

ISSN-0120-1425

# Boletín Geológico

**INGEOMINAS**  
Instituto Colombiano  
de Geología y Minería  
Ministerio de Minas y Energía  
República de Colombia



Libertad y Orden

VOLUMEN 41, 1- 3 pp 1-123, 2006 / BOGOTÁ, D.C



Quebrada Corralita, volcán nevado del Ruiz

## **Cartografía geoquímica de la plancha 209 Zipaquirá**

*Sonia Güiza González; Luz Myriam González; Álvaro Espinosa González*

## **Geoquímica de suelos de la cuenca del río Bogotá**

*Gloria Prieto Luz Myriam González, Orlando Vargas Adriana Matamoros*

## **Exploración regional de rocas ornamentales entre el Municipio de Valledupar y las inspecciones de Patillal y Badillo Departamento del Cesar-Colombia**

*Luis Enrique Bernal Vargas*

## **Geoquímica de fuentes minerales y termales del complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín, Colombia**

*Claudia Alfaro Valero y Alcides Aguirre Corrales*

[www.ingeminas.gov.co](http://www.ingeminas.gov.co)



# Boletín Geológico

---

**El Boletín Geológico de INGEOMINAS es una publicación dirigida a la comunidad geocientífica nacional e internacional. Se especializa en publicar artículos científicos inéditos, correspondientes a investigaciones relacionadas con las geociencias, minería, geoquímica, temas nucleares y ambientales. Su publicación es semestral.**



Libertad y Orden



© **INGEOMINAS 2007**

**DIAGONAL 53 N°34-53**  
**[www.ingeminas.gov.co](http://www.ingeminas.gov.co)**

2006 JULIÁN VILLARRUEL TORO  
2007 MARIO BALLESTEROS MEJÍA  
DIRECTOR GENERAL

JOSÉ VICENTE LOZANO VEGA  
SUBDIRECTOR DE INFORMACIÓN GEOLÓGICO MINERA

GILMA RAMÍREZ ZAPATA  
COORDINADORA DE CAPTURA, CONVERSIÓN Y OFICIALIZACIÓN DE INFORMACIÓN

COMITÉ EDITORIAL

LEOPOLDO GONZÁLEZ  
HÉCTOR ENCISO  
HENRY VILLEGAS  
JULIO ROJO  
RICARDO VIANA

GUSTAVO VEJARANO MATÍZ / SILVIA GUTIÉRREZ  
DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Portada/contraportada:  
Quebrada Corralita, volcán nevado del Ruiz  
Termal de las Estatuas, quebrada Agua caliente volcán Machín  
Foto: Claudia Alfaro Valero

IMPRESIÓN  
IMPRENTA NACIONAL DE COLOMBIA

## POLÍTICAS DE PUBLICACIONES

Las publicaciones del INGEOMINAS deben ser usadas principalmente para reportar los resultados de las investigaciones conducidas por funcionarios del Instituto. Sin embargo, ellas también podrán incluir los resultados de investigaciones y estudios generados por otras instituciones, en los cuales el INGEOMINAS tiene interés especial por su misión.

Es política del INGEOMINAS conducir sus actividades de tal manera que los resultados de sus investigaciones científicas, de ingeniería y disciplinas relacionadas en cumplimiento de su misión, estén disponibles en la manera que mejor sirvan al público en su conjunto antes que a intereses de un grupo especial, una entidad particular o individuos.

Las publicaciones deben ser científicamente probables y estar bien preparadas, llevarán revisiones técnicas normales para su contenido científico y estarán libres de frases contradictorias en sus textos e ilustraciones. Cada publicación, deberá satisfacer las necesidades para las cuales fue generada y claramente comunicará hechos e interpretaciones a la audiencia objetivo.

Todos los datos e informaciones compiladas por medio de investigaciones y observaciones, por los funcionarios o contratistas del INGEOMINAS en misiones oficiales de la entidad, no deben ser liberados (suministrados) a otros hasta que la información esté disponible a todo el público, de manera imparcial y simultánea a través de las publicaciones formales aprobadas por el Director del INGEOMINAS o por otros medios apropiados, excepto cuando tal publicación responde a algún requerimiento de ley.

