

APOYO AL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, EN LA  
CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DEL SISTEMA  
HIDROTHERMAL DE LA CADENA VOLCÁNICA LOS COCONUCOS

TRABAJO FINAL DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PRÁCTICA  
EMPRESARIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

JUAN GABRIEL RUIZ CASTAÑO

DIRECTOR  
Ing. JULIO CESAR GIL

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2014

APOYO AL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, EN LA  
CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DEL SISTEMA  
HIDROTHERMAL DE LA CADENA VOLCÁNICA LOS COCONUCOS



JUAN GABRIEL RUIZ CASTAÑO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2014

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del director**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Popayán, \_\_\_\_ Noviembre de 2014**

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	7
Localizacion.....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	9
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	10
2.    JUSTIFICACIÓN .....	11
3.    OBJETIVOS.....	12
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
4.    ANTECEDENTES .....	13
5.    MARCO REFERENCIAL.....	14
5.1 EMPRESA RECEPTORA.....	14
5.1.1 Misión.....	14
5.1.2 Visión.....	14
5.2 MARCO LEGAL.....	15
6.    METODOLOGÍA .....	16
6.1 ASESORÍA, SUPERVISIÓN Y ACOMPAÑAMIENTO.....	16
6.2 ACTIVIDADES REALIZADAS.....	17
7.    RESULTADOS .....	19
8.    ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	22
9.    CONCLUSIONES .....	35
10.   RECOMENDACIONES .....	36
11.   BIBLIOGRAFÍA.....	37
12.   ANEXOS.....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. UBICACIÓN DE FUENTES TERMALES Y REDES DE MONITOREO DEL VOLCAN PURACE	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
Figura 2. DIAGRAMA DE PIPER FUENTES TERMALES LA MINA, LA MINA 1, AGUA HIRVIENDO, AGUA TIBIA	23
Figura 3. DIAGRAMA DE PIPER FUENTES TERMALES POZO AZUL, POZO AZUL 2, HORNOS 3, HORNOS 7	24
Figura 4. DIAGRAMA DE PIPER FUENTES TERMALES SAN JUAN, VERSALLES, GUARQUELLO, PULULO	25
Figura 5. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO EN LAS ESTACIONES ISOTÓPICAS NO TELEMÉTRICAS PERMANENTES DEL VOLCÁN PURACÉ. EL RECUADRO AMARILLO INDICA EL PERIODO EVALUADO EN EL PRESENTE INFORME.	26
Figura 6. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA GUAÑARITA DEL VOLCÁN PURACÉ.	27
Figura 7. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CRÁTER DEL VOLCÁN PURACÉ.	28
Figura 8. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA COCUY 3 DEL VOLCÁN PURACÉ.	28
Figura 9. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA ANAMBIO DEL VOLCÁN PURACÉ.	29
Figura 10. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA CRÁTER DEL VOLCÁN PURACÉ.	29
Figura 11. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN SUELO EN LA ESTACIÓN TELEMÉTRICA COCUY DEL VOLCÁN PURACÉ.	30
Figura 12. RELACIÓN DE LOS ISOTOPOS O18 Y H2 CON LA LÍNEA METEÓRICA GLOBAL	34
Figura 13. MUESTRAS FILTRADAS ENVASADAS Y ROTULADAS PARA SU TRANSPORTE	39
Figura 14. FUENTES TERMALES DE LA CADENA VOLCÁNICA LOS COCONUCOS	39
Figura 15. ESTACIONES DE MONITOREO DE 222RN Y CO2	40
Figura 16. MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS	40
Figura 17. TOMA DE TEMPERATURAS MEDIANTE TERMOCUPLA Y CAMARA TERMICA	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE FUENTES TERMALES	19
Tabla 2. CLASIFICACIÓN FUENTES TERMALES DE ACUERDO A SU TEMPERATURA	<b>ERROR!</b>
<b>BOOKMARK NOT DEFINED.</b>	
Tabla 3. CONCENCTRACION DE ANIONES EN FUENTES TERMALES	20
Tabla 4. CONCENTRACION DE CATIONES EN LAS FUENTES TERMALES	21
Tabla 5. DATOS DE ISOTOPOS O <sup>18</sup> Y H <sup>2</sup>	31

## ANEXOS

Anexo A. Evidencia fotográfica

## INTRODUCCIÓN

El vulcanismo es una manifestación tectodinámica de la corteza terrestre y tiene su origen en los procesos de convección del magma en el manto de la tierra. En el mundo los volcanes están distribuidos en orden en determinadas zonas de la corteza terrestre, siguiendo la actividad de las placas tectónicas donde se mueven una con respecto a la otra desarrollando un proceso de creación y destrucción de litosfera.

Los estudios geoquímicos se encargan del análisis de la composición química de la tierra y del comportamiento de los elementos en ella, tanto en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Esta metodología de evaluación sobre las fuentes termales en el mundo se ha realizado desde mediados del siglo pasado<sup>1</sup>, pero los estudios isotópicos de Oxígeno 18 y Deuterio ( $^{18}\text{O}$  y  $\text{H}^2$ ) son escasos debido a que es una técnica reciente y requiere equipos sofisticados para su análisis, los cuales resultan ser de gran importancia porque ayudan a determinar el efecto de agentes externos sobre la composición química de las aguas termales, durante su recorrido superficial y subterráneo<sup>2</sup>.

En Colombia, el vulcanismo actual se clasifica como de tipo continental y está asociado al proceso orogénico de los Andes que resulta de la colisión de la placa suramericana (continental) con la placa del pacífico (oceánica) donde se presenta un fenómeno de subducción<sup>3</sup>. Por esta razón, en nuestro país hay un importante número de volcanes activos, sin embargo, existen algunos que por su tamaño y forma cónica típica, se constituyen como los más sobresalientes del relieve volcánico como por ejemplo: Chiles, Galeras, Puracé, Quindío, Ruiz y Romeral<sup>4</sup>.

En este sentido, la investigación se realizó en el departamento del Cauca, sobre la cordillera central en la región de Puracé. La cual se encuentra ubicada en la cadena volcánica “los Coconucos” (CVC), que está constituida por un grupo de 15

---

<sup>1</sup>Organización Mundial de la Salud (OMS, 1995): Guías para la calidad de las aguas Termales.

<sup>2</sup>Sussman, 1982; Espinoza, 1999; CIRA, 2006; Vásquez et al., 2007.

<sup>3</sup> Volcanismo Dinámica y Petrología de sus Productos, 1974.

<sup>4</sup> Los Volcanes de Colombia, 1968.

centros eruptivos dispuestos en dirección N39° W<sup>5</sup>, siendo el volcán Puracé uno de los más importantes de acuerdo a su histórica actividad eruptiva<sup>6</sup>.

Al respecto, en el catálogo de fuentes termales del sur-occidente Colombiano, se encuentra que por lo menos 15 de ellas están ubicadas en la (CVC), además de varias lagunas de agua tibia<sup>7</sup>.

Por lo anteriormente planteado, la finalidad de esta investigación en la modalidad de práctica empresarial fue brindar un acompañamiento técnico al Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde se evaluó la dinámica del sistema hidrotermal y del comportamiento volcánico de la CVC, por medio del análisis con trazadores isotópicos y geoquímicos. De esta manera se determinó el origen de las fuentes termales y al mismo tiempo se monitoreo la actividad volcánica.

### **Localización**

Las fuentes termales objeto del trabajo de la práctica empresarial están localizadas en el segmento volcánico central de la cordillera Central de Colombia, en el departamento del Cauca. La CVC está conformada por los volcanes de Azufral, PicoCollo, Doña Juana, Quriquina, Calambas, Paletara, Quintín, Los Charcas, Machangara, Pan de Azúcar, Pucaráel, Sotara y el volcán Puracé. Para la evaluación geoquímica e isotópica de las fuentes termales, se colectaron 5 muestras en cada una de las 12 fuentes termales ubicadas alrededor del volcán Puracé (Figura 1).

Figura 1. UBICACIÓN DE FUENTES TERMALES Y REDES DE MONITOREO DEL VOLCAN PURACE

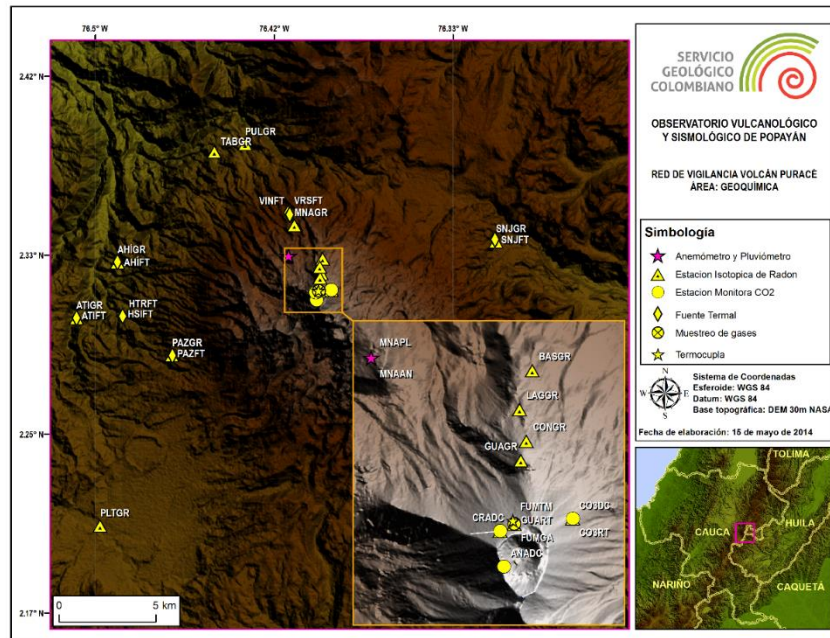
---

<sup>5</sup> Servicio Geológico Colombiano, 2014.

<sup>6</sup>Monsalve y Pulgarin, 1995.

<sup>7</sup>Garzón, 1997.





Fuente: Servicio Geológico Colombiano

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Para poder evaluar el estado de actividad volcánica, es indispensable aplicar métodos visuales e instrumentales los cuales si se usan en forma anticipada ayudan a detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad volcánica que incluso, pudiese conducir a una predicción en corto plazo de un proceso eruptivo inminente. Por esta razón, es fundamental establecer sistemas de vigilancia y monitoreo en todos los volcanes potencialmente riesgosos del país, con el fin de permitir el establecimiento de programas preventivos de acción frente a posibles desastres.

Por medio de estudios geoquímicos se ha determinado que las fuentes termales son ricas en elementos como sales de sodio, magnesio, calcio, fluoruros y azufre, además de esto la geoquímica permite evaluar gases, composición de cenizas y otros productos volcánicos que son manifestaciones relacionadas directamente con estas zonas. Debido a lo anterior, es importante la implementación de estudios geoquímicos e isotópicos, pues permiten crear una base de datos

mediante muestreos mensuales que en un futuro servirán para observar cambios significativos a través de la aplicación de estos estudios.<sup>8</sup>

En consecuencia, las fuentes termales de la CVC son muy usadas por los habitantes y turistas que llegan a esta zona, sin que existan registros amplios de análisis geoquímicos e isotópicos durante su recorrido subterráneo y superficial, con los cuales se podría definir qué tipo de agua son y que sitios no deberían ser usados por altos contenidos de algunos minerales como el azufre.

