

**INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO
DE LAS AGUAS TERMALES DEL VOLCÁN PURACÉ**

CAROLINA SOLANO CERTUCHE

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYAN**

2002

**INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO
DE LAS AGUAS TERMALES DEL VOLCÁN PURACÉ**

CAROLINA SOLANO CERTUCHE

Trabajo de Grado presentado como
requisito parcial para optar el título de Químico

Director

Ph.D. MARIA VICTORIA RUBIO BONILLA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYAN**

2002

Nota de aceptación

APROBADA

Ph.D. MARIA VICTORIA RUBIO
Directora de Trabajo de Grado

M.Sc. TIBERIO MESA
Jurado

M.Sc. CRUZ MARINA TORRES C.
Jurado

Fecha de sustentación:

Popayán, Agosto 30 de 2002

DEDICATORIA

*A mi hijo Andrés Eduardo
A mi esposo Milton Guillermo
A mis padres Hugo y Esperanza
A mis hermanos María Alexandra y Pablo Cesar
Por su paciencia y apoyo
Para lograr este reto que parecía
Inalcanzable.*

*El hombre de ciencia y el artista
Son como materia y espíritu.
Ninguno de los dos se encuentra
En forma pura sin que haya
Una aleación.
Samuel Butler*

AGRADECIMIENTOS

A punto de terminar mi trabajo de grado deseo agradecer a las personas e instituciones que de alguna manera me apoyaron para lograr finalizar esta etapa determinante en mi vida.

A mi Universidad del Cauca por haberme cobijado en su regazo durante todos estos años para, a través de las vivencias que compartí, ayudarme en mi formación humana, física e intelectual. Siempre la llevaré en mi corazón.

A mi Directora de Trabajo de Grado, Dra. María Victoria Rubio por su orientación y por confiar en mi en todo momento.

A mi Asesor Estadístico el profesor Yilton Riascos por su disponibilidad inmediata, por compartir sus conocimientos sin límite y su apoyo permanente al desarrollo del presente trabajo.

A mis profesores a través de la carrera, porque sin ellos habría sido imposible lograr ser lo que hoy soy, una mujer con futuro profesional y con esperanzas de triunfar en la vida.

A INGEOMINAS y su equipo de geocientíficos que brindaron la posibilidad de aplicar mis conocimientos de química adquiridos durante la carrera en la solución de un problema real y su constante apoyo.

A Juan Carlos Diago por compartir sus conocimientos, materiales e inquietudes sobre las aguas termales del Volcán Puracé, que dieron origen a esta investigación.

A mis compañeras Edna Rocío Cabrera, por su constante apoyo, Claudia Idrobo, por su amistad y a mis demás compañeros por su camaradería, afecto y apoyo durante estos años que compartimos juntos. A todos les deseo la mejor de las suertes.

A Angélica la secretaria de Química, a los auxiliares y tecnólogos del departamento.

A todos aquellos que no estén aquí pero que también me apoyaron para lograr esta meta ¡mil y mil gracias!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	4
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
3. OBJETIVOS	10
4. HIPÓTESIS	11
5. MARCO TEORICO	12
5.1 Dinámica de los volcanes	12
5.1.1 Génesis y transformación de una erupción	14
5.2 El agua del manto terrestre	23
5.2.1 Introducción de agua en la estructura de un mineral anhidro	30
5.2.2. Modelo de subducción	32
5.3 Disoluciones a alta temperatura y transporte	34
5.3.1 Disociación iónica de algunas moléculas	35
5.3.2 Procesos de formación de minerales	38
5.4 La atmósfera y la hidrosfera	38
6. ESTADO DEL ARTE	42
6.1. Vulcanismo en Colombia	42

	Pág.
6.1.1 Volcanes activos de Colombia	43
6.2. El volcán Puracé y las aguas termales.	44
6.3. Aplicaciones	48
6.3.1. Geotermia	48
6.3.2. Propiedades medicinales	51
7. MATERIALES Y METODOS	56
7.1. Aguas termales del Volcán Puracé	56
7.2. Análisis químico	64
7.2.1 Equipo	64
7.2.2 Materiales y reactivos	65
7.2.3 Muestreo de aguas termales	66
7.2.3.1 Recolección de muestras	66
7.2.3.2 Toma de muestras	67
7.2.3.3 Almacenamiento y conservación	68
7.2.4 Determinación de los electrolitos presentes en las fuentes termales	69
7.2.4.1 Calibración del equipo	69
7.2.4.2 Determinación de cationes	70
7.2.4.3 Determinación de aniones	70
8. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS	78
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	127
9.1 Reducción de fluidos hidrotermales magmáticos	132

	Pág.
9.2 Transporte de Metales y complejos de relevancia	134
9.3 Transporte y precipitación de metales en fluidos hidrotermales	139
9.4 Reacciones de interacción agua/roca	160
10. CONCLUSIONES	166
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Disociación iónica de algunas moléculas.	35
Tabla 2. Actividad histórica del Volcán Puracé	47
Tabla 3. Datos de pH para las aguas termales.	84
Tabla 4. Datos de temperatura para las aguas termales.	87
Tabla 5. Datos de silicio para las aguas termales (mg/L)	90
Tabla 6. Datos de aluminio para las aguas termales (mg/L)	93
Tabla 7. Datos de hierro para las aguas termales (mg/L).	96
Tabla 8. Datos de calcio para las aguas termales (mg/L)	99
Tabla 9. Datos de magnesio para las aguas termales (mg/L)	102
Tabla 10. Datos de sodio para las aguas termales (mg/L)	105
Tabla 11. Datos de potasio para las aguas termales (mg/L)	108
Tabla 12. Datos de manganeso para las aguas termales (mg/L)	111
Tabla 13. Datos de litio para las aguas termales (mg/L)	114
Tabla 14. Datos de zinc para las aguas termales (mg/L)	117
Tabla 15. Datos de cloro para las aguas termales (mg/L)	120
Tabla 16. Datos de sulfato para las aguas termales (mg/L)	123

	Pág.
Tabla 17. Datos de rubidio para las aguas termales (mg/L)	126
Tabla 18. Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales La Mina y Pilimbalá	130
Tabla 19. Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia.	137
Tabla 20. Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales San Juan y Sulfurosa	144
Tabla 21. Parámetros determinados en las fuentes termales Pozo Azul	146
Tabla 22. Fuentes termales con la máxima concentración por electrolito.	149
Tabla 23. Distancia desde el cráter y iones en máxima concentración de las aguas termales.	154
Tabla 24. Características geoquímicas de las aguas termales y origen más probable.	158

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Diagrama de cajas para el pH de las fuentes termales	84
Gráfica 2. Diagrama de cajas para el temperatura de las fuentes termales	87
Gráfica 3. Diagrama de cajas para el silicio de las fuentes termales (mg/L)	90
Gráfica 4. Diagrama de cajas para el aluminio de las fuentes termales (mg/L)	93
Gráfica 5. Diagrama de cajas para el hierro de las fuentes termales (mg/L)	96
Gráfica 6. Diagrama de cajas para el calcio de las fuentes termales (mg/L)	99
Gráfica 7. Diagrama de cajas para el magnesio de las fuentes termales (mg/L)	102
Gráfica 8. Diagrama de cajas para el sodio de las fuentes termales (mg/L)	105
Gráfica 9. Diagrama de cajas para el potasio de las fuentes termales (mg/L)	108

	Pág.
Gráfica 10. Diagrama de cajas para el manganeso de las fuentes termales (mg/L)	111
Gráfica 11. Diagrama de cajas para el litio de las fuentes termales (mg/L)	114
Gráfica 12. Diagrama de cajas para el zinc de las fuentes termales (mg/L)	117
Gráfica 13. Diagrama de cajas para el cloruros de las fuentes termales (mg/L)	120
Gráfica 14. Diagrama de cajas para el sulfatos de las fuentes termales (mg/L)	123
Gráfica 15. Diagrama de cajas para el rubidio de las fuentes termales (mg/L)	126

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Estructura y composición del manto terrestre	25
Cuadro 2. Formas de presentación del agua en los materiales terrestres	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de las fuentes termales del Volcán Puracé	5
Figura 2. Extracción del agua del manto terrestre	33

GLOSARIO

ANDESITA: roca volcánica compuesta principalmente por minerales como plagioclasa y piroxeno. Este tipo de rocas es muy común en nuestros volcanes activos, cuyo vulcanismo está asociado a magmas de composición intermedia.

ANFÍBOLES: son inosilicatos que presentan cadenas dobles de tetraedros de sílice. Son parecidos a los piroxenos pero de composición más compleja y mucho más abundantes

BASALTO: roca volcánica que tiene un color oscuro característico; contiene del 45 al 54% de sílice y generalmente es rico en hierro y magnesio.

CÁMARA MAGMÁTICA: cavidad subterránea que contiene magma rico en minerales, gases, etc. los cuales alimentan al volcán.

COMPLEJO VOLCÁNICO: se trata de varios volcanes relacionados estrechamente en el espacio y en su génesis.

CONO: es el que se forma por la acumulación de lavas que se solidifican en la corteza terrestre.

DACITA: roca volcánica de composición ácida, compuesta principalmente por cuarzo, biotita y anfíbol, feldespato potásico y plagioclasa.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR: medida de dispersión de los valores respecto a la media o a un valor promedio. Esta magnitud esta relacionada con los valores de concentración mínima y máxima cuantificable.

DIAPIROS: masas rocosas muy plásticas que al ser comprimidas revientan los estratos superiores y ascienden a través de los mismos.

DOMO: es un volcán compuesto de lava muy viscosa, el cual, como consecuencia de erupciones, produce la acumulación de domos en su cráter, el cual queda taponado.

DORSALES OCEÁNICAS: también cordillera central oceánica, término que designa las extensas cadenas montañosas submarinas, normalmente muy alejadas de los continentes. No obstante, hay muchos accidentes topográficos en el fondo marino que podrían describirse como cordilleras.

ERUPCION: salida de materiales del interior a la superficie de la tierra por procesos asociados al vulcanismo. Las erupciones son explosivas cuando los materiales salen violentamente en forma de piroclastos y efusivas cuando salen de manera pasiva en forma de lavas.

ERUPCION MAGMATICA: erupción producida por la salida casi exclusivamente de material originado de un magma nuevo o juvenil (los materiales viejos son fragmentos de roca que son arrancados de las paredes del cuello volcánico durante la erupción)

ESTRATOVOLCÁN: es un volcán compuesto por acumulación de materiales piroclásticos, resultado de actividad explosiva, intercalados con flujos ocasionales de lava, son muy pequeños y de alta pendiente.

EXSOLUCIÓN: aparición de dos fases minerales en estado sólido al enfriar a una temperatura específica.

FALLA GEOLÓGICA: se trata de una fractura o zona de debilidad, a lo largo de la cual se producen movimientos o desplazamientos en la corteza terrestre. Una falla puede mostrar desplazamientos que pueden ir desde centímetros hasta kilómetros; lógicamente, los desplazamientos a grandes kilómetros, son el resultado de un gran número de movimientos ocurridos durante los lapsos muy largos.

FISURA: fractura, quebradura o grieta en las rocas; normalmente, cuando presentan desplazamientos, pero éstos son muy pequeños.

FUENTES TERMALES: son descargas en superficie de aguas a altas temperaturas por interacción de acuíferos relativamente superficiales con emanaciones gaseosas provenientes de fuentes magmáticas. En ocasiones, esta agua no necesariamente tiene relación con descargas magmáticas, sino que pueden ser calentadas en profundidad por un gradiente geotérmico normal.

GEODESIA: ciencia que estudia el tamaño y la forma de la Tierra. La geodesia aplicada, permite conocer las deformaciones en la superficie del edificio volcánico debido a su actividad interna. Los métodos empleados para el estudio de dichas deformaciones son: inclinometría seca, inclinometría electrónica, líneas cortas de nivelación, medidas electrónicas de distancias y sistemas de posicionamiento global (GPS), cuyas mediciones se realizan en estaciones establecidas sobre el volcán.

GEOLOGÍA: ciencia que estudia la tierra sólida en todos sus aspectos; se basa en estudios de las rocas y depósitos originados en eventos eruptivos pasados y actuales, lo cual permite conocer la historia eruptiva del volcán, las fechas de

ocurrencia de las erupciones, cómo ocurrieron las erupciones y el posible comportamiento en eventos futuros.

GRADIENTE GEOTÉRMICO: relación de la diferencia de temperatura en el suelo entre dos puntos de distinta profundidad. La temperatura aumenta con la profundidad a razón de unos 30°C por kilómetro en una corteza continental estable.

INTRUSIÓN MAGMÁTICA: es la ascensión del magma hacia la superficie a través de las fisuras o grietas presentes en los estratos o capas de suelo circundantes al magma.

LAVA: término aplicado por los geólogos a la roca fundida que sale a la superficie de la Tierra a través de grietas y de fisuras, en particular durante la erupción de un volcán. Esta palabra se aplica a la roca tanto en estado fundido como en estado sólido tras enfriamiento

MATERIAL PIROCLÁSTICO: son fragmentos de magma o de materiales arrancados del cráter durante una erupción explosiva; estos son expulsados al aire con una trayectoria dirigida (similar al movimiento parabólico del proyectil de un cañón); estos materiales son transportados por el viento desde la columna de erupción y depositado por su propio peso (el material más fino, ceniza y polvo volcánico, se deposita a mayores distancias). El tamaño de dichos fragmentos, denominados bloques, es superior a 64 mm y puede alcanzar hasta varios metros por diámetro mayor. Es el evento con mayor probabilidad de ocurrencia en una erupción volcánica y puede afectar las regiones más alejadas del volcán. Los flujos piroclásticos, además de estar constituidos por una mezcla de fragmentos piroclásticos, contiene gas caliente que se desplaza a grandes velocidades por la superficie del terreno siguiendo preferencialmente las depresiones topográficas.

PLACA o PLACA TECTÓNICA: la litosfera terrestre está fragmentada en seis grandes porciones y un sin número de porciones pequeñas, denominada cada una como placa o placa tectónica.

PENACHO VOLCANICO: se forma por la liberación de los gases a partir del magma en forma de explosiones o chorros de gas, estos gases son una mezcla de vapor de agua, dióxido de carbono y en menor cantidad dióxido de azufre, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico, etc.

PERIDOTITA: rocas magmáticas intrusivas, formadas casi exclusivamente por olivino. Son de color muy oscuro y densidad muy elevada.

ROCAS PLUTÓNICAS: rocas magmáticas que solidifican en el interior de la tierra tras un enfriamiento lento que origina una textura holocristalina.

ROCAS METAMÓRFICAS: aquellas que proceden de la transformación de otras rocas sólidas preexistentes (magmáticas, sedimentarias o metamórficas).

RESERVORIO: estructura de suelo másico, permeable y caliente que almacena el agua proveniente de corrientes subterráneas.

SISMOS VOLCÁNICOS: son producidos por los movimientos de fluidos volcánicos y de sólidos en el interior del sistema volcánico. Casi la totalidad de sismos volcánicos son tan pequeños que son imperceptibles sin instrumentos (sismógrafos) y por lo regular, la gran mayoría de los que son sentidos son pequeños y no causan daños.

SOMMA o VOLCAN CALDERA: es un volcán que contiene otro dentro de su estructura.

VIGILANCIA VOLCÁNICA: tiene como fin primordial jugar un papel fundamental en la prevención de desastres de origen volcánico, mediante el suministro oportuno y confiable de información que permita organizar planes y dar respuestas rápidas y eficaces ante la eventualidad de una crisis o erupción volcánica. Tal información debe ser permanente, incluso en épocas de reposo o no crisis volcánica.

ZONA DE SUBDUCCIÓN: zona en donde la placa tectónica se desliza con respecto a otra, que es empujada por enormes fuerzas a lo largo de las fallas.

ZEOLITA: grupo de tectosilicatos que químicamente son silicatos de aluminio, sodio y calcio con agua. El agua se desprende fácilmente de ellas por calentamiento sin que esto afecte a su estructura; está es la característica más importante del grupo y la que le sirve para darle su nombre.

GLOSARIO ESTADÍSTICO

DESVIACIÓN ESTÁNDAR: medida de dispersión de los valores respecto a la media o a un valor promedio. Esta magnitud esta relacionada con los valores de concentración mínima y máxima cuantificable.

MEDIANA: En una serie de valores estadísticos es el que ocupa la posición central del conjunto de datos.

DIAGRAMA DE CAJA: Es una representación estadística de un conjunto de datos en donde se relaciona la mediana y la desviación estándar. Es otra forma de representar los histogramas.

RESUMEN

El presente documento corresponde al informe final del trabajo de grado titulado “Interpretación del Comportamiento Geoquímico de las aguas termales del Volcán Puracé” En la introducción y los antecedentes de este documento, se plantea el hecho que INGEOMINAS ha proporcionado la tabla de datos en EXCEL, sobre las determinaciones de electrolitos presentes en las aguas termales del Volcán Puracé realizadas en los últimos diez años. Por lo tanto, es una necesidad institucional que un químico realice una nueva discusión de los mismos.

Con respecto a la METODOLOGÍA, para dar respuesta a la necesidad, que tiene INGEOMINAS, de discutir los datos sobre el análisis de las aguas termales, se recibieron 5760 datos en Excel (en el anexo A), los cuales fueron depurados y analizados estadísticamente con el programa informático SPSS, para finalmente presentarlos en tablas y gráficos. Posteriormente se realizaron reuniones con los geocientíficos de INGEOMINAS en varias oportunidades sucesivas, donde se expusieron estos gráficos y tablas para, entre todos, construir la discusión de los resultados fundamentada en la bibliografía que previamente será trabajada en profundidad, además de las propuestas y la experiencia de ellos.

INGEOMINAS ha establecido, mediante carta anexa, su apoyo a través del servicio de sus profesionales y salidas de campo (si no existiera riesgo de orden

público). FACNED apoyará el proyecto a través de los profesores adscritos al proyecto.

Finalmente, se presenta una amplia y actualizada bibliografía sobre el tema, que ha sido referenciada en el texto. Los anexos están formados por tablas que corresponde a los datos originales entregados por INGEOMINAS para su análisis estadístico y además se presenta una tabla que resume la relación que existe entre algunos de los minerales, su composición química y su sistema cristalino.

Este trabajo ha sido realizado con el objetivo final de contar una guía completa sobre vulcanología y aguas termales en el Departamento del Cauca, dados los antecedentes sismológicos en la región, la riqueza natural y sus potencialidades.

INTRODUCCION

La química de la Tierra, ó geoquímica, trata de describir la distribución de los elementos y sus isótopos en las distintas porciones, más o menos bien definidas en la tierra, atmósfera, hidrosfera, corteza, manto y núcleo. La geoquímica se ha desarrollado a través del tiempo, comenzando por un estadio descriptivo hasta los mecanismos que están detrás de los hechos observados.

En particular, un volcán es un lugar situado sobre la superficie terrestre en la corteza continental por donde la tierra expulsa una mezcla denominada magma compuesta por roca fundida, partículas sólidas y gases calientes, las diferentes salidas de material a superficie forman el denominado cono volcánico producto de la acumulación de material piroclástico y lavas alrededor del edificio. Un volcán esta compuesto por una cámara magmática o sitio de reservorio de la roca fundida, la cual viaja a superficie por medio de los conductos volcánicos y un cráter volcánico ubicado generalmente en la parte alta por donde sale el material a superficie.

Colombia presenta tres zonas volcánicas ubicadas en las partes media y sur de la Cordillera Central y el extremo más meridional de la Cordillera Occidental, están separadas por áreas en donde no se registra actividad volcánica, en la parte norte

se encuentra el denominado grupo volcánico Ruiz – Tolima, en la parte central el Volcán Nevado del Huila y el grupo de volcanes Puracé – Doña Juana y en la parte sur el grupo volcánico Galeras -Cerro Negro.

El Volcán Puracé es un estratovolcán activo, de 4650 m de altitud, localizado a 26 Km. al sureste de la ciudad de Popayán, Departamento del Cauca, en la Cordillera Central. Hace parte de la cadena Volcánica de los Coconucos, compuesta por 15 centros eruptivos recientes alineados, siendo el más joven de ellos, y ubicado más al norte en la cadena. Presenta un cráter doble con una profundidad de 150 m de su cráter interno. Los productos asociados a este son lavas de composición andesítica y en su fase más reciente productos piroclásticos de caída y de flujo.

Actualmente el Volcán Puracé se caracteriza por constante actividad fumarólica representada básicamente por dos campos, uno en el interior del cráter y otro en el exterior en el flanco norte del edificio volcánica. Alrededor del volcán existe una intensa actividad de fuentes termales, aproximadamente siete campos lo circundan las cuales presentan temperaturas entre 20 – 90° C. Además, presenta continua actividad sísmica asociada al movimiento de fluidos y a rupturas de las paredes volcánicas.

El presente análisis tuvo como finalidad llevar a cabo la interpretación del comportamiento geoquímico de las aguas termales del Volcán Puracé. Al respecto, se analizaron de datos sobre la composición y la concentración de las especies iónicas determinadas en las aguas termales por Ingeominas (**Instituto**

de Investigación e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear).

Sobre las concentraciones de los electrolitos de las aguas termales, una de las incidencias que produce el Volcán Puracé es mediante la filtración de corrientes gaseosas a través de las fisuras y grietas presentes en la estratigrafía de la zona, las cuales entran en contacto con corrientes hídricas subsuperficiales y subterráneas que forman las diversas fuentes termales.

1. ANTECEDENTES

En los últimos años, se han presentando sucesos naturales, como erupciones volcánicas, en la Cordillera de los Andes, que han ocasionado numerosas pérdidas humanas, económicas y materiales. Por esta razón, Colombia ha incrementado la capacidad para monitorear los cambios que presenta un volcán antes y después de una erupción. La vigilancia volcánica en el país se inició como consecuencia de la reactivación del Volcán Nevado del Ruiz en el año de 1984 y su posterior erupción el 13 de noviembre de 1985. Actualmente, el **Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS**- En su centro operativo de Popayán, tiene a su cargo la vigilancia y monitoreo de los volcanes Nevado del Huila, Sotará y Puracé. INGEOMINAS, tiene como misión, a través de los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos (OVS de Manizales, Pasto y Popayán), monitorear estas estructuras de manera periódica, con el fin de obtener un modelo teórico-práctico que permita, de alguna manera, preveer las situaciones de origen volcánico de alto riesgo, que puedan llegar a suceder. Las principales áreas estudiadas para el seguimiento de la actividad volcánica son: la geología, la geodesia, la sismicidad y la geoquímica.

Debido a la actividad eruptiva reciente del Volcán Puracé, la ocurrencia de sismos volcánicos y la presencia de actividad fumarólica, se implementó una red de vigilancia, que incluye el análisis químico de las aguas termales procedentes de

los reservorios de las fuentes termales de Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul, Sulfurosa y San Juan, que se encuentran asociadas al Volcán Puracé, ver Figura 1.

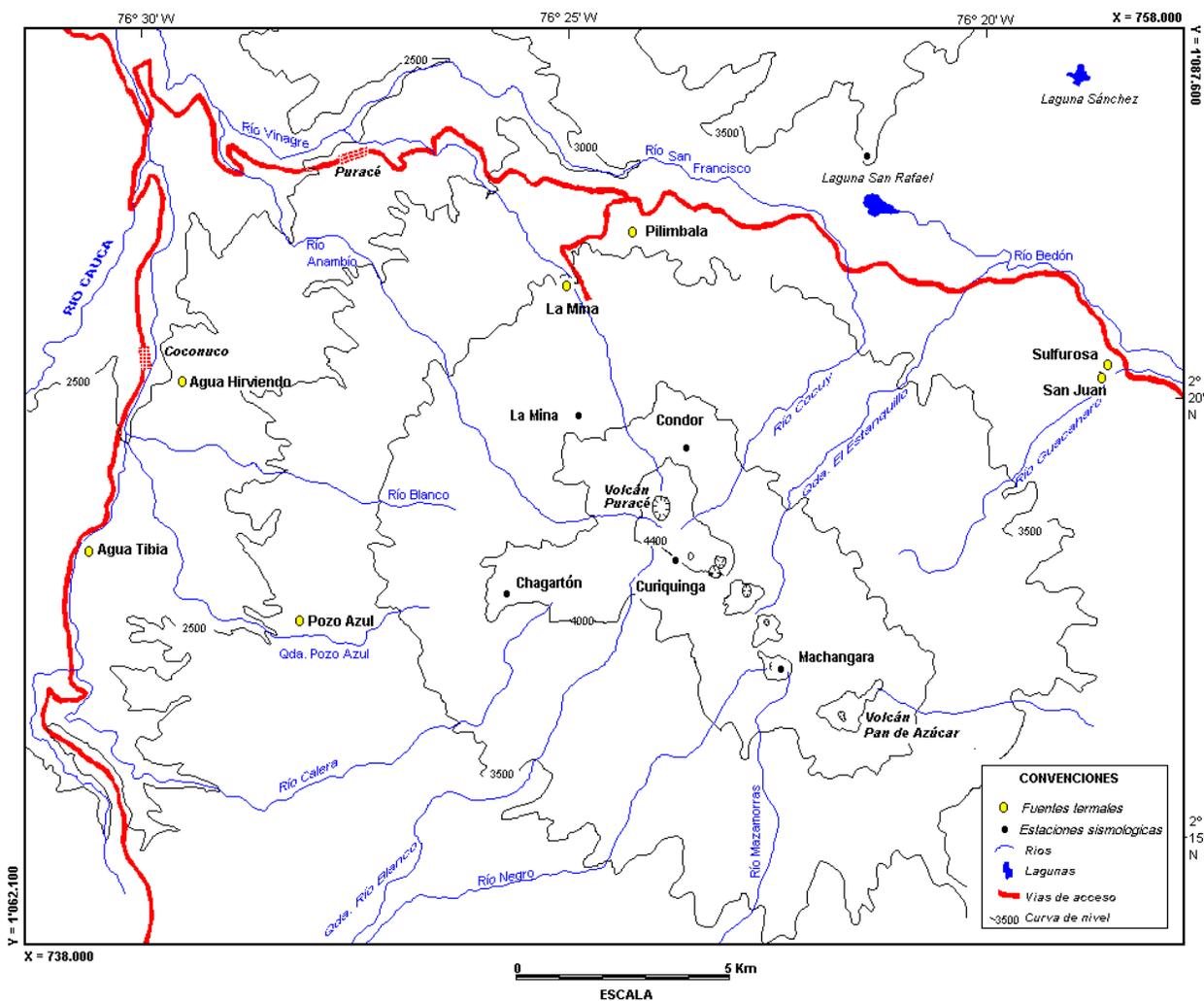


Figura 1. Mapa de localización de las fuentes termales del Volcán Puracé¹

¹ Fuente: Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).

Las aguas termales, son descargas, hacia la superficie, de aguas a altas temperaturas por interacción de acuíferos relativamente superficiales con emanaciones gaseosas procedentes de fuentes magmáticas. No necesariamente las aguas de las fuentes termales tienen relación con descargas magmáticas aún estando situadas en zonas de actividad volcánica. En ocasiones estas aguas son calentadas en la profundidad por un gradiente geotérmico normal, por lo que es indispensable hacer un seguimiento de su equilibrio químico para determinar el origen de éstas y la importancia de sus variaciones como marcador potencial de sismicidad, contaminación, entre otros.

En Colombia, existen por lo menos 270 fuentes termales, localizadas principalmente en la Región Andina, en los departamentos de Nariño, Cauca, Putumayo, Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander. La mayor densidad de ocurrencia de estas manifestaciones termales, corresponde al complejo volcánico Cerro Bravo – Machín, en donde se localizan alrededor de 100 fuentes termales. ²

El estudio de la composición y la concentración de los cationes (Al^{+3} , Ca^{2+} , Fe^{+3} , Li^{+} , Mg^{2+} , Mn^{+2} , K^{+} , Rb^{+} , Si^{2+} , Na^{+} y Zn^{2+}), aniones (SO_4^{-} y Cl^{-}) y las propiedades fisicoquímicas (temperatura y pH) de las aguas termales, suministran información importante acerca de los cambios geoquímicos y/o geofísicos que se producen,

² ALFARO, C. Generalidades acerca de aguas minerales y termales- ocurrencia de manantiales en Colombia. Informe Interno INGEOMINAS.

debido a la interacción entre las emanaciones gaseosas procedentes de fuentes magmáticas y las aguas subterráneas.

La Universidad del Cauca, y en este caso el Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, apoya el trabajo desarrollado por otras instituciones públicas, como INGEOMINAS, cuya misión implica un contacto directo con el medio ambiente y la comunidad.

Desde el año 1994, Ingeominas (Sede Popayán) inició el muestreo mensual de las aguas termales del Volcán Puracé. El análisis de la composición química de las aguas termales se viene realizando en los laboratorios de Ingeominas sede Bogotá y sede Manizales. Los datos más confiables sobre la composición química de las aguas termales del Volcán Puracé corresponden a los obtenidos en los últimos cinco años, ya que existe una dispersión en la toma de análisis y en el tiempo, que hace que estadísticamente no se tengan en cuenta, debido a los recursos económicos con los que se debe contar para poder realizar este tipo de análisis.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las aguas minerales y termales representan un importante recurso natural de amplio espectro de aplicación, derivado tanto de su composición química como de su contenido energético. La exploración de este recurso demanda la competencia de muchas disciplinas científicas entre las que ocupa un lugar importante la química, dado que unida con la geología hace posible:

- a. Clasificar el fluido
- b. Plantear hipótesis sobre su origen
- c. Aportar criterios para la modelación del sistema de aguas termales del Volcán Puracé
- d. Estimar temperatura en el reservorio, si existe equilibrio fluido-roca
- e. Postular la identidad de los minerales en equilibrio
- f. Evaluar cambios en el reservorio
- g. Establecer la posibilidad de impacto ambiental de las descargas a sistemas superficiales
- h. Inferir procesos que sufre el fluido subsuperficial en su ascenso a los manantiales.
- i. Recomendar usos potenciales

Por las razones anteriormente expuestas, el planteamiento del problema se estableció de la siguiente manera:

¿Cómo es el comportamiento geoquímico de las aguas termales: Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul y San Juan, del Volcán de Puracé respecto a la concentración de los electrolitos y sus variaciones?.

Este problema fue reformulado mediante las siguientes preguntas específicas:

1. ¿ De qué forma se llevan acabo las determinaciones químicas de los electrolitos presentes en las aguas termales del volcán Puracé?
2. ¿Cuáles han sido las concentraciones de los electrolitos de las aguas termales analizados en los últimos cinco años?
3. ¿Ha variado la composición química de las aguas termales del volcán Puracé en los últimos cinco años?
4. ¿A qué se debe la composición química de las aguas termales del volcán Puracé?
5. ¿Cuáles son las causas potenciales de las alteraciones termales?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento geoquímico de las aguas termales de Pilimbalá, La Mina, Agua Hirviendo, Agua Tibia, Pozo Azul y San Juan.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

3.2.1 Descripción de los procedimientos utilizados para llevar a cabo las determinaciones analíticas de los electrolitos de las aguas termales del Volcán Puracé.

3.2.1 Sistematizar los datos de las concentraciones electrolíticas de las aguas termales determinadas mensualmente en los últimos cinco años.

3.2.2 Diseñar un modelo descriptivo del comportamiento geoquímico de las aguas termales del Volcán Puracé en los últimos cinco años.

3.2.4 Analizar los resultados de las concentraciones electrolíticas de las aguas termales del Volcán Puracé según los aspectos geoquímicos del hidrotermalismo

4. HIPÓTESIS

Dado que Ingeominas ha realizado el análisis y la sistematización de los datos de las concentraciones de los electrolitos de las fuentes termales del Volcán Puracé, cada mes durante los últimos diez años, y actualmente es necesario dar nuevas interpretaciones, a estos datos. Analizar la información correspondiente a los últimos cinco años (1996 – 2000) de seguimiento y control de las fuentes termales asociadas al volcán Puracé

Entonces es posible obtener el modelo descriptivo del comportamiento de los datos a través del tiempo e inferir acerca de las causas de la presencia de dichos electrolitos y sus concentraciones, para analizar su impacto ambiental y sus usos potenciales.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Dinámica de los volcanes

¿Dónde tendrá lugar la próxima erupción volcánica? ¿Cuál será su forma? ¿Su violencia? ¿Su efecto eventual sobre las poblaciones cercanas? ¿Sobre el clima? A pesar de que en estos últimos años el progreso del conocimiento ha sido muy rápido, no es posible todavía responder con certeza a este tipo de preguntas. Sin embargo, una erupción va precedida de signos precursores que, cada vez, es posible detectar y analizar mejor. Pero ¿cuáles son los signos precursores? Sismos, deformaciones del suelo, variación en la concentración electrolítica de las fuentes termales, variaciones del campo magnético, etc. Pueden observarse gracias a los datos, cada vez más numerosos, registrados por satélites y modelación del comportamiento químico y físico del sistema.

Los volcanes se caracterizan por un estilo eruptivo o tipo de erupciones volcánicas predominantes que han sido definidas en volcanes clásicos. Las erupciones se pueden clasificar según el grado creciente de explosividad, el cual es función de la composición, viscosidad y profundidad del magma. Los principales tipos de erupciones son: *Fisural*; caracterizada por la emisión suave de lava calientes muy fluidas desde fisuras longitudinales, *Hawaiano*; normalmente empieza con un estado fisural en pequeñas elevaciones en zonas de debilidad donde hay fallas,

por donde son emitidos grandes volúmenes de lavas fluidas que viajan a grandes velocidades, *Estrombólico*; se caracteriza por pequeñas erupciones explosivas intermitentes de gases y jirones pastosos de lava menos fluidas, que suceden a intervalos de minutos u horas, *Vulcaniano*; ocurren potentes explosiones de roca fundida, partículas sólidas y gases calientes que son expulsados hacia la atmósfera en forma de nubes oscuras de cenizas o columnas eruptivas, *Peleano*; son extremadamente destructoras, son típicas en ellas las nubes ardientes que son inmensas oleadas de cenizas volcánicas incandescentes y gases muy calientes, y de tipo *Pliniano* siendo el más violento de todos. En este caso, inmensas explosiones de grandes volúmenes de material volcánico, precedidas o acompañadas por fuertes ruidos y movimientos del terreno, generan grandes columnas eruptivas que en algunas ocasiones pueden llegar hasta la estratosfera.²

El estudio de las placas tectónicas ha permitido explicar los grandes terremotos, como el de Kobe (Japón), esclarece también la distribución geográfica de los volcanes. Las técnicas de datación radiométrica llevan a descubrir la existencia de grandes ciclos eruptivos a escala terrestre, cuya incidencia sobre el clima y las grandes extinciones de especies es probable.

² MOSQUERA, D. Introducción a la geología con ejemplos de Colombia. Ingeominas, Bogotá, 2001 p. 70-73

5.1.1 Génesis y transformación de una erupción

¿Cuál es el origen de una erupción volcánica? ¿De dónde provienen los materiales expulsados? Gracias a una modelación de la dinámica de los flujos, actualmente es posible conocer más sobre los sistemas volcánicos y sus modificaciones a través del tiempo. La vulcanología ha progresado mucho en los últimos treinta años, hasta el punto que en la actualidad se conocen bien los principios que rigen el funcionamiento de los volcanes. En general, una erupción se produce por un aumento de presión en la cámara magmática. Esta cámara se hincha progresivamente hasta que se alcanza el umbral de ruptura de sus paredes e inicia el ascenso del magma hacia la superficie. El magma es una mezcla viscosa y caliente (750-1250 °C), compuesta por un fluido rico en sílice, alúmina, compuestos volátiles (gases) y una gran variabilidad de cationes y aniones en solución.³

A menudo se piensa que una erupción volcánica es un acontecimiento instantáneo, análoga a un terremoto o a una explosión nuclear, Pero se trata de un acontecimiento que perdura por mucho tiempo y cuya evolución es compleja. La erupción del Monte Saint Helens (EEUU) se prolongó de 1980 a 1989, la de la Montagne Pelée (Martinica) de 1902, con la destrucción completa de la ciudad de Saint-Pierre, permaneció activo durante dos años.⁴ El sistema magmático

³ TAZIEFF, H. Los volcanes y la deriva de los continentes. 1974. p. 72, 73.

⁴ SHEVELL, L. GOFF, F. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 99. 2000. p. 123-138.

profundo que alimenta a un volcán es incluso más sorprendente que la misma erupción volcánica.

Los estudios geológicos y las técnicas geofísicas nos permiten conocer las estructuras del subsuelo, pero no han logrado la precisión necesaria para el conocimiento de la dinámica eruptiva. En el momento actual, la sismología permite analizar la estructura interna de un volcán con una resolución de algunos centenares de metros. Pero las dimensiones de una cámara magmática son del orden de kilómetros, por tanto es difícil localizarla con precisión para determinar su estructura interna.⁵

Por medio de modelos físicos, se pueden cuantificar los fenómenos eruptivos, analizar su evolución en el tiempo y finalmente, medir el grado de complejidad de los sistemas volcánicos, es decir, identificar los diferentes mecanismos que intervienen.

