

Durante la actividad volcánica se emiten a la atmósfera cantidades significativas de gases y ceniza que son impulsadas a grandes distancias por la onda de energía térmica (calor) y la presión confinada en el magma. Estos productos son depositados temporalmente en la estratósfera y la tropósfera, mientras son dispersados por la acción del viento y la lluvia, alterando la calidad del aire (Organización Panamericana de la Salud - OPS 2005). El impacto de la actividad volcánica puede generar cambios en las condiciones ambientales, los ecosistemas y en la geomorfología de la región. Sus consecuencias pueden sentirse a kilómetros del volcán, e inclusive podrían provocar efectos globales como la alteración del clima. Estos cambios repercuten en los recursos naturales y alteran la salud humana como resultado del trastorno en los elementos que garantizan la supervivencia de las poblaciones (OPS 2005).

El efecto de la acumulación de ceniza y de posible lluvia ácida (según proximidad) en el suelo es contaminante por los componentes químicos que queman

la vegetación e inutilizan el suelo por varios meses. La agricultura puede verse afectada cuando la ceniza se deposita sobre los árboles y las plantas, haciendo que éstas se desprendan o que sus hojas se sequen (Caselli *et al.* 2010).

El impacto en las características del agua como consecuencia de la actividad volcánica se genera por la afluencia de aguas termales o por la precipitación de ceniza volcánica que pueden disminuir el pH (ácidos minerales fuertes  $H_2SO_4$ , HCl y HF) del agua superficial de lagos, ríos y quebradas -más allá de la neutralidad esperada en aguas crudas superficiales- y alterar sus características de sabor, olor, color, turbiedad del agua y oxígeno disuelto. Además se puede presentar una contaminación química que puede ser parcialmente nociva en el caso de los lixiviados, siendo los más comunes los de Cl,  $SO_4^{-2}$ , Na, Ca, K, Mg, entre otros (Haro 2011).

Adicionalmente, la actividad volcánica puede generar contaminación biológica debido a la muerte de organismos (mamíferos y peces) en el agua su-

perficial a causa de los agentes contaminantes inorgánicos solubles que son emitidos, y en ocasiones por cambios en la temperatura del agua, así como empobrecimiento de la cantidad del oxígeno disuelto por crecimiento microbiano (OPS 2005).

En la subcuenca de Rioclaro se han identificado fuentes de agua termal que evidencian la intensa actividad volcánica regional, la cual puede impactar las características fisicoquímicas del agua del río. Estas fuentes se localizan entre los 2.500 y 3.500 msnm, con altas temperaturas, en muchos casos superando los 60 °C (Central Hidroeléctrica de Caldas *et al.* 1983). Con el fin de caracterizar las aguas termales se emplean geotermómetros químicos, los cuales parten de la relación de concentraciones químicas de distintos elementos minerales para estimar la temperatura de foco del sistema geotérmico en el que se formaron (Aymerich 2013).

Se puede considerar que una corriente superficial con características homogéneas en sus constituyentes minerales se puede ver afectada por la afluencia de aguas termales ricas en minerales y con relaciones específicas que variarán la conductividad eléctrica y la concentración de las sustancias no degradables. Las aguas superficiales impactadas por aguas termales pueden presentar características similares a las de este tipo de aguas.

Es esencial encontrar la influencia de los flujos de masa relacionados con la actividad volcánica sobre las corrientes de agua superficiales, y de esta forma establecer una relación que permita evaluar su impacto, permitiendo conocer la calidad del agua destinada para uso agrícola, pecuario, abastecimiento de agua potable y generación de energía eléctrica, entre otros. Durante la etapa de actividad volcánica, las aguas del Rioclaro en su parte baja muestran evidencias de cenizas variando su color y la cantidad de sólidos suspendidos y disueltos.

El objetivo de este artículo es presentar la evaluación del impacto de los fluidos volcánicos en las corrientes superficiales de la subcuenca de Rioclaro, la cual puede verse afectada por la actividad del volcán Nevado del Ruiz, mediante el monitoreo de