Desde esta perspectiva, la investigación se centró en realizar un estudio de la dinámica del sistema hidrotermal y del comportamiento volcánico de la CVC por medio del análisis con trazadores isotópicos y geoquímicos, que ayudaron a mantener un constante monitoreo de la actividad volcánica y de los posibles cambios que ocurran y que puedan servir para alertar a las comunidades adyacentes a estas zonas.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue diseñar una investigación basada en apoyar al SGC en la caracterización geoquímica e isotópica del sistema hidrotermal de la CVC, por medio del monitoreo constante que permita mantener una evaluación de la dinámica volcánica de la CVC.

## **1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA**

La inquietud de esta investigación está centrada en la relación que pueda existir entre los diferentes tipos de parámetros muestreados en campo, a la hora de analizar o predecir de forma oportuna cambios significativos en la actividad volcánica. Por lo anterior, se pretende indagar en el siguiente interrogante ¿es importante el monitoreo geoquímico e isotópico en la evaluación y prevención de eventos volcánicos?

---

<sup>8</sup> American Public Health Association, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 th Ed. Washington

## 2. JUSTIFICACIÓN

El sistema de fuentes termales de la CVC es de vital importancia para los habitantes del municipio de Puracé, debido a que a través del uso de estas como balnearios, se ha logrado convertir a la región en un atractivo turístico generador de empleo.

A nivel nacional, estas fuentes de agua son conocidas por sus propiedades medicinales<sup>9</sup>. Por lo tanto, los estudios geoquímicos que se realicen con respecto a estas, ayudarán a identificar qué lugares tienen las mismas características y podrían llegar a usarse para esta misma finalidad, además de llevar un control de diferentes parámetros que permitan mantener una constante evaluación en el comportamiento volcánico.

Por otra parte, las mediciones a partir de parámetros isotópicos, permiten estudiar el comportamiento de Oxígeno 18 y Deuterio en el ciclo hidrológico<sup>10</sup>. Al utilizar estudios isotópicos en las fuentes termales de CVC, se podrá evaluar la influencia

---

<sup>9</sup> Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Coconuco, 2013.

<sup>10</sup>Organismo Internacional de la energía Atómica, 2014.

de factores externos como aguas subterráneas, además de determinar su origen, su forma de recarga, la existencia de riesgo de contaminación por otras fuentes naturales de agua y si es posible utilizarlas de una manera adecuada.

Para la investigación en particular, se analizó la dinámica del sistema hidrotermal y del comportamiento volcánico de la CVC por medio del monitoreo geoquímico e isotópico que consiste en determinar cambios en la composición química de las fuentes termales. Igualmente, se colectaron muestras de radón y dióxido de carbono presentes en los suelos de la zona, con el fin de observar cambios que pudieran estar directamente relacionados con el movimiento o el ascenso de magma al interior de un volcán.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Apoyar al Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el estudio de la composición geoquímica e isotópica del sistema hidrotermal de la cadena volcánica los Coconucos.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar un muestreo de parámetros geoquímicos e isotópicos, de las 12 fuentes termales de la CVC
2. Caracterizar las fuentes termales de la CVC de acuerdo a su contenido de elementos químicos.

3. Tomar medidas del isótopo  $Rn^{222}$  y del gas  $CO_2$  en suelo para determinar posibles cambios en el comportamiento de la CVC.
4. Realizar medidas de los isótopos  $O^{18}$  y  $H^2$  para analizar su comportamiento en las fuentes termales de la CVC.

#### 4. ANTECEDENTES

- En el municipio de Santa Fe de Antioquia se determinaron las recargas de acuíferos con trazadores isotópicos ambientales donde se encontró gran variabilidad en los contenidos de los isótopos Oxígeno 18 y Deuterio, debido a la precipitación local y también por mezclas entre aguas de recargas altas y aguas de recargas bajas<sup>11</sup>.
- La Corporación Autónoma Regional de La Guajira (CORPOGUAJIRA) realizó junto al Organismo Internacional de Energía Atómica (OAEA) y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), un estudio combinado de Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica (deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-13 y carbono-14) en el municipio de Maicao (Dpto. de La Guajira), en el extremo norte de Colombia. Este estudio ha tenido como objetivos específicos determinar la

---

<sup>11</sup> Determinación de la Recarga con Isótopos Ambientales en los Acuíferos de Santa Fe de Antioquia

naturaleza de los tres acuíferos presentes en Maicao, juzgar la relación entre ellos, y evaluar el papel que desempeñan los principales rasgos estructurales en los procesos de recarga<sup>12</sup>.

## **5. MARCO REFERENCIAL**

### **5.1 EMPRESA RECEPTORA**

La práctica empresarial para optar al título de Ingeniero Ambiental, se desarrolló en el Servicio Geológico Colombiano en la sede de la ciudad de Popayán, cuya dirección es calle 5B N.º 2 – 14 en el barrio loma de Cartagena apartado aéreo 695, teléfonos (57+2) 8242057, (57+2) 824234, Fax (57+2) 8241555, popayan@sgc.gov.co.

#### **5.1.1 Misión**

Contribuir al desarrollo económico y social del país, a través de la investigación en geociencias básicas y aplicadas del subsuelo, el potencial de sus recursos, la

---

<sup>12</sup> Estudio Hidrogeológico con Énfasis en Hidrogeoquímica de los Acuíferos en la Zona Sur del Departamento del Valle del Cauca (Colombia)

evaluación y monitoreo de amenazas de origen geológico, la gestión integral del conocimiento geocientífico, la investigación y el control nuclear y radiactivo, atendiendo las prioridades de las políticas del Gobierno Nacional.

### **5.1.2 Visión**

Consolidar para su centenario en el año 2016, al Servicio Geológico Colombiano como la autoridad geocientífica del territorio nacional y entidad líder en la investigación de aplicaciones nucleares y radiactivas.

## **5.2 MARCO LEGAL**

- Decreto 1129 de 1999. Reestructura el Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS) y asume el nombre de Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero- Ambiental y Nuclear.
- Decreto número 252 de 2004. Por el cual se reestructura el Instituto de Investigación e Información INGEOMINAS.
- Decreto-Ley Número 4131 DE 2011. “Por el cual se cambia la Naturaleza Jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS”, y teniendo en cuenta las normas y disposiciones reformativas del Estado, a partir del 4 de noviembre del 2011 Ingeominas se transforma en el de Servicio Geológico Colombiano.

Según el proyecto de ley de 2013 del senado de la república de Colombia, el congreso de la república decreta en su capítulo 2

**ARTÍCULO 4.** El Servicio Geológico Colombiano se encargará de investigar, identificar, inventariar y caracterizar las aguas termales del territorio nacional, el ministerio de salud deberá definir su utilidad terapéutica y el ministerio de industria, comercio y turismo habrá de precisar su utilidad industrial y turística.

**ARTÍCULO 5. Registro público de aguas termales.** El Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, llevará a cabo el registro oficial de aguas termales con potencial de utilización en terapias médicas, apoyado en los archivos de solicitud de declaración de aptitud del agua termal para usos médicos del Ministerio de Salud.

El documento de registro deberá incluir denominación, localización de la fuente termal o establecimiento balneario, composición del agua, información geológica y topográfica del terreno, accesos e indicaciones terapéuticas y tendrá un carácter público.

## 6. METODOLOGÍA

Para evaluar la descarga de agua en las fuentes termales de Aguas tibias, Aguas hirviendo, Versailles, Guarquello, Pululo, San Juan, se colectó una muestra mensual y en los termales de Hornos, la Mina y Pozo Azul, se colectaron 2 muestras en lugares diferentes lo cual permitió tener un total de 12 muestras mensuales, además de esto se tomaron muestras de CO<sub>2</sub> y se midió la concentración del isótopo <sup>222</sup>Rn durante un periodo de cuatro (4) meses.

Los siete primeros días de cada uno de los cuatro meses de trabajo se realizaron actividades de terreno diario 12 horas durante los cuales se colectaron tanto muestras geoquímicas como isotópicas y se midieron los parámetros fisicoquímicos correspondientes. En los cuatro meses de trabajo el tiempo total de muestreo fue de 336 horas. Posteriormente en la oficina asignada por el Servicio Geológico Colombiano se analizaron los datos, en horarios de 8 horas diarias los



días laborables de cada mes, para una totalidad de 520 horas de oficina, con esto se logró realizar un trabajo total de 853 horas.

## **6.1 ASESORÍA, SUPERVISIÓN Y ACOMPAÑAMIENTO**

Para llevar a cabo este trabajo de grado en modalidad de práctica empresarial, se contó con la supervisión de la especialista Luisa Fernanda Meza Maldonado funcionaria del SGC. En la parte académica el consejo de la facultad de ingeniería de la Universidad del Cauca designo en la dirección y asesoría al ingeniero Julio Cesar Gil.

Inicialmente, se realizó la evaluación del estado del arte llevando a cabo una constante revisión bibliográfica, la metodología que se siguió para la ejecución de esta práctica empresarial y el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos se describen a continuación:

## **6.2 ACTIVIDADES REALIZADAS**

### **6.2.1 Muestreo de parámetros geoquímicos e isotópicos, de 12 fuentes termales.**

En cada visita técnica realizada a cada una de las 12 fuentes termales de la cadena volcánica los Coconucos, se tomaron medidas insito de pH, conductividad, temperatura y solidos suspendidos con un equipo multiparamétrico en el sitio de muestreo. Los parámetros geoquímicos que se midieron fueron: Carbonatos, Cationes, Aniones y gases disueltos. Las muestras se recolectaron en recipientes de plástico de 100 mL a excepción de la de gases disueltos, para lo cual se utilizaron recipientes de vidrio de 50 mL. Los parámetros isotópicos que se analizaron fueron: Oxígeno 18 y Deuterio en agua y  $^{222}\text{Rn}$  en suelo además de  $\text{CO}_2$ .

Las muestras fueron marcadas y conducidas al depósito de muestras del SGC para rotular de manera definitiva y ser enviadas a los laboratorios del SGC con sede en Bogotá y Manizales, donde mediante técnicas de cromatografía de gases

y espectrometría de masas, se determinó cuantitativamente y cualitativamente los componentes de las muestras y relaciones isotópicas.

### **6.2.2 Caracterización de las fuentes termales de acuerdo a su contenido de elementos químicos**

En la oficina SGC de la ciudad de Popayán, teniendo los resultados de las muestras tomadas en campo, se procedió a evaluar e interpretar los datos mediante diagramas de Piper utilizando el programa Diagrammes<sup>13</sup> el cual es un software libre, creado por la universidad de Avignon.

### **6.2.3 Toma de medidas del isótopo Rn<sup>222</sup> y del gas CO<sub>2</sub> en suelo para determinar posibles cambios en su comportamiento.**

Se tomaron muestras de los isótopos Rn<sup>222</sup> y del gas CO<sub>2</sub> en las estaciones dispuestas por el SGC, con el fin de determinar posibles cambios en el comportamiento de estos gases. La medida de gas radón se realizó por medio de cámaras ionizantes E-perm, las cuales son discos de teflón Du-Pont cargados electrostáticamente llamados electret, que se encargan de coleccionar iones en su superficie, también posee una cámara fabricada con material de polipropileno que es conductor de la electricidad, dentro del cual se puede descargar un electret.

Dicho gas también se monitorea las 24 horas del día por medio de señales telemétricas que llegan a las oficinas del SGC mediante un sensor BT45N BARASOL que envía datos cada minuto, por lo cual se convierte en una herramienta muy confiable a la hora de evaluar las concentraciones de este gas.