En un volcán se tienen tres elementos importantes: un magma, una cámara magmática y unos componentes volátiles. El magma es producido por un foco profundo, en el manto terrestre, a profundidades que pueden superar los cien kilómetros, o más superficialmente, en la base de la corteza terrestre calentada a alta temperatura. Estos focos están siempre localizados en zonas activas del globo terrestre que producen magma continuamente.

El magma, es una mezcla viscosa y caliente (750 –1250 °C) generada por la fusión parcial de las rocas a altas temperaturas y presiones en el interior de la Tierra; está compuesto por fase líquida rica en sílice, fases sólidas (cristales en suspensión y fragmentos de roca) y fases gaseosas (agua, CO₂, H₂S, SO₂, F, Cl, Br y otros). Estos gases permanecen disueltos en la fase fundida mientras el magma está sometido a altas presiones, en zonas profundas del interior de la Tierra. A medida que el magma asciende, disminuye la presión que ejerce el entorno sobre él, y los componentes gaseosos empiezan a separarse de las demás fases contenidas en el magma. En zonas más someras el magma alcanza el nivel de saturación en volátiles y éstos se separan casi completamente, en un fenómeno llamado vesiculación, similar a la generación de burbujas en una botella de soda o de champaña, al ser agitadas; llega un punto en el que la presión que las burbujas de gases volcánicos ejercen es tal, que el magma se fragmenta en mil pedazos y finalmente gases y magma fragmentado son expulsados a través del cráter en una erupción volcánica.⁶

El magma se estanca y se acumula en un depósito, la cámara magmática. Antiguas cámaras magmáticas solidificadas quedan a veces expuestas en la superficie terrestre por efecto de la erosión. La acumulación del magma en profundidad repercute en la superficie por el hinchamiento y por los fenómenos de fisuración que acompañan a la deformación, entonces aparecen los sismos

⁵ BRUSCA, L. Et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 108. 2001. p. 199-218

⁶ MOSQUERA, D. Introducción a la Geología con ejemplos de Colombia. *Informe interno Ingeominas*, 2001. p. 69

volcánicos que permiten seguir “el camino del magma”. Todos ellos son signos precursores que pueden anunciar una erupción próxima.⁷

El caudal de una erupción volcánica es mucho mayor que el caudal del sistema de conducciones profundas que lleva el magma hacia la superficie. Por tanto, una erupción volcánica sólo es posible si se ha acumulado una cantidad suficiente de magma en una cámara. Algunas de las cámaras magmáticas pueden contener más de cien kilómetros cúbicos de magma. A veces sucede que se vacían completamente expulsando enormes cantidades de cenizas, gases, materiales, entre otros, hasta destruir el edificio volcánico.

En el interior de una cámara magmática, el magma se enfría y se solidifica progresivamente, formando cristales, a diferentes tiempos y velocidades, se habla entonces de cristalización fraccionada. Estos cristales incorporan determinados elementos químicos que, en consecuencia, empobrecen el líquido residual. Inversamente, los elementos que no entran en la estructura cristalina se enriquecerán en el líquido residual. Por tanto, el líquido residual cambia continuamente de composición química con el paso del tiempo.⁸

El magma es la parte del volcán que libera a los elementos volátiles. Los elementos volátiles asociados al magma son: agua (80 al 90 %) y dióxido de

⁷ HANSEN, H. GRONNVOLD, K. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98. 2000. p. 1-32

⁸ DELMELLE, P. BERNARD, S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol.97. 2000. p. 55-75

carbono (hasta el 10 %) y, en menor cantidad, óxido de azufre, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, entre otros. A presiones elevadas, estos elementos están disueltos en el magma. Este fenómeno es el que explica las grandes velocidades de eyección alcanzadas en algunas erupciones. Durante su ascenso hacia la superficie, la presión disminuye y estos elementos dejan de ser solubles en el magma, lo que generan la formación y dilatación de burbujas de gas.⁹

La liberación de los elementos volátiles desde el magma es el fenómeno que explica las grandes velocidades de eyección alcanzadas en algunas erupciones. Así, el volumen de un magma que contenga un cierto porcentaje de agua aumentará en alrededor de un factor de 100, al alcanzar la presión atmosférica.

El aumento de presión en la cámara magmática se puede producir simplemente por la llegada de nuevo magma procedente del foco en un nivel más profundo, a su vez, activado por otros movimientos más profundos, aunque también se puede explicar gracias a la evolución del propio magma. Cuando el magma se enfría y cristaliza, los elementos volátiles no encuentran minerales huéspedes. Aumentan su concentración progresivamente en el líquido residual, más allá del umbral de solubilidad, obteniéndose una fase gaseosa, de baja densidad.

⁹ DELMELLE, P. et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 97. 2000. p. 31-53

Para una masa dada, el volumen de la mezcla líquido más gas contenido en la cámara aumenta progresivamente e igual que la presión interna. Por esta causa, las paredes se deforman.¹⁰

Aunque también se deba a la desgasificación del magma, siendo un volcán susceptible a desencadenar una erupción. La velocidad de la erupción, así como el estado de la mezcla líquido-gas varían debido a su composición. Cuando el magma sube hacia la superficie, la presión disminuye, lo que provoca la exsolución y la dilatación de la fase gaseosa. A una determinada profundidad en la chimenea volcánica, la fracción volumétrica de gas depende del contenido inicial en componentes volátiles del magma así como de la presión. La presión no se puede estimar directamente en función de la profundidad, ya que viene determinada por la dinámica de la corriente. En otras palabras, no es igual a la presión que existe en las rocas circundantes a la misma profundidad, que se conoce bien. Si lo fuese no habría circulación. Este hecho ilustra la necesidad de los modelos físicos cuantitativos para seguir la evolución del magma durante su ascenso por el conducto volcánico.¹¹

Se puede calcular la manera como aumenta la fracción gaseosa durante la subida del magma por el conducto volcánico. Cuando ésta es pequeña, el gas está disperso en el magma en forma de burbujas. Para contenidos de gas superiores a un determinado tanto por ciento en peso, la fracción volúmica de gas alcanza

¹⁰ CAPASSO, G. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 102. 2000. p. 309-318.

valores de más del 95 % a la presión atmosférica. Esto hace inevitable una modificación de la naturaleza de la mezcla magma-gas: el magma se fragmenta y un chorro de gas transporta gotitas de magma. Estos fragmentos de magma vesiculado, una vez caídos al suelo y enfriados se convierten en pómez .

La diversidad de los regímenes eruptivos se debe fundamentalmente a tres factores. El primero es la gran gama de viscosidades de los magmas: una riolita es cien mil veces más viscosa que un basalto. El segundo factor es la gran variabilidad del contenido de vapor de agua y de dióxido de carbono en los magmas. Según estos valores y las leyes de la solubilidad, puede aparecer una fase gaseosa a profundidades muy diferentes y ocupar un volumen más o menos importante. El tercer factor es la mayor o menor movilidad de las burbujas de gas respecto al magma líquido. Variando estos tres factores, se puede predecir un gran número de fenómenos diferentes.

Una erupción puede presentar una alternancia entre emisión de gases poco peligrosa y fases explosivas. Un volcán puede pasar del régimen pliniano al de coladas piroclásticas y viceversa. El paso de erupción pliniana a colada piroclástica se debe ya sea al ensanchamiento de la chimenea volcánica, por efecto de la acción abrasiva de la mezcla magma-gas, o bien por la disminución del contenido de elementos volátiles en el magma . En cambio, el regreso a una fase pliniana después de un episodio de colada piroclástica no se puede explicar

¹¹ JAUPAR, C. *La Recherche, versión en español*. Vol. 157. 1993. p. 442-447

por un estrechamiento de la chimenea, sino solamente por el aumento del contenido de elementos volátiles. De otro modo un volcán puede alternar fases plinianas y fases tranquilas en la edificación de un domo de lava. Igualmente, en este caso, es el contenido de elementos volátiles el que varía.

Un mismo volcán puede presentar todos estos regímenes, que dan una apariencia caótica a una erupción.

Se puede demostrar que, en la cámara magmática, la composición química del magma, y en particular su contenido en volátiles, no varían. Modelos recientes han permitido explicar esta paradoja y explicar por qué es tan complejo el desarrollo de una, erupción.¹²

Se sabe que un volcán está fisurado con frecuencia y deja escapar gases de origen magmático de olores nauseabundos. Se trata de las fumarolas, cuyos caudales son particularmente importantes durante una erupción, y cuya presencia demuestra que el magma pierde una parte de su gas al subir. Para describir este fenómeno son necesarias tres variables: la velocidad de ascenso del magma, la presión y el contenido en elementos volátiles. Este último varía realmente, en función de la velocidad de la erupción. En efecto, el flujo de gas a través de las paredes fisuradas de la chimenea volcánica sólo depende de la presión. En consecuencia, una alta velocidad de ascenso no permite que el magma pierda grandes cantidades de gas (no tiene tiempo). Por el contrario, una velocidad

pequeña de subida asegura una desgasificación importante. Se puede demostrar que pequeñas variaciones de la presión en la base de la chimenea volcánica, es decir, en la cámara, pueden hacer pasar de un régimen en el que la velocidad y el contenido de gas crecen de manera catastrófica, a un régimen en el que la velocidad y el contenido de gas casi no varían. En términos vulcanológicos, se puede pasar de un régimen pliniano a un régimen de colada piroclástica y finalmente a la edificación de un domo de lava. Las transiciones no se producen siempre en el mismo sentido, y se predicen alternancias. No obstante, durante un periodo largo, se puede observar una disminución y luego la desaparición de los acontecimientos plinianos, luego una disminución y la desaparición de las coladas piroclásticas y, finalmente, el final de la erupción.¹³

Esta tendencia general produce una disminución progresiva de la erupción, que se puede explicar por el regreso a una presión normal en la cámara magmática. Estos resultados abren el camino a la descripción de una erupción volcánica en toda su complejidad.

Los modelos físicos han permitido definir los mecanismos fundamentales de las erupciones volcánicas y las variables importantes que determinan su funcionamiento. Sus predicciones concuerdan bien con las observaciones. Quedan incertidumbres respecto a los detalles de la evolución y, en particular, respecto a la duración y al volumen emitido durante cada fase eruptiva. De hecho,

¹² TAZZIEF, H. *Los volcanes y la deriva de los continentes*. 1974. p. 56-62.

¹³ IWASAKI, I. *et al. Bulletin Volcanologique*. Vol. 39. 1976. p. 1-3.

estos parámetros dependen del tamaño y la geometría del sistema de alimentación del volcán, siguen siendo poco conocidos y de momento, sólo se pueden estimar por medio de un cálculo hecho *a priori* a partir de principios físicos. Los métodos más prometedores consisten en medir la evolución en el tiempo de los parámetros de una erupción explosiva.

5.2 El agua del manto terrestre.

El agua ha tenido, y sigue teniendo, un papel esencial en la evolución y el modelado de nuestro planeta. Ha permitido el nacimiento y el desarrollo de la vida, modifica continuamente los relieves, hace de vector en el transporte de partículas sólidas y de iones en solución en los continentes y los mares y, por último, por su presencia en forma de vapor atmosférico, contribuye al efecto invernadero natural y a las transferencias térmicas entre los mares, los continentes y la atmósfera

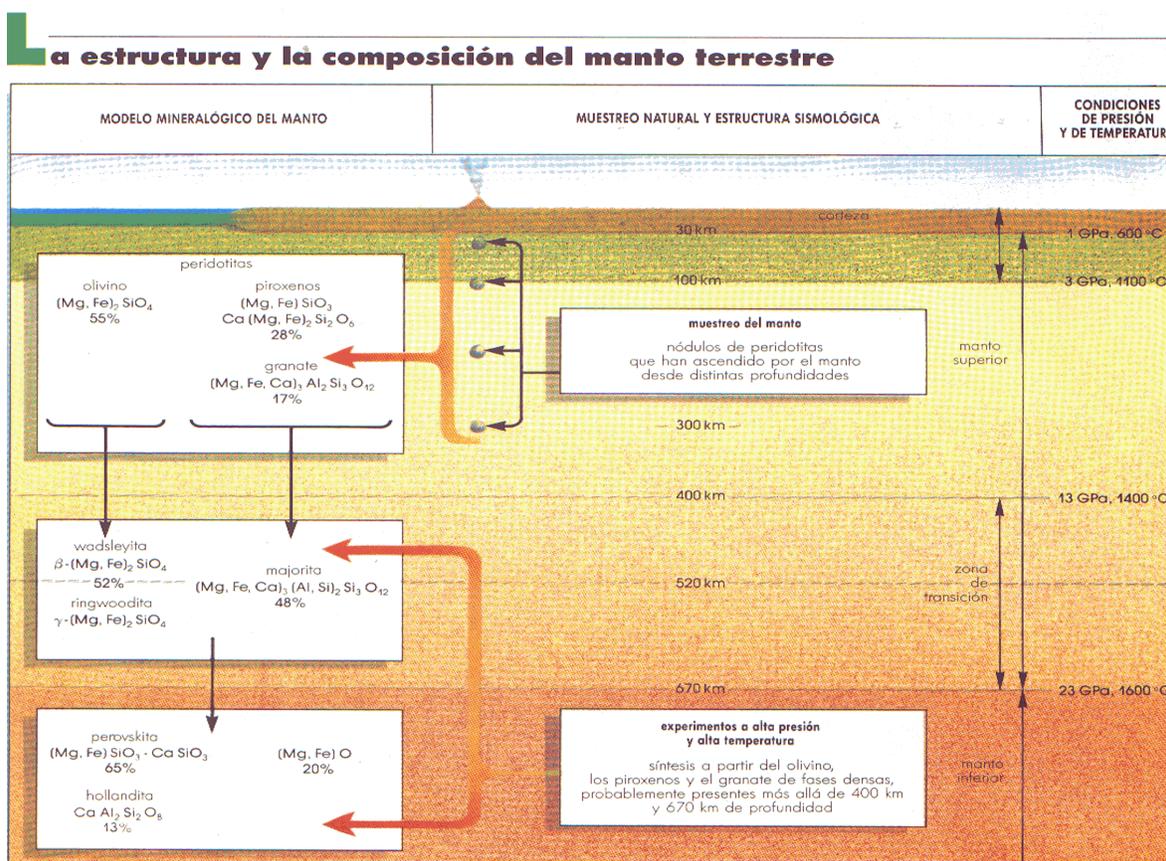
Del ciclo del agua sólo se discute la parte externa, que concierne a los continentes, los mares y la atmósfera. Una de las características de estas transferencias es su rapidez a escala geológica. Los tiempos de residencia de las moléculas de agua en estas reservas son del orden de días, de años o de varios milenios. Las cantidades y los flujos del agua entre mares, atmósfera y continentes son relativamente bien conocidos.¹⁴

¹⁴ CHAHINE, M. *Nature*, Vol. 359. 1992. p. 373

El ciclo que tiene lugar en el interior de la Tierra es mucho más misterioso. Sobre las cantidades, tamaños y flujos entre los depósitos implicados -la corteza oceánica y continental y sobre todo en el manto- (se ignoran muchas cosas). Se sabe que las transferencias son allí mucho más lentas. Así, en el manto, esta vasta envoltura rocosa que se extiende entre los 30 y los 2900 km de profundidad y que constituye aproximadamente las dos terceras partes de la masa de la Tierra (Cuadro 1), el tiempo de residencia de las moléculas de agua varía entre millones y cientos de millones de años.

Esquemáticamente, se sabe que el agua “sale” del manto por el vulcanismo de las dorsales oceánicas, montañas submarinas que serpentean por el fondo del mar y a lo largo de las cuales se forma nueva corteza oceánica por ascenso del magma basáltico desde el manto. La alteración de las rocas de la corteza oceánica por el agua del mar, a medida que dicha corteza se va alejando de la dorsal que le ha dado origen, conduce a la incorporación de una fracción del agua del mar a la corteza oceánica. Ésta, enriquecida en agua, vuelve al manto al nivel de las grandes fosas oceánicas, en las zonas de subducción, allí donde las placas oceánicas se hunden en las profundidades de la Tierra (como a lo largo del Japón o de la costa oeste de América del Sur).

Cuadro 1. Estructura y composición del manto terrestre.



Por último, una cantidad de agua no despreciable es extraída del manto y emitida directamente a la atmósfera por el vulcanismo del fondo de los océanos (islas oceánicas como Hawai) o de los continentes (como el africano). Aunque desde hace años conocemos las líneas maestras de este ciclo interno, subsisten muchas incógnitas. ¿Qué cantidad de agua está almacenada en el manto? ¿En qué lugares (rocas, minerales, fluidos o magmas)? ¿Qué cantidad escapa por vulcanismo y regresa por hundimiento de las placas litosféricas? Por último, ¿cuáles son los mecanismos de transferencia del agua del manto a la superficie y al revés? Responder a estas preguntas requiere, comparar las observaciones

realizadas en muestras naturales extraídas del manto terrestre, con experimentos de laboratorio en los cuales se reproducen las condiciones de presión y temperatura que reinan en el interior del planeta.

En efecto, la experiencia demuestra que, incluso en pequeñas cantidades (de 0,001 a 1 % en peso), el agua modifica considerablemente las propiedades de las rocas del manto; reduce notablemente sus puntos de fusión (en varios cientos de grados), cambia la composición química de los magmas procedentes de la fusión parcial de estas,¹⁵ reduce su umbral de plasticidad y su viscosidad; y, por último, modifica la velocidad de difusión de los elementos químicos. Así la variación de la concentración de agua ha afectado probablemente la dinámica de los movimientos de convección que animan el manto y, por ello, ha jugado un papel importante en su diferenciación química; también ha controlado la distribución de su temperatura con la profundidad a lo largo del tiempo.¹⁶

Por último, el conocimiento de los eventuales depósitos de agua en el manto es importante para comprender el origen, la acumulación, el reciclado y la variación del contenido de agua en la hidrosfera y la atmósfera a lo largo de los tiempos geológicos.¹⁷

¹⁵ WYLLIE, P.J. *Review of Geophysics*, Vol. 26. 1988. p. 370

¹⁶ MCGOVERN, P.J. SCHBERT, G. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 96. 1989. p. 27

¹⁷ WILLIAMS, D.R. PAN, J. *Geophys. Res.*, Vol. 97. 1992. p. 8937

Hacia el interior de la Tierra se fue diferenciando el núcleo central metálico y un manto rocoso.¹⁸ Esta diferenciación, que todavía prosigue, está gobernada por los contrastes de densidad y por la gravedad, y tiene por efecto la transferencia de los elementos más ligeros (los silicatos) hacia el exterior del planeta y de los más pesados hacia el centro (el hierro en el núcleo).

Los elementos volátiles se encuentran en la superficie, porque están incorporados a minerales y sobre todo a magmas que baja densidad. La atmósfera y la hidrosfera serían pues de origen interno y resultarían de una desgasificación del manto.¹⁹ Esta desgasificación habría sido brutal y precoz: el 80 % de la atmósfera se habría formado en los cien primeros millones de años de existencia de la Tierra mientras que el 20 % restante se habría acumulado más lentamente durante los últimos 4000 millones de años.²⁰ La desgasificación del manto prosigue actualmente por medio del vulcanismo.²¹ Para convencerse de ello basta recordar que el penacho que sale de los volcanes andesíticos, en actividad están formados, entre otras cosas, por dióxido de carbono y agua. Parece ser, además, que no todo el manto está totalmente desgasificado y que una parte importante (del orden del 50 %) del agua inicialmente incorporada permanece retenida. Ciertos autores sugieren incluso que el manto terrestre contiene todavía el equivalente de una a cuatro veces la masa de agua contenida en los océanos.²²

¹⁸ WETHERILT, G.W. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* Vol. 18. 1990. p. 205

¹⁹ HOLLAND, H.D. *et al. Nature*, Vol. 23. 1986. p. 320

²⁰ ALLEGRE, C.J.A. *et al. Earth Planet, Sci. Lett.*, Vol. 81. 1986/1987. p. 127

²¹ FOUKE, B.W. *et al. J. Sediment Res Sect A.* Vol. 70. 2000. p. 565-585

Se ha encontrado que al menos una fracción del agua presente actualmente en la superficie de la Tierra puede tener otro origen. Durante la fase de acreción, y sobre todo en sus estadios terminales, la potencia de las colisiones entre la Tierra y otros objetos rocosos de gran tamaño habría provocado una deshidratación de los materiales superficiales o próximos a la superficie de la Tierra y de los meteoritos.²³

Ello habría ocasionado la liberación a la atmósfera, de una cierta cantidad de agua y de otros gases, como el dióxido de carbono. El agua de la atmósfera inicial no pudo pasar rápidamente del estado de vapor al estado líquido. Seguramente, la temperatura de la superficie de la Tierra y la de la atmósfera eran elevadas a causa de un efecto invernadero muy acentuado, inducido por una fuerte concentración de dióxido de carbono.²⁴ No obstante, el hecho de que las rocas más antiguas conocidas se encuentren, demuestra la existencia de agua en forma líquida en la superficie de la Tierra desde hace por lo menos 3900 millones de años.

¿Hay realmente agua en el manto? La respuesta es sí. Hay pruebas directas hasta por lo menos 300 km de profundidad. A partir de ahí, los experimentos de laboratorio son los que brindan los indicios más preciados. Por comodidad, en lo que sigue se llamará “agua” indistintamente a las moléculas de agua (H₂O) y a los iones hidroxilo (OH⁻) y se expresará el contenido en “agua” en peso de H₂O (en %

²² AHRENS, T. J. *Nature*, Vol. 342. 1989. p. 565-585

²³ MATSUI, T. ABE, Y. *Nature*, Vol. 319. 1986. p. 303

o en ppm, partes por millón). Antes de proseguir, es preciso recordar bajo qué formas se presenta el agua en el manto terrestre (rocas, minerales, magmas y vidrios) (Cuadro 2). El agua puede encontrarse en estado libre (en forma de H₂O). En tal caso, está localizada en los intersticios que dejan los minerales de una roca, en la superficie de estos (adsorción) o también en las inclusiones fluidas dentro de los minerales. Esto es lo que se observa frecuentemente en los sedimentos poco consolidados de los fondos oceánicos.

Cuadro 2. Formas de presentación del agua en el manto terrestre²⁵

LOS HUÉSPEDES DEL AGUA EN EL MANTO		
profundidad	% de H ₂ O en peso	comentarios
30 km		
olivino : (Mg, Fe) ₂ SiO ₄	3-150 ppm	El olivino, el piroxeno y el granate son minerales nominalmente anhidros. Constituyen más del 90 % de la masa de las peridotitas que los volcanes hacen ascender en forma de enclaves. Los contenidos de H ₂ O aquí consignados han sido obtenidos por medidas de absorción infrarroja en muestras naturales. Los anfíboles y las micas se observan ocasionalmente en muestras de peridotitas. En tal caso, constituyen unos pocos % de la masa de la roca. Los contenidos consignados corresponden a las cantidades de agua contenidas en el mineral. Los magmas pueden disolver unos pocos % de agua. Esta cantidad disuelta depende de la riqueza en agua de la peridotita, origen del magma.
piroxeno : Ca (Mg, Fe) ₂ Si ₂ O ₆	50-1000 ppm	
granate : (Ca, Mg, Fe) ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	5-200 ppm	
anfíbol : K ₂ Ca Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	2%	
mica: K Mg ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	4,3%	
magma :	unos pocos %	
400 km		
wadsleyita β - (Mg, Fe) ₂ SiO ₄	4000 ppm	El contenido en agua de esta fase se ha obtenido con una muestra de síntesis fabricada a alta presión y alta temperatura (14 GigaPascal (GPa) y 1.500 °C) en presencia de agua. ⁽²⁴⁾
520 km	----- + majorita	?
ringwoodita γ - (Mg, Fe) ₂ SiO ₄	?	La estructura de esta fase es la misma que la de la espinela MgAl ₂ O ₄ . ⁽²⁸⁾ Pero las observaciones demuestran que esta estructura no incorpora OH o H ₂ O. Podría ser, pues, que el γ-Mg ₂ SiO ₄ no contuviera agua. En cambio, es bastante posible que la majorita, lo mismo que los granates de más baja presión, pueda incorporar agua.
670 km		
(Mg, Fe)SiO ₃ - perovskita	?	Actualmente, no sabemos si la perovskita (Mg,Fe)SiO ₃ nominalmente anhidra puede también albergar agua. Pero no hay que excluir esta posibilidad, ya que es sabido que otros compuestos de estructura perovskita como BaTiO ₃ o CaTiO ₃ pueden contener algunos ppm de agua.
(Mg, Fe)O magnesio-wüstita	?	

El agua, en forma de H₂O ó de OH⁻, puede también estar incorporada a la propia estructura de los minerales. Se habla en tal caso de “minerales nominalmente hidratados”. Las zeolitas y los anfíboles, frecuentemente observados en la corteza oceánica alterada por el agua de mar, pertenecen a esta categoría.

²⁴ ATREGA, S.K. *et al.* (ed.), *University of Arizona Press*. 1989. p. 386-342

²⁵ PHILIPPE, G. En: *La Recherche, versión en español*. Vol.138 (9) (1993) p. 708-717

El agua también puede estar presente en minerales cuya estructura y estequiometría no permiten la presencia de H_2O ó de OH^- . El olivino, componente principal del manto terrestre, pertenece a esta categoría. Se habla entonces de “material nominalmente anhidro”. No obstante, las medidas de absorción infrarroja en muestras naturales procedentes del manto realizadas por D.R. Bell y G.R. Rossman, del California Institute of Technology de Pasadena, revelan la presencia de decenas de ppm de agua en forma de moléculas de H_2O o de grupos OH^- . Una parte de esta agua es atribuible a inclusiones fluidas, pero otra está verdaderamente incorporada en la estructura del mineral.

5.2.1 Introducción de agua en la estructura de un mineral anhidro

La mayoría de los magmas que se difunden por la superficie de la Tierra o en el fondo de los océanos proceden del manto y contienen cantidades no despreciables de agua. Los magmas que llegan al nivel de las dorsales oceánicas se enfrían casi instantáneamente al entrar en contacto con el agua de mar, y en su superficie se forma una costra vítrea de unos centímetros de espesor. La erupción tiene lugar bajo varios miles de metros de agua, es decir, a presiones de 100 a 400 bars. A tales presiones, el agua está disuelta en el magma basáltico. La corteza vítrea sólida es magma mojado, que no ha perdido su agua, contrariamente al resto del magma, que se enfría y cristaliza más o menos. Por lo tanto, las medidas del contenido en agua de estos vidrios son las únicas que son representativas del magma.

Un magma basáltico se separa así de una roca residual refractaria empobrecida en agua. Se dice en tal caso que el agua es un componente incompatible, ya que durante la fusión parcial va a parar preferentemente al magma.²⁶ Conociendo la tasa de fusión, el contenido de agua en estos basaltos y las cantidades de agua que, van a parar al magma y permanecen en la roca residual respectivamente, es decir, el coeficiente de distribución del agua entre el basalto y la peridotita, cabe estimar que las peridotitas de las que surgieron los basaltos contienen de 100 a 1000 ppm de agua.

Otra prueba directa de la existencia de agua en el manto: los enclaves de peridotitas que las lavas de ciertos volcanes (como los del Macizo Central en Francia, o los muy especiales de África del Sur), arrancan en su ascenso hacia la superficie. Los minerales de estas peridotitas, algunas de las cuales proceden de regiones del manto situadas a 300 km. de profundidad, contienen cientos de ppm de H₂O.

Los experimentos de laboratorio nos permiten afirmar que hay zonas potenciales de almacenamiento de agua en el manto más allá de los 300 km de profundidad. Los resultados de los experimentos de laboratorio, en los que los minerales y las rocas se someten a las condiciones de presión y temperatura que reinan en el interior del manto, muestran la posibilidad de existencia, más allá de los 300 km de

²⁶ MICHAEL, P.J. *geochemistry, Cosmochim. Acta*, 52. 1988. p. 30

profundidad, de fases de alta presión del olivino, el piroxeno y el granate en las peridotitas (Cuadro 2).²⁷

El dióxido de carbono CO₂ está presente en forma libre en la atmósfera, pero también está “fijado”, por ejemplo en las rocas calizas en forma de carbonatos. Como el agua, el CO₂ escapa del manto por el vulcanismo, se encuentra en la corteza oceánica y los sedimentos calizos y puede volver a ellos por la subducción.²⁸ La comprensión del ciclo interno del CO₂ pasa por un conocimiento experimental de las reacciones de descarbonación en función de la presión y de la temperatura, así como de las relaciones entre silicatos y carbonatos.

5.2.2 El modelo de Subducción

La corteza terrestre sólida está dividida aproximadamente en unas veinte placas semirrígidas. Cuando dos placas convergen o chocan, de tal forma que una de las dos, la más densa, se desliza debajo de la otra y desciende hasta el manto, se denomina zona de subducción. Los volcanes se ubican en la placa que permanece “flotante” y se localizan aproximadamente a 200 km desde la fosa oceánica o lugar de choque de las placas.

Una consecuencia importante de la fusión de la corteza oceánica subducida es la producción de magma nuevo. Cuando la corteza se funde, el magma que se forma

²⁷ RINGWOOD, A.E. *geochemistry, Cosmochim. Acta*, 55. 1991. p. 2083

²⁸ CAPASSO, G. *et al. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 102, 2000. p.309

asciende desde el plano de subducción, en el interior del manto, para hacer erupción en la superficie terrestre. Allí donde una placa tectónica oceánica es subducida bajo corteza continental, el magma producido hace erupción en los volcanes situados a lo largo de cadenas montañosas lineales, conocidas como cordilleras, hasta una distancia de unos 100 km tierra adentro desde la zona de subducción (esta zona se sitúa a lo largo de una zanja submarina situada a cierta distancia del continente). Además de crear y alimentar volcanes continentales, la fusión de la corteza oceánica subducida es responsable de la formación de algunos tipos de yacimientos de minerales metálicos valiosos.²⁹

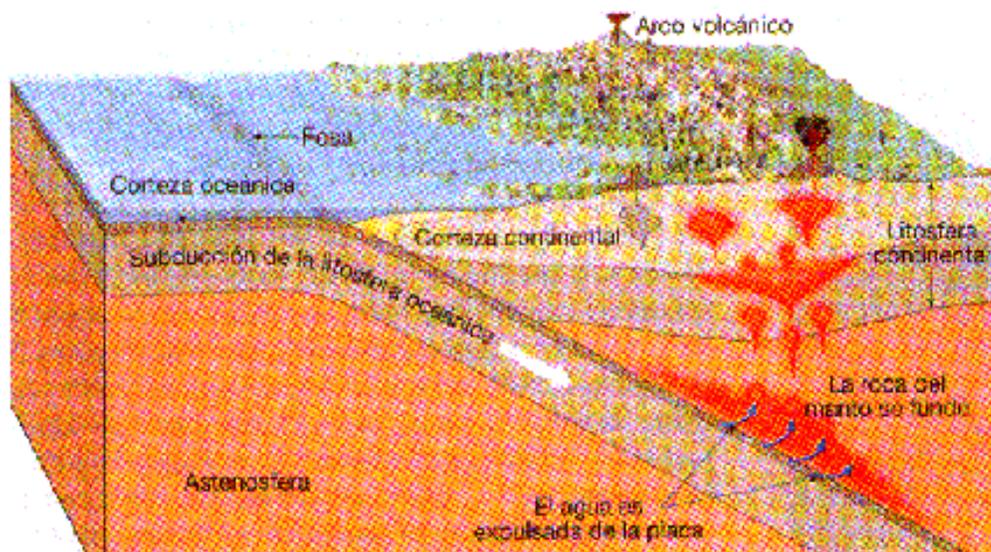


Figura 2. Modelo de subducción³⁰

²⁹ MOSQUERA, D. *Informe interno Ingeominas*. 2001. p. 68, 100

³⁰ Fuente: Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología física. Tarbuck y Lutgens, 1999

5.3 Disoluciones a alta temperatura y transporte de iones

El agua caliente se mueve a través de porciones de la corteza terrestre en volúmenes enormes y el movimiento va asociado con el transporte químico de los iones en disolución. El depósito a partir de estas disoluciones en los sistemas de vetas minerales conduce a la concentración de muchos elementos y compuestos importantes en la industria moderna.

De forma experimental, si se introduce una barra calentada al rojo vivo en un baño de arena húmeda, recubierto de agua, el mecanismo de enfriamiento implica una transferencia de calor a través de un sistema de agua en convección. Se ha observado que este tipo de proceso opera en muchas regiones geotérmicas o de fuentes termales en la Tierra. En algunos lugares en los que interviene el agua del mar, los gases resultantes son ricos en HCl a consecuencia de una piro-hidrólisis del cloruro sódico. En algunas regiones volcánicas se liberan grandes cantidades de gases ácidos. Por ejemplo, en el valle de Ten Thousand Smokes ("Diez mil humos"), en Alaska, se ha estimado que durante un período eruptivo, en un solo año, se desprenden más de un millón de toneladas de HCl y un cuarto de millón de toneladas de HF. Pero como la mayor parte del vulcanismo es submarino, no llegamos a observar los sucesos más importantes.³¹ Es posible imaginar que consiste en un enorme experimento de lixiviación y, actualmente, creemos que

³¹ FYFE, W.S. *Introducción a la Geoquímica*. 1981. p. 82

muchos elementos como el hierro, manganeso, níquel, cobre, plomo, zinc, plata y oro se concentran en el manto terrestre a través de procesos como éste.

5.3.1 Disociación iónica de algunas moléculas

La mayor parte de muchas ideas acerca de las disoluciones inorgánicas se originan en el laboratorio a 25°C. En este caso, la mayoría de las sustancias inorgánicas entran en interacción con el agua formando iones hidratados o algunos tipos de iones complejos. Las solubilidades de los componentes inorgánicos se discuten normalmente en función de las constantes de equilibrio, tales como los productos de solubilidad iónicos. Si se desea considerar lo que sucede a temperaturas elevadas se debe tener en cuenta las entropías de estos procesos.

Teniendo en cuenta los datos representados en la tabla No. 1, cuando se produce la disociación iónica, las moléculas de agua se enlazan con los iones para compensar las energías de ruptura de los enlaces. En general, el número de moléculas de agua es tal que la pérdida general de entropía (libertad) por parte de

Tabla No.1 Disociación iónica de algunas moléculas

REACCION	$\Delta S / (\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1})$
$\text{LiCl sólido} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{Cl}^-$	+14.2
$\text{NaCl sólido} \rightarrow \text{Na}^+_{\text{aq}} + \text{Cl}^-_{\text{aq}}$	+43.1
$\text{HCl (gas)} \rightarrow \text{H}^+_{\text{aq}} + \text{Cl}^-_{\text{aq}}$	-131.4
$\text{HSO}_4^- \rightarrow \text{H}^+_{\text{aq}} + \text{SO}_4^{2-}$	-109.6
$\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})} \rightarrow 2\text{H}^+_{\text{aq}} + \text{S}^=_{\text{aq}}$	-567.4
$\text{Fe}^{+3}_{\text{aq}} + \text{Cl}^-_{\text{aq}} \rightarrow \text{FeCl}^{2+}_{\text{aq}}$	+146.0

las moléculas de disolvente es mayor que la ganancia en entropía de traslación de los iones. Cualquier proceso que tiende a formar especies gaseosas se asocia con un cambio de entropía negativo y cualquier proceso en que el cambio total de entropía se reduce, se relaciona con un cambio de entropía positivo.

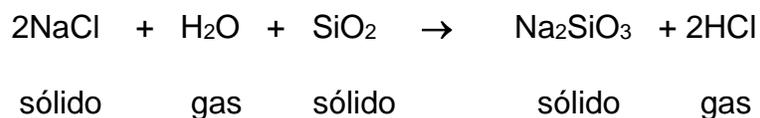
Existe otro principio, si se examina el vapor de moléculas en equilibrio con sólidos a bajas temperaturas, las presiones de vapor son normalmente muy bajas y la química molecular es bastante simple. Cuando crece la temperatura, la presión de vapor crece rápidamente y a medida que crece la concentración de especies en el vapor, crece también la probabilidad de que existan concentraciones apreciables de moléculas asociadas. De esta forma, con el aumento de la temperatura, se presenta una tendencia de la fase de vapor en equilibrio con un sólido a hacerse más compleja. Por lo cual, se empieza a pensar en sistemas inorgánicos moleculares de complejidad molecular creciente con la temperatura. Esto significa también que las tablas de propiedades termodinámicas de los iones acuosos a 25°C pueden ser poco útiles para nosotros, por lo que sería deseable disponer de tablas de la misma amplitud para las moléculas inorgánicas en disolución.