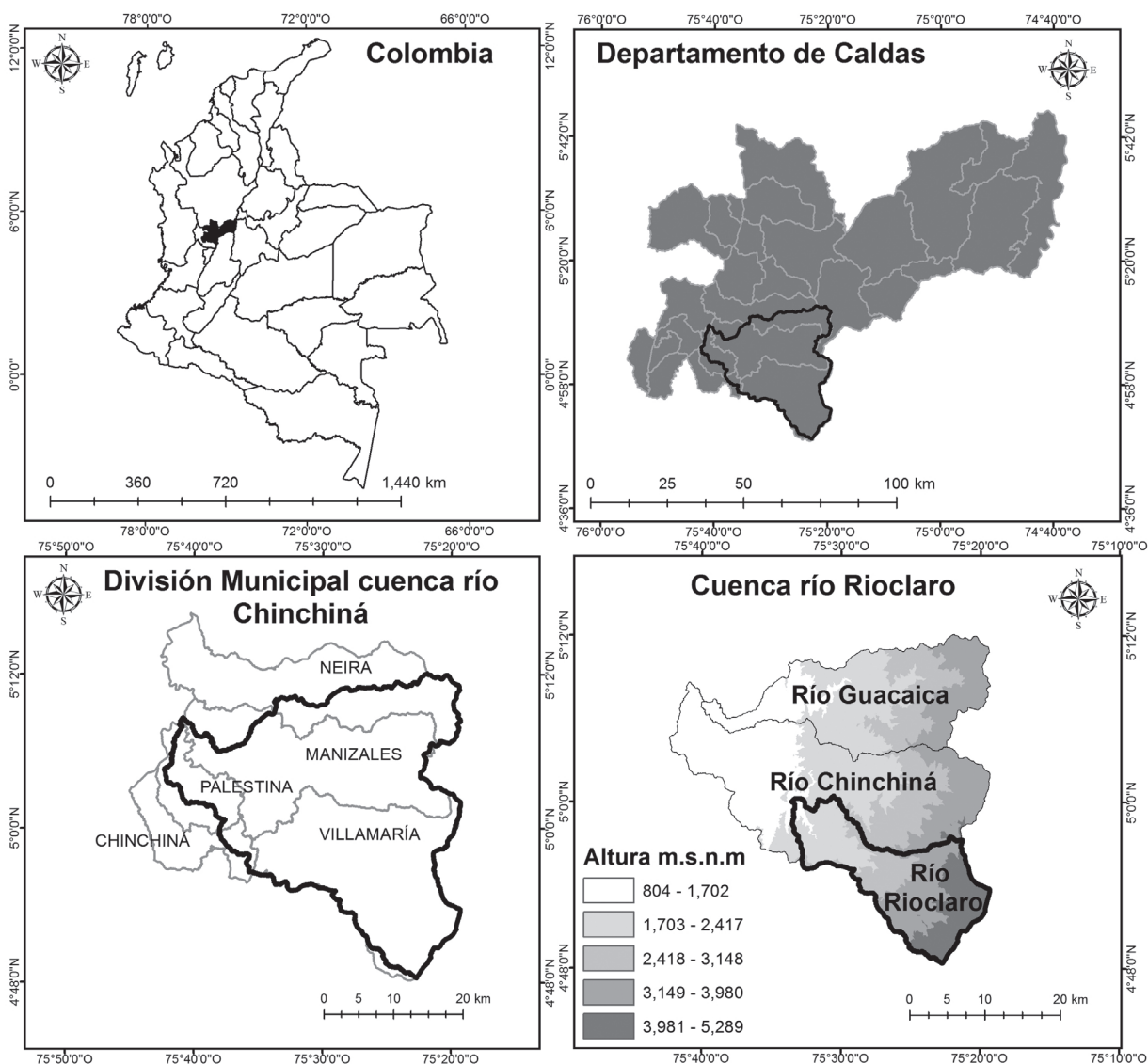
variables fisicoquímicas indicadoras de los posibles efectos volcánicos en los cuerpos de agua: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio y potasio. Adicionalmente, mediante el uso de geotermómetros químicos se busca evaluar el impacto de las fuentes de aguas termales en las aguas superficiales de la subcuenca de Rioclaro.

## Descripción del área de estudio

La cuenca del río Chinchiná se ve influenciada directamente por el volcán Nevado del Ruiz, el cual es uno de los cinco volcanes que conforman el Parque Nacional Natural Los Nevados y está ubicado en la cordillera central de Colombia, en el límite entre los departamentos de Caldas y Tolima. Es un volcán activo que presenta fumarolas y solfataras (emanación en forma de vapor de agua, bióxido de carbono y anhídrido sulfhídrico, por cuya oxidación se forma azufre) cuya última erupción ocurrió en 1985. Su cima se encuentra a 5400 m y posee dos cráteres adventicios (Bermúdez y Londoño 2002).

La cuenca del río Chinchiná comprende como drenaje principal al río Chinchiná y uno de sus principales tributarios es el río Rioclaro, el cual nace en las zonas de influencia del volcán Nevado del Ruiz en el municipio de Villamaría. Rioclaro tiene una dirección preferencial SE-NW, una longitud de 36.87 km aproximadamente, nace entre el Nevado del Ruiz y el Nevado del Cisne y desemboca en el río Chinchiná en el sector de Montevideo (municipio de Chinchiná). En la Figura 1 se muestra la ubicación de la zona de estudio.