Para tomar las medidas de CO<sub>2</sub> en el suelo se instaló un tubo de PVC (cloruro de polivinilo) a una profundidad de 70 cm con el fin de minimizar influencias meteorológicas, tales como lluvias, vientos, temperatura ambiental o presión atmosférica. Así mismo, la parte superior del tubo se selló con una tapa de PVC, utilizando silicona transparente. El tubo tiene unas dimensiones de 100 cm de largo y 10.16 cm de diámetro, los cuales están ubicados en los alrededores del volcán Puracé y en el edificio volcánico. Dentro del tubo de PVC se colocaron dos tubos pequeños del mismo material, usando pegante de PVC o silicona transparente, de tal manera que sirvieran de soporte para el electret antes mencionado y una manguera de donde se tomaron las muestras de CO<sub>2</sub> por medio de una jeringa que depositara su contenido en un tubo vacutainer, que

---

<sup>13</sup> <http://www.lha.univ-avignon.fr/>, 2014

después de ser rotulado se envió a los laboratorios del SGC donde por medio de un cromatógrafo de gases se evaluó su concentración.

No obstante el gas CO<sub>2</sub> fue monitoreado las 24 horas del día por medio de señales telemétricas que llegan directamente a la oficina del SGC cada minuto, esto se logró mediante la técnica de cámara de acumulación de flujo que ha sido ampliamente utilizada en áreas volcánicas. Dicha técnica consiste en una cámara circular de dimensiones conocidas y que se encuentra abierta solo en la parte inferior donde está en contacto con el suelo, un detector infrarrojo de CO<sub>2</sub> por el cual se hace pasar en un circuito cerrado el aire del interior de la cámara, un conversor analógico que transforma la señal de salida y un ordenador que envía la señal.

#### **6.2.4 Realizar medidas de los isotopos O<sup>18</sup> y H<sup>2</sup> para analizar su comportamiento en las fuentes termales de la zona.**

Para realizar el estudio de los isotopos O<sup>18</sup> y H<sup>2</sup> se tomaron muestras de agua de las 12 fuentes termales en frascos de 50 ml que posteriormente fueron enviadas a los laboratorios del Servicio Geológico Colombiano con sede en Bogotá, donde por medio de las técnicas de espectrometría de absorción atómica se analizaron las muestras y se enviaron de regreso a la sede del SGC en Popayán para su posterior análisis.

## **7. RESULTADOS**

Por medio del análisis fisicoquímico de las fuentes termales se observó que el pH varía entre 1.35 y 6.6 y la conductividad entre 1.08 y 12.17 los cuales no mostraron cambios significativos durante el transcurso del tiempo de estudio, además de esto las temperaturas se encontraron entre el rango de 23°C a 89°C. Dichos resultados se ven expuestos en la tabla 1

**Tabla 1. PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE FUENTES TERMALES**

Datos de la muestra		Parametros fisicoquímicos		
Nombre	Fecha de muestreo	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléct (mS/cm)
LA MINA	30/10/2013	1.43	46	
LA MINA	06/02/2014	1.39	45	
LA MINA	13/03/2014	1.54	45.7	
LA MINA	15/05/2014	1.52	45.1	
LA MINA	21/06/2014	1.49	45	
LA MINA 1	30/10/2013	1.47	50.7	11.03
LA MINA 1	06/02/2014	1.35	50.9	11
LA MINA 1	13/03/2014	1.49	50.9	10.86
LA MINA 1	15/05/2014	1.49	50.8	10.6
LA MINA 1	21/06/2014	1.47	50.8	10.74
A.HIRVIENDO	31/10/2013	6.54	72.8	12.17
A.HIRVIENDO	05/02/2014	6.32	73	12.02
A.HIRVIENDO	12/03/2014	6.51	73.1	11.7
A.HIRVIENDO	15/05/2014	6.57	73.1	11.61
A.HIRVIENDO	19/06/2014	6.43	73	12.06
A.TIBIA	31/10/2013	6.37	53.7	8.2
A.TIBIA	05/02/2014	6.14	54.1	8.2
A.TIBIA	12/03/2014	6.42	53.9	8.15
A.TIBIA	15/05/2014	6.27	54.1	8.18
A.TIBIA	19/06/2014	6.33	53.4	7.97
POZO AZUL	31/10/2013	3.76	87	4.09
POZO AZUL	05/02/2014	5.44	43	1.19
POZO AZUL	11/03/2014	4.9	85.4	2.71
POZO AZUL	13/05/2014	5.78	40.2	1.12
POZO AZUL	18/06/2014	5.94	43.5	1.08
POZO AZUL 2	31/10/2013	1.83	88.9	3.33
POZO AZUL 2	05/02/2014	1.51	88.6	4.1
POZO AZUL 2	11/03/2014	1.76	89.1	4.3
POZO AZUL 2	13/05/2014	1.67	86.4	4.7
POZO AZUL 2	18/06/2014	1.82	88	5.07
SAN JUAN	30/10/2013	6.02	34.7	1.72
SAN JUAN	06/02/2014	4.54	34.8	1.93
SAN JUAN	13/03/2014	4.56	34.9	1.94
SAN JUAN	14/05/2014	4.63	34.6	1.82
SAN JUAN	20/06/2014	4.7	34.5	1.94
HORNOS 3	31/10/2013	3.5	80.8	4.3
HORNOS 3	05/02/2014	3.31	79.6	3.76
HORNOS 3	11/03/2014	3.53	79.4	1.92
HORNOS 3	13/05/2014	3.52	80	3.85
HORNOS 3	18/06/2014	3.5	78	4.19
HORNOS 7	31/10/2013	3.52	80.7	4.14
HORNOS 7	05/02/2014	3.33	79.8	3.93
HORNOS 7	11/03/2014	3.56	77.6	4
HORNOS 7	13/05/2014	3.5	78.1	4.04
HORNOS 7	18/06/2014	3.55	78.3	4.26
VERSALLES	30/10/2013	6.02	34.7	1.72
VERSALLES	06/02/2014	5.96	36.1	2.38
VERSALLES	13/03/2014	6.6	36.3	2.34
VERSALLES	15/05/2014	6.19	34.7	2.08
VERSALLES	20/06/2014	6.05	33.7	1.97
GUARQUELLO	14/03/2014	2.2	23.6	3
GUARQUELLO	15/05/2014	2.2	23.4	2.9

En las fuentes termales se encontraron elevadas concentraciones de iones cloruro y sulfato cuyos rangos fueron de 32.6 mg/l a 1627.5 mg/l y 136 mg/l a 7079.9 mg/l respectivamente. Las aguas también mostraron concentraciones de cationes como sodio y potasio que varían de 14.2 mg/l a 3100 mg/l y 1.7 mg/l a 274 mg/l, las concentraciones de calcio y magnesio están en rangos de 7.8 mg/l a 350 mg/ y 4 mg/l a 395 mg/l respectivamente. Algunos componentes no están presentes en las tablas debido a que sus concentraciones son muy bajas. Los resultados de la composición química de las aguas muestreadas de esta zona se presentan en las tablas 2 y 3.

**Tabla 2. CONCENTRACION DE ANIONES EN FUENTES TERMALES**

Datos de la muestra		Aniones mayoritarios (mg/L)							
Nombre	Fecha de muestreo	Fluoruro	cloruro	bromuro	nitrato	fosfato	bicarbonato	carbonato	sulfato
LA MINA	30/10/2013		779.9						2247
LA MINA	06/02/2014		1320						7079.9
LA MINA	13/03/2014	49.2	1048.4				0		3396.5
LA MINA	15/05/2014		989.2				0	0	2508
LA MINA	21/06/2014		1306.6				0	0	3540.9
LA MINA 1	30/10/2013		1293.9						3447
LA MINA 1	06/02/2014		927.3						5747.8
LA MINA 1	13/03/2014		956.7						2960.5
LA MINA 1	15/05/2014		1246.2				0	0	3527.7
LA MINA 1	21/06/2014	51.7	942.5				0	0	5274.5
A.HIRVENDO	31/10/2013		1317						1772.5
A.HIRVENDO	05/02/2014		1357.6						2536.4
A.HIRVENDO	12/03/2014	7.8	1482.2				899.75		349.9
A.HIRVENDO	15/05/2014		1600						2223.2
A.HIRVENDO	19/06/2014		1627.5				1067.5	0	5293.9
A.TIBIA	31/10/2013		1329.4						2574
A.TIBIA	05/02/2014		1044						1155.4
A.TIBIA	12/03/2014	3.9	1535	7.6			878.4		1365.8
A.TIBIA	15/05/2014		1318.9				988.2	0	1050.7
A.TIBIA	19/06/2014		1295.1				994.3	0	2916.8
POZO AZUL	31/10/2013		531.75						136
POZO AZUL	05/02/2014		520						2540.9
POZO AZUL	11/03/2014	1.1	472.1				0		1740.8
POZO AZUL	13/05/2014		248.2				42.7	0	141.6
POZO AZUL	18/06/2014		145.8				0	0	310.4
POZO AZUL 2	31/10/2013		443.1						1883
POZO AZUL 2	05/02/2014		302.5						844.6
POZO AZUL 2	11/03/2014		1.3	1.7			0		442.6
POZO AZUL 2	13/05/2014		63.8				0	0	458.3
POZO AZUL 2	18/06/2014		209.6				48.8	0	1063.8
SAN JUAN	30/10/2013		230.425						682
SAN JUAN	06/02/2014		32.6						115.5
SAN JUAN	13/03/2014		36.6				21.35		1188.7
SAN JUAN	14/05/2014		73.7				48.8	0	1006.5
SAN JUAN	20/06/2014		89.3				67.1	0	961.9
HORNOS 3	31/10/2013		372.22						1009
HORNOS 3	05/02/2014		355.2						724.7
HORNOS 3	11/03/2014	1.8	437.2				0		636.7
HORNOS 3	13/05/2014		517.2				0	0	618.6
HORNOS 3	18/06/2014		553.1				30.5	0	820.8
HORNOS 7	31/10/2013		389.95						2902
HORNOS 7	05/02/2014		836.1						755.8
HORNOS 7	11/03/2014	3.1	458.9				0		611.5
HORNOS 7	13/05/2014		534.1				18.3	0	639.1
HORNOS 7	18/06/2014		571				30.5	0	1698.6
VERSALLES	30/10/2013		868.5						1373
VERSALLES	06/02/2014		303.8						378.5
VERSALLES	13/03/2014		199.2				732		180.9
VERSALLES	15/05/2014		199.3				780.8	0	175.7
VERSALLES	20/06/2014								
GUARQUE LLO	14/03/2014		176.6				0		487.3
GUARQUE LLO	15/05/2014	10.2	238.5				0	0	518.8
PULWLO	12/03/2014	6.3	132.6				0		2369.9
PULWLO	15/05/2014		340.7				0	0	829.2
PULWLO	20/06/2014		390.4				0	0	1019.4