Cuando los resultados de una investigación han sido entregados a una entidad cooperante, los mismos no pueden ser divulgados por ésta antes que el reporte oficial haya sido li-

berado del INGEOMINAS o hasta que el Director del INGEOMINAS haya autorizado su publicación por la otra entidad.

Los criterios generales para publicación son los siguientes:

**Integridad:** los datos colectados deben ser exactos y precisos, y los métodos de colección deben estar documentados. El tono de los informes será razonable y se evitarán las frases descalificadoras de trabajos o gestiones de terceros. No se discuten en los mismos, los planes de proyectos futuros, excepto en documentos de planeación. En lo posible, los documentos del INGEOMINAS deben evitar la especulación sobre los resultados.

**Objetividad:** Las investigaciones y conclusiones deben basarse en interpretaciones con suficiente razonamiento científico. Las políticas del INGEOMINAS no se cuestionan ni se contradicen de manera deliberada.

**Imparcialidad:** Los informes deben presentar hechos e interpretaciones imparciales para que otros puedan usarlos en sus propios propósitos. No se presentará crítica específica o general de otras entidades gubernamentales o del sector privado.

**Beneficio público:** La información a publicar tendrán amplia aplicabilidad a la comunidad de usuarios, antes que al favorecimiento de un sector específico. Los resultados no implican competencia con el sector privado ni a favorecer una entidad privada especial.

Los artículos de investigación constituyen el tipo más común de contribución que publica el INGEOMINAS. Corresponderán a aplicaciones y metodologías geocientíficas, que involucran contribuciones originales y aplican el método científico a la resolución de nuevos problemas, mediante la adquisición, procesamiento, validación e interpretación de datos

geológicos, mineros, químicos o nucleares. Tales contribuciones deben ser más que la recopilación de hechos ya aceptados o publicados previamente; deben ser la prueba o el rechazo de una hipótesis, razón por la cual tienen que involucrar el riesgo que implica la investigación.

En las investigaciones en geociencias, que basan su desempeño en la observación directa o indirecta de procesos naturales, puede ser difícil de percibir el riesgo inherente a la investigación, porque algunos artículos pue-

den probar o comparar métodos conocidos o ya documentados, con juegos de datos antiguos o recientemente adquiridos. En estos casos, la revisión editorial de los artículos por parte de especialistas, consistirá en discernir si él o los autores: (1) Aplican herramientas y procedimientos de evaluación y prueba de manera apropiada, pertinente e innovadora y (2) aportan metodologías y aplicaciones de manera acertada, para dar relevancia a la correcta comprensión de las ideas expuestas en el artículo, más allá de la mera observación y presentación de los datos.

# CONTENIDO

## CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA DE LA PLANCHA 209 ZIPAQUIRÁ

<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>10</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>10</b>
Localización	10
<b>2. METODOLOGÍA CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA</b>	<b>16</b>
Trabajo de campo	16
Análisis de laboratorio	16
Tratamiento y análisis de la información	18
<b>3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEOQUÍMICA</b>	<b>19</b>
Aguas	19
Asociaciones geoquímicas	19
Geoquímica ambiental	22
Suelos	25
Sedimentos activos	28
Perspectivas para exploración de recursos minerales	31
<b>4.CONCLUSIONES</b>	<b>38</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>39</b>

## GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

<b>RESUMEN</b>	<b>41</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>42</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>42</b>
1.1 Localización	43
1.2 Características de la zona	43
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>44</b>
2.1 Resultados y discusión	45
2.1.1 Correlación y asociación de elementos	45
2.1.2 Distribución espacial de elementos trazas	46
2.1.3 Influencia de parámetros fisicoquímicos en el comportamiento de los metales trazas	52
2.1.4 Movilidad v.s acumulación de elementos traza	53
<b>3. CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>56</b>

## **EXPLORACIÓN REGIONAL DE ROCAS ORNAMENTALES ENTRE EL MUNICIPIO DE VALLEDUPAR Y LAS INSPECCIONES DE PATILLAL Y BADILLO DEPARTAMENTO DEL CESAR-COLOMBIA**