El cloruro sódico es muy soluble en agua a cualquier temperatura, aumentando su solubilidad continuamente hasta llegar al punto de fusión. La conductividad de las disoluciones de sales ha sido estudiada en un amplio rango de condiciones, y a partir de la conductancia se pueden determinar las constantes de disociación del proceso:



Si los sólidos inorgánicos dan disoluciones moleculares a altas temperaturas, el tratamiento termodinámico de tales disoluciones se hace más análogo al de las mezclas simples de gases.³² Se ha notado, por ejemplo, que cerca de los 600°C, las mezclas diluidas de moléculas de hidróxido sódico en agua se comportan de una forma casi ideal.

El dominio molecular de los sistemas a bajas presiones y altas temperaturas conduce a interesantes reacciones de hidrólisis. Por ejemplo, la reacción:



Esta reacción llega a ser completa a 600-700°C y bajas presiones. Otras sales halogenadas se comportan de la misma forma y lo que explica la presencia de tales gases en los centros volcánicos.

La mayoría de los sulfuros de los metales de transición comunes son muy insolubles a bajas temperaturas, pero es sabido que pueden ser transportados en grandes cantidades a temperaturas moderadas. A bajas temperaturas, la mayoría

³² BERNER, R. A. *Principles of chemical sedimentology*, 1971. p. 229

de los sulfuros forman complejos estables con SH^- o S^{2-} , si hay presente un exceso de sulfuro y las disoluciones son alcalinas.

5.3.2 Procesos de formación de minerales

Los procesos de formación de minerales son esencialmente del mismo tipo, tanto si se producen en un ambiente ígneo, sedimentario o metamórfico. Uno de los componentes se va enriqueciendo al ser extraído de un volumen en el que está diluido, seguido del transporte a un volumen más reducido, donde precipita. Algunas veces el componente es un residuo de la lixiviación y el transporte de los componentes menos deseables. La concentración de Al en forma de óxido hidratado en los suelos por lixiviación puede ser representación de esta última etapa.

5.4 La atmósfera y la hidrosfera.

La interfase gas-líquido-sólido que existe en la superficie de la Tierra es de importancia vital para el hombre. Es un sistema complejo con procesos cinéticos interdependientes y de equilibrio que abarcan conceptos principalmente del ámbito de la ciencia física. Así, es interesante la química de las radiaciones del campo magnético terrestre, cinética de gases, química de los electrolitos, bioquímica, etc. Aquí sólo se puede hacer un breve comentario acerca de algunas observaciones geoquímicas sobresalientes. Es muy importante llegar a comprender los factores

que controlan el balance químico de estas regiones externas de la Tierra. Mientras los seres vivos pueden tolerar en general una sorprendente variación de condiciones ambientales, las especies más específicas son sensibles a cambios pequeños.

El balance de oxígeno en la Tierra es complejo. El oxígeno es generado por fotodisociación del agua y por fotosíntesis. Se elimina por procesos biológicos (putrefacción y respiración) y por reacción con las rocas de la superficie, principalmente con las rocas volcánicas recientes que están dominadas por el hierro ferroso, que tienden a formar compuestos de hierro férrico. En parte puede perderse por combinación con el hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de azufre en los gases volcánicos. Si se produjera más oxígeno por fotosíntesis, se fijaría más dióxido de carbono en la materia orgánica. Esto llevaría a una reducción de la temperatura en la superficie terrestre, ya que el dióxido de carbono de la atmósfera reabsorbe la radiación infrarroja que es devuelta desde la superficie al espacio. La reducción de la temperatura (una glaciación), conduciría a una disminución de la actividad biológica.³³

Los procesos de oxidación tienen lugar a través de pasos en los que intervienen especies químicas tales como O_2 , O_3 , OH^\cdot , etc. El rasgo que interesa destacar en este momento es que la existencia de la vida queda regulada por tales procesos complejos que se producen en gran escala. Así, una desviación grande del equilibrio de los organismos productores de oxígeno, causada por la polución

tendría consecuencias serias. En este aspecto debe notarse que el 90 por ciento del oxígeno fotosintético se produce por organismos existentes en los océanos y que los bosques son mucho más productivos que las tierras de cultivo.³⁴

El nitrógeno es un elemento inerte y casi todos los compuestos comunes de nitrógeno son termodinámicamente inestables, con respecto al N₂ gaseoso. Una vez el nitrógeno alcanza la atmósfera es probable que quede retenido en ella. Pequeñas cantidades del mismo se transforman en óxidos y amoníaco por los procesos radiactivos atmosféricos y vuelven a la superficie por acción de la lluvia. Algunos organismos fijan el nitrógeno en forma de nitratos y de amoníaco haciendo que sea más asequible para la actividad biológica. Si quedan enterrados residuos orgánicos en los sedimentos, el nitrógeno tiende a perderse durante el metamorfismo y vuelve a la superficie. Se conocen algunos compuestos de níquel análogos a los silicatos de Na-K, pero son compuestos muy raros.

Las partículas son componentes significativos de la atmósfera de los aerosoles sólidos. Estas partículas varían de tamaño desde lo que podría llamarse iones grandes (radio 10⁻⁸ μm) hasta partículas de polvo de ≈10 μm. Algunas técnicas de prospección geoquímica se basan actualmente en el análisis de las partículas de polvo recogidas. En los aerosoles han sido detectados un gran número de elementos. Algunos que son vitales para la vida (Cl, S) se distribuyen probablemente a partir de agua del mar evaporada, por evaporación relámpago.

³³ PICCARDI, G. *Bull Volcanol.*, Vol. 45-3. 1982. p. 258,.

³⁴ DAIRBRIDGE, R. W. *Bull Volcanol.*, Vol. 25-3. 1972. p. 249

Las partículas de aerosol así formadas son arrastradas por la lluvia. Así, el agua de lluvia contiene aproximadamente 0,5 ppm de Cl, 0,001 ppm de I, 0,4 ppm de Na, etc. Es posible que se formen algunas partículas de aerosol durante la entrada y vaporización del material meteórico.³⁵

La mayor parte del agua libre que existe sobre la Tierra se encuentra en los océanos y la otra se encuentra en forma de lagos, ríos y aguas subterráneas. Una gran cantidad de agua queda atrapada en las fases hidratadas de la corteza y el manto, quizás en la superficie. El agua circula constantemente sobre la Tierra y dentro de ella. Los sedimentos enterrados se deshidratan y el agua es devuelta a la superficie fluyendo a través de la corteza o disuelta en los silicatos fundidos que son liberados en los volcanes. El agua del mar se evapora y la precipitación excede a la evaporación en los continentes, de modo que el agua de los océanos se encuentra constantemente en procesos de evaporación y de retorno por el flujo de las aguas superficiales y subterráneas.

³⁵ MINISSALE, A. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 79. 1997. p. 223-251

6. ESTADO DEL ARTE

6.1 Vulcanismo en Colombia

El vulcanismo ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo y evolución del territorio colombiano. En épocas recientes, durante el *Cuaternario* (últimos 1.8 ó 2 millones de años) ocurrieron diversas erupciones que formaron depósitos que, junto a la acción del clima, facilitaron la generación de suelos fértiles para el desarrollo humano y agropecuario.³⁷

En el territorio que hoy es Colombia las rocas de origen volcánico se remontan al Precámbrico (> 500 millones de años) hasta el Cuaternario, son rocas de composición ácida que intercaladas con rocas sedimentarias, conforman la formación Piraparaná en los Llanos Orientales. Igualmente durante el paleozoico inferior (540 a 435 millones años atrás) erupciones volcánicas de tipo submarino dieron origen a grandes depósitos de rocas volcánicas que luego fueron convertidas a rocas metamórficas, en terrenos de lo que ahora son las cordilleras Central y Oriental y los Llanos orientales de Colombia.

El vulcanismo ha sido más intenso y extenso a lo largo de las cordilleras Central y Occidental y en los valles del Magdalena, del Cauca y del Patía. Los productos de

este vulcanismo son lavas y piroclastos de composición intermedia (andesitas) a ácida (dacitas) localmente de composición básica.³⁸

El vulcanismo activo de Colombia, localizado en el oeste del país, es el resultado de la convergencia destructiva (choque y hundimiento de una placa) que ocurre entre las placas litosféricas de Nazca y Suramericana. Este vulcanismo es fundamentalmente explosivo, de composición andesítica y a veces, dacítica, con predominio de productos piroclásticos en forma de flujos y caídas, flujos de lodo y flujos de lava.³⁶

6.1.1 Volcanes activos en Colombia

Se considera que un volcán es activo cuando ha tenido al menos un evento eruptivo en los últimos 10.000 años o en épocas históricas. La gran mayoría de los volcanes activos del mundo se encuentran dentro de la zona conocida como “Cinturón de Fuego Circumpacífico”, donde además se localiza una buena parte de los epicentros de terremotos que anualmente sacuden al planeta Tierra.

En Colombia hay aproximadamente 35 volcanes, de los cuales 13 son activos. Estos volcanes están construidos sobre sistemas de fallas importantes como , por

³⁷ ATLAS DE AMENAZA VOLCÁNICA DE COLOMBIA. *Informe interno Ingeominas*. 2000. p. 8.

³⁸ MOSQUERA, D. *Informe interno Ingeominas*. Unidad Operativa Bogotá. 2000. p. 74-75

³⁶ ATLAS DE AMENAZA VOLCÁNICA DE COLOMBIA. *Ibid*, p. 10

ejemplo, Romeral y Palestina. Los volcanes que han registrado mayor actividad a lo largo de la historia son el Galeras, el Puracé y el Nevado del Ruiz.³⁷

Colombia presenta actualmente tres zonas volcánicas, dos de ellas ubicadas en las partes media y sur de la Cordillera Central respectivamente y en el extremo más meridional de la Cordillera Occidental, separadas por áreas donde no se registra actividad volcánica. Este fenómeno de segmentación del vulcanismo, muy posiblemente, obedece a las variaciones en el ángulo de inclinación de la superficie de subducción. En la parte norte se encuentra el denominado grupo volcánico Ruiz – Tolima, en la parte central el Volcán Nevado del Huila y el grupo de volcanes Puracé – Doña Juana y en la parte sur el grupo volcánico Galeras - Cerro Negro.

6.2 El Volcán Puracé y las aguas termales

El Volcán Puracé, un estrato-volcán andesítico, es uno de los más activos de Colombia que hace parte de la cadena volcánica de Los Coconucos, en la Cordillera Central. Su actividad ha sido reportada a partir de 1801 y se han descrito desde 1827 al menos 15 erupciones históricas bien documentadas, que han causado daños materiales y pérdida de vidas.

³⁷ MOSQUERA, D. Ibid. P. 75-76

El Volcán Puracé se encuentra en el Departamento del Cauca a 30 km al sureste de la ciudad de Popayán, en 02° 22' de latitud y 76° 23' de longitud oeste.

La actividad volcánica del Puracé, que ha sido reportada desde la época de la colonia, en los últimos 150 años ha presentado al menos cinco períodos eruptivos importantes, que se han caracterizado por ser de tipo explosivo, con períodos de reposo entre 10 y 20 años aproximadamente.

En la tabla No. 2 se pueden observar los episodios históricos de la actividad del Volcán Puracé. Se hace referencia a la actividad principalmente de tipo explosivo, incluyendo flujos piroclásticos, proyectiles balísticos y emisiones de ceniza, que alcanzó las poblaciones de El Tambo y Popayán en los años 1849, 1869 y 1949. En general, desde 1816 hasta 1977, se han reportado 41 erupciones, las cuales se clasificaron en quince períodos eruptivos, con duración de cuatro a ocho años y períodos de reposo de cinco a veintidós años. Su última erupción se presentó el 19 de marzo de 1977, la cual consistió en una pequeña emisión de cenizas, ocurrida después de un período de reposo de diecinueve años, fecha a partir de la cual ha presentado un lapso de veintitrés años de quietud revelando actividad fumarólica y sísmica.³⁸

Las fumarolas asociadas al Volcán Puracé se reúnen en cinco grupos: El primer grupo, en el cráter, asociado a una grieta, se encuentra la fumarola principal, en su

³⁸ PULGARÍN, B. *et al.* *Informe interno Ingeominas*. Unidad Operativa Popayán. 1993. p. 3-24

extremo oriental. Un segundo grupo lo conforman pequeñas fumarolas a lo largo de la grieta. También en el interior del cráter, en las paredes internas noroeste y noreste, se encuentran otros dos grupos respectivamente. El quinto grupo lo conforman varias fumarolas que se encuentran en el flanco noroeste del volcán a pocos metros del borde del cráter actual. El promedio de temperatura para todas las fumarolas del interior del cráter es de 90°C y es de 90° a 135°C en las fumarolas laterales, aunque se han observado temperaturas mucho mayores.³⁹

Para la vigilancia del Volcán Puracé, los métodos fundamentales han incluido además, muestreo y análisis de laboratorio (determinación y cuantificación de cationes, aniones e isótopos) los cuales proporcionan información geoquímica detallada del sitio.⁴⁰

³⁹ PULGARÍN, B. Ibid p. 4

⁴⁰ CARDONA, C. DIAGO, J.C. *Informe Interno Ingeominas*. Unidad Operativa Popayán. 1999. p. 1-3

Tabla No. 2 Actividad histórica del Volcán Puracé⁴⁴

FECHA	TIPO DE ERUPCION
1559-1560, 1583	Se habla de la frecuente actividad del volcán
1789	Emisiones de ceniza, actividad fumarólica
1816: Dic. 12; Jun. 29	Explosiones y sismo
1827: Nov. 18	Erupción explosiva del cráter central y lava.
1835: Ene. 23	Erupción explosiva del cráter central
1840	Erupción explosiva del cráter central
1847: Oct. 27	Erupción explosiva del cráter central con destrucción de tierras.
1849: Dic.	Explosión de domo. Es la más fuerte erupción conocida.
1852	Explosiones
1860	Erupción explosiva del cráter central y lava.
1869: Oct. 4; Nov.	Erupción explosiva del cráter central; flujo de lodo.
1870	Erupción explosiva del cráter central
1878: Ago. 31; sep. 11	Erupción explosiva del cráter central
1881	Erupción explosiva del cráter central
1885: May. 25	Erupción explosiva del cráter central con destrucción de tierras y posiblemente muertos.
1899	Erupción explosiva del cráter central
1902	Erupción explosiva del cráter central
1906: Nov. 21	Erupción explosiva del cráter central
1907: Ene. 12	Emisión de cenizas, sismo.
1912?: Oct. 6	Flujos de lava
1914: Ago. 5	Pequeña emisión de ceniza
1919: Ene.	Caída de ceniza en la ciudad de Popayán.
1920: Ene. 5	Ceniza y efectos de onda de choque en Popayán.
1924	Erupción explosiva del cráter central
1925: Oct. 12; nov. 5	Erupción explosiva del cráter central
1926: Ago. – Sep.	Erupción explosiva del cráter central
1927: Oct. 8	Erupción explosiva del cráter central
1936: Ago. 3	Efectos de onda de choque en Popayán.
1939: Sep. 19	Ceniza y sismo
1941: Ago. 12	Ceniza en la ciudad de Popayán.
1944: Feb.	Sismo atribuido a la actividad del volcán
1946: Mar.29;abr.1;may.29y30;Dic. 28	Explosiones y sismos. Erupción explosiva del cráter central.
1947: Abr. 27	Erupción explosiva del cráter central.
1949: May. 26; Jun. 11	Erupción explosiva del cráter central; 16 muertos.
1950: Ene. 10; Jul. 26	Explosiones, emisión de cenizas
1952: May.	Explosiones
1954: May.	Explosión
1955	Cuatro explosiones
1956: Jun. 21	Erupción explosiva del cráter central
1958: Sep. 8	Proyectiles balísticos?, incendios
1977: Mar. 19-28	Erupción explosiva del cráter central

⁴⁴ PULGARÍN B. Op. Cit., p:6.

En la Región Andina de Colombia, en íntima relación con el vulcanismo y los sistemas de fallas geológicas, se registran numerosos manantiales minerales y termales. De estos, 74 fuentes termales han sido caracterizados químicamente y se encuentran asociados a volcanes como el Nevado del Ruiz, Puracé, Galeras, Santa Isabel y Chiles, revelando una amplia diversidad en tipos de aguas y en posibilidades para su aprovechamiento.⁴⁵

Alrededor del Volcán Puracé existe una intensa actividad de fuentes termales, las cuales presentan temperaturas entre 20 – 90° C. La composición y la concentración de los cationes (Al^{+3} , Ca^{2+} , Fe^{+3} , Li^{+} , Mg^{2+} , Mn^{+2} , K^{+} , Rb^{+} , Si^{2+} , Na^{+} y Zn^{2+}), aniones (SO_4^{-} y Cl^{-}) y las propiedades fisicoquímicas (temperatura y pH) de las aguas termales de Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul, Sulfurosa y San Juan, pueden suministrar información importante acerca de los cambios geoquímicos y/o geofísicos que se producen.

6.3 Aplicaciones

6.3.1 Geotermia

Es el estudio de todo fenómeno relacionado con el calor almacenado en el interior de la Tierra. Por lo tanto, se denomina "energía geotérmica" a la energía derivada de este calor, que se produce de forma continua por la desintegración de

⁴⁵ ALFARO, C. *Informe interno Ingeominas*. Unidad Operativa Popayán. P. 3.

los materiales radiactivos existentes en muy pequeñas proporciones en las rocas naturales. El calor se transmite a través del subsuelo y llega a la superficie muy lentamente, por lo que la mayor parte queda almacenado en el interior de la Tierra durante largo tiempo.

De esta forma, a medida que aumenta la profundidad, la temperatura de las rocas es más elevada. A la variación de la temperatura con la profundidad se le denomina "gradiente geotérmico", siendo su valor promedio alrededor de los 30 °C/km. El flujo de calor, o "flujo geotérmico", que produce esta diferencia de temperaturas es muy bajo si se compara con el flujo de energía solar, lo que condiciona fuertemente la utilización de la energía geotérmica.

Los sistemas conectivos de agua subterránea captan dicho calor, alcanzando la superficie a través de rocas porosas o fallas geológicas. Existen lugares que son importantes fuentes de calor en donde se manifiesta la energía geotérmica, ya sea en forma de agua caliente o vapor de agua con altas temperaturas, las cuales pueden ser aprovechadas para la producción de energía eléctrica o para otros usos. En el caso del agua caliente se la puede utilizar para calefacción de viviendas o industrias, tales como: destilación, cultivos de microorganismos, invernadero, etc. El vapor del agua se puede utilizar para mover turbinas que generen electricidad.⁴⁶

⁴⁶ www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/calidad_aguas/pdf/lib43/1_1.pdf

Este recurso natural debería ser explotado en los países en desarrollo, como una alternativa a los sistemas de energía convencionales, basado en el gas y el petróleo.

Las fuentes termales son zonas limitadas de la corteza terrestre, en donde existen flujos anormales de calor que producen el calentamiento de las aguas contenidas en los estratos de rocas permeables. Están cubiertos por una capa rocosa que impide el escape del flujo caliente. Pero a la vez se encuentran zonas de fluidos de calor normal cuya explotación se justifica por estar constituidos por acuíferos.

Los campos geotérmicos de alta temperatura se localizan generalmente en las áreas de vulcanismo reciente relacionadas con las fallas. Los fluidos geotérmicos se desplazan siguiendo fallas, fisuras o cualquier otra zona de alta permeabilidad y, al clasificarlas, se puede inferir la trayectoria que han seguido hasta la superficie, así como los procesos de mezclado y ebullición que pudieron haber experimentado.

La forma más generalizada de explotar esta fuente energética, consiste en extraer el agua caliente o el vapor del agua termal, esta se conduce por redes de calefacción y se vuelve a inyectar, o utilizando turbinas para la generación de electricidad.

La energía geotérmica tiene su principal ventaja, es el bajo impacto ambiental que produce, puesto que su efecto sobre los ecosistemas es mínimo, y tiene rendimientos que le permiten competir con el petróleo. Sus principales desventajas son: las grandes inversiones, la escasez de campos geotérmicos y la ubicación en zonas desfavorables.

6.3.2 Propiedades Medicinales

Desde los tiempos de la antigüedad se empleaban las fuentes termales para la curación y alivio de múltiples enfermedades, en especial afecciones reumáticas, obteniéndose grandes beneficios a pesar del empirismo con que se utilizaban. Actualmente, las aguas termales constituyen un sistema terapéutico que ha adquirido mayor trascendencia.

Las aguas termales contienen diversas sustancias minerales a las que se les atribuyen propiedades medicinales. Estas aguas son uno de los mecanismos naturales que ha encontrado el hombre para hallar su equilibrio con la naturaleza, pues la mayoría de los trastornos que padece se deben a que ignora las leyes de la misma. Sin embargo, detrás de cada dolencia hay causas que deben ser investigadas y orientadas por el médico, además de observar una alimentación sana, un estado de desintoxicación adecuado y controlar los estados que

provocan estrés y conflicto, por esta razón, la utilización de las fuentes termales son una terapia más, para el control de ciertas enfermedades.⁴⁷

Los beneficios de los baños termales están relacionados con el alto contenido de minerales disueltos en las aguas, los fangos que las acompañan y el vapor de agua. Este último puede ser aprovechado a través de las fumarolas, pues proporcionan excelentes baños de vapor, además de las piscinas de inmersión con grandes columnas de vapor sobre la superficie del agua termal.

Diversos autores afirman que los mayores beneficios se logran cuando se combina la terapia de calor en el agua termal de los pozos junto a baños fríos. A esta terapia se le conoce como gimnasia vascular, debido a que el calor dilata los vasos sanguíneos y el frío los contrae. Además, la alta temperatura del agua disminuye la presión sanguínea, hace que la presión cardíaca aumente y los músculos se oxigenan mejor. Por otra parte, este proceso permite la depuración del organismo, dado que provoca la liberación de desechos.

Muchas personas con enfermedades de características inflamatorias se ven beneficiadas por las aguas termales, debido al proceso de depuración del organismo que se logra con esas terapias. Ciertos escritores afirman que, el proceso inflamatorio (como la artritis y la bursitis) genera calor interno, razón por la

⁴⁷ www.producto_ligth.com

cual los fangos que se encuentran en las aguas termales aplicados sobre las zonas afectadas actúan como unos "succionadores" del calor que alivian el dolor.

En cuanto a las dolencias de tipo muscular, las aguas termales disminuyen la rigidez y hacen más fácil la movilización del paciente, para evitar las atrofiaciones musculares.

Es más, el esfuerzo de mover el cuerpo en contra de la resistencia del agua más densa ya es un ejercicio en sí mismo, que no requiere de un fisioterapeuta que ayude al paciente a mover su cuerpo.⁴⁸

En cuanto a los beneficios estéticos que proporcionan las terapias termales, estos se basan en la mencionada depuración del organismo, pues a través de la piel y las mucosas, el cuerpo expulsa toxinas, lo que redundará en suavidad notable de la textura y apariencia de la piel. De hecho, los fangos son excelentes como mascarillas, incluso para casos de acné, psoriasis y diversos tipos de eritema.

Quizá una de las dolencias que más se relaciona con el uso de las aguas termales es el reumatismo. Reumatismo son todas aquellas enfermedades (condicionadas por un factor genético) que afectan al sistema músculo-esquelético y que producen dolor y rigidez en huesos, músculos y articulaciones, hasta llegar al momento de la cronicidad, cuando la enfermedad causa deformidad en sus

⁴⁸ www.aurasalud.com/Ariculos/Art_medica_alternativa/guastermprop.htm

huesos e incapacita al paciente. Las manifestaciones del reumatismo son muy amplias, pues algunas veces ataca a la columna y genera molestias a nivel del cuello, región lumbar y cintura, mientras que en otras oportunidades ataca a las articulaciones periféricas, tales como los dedos, codos, hombros, rodillas, tobillos y pies. A este tipo de dolencias, el calor presente en las aguas termales le ofrece grandes beneficios porque disminuye el dolor y relaja la tensión concentrada en los músculos y las articulaciones.

Químicamente su efecto ocurre cuando el agua entra en contacto con la piel y pasa por ósmosis al torrente sanguíneo. Por experimentos bioquímicos se ha demostrado que algunas de las sustancias que penetran estimulan la hipófisis, que dirige y ordena el funcionamiento de las glándulas endocrinas. Por lo tanto, está comprobado que el tratamiento con las aguas termales activa el funcionamiento de las glándulas tiroideas y de la corteza suprarrenal. Las sustancias que se absorben a través de la piel actúan a nivel neuroendocrino liberando las endorfinas, que son las sustancias que disminuyen el dolor, por lo que el paciente puede disminuir la ingesta de analgésicos.⁴⁹

Las aguas termales pueden ingerirse (denominada “cura Hidropínica”) para tratar cierto tipo afecciones, ya que, si presentan alto contenido de sulfato de sodio o de magnesio se pueden utilizar como purgantes. Por lo tanto, para su ingesta se calcula la cantidad de mililitros que el paciente debe ingerir por día según la

⁴⁹ www.yacurupaj.com.ar/aguas_termales.htm

concentración de esta sal en el agua a ingerir. Si las aguas son clorobicarbonatadas se utilizan a nivel digestivo, son muy recomendadas ingerirlas durante las comidas.

En general, algunas de las enfermedades que pueden ser tratadas con las aguas termales son: enfermedades osteomioarticulares como la artritis subagudas o crónicas, la artrosis, lesiones traumáticas o deportivas, el mal de Parkison, Psoriasis; enfermedades de la piel como: acné, ecsemas, seborreas, micosis; enfermedades respiratorias crónicas tales como: Rinitis alérgicas, asma, entre otras.

Por último, y no por eso menos importante, **MEJORA LA CALIDAD DE VIDA** empleándolas como terapia antiestrés o aplicándolas en Medicina Estética para la pérdida de peso, celulitis, acné, etc.⁵⁰

⁵⁰ www.ambiente_ecologico.com/revist57/apesce57.htm

7. MATERIALES Y METODOS

7.1 Aguas Termales del Volcán Puracé analizadas.

NOMBRE: **Pozo Azul**⁴¹

CARACTERÍSTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN: GEOGRÁFICA: 02° 17,38' Latitud Norte;
76° 28,00' Longitud Occidental.
8.6 km del cráter.

ALTITUD: 3200 msnm

VIA DE ACCESO: inicia desde la ciudad de Popayán, se viaja hasta el municipio de Coconucos, recorriendo 22.7 km; desde el crucero de la Virgen en Coconucos se toma la vía hacia San José de Isnos (Huila), siguiendo hacia la izquierda en el crucero ubicado frente a la sede del Resguardo Indígena de los Coconucos a 2.5 km. Luego se recorren en carro 6.0 km y, hora y media a pie hasta la Hacienda Patugó donde se halla esta fuente termal.

⁴¹ GARZON, G. *et al.* Informe interno Ingeominas. Unidad operativa Popayán. 1997. p. 37-47

TEMPERATURA: 90°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 2,42

CATIONES MAYORES, (ppm): Si^{4+} (100.8); Fe^{3+} (58.2), Na^+ (62.6)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO_4^{2-} (1724); Cl^- (110)

MINERALES DE ALTERACION: Cristobalita, Si amorfa, Alunita, Na-alunita, Caolinita, Anhidrita, Azufre, Opalo.

CLASIFICACION Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^- : Aguas Sulfatadas

CLASIFICACION Na^+ - K^+ - Mg^{2+} : Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Aguas Ácidas Sulfatadas

NOMBRE: **Agua Tibia**⁴²

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 18,38' Latitud Norte;
76° 30,75' Longitud Occidental
12.6 km del cráter.

ALTITUD: 2650 msnm

VIA DE ACCESO: Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Coconucos, recorriendo 22,7 km; desde el cruce de la Virgen en Coconucos se toma la vía hacia San José de Isnos (Huila), y se avanzan 4,6 km hasta el Balneario Agua Tibia. A 0,5 km, dentro de los predios de la Hacienda La Cascada se halla la fuente termal.

TEMPERATURA: 57°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 7.0

CATIONES MAYORES, (ppm): Na⁺(1504.3); Ca²⁺(64.1); K⁺(64); Si⁴⁺(47.9)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(1236); Cl⁻(1372)

MINERALES NO ALTERADOS: Plagioclasa (Labradorita, Albita)

MINERALES DE ALTERACION: Halloysita

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfato-Cloruradas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Parcialmente Equilibradas

CLASIFICACION GENERAL: Mezcla de Aguas Cloruradas y Sulfatadas

⁴² GARZÓN, G. *et al* Ibid. p. 38

NOMBRE: Agua Hirviendo⁴³

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 19,96' Latitud Norte;
76° 29,59' Longitud Occidental
10.8 km del cráter

ALTITUD: 2740 msnm

VIA DE ACCESO: Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Coconucos, recorriendo 22,7 km; desde el cruce de la Virgen en Coconucos se toma la vía izquierda en dirección hacia el Balneario de los Coconucos, recorriendo 4,0 km en carro. La fuente termal alimenta las piscinas de éste Balneario.

TEMPERATURA: 73°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 6.8

CATIONES MAYORES, (ppm): Na⁺(1898.7); K⁺(227.6); Ca²⁺(106.9); Si⁴⁺(50.97)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(2794); Cl⁻(1639)

MINERALES NO ALTERADOS: Plagioclasa (Labradorita)

MINERALES DE ALTERACION: Halloysita, Mg-calcita, Tamarugita

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfato-Cloruradas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Mezcla de Aguas Cloruradas y Sulfatadas

⁴³ GARZÓN, G. *et al.* Ibid. P. 39

NOMBRE: **La Mina**⁴⁴

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 21,45' Latitud Norte;
76° 24,82' Longitud Occidental
5 km del cráter

ALTITUD: 3600 msnm

VIA DE ACCESO: Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Puracé, recorriendo 32,0 km; luego se sigue por la vía hacia La Plata (Huila). A 11,9 km hay un cruce hacia el cráter del Volcán Puracé por donde se debe seguir. A 4,6 km se encuentra la fuente termal La Mina, en predios de la antigua mina de azufre.

TEMPERATURA: 46°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 1.89

CATIONES MAYORES, (ppm): Mg²⁺(302.4); Na⁺(300.7); Ca²⁺(194.71); Al³⁺(119.1); Fe⁺²(47.1)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(2756); Cl⁻(1017)

MINERALES NO ALTERADOS: Plagioclasa (no diferenciado), Hiperstena, Cuarzo

MINERALES DE ALTERACION: Cristobalita, Si amorfa, Tridimita, Na-alunita, Alunita, Azufre, Pirita, Marcasita, Anhidrita

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfatadas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Aguas Ácidas Sulfatadas

NOMBRE: **Pilimbalá**⁴⁵

⁴⁴ GARZÓN, G. *et al.* Ibid. P. 39

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 21,96' Latitud Norte;
76° 24,40' Longitud Occidental
5.4 km del cráter

ALTITUD: 3460 msnm

VIA DE ACCESO: Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Puracé; luego se sigue por la vía hacia La Plata (Huila). A 11,9 km hay un crucero hacia el cráter del Volcán Puracé por donde se debe seguir. A 1,3 km hay otro crucero por donde se cruza hacia la izquierda. La fuente termal Pilimbalá se encuentra a 1,1 km del último crucero.

TEMPERATURA: 27°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 2,34

CATIONES MAYORES, (ppm): Na⁺(115.6); Mg²⁺(121.55); Ca²⁺(84.4); Al³⁺(50.7),
Si⁴⁺(45.9)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(1015); Cl⁻(367)

MINERALES DE ALTERACION: Cristobalita, Si amorfa

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfatadas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Aguas Ácidas Sulfatadas

⁴⁵ GARZÓN, G. *et al.* Ibid. P. 40

NOMBRE: **San Juan**⁴⁶

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 20,57' Latitud Norte;
76° 19,00' Longitud Occidental
9.9 km desde el cráter

ALTITUD: 3320 msnm

VIA DE ACCESO: Ubicada a 3 metros de la fuente termal Sulfurosa. Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Puracé; luego se sigue por la vía hacia La Plata (Huila). A 27,1 km se halla la Caseta de Parques Nacionales hasta donde se llega en carro. Luego se caminan 0,7 km. La fuente termal está ubicada detrás de la Cabaña de Parques Nacionales.

TEMPERATURA: 35°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 4,8

CATIONES MAYORES, (ppm): Ca²⁺(268.3); Mg²⁺(77.24); Na⁺(62.6); Si⁴⁺(55.7)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(6422); Cl⁻(100)

MINERALES NO ALTERADOS: Plagioclasa (Labradorita, Andesina), Augita,
Cuarzo

MINERALES DE ALTERACION: Yeso, Si amorfa, Azufre, Cristobalita, Tridimita

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfatadas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Aguas Ácidas Sulfatadas

⁴⁶ GARZÓN, G. *et al.* Ibid. P. 41

NOMBRE: **Sulfurosa**

CARACTERISTICA: Alta influencia magmática

UBICACIÓN GEOGRÁFICA: 02° 20,57' Latitud Norte;
76° 19,00' Longitud Occidental
9.9 km desde el cráter

ALTITUD: 3320 msnm

VIA DE ACCESO: Ubicada a 3 metros de San Juan. Desde la ciudad de Popayán se viaja hasta el municipio de Puracé; luego se sigue por la vía hacia La Plata (Huila). A 27,1 km se halla la Caseta de Parques Nacionales hasta donde se llega en carro. Luego se caminan 0,7 km. La fuente termal está ubicada detrás de la Cabaña de Parques Nacionales.

TEMPERATURA: 35°C

POTENCIAL DE HIDROGENO, pH: 4,8

CATIONES MAYORES, (ppm): Ca²⁺(265.07); Mg²⁺(71.36); Na⁺(63.6); Si⁴⁺(50)

ANIONES MAYORES, (ppm): SO₄²⁻(1111); Cl⁻(30)

MINERALES NO ALTERADOS: Plagioclasa (Labradorita, Andesina), Augita,
Cuarzo

MINERALES DE ALTERACION: Yeso, Si amorfa, Azufre, Cristobalita, Tridimita

CLASIFICACION Cl⁻ - SO₄²⁻ - HCO₃⁻: Aguas Sulfatadas

CLASIFICACION Na⁺ - K⁺ - Mg²⁺: Aguas Inmaduras

CLASIFICACION GENERAL: Aguas Acidas Sulfatadas

7.2 Análisis Químico

7.2.1 Equipos

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos (temperatura y pH) en las muestras de aguas termales se emplean los siguientes equipos⁴⁷:

- Un pH-metro de campo SCHOTT GERATE, MODELO CG818
- Electrodo SCHOTT GERATE, N32A
- Termómetro de -10 a 110°C , BRAND ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)

Para la determinación de los electrolitos presentes en las aguas termales se utilizan los siguientes equipos:

En el análisis de los cationes (Na, K, Li, Al, Mg, Ca, Fe, etc), se emplea:

- Espectrofotómetro de absorción atómica con atomización a la llama.
- Lámparas de cátodo hueco (Na, K, Li, Ca, etc), INTRALAB
- Compresor de aire, SCHULZ
- Desionizador

⁴⁷ SANCHEZ, I. SAMBONI, N

7.2.2 Materiales y reactivos

- Frascos plásticos de polietileno (300 mL), NALGENE
- Papel filtro de 0.45 μm de tamaño de poro (nitrato de celulosa), MFS
- Aire generado por el compresor, 80psi
- Estándares 1000, 2000 ppm (Na, K, Li, Zn, etc.), MERCK
- Solución de ácido nítrico, 65% Carlo Erba Co

En el análisis de los aniones (SO_4^{2-} , Cl^-) se utiliza:

- Un pHmetro de campo SCHOTT GERATE, MODELO CG818
- Frascos de color ambar de 500 y 1000 mL
- Beaker de 50, 100 y 250 mL
- Balones aforados de 50, 100, 500 y 1000 mL
- Erlenmeyer de 100 y 250 mL
- Probeta de 100 y 250 mL
- Bureta de 100 mL
- Espátula
- Vidrio de reloj
- Pipetas de 1, 5 y 25 mL

Para la determinación de sulfatos se utiliza los siguientes reactivos⁴⁸:

- Ácido Clorhídrico 6 N (aprox. 1:1)
- Agua de bromo. Volumen : 250 ml
- Cloruro de Bario (BaCl) al 10%
- Cloruro de hidrógeno
- Agua desionizada

Para la determinación de cloruros se utiliza los siguientes reactivos

- Acido Nítrico (HNO₃) 5 N
- Solución Indicadora de Cromato de Potasio (K₂CrO₄) al 5%
- Cloruro de Sodio (NaCl) 0.025 N
- Nitrato de Plata (AgNO₃) 0.025 N
- Agua desionizada

7.2.3 Muestreo de aguas termales.

7.2.3.1 Recolección de la muestra.

Para el monitoreo de las aguas termales es esencial obtener muestras verdaderamente representativas y que no sean alteradas en el proceso de recolección, almacenamiento y transporte.

⁴⁸ ALFARO, C. Informe Interno Ingeominas—Unidad operativa Popayán, 1999. p 9

Para este propósito es aconsejable utilizar recipientes de polietileno. Aún si son nuevos, se deben lavar con una solución de ácido nítrico (HNO_3) al 5% y luego enjuagar con agua destilada y desmineralizada.