**Tabla 3. CONCENTRACION DE CATIONES EN LAS FUENTES TERMALES**

Datos de la muestra				Cationes mayoritarios (mg/L)								
Nombre	Fecha de muestreo	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Zn	Sr
LA MINA	30/10/2013	74.5	163	73.1	278	360	312	82.9	15.6	0.4	1.4	1.7
LA MINA	06/02/2014	67.9	22	67.3	220	316	404	78	13.7	0.4	1	1.7
LA MINA	13/03/2014	63.6	151	66.7	174	309	293	71.4	13.3	0.3	1.2	1.5
LA MINA	15/05/2014	67	150	75	335	260	295	67	14	0.2	0.9	1.4
LA MINA	21/06/2014	81.6	178	74.1	350	295	305	89.7	14.8	0.3	1.3	1.6
LA MINA1	30/10/2013	77	183	103	305	395	346	92.2	17.4	0.5	1.5	1.9
LA MINA1	06/02/2014	63.6	19.7	52.2	202	264	264	66	11.7	0.3	<-0.1	1.7
LA MINA1	13/03/2014	58.3	127	53.1	205	262	242	58.9	11.2	0.3	<-0.1	1.3
LA MINA1	15/05/2014	64.7	129	62	260	215	255	56.8	13	0.2	0.7	1
LA MINA1	21/06/2014	71.2	142	55.9	230	240	245	67.3	11.9	0.3	1	1.4
A.HIRVIENDO	31/10/2013	67.7	<1	0.2	134	45.5	2391	274	5.6	9.6	<-0.1	3.2
A.HIRVIENDO	05/02/2014	55.0	<1	0.1	106.0	35.0	3100.0	224.0	4.5	6.8	<-0.1	3.9
A.HIRVIENDO	12/03/2014	56.8	<1	0	78	35.9	2016	212	4.4	7.3	<-0.1	3
A.HIRVIENDO	15/05/2014	70.6	<1	0.4	152	36	2280	212	6	6.4	<-0.1	3.9
A.HIRVIENDO	19/06/2014	70.9	<1	<-0.1	164	34	2420	255	4.9	8.3	<-0.1	3.4
A.TIBIA	31/10/2013	65.6	<1	1.5	83.3	12.5	1831	80.2	0.3	4.9	<-0.1	2.7
A.TIBIA	05/02/2014	51.1	<1	0.3	74	9.6	2190	62	0.2	3.6	<-0.1	2.7
A.TIBIA	12/03/2014	54.1	<1	0.1	54	9.7	1508	61.5	0.2	3.7	0.1	2.1
A.TIBIA	15/05/2014	64.5	<1	0.6	96	9.8	2080	63.3	0.2	3.8	<-0.1	2.2
A.TIBIA	19/06/2014	70	<1	<-0.1	118	10	1680	18.1	0.2	4.4	<-0.1	2.4
POZO AZUL	31/10/2013	208	167	103	19.9	9.4	15.6	5.2	0.5	0.1	0.1	0.4
POZO AZUL	05/02/2014	136	26	95.5	11.7	8.1	15.3	3.9	0.4	<-0.1	<-0.1	0.3
POZO AZUL	11/03/2014	148	180	87.9	7.8	8.7	14.2	3.9	0.4	<1	0.1	0.3
POZO AZUL	13/05/2014	148	167	<-0.1	68	20.2	20.6	2.2	0.9	<-0.1	0.1	<-0.1
POZO AZUL	18/06/2014	174	331	200	72	20	24	1.7	1.1	<-0.1	0.2	0.3
POZO AZUL2	31/10/2013	167	3.2	7.3	13.7	4.7	595	92.4	0.4	2.6	0.1	0.3
POZO AZUL2	05/02/2014	64.6	<1	0.2	14.9	5.3	216	27	0.1	0.6	<-0.1	0.3
POZO AZUL2	11/03/2014	128	4.8	5.2	8.1	5	427	60.5	0.4	1.7	<-0.1	0.3
POZO AZUL2	13/05/2014	79.8	<1	0.2	15.6	4.1	172	23.3	0.1	0.6	<-0.1	0.2
POZO AZUL2	18/06/2014	69.2	<1	<-0.1	20	4	172	28	0.1	0.7	<-0.1	0.2
SAN JUAN	30/10/2013	68.9	<1	<-0.2	364	89.7	69	11.1	2.9	0.1	<-0.1	0.9
SAN JUAN	06/02/2014	51.8	<1	<-0.1	290	68	70	9.8	2.3	0.2	<-0.1	1
SAN JUAN	13/03/2014	58.1	<1	0	297	73.3	60	9.2	2.3	<-0.1	<-0.1	1.3
SAN JUAN	14/05/2014	63.3	<1	0.1	350	66	64	8.7	2.3	<-0.1	<-0.1	0.6
SAN JUAN	20/06/2014	70.7	<1	<-0.1	300	66	66	10.5	2.5	<-0.1	<-0.1	0.8
HORNOS 3	31/10/2013	194	<1	0.8	31.3	9.5	664	126	0.9	2.4	0.1	0.1
HORNOS 3	05/02/2014	155	<1	0.2	24.6	6.5	596	96	0.6	1.9	<-0.1	<-0.1

## 8. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la evaluación geoquímica en campo, muestran que las aguas asociadas al sistema hidrotermal de la CVC presentan temperaturas mayores a 20°C lo que las sitúa dentro del grupo de aguas termales según los diferentes criterios de termalismo existentes. Teniendo en cuenta lo anterior se realizó la clasificación de las fuentes termales de la CVC de acuerdo a su temperatura como se muestra en la tabla 2.

Tabla 4. CLASIFICACION DE FUENTES TERMALES DEACUERDO A SU TEMPERATURA CON TERMOCUPLA Y CAMARA TERMICA

FUENTE TERMAL	TEMPERATURA MEDIDA CON TERMOCUPLA (°C)	TEMPERATURA MEDIDA CON FLIR (°C)	PROMEDIO ENTRE MEDIDAS DIRECTAS E INDIRECTAS	CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES SEGÚN SU TEMPERATURA
POZO AZUL	76.4	73.3	74.8	Termales
POZO AZUL 2	84.1	--	--	Termales
HORNOS 3	80.8	73.9	77.3	Termales
HORNOS 7	78.8	80.0	79.4	Termales
AGUA TIBIA	53.9	--	--	Termales
AGUA HIRVIENDO	72.8	72.2	72.5	Termales
PULULÓ	25.9	32.4	29.1	Hipotermiales
VERSALLES	34.0	30.6	32.3	Mesotermiales
SAN JUAN	34.4	33.4	33.9	Mesotermiales
LA MINA 1	49.8	--	--	Mesotermiales
LA MINA	45.3	--	--	Mesotermiales
GUARQUELLÓ	23.1	29.6	26.3	Hipotermiales
FUMAROLA	93.8	110.5	--	--

Analizando la información de las tablas 2 y 3, se procedió a caracterizar las fuentes termales de acuerdo a su contenido de elementos químicos por medio del software Diagrammes, que es de gran utilidad porque permite visualizar diferentes tipos de aguas según su concentración química y al mismo tiempo observar su grado de mineralización. Estos diagramas permiten hacer un análisis estadístico minucioso, de las variaciones en las composiciones químicas de los resultados geoquímicos e isotópicos de las muestras.

Dicha clasificación geoquímica de las aguas en estudio es posible de realizar mediante diagramas de PIPER, los cuales por medio de dos triángulos equiláteros

permiten representar la concentración de aniones y cationes para luego de proyectarse a un rombo central poder analizarse.

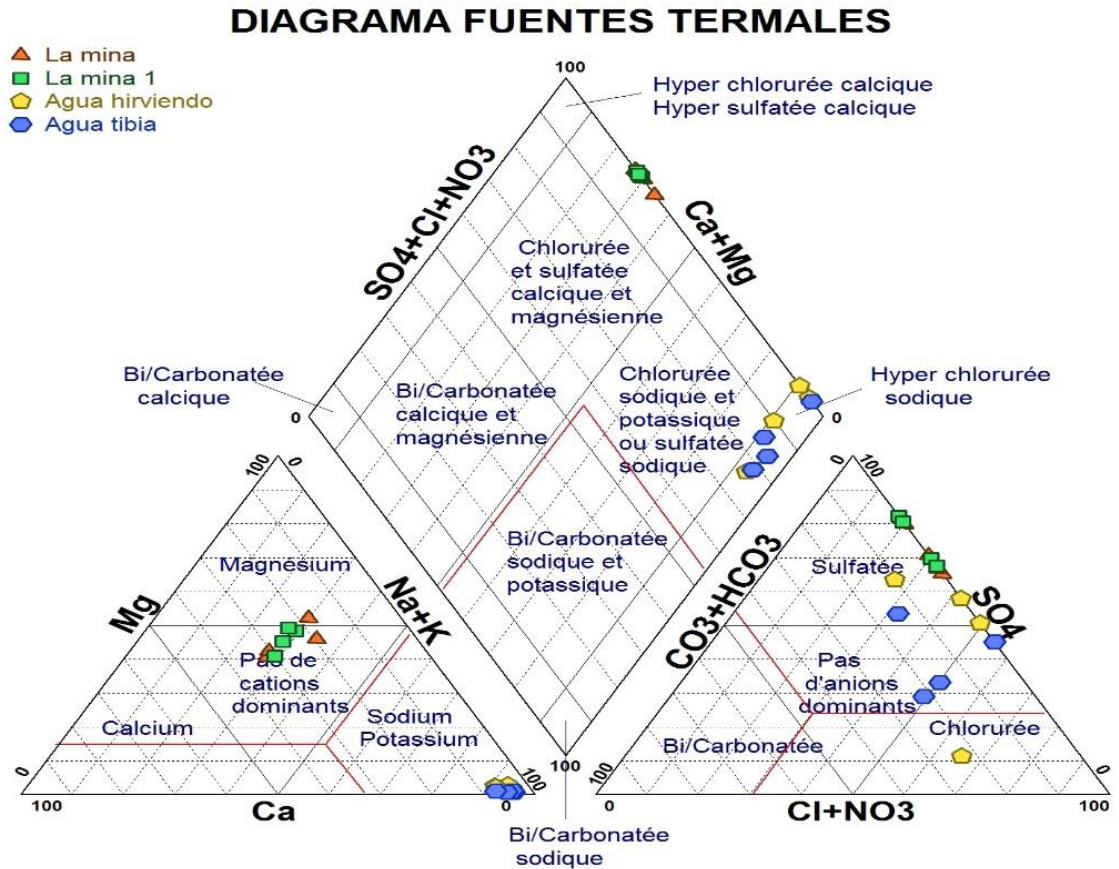


Figura 2. Diagrama de Piper fuentes termales La mina, La mina 1, Agua hirviendo, Agua tibia

De los resultados obtenidos mediante el diagrama de Piper se puede observar que las aguas correspondientes a las fuentes termales de Agua hirviendo y Agua tibia, tienen una componente mayormente clorurada-sódica que muestran como iones de disolución más abundantes dominantes los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y siguen en abundancia los iones  $\text{Cl}^-$ . Este tipo de aguas provienen desde reservorios geotermales relativamente profundos, que posiblemente estén asociados a rocas sedimentarias las cuales suelen contener altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$ . Este tipo de aguas también pueden ser afectadas por mezcla con aguas superficiales de baja salinidad. Por otro lado las aguas correspondientes a las fuentes termales de La mina y La mina 1 pertenecen al grupo de aguas sulfato-sódico y magnésica donde se presentan como elementos mayoritarios los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , la presencia de los iones sulfato podrían estar asociados a la condensación de gases



volcánicos cerca de la superficie con aguas meteóricas, también se puede clasificar estas aguas como inmaduras por presentar elevadas concentraciones de Mg, elemento que tiende a ser soluble a bajas temperaturas.