A lo largo de la subcuenca de Rioclaro se ubican diferentes centros poblados entre los que se encuentran Llanitos, Santo Domingo, Guayana, Papayal, Laguna Alta, Playa Larga, El Páramo y Rioclaro. Estas veredas se dedican en gran parte a la actividad agrícola en el cultivo de café, frutas y hortalizas; además la actividad pecuaria es fuente de trabajo y sustento familiar con la cría de ganado para carne y leche, cerdos y aves, entre otras especies menores (Patiño 2008). La elevación media de la subcuenca



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio, subcuenca de Rioclaro. Fuente: elaboración propia a partir de los mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

de Rioclaro es de 3282 m, su perímetro es de 91.26 km y su pendiente corresponde a la media del cauce principal, la cual presenta un valor de 40.28% (CORPOCALDAS e Instituto de Estudios Ambientales - IDEA 2013).

### Metodología

La “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas” (Instituto De

Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM 2004), es la herramienta básica utilizada para el programa de monitoreo de la fuente hídrica de la subcuenca de Rioclaro, por contener los elementos básicos para el establecimiento y realización de monitoreo de calidad del agua. Sin embargo, los métodos de análisis de las muestras varían teniendo en cuenta la medición del impacto de fuentes termales.

Para este procedimiento se ejecutan dos campañas de monitoreo en los puntos seleccionados, tanto en época de lluvia como en tiempo seco. Se toman medidas directas en campo de pH, conductividad eléctrica, temperatura, y sólidos disueltos totales, debido a que las aguas termales y los fluidos volcánicos (gases y cenizas) pueden alterar el pH, la temperatura y la conductividad de las corrientes superficiales (OPS 2001).

Posteriormente, se realizan análisis de determinación de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), con el fin de compararlos con la composición más común de iones para cuerpos de agua dulce, y así evaluar alteraciones por influencia volcánica (Fuentes y Massol-Deyá 2002).

Igualmente se determina el oxígeno disuelto (OD) debido a la importancia del oxígeno en el agua, vital para la vida acuática (peces, plantas, bacterias aerobias, entre otros). La solubilidad del oxígeno atmosférico en agua dulce varía desde 14,6 mg/L a 0°C hasta aproximadamente 7,0 mg/L a 35°C a una atmósfera de presión (Sawyer *et al.* 2001).

Teniendo en cuenta que en la determinación de la calidad del agua es necesaria una caracterización química, se realiza la medición de demanda química de oxígeno (DQO), que está directamente relacionada con el grado de contaminación, así como con la naturaleza de la materia oxidable, ya que a través de esta prueba es posible estimar qué proporción del total de la materia orgánica es biodegradable (Barba 2002).

Adicionalmente, se evalúa la calidad microbiológica de las aguas, determinando la presencia de coliformes que indican la contaminación bacteriana reciente y constituyen un indicador de degradación de los cuerpos de agua (Arcos *et al.* 2005).

En este estudio se utilizan como herramienta los geotermómetros sodio-potasio (Na-K) para estimar las relaciones de estos elementos en el agua superficial y analizar si existe similitud con la temperatura del reservorio hidrotermal propio del sistema del Volcán Nevado del Ruiz; de este modo es posible verificar su influencia en el agua de la subcuenca del río Rioclaro. Para esto se determinó

la concentración de sodio y potasio en las corrientes de agua superficiales.

Los geotermómetros de Na-K han mostrado proveer temperaturas más confiables y consistentes en estudios de exploración y explotación. De hecho, el comportamiento estable de este geotermómetro ha motivado que sus ecuaciones sean, hoy en día, las más usadas en la industria geotérmica mundial (Díaz *et al.* 2008). Los cálculos obtenidos se realizan mediante la ecuación de Giggenbach (Ec.1) (Giggenbach *et al.* 1989), seleccionada entre las propuestas de varios investigadores por ser la única que se ha aplicado en el área del volcán Nevado del Ruiz, teniendo en cuenta que las ecuaciones de los geotermómetros se desarrollan con base en el ajuste de datos experimentales.

$$\frac{1390}{\text{Log} (\text{Na}/\text{K}) + 1,75} - 273,15 \quad \text{Ec. 1}$$

Finalmente, para evaluar la calidad de los datos se verifica que los resultados de las mediciones de los análisis químicos sean técnicamente válidos, justificables y de calidad, por esta razón se someten al método tradicional de Balance de Aniones-Cationes (Eaton *et al.* 2005). La comprobación de equilibrio anión-cation se basa en un porcentaje de diferencia de las contribuciones entre la carga positiva total de los cationes ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y la carga negativa total de los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NO}_3^-$ ).