Para la identificación de las muestras, cada recipiente de muestreo debe tener adjunto una etiqueta impresa que indique: Nombre del volcán, nombre de la fuente y localidad, fecha y hora de recolección y algunos datos tomados *“in situ”* como son: temperatura, pH, caudal, olor, apariencia, conductividad, entre otros.⁴⁹

7.2.3.2 Toma de muestras

Es fundamental la toma de muestras y la preservación de la misma, hasta su posterior análisis en el laboratorio, pues se trata de obtener una muestra representativa del agua a analizar. Para conservar las concentraciones de sus componentes sean los mismos, tanto en el sitio de muestreo como en las muestras recolectadas.

Las muestras se recolectaron mes a mes en los años 1996 y 1999. En los demás años los muestreos se hicieron esporádicamente en las siguientes siete fuentes termales del Volcán Puracé: Pozo Azul, Agua Tibia, Agua Hirviendo, La Mina, Pilimbalá, San Juan y Sulfurosa.

⁴⁹ GARCÍA, F. *Informe interno Ingeominas - Manizales*, 1992. p. 32

En el sitio de muestreo se registraron parámetros fisicoquímicos tales como: pH, temperatura del agua y del ambiente. Las muestras fueron recolectadas en envases plásticos de polietileno.

Los sitios de recolección de muestras fueron seleccionados por INGEOMINAS, los cuales se consideraron representativos para cada una de las fuentes termales (zona de mayor temperatura de la fuente). Las muestras fueron enviadas a los laboratorios de INGEOMINAS – BOGOTA e INGEOMINAS-MANIZALES para la determinación de cationes y aniones presentes en las aguas termales.

7.2.3.3 Almacenamiento y conservación de las muestras.

La preservación de las muestras tiene como finalidad retardar la hidrólisis de los compuestos y complejos químicos, así como la actividad biológica, además de evitar la volatilización de los compuestos.

Una vez tomada la muestra, comienzan los cambios en la concentración de los compuestos y complejos químicos así como de los parámetros fisicoquímicos. Algunos cambios fueron bastante rápidos y otros más lentos, pero pocos parámetros, presentaron estabilidad permanente.

Procedimiento de Almacenamiento y Conservación

Cationes

- Se adiciona 1-2 mililitros de ácido nítrico 65%
- Se mide el pH y se adiciona ácido nítrico hasta alcanzar un pH < 2
- Se envasa la muestra en un frasco de polietileno previamente rotulado y se tapa
- Se refrigera para su posterior transporte y análisis químico.⁵⁰

Aniones

- Se toma la muestra y se filtra a través de una membrana de 0.45 μm de tamaño poro en un sistema de extracción al vacío, en el sitio de muestreo.
- Se envasa la muestra en un frasco de polietileno previamente rotulado y se tapa
- Se refrigera para su posterior transporte y análisis químico.⁵¹

7.2.4 Determinación de los electrolitos presentes en las fuentes termales.

7.2.4.1 Calibración del equipo

El equipo de Absorción atómica se calibró realizando una curva con soluciones

⁵⁰ Ibid, GARCÍA, F. p. 28

⁵¹ Op Cit. ALFARO, C. p 14.

patrón para cada elemento (Na, K, Li, Zn, Ca, Fe, Al, Rb, Mn y Si) a partir de una solución estándar de 1000 ppm, teniendo en cuenta los respectivos parámetros instrumentales (combustible, oxidante, corriente de lámpara y de la llama) y las condiciones de trabajo tales como: longitud de onda (nm), paso de banda y rango de trabajo para cada elemento y un blanco de agua desionizada que equivale a una concentración de 0 ppm.

7.2.4.2 Determinación de Cationes

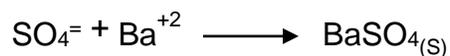
La determinación de los cationes Al^{+3} , Ca^{2+} , Fe^{+3} , Li^{+} , Mg^{2+} , Mn^{+2} , K^{+} , Rb^{+} , Si^{2+} , Na^{+} y Zn^{2+} se realiza de la siguiente formas:

- Se realizan lecturas directamente o efectuando diluciones si son necesarias, utilizando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica de llama teniendo en cuenta los parámetros instrumentales y las condiciones de trabajo anteriormente expuestas.

7.2.4.3 Determinación de Sulfatos

Fundamento teórico de la determinación de sulfatos

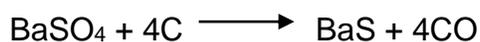
La determinación del anion SO_4^- se lleva a cabo gravimétricamente con BaSO_4 , uno de los precipitados más insolubles que se conocen:



Para obtener resultados satisfactorios en esta determinación, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones experimentales:

- La precipitación del sulfato de bario debe realizarse a la temperatura de ebullición para que la saturación relativa disminuya a medida que aumenta la temperatura. Recuerde que la adición de cloruro de bario a la solución diluida y caliente, elimina la posibilidad de coprecipitación del cloruro.
- Adicionar exceso de BaCl_2 en medio ácido (pH ~2) para prevenir sales de bario poco solubles en soluciones neutras (carbonato, fosfato, cromato, hidróxido). El medio ácido favorece además la formación de cristales grandes más fáciles de filtrar.
- Adicionar una pequeña cantidad de agar-agar para neutralizar el sólido y lograr un precipitado coagulado.

A temperatura superior a 600°C y por acción del carbono del papel de filtro, el sulfato de bario puede sufrir reducción a sulfuro, así:



Para reducir este efecto se carboniza el papel sin que llegue a arder y luego se quema lentamente a temperatura baja con libre acceso de aire.

- Calcinación del sulfato debe efectuarse entre un rango de temperatura entre 600-800°C en un crisol de porcelana o embudos de vidrio con membranas filtrantes.
- Cuando se utilizan los embudos de vidrio, el sólido es secado a 400°C y no se recomienda la adición de agar-agar.

Procedimientos para la determinación de sulfatos

- Se toma 100 mL de muestra en un vaso de precipitados
- Se adiciona 50 mL de agua destilada, se ajusta a un pH entre 4.5 y 5 con HCl 6N usando rojo de metilo (exclusivo para SO_4^{2-}) como indicador hasta que vire a color canela.
- Se añade 2 mL de HCl como exceso. Se calienta la solución hasta ebullición y con agitación ligera.

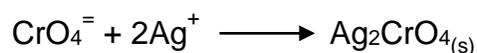
- Se adiciona 0.5 mL de solución de BaCl_2 como exceso. Se calienta el precipitado entre 80 – 90 °C durante 3 horas o dejarlo un día a temperatura ambiente, antes de continuar con el procedimiento.
- Se filtra sobre el papel filtro. En este punto es importante recordar que debe utilizarse un papel filtro que provenga de una caja cuyo contenido mínimo de papeles filtro debe ser de dos, porque el otro papel de filtro debe ser carbonizado sólo, con el fin de restar el peso de las cenizas del papel al peso final de las cenizas (cenizas del precipitado más cenizas del papel)
- Se lava el precipitado con pequeñas porciones de agua destilada caliente hasta que el agua de lavado esté libre de cloruros, los cuales serán detectados por la adición de una gota del reactivo AgNO_3 HNO_3
- Se coloca el papel con precipitado en un crisol. Este crisol debe haberse puesto a peso constante a temperatura de 800 °C.
- Se seca, se quema y se calcina llevando el crisol a la mufla desde que ésta empieza a calentar, cuando la temperatura sea 800 °C deje una hora.
- Se deja enfriar
- Se pesa las cenizas resultantes y a ese peso de les resta el valor del peso de las cenizas del papel filtro solo.

Determinación de cloruros

Fundamento teórico de la determinación de cloruros

Para la determinación de cloruros se utiliza el método directo Mohr, requiere de un indicador que reacciona con la plata en exceso para producir un compuesto coloreado que permite establecer el punto final, mientras que en los métodos indirectos (Volhard) se valora el exceso de plata.⁵²

El método de Mohr, emplea un cromato soluble (K_2CrO_4) como indicador:



Rojo

La diferencia entre los puntos final y de equivalencia se debe a varios efectos combinados. Primero, debe haber una cantidad apreciable de Ag_2CrO_4 antes de que el color rojo sea visible. Segundo, el ión cromato imparte un color amarillento relativamente intenso a las soluciones que poseen la cantidad requerida para que sea posible la coincidencia de los puntos en mención; este color dificulta la observación del momento en que la solución se oscurece por la aparición del color del Ag_2CrO_4 , por lo que aumenta la cantidad de plata (I) necesaria para alcanzar el punto final. Tercero, el precipitado blanco opaco de $AgCl$ produce

⁵² GAVIRIA, L., BRAVO, Y. Universidad Nacional de Colombia, 1983. 54

enmascaramiento sobre el cromato de plata lo que exige una cantidad apreciable de plata(I) para producir el cromato suficiente para superar este efecto. El enmascaramiento producido por el cloruro es simulado en el blanco indicador con carbonato de calcio libre de cloruros.

La concentración de reactante y titulante son un factor importante por cuanto al disminuir su molaridad, aumenta el error en la titulación. Por su parte, el valor del blanco aumenta al disminuir la molaridad de la solución titulante de Ag(I) y al aumentar el volumen en el punto final.

El pH es fundamental para la determinación del punto final en la valoración de Möhr ya que a pHs extremos se presentan reacciones paralelas. Según Dick, J.G.⁵³, el rango óptimo es entre 7 y 10. Gaviria, et al 1993, recomiendan acidular ligeramente soluciones neutras mediante la adición de una gota de ácido acético, para visualizar el punto final. En este documento se recomienda ajustar potenciométricamente el pH a un valor entre 5.8 y 6.2.

En pH ácido ocurren las siguientes reacciones;



La solubilidad de AgHCrO_4 y $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ es mayor que la del cromato de plata así que para titular una solución ácida es necesaria mayor cantidad de plata(I).

Por otra parte, en pH demasiado alcalino ocurre precipitación de óxido de plata, en lugar de cloruro:



El sulfuro, presente en muestras de gases volcánicos, interfiere en la valoración por formación de la sal de plata. Esta es la razón por la cual se debe hacer la determinación sobre muestra previamente oxidada con peróxido. En el caso de aguas termales, se recomienda calentar la muestra hasta ebullición tranquila y exsolución del H_2S disuelto.⁵⁴

Procedimiento de la determinación de cloruros

- Se tomaron 150 mL de muestra de aguas termales y se le adicionan 15 mL de peróxido de hidrógeno para oxidar la muestra
- Se calienta la muestra hasta ebullición y liberación de H_2S , controlando el pH del vapor liberado

⁵³ DICK, J. G. El Manual Moderno. S.A. 1979. p. 520

⁵⁴ Op Cit. ALFARO, C. p. 12

- Se toman 100 mL de la muestra de agua termal problema
- Se añade 3 gotas de disolución de cromato potásico al 5%
- Se titula con nitrato de plata 0,025 N hasta aparición de un precipitado rojizo.

7. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

8.

El numeral 8 corresponde a los Resultados de los Análisis Químicos realizados a las aguas termales de las siguientes fuentes termales: La Mina, Agua Hirviendo, Agua Tibia, Pozo Azul, San Juan, Pilimbalá y Sulfurosa, durante el período de tiempo comprendido entre 1996 y 2000 incluyendo ambos años. Las muestras de aguas termales fueron recolectadas mes a mes durante los años 1996 y 1999. En los demás años (1997, 1998 y 2000) los muestreos se hicieron esporádicamente sin un período de tiempo definido entre determinación y determinación (ver datos de composición electrolítica y algunos parámetros fisicoquímicos en anexo A)

Los resultados corresponde a los siguientes parámetros: concentración de los cationes (Al^{+3} , Ca^{2+} , Fe^{+3} , Li^{+} , Mg^{2+} , Mn^{+2} , K^{+} , Rb^{+} , Si^{4+} , Na^{+} y Zn^{2+}), aniones (SO_4^{-} y Cl^{-}) y las propiedades fisicoquímicas (temperatura y pH) de las aguas termales. Los resultados serán presentados de la siguiente forma: primero aparece el nombre de la tabla correspondiente a un solo parámetro determinado. Los datos presentados en la tabla son los resultados del análisis estadístico de los datos originales tratados y presentados en el anexo A del presente trabajo.

Cada tabla contiene seis columnas y ocho filas. La primera columna corresponde al nombre de la fuente termal; la segunda al número de muestras obtenidas de cada fuente termal durante los cinco años consecutivos estudiados; la tercera

presenta la mediana de los datos del parámetro específico al que hace referencia la tabla; la cuarta es la desviación estándar de dichos datos; la quinta presenta el valor mínimo encontrado y la sexta el valor máximo encontrado entre los datos obtenidos. De esta forma, cada fila se refiere a los datos de una fuente termal diferente.

En el glosario estadístico que se presenta al inicio de este documento se encuentran las definiciones de los términos estadísticos relacionados en estas tablas y gráficos.

Debajo de cada tabla aparece el diagrama de caja correspondiente a los datos presentados en dicha tabla, para un parámetro específico determinado. El diagrama de caja grafica los valores del parámetro estudiado (eje y) versus las fuentes termales (eje x). N corresponde al número de muestras analizadas para cada fuente termal. Cada caja está delimitada por una línea de contorno negra y un interior de color rojo. El tamaño de la caja indica la variabilidad de los datos representada numéricamente en el valor de la DESVIACIÓN ESTÁNDAR que se observa en la tabla anterior. Una caja más grande implica mayor variación en los datos obtenidos a partir de los análisis químicos realizados a las muestras de aguas termales obtenidas durante los cinco años estudiados.

Dentro de cada caja se encuentra una línea horizontal de color negro y mayor grosor que la línea de contorno. Esta línea representa al valor de la MEDIANA de los datos, al cual está numéricamente presentado en la tabla anterior.

De cada uno de los lados superior e inferior de la caja sale una línea vertical que termina en una línea horizontal. A esta línea de color negro, del mismo grosor de la línea de contorno, se le llama ALAMBRE. La longitud del alambre representa los VALORES MÍNIMO Y MÁXIMO que corresponden al punto del eje y donde se ubica la línea.

En algunos casos se presentan VALORES LEJANOS Y ESPORÁDICOS, que salen del común de los valores obtenidos en los análisis químicos realizados a las aguas termales en los cinco años estudiados. Estos valores son representados con círculos ó asteriscos ubicados por fuera de la caja y del alambre. Por lo general indican las concentraciones (o valores de parámetros fisicoquímicos) a las que tiende el agua termal en el futuro o los valores que anteriormente eran más comunes y actualmente, han evolucionado a través del tiempo. Los números que acompañan a estos símbolos (círculos y asteriscos) corresponden a LOS NÚMEROS DE REGISTRO que el programa SPSS de estadística utiliza para enumerar la entrada de los datos.

Las páginas de texto ubicadas antes de cada tabla y gráfica corresponden a la descripción literal de dicha tabla y gráfica.

Después del numeral 8 de Resultados, viene el numeral 9 de Discusión de resultados donde se encuentra la explicación más probable de los resultados obtenidos en el presente trabajo, así como la comparación de estos resultados con los obtenidos por otros investigadores referenciados en la bibliografía.

En el diagrama de cajas de la Gráfica 1, se representa el pH versus el número de datos analizados para cada fuente termal, en el período de tiempo comprendido entre los años 1996 – 2000. Los números que se encuentran fuera de las cajas corresponden a los registros atípicos con respecto al conjunto de datos.

En total se analizaron 185 determinaciones de pH de 7 aguas termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de $\text{pH} = 4.26 \pm 2.02$, con valores mínimos de $\text{pH} = 1.6$ y valores máximos de $\text{pH} = 7.5$ en las fuentes termales de Agua Hirviendo y La Mina. Aunque Agua Tibia también tiene pH alto con un valor de 7.4. El orden descendente de los valores de pHs en las diferentes fuentes termales es Agua Hirviendo, Agua Tibia, Sulfurosa, San Juan, Pozo Azul, Pilimbalá y La Mina.

Los diagramas de cajas para Pozo Azul y San Juan son más grandes comparados con los diagramas de cajas de las otras fuentes termales. La mediana se encuentra representada por una línea que divide a la caja en dos partes, y en las dos fuentes nombradas se encuentra desplazada hacia arriba. Por otro lado, la longitud del alambre no es homogéneo y esto representa la mayor variabilidad de los datos para estas dos fuentes.

En la gráfica se observan 7 cajas que pueden clasificarse en tres grupos. El primero esta conformado por Agua Tibia y Agua Hirviendo, el cual presenta un pH

próximo a 7. Para el caso de Agua Tibia se tomaron 27 datos de pH a través del tiempo, con una mediana de 6.8 ± 0.26 ; observándose como valor mínimo el pH = 6.2 y el máximo pH = 7.4. Fuera de la caja de Agua Tibia se observan tres puntos, el número de registro 84 corresponde al pH = 7.4 y los registros 74 y 77, corresponden a 6.32 y 6.23 respectivamente. En Agua Hirviendo se tomaron 29 datos de pH, con una mediana de 6.99 ± 0.22 . El valor mínimo encontrado es el pH = 6.4 y el máximo pH = 7.5. Se observa un punto muy bajo fuera de la caja con número de registro 47 que equivale a 6.42.

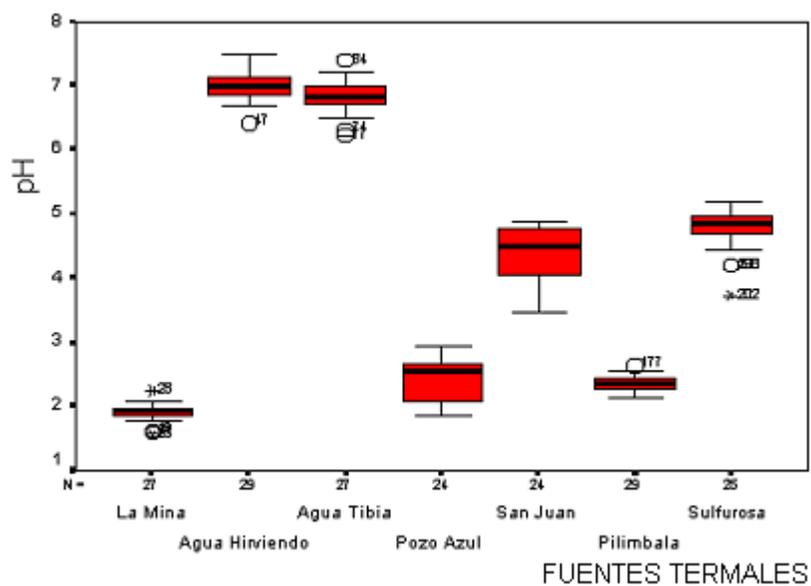
En la tabla No. 3 las fuentes termales de San Juan y Sulfurosa constituyen el segundo grupo con un pH entre 4 y 5 aproximadamente. Para San Juan se tomaron 24 datos de pH, con una mediana de 4.36 ± 0.43 . El valor mínimo es 3.5 y el máximo 4.9. En la fuente Sulfurosa se tomaron 25 datos, la mediana es 4.76 ± 0.33 . El valor mínimo es el pH = 3.7 y el máximo 5.2, se observan fuera de la caja puntos que corresponden a 4.2 y 3.7.

Las fuentes termales de Pozo Azul y Pilimbalá muestran pHs muy ácidos cercanos a 2.5, en este último grupo se incluye la fuente termal La Mina que presenta el pH más ácido, próximo a 2. En Pozo Azul se determinaron 24 datos de pH, obteniéndose una mediana de 2.42 ± 0.32 , el valor mínimo de pH = 1.9 y el máximo pH = 3.0. 29 datos se tomaron para la fuente termal Pilimbalá, con una mediana de 2.34 ± 0.11 , el pH mínimo encontrado es 2.2 y el pH máximo de 2.7. Para el caso de La Mina se tomaron 27 datos con una mediana de pH = $1.89 \pm$

0.14, observándose como valor mínimo el pH = 1.6 y el máximo 2.2. Se observa un punto fuera de la mediana que corresponde a 2.24 según su número de registro.

Tabla No. 3 Datos de pH para las aguas termales del Volcán Puracé

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	27	1,8904	0,1480	1,6	2,2
Agua Hirviendo	29	6,9924	0,2185	6,4	7,5
Agua Tibia	27	6,8259	0,2555	6,2	7,4
Pozo Azul	24	2,4204	0,3242	1,9	3,0
San Juan	24	4,3663	0,4327	3,5	4,9
Pilimbala	29	2,3434	0,1099	2,2	2,7
Sulfurosa	25	4,7548	0,3383	3,7	5,2



Gráfica 1. Diagrama de cajas para el pH de las fuentes termales.

En el diagrama de cajas de la Gráfica 2 se representa la temperatura en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) versus el número de datos analizados para cada fuente termal, entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 202 determinaciones de temperatura de siete aguas termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 51.5, con una desviación estándar de 21.5 y con un mínimo de temperatura de 25°C en Pilimbalá y un máximo de 92°C en Pozo Azul. El orden descendente de las fuentes según su temperatura es: Pozo Azul, Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, San Juan, Sulfurosa y Pilimbalá

La temperatura más alta la tiene Pozo Azul ($T = 92^{\circ}\text{C}$) y la más baja la presenta Pilimbalá ($T = 26^{\circ}\text{C}$). En Pozo Azul se tomaron 30 datos de temperatura, los cuales tienen una mediana de 89.6 ± 0.86 , con un valor mínimo encontrado de 88.4°C y un máximo de 92°C (ver tabla No. 4 y Anexo 1 Fuente termal Pozo azul).

Para Agua Hirviendo se tomaron 29 datos, con una mediana de 72.6 ± 0.59 , observándose como valor mínimo de temperatura 71.5°C y el máximo de 74.1°C .

De acuerdo con la tabla No. 4, en la fuente termal de Agua Tibia, se tomaron 27 datos con una mediana de 56.7 ± 0.4 . La temperatura mínima encontrada es de 55.7°C y la máxima de 57°C .

Para el caso de La Mina se tomaron 27 datos con una mediana de 45.7 ± 0.4 y como valor mínimo de temperatura $44.9 \text{ }^\circ\text{C}$ y el máximo $47 \text{ }^\circ\text{C}$.

En San Juan, muestrearon 30 datos, los cuales presentan una mediana de 33.9 ± 1.1 . La temperatura mínima observada es de $31 \text{ }^\circ\text{C}$ y la máxima es de $35.8 \text{ }^\circ\text{C}$.

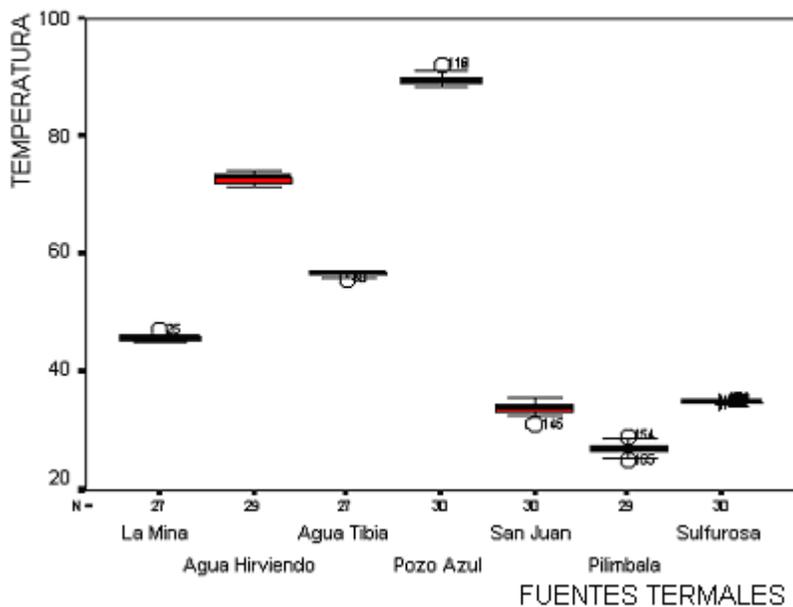
En la fuente termal Sulfurosa se muestrearon 30 datos, con una mediana de 35 ± 0.16 . El valor mínimo de temperatura es de $34.7 \text{ }^\circ\text{C}$ y el máximo es de $35.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Se observa que se encuentra representada por una línea horizontal, lo cual significa que los valores no presentan variabilidad estadística significativa. Esto también se observa en La Mina con una temperatura de aproximadamente $45 \text{ }^\circ\text{C}$ y en Agua Tibia con $57 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pilimbalá es la fuente termal que presenta el valor más bajo de temperatura respecto a las otras fuentes termales, en ella se muestrearon 29 datos con una mediana de 26.8 ± 0.89 y la temperatura mínima observada fue de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y la máxima de $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la gráfica 2., se observan puntos por fuera de los diagramas de cajas para las fuentes termales, los cuales se encuentran muy cercanos al conjunto de datos.

Tabla No. 4 Datos de temperatura para las aguas termales del Volcán Puracé

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	27	45,6852	0,4688	44,9	47,0
Agua Hirviendo	29	72,5828	0,5856	71,5	74,1
Agua Tibia	27	56,6667	0,4123	55,7	57,0
Pozo Azul	30	89,5700	0,8559	88,4	92,0
San Juan	30	33,9167	1,0587	31,0	35,8
Pilimbala	29	26,8862	0,8967	25,0	29,0
Sulfurosa	30	35,0500	0,1614	34,7	35,5



Gráfica 2. Diagrama de cajas para la temperatura de las fuentes termales.

La gráfica 3 representa los valores de silicio (en miligramos por litro) versus el número de datos analizados en cada agua termal en el periodo de tiempo entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 200 muestreos para determinar los miligramos por litro de silicio de siete aguas termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 58.5 ± 21.8 y con una mínima concentración de silicio de 38 mg/L en Pilimbalá y un máximo de 128 mg/L en Pozo Azul. El orden descendente de las concentraciones de silicio en miligramos por litro es: Pozo Azul, La Mina, Agua Hirviendo, San Juan, Sulfurosa, Agua Tibia y Pilimbalá.

San Juan y La Mina tienen valores especiales con respecto a las demás fuentes. En San Juan se encuentra un valor muy alto (200 mg/L de Si) y en La Mina tres valores muy bajos (48, 30 y 5.4 mg/L de Silicio).

Para el caso de Pozo Azul, se realizaron 29 determinaciones, con una mediana de 100.76 ± 11.30 . El valor mínimo encontrado de silicio es de 82 mg/L y el máximo es de 128 mg/L.

Las fuentes termales La Mina, Agua Hirviendo, Agua Tibia, San Juan, Pilimbalá y Sulfurosa presentan diagramas de caja muy similares, ya que las concentraciones de silicio se encuentran alrededor de 50 mg/L. Así, para La Mina se tomaron 28 datos con una mediana de 57.6 ± 12.7 . Un valor mínimo de 5.4 mg/L de silicio y

un máximo de 74 mg/L. Fuera de la caja se encuentran localizados varios puntos los cuales son atípicos del conjunto de datos.

En Agua Hirviendo se analizaron 28 muestras las cuales tienen una mediana de 50.9 ± 3.3 . El valor mínimo de silicio encontrado es de 44 mg/L y el máximo es de 58 mg/L.

En la tabla No. 5 se observa que para Agua Tibia, se analizaron 28 muestreos, como mediana 47.9 ± 3.3 . La concentración mínima de silicio es 40 mg/L y la máxima es de 60 mg/L.

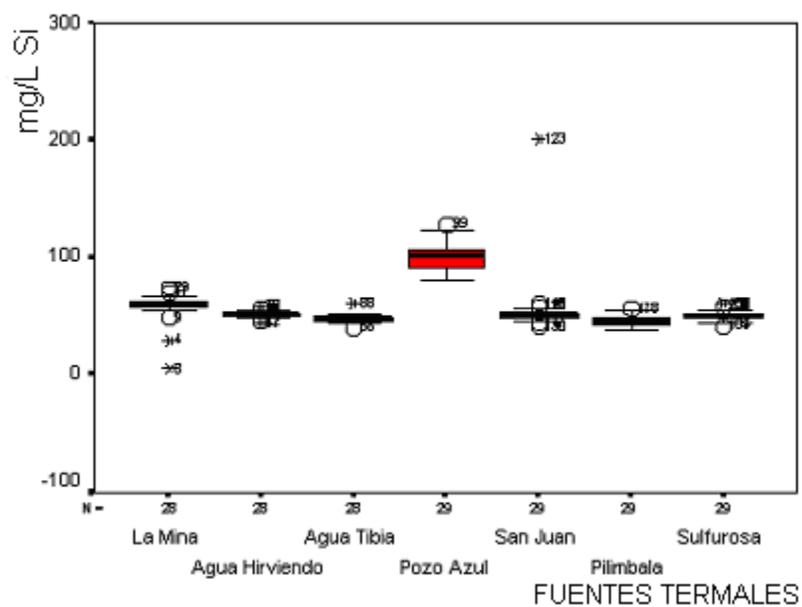
En San Juan, se analizaron 29 muestras, dando como mediana 55.7 ± 28 . La concentración mínima de silicio es de 41 mg/L y la máxima es 200 mg/L

En la fuente termal Pilimbalá se analizaron 29 muestras teniendo una mediana de 45.9 ± 4.6 . La concentración mínima de silicio es 38 mg/L y la máxima de 56 mg/L.

En Sulfurosa se muestrearon en 29 ocasiones, se encontró que la mediana es 50 ± 4.1 . El valor mínimo de silicio encontrado es 42 m/L y el máximo es 60 mg/L.

Tabla No. 5 Datos de silicio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	57,6643	12,7248	5,4	74
Agua Hirviendo	28	50,9714	3,2921	44	58
Agua Tibia	28	47,9857	3,3007	40	60
Pozo Azul	29	100,7586	11,3031	82	128
San Juan	29	55,6897	28,0295	41	200
Pilimbalá	29	45,8621	4,5960	38	56
Sulfurosa	29	50,0000	4,1662	42	60



Gráfica 3. Diagrama de cajas para silicio de las fuentes termales (mg/L).

En la Gráfica 4 se representa los datos obtenidos de aluminio (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 192 muestras para determinar los miligramos por litro de aluminio de las fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 28.2 ± 42.6 y con una mínima cantidad de aluminio de 0.01 mg/L en Agua Hirviendo y Agua Tibia y un máximo de 150 mg/L en La Mina. El orden descendente de la concentración de aluminio en miligramos por litro es: La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul, Agua Tibia, Agua Hirviendo, San Juan y Sulfurosa.

Se observan algunos valores que se encuentran fuera de las cajas para las fuentes termales Agua Tibia, San Juan, Pilimbalá y La Mina presenta valores muy notorios con respecto a los otros de las demás fuentes.

Para el caso de La Mina, se realizaron 28 determinaciones, con una mediana de 119.1 ± 21.4 . El valor mínimo encontrado de aluminio es de 54 mg/L y el máximo es de 154 mg/L.

En la fuente termal Pilimbalá se analizaron 29 muestras con una mediana de 50 ± 13.5 . El valor mínimo de aluminio es 34 mg/L y el valor máximo es 92 mg/L.

Para Pozo Azul se determinó 29 datos, la mediana es 17.08 ± 4.3 . La concentración mínima encontrada es 11 mg/L y la máxima 25 mg/L.

En la gráfica 4 se observa que entre las fuentes termales Agua Hirviendo, Agua Tibia, San Juan y Sulfurosa se observa una gran similitud en la forma de las cajas y que se encuentran situadas, muy cercanas a cero. De acuerdo a la tabla No. 6, para Agua Hirviendo se tomaron 26 muestras con una mediana de 0.83 ± 0.6 . El valor mínimo observado es 0.01 mg/L de aluminio y el máximo es 2.0 mg/L de aluminio.

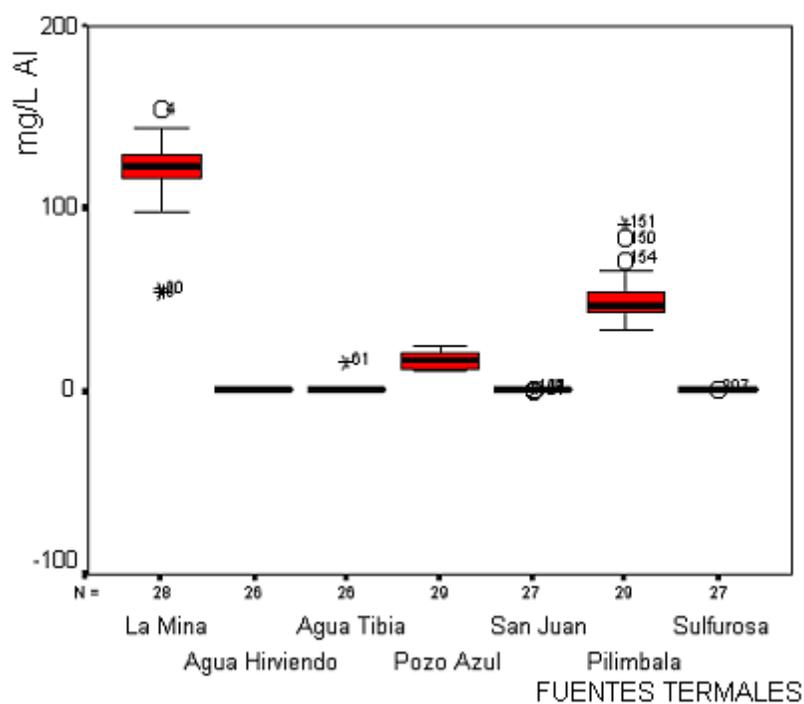
Para Agua Tibia, se determinaron 26 datos, la mediana es de 1.35 ± 3.0 . El valor mínimo de aluminio es 0.01 mg/L y el máximo es de 16 mg/L.

En San Juan, se tomaron 27 datos, la mediana es 1.08 ± 0.45 . El valor mínimo de aluminio es de 0.4 mg/L y el máximo es 2.0 mg/L.

Para el caso de Sulfurosa se muestrearon 27 datos, se encontró que la mediana es 0.85 ± 0.46 . El valor mínimo de aluminio encontrado es 0.10 mg/L y el máximo es 2.0 mg/L.

Tabla No. 6 Datos de aluminio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	119,1214	21,3687	54	154
Agua Hirviendo	26	0,8354	0,6028	0,01	2,0
Agua Tibia	26	1,3469	3,0337	0,01	16
Pozo Azul	29	17,0828	4,3400	11	25
San Juan	27	1,0815	0,4541	0,40	2,0
Pilimbalá	29	50,7034	13,4788	34	92
Sulfurosa	27	0,8519	0,4644	0,10	2,0



Gráfica 4. Diagrama de cajas para aluminio de las fuentes termales (mg/L)

En el diagrama de cajas de la Gráfica 5, se representa los datos obtenidos para el hierro (en miligramos por litro) versus el número de datos analizados para cada fuente termal, en el período de tiempo comprendido entre los años 1996 – 2000.

En total se realizaron 196 determinaciones de miligramos por litro de hierro de las aguas termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 19.1 ± 25.1 , con un mínimo de 0.01 mg/L en San Juan y un máximo de 95 mg/L en Pozo Azul. El orden descendente de las concentraciones de hierro en miligramos por litro es: Pozo Azul, La Mina, Pilimbalá, Agua Hirviendo, Agua Tibia, San Juan y Sulfurosa.

Para la fuente termal Pozo Azul se analizaron 29 muestras obteniendo una mediana de 58.2 ± 24.5 . Una concentración mínima encontrada en miligramos por litro de hierro de 34 y una máxima de 160. El tamaño de la caja y de los alambres es mayor para la fuente termal Pozo Azul y esto indica que la variabilidad del conjunto de datos es mayor comparada con los datos de las otras fuentes.

En La Mina se tomaron 28 datos, la mediana hallada es de 47.1 ± 8.4 . El valor mínimo en miligramos por litro de hierro es 27 y el máximo es 74.

Para el caso de Pilimbalá se tomaron 29 datos en mg/L de hierro a través del tiempo, con una mediana de 22.6 ± 2.4 observándose como valor mínimo el 18 mg/L de hierro y el máximo 28 mg/L de hierro.

En la gráfica 5 se observa que las fuentes termales de Agua Hirviendo Agua Tibia, San Juan y Sulfurosa contienen una concentración de hierro muy cercana a cero. La tabla No. 7 indica que para Agua Hirviendo se tomaron 28 datos en miligramos por litro de hierro, con una mediana de 0.52 y una desviación estándar de 0.65. El valor mínimo encontrado es 0.10 mg/L y el máximo es 3.2 mg/L.