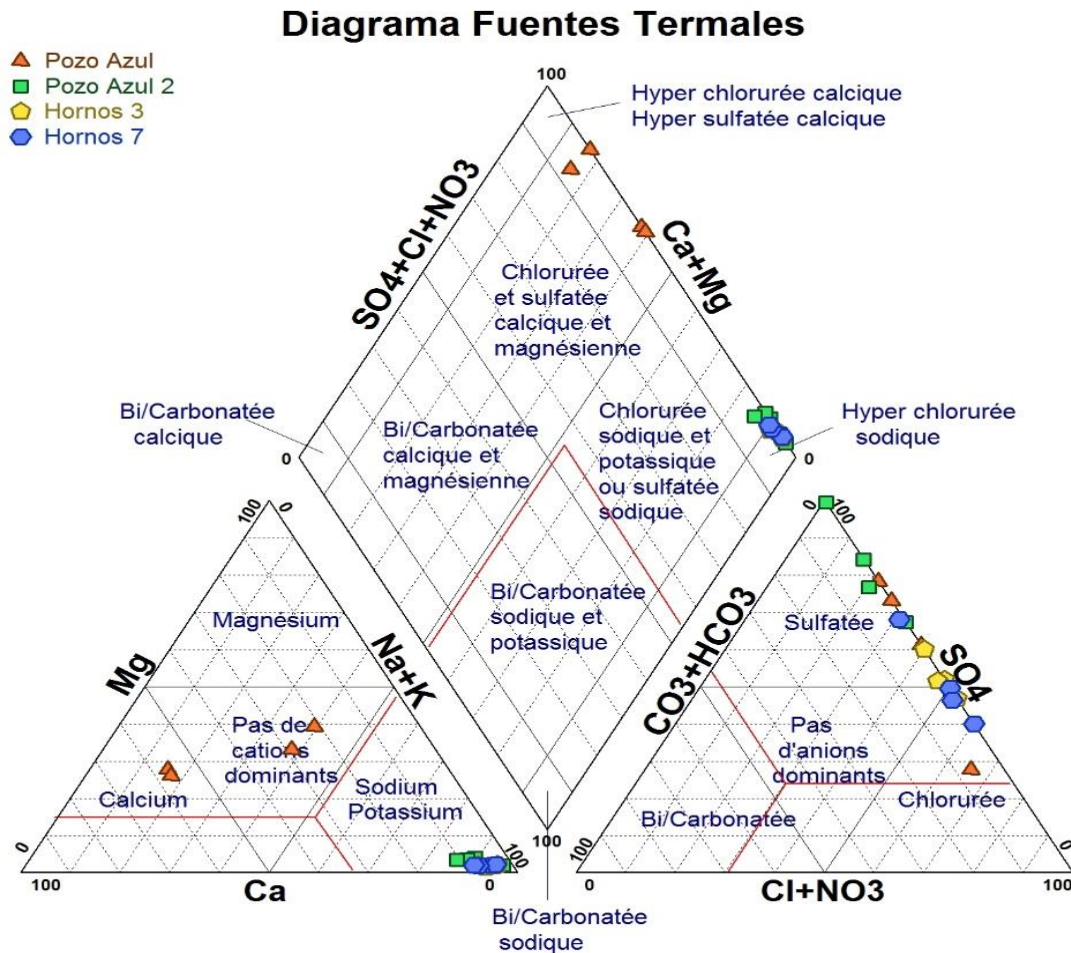


Figura 3. Diagrama de Piper fuentes termales Pozo Azul, Pozo Azul 2, Hornos 3, Hornos 7

Teniendo en cuenta el diagrama de Piper de la figura 3 se puede concluir que las fuentes termales de Pozo azul 2, Hornos 3 y Hornos 7 pertenecen al grupo de aguas denominado sulfato sódico donde prevalecen las concentraciones de los elementos químicos  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Las elevadas concentraciones de estos dos elementos pueden estar relacionados directamente con los suelos salinos del área. Por otra parte la fuente termal de Pozo azul por presentar elevadas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se puede catalogar como un agua cálcica sulfatada, donde la presencia de elevadas concentraciones de calcio está relacionado a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, además de estar unido a las arcillas del suelo.

## Diagrama Fuentes Termales

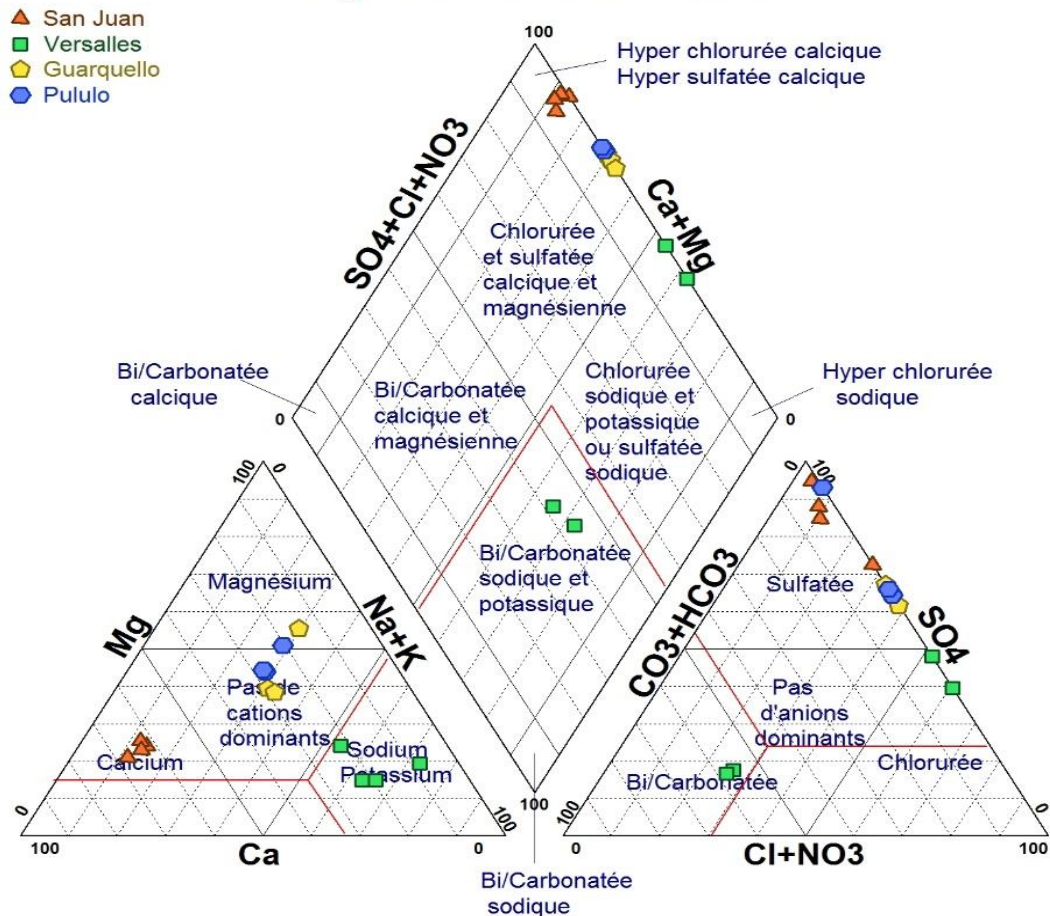


Figura 4. Diagrama de Piper fuentes termales San Juan, Versailles, Guarquello, Pululo

La fuente termal de San Juan de acuerdo a su contenido de calcio y sulfatos puede considerarse como un agua sulfatada cálcica, donde el calcio es el catión principal debido a que puede estar presente en rocas ígneas como constituyentes esenciales de los silicatos y en rocas sedimentarias donde aparece fundamentalmente en forma de carbonato o de silicato.

Según el diagrama de Piper de la figura 4, las fuentes termales de Guarquello y Pululo pueden considerarse como aguas sulfatadas cálcicas o magnésicas, esto debido a las relativamente altas concentraciones de calcio y magnesio que predominan en la zona. El ion magnesio es menos abundante que el calcio en la mayoría de las fuentes termales y procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas magnesianas), y la alteración de silicatos ferromagnesianos.

Por ultimo podemos ver en el diagrama que la fuente termal de Versailles pertenece a al grupo de aguas bicarbonatadas sódicas y potásicas que tienen como componente aniónico predominante el bicarbonato y el componente catiónico variable este tipo de aguas suelen ser de origen profundo y predomina por lo general el bicarbonato y el sodio.

### 8.1 Medición del isótopo $Rn^{222}$

Durante el periodo que se apoyó en campo en la toma de muestras de  $Rn^{222}$  en las diferentes estaciones ubicadas en zonas donde se facilita su detección como fisuras, fallas geológicas y flujos de agua subterránea, se observaron cambios en la concentración de radón lo que puede ser el resultado de fluctuaciones en la temperatura del agua subterránea, debido a la disminución de la solubilidad del radón en el agua con el aumento de la temperatura. Durante los meses de marzo a agosto se tomaron muestras mediante el método que emplea cámaras ionizantes *E-perm*, presentando cambios en las concentraciones de algunas estaciones, lo cual comparado con datos anteriores registrados en la línea base presentan normalidad. En la figura 5 se pueden observar estos cambios.