### Estaciones monitoreadas y campañas realizadas

Considerando la información geográfica y el reconocimiento de la zona de la subcuenca de Rioclaro en el área de influencia del volcán Nevado del Ruiz, se establecen cuatro puntos de monitoreo a lo largo de la subcuenca.

En la Figura 2 se encuentra el mapa de la subcuenca de Rioclaro, donde se muestran los puntos de monitoreo evaluados, las fuentes termales de influencia en el área y la ubicación del volcán Nevado del Ruiz.



Figura 2. Subcuenca de Rioclaro. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps.

El punto 1 se ubica en el nacimiento de Rioclaro, en el sector de “Conejeras”, para evaluar las condiciones iniciales de la corriente.

El punto 2 se encuentra en el puente sector “finca La Cueva” para analizar el recurso hídrico en el área donde se ubican numerosas fuentes de agua termal, evidenciando la intensa actividad volcánica.

El punto 3 se ubica en el río Molinos, el cual conforma una de las 8 microcuencas que alimenta a Rioclaro y es una de las corrientes de mayor aporte, cuyo nacimiento se encuentra en el glaciar del volcán Nevado del Ruiz. La evaluación de este punto se realiza en el sector del “puente La Laguna” antes de la desembocadura del río Molinos en Rioclaro, para analizar su influencia.

El punto 4 se ubica en la desembocadura de Rioclaro en el río Chinchiná (sector de Montevideo), para evaluar su estado al final de la corriente.

En la Tabla 1 se registran las estaciones monitoreadas con las respectivas coordenadas geográficas y altura sobre el nivel del mar.

Durante el programa de monitoreo en la subcuenca de Rioclaro se ejecutaron dos campañas en los puntos seleccionados, tanto en época de lluvia

Tabla 1. Ubicación de los puntos monitoreados.

Punto	Nombre	Coordenada geográfica	Altura (msnm)
1	Río Rioclaro (sector Conejeras)	N 04° 50' 29" S 075° 22' 00"	4367
2	Río Rioclaro (puente sector finca La Cueva)	N 04° 52' 13,2" S 075° 24' 8,5"	3462
3	Río Molinos (puente La Laguna)	N 04° 56' 08" S 075° 28' 0,23"	2331
4	Río Rioclaro (sector Montevideo)	N 04° 59' 51,846" S 75° 33' 9,596"	1461

Fuente: elaboración propia.

como en tiempo seco. Este estudio es una evaluación preliminar que pretende generar datos concretos para evaluar la importancia de un estudio de mayor alcance. En la Figura 3 se presentan fotos de las campañas, en las cuales se observa la pendiente del río y las condiciones del área de estudio. La primera campaña fue en época de lluvia y se presentaron dificultades en las condiciones de acceso, por esta razón solo se cuenta con dos puntos de monitoreo.



Figura 3. Fotos de las campañas de monitoreo. Fuente: autores.

A pesar de esta restricción, los datos obtenidos son relevantes para comparar las condiciones del río durante los dos periodos ya que se midieron todos los parámetros en los sitios dos y tres.

En la Tabla 2 se encuentran las principales características de la ejecución de las campañas de monitoreo.

La información relacionada con respecto a la actividad del volcán Nevado del Ruiz es suministrada por el Servicio Geológico Colombiano a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, mediante:

- “Boletín nivel de actividad del volcán Nevado del Ruiz”, publicado semanalmente.
- Base de datos de la estación “BRUMA” que registra los flujos de emisión de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) del volcán Nevado del Ruiz a la atmósfera.

### Parámetros evaluados

Se evalúan parámetros en campo como temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), pH y sólidos disueltos totales (TDS), utilizando una sonda multiparamétrica. Los parámetros fisicoquímicos determinados en laboratorio y su respectivo método se presentan en la Tabla 3.

### Resultados y discusión

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados durante las campañas de monitoreo se presentan en la Tabla 4.

En el análisis del agua el pH presenta valores alrededor de 7, esto indica que el agua es de naturaleza neutra en todos los puntos de monitoreo. Sin embargo, se evidencia la influencia de las emisiones de ceniza y gases en el segundo monitoreo durante periodo seco, ocasionando una disminución ligera del pH.

La variación de los valores de temperatura del agua mayor a 1 °C entre una campaña y la otra, se debe posiblemente a la diferencia de condiciones climatológicas entre los tiempos de monitoreo.