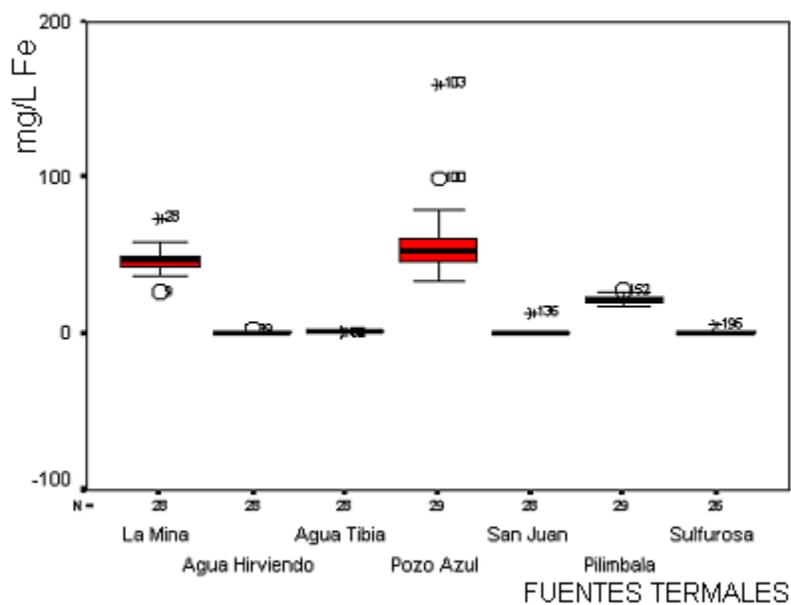
En el caso de Agua Tibia se determinó 28 valores con una mediana de 0.95 ± 0.24 . El valor mínimo es 0.20 mg/L de hierro y el máximo es 1.4 mg/L.

La fuente termal de San Juan muestra valores muy pequeños de hierro, muy cercanos a cero. Se determinaron 28 datos, la mediana tiene un valor de 0.88 ± 2.6 . El valor mínimo de hierro encontrado es 0.01 mg/L y el máximo 14 mg/L.

Para el caso de Sulfurosa se tomaron 26 datos en este tiempo. La mediana de los datos de mg/L de hierro es 0.6 ± 1.16 , observándose como valor mínimo 0.10 mg/L de hierro y el máximo 6.0 mg/L de hierro.

Tabla No. 7 Datos de hierro para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	47,1071	8,3768	27	74
Agua Hirviendo	28	0,5268	0,6459	0,10	3,2
Agua Tibia	28	0,9429	0,2395	0,20	1,4
Pozo Azul	29	58,1655	24,5369	34	160
San Juan	28	0,8789	2,5945	0,01	14
Pilimbalá	29	22,6207	2,4414	18	28
Sulfurosa	26	0,5846	1,1633	0,10	6,0



Gráfica 5. Diagrama de cajas para hierro de las fuentes termales (mg/L)

La Gráfica 6, representa la cantidad de calcio (en miligramos por litro de calcio) versus el número de datos analizados para cada fuente termal, en un período de tiempo comprendido entre los años 1996 – 2000.

En total se analizaron 200 muestras determinándoles en miligramos por litro el calcio de las 7 aguas termales del Volcán Puracé, las cuales presentaron una mediana 144.2 ± 100.3 , con un mínimo de 13 mg/L de calcio en Pozo Azul y un máximo 372 mg/L de calcio en San Juan.

En la gráfica 6 se observa el diagrama de caja de la fuente termal San Juan, donde se tomaron 29 datos. La mediana de los datos de miligramos por litro de calcio fue 268.3 ± 61.1 . El valor mínimo observado es 254 mg/L de calcio y el máximo 330 mg/L de calcio.

La tabla No. 8 muestra que para el caso de Sulfurosa se analizaron 29 muestras en miligramos por litro de calcio a través del tiempo, con una mediana de 265.07 ± 69.7 observándose como valor mínimo 250 mg/L de calcio y el máximo 330 mg/L de calcio.

Para los diagramas de cajas de las fuentes termales de San Juan y Sulfurosa se observan valores que se salen del conjunto de datos, en San Juan se observan cuatro puntos que corresponden a 342, 200, 190 y 2.94 mg/L de calcio y en

Sulfurosa tres puntos 336, 40.1 y 10 mg/L de calcio, esto significa que no existe homogeneidad en los datos, de ahí que el tamaño de las cajas sea grande.

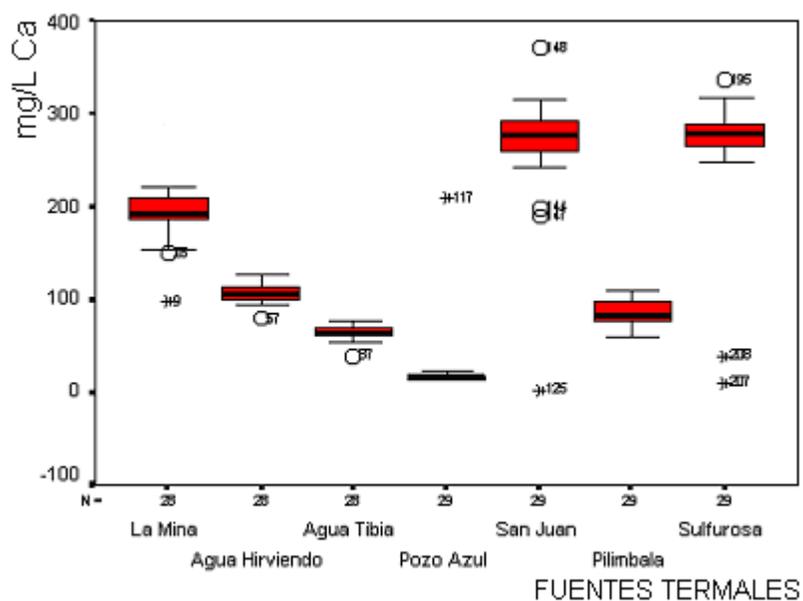
De acuerdo a la tabla No. 8, en la fuente termal La Mina se analizaron 28 muestras en miligramos por litro de calcio, la mediana encontrada tiene un valor de 194.7 ± 31.6 . El valor mínimo es 150 mg/L de calcio y el máximo 230 mg/L de calcio. Se observan 3 puntos fuera del diagrama de caja, el primero equivale a 296 mg/L de calcio y los dos últimos a 150 y 98 mg/L de calcio.

En Agua Hirviendo se tomaron 28 datos, la mediana es 106.9 ± 9.8 . El valor mínimo hallado es 90 mg/L de calcio y el máximo 126 mg/L de calcio. Para la fuente termal Agua Tibia se analizaron 28 muestras de miligramos por litro de calcio, obteniéndose una mediana de 64.1 ± 7 . El valor mínimo de miligramos por litro de calcio hallado es 50 y el máximo 76.

29 muestreos se realizaron para la fuente termal Pilimbalá, con una mediana de 85.4 ± 12.97 . La cantidad en miligramos por litro de calcio mínima encontrada es 60 y la máxima 110. Para el caso de Pozo Azul se tomaron 29 datos en ese periodo de tiempo. La mediana de los datos fue de 22.9 ± 36.08 , observándose como valor mínimo 13 mg/L de calcio y el máximo 22 mg/L. De acuerdo con la gráfica 6, existe un punto fuera del diagrama de caja con un número de registro de 117 que equivale a 210 mg/L de calcio, el cual se encuentra muy alejado del grupo de datos.

Tabla No. 8 Datos de calcio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	194,7143	31,5734	98,0	296
Agua Hirviendo	28	106,9429	9,8479	80,0	126
Agua Tibia	28	64,1071	7,0097	40,0	76,0
Pozo Azul	29	22,8517	36,0797	13,0	210
San Juan	29	268,2738	61,1198	2,94	372
Pilimbalá	29	85,4069	12,9742	60,0	110
Sulfurosa	29	265,0724	69,7646	10,0	336



Gráfica 6. Diagrama de cajas para calcio de las fuentes termales (mg/L)

En la Gráfica 7 se representa la concentración de magnesio (en miligramos por litro) versus el número de datos analizados para cada fuente termal entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 200 datos de concentración de magnesio de siete aguas termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 88.3 ± 104.9 y con una concentración mínima de 3.9 mg/L en Pozo Azul y un máximo de 350 mg/L en La Mina. El orden descendente de la concentración de magnesio en miligramos por litro en las siete fuentes termales es: La Mina, Pilimbalá, San Juan, Sulfurosa, Agua Hirviendo, Agua Tibia y Pozo Azul.

En La Mina se analizaron 28 muestras de concentración en miligramos por litro de magnesio en este período de tiempo. En la tabla No. 9 se observa que la mediana de los datos fue de 302.4 ± 98.2 . El valor mínimo encontrado es 144 mg/L de magnesio y el máximo es de 370 mg/L de magnesio. Se observa un punto que se encuentra muy alejado del diagrama de caja, equivale a 760 mg/L de magnesio.

Para Pilimbalá se analizaron 29 muestras, con una mediana de 121.6 ± 46 , observándose como valor mínimo de miligramos por litro de magnesio 89 y el máximo de 190. Se observan dos puntos muy alejados del diagrama de caja que corresponden a 230 y 240 mg/L de magnesio.

En la fuente termal de San Juan, se tomaron 29 datos con una mediana de 77.2 ± 44 . La concentración mínima de magnesio encontrada es de 54 mg/L y la máxima de 150 mg/L.

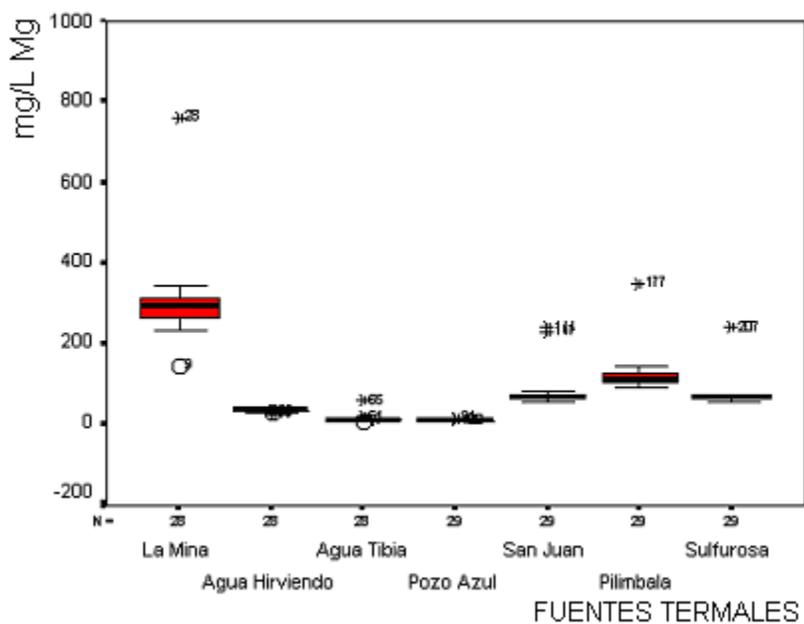
En la tabla No. 9, para fuente termal Sulfurosa se analizaron 29 muestras con una mediana de 71.4 ± 32.8 . La concentración mínima de magnesio encontrada es de 55 mg/L y la máxima de 72.5. En la gráfica 7, se observa un punto localizado fuera del diagrama de caja que equivale a 240 mg/L. Los diagramas de caja de San Juan y Sulfurosa son muy similares en la forma de las cajas y en donde se encuentran situadas.

Para el caso de Agua Hirviendo se analizaron 28 muestras, la mediana es de 32.2 ± 2.9 y el valor mínimo observado es de 25 mg/L de magnesio y el máximo 37 mg/L de magnesio.

En Agua Tibia y Pozo Azul, fueron muestreados 28 y 29 datos, los cuales presentan una mediana de 10.4 ± 9.5 y 5.8 ± 1.99 respectivamente. El valor mínimo en miligramos por litro de magnesio encontrados es 5.5 y el máximo 58 para Agua Tibia, y para Pozo Azul el valor mínimo es 3.9 y el máximo 14.6. Los diagramas de cajas son muy similares para las dos fuentes termales, se encuentra representadas por una línea horizontal lo cual significa que los datos son muy homogéneos, aunque se observan algunos puntos fuera de los diagramas de cajas, pero estos no se encuentran muy alejados.

Tabla No. 9 Datos de magnesio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	302,4286	98,1531	144	760
Agua Hirviendo	28	32,2429	2,9359	25,0	37,0
Agua Tibia	28	10,3750	9,5243	5,50	58,0
Pozo Azul	29	5,7862	1,9896	3,90	14,6
San Juan	29	77,2483	44,0150	54,0	240
Pilimbalá	29	121,5517	46,0082	89,0	350
Sulfurosa	29	71,3552	32,7833	55,0	240



Gráfica 7. Diagrama de cajas para magnesio de las fuentes termales (mg/L)

En los diagramas de caja de la Gráfica 8, se representa la concentración de sodio (en miligramos por litro) versus el número de datos analizados para cada fuente termal entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 200 datos de concentración de sodio en las siete aguas termales analizadas del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 556.2 ± 762.2 y una concentración mínima de 12 mg/L en Pozo Azul mientras una concentración máxima de 3000 mg/L en Agua Hirviendo. El orden decreciente de la concentración de sodio en miligramos por litro en las siete aguas termales es: Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, San Juan, Sulfurosa y Pozo Azul.

Agua Hirviendo y Agua Tibia son las fuentes que presentan una mayor concentración de sodio, aproximadamente entre 1000 y 3000 mg/L. El tamaño de los diagramas de cajas es grande comparada con las cajas de las demás fuentes, por lo tanto la variabilidad en estos grupos de datos es mayor.

En Agua Hirviendo se analizaron 28 muestras de concentración, en miligramos por litro de sodio. La mediana de los datos fue de 1898.7 ± 530.7 . El valor mínimo encontrado es 1110 mg/L de sodio y el máximo de 3000 mg/L de sodio.

Para Agua Tibia se tomaron 28 datos, con una mediana de 1504.3 ± 295.1 , observándose como valor mínimo de miligramos por litro de sodio 922 y el máximo de 2034.

En la fuente termal de La Mina, se tomaron 28 datos con una mediana de 300.7 ± 35 , la concentración mínima de sodio encontrada es de 156 mg/L y la máxima de 350 mg/L.

Para el caso de Pilimbalá se tomaron 29 datos, la mediana es de 115.6 ± 14.8 y el valor mínimo observado es de 87 mg/L de sodio y el máximo de 156 mg/L de sodio.

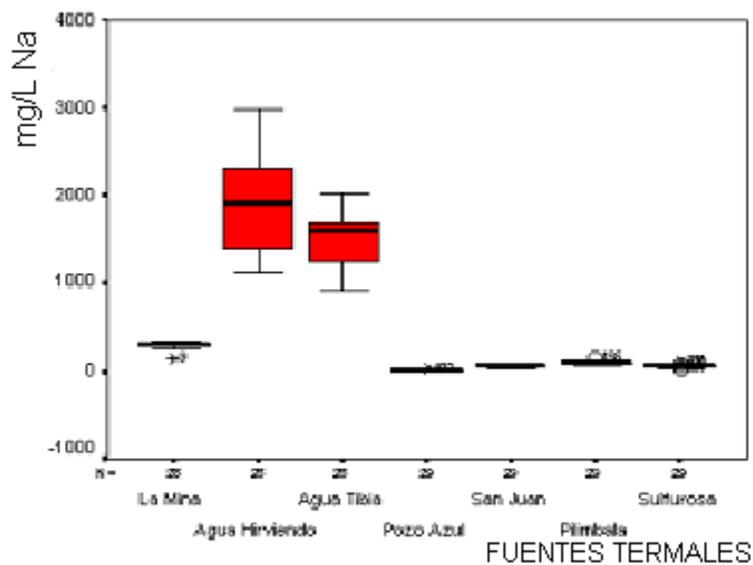
En Sulfurosa se tomaron 29 datos, la mediana hallada fue de 62.6 ± 14.3 . El valor mínimo encontrado en miligramos por litro de sodio es de 46 mg/L y el máximo 74 mg/L. 29 datos se tomaron para San Juan, la mediana fue de 115.6 ± 14.8 . La concentración de sodio mínima es 87 mg/L y la máxima de 156 mg/L.

En Pozo Azul, fueron muestreados 29 datos, los cuales presentan una mediana de 18.1 ± 5.2 . El valor mínimo en miligramos por litro de sodio encontrados es 12 y el máximo de 40.

En la gráfica 8 se observan que los diagramas de cajas son muy similares para las tres fuentes termales Sulfurosa, San Juan y Pozo Azul, porque los tres se encuentran representadas por una línea horizontal, lo que significa que los datos son muy homogéneos. Aunque se observan algunos puntos fuera de los diagramas de cajas, estos se encuentran muy cercanos a la horizontal.

Tabla No. 10 Datos de sodio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	300,7143	34,9972	156	350
Agua Hirviendo	28	1898,7143	530,7312	1110	3000
Agua Tibia	28	1504,3214	295,1142	922	2034
Pozo Azul	29	18,1241	5,2105	12,0	40,0
San Juan	29	62,6172	7,4219	46,0	74,0
Pilimbalá	29	115,6000	14,8318	87,0	156
Sulfurosa	29	63,6138	14,3271	44,0	118



Gráfica 8. Diagrama de cajas para sodio de las fuentes termales (mg/L)

En los diagramas de caja de la Gráfica 9, se representa la concentración de potasio (en miligramos por litro) versus el número de datos analizados para cada fuente termal entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 200 datos de concentración de potasio en siete aguas termales del Volcán Puracé, la mediana hallada es de 60.5 ± 73.8 y la concentración mínima encontrada es de 2 mg/L de potasio en Pozo Azul y la máxima es de 293 mg/L de potasio en Agua Hirviendo. El orden decreciente de la concentración de potasio en miligramos por litro en las siete aguas de las fuentes termales es: Agua Hirviendo, La Mina, Agua Tibia, Pilimbalá, San Juan, Sulfurosa y Pozo Azul.

En Agua Hirviendo se analizaron 28 muestras de concentración en miligramos por litro de potasio. La mediana de los datos fue de 227.6 ± 24.9 . El valor mínimo encontrado es 190 mg/L de potasio y el máximo de 268 mg/L. Se observa un punto fuera del diagrama de caja que corresponde a 293 mg/L de potasio.

Para La Mina se tomaron 28 datos, con una mediana de 72.2 ± 22.6 , el valor mínimo es 32.4 mg/L y el máximo 90 mg/L de potasio. Se observa un punto situado fuera del diagrama de caja que corresponde a 176 mg/L de potasio.

En Agua Tibia se analizaron 64 muestras, con una mediana de 64 ± 6.9 observándose como valor mínimo es 54 mg/L de potasio y el máximo de 84 mg/L.

En la fuente termal de Pilimbalá, se tomaron 29 datos con una mediana de 34.3 ± 24.7 . La concentración mínima de potasio encontrada es de 18 mg/L y la máxima de 39 mg/L. Se observan dos puntos fuera del diagrama de cajas, los cuales tienen un número de registro de 151 y 157 que corresponde a 132 mg/L de potasio y 110 mg/L de potasio respectivamente.

En la tabla No. 11, se observa que para el caso de San Juan se tomaron 29 datos, la mediana es de 12 ± 6.1 y el valor mínimo observado es de 8 mg/L de potasio y el máximo 38.8 mg/L de potasio.

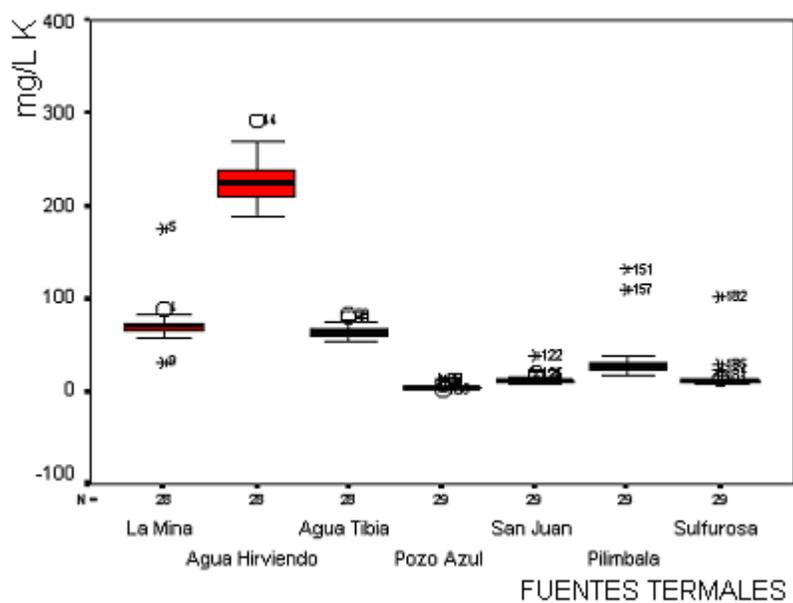
En Sulfurosa se tomaron 29 datos, la mediana hallada fue de 14.5 ± 17.5 . El valor mínimo encontrado en miligramos por litro de potasio es para Sulfurosa 8 mg/L y el máximo 18 mg/L. La gráfica 9, muestra algunos puntos localizados fuera del diagrama de caja que equivalen a 102 mg/L, 29.6 mg/L y 24.4 mg/L de potasio.

29 datos se tomaron para Pozo azul, la mediana fue de 4.9 ± 2.5 . La concentración de potasio mínima es 2 mg/L y la máxima 13.6 mg/L

Los diagramas de cajas son muy similares para las fuentes termales San Juan, Sulfurosa y Pozo Azul, porque las tres se encuentran representadas por una línea horizontal lo cual significa que los datos no presentan una gran variabilidad, a pesar de observarse algunos puntos fuera de los diagramas de cajas.

Tabla No. 11 Datos de potasio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	72,2179	22,5767	32,4	176
Agua Hirviendo	28	227,6071	24,9493	190	293
Agua Tibia	28	64,0071	6,8781	54,0	84,0
Pozo Azul	29	4,8938	2,4527	2,00	13,6
San Juan	29	12,1062	6,1284	8,00	38,8
Pilimbalá	29	34,2517	24,6943	18,0	132
Sulfurosa	29	14,4617	17,5186	8,00	102



Gráfica 9. Diagrama de cajas para potasio de las fuentes termales (mg/L)

En la Gráfica 10 se representa los datos obtenidos de manganeso (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 200 muestras de las fuentes termales del Volcán Puracé, las cuales presentaron una mediana de 4.1 ± 12.1 y con una mínima cantidad de manganeso de 0.01 mg/L en Pozo Azul y Sulfurosa, la cantidad máxima de manganeso es 7.0 mg/L en Pilimbalá. El orden decreciente de la concentración de manganeso en miligramos por litro es: La Mina, Pilimbalá, Agua Hirviendo, San Juan, Sulfurosa, Pozo Azul, Agua Tibia.

Para el caso de La Mina, se realizaron 28 determinaciones, con una mediana de 14.65 ± 3.09 . El valor mínimo encontrado de manganeso para la Mina es de 6 mg/L y el máximo es de 19 mg/L.

En la fuente termal Pilimbalá, se tomaron 29 datos, la mediana es 5.38 ± 0.99 . La concentración mínimo de manganeso es de 2.6 mg/L y la máxima es 7.0 mg/L.

En la fuente termal Agua Hirviendo se determinó 28 datos, la mediana es 4.4 ± 0.63 . El valor mínimo de manganeso observado es 2.5 mg/L y el valor máximo es 5.3 mg/L.

En San Juan se analizaron 29 muestras, con una mediana de 2.11 ± 0.4 . La concentración mínima de manganeso halla es de 1.2 mg/L y la máxima 3.0 mg/L.

Para Sulfurosa se analizaron 29 muestras, la mediana encontrada es 2.1 ± 0.6 . La cantidad mínima hallada en miligramos por litro de manganeso es 0.01 y la máxima 3.

En la gráfica 10, las fuentes termales Agua Tibia y Pozo Azul se observa una gran similitud en la forma de las cajas y en el lugar donde se encuentran situadas, puesto que están muy cercanas a cero. Además se observan varios puntos fuera pero se encuentran muy próximos a la caja.

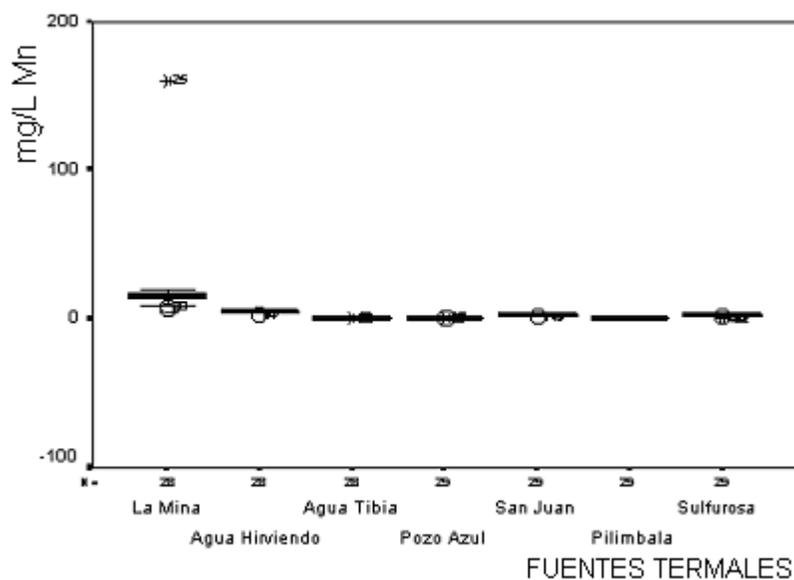
Para Agua Tibia se tomaron 28 datos con una mediana de 0.2 ± 0.08 , el valor mínimo observado es 0.1 mg/L de manganeso y el máximo es 0.6 mg/L de manganeso.

En Pozo Azul, se analizaron 29 muestras, la mediana es de 0.3 ± 0.2 . El valor mínimo de manganeso es 0.01 mg/L y el máximo es de 0.9 mg/L.

Tabla No.12 Datos de manganeso para las aguas termales del Volcán Puracé

(mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	14.65	3.091	6,00	19
Agua Hirviendo	28	4,3957	0,6340	2,50	5,30
Agua Tibia	28	0,2164	0.08828	0,10	0,60
Pozo Azul	29	0,3162	0,1564	0,01	0,90
San Juan	29	2,1148	0,4176	1,20	3,00
Pilimbalá	29	5.3800	0.9865	2.6	7.0
Sulfurosa	29	2,1031	0,5656	0,01	3,00



Gráfica 10. Diagrama de cajas para manganeso de las fuentes termales (mg/L)

La Gráfica 11 representa la concentración obtenida para Litio (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales, durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000.

En total se realizaron 183 determinaciones de miligramos por litro de litio de las siete fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 1.83 ± 2.8 y con una mínima cantidad de manganeso de 0.01 mg/L en Pozo Azul, San Juan, Pilimbalá y Sulfurosa y una máxima de 8.6 mg/L en Agua Hirviendo. El orden decreciente de la concentración de litio en miligramos por litro es: Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul, San Juan y Sulfurosa.

En la gráfica 11, se observan algunos valores que se encuentran fuera de las cajas para las fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia los cuales son más bajos comparados con el conjunto de datos de las dos fuentes.

Para el caso de Agua Hirviendo, se realizaron 28 determinaciones, la mediana fue de 7.4 ± 1.6 . El valor mínimo encontrado de litio es de 0.9 mg/L y el máximo es de 8.6 mg/L. Se observan 3 puntos con números de registro 56, 55 y 43 que corresponden a 6.3 , 3.8 y 0.9 mg/L de litio.

En la fuente termal Agua Tibia se determinó 28 datos, la mediana es 3.7 ± 0.8 . El valor mínimo de litio encontrado es 0.3 mg/L y el valor máximo es 4.2 mg/L.

Se observan dos puntos fuera del diagrama de caja que corresponden a 1.93 mg/L y 0.3 mg/L de litio.

En las fuentes termales Pozo Azul San Juan, Pilimbalá y Sulfurosa se observa una gran similitud en la forma de las cajas y en que se encuentran muy cercanas a cero. Para Pozo Azul se tomaron 23 datos con una mediana de 0.054 ± 0.045 . El valor mínimo observado es 0.01 mg/L de litio y el máximo es 0.1 mg/L de litio.

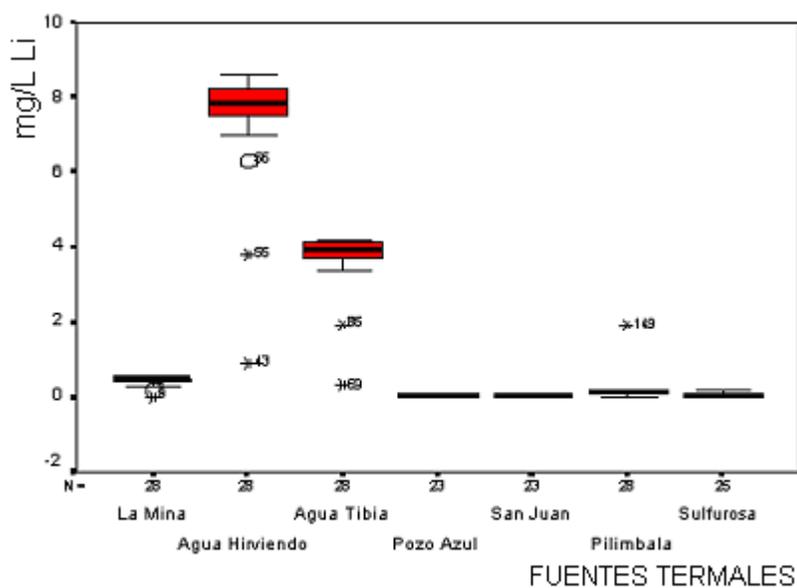
La tabla No. 13 muestra que para San Juan, se determinaron 23 datos, la mediana es de 0.051 ± 0.042 . El valor mínimo de litio es 0.01 mg/L y el máximo es de 0.1 mg/L.

En Pilimbalá, se tomaron 28 datos, la mediana es 0.2 ± 0.06 . El valor mínimo de litio es de 0.01 mg/L y el máximo es 0.2 mg/L.

Para el caso de Sulfurosa se muestrearon 25 datos, se encontró que la mediana es 0.06 ± 0.05 . La concentración mínima de litio encontrada es 0.10 mg/L y la máxima es 0.20 mg/L.

Tabla No. 13 Datos de litio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	28	0,4375	0,1177	0,01	0,60
Agua Hirviendo	28	7,4293	1,5718	0,90	8,6
Agua Tibia	28	3,7339	0,8086	0,30	4,2
Pozo Azul	23	0.0539	0.0452	0,01	0,10
San Juan	23	0.0522	0.04166	0,01	0,10
Pilimbalá	28	0,2025	0,05798	0,01	0.2
Sulfurosa	25	0.0608	0.05115	0,01	0,20



Gráfica 11. Diagrama de cajas para litio de las fuentes termales (mg/L)

La Gráfica 12 representa las concentraciones obtenidas de zinc (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000.

En total se realizaron 190 determinaciones de miligramos por litro de zinc de las siete fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 0.37 ± 0.43 y una mínima cantidad de zinc de 0.01 mg/L en Agua Hirviendo, Agua Tibia, San Juan y Sulfurosa y un máximo de 1.8 mg/L en La Mina. El orden descendente de la concentración de zinc en miligramos por litro es: La Mina, Pilimbalá, Pozo Azul, Agua Hirviendo, Agua Tibia, San Juan y Sulfurosa,.

Para el caso de La Mina, se realizaron 27 determinaciones, con una mediana de 1.2 ± 0.28 . El valor mínimo encontrado de zinc es de 0.4 mg/L y el máximo es de 1.8 mg/L. Cuatro puntos se encuentran fuera del diagrama de caja, corresponde a las siguientes determinaciones 1.8 mg/L, 0.66 mg/L, 0.62 mg/L, 0.4 mg/L de zinc. En la fuente termal Pilimbalá se determinaron 29 datos, la mediana es 0.51 ± 0.17 . El valor mínimo de zinc es 0.25 mg/L y el valor máximo es 0.9 mg/L. Se observa un punto fuera de la caja según el número de registro corresponde a 1.0 mg/L

Las fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia se observa una gran similitud en las cajas en que se encuentran muy cercanas a cero. Para Agua Hirviendo se tomaron 26 datos con una mediana de 0.23 ± 0.48 . El valor mínimo observado es

0.01 mg/L de zinc y el máximo es 0.3 mg/L de zinc. Dos determinaciones se encuentra por encima del conjunto de datos 2.4 y 1 mg/L, estos son valores altos comparados con los demás.

En la tabla No. 14 se observa que para Agua Tibia, se determinaron 27 datos, la mediana es de 0.14 ± 0.16 . La concentración mínima de zinc es 0.01 mg/L y la máxima es de 0.2 mg/L. La gráfica 12 indica que Agua Tibia presenta cuatro puntos por encima del diagrama de caja, los cuales corresponden a los siguientes valores 0.7, 0.5, 0.3, y 0.26 mg/L

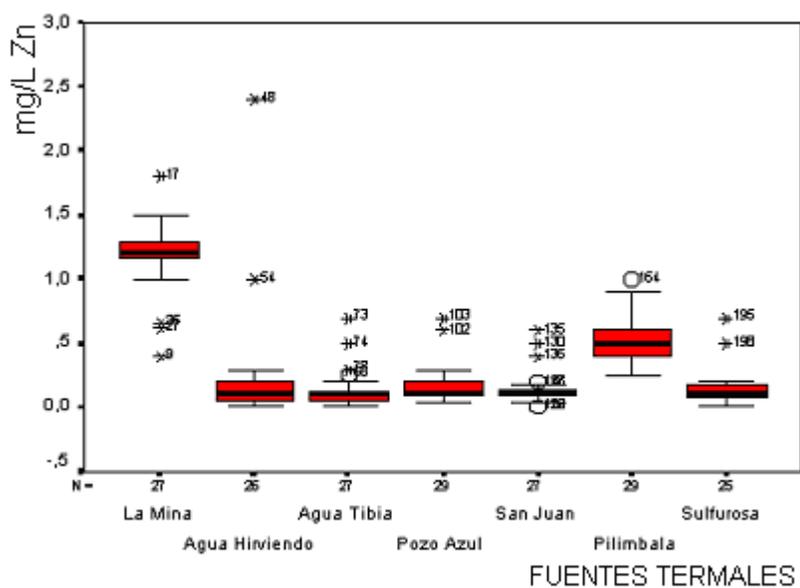
Para el caso de Pozo Azul se tomaron 29 datos, la mediana es 0.17 ± 0.15 . El valor mínimo de zinc es 0.04 mg/L y el máximo es 0.3 mg/L. 102 y 103 son el número de registro de dos puntos que se encuentran situados fuera del diagrama de caja, los cuales corresponden 0.6 y 0.7 mg/L de zinc.

Para San Juan se tomaron 27 datos con una mediana de 0.14 ± 0.14 . El valor mínimo es 0.01 mg/L y el máximo 0.2 mg/L. San Juan tiene 3 puntos notorios fuera de la caja, que equivale a 0.6, 0.5 y 0.4 mg/L de zinc.

Para Sulfurosa se tomaron 25 datos con una mediana de 0.15 ± 0.17 . La concentración mínima para Sulfurosa es 0.01 mg/L y la máxima 0.1 mg/L. Sulfurosa tiene dos puntos fuera del diagrama de cajas corresponden a los valores 0.7 y 0.5 mg/L de zinc

Tabla No. 14 Datos de zinc para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	27	1,1919	0,2770	0,40	1,8
Agua Hirviendo	26	0,2338	0,4808	0,01	2,4
Agua Tibia	27	0,1378	0,1537	0,01	0,70
Pozo Azul	29	0,1697	0,1480	0,04	0,70
San Juan	27	0,1437	0,1408	0,01	0,60
Pilimbalá	29	0,5110	0,1702	0,25	1,0
Sulfurosa	25	0,1524	0,1692	0,01	0,70



Gráfica 12. Diagrama de cajas para zinc de las fuentes termales (mg/L)

En los diagramas de cajas de la Gráfica 13, se representa las concentraciones obtenidas de cloro (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 151 determinaciones de miligramos por litro de cloro de seis fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 766.5 ± 636.2 y una mínima cantidad de cloro 29 mg/L en San Juan y Sulfurosa y un máximo de 1755 mg/L en Agua Hirviendo. El orden descendente de la concentración en miligramos por litro de cloro es: Agua Hirviendo, Agua Tibia, La Mina, Pilimbalá, San Juan y Sulfurosa.

En la fuente termal Agua hirviendo se tomaron 26 datos con una mediana de 1639.30 ± 47.5 . el valor mínimo observado es 1578 mg/L y el máximo es 1755 mg/L de cloro.

En Agua Tibia, se determinaron 26 datos, la mediana es 1371.5 ± 44.8 . La concentración mínima de cloro es 1255 mg/L y la máxima es de 1458 mg/L.

Para el caso de La Mina, se realizaron 26 determinaciones, con una mediana de 1017.42 ± 52.03 . El valor mínimo encontrado de cloro es 926 mg/L y el máximo es de 1129 mg/L.

La tabla No. 15 muestra que en la fuente termal Pilimbalá se determinaron 26 datos, la mediana es 366.5 ± 29.5 . El valor mínimo de cloro es 292 mg/L y el valor máximo es 414 mg/L.