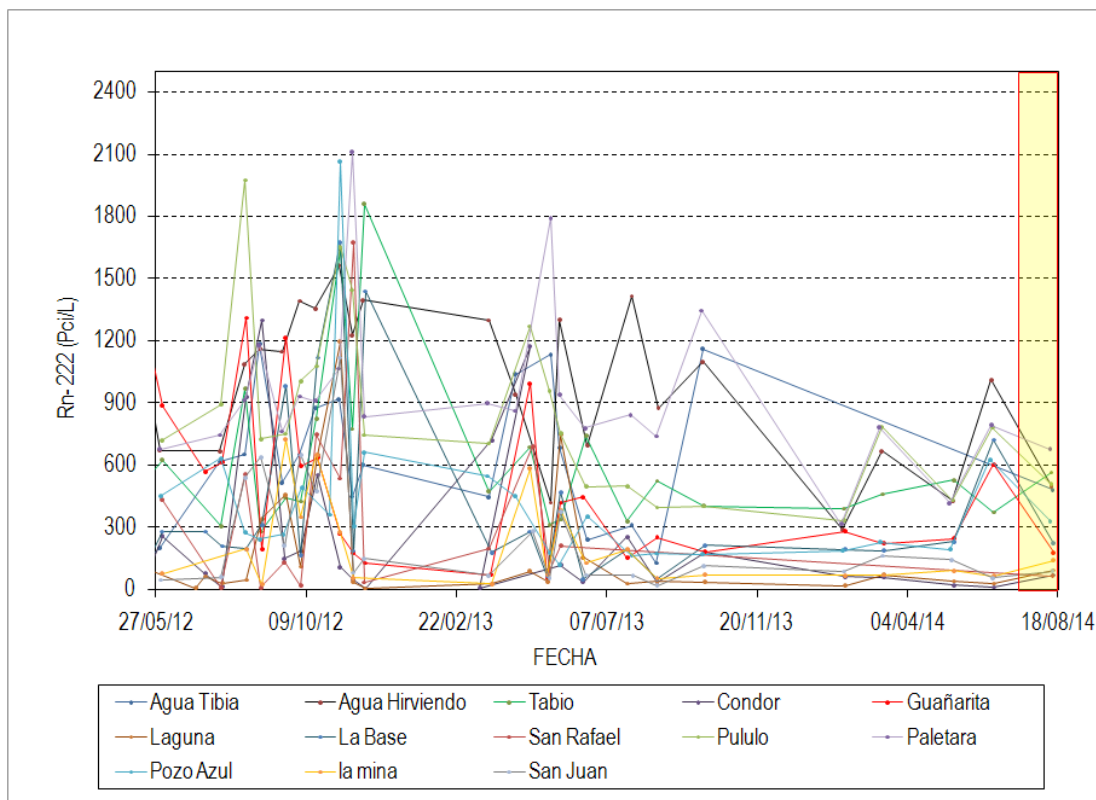
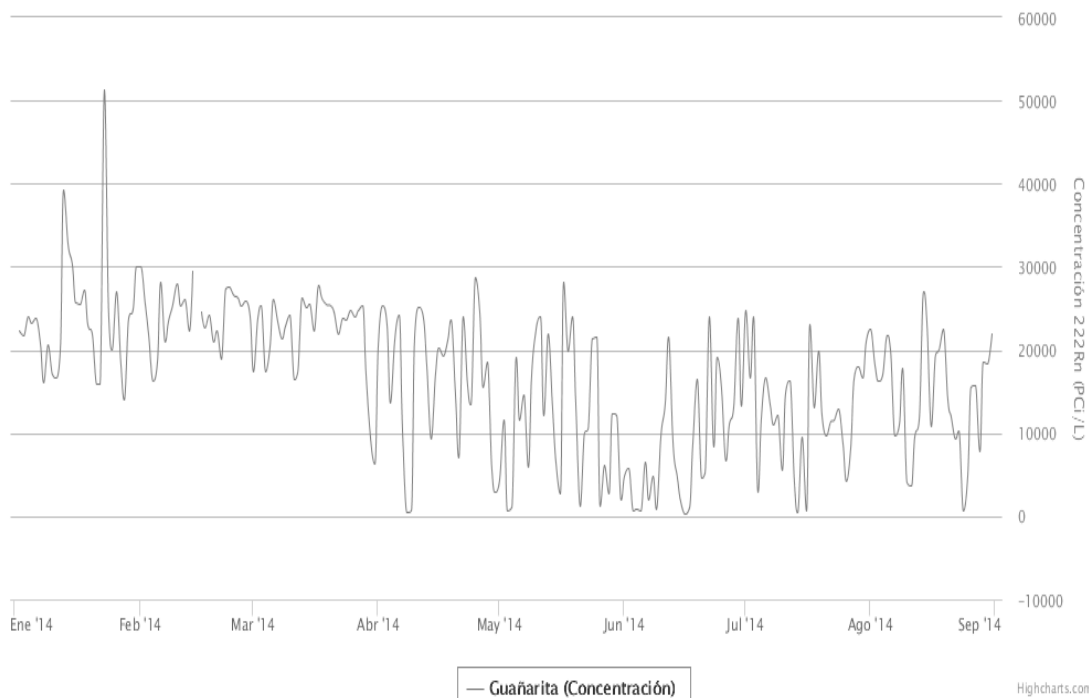


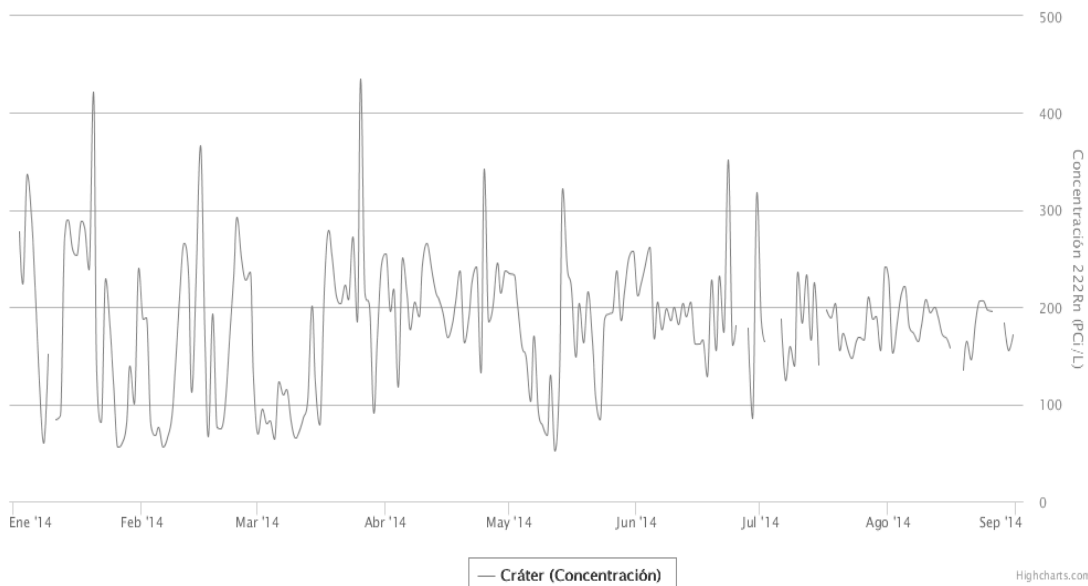
Figura 5. Variación de la concentración de Radón en suelo en las estaciones isotópicas no telemétricas permanentes del volcán Puracé. El recuadro amarillo indica el periodo evaluado en el presente informe.

En las oficinas del SGC también se monitoreo el isotopo  $Rn^{222}$  las 24 horas del día, por medio de la técnica de detección en suelo empleando telemetría, que consiste en enviar datos de los impulsos de desintegración de partículas alfa por medio de un Sensor BT45N BARASOL, de manera que al recibir los datos en los equipos de adquisición se determine la concentración en unidades de picoCurio por litro (PCi/L). La ventaja de esta técnica, radica en la obtención de datos más precisos y constantes de las emisiones de dicho gas por hora y día, con márgenes de error confiables

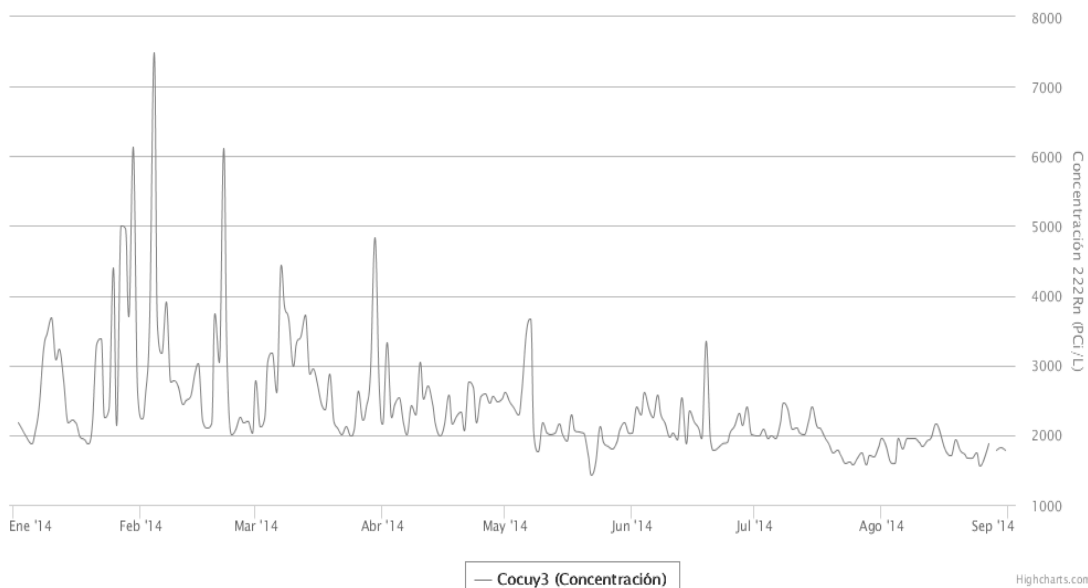
En las figuras 6, 7 y 8 se ilustran las variaciones en el tiempo de las concentraciones de gas radón registradas por las estaciones telemétricas Guañarita, Radón-Cráter y Cocuy. Como se observa en estas figuras, se presentan algunos cambios durante el tiempo evaluado, teniendo la mayor concentración en la estación de cocuy 3 entre los meses de marzo y abril, esta variación está relacionada con la actividad volcánica e hidrotermal del edificio volcánico durante el período evaluado.