En la primera campaña de monitoreo, los valores de conductividad eléctrica elevados indican la presencia de sales en el agua que generan la capacidad de transportar corriente eléctrica dependiendo de la naturaleza de los iones y su concentración total (Quintana 2005). Se obtuvieron valores de 317 y 256  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los puntos 2 y 3, los cuales disminuyeron significativamente en la segunda campaña a 161 y 183  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente.

**Tabla 2.** Características del programa de monitoreo en la cuenca de Rioclaro.

Descripción	Primera campaña 26 de octubre de 2014	Segunda campaña 31 de enero de 2015
<b>Estaciones monitoreadas</b>	Punto 2 y 3 debido a dificultades en las condiciones de acceso a los otros dos puntos.	Los cuatro puntos en su totalidad, debido a las buenas condiciones de clima y acceso al área.
<b>Nivel de actividad del volcán Nevado del Ruiz</b>	Nivel amarillo de actividad (III), cambios en el comportamiento de la actividad volcánica.	
<b>Emisiones a la atmósfera volcán Nevado del Ruiz</b>	*Vapor de agua. *Gases, entre los que se destaca el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).	*Vapor de agua. *Gases, entre los que se destaca el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). *Ceniza volcánica.
	Emisiones de SO <sub>2</sub> (Kg/s), promedio anual 2014/ desviación estándar [SO <sub>2</sub> ] promedio: 31,65 $\sigma$ : 18,67 [SO <sub>2</sub> ] máxima: 161,60 $\sigma$ : 64,59 [SO <sub>2</sub> ] mínima: 0,63 $\sigma$ : 0,75	
<b>Observaciones de condiciones climáticas en campo</b>		
<b>Precipitación</b>	Sí	No
<b>Nubosidad</b>	Sí	No
<b>Presencia de vientos</b>	Sí	No

**Tabla 3.** Parámetros fisicoquímicos evaluados en laboratorio.

Parámetros	Método de determinación
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico
Coliformes	Estándar, Filtración por Membrana.
Oxígeno Disuelto (OD)	Winkler.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Micro, reflujo abierto.
Sulfatos (SO <sub>4</sub> -2)	Turbidimétrico
Cloruros (Cl-)	Argentométrico.
Nitratos (NO <sub>3</sub> -)	Espectrofotometría UV.
Sodio (Na+)	Absorción atómica de llama.
Potasio (K+)	Absorción atómica de llama.

Fuente: elaboración propia.



**Tabla 4.** Resultados de las campañas de monitoreo.

Parámetros	Unidades	Primera campaña			Segunda campaña		
		Punto 2	Punto 3	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
pH	Unidad de pH	7,90	7,76	6,98	7,09	7,43	7,60
T	°C	8	12	6	9	15	17
T <sub>amb.</sub>	°C	8,2	12	5,9	9,3	14,6	16,9
CE	μS/cm	317	256	18	161	183	323
TDS	%	----	----	0,020	0,148	0,149	0,248
ST	mg/L	2,8	4,3	90,0	190,0	210,0	270,0
Coliformes	UFC/100 ml	316	818	74	159	282	3988
OD	mg/L	3,70	3,80	7,96	7,62	7,37	5,23
DQO	mg/L	5,18	10,35	22,59	45,18	90,35	135,53
SO <sub>4</sub> -2	mg/L	45,70	47,70	45,16	45,16	43,58	63,13
Cl-	mg/L	0,0034	0,0034	3,00	4,00	8,00	35,24
NO <sub>3</sub> -	mg/L	0,90	1,11	ND	0,13	0,08	0,27
Na+	mg/L	12,67	7,39	1,27	8,87	8,26	24,43
K+	mg/L	15,66	8,71	1,13	7,19	5,07	6,51

Fuente: elaboración propia.

En el punto 1 la conductividad es de 18 μS/cm, lo que muestra un bajo contenido de iones, que aumentan a medida que se desciende hasta la parte baja de la cuenca donde se registra un valor de 323 μS/cm. Estos valores están directamente relacionados con el aumento del porcentaje de sólidos disueltos totales, representados en la presencia de aniones y cationes.

De acuerdo con los resultados de los análisis de sólidos totales, se encuentra que su contenido aumenta significativamente en la segunda campaña de monitoreo, probablemente por las emisiones de ceniza frecuentes en el periodo posterior a la primera campaña, lo cual se evidenció al encontrar restos de ceniza en las rocas a lo largo de la corriente de Rioclaro y Molinos. En los puntos 2 y 3 hubo

una variación de 2,8 y 4,3 mg/L a 190 y 210 mg/L, respectivamente.