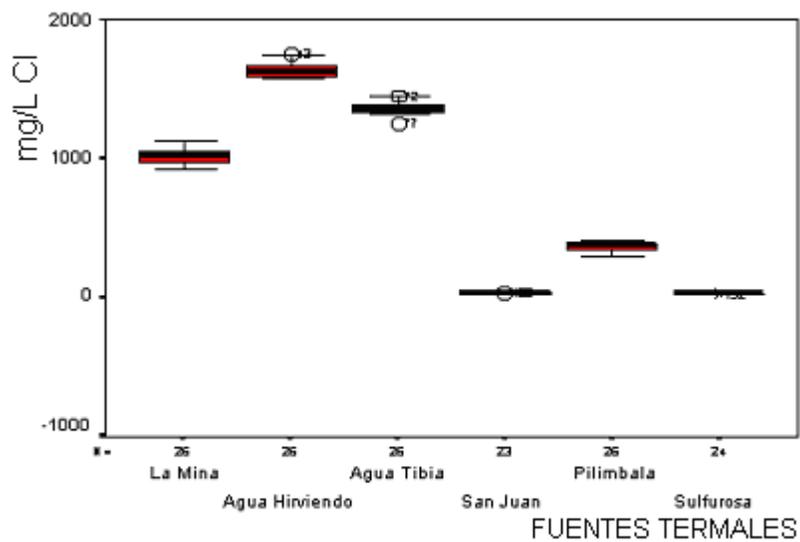
Para el caso de San Juan se tomaron 23 datos, la mediana es 32.39 ± 3.64 . El valor mínimo de cloro es 29 mg/L y el máximo es 41 mg/L.

Para Sulfurosa se tomaron 24 datos con una mediana de 30.62 ± 1.13 . El valor mínimo es 29 mg/L y el máximo 35 mg/L de cloro.

En la gráfica 13 se observa que los diagramas de cajas para San Juan y Sulfurosa son muy similares en la forma de la caja y en el lugar donde se encuentran situadas, en ellas se observan dos puntos muy cercanos a la caja.

Tabla No. 15 Datos de cloro para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	26	1017,4231	52,0309	926	1129
Agua Hirviendo	26	1639,3077	47,4812	1578	1755
Agua Tibia	26	1371,5000	44,7591	1255	1458
Pozo Azul	-	-	-	-	-
San Juan	23	32,3913	3,6399	29	41
Pilimbalá	26	366,4615	29,4608	292	414
Sulfurosa	24	30,6250	1,1349	29	35



Gráfica 13. Diagrama de cajas para cloro de las fuentes termales (mg/L)

La Gráfica 14 se representa las concentraciones obtenidas de sulfatos (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 180 muestras determinadas en miligramos por litro de sulfato de las siete fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 1294.4 ± 1062.2 y una mínima concentración de sulfato de 295 mg/L en Pozo Azul y un máximo de 3013 mg/L en La Mina. El orden descendente de la concentración de sulfatos en miligramos por litro es: La Mina, Agua Hirviendo, Agua Tibia, Pilimbalá, San Juan y Sulfurosa.

Para el caso de La Mina, se realizaron 25 determinaciones, con una mediana de 2756.3 ± 174.78 . El valor mínimo encontrado de sulfato es 2458 mg/L y el máximo es de 3013 mg/L. Un punto se encuentra fuera del diagrama de caja, corresponde a 2314 mg/L de sulfato.

Para Agua Hirviendo se tomaron 27 datos con una mediana de 2793.5 ± 131.05 . El valor mínimo observado es 2546 mg/L de sulfato y el máximo es 3011 mg/L de sulfato.

En Agua Tibia, se determinaron 27 datos, la mediana es de 1236.5 ± 99.1 . La concentración mínima de sulfato es 1111 mg/L y la máxima es 1715 mg/L

La tabla No. 16, indica que en la fuente termal Pilimbalá se determinaron 26 datos, la mediana es 1014.7 ± 227.9 . El valor mínimo de sulfato es 794 mg/L y el valor máximo es 1308 mg/L. En la gráfica 14, se observa un punto fuera de la caja según el número de registro corresponde a 115 mg/L

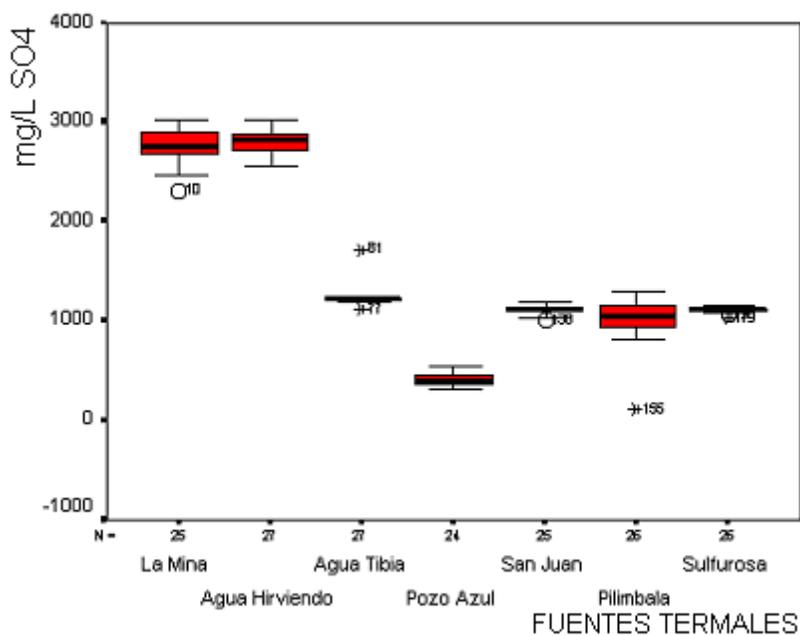
En Sulfurosa se determinaron 26 datos con una mediana de 1110.9 ± 28.8 , el valor mínimo de sulfato encontrado es 1024 mg/L y el máximo es 1156 mg/L.

Para San Juan se tomaron 25 datos con una mediana de 0.067 ± 0.045 . El valor mínimo es 1001 mg/L y el máximo 1189 mg/L.

En Pozo azul se determinaron 24 datos con una mediana de \pm El valor mínimo encontrado es 295 mg/L de sulfato y el máximo 500 mg/L de sulfato.

Tabla No. 16 Datos de sulfatos para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	25	2756,3200	174,7240	2314,00	3013,00
Agua Hirviendo	27	2793,4815	131,0562	2546,00	3011,00
Agua Tibia	27	1236,4815	99,1259	1111,00	1715,00
Pozo Azul	24	395,23	15,6	295,00	500,00
San Juan	25	1115,03	221,2	1001,00	1189,00
Pilimbalá	26	1014,6923	227,9096	115,00	1308,00
Sulfurosa	26	1110,9231	28,7610	1024,00	1156,00



Gráfica 14. Diagrama de cajas para sulfatos de las aguas termales (mg/L)

La Gráfica 15 representa las concentraciones obtenidas de rubidio (en miligramos por litro) versus el número de datos de cada una de las fuentes termales durante el periodo de tiempo entre los años 1996 y 2000.

En total se analizaron 174 determinaciones en miligramos por litro de rubidio de las siete fuentes termales del Volcán Puracé, los cuales presentaron una mediana de 1.35 ± 2.2 y una mínima cantidad de rubidio de 0.01 mg/L en Pozo Azul, San Juan, Pilimbalá y Sulfurosa, y un máximo de 11 mg/L en Agua Hirviendo. El orden descendente de la concentración de rubidio en miligramos por litro es: Agua Hirviendo, La Mina, Pilimbalá, Agua Tibia, Pozo Azul, San Juan y Sulfurosa.

En la fuente termal Agua Hirviendo se determinaron 26 datos, la mediana es 1.88 ± 2.63 . El valor mínimo de rubidio es 0.10 mg/L y el valor máximo es 1.2 mg/L. Se observan tres puntos fuera de la caja según sus números de registros corresponden a 11, 8.22 y 7.3 mg/L de rubidio.

En La Mina se tomaron 25 datos con una mediana de 0.33 ± 0.12 . El valor mínimo observado es 0.01 mg/L de rubidio y el máximo es 0.5 mg/L de rubidio.

En Agua Tibia, se determinaron 26 datos, la mediana es de 0.6 ± 0.9 . La concentración mínima de rubidio es 0.14 mg/L y la máxima es de 0.4 mg/L.

Para el caso de Pilimbalá, se realizaron 29 determinaciones, con una mediana de 0.16 ± 0.57 . El valor mínimo encontrado de rubidio es de 0.01 mg/L y el máximo es de 0.2 mg/L.

En la gráfica 15, Agua Tibia presenta dos puntos por encima del diagrama de caja, los cuales corresponden a los siguientes valores 4.0 y 3.8 mg/L de rubidio.

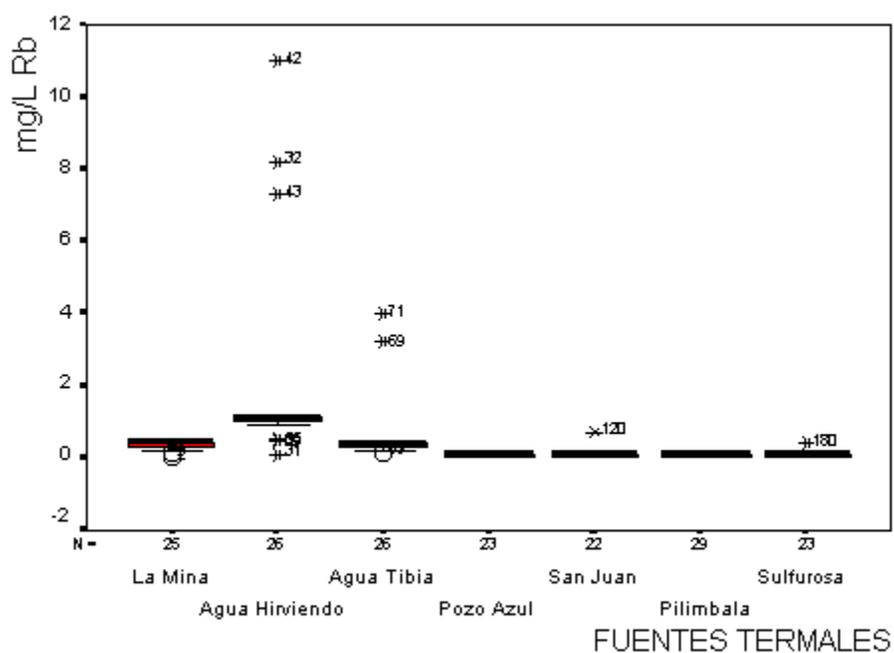
En la tabla No. 17, se observa que para el caso de Pozo Azul se tomaron 23 datos, la mediana es 0.08 ± 0.06 . El valor mínimo de rubidio es 0.01 mg/L y el máximo es 0.20 mg/L.

Para San Juan se tomaron 22 datos con una mediana de 0.09 ± 0.15 . El valor mínimo es 0.01 mg/L y el máximo 0.72 mg/L.

En la Sulfurosa se tomaron 23 datos con una mediana de 0.08 ± 0.08 . La concentración mínima para Sulfurosa es 0.01 mg/L y la máxima 0.40 mg/L.

Tabla No. 17 Datos de rubidio para las aguas termales del Volcán Puracé (mg/L)

FUENTE	NUMERO DE DATOS (N)	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTANDAR	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
La Mina	25	0,3364	0,1167	0,01	0,50
Agua Hirviendo	26	1,8846	2,6312	0,10	11
Agua Tibia	26	0,5815	0,8993	0,14	4,0
Pozo Azul	23	0.0804	0.05481	0,01	0,20
San Juan	22	0.08909	0,1472	0,01	0,72
Pilimbalá	29	0.1614	0.5700	0.01	0.20
Sulfurosa	23	0.0787	0.08165	0,01	0,40



Gráfica 15. Diagrama de cajas para rubidio de las fuentes termales (mg/L)

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se discutirá los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado a los datos de las concentraciones electrolíticas y los parámetros fisicoquímicos de las aguas termales del Volcán Puracé, que se encuentran representados en los diagramas de caja de las gráficas del No. 1 hasta el No. 15, durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1996 y 2000. El estudio de las concentraciones de los electrolitos presentes en las diferentes fuentes de aguas termales del Volcán Puracé puede interpretarse, con sus debidas restricciones, con el fin de sugerir la posibilidad de asociaciones entre los minerales componentes, la fuente, la distancia de transporte y su modificación durante el mismo, así como las propiedades de la roca huésped. Por lo tanto, el análisis de las asociaciones compatibles e incompatibles entre las variables analizadas constituye la clave para hipotetizar acerca de la comprensión de la génesis de los electrolitos constituyentes.⁵⁵

De acuerdo a la concentración de los iones, estas siete aguas termales se pueden clasificar en cuatro grupos:

⁵⁵ VALENTINO, G.M. *et al*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 91 (2-4) (1999) p. 329-344.

Grupo I: fuentes termales de La Mina y Pilimbalá

Grupo II: fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia

Grupo III: fuentes termales San Juan y Sulfurosa

Grupo IV: fuente termal Pozo Azul

GRUPO I: La Mina y Pilimbalá

La tabla No. 18 compara las concentraciones de los iones presentes en las fuentes termales La Mina y Pilimbalá expresados en miligramos por litro, además de los valores de pH y temperatura.

Se evidencia que en las fuentes termales La Mina y Pilimbalá se presentan los pHs más bajos (1.89 y 2.34 respectivamente) con respecto a las demás fuentes. Pilimbalá presenta la temperatura más baja debido a que puede estar recibiendo descargas de aguas ya sea superficiales o lluvias.

Para este primer grupo, las concentraciones de los iones por lo general son las más altas en comparación con los otros grupos, las concentraciones de los iones Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Zn^{+2} , y SO_4^{2-} son variables, mientras que los iones Si^{+2} , Fe^{+2} , Na^{+} , K^{+} , Mn^{+2} , Li^{+} , Rb^{+} y Cl^{-} son constantes a través del tiempo. Las concentraciones de los electrolitos en las dos aguas termales tienen un comportamiento menos paralelo que en los otros casos, sin embargo la mayor diferencia se encuentra en las concentraciones de los aniones Cl^{-} y SO_4^{2-} , donde La Mina presenta valores altos mientras Pilimbalá presenta valores medios comparadas con las demás

fuentes termales. Pilimbalá tiene una concentración de sulfatos similar a San Juan, Sulfurosa y Agua Tibia sin embargo su concentración es más variables que estas a través del tiempo.

En todos los casos de análisis La Mina presenta concentraciones de iones superiores que Pilimbalá.

Las aguas de las fuentes termales de Pilimbalá y La Mina presentan las máximas concentraciones de aluminio, magnesio, manganeso y zinc, respecto a las demás fuentes termales. Además, son ricas en calcio y cloruro. Por su parte, La Mina es muy rica en hierro.

Tabla No. 18 Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales La Mina y Pilimbalá (Mediana \pm Desviación estándar)

PARÁMETROS	LA MINA	PILIMBALÁ	ESTABILIDAD LA MINA	ESTABILIDAD PILIMBALA
pH	1,89 \pm 0,14	2,34 \pm 0,11	Muy bajo, constante	Muy bajo, constante
T °C	45,69 \pm 0,46	26,8 \pm 0,89	Bajo, Constante	Bajo, Constante
Si ²⁺	57,66 \pm 12,72	45,86 \pm 3,3	Bajo, Constante	Bajo, Constante
Al ³⁺	119,12 \pm 21,37	50,7 \pm 13,5	Alto, variable	Mediano, Variable
Fe ²⁺	47,1 \pm 8,37	22,62 \pm 2,4	Mediano, constante	Mediano, constante
Ca ²⁺	194,7 \pm 31,6	85,4 \pm 12,97	Alto, variable	Mediano, Variable
Mg ²⁺	302,4 \pm 98,2	121,55 \pm 46	Alto, variable	Mediano, Variable
Na ⁺	300,7 \pm 34,99	115,6 \pm 14,8	Bajo, constante	Bajo, Constante
K ⁺	72,2 \pm 22,6	34,3 \pm 24,7	Mediano, constante	Bajo, Constante
Mn ²⁺	19,9 \pm 27,6	5,38 \pm 0,98	Mediano, constante	Bajo, Constante
Li ⁺	0,44 \pm 0,11	0,20 \pm 0,34	Bajo, constante	Bajo, Constante
Zn ²⁺	1,19 \pm 0,27	0,51 \pm 0,17	Alto, variable	Mediano, Variable
Rb ⁺	0,33 \pm 0,11	0.16 \pm 0,57	Bajo, constante	Bajo, Constante
Cl ⁻	1017,4 \pm 52,03	366,5 \pm 29,5	Alto, constante	Mediano, Constante
SO ₄ ²⁻	2753,3 \pm 174,7	1014,7 \pm 227,9	Alto, variable	Mediano, Variable

Iones (mg/L) y temperatura T (°C)

Alto: El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores más altos y la caja está ubicada por encima de los demás.

Mediano: El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los altos y por encima de los bajos.

Bajo: : El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los medianos y por encima de los muy bajos.

Muy bajos: : El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los bajos y de todos los demás.

Estabilidad: Grado de variabilidad de los datos representada en el tamaño de las cajas que a su vez corresponde a la desviación estándar de los datos.

Constante: La altura de la caja está en el 50% de las cajas más bajas incluyendo las que correspondan a una línea horizontal.

Variable: la altura de la caja está en el 50% de las cajas más altas (Cajas más grandes de color rojo).

La fuente termal La Mina contiene iones como Al^{+3} , Ca^{+2} , Zn^{+2} y Mg^{+2} en altas concentraciones. Generalmente, dichos metales están presentes en las rocas y en el magma precursor en forma de trazas, ya sea como microinclusiones de sulfuros magmáticos o como parte de la red cristalina, excepto cuando son retenidos por el fluido hidrotermal.⁵⁶

Las aguas de las fuentes termales de Pilimbalá, y La Mina presentan los pHs más ácidos (2.3 y 1.89 respectivamente) comparados con las demás aguas termales, de acuerdo con la gráfica 1. Al entrar en contacto con la roca huésped, estas aguas termales ácidas originan una serie de reacciones de alteración, formando minerales que son producto de su reacción progresiva con la roca. El pH varía en un rango que genera una serie de minerales colocados unos sobre otros, a distintos rangos de pH.⁵⁷

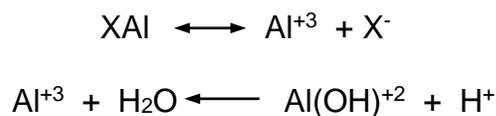
En la fuente termal La Mina, por interacción de las aguas ácidas con la roca huésped se consume H^+ producido por el intercambio de cationes de la roca. El fluido ácido inicial cambia a un fluido básico enriquecido en cationes, ya que el ataque ácido de minerales formadores de roca libera cuarzo, Al^{+3} , Na^+ , K^+ , etc.,⁵⁸ tal como se observa en las gráficas 4, 8 y 9.

⁵⁶ DELMELLE, P. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 31-53.

⁵⁷ ALFARO, C. *Informe interno Ingeominas – Unidad Operativa de Popayán*, 1999, p 1 – 4.

⁵⁸ AIUPPA, A. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98 (1-4) (2000) p. 189-207.

El aluminio es uno de los principales elementos que causan acidez y esto se puede observar en La Mina, que presenta el menor pH (gráfica 1) y la mayor concentración de aluminio (gráfica 4). Según BRUSCA L *et al*⁵⁹, las reacciones de hidrólisis entre el aluminio y la roca precursora podrían plantearse de la siguiente forma:



La alta acidez de la Mina y Pilimbalá facilitan el transporte de iones como Fe y Al desde la roca huésped hasta el acuífero permitiendo ser detectados.

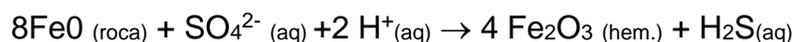
9.1. Reducción de fluidos hidrotermales magmáticos

De acuerdo con BARTON, PB *et al*⁶⁴, el magma contiene una alta razón inicial de SO₂ sobre sulfatos, sulfuros y azufre nativo. Durante la alteración del fluido por la interacción con la roca, los sulfitos (SO₂) magmáticos son reducidos a sulfuros (S⁼), a medida que Fe⁺² (ferroso) en la roca es oxidado a Fe⁺³ (férrico), que precipita en otro tipo de minerales como la hematita, la epidota y/o la magnetita. Tal reducción de sulfatos es probablemente la fuente principal de sulfuros en muchos de los sistemas hidrotermales, como se puede observar en la gráfica 14. Esto es debido a que los procesos de reducción ocurren en toda roca

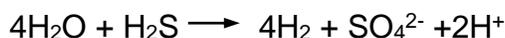
⁵⁹ BRUSCA. Op. Cit., p. 200.

⁶⁴ BARTON, P. B. *et al. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, segunda ed., Huber L. Barnes, Wiley Interscience Publication, p 278-403.

que contenga Fe^{+2} y que reaccione con aguas sulfatadas, como las que presenta las fuentes termales de La Mina, Pilimbalá, además de San Juan y Pozo Azul. La reacción más probable de reducción de los sulfatos y oxidación del hierro es la siguiente:



Según BARTON, PB *et al*⁶⁰, el ácido sulfhídrico generado en esta reacción permanece en parte en el fluido hidrotermal, pero principalmente precipita en minerales como pirita y sulfuros de metales base presentes en la fuente termal La Mina. La reducción de sulfato, así como el descenso de la razón sulfato/sulfuro, normalmente provoca reacciones redox que generan hidrógeno y metano como sigue:



En caso de ebullición de fluido, H_2 y CH_4 contribuirían a la reducción de especies en la fase de vapor. Cabe mencionar que la reducción del sulfato puede provocar la disolución de la anhidrita presente en la fuente termal La Mina.

⁶⁰ Ibid., p: 206

Según FYFE, WS⁶¹, las temperaturas y las presiones elevadas tienen un efecto importante sobre la concentración de los electrolitos. Por ejemplo, los electrolitos como NaCl e incluso los ácidos fuertes como el HCl, están fuertemente asociados a temperaturas superiores a 250°C. Por otro lado, a 20°C, el NaCl tiende a disociarse en Na⁺ y Cl⁻, diez veces más que a 370°C, esta situación posiblemente ocurra en la fuente termal Pilimbalá que presenta una temperatura de 26.8 ± 0.89 °C, según la gráfica 2, y esto está directamente relacionado con los cambios dieléctricos del agua en función de la temperatura.

9.2 Transporte de Metales y Complejos de Relevancia

La importancia de los complejos metálicos transportados en los fluidos hidrotermales puede ser evaluada en términos de la teoría donante-captor de electrones de los ácidos y las bases de Lewis. De esta forma, los complejos metálicos pueden ser clasificados como de tipo duro o de tipo blando. Los metales duros (cadores) como por ejemplo Na, K, Li, Ca, Mg, Fe, Al, forman los complejos más estables con ligandos duros (donadores de electrones) como CO₃²⁻ y SO₄²⁻. Donantes y cadores duros están caracterizados por tener gran carga y/o radio pequeño (alta razón carga/radio). Por lo tanto, mientras más duro es el donante y el captor, más electroestático será el enlace de la interacción duro-duro.⁶²

⁶¹ FYFE, W.S. Introducción a la geoquímica. Barcelona – España: Editorial Reverté S.A. 1981 p. 118

⁶² AIUPPA. A. Et al. Op.cit. p.190

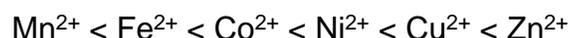
Con los haluros, los metales duros forman complejos cuya estabilidad está en la siguiente secuencia $F \gg Cl > Br > I$. Por ejemplo, Fe^{+3} forma un complejo estable con el ión duro F (FeF^{2+}), el cual es alrededor de cuatro ordenes de magnitud más estable que el complejo formado con el ion. El SO_4^{2-} es también un ion duro, formando complejos estables, por ejemplo con Fe^{+2} ($FeSO_4$)⁶³. En las aguas termales del Volcán Puracé se presentan las mayores concentraciones de hierro en Pozo Azul (58.17 ± 24.54 mg/L) y La Mina (47.11 ± 8.38 mg/L) debido al pH tan ácido que presentan, esto hace que la solubilidad de este ión sea mayor. De acuerdo con la gráfica 5, los sulfatos se encuentran en mayores concentraciones en La Mina (2756.32 ± 174.72 mg/L) y Agua Hirviendo (2793.48 ± 131.06 mg/L), de acuerdo con la gráfica 14.

Sin embargo, es necesario tener precaución cuando se emplea esta clasificación duro-blando, porque depende del ambiente y la solubilidad en el agua a temperaturas $< 100^\circ C$. A temperaturas más elevadas los cambios en la estructura del agua dan lugar a un descenso de la constante dieléctrica. Mientras más baja es la constante dieléctrica del medio, más fuerte, más electroestática y más dura será la interacción entre el metal y el ligando. Haciendo uso de la teoría duro-blando, es posible predecir cuales complejos serán los de mayor relevancia en el transporte hidrotermal de metales. Estas predicciones deben eso sí, tomar en cuenta no solo la estabilidad de los complejos, sino también la disponibilidad de ligando duro.⁶⁴

⁶³ FYFE. W.S. Ibid.,p:25

⁶⁴ AIUPPA, A. *et al.* Op. cit p. 195

Según BRUSCA L *et al*⁶⁵, en el caso de los metales de transición como Fe, Zn, Mn, etc., los complejos que forman tienen una estabilidad que depende de los ligandos. En el caso de la primera fila de metales de transición bivalentes, el orden de estabilidad con la mayoría de ligandos es:



Las concentraciones de zinc analizadas en las aguas termales del Volcán Puracé son muy bajas respecto a los demás electrolitos (por debajo de 0.5 mg/L excepto en La Mina que es próxima a 2 mg/L), según lo observado en la gráfica 12, esto puede ser debido a la posición de este catión en el orden de estabilidad con el ligando disponible.

⁶⁵ BRUSCA, L. *et al.* Op.Cit. p.200

GRUPO II: Agua Hirviendo y Agua Tibia

Tabla No. 19. Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia (Mediana \pm Desviación estándar)

PARÁMETROS	AGUA HIRVIENDO	AGUA TIBIA	ESTABILIDAD AGUA HIRVIENDO	ESTABILIDAD AGUA TIBIA
pH	6,99 \pm 0,22	6,83 \pm 0,25	Alto, variable	Alto, Variable
T °C	72,6 \pm 0,58	56,7 \pm 0,41	Alto, constante	Mediano, Constante
Si ⁺²	50,97 \pm 3,29	47,99 \pm 3,3	Bajo, constante	Bajo, Constante
Al ⁺³	0,83 \pm 0,6	1,35 \pm 3,03	Bajo, constante	Bajo, Constante
Fe ⁺²	0,53 \pm 0,65	0,94 \pm 0,24	Bajo, constante	Bajo, constante
Ca ⁺²	106,9 \pm 9,85	64,11 \pm 7,01	Mediano, constante	Mediano, constante
Mg ⁺²	32,2 \pm 2,9	10,37 \pm 9,5	Bajo, constante	Bajo, Constante
Na ⁺	1898,7 \pm 530,7	1504,3 \pm 295,1	Alto, variable	Alto, Variable
K ⁺	227,6 \pm 24,95	64,0 \pm 6,89	Alto, variable	Mediano, Constante
Mn ⁺²	4,4 \pm 0,6	0,21 \pm 0,08	Bajo, constante	Bajo, Constante
Li ⁺	7,42 \pm 1,57	3,73 \pm 0,80	Alto, variable	Alto, Variable
Zn ⁺²	0,23 \pm 0,48	0,13 \pm 0,15	Bajo, variable	Bajo, variable
Rb ⁺	1,88 \pm 2,6	0,58 \pm 0,89	Bajo, constante	Bajo, constante
Cl ⁻	1639,3 \pm 47,48	1371,5 \pm 44,76	Alto, constante	Alto, constante
SO ₄ ²⁻	2793,5 \pm 131,1	1236,5 \pm 99,1	Alto, variable	Bajo, Constante

Iones (mg/L) y temperatura T (°C)

Alto: El valor corresponde a ¼ de los valores más altos y la caja está ubicada por encima de los demás.

Mediano: El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los altos y por encima de los bajos.

Bajo: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los medianos y por encima de los muy bajos.

Muy bajos: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los bajos y de todos los demás.

Estabilidad: Grado de variabilidad de los datos representada en el tamaño de las cajas que a su vez corresponde a la desviación estándar de los datos.

Constante: La altura de la caja está en el 50% de las cajas más bajas incluyendo las que correspondan a una línea horizontal.

Variable: la altura de la caja está en el 50% de las cajas más altas (Cajas más grandes de color rojo).

La tabla No. 19 compara las concentraciones de los iones presentes en las fuentes termales Agua Hirviendo y Agua Tibia expresados en miligramos por litro, además de los valores de pH y temperatura.

Las fuentes termales de Agua Hirviendo y Agua Tibia presenta los pHs más altos (6.99 y 6.82 respectivamente) y sus temperaturas ocupan el segundo y tercer (72.6 y 56.7 °C respectivamente) lugar respecto a la temperatura de Pozo Azul que es la más alta (89.57 °C).

Los valores de las concentraciones de Si^{+2} , Al^{+3} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , y Rb^+ en general son muy constantes, mientras que los iones Na^+ , Li^+ y Zn^{+2} son más variables a través del tiempo.

Agua Hirviendo se caracteriza por presentar la máxima concentración de rubidio, esto hace factible la continuidad de los análisis de este catión en las fuentes termales del Volcán Puracé.

Entre las concentraciones de los iones, la más variable es la del sodio donde ambas fuentes presentan los valores más altos. A pesar de que el comportamiento de las concentraciones de los iones presentes en ambas aguas termales es muy similar, entre los dos existen diferencias en las concentraciones de K^+ y SO_4^{2-} . Las concentraciones de K^+ y SO_4^{2-} en Agua Hirviendo son las más altas respecto a las demás aguas termales y las concentraciones de Agua Tibia son medianas y similares a las demás aguas termales.

Los iones característicos por ser las concentraciones más altas entre todas las aguas termales son Na⁺, Li⁺ y Cl⁻.

La pérdida de solubilidad del magma y la consecuente interacción agua/roca se denomina “primera ebullición” y es un fenómeno gradual a través del tiempo⁶⁶. Las aguas termales generadas contienen una fase de vapor y la otra de hidrosalmuera salina, con altos contenidos de Na y Cl, tal como se observa en las gráficas 8 y 13.

Según GEVREK, A.I.⁶⁷, la interacción agua/roca depende en gran medida de la composición de la roca huésped y del fluido termal, de la temperatura y la presión, pero también depende de la superficie o volumen de la roca expuesta al fluido, es decir, la permeabilidad de la roca constituye un factor determinante.

9.3. Transporte y precipitación de metales en fluidos hidrotermales

La solubilidad y la temperatura son factores muy importantes para el transporte de los metales. El fluido hidrotermal, al separarse del magma, es el que se encarga de secuestrar y extraer metales del mismo en el momento de ser liberado.⁶⁸

⁶⁶ LEMARCHAND, F. *La Recherche, versión en español*. Vol. 157(9) (1993) p. 441

⁶⁷ GEVREK, A. I. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 96 (3-4) (2000) p. 207-213.

⁶⁸ BRUSCA, L. et al. Op cit. 201

De acuerdo con FYFE WS⁶⁹, las aguas termales son soluciones multicomponentes electrolíticas, cuyos solutos principales son los cloruros alcalinos (NaCl, KCl, LiCl, etc) y esto se puede observar en las gráficas 8, 9, 11 y 13. Por otra parte, otros metales están presentes a nivel de trazas en estas soluciones, predominantemente en forma de iones complejos. La presencia de estos iones resulta de la disociación de los complejos metálicos de las rocas y los diferentes cambios en el ambiente hidrotermal.

En las fuentes termales de Agua Hirviendo y Agua Tibia, la sal dominante es el cloruro de sodio (NaCl). En menor concentración se encuentran los cloruros de potasio y de calcio (KCl y CaCl₂).

Los fluidos de origen netamente magmático presentan salinidades altas, muchas veces correspondientes al 50% en peso equivalente al NaCl. Sin embargo, ya sea por dilución, por partición a la fase de vapor y consecuente condensación, las concentraciones de sal pueden ser mucho más bajas. Si bien la oxidación y el pH son afectados por condiciones interdependientes, los fluidos iniciales suelen tener bajo potencial de oxidación y un pH cercano a la neutralidad, como ocurre en Agua Hirviendo y Agua Tibia.⁷⁰

⁶⁹ FYFE, W.S. Op Cit. 45

⁷⁰ CHRISTENSON, B. W. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 1-30.

Entre los aniones (ligandos) más importantes y en mayor concentración de los fluidos hidrotermales, se encuentran el Cl^- y el SO_4^{2-} .⁷¹ Según la gráfica 13, el Cl^- se encuentra en concentraciones altas en las fuentes termales de Agua Hirviendo (1639.3 ± 47.48 mg/L) y Agua Tibia (1371.5 ± 44.76 mg/L).

Estos cloruros probablemente proceden de rocas profundas que contienen agua marina en su sistema poroso, o de la corriente de vapor de agua procedente del magma que transporta haluros alcalinos.

El ión Cl^- no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de marcador casi ideal.⁷²

El comportamiento del ión SO_4^{2-} es la tendencia a formar iones complejos con Na^+ y Ca^{+2} y a incorporarse a procesos biológicos. Estos tres iones son los que se encuentran en mayor concentración en la mayoría de las aguas termales del Volcán Puracé, de acuerdo con lo observado en las gráficas 6, 8 y 14.

Según BARTON PB *et al*⁷³, el ión sulfato está sometido a procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y de materia orgánica. En ambientes reductores a pH menor que 7, como los observados en las aguas termales del

⁷¹ FYFE, W.S. Op. cit. p.60

⁷² PHILIPPE, G. *La Recherche, versión en español*. Vol.138 (9) (1993) p. 708-717

Volcán Puracé (gráfica 1), la forma reducida estable es el H_2S , mientras que en soluciones alcalinas predomina el ión HS^- , el cual le confiere al agua el típico olor a huevos podridos. Por lo tanto estos aniones serán los mayores formadores de complejos en las aguas termales.

La capacidad de ionización propia del agua también cambia, en respuesta a cambios de presión y temperatura, en la medida en que la molécula de agua se disocia en H^+ y OH^- . La constante de ionización desde 25°C a 300°C cambia en varios ordenes de magnitud. Esto cambia el pH neutro de 7 a 25°C hasta 5.7 a 300°C . Esto representa importantes implicaciones en las reacciones de hidrólisis de cationes metálicos como Na, K, Mg, Li, etc. de las diferentes aguas termales porque modifica su solubilidad. Por otro lado, los aumentos de presión tienen un efecto similar.⁷⁴ En el caso de Agua Hirviendo y Agua Tibia que presentan pH similares, las concentraciones de sodio, litio y magnesio son diferentes pero especialmente la de potasio.

⁷³ BARTON, P. B. *et al. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, segunda ed., Huber L. Barnes, Wiley Interscience Publication, p 278-403.

⁷⁴ SIMONEIT, BR. En: *Geochim Cosmochim Acta* 1993. Vol. 57. p 3231-3243.

La tabla No. 20 compara las concentraciones de los iones presentes en las fuentes termales San Juan y Sulfurosa expresados en miligramos por litro, además de los valores de pH y temperatura.

Las fuentes termales San Juan y Sulfurosa presentan un pH de valor medio (4.36 y 4.8 respectivamente) y temperatura medias (33.9 y 35.05 °C respectivamente) respecto a las demás aguas termales. Sin embargo, el pH de San Juan se caracteriza por ser el más variable. Las concentraciones de los iones se presentan muy constantes a través del tiempo, excepto la concentración de calcio que varia significativamente. Las concentraciones de los cationes en general son bajas, respecto a los otros grupos, excepto en el calcio que presentan las mayores concentraciones.