**Figura 6. Variación de la concentración de Radón en suelo en la estación telemétrica Guañarita del volcán Puracé.**



**Figura 7. Variación de la concentración de Radón en suelo en la estación telemétrica Cráter del volcán Puracé.**

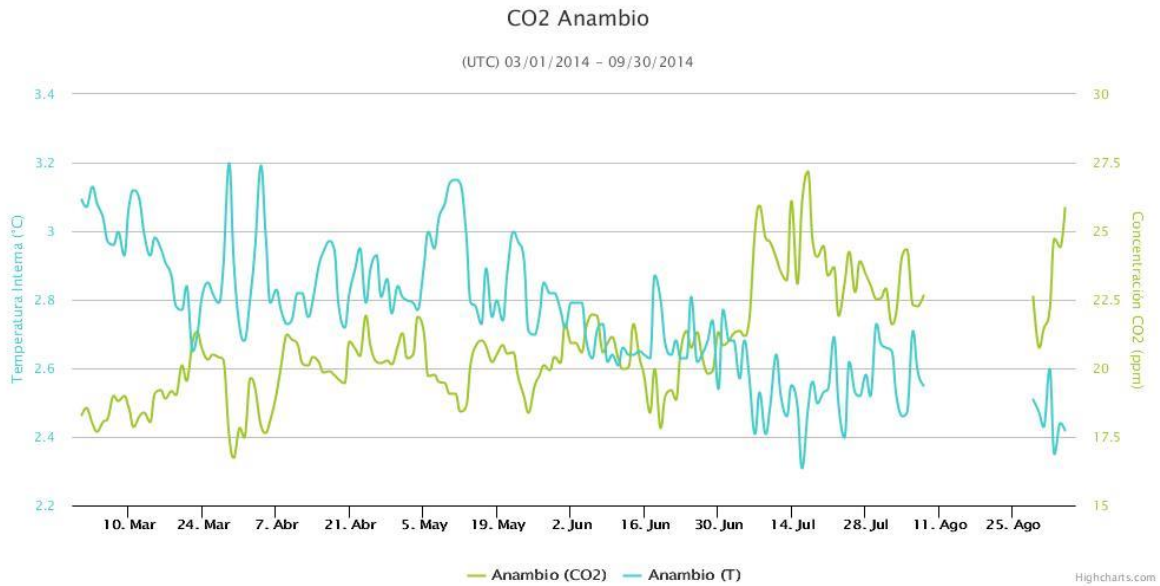


**Figura 8. Variación de la concentración de Radón en suelo en la estación telemétrica Cocuy 3 del volcán Puracé.**

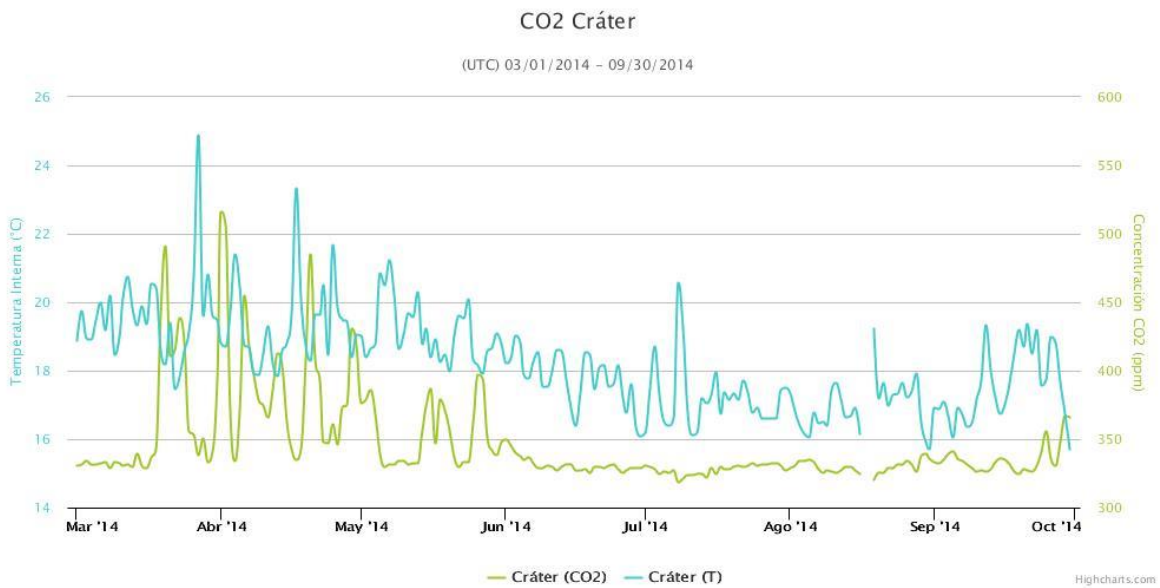
## 8.2 Medidas de Dióxido de carbono

En las figuras 9, 10 y 11 se ilustran las variaciones en el tiempo de las concentraciones de dióxido de carbono contra los datos temperatura registradas por las estaciones telemétricas Anambío, Cráter y Cocuy 3. Durante los meses de marzo a septiembre se presentan cambios significativos, siendo el valor de 515.85 ppm registrado en la estación Cráter el más alto para este período. También se

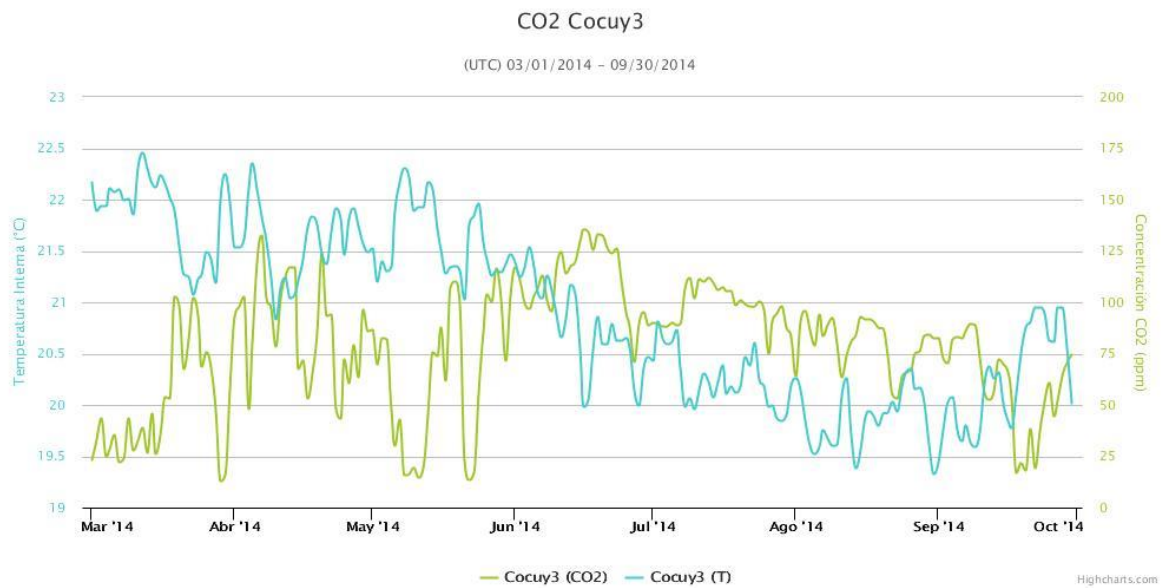
puede observar la relación inversamente proporcional entre la temperatura y el dióxido de carbono. Estas variaciones están relacionadas con la actividad sísmica e hidrotermal del edificio volcánico durante el período evaluado.



**Figura 9. Variación de la concentración de dióxido de carbono en suelo en la estación telemétrica Anambio del volcán Puracé.**



**Figura 10. Variación de la concentración de dióxido de carbono en suelo en la estación telemétrica Cráter del volcán Puracé.**



**Figura 11. Variación de la concentración de dióxido de carbono en suelo en la estación telemétrica Cocuy del volcán Puracé.**

### 8.3 Medición de los isotopos $^{18}\text{O}$ y $^2\text{H}$

Los isotopos ambientales  $^{18}\text{O}$  y  $\text{H}^2$  son de gran interés hidrológico y son muy utilizados por ser trazadores geoquímicos ideales en el agua, puesto que sus concentraciones no suelen alterarse por interacción con las materias de otros acuíferos. Sabiendo esto y con el objetivo de analizar el comportamiento isotópico de las fuentes termales en estudio, en cada visita a esta zona se realizaron muestreos, los resultados se ven expuestos en la tabla 5.

FUENTE TERMAL	DEUTERIO	OXIGENO 18	FUENTE TERMAL	DEUTERIO	OXIGENO 18	FUENTE TERMAL	DEUTERIO	OXIGENO 18	FUENTE TERMAL	DEUTERIO	OXIGENO 18
A.tibia	-85,99	-3,47	San juan	-82,59	-12,6	La mina 1	-85,46	-11,79	A.tibia	-84,98	-3,55
Pozo azul	-57,43	-5,36	Verzalles	-70,46	-10,36	San juan	-83,35	-12,5	A.hirviendo	-84,73	-3,37
Hornos 3	-81,86	-10,86	Verzalles	-67,91	-10,4	Verzalles	-70,24	-10,47	Pozo azul	-58,19	-5,81
Hornos 7	-81,7	-10,88	San juan	-83	-12,5	Pozo azul	-55,41	-5,62	Pozo azul 1	-76,15	-9,6
Verzalles	-67,85	-10,28	La mina	-84,66	-11,88	Pozo azul 1	-66,38	-9,36	Hornos 3	-81,86	-10,63
San juan	-85,38	-12,47	A.tibia	-85,67	-9,68	Hornos 3	-82,67	-10,91	Hornos 7	-82,39	-10,91
Pozo azul 1	-76,29	-9,1	A.hirviendo	-86,1	-9,61	Hornos 7	-82,79	-10,93	La mina	-86,17	-11,82
A.tibia	-85,15	-3,62	Pozo azul	-55,94	-5,35	La mina	-85,48	-11,92	La mina 1	-85,88	-11,67
A.hirviendo	-87,03	-3,64	Pozo azul 1	-77,84	-9,28	La mina 1	-85,85	-11,71	San juan	-85,34	-12,38
Pozo azul	-56,4	-5,05	Hornos 3	-81,36	-10,85	San juan	-86,43	-12,53	Verzalles	-70,07	-10,09
Hornos 3	-82,05	-10,81	Hornos 7	-81,61	-10,71	Verzalles	-71,83	-10,4	Fumarola	-54,48	-0,58
Hornos 7	-82,51	-10,73	La mina	-84,8	-11,73	A.tibia	-85,75	-9,59			
Pozo azul 1	-78,75	-9,63	La mina 1	-84,53	-11,76	A.hirviendo	-85,07	-9,34			
A.tibia	-84,87	-3,5	San juan	-85,35	-12,56	Pozo azul	-55,66	-5,03			
A.hirviendo	-85,43	-9,45	Verzalles	-70,48	-10,32	Pozo azul 1	-78,51	-3,77			
Pozo azul	-57,81	-5,68	A.tibia	-84,75	-9,7	Hornos 3	-81,66	-10,46			
Pozo azul 1	-78,38	-9,35	A.hirviendo	-85,56	-9,68	Hornos 7	-82,13	-10,46			
Hornos 3	-81,19	-10,67	Pozo azul 1	-54,84	-5,96	La mina	-85,12	-11,37			
Hornos 7	-81,61	-10,67	Hornos 3	-81,59	-10,77	La mina 1	-84,05	-11,35			
La mina	-84	-11,77	Hornos 7	-82,25	-11	San juan	-84,99	-12,24			
La mina	-82,44	-11,92	La mina	-85,58	-11,9	Verzalles	-69,24	-10,2			

Tabla 5. Datos de isotopos O18 y H2



El estudio hidrogeológico mediante isótopos estables para identificar el origen del agua subterránea, se realizó mediante el análisis de deuterio y oxígeno 18 en el agua lluvia y en las fuentes termales, el estudio de estos isótopos en agua lluvia es importante porque a partir de los datos obtenidos se puede realizar una línea meteórica local.

Uno de los objetivos al inicio de este trabajo era realizar una línea meteórica local, sin embargo según los expertos en análisis de isótopos estables, es necesario contar con mínimo un año de muestreo de aguas lluvias para poder realizarla. Esto no fue posible de hacer por el corto tiempo el que se desarrolló este trabajo, de todas formas en este trabajo se realizó el estudio de estos isótopos comparados con la línea meteórica mundial (WMWL) que está definida por la ecuación:

$$dD = 8 \cdot dO + 10$$

En la figura 12 se puede observar la línea meteórica mundial y la relación que tiene con las fuentes termales de la zona. En la gráfica se puede ver como las fuentes termales de Agua hirviendo, Agua tibia, Pozo azul 1, Pozo azul y La mina se encuentran alejadas de la línea meteórica lo cual indica que estas fuentes no tienen influencia de aguas lluvia si no de factores ajenos a esto que son de carácter volcánico como lo son reservorios geotérmicos o cámaras magmáticas.

Los reservorios geotérmicos o cámaras magmáticas son mezcla de gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, entre otros), agua y/o vapor de agua, así como variados elementos químicos disueltos, los cuales se encuentran a elevadas temperaturas (>120°C) y se hospedan en diversos tipos de roca, esto se puede ver evidenciado en las altas temperaturas a las que se encuentran las fuentes termales anteriormente mencionadas.

En el gráfico también se puede observar como las fuentes termales de San Juan, Hornos 3, Hornos 7 y Versailles se encuentran muy cerca de la línea meteórica mundial (WMWL), lo cual hace de estas fuentes lugares donde existe alta probabilidad de influencia meteorológica, esto puede ocurrir por diferentes factores, entre ellos la porosidad de los suelos donde se encuentran ubicadas. Materiales como arcillas, arena o fracturamiento de rocas son la mayor razón para que exista la intrusión de estas aguas a las fuentes termales de esta zona, este análisis corrobora la información fisicoquímica de estas fuentes pues al observar

las temperaturas no son muy altas lo cual se debe al fenómeno de aguas meteóricas en la zona.