El menor contenido de sólidos totales se observa en el punto 1, en el área de nacimiento de Rioclaro, donde se reporta un valor de 90 mg/L, y el mayor contenido se presenta en el punto 4 en el sector de Montevideo, donde se detecta 270 mg/L, aumento que se relaciona a un arrastre de sólidos a lo largo de la corriente de Rioclaro y el aporte de la carga de sólidos del río Molinos al río Rioclaro.

Los parámetros como coliformes, OD y DQO se monitorearon para aclarar si las aguas residuales domésticas podían interferir en el análisis del impacto de los fluidos volcánicos sobre las aguas superficiales. Se encontró que el único punto de influencia a lo largo de la subcuenca de Rioclaro

es en el sector de Montevideo (al final de este río), donde se nota un aumento en las concentraciones de estos parámetros, teniendo en cuenta que allí se ubica el centro poblado con mayor número de habitantes.

Los valores de coliformes se reducen significativamente en la segunda campaña de monitoreo. En el punto 2 disminuyen de 316 a 159 UFC/100 ml y en el punto 3 de 818 a 282 UFC/100 ml. En el punto 1 se reportan 74 UFC/100 ml, siendo un valor pequeño debido a que esta zona es un área de reserva protegida por el Parque Nacional Natural los Nevados.

El valor de OD para preservación de flora y fauna es de 5,0 mg/L en aguas dulces frías; la mayoría de los ríos y riachuelos requieren de un mínimo de 6 ppm para soportar una diversidad de vida acuática. Los niveles de OD por debajo de 3 ppm afectan gravemente a la mayor parte de los microorganismos acuáticos (Peña 2007). Los valores de OD en la segunda campaña superan este valor por lo cual son fuentes de agua aceptable para la preservación de flora y fauna. En la primera campaña de monitoreo se evidencia un nivel de OD significativamente menor al evaluado en la segunda campaña. En los puntos 2 y 3 la variación fue de 3,7 y 3,8 mg OD/L a 7,62 y 7,37 mg OD/L.

La mayor cantidad de OD en la segunda campaña se reporta en el punto 1 con 7,9 mg/L, y el menor valor de 5,23 en el punto 4. Esta diferencia en concentraciones de OD está asociada a diferentes criterios como diferencias en la altitud, temperatura del agua, entrada de minerales solubles (aumento en salinidad) y entrada de grandes cantidades de materia orgánica oxidable (Fuentes y Massol-Deyá 2002). Es importante tener en cuenta que el punto 1 se encuentra a 4367 msnm y reporta temperatura de 5,9 °C, a diferencia del punto 4 ubicado a 1461 msnm y 16,94 °C. Este último recibe un mayor aporte de carga orgánica por encontrarse en la parte baja de la cuenca y está influenciado por los centros poblados ubicados a lo largo de la corriente.

La composición común de iones sulfatos para cuerpos de agua dulce es de 12,2 mg/L y el con-

tenido de sulfatos tanto para Rioclaro y Molinos es superior a los 40 mg/L en las dos campañas de monitoreo, lo cual muestra la influencia de aguas termales sulfatadas.

Los contenidos de cloruro de las aguas naturales no suelen sobrepasar los 50-60 mg/L (Rengifo y López 2011). Los resultados obtenidos en la evaluación de este parámetro en la subcuenca de Rioclaro no superan estos valores de concentración, lo cual no perjudica el crecimiento vegetal; en la primera campaña no alcanzan concentraciones de 1 mg/L, a diferencia de la segunda, donde se evidencia un aumento significativo en los contenidos de cloruro en un rango entre los 3 y 35,24 mg/L, si bien no superan el valor para aguas naturales.

La presencia de nitratos se debe a los compuestos nitrogenados que se hallan en el agua. En los análisis de nitratos durante las dos campañas de monitoreo ejecutadas a lo largo de la subcuenca de Rioclaro, se encontraron valores no detectables en su nacimiento y concentraciones inferiores a 1,11 mg/L en los otros tres puntos monitoreados, valores comunes para cuerpos de agua dulce.

En las aguas superficiales la concentración de sodio puede ser menor que 1 mg/L o exceder 300 mg/L (Osicka y Giménez 2004). Las concentraciones de sodio registradas en las muestras de agua analizadas correspondientes a la subcuenca de Rioclaro, están comprendidas en un rango entre 1,27 y 24,43 mg/L de Na. En el caso del potasio, la concentración mínima encontrada fue de 1,13 mg/L de K y la concentración máxima fue de 15,66 mg/L de K. Los resultados obtenidos confirman que el sodio está en el agua en mayor concentración que el potasio, donde los niveles más altos de sodio pueden estar relacionados con suelos salinos (Osicka y Giménez 2004).