GRUPO III: San Juan y Sulfurosa

Tabla No. 20 Comparación de los parámetros determinados en las fuentes termales San Juan y Sulfurosa (Mediana \pm Desviación estándar)

PARÁMETROS	SAN JUAN	SULFUROSA	ESTABILIDAD SAN JUAN	ESTABILIDAD SULFUROSA
pH	4,36 \pm 0,43	4,76 \pm 0,33	Mediano, variable	Mediano, Variable
T °C	33,91 \pm 1,06	35,05 \pm 0,16	Bajo, constante	Bajo, Constante
Si ⁺²	55,7 \pm 28,03	50,0 \pm 4,16	Bajo, constante	Bajo, Constante
Al ⁺³	1,08 \pm 0,45	0,85 \pm 0,46	Bajo, constante	Bajo, Constante
Fe ⁺²	0,88 \pm 2,59	0,58 \pm 1,16	Bajo, constante	Bajo, Constante
Ca ⁺²	268,3 \pm 61,1	265,07 \pm 69,76	Alto, variable	Alto, variable
Mg ⁺²	72,2 \pm 44,01	71,4 \pm 32,78	Mediano, constante	Mediano, Constante
Na ⁺	62,6 \pm 7,42	63,6 \pm 14,3	Mediano, Constante	Mediano, constante
K ⁺	12,1 \pm 6,1	14,5 \pm 17,5	Bajo, Constante	Bajo, Constante
Mn ⁺²	2,11 \pm 0,41	2,10 \pm 0,57	Bajo, Constante	Bajo, Constante
Li ⁺	0,05 \pm 0,04	0,06 \pm 0,05	Bajo, constante	Bajo, Constante
Zn ⁺²	0,14 \pm 0,14	0,15 \pm 0,17	Bajo, constante	Bajo, Variable
Rb ⁺	0,089 \pm 0,15	0,08 \pm 0,082	Bajo, constante	Bajo, Constante
Cl ⁻	32,39 \pm 3,6	30,62 \pm 1,13	Bajo, constante	Bajo, Constante
SO ₄ ²⁻	1115,0 \pm 221,2	1110,9 \pm 28,8	Mediano, constante	Mediano, Constante

Iones (mg/L) y temperatura T (°C)

Alto: El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores más altos y la caja está ubicada por encima de los demás.

Mediano: El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los altos y por encima de los bajos.

Bajo: : El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los medianos y por encima de los muy bajos.

Muy bajos: : El valor corresponde a $\frac{1}{4}$ de los valores por debajo de los bajos y de todos los demás.

Estabilidad: Grado de variabilidad de los datos representada en el tamaño de las cajas que a su vez corresponde a la desviación estándar de los datos.

Constante: La altura de la caja está en el 50% de las cajas más bajas incluyendo las que correspondan a una línea horizontal.

Variable: la altura de la caja está en el 50% de las cajas más altas (Cajas más grandes de color rojo).

La tabla No. 21 presenta las concentraciones de los iones en la fuente termal Pozo Azul expresadas en miligramos por litro, además de los valores de pH y temperatura.

La fuente termal Pozo Azul no parece pertenecer a ninguno de los otros tres grupos y por tal razón es analizada de forma independiente. Pozo azul presenta la temperatura más alta (89.57 °C) y un pH de los más bajos (2.42) y variables. En cuanto a la concentración de iones, Pozo Azul se caracteriza por presentar las mayores concentraciones de silicio y hierro, así como las más bajas de SO_4^{2-} con respecto a las demás fuentes termales.

Hay dos maneras de considerar a escala atómica la introducción de agua en un mineral nominalmente anhidro. Sea una estructura esquemática de silicato. Los átomos de silicio están ligados a cuatro átomos de oxígeno, formando tetraedros $[\text{SiO}_4]^{4-}$ entre los cuales están situados cationes (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+}). La molécula H_2O o el grupo OH^- pueden hidrolizar un enlace fuerte de tipo Si-O ó Mg-O (sustituyendo en cierto modo el átomo de oxígeno), o también ocupar lugares en la estructura en la que faltan átomos (las lagunas). Dado que los enlaces H-H así creados son más débiles que los enlaces Si-O y Mg-O , la introducción de agua en un mineral nominalmente anhidro reduce su resistencia mecánica.

Pozo Azul podría considerarse como parte de un grupo formado por Pilimbalá, San Juan, Sulfurosa y Pozo Azul porque tienen en común las concentraciones más bajas y similares de los iones Na^+ , K^+ , Mn^{+2} y Li^+ . Sin embargo, las

GRUPO IV: Pozo Azul

Tabla No. 21 Parámetros determinados en la fuente termal Pozo Azul

PARÁMETROS	POZO AZUL	ESTABILIDAD POZO AZUL
pH	2,42 ± 0,32	Mediano, Variable
T °C	89,57 ± 0,86	Alto, Constante
Si ⁺²	100,76 ± 11,3	Alto, Variable
Al ⁺³	17,08 ± 4,3	Mediano, Variable
Fe ⁺²	58,16 ± 24,5	Alto, Variable
Ca ⁺²	22,9 ± 36,07	Bajo, Constante
Mg ⁺²	5,8 ± 1,99	Bajo, Constante
Na ⁺	18,12 ± 5,21	Bajo, Constante
K ⁺	4,9 ± 2,45	Bajo, Constante
Mn ⁺²	0,31 ± 0,16	Bajo, Constante
Li ⁺	0,05 ± 0,04	Bajo, Constante
Zn ⁺²	0,17 ± 0,15	Bajo, Variable
Rb⁺	0,08 ± 0,05	Bajo, Constante
SO ₄ ²⁻	395,2 ± 15,6	Bajo, Constante

Iones (mg/L) y temperatura T (°C)

Alto: El valor corresponde a ¼ de los valores más altos y la caja está ubicada por encima de los demás.

Mediano: El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los altos y por encima de los bajos.

Bajo: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los medianos y por encima de los muy bajos.

Muy bajos: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los bajos y de todos los demás.

Estabilidad: Grado de variabilidad de los datos representada en el tamaño de las cajas que a su vez corresponde a la desviación estándar de los datos.

Constante: La altura de la caja está en el 50% de las cajas más bajas incluyendo las que correspondan a una línea horizontal.

Variable: la altura de la caja está en el 50% de las cajas más altas (Cajas más grandes de color rojo).

características mencionadas anteriormente hacen de Pozo Azul una fuente muy diferente a las demás que merece ser analizada de forma independiente. No se descarta la posibilidad de que Pozo Azul pertenezca a un grupo de aguas termales no contemplada en el presente estudio.

Las temperaturas elevadas que presenta Pozo Azul favorecen los estados de alta entropía donde se produce mayor disociación iónica, las moléculas de agua se asocian con los iones para compensar las energías de ruptura de los enlaces, por esta razón los sólidos inorgánicos dan lugar a disoluciones de electrolitos.⁷⁵

Cuando el agua es calentada ya sea isobáricamente o a lo largo de la curva de equilibrio vapor-agua, se expande su estructura, su densidad disminuye, su viscosidad baja rápidamente con un consecuente aumento de movilidad molecular y aumento de conductancia. Esto favorece, a alta temperatura, la formación de cúmulos moleculares, incluyendo moléculas de complejas, como tal vez ocurre en Pozo Azul que presenta la temperatura máxima de las aguas termales estudiadas, con una temperatura equivalente a 89.57 ± 0.86 °C.

Algunos ácidos débiles siguen la misma conducta de asociación a mayor temperatura. Por ejemplo, SO_4^{2-} tiende a HSO_4^- a alta temperatura, esto significa que el alto contenido de este anión y la alta temperatura ($T = 89.57 \pm 0.86$ °C) que presenta la fuente termal de Pozo Azul tal vez genere ese pH ácido ($\text{pH} = 2.42 \pm 0.32$).

Las características del agua y los electrolitos a alta temperatura indican que el transporte de metales en agua es muy limitado y que el efecto de la temperatura predomina sobre el de la presión. Por eso, en fuentes termales con temperaturas altas, como es el caso de Pozo Azul, el transporte de metales podría hacerse más difícil.

Por último resta decir que debido a la gran concentración de electrolítica en las diferentes fuentes termales, los dos elementos más importantes para la tecnología moderna, estos serían sin duda el hierro y el silicio. Una intensa investigación sobre la familia de las aleaciones hierro-silicio, llamada siliciuros de hierro, realizada en la última década, ha desembocado en varios descubrimientos fundamentales y en numerosas posibilidades de aplicación. Están en estudio nuevos emisores y detectores de luz, transistores más rápidos y nuevos cabezales de lectura magnéticos. Los siliciuros permiten la integración de componentes magnéticos, ópticos y electrónicos en un mismo dispositivo.⁷⁶

En la tabla No. 22 se encuentran resumidos las máximas concentraciones por electrolito y los parámetros fisicoquímicos encontrada para las diferentes fuentes termales del Volcán Puracé, además de otros fuentes interesantes que llaman la atención debido al máximo valor que presentan.

⁷⁵ SIMONEIT, BR. Ibid.,p:3232.

⁷⁶ MIRANDA, R. ALVAREZ, J. VÁZQUEZ DE PRAGA, A. *La Recherche, versión en español*. Vol. 155 (3).1995 p. 232-237.

Tabla No. 22 Fuentes termales con la máxima concentración por electrolito

PARAMETROS	FUENTE TERMAL CON MÁXIMO VALOR	OTRAS FUENTES INTERESANTES
pH	Agua Hirviendo y Agua Tibia, variables	Todas variables y pH < 7
T °C	Pozo Azul, constante	Todas constantes
Si ²⁺	Pozo azul, variable	Las demás constantes
Al ³⁺	La Mina, variable	Pozo Azul y Pilimbalá, variables
Fe ²⁺	Pozo Azul, variable	La Mina, variable
Ca ²⁺	San Juan y Sulfurosa, variables	Pozo Azul, el más bajo, constante
Mg ²⁺	La Mina, variable	Los demás constantes
Na ⁺	Agua Hirviendo y Agua Tibia, variables	Los demás constantes
K ⁺	Agua Hirviendo, variable	Las demás constantes
Mn ²⁺	La Mina, constante	Todos constantes
Li ⁺	Agua Hirviendo y Agua Tibia, variables	Los demás constantes
Zn ²⁺	La Mina, variable	Todos variables
Rb ⁺	Agua Hirviendo, constante	Los demás constantes
Cl ⁻	Agua Hirviendo y Agua Tibia, constantes	Todos constantes
SO ₄ ²⁻	Agua Hirviendo y La Mina, variables	Pilimbalá variable

Iones (mg/L) y temperatura T (°C)

Alto: El valor corresponde a ¼ de los valores más altos y la caja está ubicada por encima de los demás.

Mediano: El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los altos y por encima de los bajos.

Bajo: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los medianos y por encima de los muy bajos.

Muy bajos: : El valor corresponde a ¼ de los valores por debajo de los bajos y de todos los demás.

Estabilidad: Grado de variabilidad de los datos representada en el tamaño de las cajas que a su vez corresponde a la desviación estándar de los datos.

Constante: La altura de la caja está en el 50% de las cajas más bajas incluyendo las que corresponda a una línea horizontal.

Variable: la altura de la caja está en el 50% de las cajas más altas (Cajas más grandes de color rojo).

Fuente interesante: aquellas fuentes cuyos datos de ese parámetro específico llama la atención por su estabilidad respecto a la fuente termal con máximo valor

Los cationes mayores encontrados en las aguas termales del Volcán Puracé son calcio, magnesio, sodio y potasio, los cuales pueden presentar diversos orígenes.

Calcio

El calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas termales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.⁷⁷

En las aguas termales del Volcán Puracé el catión más abundante es el sodio, en términos generales, seguido del calcio, tal como se puede observar en las gráficas 6 y 8. En las rocas ígneas, el calcio aparece como constituyente esencial de los silicatos, especialmente en el grupo de las plagioclasas como por ejemplo, la anortita (silico aluminatocálcico). En rocas sedimentarias, el calcio aparece fundamentalmente en forma de carbonato: CaCO_3 (calcita y aragonito), o de sulfato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso) o CaSO_4 (anhidrita).⁷⁸

El calcio se encuentra unido a las arcillas del suelo y a la materia orgánica, al entrar en contacto con el agua se produce un intercambio iónico con otros iones y puede perderse del suelo fácilmente por lixiviación.⁷⁹

Magnesio

En las aguas termales del Volcán Puracé se observan concentraciones relativamente altas de calcio y magnesio. Con excepción de La Mina (concentración de magnesio 302.42 ± 98 mg/L), las concentraciones de calcio son

⁷⁷ STURCHIO, N. *Bull Volcano* 1, Vol. 55. 1993, p 290 – 291.

⁷⁸ VALENTINO, G.M. *et al. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 91 (2-4) (1999) p. 329-344.

mayores que las de magnesio, según lo observado en las gráficas 6 y 7. Según E. AGUILERA E. *et al*⁸⁰, el ión magnesio es menos abundante que el calcio en la mayoría de las aguas termales y procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de Silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina.

Al igual que los niveles de calcio, La Mina presenta la mayor concentración de magnesio que se puede observar en las aguas termales del Volcán Puracé según la gráfica 7, sin embargo, no se puede decir que las concentraciones de calcio y magnesio son directamente proporcionales, pues no existe relación en los niveles de calcio y magnesio observados especialmente en San Juan y Sulfurosa.

La solubilidad de la magnesita ($MgCO_3$) y de otros tipos de compuestos es mayor en las aguas termales que la solubilidad de la calcita ($CaCO_3$), por lo que se necesita un período bastante largo para que se sature, precipite directamente de la solución y forme minerales.⁸¹

⁷⁹ AIUPPA, A. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98 (1-4) (2000) p. 189-207

⁸⁰ AGUILERA, E. *et al.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 271-285.

⁸¹ GEVREK, A. I. *Op.cit.* p. 212.

Al igual que el calcio, el magnesio se libera por procesos de intercambio iónico en aguas subterráneas que posiblemente alimentan las fuentes termales como las del Volcán Puracé.⁸²

Sodio

Por otro lado, el sodio, el catión más abundante de las aguas termales del Volcán Puracé (gráfica 8), pudo ser liberado por la meteorización de silicatos presentes en la cuenca receptora de los fluidos hidrotermales.⁸³

Un ejemplo es la albita encontrada en la fuente termal Agua Tibia⁸⁴, aunque es posible también que el sodio se origine por la disolución de rocas sedimentarias y depósitos evaporíticos, donde se presenta fundamentalmente como NaCl.

Las sales de Na⁺ son altamente solubles y tienden a permanecer en solución, por esa razón los contenidos de sodio en todas las fuentes termales son altos, especialmente en Agua Hirviendo (gráfica 8) que presenta una concentración de sodio equivalente a 1898.71 ± 530 mg/L. Aunque el sodio no produce reacciones de precipitación como ocurre con el calcio, según CORBETT, G.J. *et al*⁸⁵ el Na⁺ puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y

⁸² STURCHIO, NC *et al.* *J Sediment Res Sect A* (2000); 70 (3) p. 565-85.

⁸³ ALFARO, C. *Informe interno Ingeominas – Unidad Operativa de Popayán*, 1999, p 1 – 4.

⁸⁴ GARZÓN, G. *et al.* *Informe interno Ingeominas. Unidad operativa Popayán*. 1997. p. 37-47

⁸⁵ CORBETT, G. J. *et al.* *Society of economic Geologist*, Special Publication Number 6, 237pp.

puede ser intercambiado por Ca^{+2} provocando una disminución en el contenido total de sodio de las aguas termales.

Potasio

El ión potasio procede de la meteorización de los feldespatos,⁸⁶ como la albita, la anortita y la labradorita presente en las fuentes termales de Agua Tibia y Agua Hirviendo. Al respecto, la gráfica 9 representa las concentraciones de potasio en todas las aguas termales del Volcán Puracé indicando que las mayores concentraciones se encuentran en Agua Hirviendo (227.60 ± 24.9 mg/L), La Mina (72.22 ± 22.57 mg/L) y Agua Tibia (64 ± 6.9 mg/L).

Si se observan las concentraciones de sodio y potasio para las diferentes aguas termales en las gráficas 8 y 9, se logra encontrar fácilmente que en todas las aguas termales las concentraciones de potasio son siempre menores que las de sodio. El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico, por ello su concentración en aguas termales es generalmente mucho menor que la del Na^+ .⁸⁷

⁸⁶ MARTÍNEZ, M. *et al. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 127-141.

⁸⁷ CORBETT, G.J. *Op. Cit.* p. 125

La tabla No. 23 indica los iones que se encuentran en máxima concentración para los diferentes grupos de fuentes termales del Volcán Puracé, además de la localización de la fuente con respecto al cráter.

Tabla No. 23 Distancia desde el cráter y iones en máxima concentración de las aguas termales del Volcán Puracé.

GRUPO	FUENTE TERMAL	LOCALIZACIÓN (desde el cráter)	IONES EN MÁXIMA CONCENTRACION
I	La Mina	5 km (Puracé)	Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Zn^{+2} , Cl^- , SO_4^{2-}
I	Pilimbalá	5.4 km (Puracé)	Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}
II	Agua Hirviendo	10.8 km (Coconucos)	K^+ , Na^+ , Rb^+ , Li^+ , Cl^- , SO_4^{2-}
II	Agua Tibia	12.6 km (Coconucos)	Na^+ , Li^+ , Cl^-
III	San Juan	9.9 km (Puracé)	Ca^{+2}
III	Sulfurosa	9.9 km (Puracé)	Ca^{+2}
IV	Pozo Azul	8.6 km (Coconucos)	Si^{+2} , Fe^{+2}

Al parecer, los electrolitos presentes en las aguas termales del Volcán Puracé proceden del proceso de intercambio químico llamado “proceso de alteración hidrotermal”. Por esta razón, la concentración de los electrolitos presentes en las aguas termales del Volcán Puracé pueden aportar información importante acerca de la fuente magmática y mineralógica que las generó.

Con el fin de analizar el tipo de alteración hidrotermal provocada por los electrolitos presentes en las aguas termales del Volcán Puracé y la intensidad con la que se llevó a cabo, se determinaron los factores de los cuales dependen estos procesos, como son: composición del agua termal, temperatura y pH.⁸²

⁸² ALFARO, C. Op. Cit. p.9

Sin embargo, para completar estos factores hubiera sido interesante tener también los datos sobre composición de las rocas huésped del agua termal, la razón agua/roca y el tiempo de interacción entre ellos, con el fin de conocer la influencia de las condiciones del reservorio actual sobre la concentración de los electrolitos en cada agua termal.

A pesar de ello, teniendo en cuenta los factores antes mencionados, es posible hipotetizar acerca de los diferentes tipos de alteración que pueden ocurrir con las aguas termales del Volcán Puracé como sigue:

- 1) La alteración argílica moderada, que se caracteriza principalmente por suceder en presencia de suelos con contenidos de arcillas (caolín) y de cuarzo, en mayor o menor cantidad.⁸⁸ La alteración argílica moderada ocurre en rangos de pH entre 4 y 5, tal como se observa en las fuentes de San Juan y Sulfurosa (gráfica 1). También puede co-existir con minerales como la alunita en un rango transicional de pH entre 3 y 4, como ha sucedido con San Juan (gráfica 1). Esto indica que las rocas del reservorio de las aguas de la fuente termal San Juan pueden presentar minerales tales como: el cuarzo, la labradorita y la tridimita a un pH de 4.8.

Aunque en otras fuentes termales pueden presentarse estas rocas, el pH no es el apropiado para que ocurra este tipo de alteración. El sodio y el potasio que quedan en libertad en la alteración de los minerales

permanecen en solución iónica, mientras que el aluminio reacciona con la sílice para formar minerales arcillosos.⁸⁹

Sin embargo, en las gráficas 3 y 4 se observan las concentraciones de silicio y aluminio presentes en todas las aguas termales, especialmente en Pozo Azul donde las concentraciones de silicio en solución alcanzan los 100.76 ± 11.3 mg/L y La Mina donde las concentraciones de aluminio alcanzan los 119.12 ± 21.4 mg/L.

- 2) La alteración argílica avanzada se identifica principalmente por estar presente el cuarzo residual, con o sin presencia de alunita, jarosita, caolín, pirofilita y pirita. La alteración argílica avanzada ocurre dentro de un amplio rango de temperatura, pero a condiciones de pH entre 1 y 3.5.⁹⁰ En las fuentes termales de Pozo azul y La Mina se encuentran minerales como el cuarzo y la alunita, por lo tanto, este tipo de alteración podría presentarse, puesto que existen las condiciones adecuadas en Pozo Azul con un pH = 2.42 ± 0.3 y la Mina pH = 1.89 ± 0.15 . Según CAPASSO, G. *et al*⁹¹, minerales como la alunita posiblemente se hayan originado como producto de alteración por condensación de gases ricos en H₂S, como producto de cristalización magmática/hidrotermal, o a lo largo de vetas y brechas hidrotermales de origen magmático.

⁸⁸ CORBETT, G.J. *Ibid.* p. 134

⁸⁹ CORBETT, G.J. *Ibid.* p. 136

⁹⁰ CORBETT, G.J. *Ibid.* p. 140

⁹¹ CAPASSO, G. *et al. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 102 (3-4). 2000. p.

- 3) La alteración carbonatada principalmente se caracteriza por ocurrir en presencia de minerales como calcita, dolomita, pirita en mayor o menor cantidad y/o albita.⁹² Aunque no se cuenta con la determinación de carbonatos, se analizará esta alteración porque sucede dentro de un amplio rango de temperatura y pH, asociados con minerales como caolinita, clorita y minerales calco-silicatados. Carbonatos de Fe-Mn co-existen con caolinita, mientras que carbonatos de Ca-Mg (dolomita-calcita) ocurren con clorita y minerales calco-silicatados. Esta movilidad de algunos electrolitos es decreciente Fe, Mn y Mg a medida que aumenta el pH.⁹³ Posiblemente esto suceda en las fuentes termales de Agua Tibia con minerales como albita y un pH = 6.82, en Agua Hirviendo con minerales como Mg – calcita y pH = 6.99. Según BOLOGNESI, L⁹⁴ por lixiviación de bases de las rocas se forman soluciones alcalinas que extraen la sílice en solución coloidal.

La gráfica 5 muestra que La Mina tiene un pH bajo y una concentración alta de hierro. Por otro lado, las gráficas 7 y 10 presentan las máximas concentraciones de magnesio (302.43 ± 98 mg/L) y manganeso (19.86 ± 27.64 mg/L) en La Mina.

⁹² FOUKE, B.W. *et al. J Sediment Res Sect A* (2000); 70 (3) p. 565-85.

⁹³ AIUPPA, A. *et al. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 102 (3-4). 2000. p. 311

⁹⁴ BOLOGNESI, L. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98 (1-4). 2000. p. 195-197

En la tabla No. 24 se encuentran resumidas las características geoquímicas de las siete aguas termales del Volcán Puracé y el origen más probable que pueden presentar cada una de ellas.

Tabla No. 24 Características geoquímicas de las aguas termales del Volcán Puracé y origen más probable.

GRUPO	FUENTE	CARACTERÍSTICAS	ORIGEN PROBABLE
I	La Mina	pH y temperatura baja, concentración alta de iones	Condensación de gases magmáticos en aguas meteóricas
I	Pilimbalá	pH y temperatura baja, concentración mediana de iones	Condensación de gases magmáticos en aguas meteóricas
II	Agua Hirviendo	pH y temperatura alta, concentración alta de cationes	Gradiente geotérmico con gran interacción agua/roca
II	Agua Tibia	pH alto, temperatura mediana, concentración alta de cationes	Gradiente geotérmico con gran interacción agua/roca
III	San Juan	pH mediano, temperatura baja, concentración baja de iones	Bajo flujo geotérmico con aporte de aguas meteóricas
III	Sulfurosa	pH mediano, temperatura baja, concentración baja de iones	Bajo flujo geotérmico con aporte de aguas meteóricas
IV	Pozo Azul	pH mediano, temperatura alta, concentración mediana de iones	Alto flujo geotérmico en ebullición con poco aporte de aguas meteóricas

La hipótesis más probable es que La Mina y Pilimbalá sean fuentes termales de origen magmático y que hayan surgido de la filtración de las corrientes gaseosas procedentes del volcán a través de las fisuras y grietas presentes en la

estratigrafía de la zona, que entran en contacto con corrientes hídricas superficiales y subterráneas.⁹⁵

Las fuentes de Agua Hirviendo y Agua Tibia provienen de aguas profundas calentadas por un gradiente geotérmico (> presión > temperatura), y en su recorrido hacia la superficie hay una alta interacción entre la roca del medio que atraviesa, lo que posiblemente contribuye a un gran contenido de cationes, incrementando los valores de pH. Agua Hirviendo presenta mayor contenido en estas variables comparada con la fuente de Agua Tibia, debido posiblemente a la mayor temperatura presentada en esta fuente.⁹⁶

El origen de las fuentes de San Juan y Sulfurosa se les atribuye a un bajo flujo geotérmico con aporte de aguas meteóricas. Estas fuentes presentan pH mediano, temperatura baja y concentración baja de iones. El bajo contenido de cationes presentado en estas fuentes se puede deber a una menor interacción entre el vapor que fluye hacia la superficie y el medio.

Pozo Azul presenta la máxima temperatura de las aguas termales del Volcán Puracé analizadas (90 °C) según la gráfica 2. Esta alta temperatura sugiere que el magma del Volcán Puracé se encuentre en un reservorio sometido a presión y temperatura elevada. Estas condiciones le generan alta solubilidad de los

⁹⁵ STURCHIO, NC. *et al*, *Bull Volcano 1*, Vol. 55 (1993), p 290 – 291.

⁹⁶ ALFARO, C. *Op. cit.* 2

electrolitos en agua, pero esta solubilidad decrece con el descenso de la temperatura durante el transporte y más fuertemente con el descenso de la presión.

9.4 Reacciones de interacción agua/roca

Algunas reacciones que se presentan en las interacciones agua/roca pueden intuirse en los electrolitos de las aguas termales del Volcán Puracé, y son:

- 1) Las reacciones de intercambio metasomático, que se presentan en los procesos de difusión iónica, permiten el intercambio de iones y logran incluso transformar un mineral en otro. Estos procesos se representan mediante diagramas bi o tricomponentes, en función de la actividad iónica de los iones que se intercambian.⁹⁷ La fuente termal de Agua Tibia puede presentar minerales como albita (aluminosilicato de sodio puro) donde posiblemente se den este tipo de reacciones de intercambio iónico.
- 2) Reacciones de hidrólisis (o llamadas también metasomatismo H^+) consisten en la descomposición de los minerales debido a la acción de los hidrogeniones de las aguas ácidas. Según la gráfica 1, La Mina presenta el pH más bajo ($pH = 1.89$) y parece ser por la presencia de ácido sulfúrico, tal como lo demuestra la gráfica 14, donde La Mina aparece con la concentración más elevada de sulfatos (2756.32 ± 174.72 mg/L). Según

Corbett, el proceso de hidrólisis implica tres pasos: el primer paso es la rotura de la estructura del mineral. Debido a su pequeño tamaño y a su gran movilidad, los iones H^+ se introducen con facilidad en las redes cristalinas, lo que produce la pérdida de su neutralidad eléctrica; para recuperarla, el cristal tiende a expulsar a los cationes, cuya carga es también positiva. Como consecuencia, la estructura cristalina colapsa, y se liberan también los aniones. Como segundo, el lavado o lixiviado de una parte de los iones liberados, que son transportados por las aguas fuera de la roca meteorizada. Por último, la neoformación de otros minerales, por la unión de los iones que dan como resultado compuestos insolubles. La intensidad del proceso hidrolítico se traduce en el grado de lixiviación de elementos químicos y en la formación de nuevos minerales.

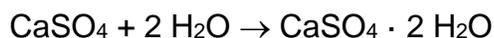
- 3) Las reacciones de oxidación pueden estar controladas por las condiciones de óxido-reducción de los fluidos hidrotermales.⁹⁸ Los elementos susceptibles a las reacciones de oxidación y que han sido determinados en este estudio son: Fe y Mn, según las gráficas 5 y 10. Posiblemente las reacciones de oxidación sucedan en la fuente termal La Mina, ya que esta contiene cantidades significativas de hierro (47.1 ± 8.4 mg/L) y de manganeso (19.9 ± 27.64 mg/L) comparadas con las demás fuentes termales. Los minerales que contienen estos elementos, como es el caso

⁹⁷ CORBETT, G.J. et al. Op. cit. 56

⁹⁸ BORROK, D. et al Sulfite Mininerals in Intrusive and Volcanic Rock of the Bingham- Park City Belt, UTA. Economic Geolist, 1994, No. 8, 1213 – 1230

del Fe en la pirita (FeS_2), podrían ser el origen de los metales presentes en las aguas termales del Volcán Puracé.

- 4) Las reacciones de hidratación implican la absorción de moléculas de agua y su incorporación a la estructura cristalina de algunos minerales. Es un proceso que suele implicar un aumento de volumen del mineral, y que en algunos casos puede ser reversible.⁹⁹ Es el caso, por ejemplo, de la anhidrita presente en La Mina (194.7 ± 31.6 mg/L), que corresponde a la cuarta concentración de calcio entre las aguas termales del Volcán Puracé, después de las concentraciones observadas en San Juan (268.27 ± 61.12 mg/L), Sulfurosa y Agua Hirviendo. De esta forma, la anhidrita por hidratación se transforma en yeso:



En algunos casos, la repetición cíclica de los procesos de hidratación-deshidratación, propios de climas estacionales, puede provocar la destrucción de la red cristalina del mineral.¹⁰⁰

- 5) Las reacciones de deshidratación, controlada principalmente por condiciones de presión y temperatura¹⁰¹, podrían ocurrir en Pozo Azul dada

⁹⁹ PHILIPPE, G. Op. cit. p.705

¹⁰⁰ PHILIPPE, G. Op. cit. p. 210

¹⁰¹ FYFE, WS. Op. cit. p- 122-126

su alta temperatura ($T = 89.57 \pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$) respecto a las demás aguas termales, de acuerdo con la gráfica 2.

- 6) Las reacciones de disolución implican que determinados componentes químicos de la roca dejan de formar parte de ésta, en forma de un compuesto mineral, para formar iones en disolución acuosa. Esto afecta sobre todo a los minerales que constituyen compuestos solubles, como la halita (NaCl) o en menor medida, el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),¹⁰² este último presente en San Juan. Al respecto, San Juan presenta la concentración más alta de calcio según la gráfica 6, equivalente a $268.23 \pm 61.12 \text{ mg/L}$.

No hay que olvidar que este proceso implica la disolución de algunos de los componentes de la roca, pero no de todos, es decir, arrastra (o *lixivia*) a unos componentes, los más lábiles, y concentra relativamente a otros en el residuo. En cada caso, dependiendo de la concentración del mineral que se disuelve, los cambios serán más o menos importantes.

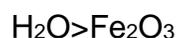
Los procesos de disolución e hidrólisis se ven favorecidos por factores climáticos y ambientales, y en especial por las altas temperaturas de los climas cálidos, que favorecen la dinámica de los procesos y, por tanto, la presencia de aniones en el agua que la hacen más activa químicamente: este es el caso de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- .

¹⁰² FYFE, WS. Ibid., p. 130.

Es importante observar que frente a estos procesos de disolución y lixiviación hay elementos que se movilizan con mayor facilidad que otros; hay elementos que entran en disolución con gran facilidad, mientras que otros tienden a formar geles, menos solubles, o forman rápidamente compuestos muy insolubles, quedando por tanto retenidos en el residuo de la roca. Según CORBETT GJ *et al*¹⁰³, los elementos se lixivian por el siguiente orden de mayor a menor facilidad:



mientras que los que tienden a concentrarse en la roca alterada son:



Al respecto, obsérvese que el sodio es el catión que se encuentra en mayor concentración en todas las aguas termales del Volcán Puracé (gráfica 8), seguido del calcio (gráfica 6), del hierro (gráfica 5), del magnesio (gráfica 7), del potasio (gráfica 9), del silicio (gráfica 3), del aluminio (gráfica 4).

Como puede observarse en la homogeneidad de las concentraciones de los electrolitos presentes en las aguas termales del Volcán Puracé, a través del tiempo, el fluido termal originario de estas aguas termales presenta una concentración electrolítica definida. Sin embargo, es posible que no sea así, pues a lo largo del camino de transporte desde las entrañas del volcán, los electrolitos presentes en las aguas termales cambian debido a la interacción agua/roca, donde las concentraciones de los minerales son el resultado de cambios químicos

¹⁰³ CORBETT GJ. *et al.* Op. cit. p. 145

y mineralógicos en la roca afectada. Esto se evidencia con los puntos que salen de las cajas en las gráficas, implicando que las aguas termales presentan una evolución con tendencia a aumentar la concentración de algunos electrolitos con mayor facilidad que otros, por ejemplo el caso del calcio y del zinc, cuyas concentraciones son sumamente variables en todas las aguas termales analizadas. Esto implica necesariamente cambios químicos y termodinámicos en el fluido hidrotermal que atraviesa la roca.

Independientemente de la fuente del fluido hidrotermal, esta reaccionará con la roca que atraviesa, hasta llegar a un sitio donde la combinación de condiciones estructurales, de permeabilidad, químicos y físicos son los ideales para provocar permanencia del fluido. De esta forma, es posible que hayan aparecido las diferentes aguas termales del Volcán Puracé.

10. CONCLUSIONES

1. El análisis estadístico de los datos sobre las concentraciones de los electrolitos de siete aguas termales del Volcán Puracé de Pilimbalá, La Mina, Agua Hirviendo, Agua Tibia, Pozo azul, y San Juan, permitió inferir acerca de las causas que dan origen a dichos electrolitos y sus concentraciones, para estudiar el comportamiento geoquímico de las aguas termales.
2. Comprender los procedimientos utilizados para llevar a cabo las determinaciones analíticas de los electrolitos de las aguas termales del volcán Puracé permitió organizar estas técnicas ya estandarizadas y mejorar la disponibilidad de esta información para el presente estudio y los posteriores.
3. La sistematización de los datos de las concentraciones electrolíticas de las aguas termales del volcán Puracé determinadas en los últimos cinco años, permite aprovechar esta información, con el fin de facilitar la toma de decisiones por parte del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán con respecto al futuro de los análisis de las concentraciones de los electrolitos de las aguas termales del Volcán Puracé.

4. Las aguas termales del Volcán Puracé en cuatro grupos: primero, la Mina y Pilimbalá; Agua Hirviendo y Agua Tibia; tercero, San Juan y Sulfurosa; cuarto, Pozo azul. Esta Clasificación se presenta con respecto a la similitud en los resultados de los parámetros analizados (concentración de iones, pH y temperatura), pero también está relacionada con la localización desde el cráter del Volcán Puracé (ver numeral 7.1) y con el origen hipotético del agua termal.
5. La interacción entre el fluido hidrotermal y las rocas posiblemente es la causa principal de la riqueza mineral de las aguas termales del Volcán Puracé.
6. Probablemente la fuente termal San Juan sea producto de una alteración argílica moderada; Pozo Azul y La Mina de una alteración argílica avanzada; Agua Tibia, Agua Hirviendo, La Mina y Pozo Azul sean producto de una alteración carbonatada.
7. Posiblemente Agua Tibia presente reacciones de intercambio iónico metasomático; La Mina reacciones de hidrólisis, reacciones de oxidación y reacciones de hidratación; Pozo Azul tal vez presente reacciones de deshidratación; San Juan reacciones de disolución y La Mina reacciones redox.

8. Todas las aguas termales del Volcán Puracé estudiadas presentan pH ácidos o ligeramente ácidos ($\text{pH} < 7$). Las aguas con pH más ácido son La Mina, Pilimbalá y Pozo azul.
9. La temperatura más alta de las aguas termales estudiadas la presenta Pozo Azul y la más baja Pilimbalá, generando un rango de temperaturas para las aguas termales del Volcán Puracé entre 25 y 92 °C.
10. Los cationes mayores más abundantes en las aguas termales del Volcán Puracé son calcio, magnesio, sodio y potasio.
11. La fuente termal Agua Hirviendo es la más rica en sodio, potasio, litio, rubidio, cloruros y sulfatos. La Mina es la fuente más rica en aluminio, magnesio, manganeso y zinc. Pozo Azul es la más rica en silicio y hierro. San Juan es la más rica en calcio .
12. Las aguas termales más ricas en hierro y que reaccionan con aguas sulfatadas son Pozo Azul, La Mina, Pilimbalá y San Juan.
13. El catión que se encuentra en mayor concentración en las aguas termales del Volcán Puracé estudiadas es el sodio y los menos concentrados son el zinc, el litio y el rubidio.

RECOMENDACIONES

- Los análisis estadísticos de los datos obtenidos de los análisis de las aguas de las fuentes termales del Volcán Puracé deberían ser realizados por lo menos cada año, con el fin de aprovechar la información que estos brindan a través de la modelación del sistema.
- Es necesario que las determinaciones se realicen cada vez que se cumpla un período de tiempo preestablecido. Si el período de tiempo no es constante, entonces no es posible realizar la modelación del sistema a través del tiempo.
- Es necesario que Ingeominas continúe promocionando el encuentro de las diferentes disciplinas científicas entorno al análisis de la actividad del Volcán Puracé, las fuentes termales y las fumarolas asociadas.
- La meta debe ser el logro de una observación constante del Volcán Puracé, las fuentes termales y las fumarolas asociadas, con el fin de aprovechar esta información para predecir la actividad sísmológica, el grado de contaminación atmosférica, los usos medicinales potenciales,

las posibilidades turísticas de la zona, los usos agroecológicos de las tierras del entorno.