<b>RESUMEN</b>	<b>57</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>57</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>58</b>
1.1 Localización	58
1.2 Metodología	58
<b>2. RESULTADOS</b>	<b>62</b>
2.1 Prospección geológica	63
2.1.1 Batolito de Patillal (jcm_jgr: 170 <sup>+</sup> - 11 m.a)	63
2.1.2 Pórfido de las Palomas (tkg?)	63
2.1.3 Tectónica	67
2.2 Definición de áreas de interés	69
<b>3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>74</b>

## **GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO - CERRO MACHÍN, COLOMBIA**

<b>RESUMEN</b>	<b>76</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>77</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>78</b>
1.1 Marco geológico	78
1.1.1 Estratigrafía	78
1.1.2 Tectónica	80
1.2 Marco geoquímico	81
1.3 Objetivos	82
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>83</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>84</b>
3.1 Geoquímica de los manantiales del complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín	84
3.2 Usos potenciales	106
3.2.1 Usos como recurso energético	106
3.2.2 Usos en termalismo	108
3.2.2 Usos tópicos	109
3.2.2.2 Agua natural embotellada	110
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>117</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>119</b>



# CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA DE LA PLANCHA 209 ZIPAQUIRÁ

Sonia Güiza González; Luz Myriam González;  
Alvaro Espinosa González  
sguiza@ingominas.gov.co; luzgonz@ingominas.gov.co

## RESUMEN

**A** continuación se presentan los resultados de la cartografía geoquímica realizada en la plancha 209 Zipaquirá. Incluye una revisión de las unidades geológicas, geomorfológicas y de suelos. A partir de los resultados de análisis químicos en muestras de suelos, sedimentos y aguas, se hace un tratamiento estadístico básico y un análisis multivariado, para encontrar los principales grupos de elementos asociados, que facilitan la identificación de parámetros geoquímicos característicos en la zona. Para cada elemento químico, se hace un análisis geoestadístico, mapas de concentración puntual y distribución espacial en los diferentes medios de muestreo. (Güiza s., Espinosa, A. 2005.)

En la parte ambiental, se tienen en cuenta los elementos considerados como potencialmente peligrosos (EPP) por su toxicidad y su incidencia en la salud humana. Si realiza la interpretación de algunos elementos considerados fundamentales, desde el punto de vista agrícola, para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los principales elementos que exceden los valores recomendados ( Decreto 475 , de 1998 ) en aguas desde el punto de vista ambiental son el hierro, el manganeso y el aluminio.

Igualmente, se realizó una interpretación geoquímica para exploración de recursos minerales, mediante el análisis de los elementos de interés económico y la delimitación de zonas geoquímicas a partir de las asociaciones de elementos afines y valores extremos, obtenidos de la distribución y variación de los contenidos de elementos químicos en los tres medios de muestreo antes mencionados. Lo anterior apoyado tanto en la información cartográfica disponible y la generada dentro de este trabajo, como en las herramientas estadísticas.

A partir de la geología, geomorfología, factores fisicoquímicos del agua, grupos de elementos y valores extremos en aguas, sedimentos activos y suelos y finalmente la presencia de oro y plata en sedimentos y suelos se determinaron 5 regiones geoquímicas denominadas así: San Cayetano, Lenguaque, Zipaquirá, Cuenca alta de Bogotá y Machetá-Manta.

**Palabras clave:** Geoquímica, elementos químicos, sedimentos, suelos ambiental, exploración, Zipaquirá, cuenca Bogotá, análisis estadístico, región geoquímica.

## ABSTRACT

Results of a geochemistry cartography covering the area of Plate 209- Zipaquirá, are presented in this article. It includes a review of geology, geomorphology and soil information. The results of chemical analysis of soils, sediments and water samples were statistically processed and a multivariate analysis was carried out to find groups of element associated to facilitate the identification of geochemical characteristics in the zone. Also after a geostatistical analysis was done, point concentration and spatial distribution map were constructed for each chemical element and each sampling media.

In respect to environmental aspects, the levels of the elements classified as potentially dangerous (EPP) for its toxicity and effect in human health, were analyzed in each sampling media: water, soil (horizon A) and sediments. The study also gives information about elements important in relation to its impact in agricultural use of soil.