El análisis de sodio y potasio permite calcular los geotermómetros Na-K aplicando la ecuación de Giggenbach (Ec. 1). Se realizó este cálculo con el fin de evaluar si la relación de las concentraciones de estos compuestos en el agua superficial generan un geotermómetro propio de la zona, que guarde la misma relación de los geotermómetros del sistema hidrotermal del Ruiz, de esta manera se podría co-

nocer el aporte de los fluidos geotermales en la subcuenca de Rioclaro.

Los datos que se reportan en la Tabla 5 representan la temperatura de los geotermómetros del sistema de agua superficial.

En la Figura 4 se muestran los geotermómetros Na-K obtenidos a partir de la evaluación de las concentraciones de sodio y potasio en las dos campañas de monitoreo ejecutadas.

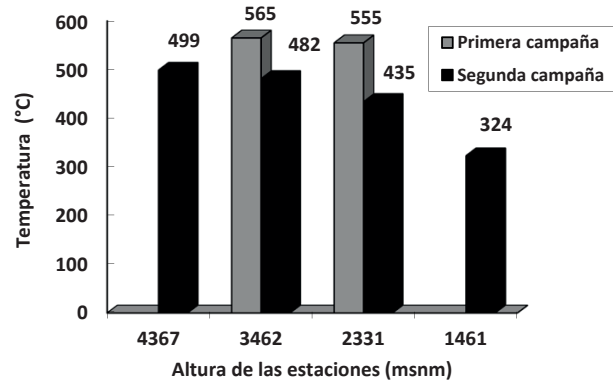
De acuerdo a la Figura 4 se observa que la temperatura disminuye con la elevación de las estaciones de monitoreo evaluadas a lo largo de la subcuenca de Rioclaro.

En los puntos 1, 2 y 3 la temperatura se encuentra entre los 400 y 500 °C, donde se evidencia la presencia de numerosas fuentes termales en el área, como se muestra en la Figura 2; mientras que en el punto 4 no se conoce la existencia de fuentes o salidas hidrotermales al final de la subcuenca de Rioclaro en el sector de Montevideo, por lo tanto este cálculo se hace básicamente como ejercicio.

Se encuentra que los valores de temperatura del sistema de agua superficial obtenidos en este estudio son similares a los del sistema de agua hidrotermal según el modelo de Giggenbach *et al.* (1989), propios de los reservorios del sistema del Ruiz, confirmando la influencia de las fuentes termales en las corrientes de agua superficial de la subcuenca de Rioclaro, teniendo en cuenta que las relaciones de Na-K se mantienen en los dos sistemas.

**Tabla 5.** Temperatura obtenida a partir de geotermómetros Na-K.

Punto de monitoreo	T (°C)	
	Primera campaña	Segunda campaña
1	---	499
2	565	482
3	555	435
4	---	324



**Figura 4.** Geotermómetros sodio-potasio del sistema de agua superficial en la subcuenca de Rioclaro. Fuente: elaboración propia.

## Conclusiones

Los geotermómetros Na-K evaluados durante la investigación arrojan temperaturas entre los 400 y 500 °C, las cuales son características de reservorios hidrotermales propios del sistema del Ruiz. Se evidencia así la influencia de las aguas termales sobre las aguas de la subcuenca de Rioclaro, confirmada con las relaciones sodio/potasio en ambos sistemas.

Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua de la subcuenca de Rioclaro confirman la influencia del volcán Nevado del Ruiz en las corrientes de agua de la zona, debido a las emisiones volcánicas de cantidades importantes de vapor de agua y gases a la atmósfera, entre los que se destaca el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y ceniza volcánica (reportados por INGEOMINAS - Observatorio Vulcanológico y Sismológico Manizales), compuestos que modifican la composición de las corrientes de agua. En el estudio se evidencia una variación en los valores comunes de las concentraciones de los compuestos analizados para la mayoría de corrientes superficiales de agua dulce, como es el caso de la composición de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) donde para cuerpos de agua dulce la concentración común es de 12,2 mg/L, a diferencia del contenido de sulfatos evaluados en Rioclaro y Molinos, que presenta concentraciones superiores a los 40 mg/L en las 2 campañas, evidenciando un aporte de aguas

termales sulfatadas. De manera similar, en la segunda campaña de monitoreo se evidencia un aumento significativo en el contenido de sólidos (de alrededor de 2 mg/l a más de 200 en la segunda campaña), un cambio causado probablemente por las emisiones permanentes de ceniza durante este periodo.