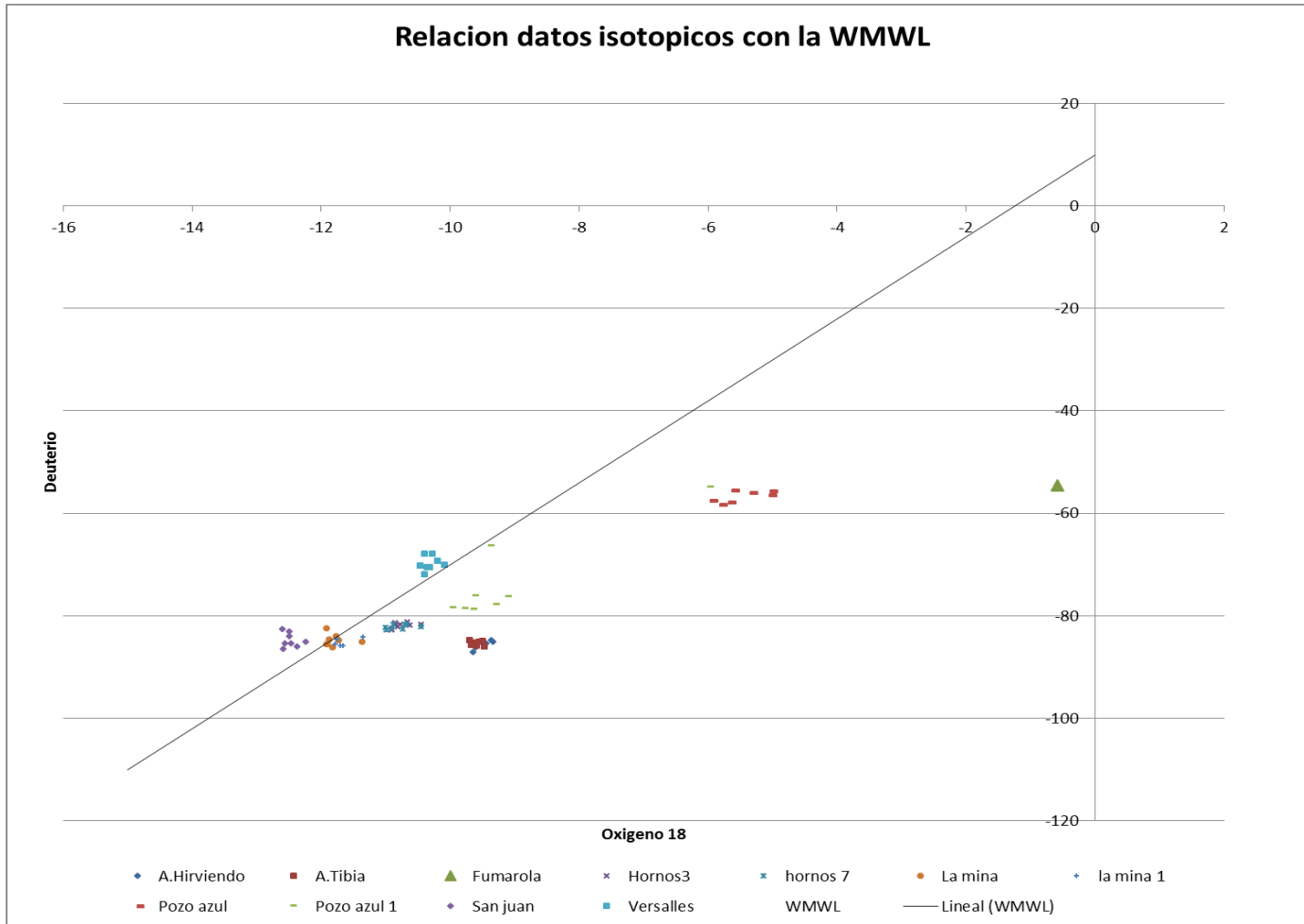


Figura 12. Relación de los isotopos O18 y H2 con la línea meteórica global

## 9. CONCLUSIONES

- El análisis de los datos de las concentraciones de las fuentes termales de la cadena volcánica los Coconucos, permite inferir acerca del comportamiento geoquímico de las fuentes termales.
- La fuente termal de Pozo azul presenta la temperatura más alta 89.1, siendo esta temperatura una de las más altas encontradas en las fuentes termales a nivel nacional.
- La interacción entre el agua de las fuentes termales y las rocas presentes en la zona es posiblemente la causa principal de la riqueza mineral de estas fuentes.
- Todas las aguas termales estudiadas presentan un pH ácido ( $\text{pH} < 7$ ). Las aguas con pH más ácido son las de La mina, Pozo azul, Guarquello y Pululo.
- Los cationes que se encuentran en mayor concentración en las aguas termales son calcio, magnesio, sodio y potasio.
- Los cambios en el comportamiento del isótopo  $\text{Rn}^{222}$  y del  $\text{CO}_2$  están relacionados directamente con la actividad volcánica en las fechas en se tomaron las muestras.
- El estudio isotópico realizado en este trabajo permitió demostrar que las fuentes termales de Agua tibia, Pozo azul 1, Pozo azul y La mina tienen influencia volcánica, mientras que el resto de fuentes San Juan, Hornos 3, Hornos 7 y Versalles se ven influenciadas por condiciones meteorológicas.
- Por presentar condiciones de altas temperaturas, formación de gases y accesibilidad a las fuentes termales de pozo azul, hornos, la mina y San Juan no se recomienda que sean usadas para fines recreativos o medicinales.
- La realización de este tipo de investigaciones es importante porque se crea una línea base de datos que permitirá a futuro comparar datos y observar cambios significativos en el comportamiento volcánico de la zona, que al mismo tiempo permitan predecir o alertar a las comunidades de la zona sobre algún cambio relevante.
- Este tipo de investigación se convierte en un estudio multidisciplinario donde intervienen químicos, ingenieros, geólogos, vulcanólogos con el fin de predecir desastres naturales como los que se han ocasionado en algunos volcanes a nivel mundial.

## 10.RECOMENDACIONES

- Es importante que se sigan realizando muestreos mensuales de las fuentes termales y de las estaciones de radón dispuestas en la zona para poder hacer seguimiento al comportamiento volcánico.
- Se debe continuar con el trabajo realizado en la instalación de pluviómetros para aguas lluvias, con el fin de realizar una línea meteórica local que permita seguir realizando estudios en la zona.
- Los constantes estudios de fuentes termales, fumarolas y gases de la cadena volcánica los Coconucos son de vital importancia pues permiten predecir actividad volcánica, grados de contaminación atmosférica, usos medicinales potenciales y usos agroecológicos de las tierras del entorno.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ARAÑA, S. V. & J. R. LÓPEZ, 1974. Volcanismo: Dinámica y Petrología de sus Productos. Itsmo, Madrid, 481p.
- RAMIREZ, J. E. 1968. Los Volcanes de Colombia. Rev. Acad. Ciencia F. N-13
- Servicio Geológico Colombiano, Estudios de Fuentes termales de la Cadena volcánica los Coconucos. 2014.
- 
- Monsalve, M.L., Pulgarín, B, 1995. Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia): Centros eruptivos y productos recientes: Boletín Geológico, v 37 (1-3), p 17 – 51
- Organización Mundial de la Salud (OMS, 1995): Guías para la calidad de las aguas Termales.
- Sussman, 1982; Espinoza, 1999; CIRA, 2006; Vásquez et al., The geology of Apoyo caldera. Master thesis. Dartmouth College. 2007.
- Garzón, G 1997; Catalogo de Fuentes Termales Del Suroccidente Colombiano. INGEOMINAS-Informe interno, San Juan de Pasto, 212pp.
- American Public Health Association, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 th Ed. Washington.
- Balek, 1998; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Samper, Métodos para determinar la recarga en acuíferos, 1997.
- Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Coconuco, 2013.
- ORGNISMO INTERNACIONAL DE LA ENERGIA ATOMICA, 2013. Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica.

- L.E. TORO, J. CALDERON, J.D. TAUPIN, M.C VARGAS QUINTERO, 2006. Exploración de aguas subterráneas en Maicao (Colombia) mediante técnicas hidroquímicas e isotópicas.
- VELEZ O, María & RHENALS G, Luis. Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe De Antioquia. Universidad nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, sede Medellín, 2008.

### WEBGRAFIA

- <http://www.sgc.gov.co/Nosotros/Marco-Estrategico.aspx>
- [http://www.ingenierosdeminas.org/biblioteca\\_digital/libros/hidrologia\\_terrornos\\_volcanicos.pdf](http://www.ingenierosdeminas.org/biblioteca_digital/libros/hidrologia_terrornos_volcanicos.pdf).
- [http://www.igme.es/internet/boletin/2008/119\\_1\\_2008/ARTICULO%2012.pdf](http://www.igme.es/internet/boletin/2008/119_1_2008/ARTICULO%2012.pdf)
- <http://www.lha.univ-avignon.fr/>, 2014

## 12. ANEXOS

Figura 13. Muestras filtradas envasadas y rotuladas para su transporte



Figura 14. Fuentes termales de la cadena volcánica los Coconucos

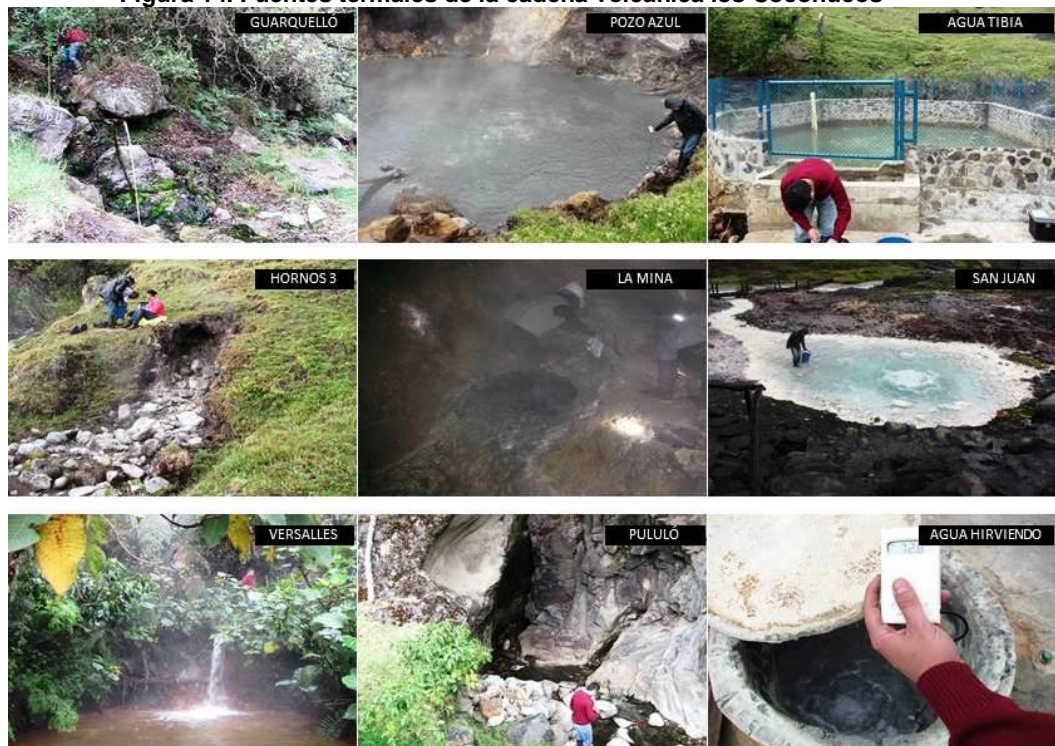




Figura 15. Estaciones de monitoreo de  $^{222}\text{Rn}$  y  $\text{CO}_2$



Figura 16. Medición de parámetros fisicoquímicos



Figura 17. Toma de temperaturas mediante termocupla y cámara térmica  
POZO AZUL