- El estudio del desarrollo económico y sanitario de la población aledaña al Volcán Puracé, requiere un arduo trabajo interdisciplinario con marcado enfoque local, capaz de aprovechar las posibilidades de apoyo internacional y la participación de las universidades entorno a la gestión de INGEOMINAS

BIBLIOGRAFIA

BRUSCA, L et al. Geochemical mapping of magmatic gas-water-rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 108 (1-4) (2001) p. 199-218.

GARZÓN, G. Catálogo de Fuentes Termales del Suroccidente Colombiano. Departamentos del Cauca, Nariño y Putumayo. Ingeominas, San Juan de Pasto. 1997. p 212.

MARTÍNEZ, M. et al. Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás volcano, Costa Rica, 1993-1997. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 127-141.

DELMELLE, P. BERNARD, A. Downstream composition changes of acidic volcanic waters discharged into the Banyupahit stream, Ijen caldera, Indonesia. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4)(2000)p.55-75

DELMELLE, P. et al. Geochemistry of the magmatic-hydrothermal system of Kawah Ijen volcano, East Java, Indonesia. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 31-53.

SHEVENELL, L. GOFF, F. Temporal geochemical variations in volatile emissions from Mount St. Helens, USA, 1980-1994. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 99 (1-4) (2000) p. 123-138

BOLOGNESI, L. Earthquake-induced variations in the composition of the water in the geothermal reservoir at Vulcano Island, Italy. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 99 (1-4) (2000) p. 139-150

HANSEN, H. GRÖNVOLD, K. Plagioclase ultraphyric basalts in Iceland: the mush of the rift. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98 (1-4) (2000)p.1-32.

AIUPPA, A. et al. Trace elements in the thermal groundwaters of Vulcano Island (Sicily). En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 98 (1-4) (2000) p. 189-207.

CHRISTENSON, B. W. Geochemistry of fluids associated with the 1995-1996 eruption of Mt. Ruapehu, New Zealand: signatures and processes in the magmatic-hydrothermal system. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 1-30.

E. AGUILERA, E. et al. Water chemistry of Lake Quiltoea (Ecuador) and assessment of natural hazards. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97 (1-4) (2000) p. 271-285.

UJIKE, O. STIX, J. Geochemistry and origins of Ueno and On-take basaltic to andesitic rocks produced by distinct contributions of subduction components, central Japan. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 95 (1-4) (2000) p. 49-64.

FOUKE, BW. et al. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A.). En: *J Sediment Res Sect A* 2000; 70 (3) p. 565-85.

GEVREK, A. I. Water/rock interaction in the Kizilcahamam Geothermal Field, Galatian Volcanic Province (Turkey): a modelling study of a geothermal system for reinjection well locations. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 96 (3-4) (2000)p.207-213.

CAPASSO, G et al. Interaction between fumarolic gases and thermal groundwaters at Vulcano Island (Italy): evidences from chemical composition of dissolved gases in waters. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.102(3-4)(2000)p.309-318

STURCHIO, NC et al. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A.). En: *J Sediment Res Sect A* 2000; 70 (3) p. 565-85.

LOPPI S, BONINI I. Lichens and mosses as biomonitors of trace elements in areas with thermal springs and fumarole activity (Mt. Amiata, central Italy). En: *Chemosphere* 2000 Vol. 41 (9) p. 1333-1336.

SÁNCHEZ, I. SAMBONI, N. Incidencias de las concentraciones de los cationes K^+ , Na^+ , Li^+ y Zn^{+2} y algunos parámetros fisicoquímicos en aguas termales sobre la actividad volcánica del Puracé, Departamento del Cauca, Colombia. Popayán, 2000, 83 p. Trabajo de Grado (Químico). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Departamento de Química.

CARDONA, E. y MAMIAN, M. Análisis de los gases SO_2 , H_2S , HCl y Rn en el área volcánica del Puracé, Cauca, Colombia. Popayán, 2000, 92 p. Trabajo de Grado (Químico). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Departamento de Química

ATLAS DE AMENAZA VOLCÁNICA EN COLOMBIA. *Ingeominas*. Bogotá, 2000.

p. 3-15

VALENTINO, G.M. et al. Chemical and isotopic compositions of minerals and waters from the Campi Flegrei volcanic system, Naples, Italy. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 91 (2-4) (1999) p. 329-344.

BORROK, D. et al. Sulfite Mininerals in Intrusive and Volcanic Rock of the Bingham- Park City Belt, UTA. *Economic Geologist*, 94, No. 8, 1213 – 1230.

CARDONA, C. DIAGO, J.C. Como se vigilan los volcanes del Cauca. *Informe interno Ingeominas – Unidad Operativa de Popayán*, 1999, p. 1 – 13.

ALFARO, C. Generalidades Acerca de Aguas Minerales y Termales – Ocurrencia de Manantiales en Colombia. *Informe interno Ingeominas – Unidad Operativa de Popayán*, 1999, p 1 – 4.

ALFARO, C. Cartilla de muestreo y análisis de gases volcánicos por vía húmeda. *Informe interno Ingeominas – Unidad Operativa de Popayán*, 1999, p 3 – 17.

FAVARA, R et al. Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 84 (1-2) (1998) p. 125-141

CORBETT, G. J. et al. En: Structure, alteration and Mineralization. Society of economic Geologist, Special Publication Number 6, 237pp.

MALAVIEILLE, J. SERANNE, M. La destrucción de las montañas. En: *La Recherche, versión en español*. Vol. 16 (4) (1996). p 368 – 373.

SIMONEIT BR. Aqueous high-temperature and high-pressure organic geochemistry of hydrothermal vent systems. En: *Geochim Cosmochim Acta 1993*. Vol.57.p3231-3243.

LEMARCHAND, F. Volcanes. En: *La Recherche, versión en español*. Vol. 157(9) (1993) p. 441

JAUPART, C. Génesis y metamorfosis de una erupción, En: *La Recherche, versión en español*. Vol.157 (9) (1993) p. 442 –447.

WOODS, A. La fiebre destructiva de las erupciones explosivas. En: *La Recherche, versión en español*. Vol.157 (9) (1993) p 451 – 455.

PULGARIN, B. et al. Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del Volcán Puracé. *Ingeominas – Unidad Operativa Popayán*, 1993, p. 3 – 24.

PULGARIN, B. et al. Actividad Histórica y Actual del Volcán Puracé. *Ingeominas – Unidad Operativa Popayán*. 1993, p.8.

STURCHIO, N. The hidrotermal sistem of volcán Puracé, Colombia. En: *Bull Volcano 1*, Vol. 55 (1993), p 290 – 291.

BARTON, P. B. et al. Sulfide minerls stabilities. En: *Geochemistry of Hidrotermal Ore Deposits*, segunda ed., Huber L. Barnes, Wiley Interscience Publication, p 278-403.

CASERTANO, L. et al. Investigaciones geofísicas y características geoquímicas de las aguas hidrotermales: Volcán Poas, Costa Rica. Vol. 24-2 (1985) p 315-332.

IWASAKI, I. et al. Forecast of Volcanic Eruptions by Chemical Methods. En: *Bulletin Volcanologique*, Vol. 39, (1976), p 1 – 3.

TAZIEFF, H. *Los volcanes y la deriva de los continentes*. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1974, p 72, 73.

PHILIPPE, G. El agua del manto terrestre En: *La Recherche, versión en español*. Vol.138 (9) (1993) p. 708-717

DICK, J. G. Química Analítica. Mejico: El Manual Moderno, S.A. 1979. p. 747

FYFE, W.S. Introducción a la geoquímica. Barcelona – España: Editorial Reverté S.A. p. 118.

RISACHER, F. BERTRAND, F. La génesis de los lagos salados. En: *La Recherche, versión en español*. Vol.59 (9) (1993) p. 626 – 632.

COUSSOT, P. PIAU, J.M. Los deslizamientos de lodo. En: *La Recherche, versión en español*. Vol. 141 (9) (1993) p. 1024 – 1031.

GARCÍA, F. Consideraciones para el muestreo de aguas termales en zonas de influencia volcánica. IGEOMINAS, Manizales, 1992. p. 32

PICCARDI, G. Fumaroles Gas Collection and Análisis. En: *Bull. Volcanol.*, Vol. 45-3 (1982) p.257-260.

MARTÍN, M. Geochemical Survey on the Phreatic Waters of Vulcano (Aeolian Islands, Italy) En: *Bull. Volcanol.*, Vol. 43-1, 1980. p. 265-274.

BERNER, R.A. Principles of chemical sedimentology, Mc Graw- Hill, 1971. p. 227-324.

ROBERTSON, E.C. The nature of the solid Earth. Mc Graw- Hill, 1972. p. 530-544.

FAIRBRIGDGE, R. W. The geochemistry and environmental sciences. En: *Bull. Volcano.*, Vol. 25-3 (1972) p.247-269..

ROBIE, R. *et al.* Thermodynamic properties of minerals. En: Bull. Volcanol., Vol. 45-3 (1968) p.125-250.

www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/calidad_aguas/pdf/lib43/1_1.pdf.

5 de Julio de 2002.

www.yacurupaj.com.ar/aguas_termales.htm 10 de Julio de 2002.

www.producto_ligth.com.ve/alternas/aguas.html 15 de Julio de 2002

www./aurasalud.com/Articulos/Art_medic_alternativa/aquastermprop.htm 5 de Julio de 2002.

www.ambiente_ecologico.com/revist57/apesce57.htm 10 de Julio de 2002

ANEXO A

FUENTE TERMAL LA MINA

Fecha	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	1.87	44.9												926	2674
06/02/96	1.85	45.3	64	130	43.2	190	316	338	70	14	0.4	0.01	1.2	1021	2745
27/03/96	1.84	45	58	124	46.8	190	332	319	73	13.9	0.5	0.01	1.2	993	2550
24/04/96	1.95	45.5	30	154	50	216	326	320	90	13.8	0.4	0.4	1.24	949	2900
26/05/96	1.9	45.5	56	120	42	200	300	294	176	13	0.4	0.34	1.1	957	2910
25/06/96	1.93	45	61.2	144	50	206	304	320	78	14.4	0.44	0.2	1.2	970	3013
25/07/96	1.92	46	54	122	43.8	192	290	294	74	12.8	0.2	0.34	1.16	953	2848
30/08/96	1.92	46	5.4	134	44	220	308	294	74	14	0.42	0.22	1.16	975	2797
26/09/96	1.94	45.5	48	54.4	26.8	98	144	156	32.4	6	0.01	0.12	0.4	980	2900
30/10/96	1.98	45	62	112	54	182	268	302	64	12.6	0.44	0.2	1.2	970	2314
21/11/96	1.98	45.5	64	112	47.4	210	300	298	64	14.72	0.46	0.42	1.4	975	2458
19/12/96	1.95	46	62	132	45	210	329	322	72	14.5	0.5	0.4	1.4	996	2684
22/02/97	1.96	46	55	130	45	155	261	297	58	14.1	0.5	0.4	1.5	1024	2715
20/03/97	1.9	45.6	62	120	60	192	270	309	72	14	0.3	0.3	1.14	1064	2684
24/04/98			64	130	37	190	290	260	71	19	0.5	0.4	1.2	1051	2962
03/05/98			61	120	48	184	290	310	67	17.9	0.5	0.5	1.2		
25/07/98															
21/12/98	1.63	46	70	122	48	222	276	280	71	19	0.5	0.4	1.8		
22/01/99	1.87	46	61	125	56	211	247	340	71	18	0.5	0.4	1.5	1042	2910
17/02/99	1.63	46	59	131	49	199	312	300	66	18.1	0.5	0.4	1.3	1050	2941
08/04/99	1.92	46	66	56	51	185	233	312	72	16	0.5	0.4	1	1012	2941
29/04/99	1.61	45.3	60	130	41	189	253	305	65	17	0.5	0.4	1.2	1038	3013
22/05/99	1.91	45.4	60	120	42	192	260	309	69	17	0.5	0.4	1.2	1055	2715
30/06/99	1.88	45.8	62	120	48	190	270	309	66	17.6	0.5	0.4	1.3	1059	2787
02/08/99	1.96	45.2	57	111	43	210	300	301	68	16.5	0.5	0.4	1.3	1063	2735
03/09/99	1.56	47	58	100	42	199	257	264	60	16	0.5	0.4	1.3	1038	2622
07/10/99	2.09	46	59	130	49	194	333	294	63	9	0.28	0.16	0.66	1129	2612
04/11/99	2.06	46	62	124	38	180	294	290	60	16	0.5	0.4	0.62	1129	2602
11/12/99	2.24	46	60	130	74	150	760	333	71.9	8.5	0.4	0.1	1.3	1034	2776
27/07/00	1.79	46	74	98	55	296	345	350	83.8	14.6	0.6		1.1		

FUENTE: Todos los datos que se presentan en las siguientes tablas fueron proporcionados por INGEOMINAS

ANEXO B

Fuente Termal Agua Hirviendo

FECHA	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	6.75	72.2												1671	2591
06/02/96	6.69	72.6	56	0.6	0.2	106	32.6	1284	228	4	8.4	0.1	0.2	1662	2546
27/03/96	6.98	73	50	0.1	1	98	34	1250	210	4	7.6	8.22	0.01	1657	2571
24/04/96	6.98	72.5	52	0.1	0.2	118	34.4	1170	268	4.2	8.6	1.2	0.01	1578	2826
26/05/96	6.78	73	52	1.2	0.2	118	35.6	1212	260	4.4	8.2	1.14	0.01	1591	2920
25/06/96	7.09	73	50.2	1.2	0.1	106	32.6	1334	198	4.2	7.62	0.92	0.01	1600	2776
25/07/96	6.99	73	48	0.01	0.2	104	32.4	1398	214	4	8.1	1	0.06	1608	2801
30/08/96	7.32	72	48	0.01	0.4	126	33	1110	228	4.4	8.26	1.14	0.06	1640	2805
26/09/96	7.14	72	48	0.1	0.1	108	32	1470	240	4.2	8.2	1.14	0.01	1627	2859
30/10/96	6.94	73	48	0.1	3.2	126	30.4	1400	222	3.8	7.46	0.44	0.2	1626	2694
21/11/96	6.81	73	58	1.2	0.1	110	34	1858	212	4.28	7.78	1.02	0.22	1622	2571
19/12/96	7	73	51	2	0.1	112	35	2400	270	4.2	7.9	1.1	0.1	1644	2760
22/02/97	6.86	73	45	0.1	0.1	101	36	2470	214	4.4	8	11	0.1	1684	2628
20/03/97	7.18	73	51	1	0.2	110	27	1760	224	4.2	0.9	7.3	0.2	1755	2669
24/04/98	6.96	73	56	0.5	0.2	107	33	1750	293	5	8.3	1.1	0.1	1684	2781
03/05/98	7.02	73	54	1	0.1	106	33	2800	190	5.3	8.5	1.2	0.1		
25/07/98															
21/12/98	6.92	72	53	1	0.2	102	33	2840	231	5	8	1.1	0.3		
22/01/99	6.42	73	50	1	0.25	114	37	2300	241	4.9	7.9	1	0.2	1616	2904
17/02/99	6.8	73	50	2	1	107	31.9	2050	220	5.1	7.5	1	2.4	1620	2912
08/04/99	7.19	72	52	1	0.3	100	33	2000	209	4.7	7.5	1	0.1	1599	2830
29/04/99	7.05	71.5	50	1	1	106	34	2100	224	4.8	7.8	1.1	0.1	1603	2887
22/05/99	7.14	72.1	50	1	1	105	32	2100	213	4.9	7.5	1.1	0.1	1608	2887
30/06/99	6.86	74.1	51	1	1	100	28	2300	202	4.9	8.2	1.1	0.1	1629	2855
02/08/99	6.88	71.7	51	1	1	120	32	2300	237	5	8.3	1.1	0.1	1629	2867
03/09/99	7.4	72.2	50	1	1	115	32	1960	191	4.8	7.2	1	1	1591	2818
07/10/99	7.13	72	51	1	0.1	99	29	1740	207	2.8	3.8	0.48	0.04	1746	2723
04/11/99	7.05	72	50	2	1	95	25	1800	229	4.7	6.3	1	0.06	1728	2929
11/12/99	7.5	72	44	0.1	0.3	80	25.9	3000	235	2.5	7.2	0.1	0.1	1604	3003
27/07/00	6.95	73	58	0.1	0.2	95.4	35	2008	263	4.4	7		0.2		3011

ANEXO C

Fuente Termal Agua Tibia

Fecha	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	6.88	57	48	0.1	1.0	70	8.2	1048	84	0.2	4.2	0.4	0.01	1387	1189
06/02/96	6.91	57	48	0.8	1.0	76	8.8	1052	80	0.2	4.2	0.36	0.01	1387	1199
27/03/96	7.23	57	47.6	16	0.6	76	17.0	1028	64	0.2	3.82	0.14	0.01	1405	1197
24/04/96	6.88	56	46	0.01	1.0	70	8.8	1308	68	0.2	4.2	0.32	0.06	1340	1226
26/05/96	6.99	56	46	0.01	1.0	70	8.6	922	66	0.2	4.2	0.36	0.04	1344	1231
25/06/96	7.04	56.5	48	0.1	1.0	66	8.8	1200	66	0.2	4.2	0.36	0.01	1451	1232
25/07/96	6.72	57	48	0.1	0.5	60	58.0	1230	54	0.2	4	0.16	0.2	1344	1231
30/08/96	6.73	57	46	0.1	0.8	72	8.8	1564	68	0.24	4.2	0.38	0.26	1365	1239
26/09/96	6.87	57	49	0.1	1.0	61	9.0	1690	64	0.2	4.2	0.4	0.1	1383	1220
30/10/96	6.8	57	40	1	1.0	62	10.0	1700	67	0.2	4.1	0.4	0.1	1360	1225
21/11/96	7.08	57	51	1.0	1.4	66	7.0	1460	69	0.6	0.3	3.2	0.14	1343	1230
19/12/96			52	0.1	1.2	63	9.0	1260	63	0.2	4.1	0.4	0.1	1380	1208
22/02/97			50	1	1.0	63	9.0	1360	58	0.3	4.0	4.0	<0.1	1387	1215
20/03/97														1458	1196
24/04/98	6.55	57	48	1	0.5	63	8.0	1670	61	0.2	3.9	0.4	0.7	1396	1238
03/05/98	6.32	56	44	1	1.3	62	8.4	1590	63	0.2	3.6	0.3	0.5		
25/07/98	6.54	57													
21/12/98	6.49	57	46	1	1.0	60	9.0	1545	62	0.2	3.8	0.3	0.1		
22/01/99	6.23	56.5	50	1	1.0	67	9.0	1700	67	0.2	3.9	0.4	0.1	1255	1111
17/02/99	6.8	56.4	48	1	1.0	63	8.0	1700	59	0.1	3.9	0.4	0.3	1357	1238
08/04/99	6.73	56.8	49	1	1.0	61	7.0	1800	58	0.3	4.1	0.4	0.1	1336	1235
29/04/99	6.82	55.7	46	1	1.0	60	8.0	1700	61	0.2	3.9	0.3	0.1	1353	1227
22/05/99	6.73	56.8	47	0	1.0	70	9.0	1620	60	0.2	3.5	0.3	0.1	1348	1715
30/06/99	7	56.5	49	1	1.0	61	7.0	1800	58	0.3	4.1	0.4	0.1	1353	1224
02/08/99	6.79	57	46	1	1.0	60	8.0	1700	61	0.2	3.9	0.3	0.1	1357	1212
03/09/99	7.4	56.8	47	1	1.0	70	9.0	1620	60	0.2	3.5	0.3	0.1	1336	1238
07/10/99	7	56.5	46	1	0.9	55	7.0	1220	56	0.12	1.93	0.14	0.02	1447	1240
03/11/99	6.79	57	50	1	1.0	61	7.4	1600	58	0.2	3.4	0.3	0.06	1447	1229
11/12/99	7.07	56	48	2	1.0	40	5.5	2000	61.6	0.2	3.6	0.1	0.1	1340	1236
27/07/00	6.91	56.5	60	1.6	0.2	67	9.2	2034	75.6	0.1	3.8		0.2		1204

ANEXO D

Fuente Termal Pozo Azul

Fecha	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	2.66	88.4	92	11.8	54	13	4.2	14.2	13.6	0.01	0.01	0.2	0.2	ND	387
06/02/96	2.63	89	102	13	52	13.8	5	15.4	12	0.1	0.01	0.02	0.08	ND	
27/03/96	2.6	89	102	14.8	52	14.6	14.6	14.4	5	0.4	0.01	0.1	0.07	ND	295
24/04/96	2.56	89	102	20.6	80	18	6.6	16.8	5.2	0.2	0.02	0.02	0.14	ND	364
26/05/96	2.53	89	100	13.2	47	18	4.6	15	4.8	0.2	0.01	0.2	0.12	ND	359
25/06/96	2.56	90	102	20.4	80	17.4	7	20	3.6	0.4	0.01	0.01	0.2	ND	396
25/07/96	2.61	89	102	14.6	58.2	15.6	6	16.2	3.8	0.36	0.01	0.06	0.28	ND	470
30/08/96		89	91	13	54	20	6	22	5	0.3	0.01	0.1	0.3	ND	373
26/09/96		89.2	82	11	42	20	5	20	5	0.2	0.01	0.01	0.2	ND	
30/10/96		89	123	24	62	14	5	16	8	0.9	0.01	0.01	0.15	ND	500
21/11/96		90	128	25	77	16	5	19	6	0.4	0.01	0.1	0.1	ND	397
19/12/96		89	112	24	100	22	9	20	4	0.5	0.1	0.1	0.1	ND	399
22/02/97		89												ND	332
20/03/97	1.92	89	90	17	46	14	5	40	5	0.3	0.1	0.1	0.6	ND	433
24/04/98	2.67	90	82	15	160	16	5.9	16	4	0.3	0.1	0.1	0.7	ND	551
03/05/98	2.12	90	88	23	46	14.1	5.5	13	3.3	0.4	0.1	0.1	0.1	ND	
25/07/98	2.11	90	90	16	40	14	5	22	2	0.3	0.1	0.1	0.1	ND	
21/12/98	1.97	89.3	104	22	38	17	6	23	3.5	0.3	0.1	0.1	0.1	ND	
22/01/99	1.86	89.4	100	13	38	13	5	20	3	0.3	0.1	0.1	0.2	ND	367
17/02/99	2.09	89.7	97	13	48	14	4	20	4	0.3	0.1	0.1	0.1	ND	344
08/04/99	2.3	89.1	110	22	60	17	6	16	5	0.4	0.1	0.1	0.1	ND	
29/04/99	2.04	89.2	103	15	52	20	6	15	4.4	0.4	0.1	0.1	0.1	ND	372
22/05/99	2.75	89.5	100	13	38	13	5	20	3	0.3	0.1	0.1	0.2	ND	395
30/06/99	2.76	92	97	13	48	14	4	20	4	0.3	0.1	0.1	0.1	ND	354
02/08/99	2.3	89.1	110	22	60	17	6	16	5	0.4	0.1	0.1	0.1	ND	536
03/09/99	2.04	89.2	106	16	62	18	6	19	4	0.25	0.01	0.01	0.04	ND	429
07/10/99	2.75	89.5	106	16	62	18	6	19	4	0.25	0.1	0.01	0.08	ND	466
03/11/99	2.76	92	97	18	48	18	5.9	12	4.2	0.4	0.1	0.1	0.06	ND	476
11/12/99	2.96	91	84	14	49	210	3.9	12.2	3.52	0.2	0.1	0.1	0.1	ND	361
27/07/00	2.54	90.5	120	22	33.6	13.2	4.6	13.4	4	0.1	0.02		0.2	ND	378

ANEXO E

Fuente termal de San Juan															
Fecha	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	4.55	33.7	56	1	0.2	316	64	66	10.2	1.8	0.01	0.01	0.01	30	1060
06/02/96	3.47	34	50	0.6	0.2	276	68	56	9.2	1.8	0.01	0.72	0.01	31	1094
27/03/96	4.84	34.5	50	0.4	0.2	310	72	70	20	2	0.01	0.01	0.1		
24/04/96	4.4	35	50	1	0.2	308	70	64	38.8	2	0.01	0.01	0.01	34	1148
26/05/96	4.51	34	200	1.6	0.01	300	68	56	11.2	2	0.02	0.01	0.01	30	1123
25/06/96	4.45	35	46	0.6	0.2	280	62	68	18	1.6	0.04	0.02	0.08	33	1127
25/07/96	4.83	34	46	0.8	0.2	2.94	64	72	20.4	2	0.06	0.08	0.1	32	1143
30/08/96	4.89	35	48	0.8	0.2	292	70	70	9.4	2	0.01	0.01	0.01	34	1153
26/09/96	4.75	34	46	0.6	1	272	64	74	9.2	1.8	0.06	0.01	0.2	31	1133
30/10/96	4.7	34	58	0.6	0.1	292	70	68	9.2	2.22	0.01	0.06	0.2	31	1135
21/11/96		35.4	47	1	0.1	282	70	61	10	2.2	0.01	0.1	0.1	30	1115
19/12/96		34	41	2	0.1	274	79	74	12	2.1	0.01	0.01	0.5	30	1097
22/02/97		34	51	1.5	0.2	275	70	66	15	2.2	0.1	0.01	0.18	41	1089
20/03/97		34.5	52	0.8	0.2	254	61	56	11	3	0.01	0	0.1	41	1186
24/04/98		34	51	1	0.6	273	63	50	8	2.5	0.1	0.1	0.1	32	1163
03/05/98		34.5													
25/07/98	4.08	35	54	1	0.3	305	64	58	10	2.6	0	0.1	0.6		
21/12/98	4.15	34	51	1	14	279	70	70	10	2.4	0.1	0.1	0.4		
22/01/99	4.26	34	49	2	1	242	56	61	8.6	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1101
17/02/99	4.01	34	53	1	0.4	254	65	66	10	2.3	0.1	0.1	0.1	30	1001
08/04/99	4.56	34.2	50	1	1	275	68	67	15	2.5	0.1	0.1	0.1	30	1094
29/04/99	4.77	33.1	51	1	1	257	61	60	10	2.3	0.1	0.1	0.1	29	1111
22/05/99	4.1	35.8	52	1	1	260	64	62	8	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1092
30/06/99	3.72	32.9	52	1	1	290	67	53	10	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1112
02/08/99	3.9	33.5	52	0.1	0.1	290	67	53	10	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1108
03/09/99	4.77	33.4	52	0.1	0.2	200	240	71	8.78	1.2	0.1	0.1	0.1	38	1189
07/10/99	4.79	31	50	1	0.2	294	58	55	9	1.31	0.02	0.01	0.04		1115
04/11/99	4.79	31	53	1	0.1	265	54	46	8.5	2.4	0.1	0.1	0.05		1027
11/12/99	3.83	33	44	2	0.5	190	230	60.5	9.4	1.2	0.1	0.1	0.1	38	1156
27/07/00	3.67	33	60	1.9	0.2	372	61.2	62.4	12.2	2.3	0.02		0.2		

ANEXO F

Fuente Termal Pilimbala

Fecha	pH	T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	2.25	28	42	46	22.2	76	116	110	24.8	5.2	0.2	1.92	0.4	292	794
06/02/96	2.34	26	44	84	22.2	94	120	124	37	5	0.2	0.12	0.6	378	971
27/03/96	2.26	27	42	92	22.2	102	128	138	132	5.2	0.2	0.1	0.44	370	905
24/04/96	2.23	28	47	66	28.2	108	124	124	32.2	6	0.2	0.1	0.5	348	1148
26/05/96	2.16	26.5	38	48	22.4	86	106	114	29.6	4.6	0.14	0.12	0.43	373	1230
25/06/96	2.26	29	40	72	24.8	110	132	132	36.6	5.8	0.16	0.14	0.48	414	1308
25/07/96	2.35	27	48	54.4	26.8	98	144	156	32.4	6	0.01	0.12	0.4	344	115
30/08/96	2.35	27.5	52	46	23.6	82	100	116	28.6	5	0.2	0.01	0.6	388	1254
26/09/96	2.3	27.5	46	52	26.8	102	126	132	110	5.92	0.16	0.18	0.64	403	1283
30/10/96	2.29	27	45	55	23	81	126	121	28	5.5	0.2	0.2	0.5	366	872
21/11/96	2.33	28	39	50	22	61	93	98	22	5.3	0.2	0.1	0.9	385	1044
19/12/96	2.27	26.5	45	48	24.3	90	120	133	39	5.6	0.2	0.1	0.53	362	1078
22/02/97	2.3	27	54	55	23.1	99	130	122	31	7	0.2	0.2	0.5	391	1185
20/03/97	2.29	27	43	37	22	74	89	87	18	4.8	0.1	0.2	0.3	391	1106
24/04/98														389	1197
03/05/98	2.56	26	54	45	22	78	104	105	26	6.1	0.2	0.2	1		
25/07/98	2.48	25	44	38	25	83	105	120	25	5.4	0.2	0.1	0.8		
21/12/98	2.15	26	48	42	20	81	107	110	24	6	0.1	0.1	0.4		
22/01/99	2.43	26.5	49	34	23	71	97	102	22	5.2	0.2	0.2	0.3	318	930
17/02/99	2.28	26.6	41	38	18	74	96	102	27	5	0.1	0.2	0.4	348	971
08/04/99	2.31	27.1	44	42	19	80	108	120	28	5.6	0.2	0.2	0.5	335	961
29/04/99	2.33	28.6	45	44	21	77	110	112	24	6.1	0.2	0.2	0.5	326	910
22/05/99	2.34	27	47	46	21	83	111	110	28	6	0.2	0.1	0.5	361	1066
30/06/99	2.34	27	50	50	23	100	117	105	27	6.4	0.2	0.2	0.6	381	1099
02/08/99	2.47	26.5	47	46	21	83	111	110	28	6	0.2	0.1	0.5	386	1062
03/09/99	2.42	26	50	50	23	100	117	105	27	6.4	0.2	0.2	0.6	381	1009
07/10/99	2.47	26.5	43	47	20	78	103	105	26	3.3	0.09	0.06	0.25	393	1032
03/11/99	2.42	26	47	46	20	76	99	97	22	5.9	0.02	0.1	0.25	382	938
11/12/99	2.65	25.5	40	35	20	60	350	106.4	23.1	2.6	0.1	0.1	0.5	323	914
27/07/00	2.33	27.4	56	62	26.4	89.8	136	136	35	3.1	0.1		0.5		

ANEXO G

Fuente Termal Sulfurosa															
FECHA	pH	°T	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Li	Rb	Zn	Cl	SO4
23/01/96	4.73	34.9	50	1.2	0.1	314	64	62	10	2	0.01	0.01	0.01	31	1024
06/02/96	4.84	35	48	0.1	1	274	70	58	9.8	1.8	0.2	0.4	0.01	31	1083
27/03/96	4.87	35.5	50	0.6	0.2	308	70	68	18	2	0.01	0.01	0.1	31	1076
24/04/96	4.99	35	46	0.2	0.1	300	72	78	102	0.01	0.01	0.01	0.01	30	1127
26/05/96	4.9	35	49	1.6	0.01	286	64	54	11.6	2	0.04	0.01	0.01	31	1135
25/06/96	4.85	35.5	42	0.1	0.2	250	62	64	24.4	1.6	0.02	0.02	0.08	30	1115
25/07/96	4.91	35	42	0.4	0.2	318	60	91.4	29.6	1.8	0.02	0.04	0.18	30	1120
30/08/96	4.95	35	48	0.4	0.2	266	70	70	10	2	0.01	0.01	0.01	30	1119
26/09/96	4.94	35	52	0.1	0.5	260	58	118	9.4	1.8	0.04	0.01	0.2	31	1116
30/10/96	4.72	35	60	0.1	0.1	288	64	64	8.8	2.22	0.01	0.08	0.2	31	1125
21/11/96	4.7	35	48	1	0.1	277	67	54	11	2.2	0.1	0.01	0.1	30	1129
19/12/96		35	44	1	0.1	271	73	78	12	2.1	0.01	0.1	0.5	29	1060
22/02/97		35	50	1	0.1	277	70	64	14	2.5	0.1	0.01	0.12	32	1088
20/03/97		35	54	1	0.2	279	67	57	11	3	0.01	0.1	0.1	35	1113
24/04/98		35	49	1	0.1	300	66	52	8	2.5	0.1	0.1	0.1	31	1087
03/05/98		35													
25/07/98	4.2	35	57	1	0.2	336	66	60	11	2.6	0	0.1	0.7		
21/12/98	4.76	35	55	1	6	287	72.5	70	10	2.4	0.1	0.1	0.5		
22/01/99	4.76	35	51	1	1	261	61	62	8.6	2.5	0.1	0.1	0	30	1102
17/02/99	4.95	35	54	1	0.1	254	64	63	9	2.2	0.1	0.1	0.1	30	1111
08/04/99	4.98	35	48	1	1	282	68	63	10	2.5	0.1	0.1	0.1	30	1104
29/04/99	4.2	35	50	1	1	283	68	63	9	2.4	0.1	0.1	0.1	31	1121
22/05/99	4.56	35.4	50	1	1	250	63	59	8	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1106
30/06/99	3.73	34.7	50	1	1	310	68	58	10	2.4	0.1	0.1	0.1	30	1117
02/08/99	4.43	35.1	50		0.1	285	62	49	9	2.3	0.1	0.1	0.1	31	1118
03/09/99	4.43	35.1	50	0	0.1	285	62	49	9	2.3	0.1	0.1	0.1	30	1154
07/10/99	5.2	35.1	47	1	0.1	268	55	49	8	1.26	0.01	0.01	0.04		1145
03/11/99	5.07	35	50	1	0.1	268	55	44	8	2.4	0.1	0.01	0.05		1156
11/12/99	5.1	35	48	2	0.3	10	240	62.8	9.19	1.2	0.1	0.1	0.1	30	1133
27/07/00	5.1	35.2	58	1.2	0.2	40.1	67.8	60.6	11	2.6	0.02		0.2		

ANEXO H

MINERALES CITADOS (Hurlbut, C.S., 1974)

NOMBRE	COMPOSICION	SISTEMA CRISTALINO
ELEMENTOS NATIVOS		
Azufre	S ₈	Rómbico
SULFUROS		
Pirita	FeS ₂	Cúbico
Marcasita	FeS ₂	Rómbico
OXIDOS		
Olgisto	FeO ₃	Hexagonal
Hematita	Fe ₂ O ₃	Trigonal
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Cúbico
Limonita	FeO(OH)·nH ₂ O + Fe ₂ O ₃ ·nH ₂ O	Amorfo
Ilmetita	FeTiO ₃	Hexagonal
Anatasa	TiO ₂	Tetragonal
HALUROS		
Halita	NaCl	Cúbico
CARBONATOS		
Calcita	CaCO ₃	Hexagonal
Aragonito	CaCO ₃	Rómbico
Mg-calcita	CaMg(CO ₃)	Hexagonal
SULFATOS		
Anhidrita	CaSO ₄	Rómbico
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Monoclínico
Thenardita	Na ₂ SO ₄	--
Epsomita	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Rómbico
Eusgterita	Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ ·2H ₂ O	--
Tamarugita	NaAl(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	--
Na-alunita	NaAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Rómbico
Alunita	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Rómbico
Jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Trigonal
SILICATOS (Inosilicatos, Grupo de Piroxenos)		
Hiprstenita	(Mg,Fe) ₂ (Si ₂ O ₆)	Rómbico
Augita	(Al,Si) ₂ O ₆ Ca(Mg,Fe,Al)	Monoclínico
SILICATOS (Inosilicatos, Grupo de Anfíboles)		
Actinolita	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Monoclínico
Tremolita	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Monoclínico
Hornblenda	(AlSi) ₈ O ₂₂ Ca ₂ NaMg ₄ (Fe,Ti)(OH) ₂	Monoclínico

MINERALES CITADOS (Continuación)

NOMBRE	COMPOSICION	SISTEMA CRISTALINO
SILICATOS (Filosilicatos)		
Caolinita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5 (\text{OH})_4$	Monoclínico
Moscovita	$\text{KAlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})$	Monoclínico
Pirofilita	$\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Monoclínico
Halloysita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Amorfo
Flogopita	$\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Monoclínico
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Monoclínico
Montmorillonita	$(\text{Al,Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico
SILICATOS (Tectosilicatos, Grupo SiO_2)		
Cuarzo	SiO_2	Trigonal
Tridimita	SiO_2	Rómbico
Cristobalita	SiO_2	Tetragonal
Opalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amorfo
Sílice amorfa	SiO_2	Amorfo
SILICATOS (Tectosilicatos, Grupo de los Feldespatos)		
Microclina	$\text{KAl Si}_2\text{O}_8$	Triclínico
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Triclínico
Anortita	$\text{CaSi}_2\text{Al}_2\text{O}_8$	Triclínico
Oligoclasa	90-70% Albita + 10-30% Anortita	Triclínico
Andesina	70-30% Albita + 30-50% Anortita	Triclínico
Labradorita	50-30% Albita + 50-70% Anortita	Triclínico
Bitownita	30-10% Albita + 70-90% Anortita	Triclínico