Al conocer el cambio en las relaciones de minerales aportados por las aguas termales en la corriente del Rioclaro se muestra la necesidad de profundizar en el estudio de los impactos de los fluidos volcánicos en la calidad de las aguas cercanas a la zona y prever mitigaciones de acuerdo a la actividad volcánica presentada, sea por emisiones de cenizas o de gases provenientes del magma en desgasificación.

## Referencias

- Arcos, M. P., Ávila, S. L., Estupiñán, S. M. y Gómez, A. C. 2005. *Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua*. Bogotá: División de Investigaciones, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Aymerich, J. 2013. Estudio y modelización del sistema geotérmico de Sierra Almagrera (Almería), España. Consultado en octubre de 2014. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/19424>.
- Barba, L. E. 2002. *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición*. Cali: Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.
- Bermúdez, D. M. y Londoño, J. P. 2002. *Evaluación y parámetros de optimización de la red de estaciones hidrometeorológicas del Parque Nacional los Nevados*. Trabajo Exploratorio. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Caselli, A. T., Vélez, M. L., Agosto, M. R. y Jover, M. L. 2010. *Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas*. Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Central Hidroeléctrica de Caldas - CHEC S.A., CONTECOL Ltda y Geotérmica Italiana. 1983. *Investigación geotérmica macizo volcánico del Ruiz*. Fase II etapa A, Geovolcanología. Bogotá: ICEL, Ministerio de Minas y Energía.
- CORPOCALDAS e Instituto de Estudios Ambientales - IDEA. 2013. *Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas-Colombia*. Manizales: CORPOCALDAS, Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- Díaz, L., Santoyo E. y Reyes, J. 2008. "Three new improved Na/K geothermometers using computational and geochemical tools: application to the temperature prediction of geothermal systems". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(3): 465-482.
- Eaton, A., Archie, A.E., Rice, E.W. y Clesceri, L.S. 2005. *Standard methods for the examination of water & wastewater*. Washington, D.C: Centennial Edition.
- Fuentes, F. y Massol-Deyá, A. 2002. *Manual de laboratorios: Ecología de Microorganismos*. Río Piedras: Universidad de Puerto Rico.
- Giggenbach, W. F., García, N., Londoño, A., Rodríguez, L., Rojas, N. y Calvache, M. L. 1989. "The Chemistry of Fumarolic Vapor and the Thermal-Spring Discharges from the Nevado Del Ruiz Volcanic-Magmatic-Hydrothermal System, Colombia". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 42 (1990): 13-29.
- Haro, A. N., 2011. *Evaluación del impacto ambiental en los pastizales producidos por el proceso eruptivo del volcán Tungurahua en la hacienda Choglontus*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales De Colombia - IDEAM. 2004. *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Bogotá: IDEAM.

- Organización Panamericana de la Salud - OPS. 2001. *Emergencias y desastres en sistemas de agua potable y saneamiento: guía para una respuesta eficaz*. Washington D.C. Consultado en octubre de 2014. <http://www1.paho.org/spanish/ped/agua.htm>.
- Organización Panamericana de la Salud - OPS. 2005. El sector salud frente al riesgo volcánico. Quito, Ecuador. Consultado en octubre de 2014. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd63/modulo1/modulo1.html>.
- Osicka, R. M. y Giménez, M. C. 2004. Determinación del contenido de sodio y potasio en aguas naturales subterráneas por fotometría de llama. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(3): 465-482.
- Patiño, L. M. 2008. *Villamaría Caldas y sus veredas*. Villamaría: Fondo Mixto de Cultura, Administración Municipal y Corporación Casa de la Cultura.
- Peña, E. 2007. *Calidad de Agua*. Trabajo de Investigación. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Quintana, E. 2005. *Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Rengifo, A. J. y López, L. E. 2011. *Diseño y construcción de un sistema de purificación de agua potable, osmosis inversa, desmineralización y ozonificación*. Tesis de Grado. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L. y Parkin, G.F. 2011. *Química para ingeniería ambiental*. Ed 4°. Bogotá: McGraw-Hill.

## Agradecimientos

El equipo de trabajo del proyecto “Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el aire y el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná” quiere expresar su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales) y al programa “Jóvenes Investigadores e innovadores 2013” de COLCIENCIAS, por el apoyo, financiación y acompañamiento durante este año de trabajo de investigación.

## Citar este artículo como:

Erazo, E., Londoño, A. y Aristizábal, B. 2015. “Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná”. *Gestión y Ambiente* 18(2): 81-93.