In relation to water quality, the main elements that exceed recommended values are iron, manganese, and aluminum, in sediments cadmium, zinc, lead, arsenic and in soils vanadium.

Regarding geochemical interpretation for possible mineral deposits, elements of economical interest were analyzed and geochemical differentiable regions were delimited having element associations and the presence of outliers (extremely high concentration values) in account.

Between the areas of interest there is San Cayetano, located NW and the Machetá- Manta area located in the SE of the Plate. In these areas the influence of cretacic marine origin rocks is evident and higher levels, in relation to the rest of the plate, of some elements including rare earth element are present. In Lenguazaque area is evident the influence of coal mining in the high levels of some ele-

ments in all sampling media especially in soils and sediments. In the Zipaquirá area, were there are salt diapirism, and also cretaceous marine influence; there is an increase in elements like As, Ba, Cu, and Sb.

Finally, for the High Bogotá river basin, two sources of elements present in water are proposed, one related to natural geogenic origin, evident near the river birth, and also an effect of human and industrial activity in its middle basin, evident in the levels of elements in water samples.

## 1. GENERALIDADES

### Localización

La plancha 209-Zipaquirá, esta localizada al norte del departamento de Cundinamarca; en la parte central de la Cordillera Oriental. Las coordenadas planas X, Y con origen en el Observatorio Nacional de Bogotá son:  $X_1$ : 1.040.000,  $Y_1$ : 1.000.000 y  $X_2$ : 1.080.000,  $Y_2$ : 1.060.000. Cubre un área aproximada de 2.400 Km<sup>2</sup> e incluye los municipios de Zipaquirá, Ubaté, Suesca, Sesquilé, Chocontá, Machetá, Manta, Villapinzón, Cucunubá, Lenguazaque, San Cayetano, Sutatausa, Tausa, Gachancipá, Tocancipá, Cogua y Nemocón. (Ver figura 1.)

### Cuencas hidrográficas

La principal cuenca de la plancha 209 corresponde a la del Río Bogotá, la cual cubre aproximadamente el 60 % de la zona de estudio y se encuentran ubicados el mayor número de puntos de muestreo. Las demás cuencas corresponden a la parte más alta de las mismas cuencas, cuyas quebradas desembocarán en los correspondientes ríos. La cuenca del Río Suárez es la segunda en importancia, está al norte del área de estudio, otra muy importante es la cuenca alta del Río Meta al oriente de la plancha y por último, al noroccidente se encuentran ubicadas pequeños sectores de las cuencas de los ríos: Guazu, Carare y Río-negro. (Ver figura 2.)



### Geomorfología y suelos:

La información de geomorfología y suelos, que incluye vegetación y clima, presentada en este informe y mapas respectivos, es adaptada y modificada del estudio titulado "Departamento de Cundinamarca. Estudio general de suelos y zonificación de tierras" del IGAC, 2000. La plancha 209 Zipaquirá se caracteriza principalmente por dos unidades de paisaje: Montaña y Planicie, ésta última corresponde a la Sabana de Bogotá. La distribución espacial se aprecia en la (Figura 3.)

**1) Suelos del paisaje de montaña:** Abarca pisos térmicos desde muy frío hasta medio; los tipos de relieve formados por artesas, filas vigas, crestas, crestones y espinazos, cuestras, lomas, glacis; en un relieve que varía de ligeramente ondulado a fuertemente escarpado.

La zona esta cubierta en los sectores más altos con bosque natural y vegetación de páramo; la intervención humana en la zona de subpáramo (alturas entre 3.000 y 3.600 msnm) donde se adelantan actividades pecuarias (ganadería de leche) y agrícolas, con cultivos principalmente de papa. En altitudes inferiores a los 3.000 m la vegetación natural ha sido remplazada en gran parte para dar paso a la explotación agropecuaria con una gama variada de cultivos propios de cada piso térmico.

Los suelos de este paisaje pertenecen a los ordenes Entisol, Inceptisol, Andisol, Molisol, Alfisol, Histosol y Ultisol; son de evolución desde muy incipiente (Entisoles) hasta altamente evolucionados (Ultisol) y se han originado a partir de rocas sedimentarias. La profundidad efectiva, el drenaje y la textura presentan gran variabilidad.

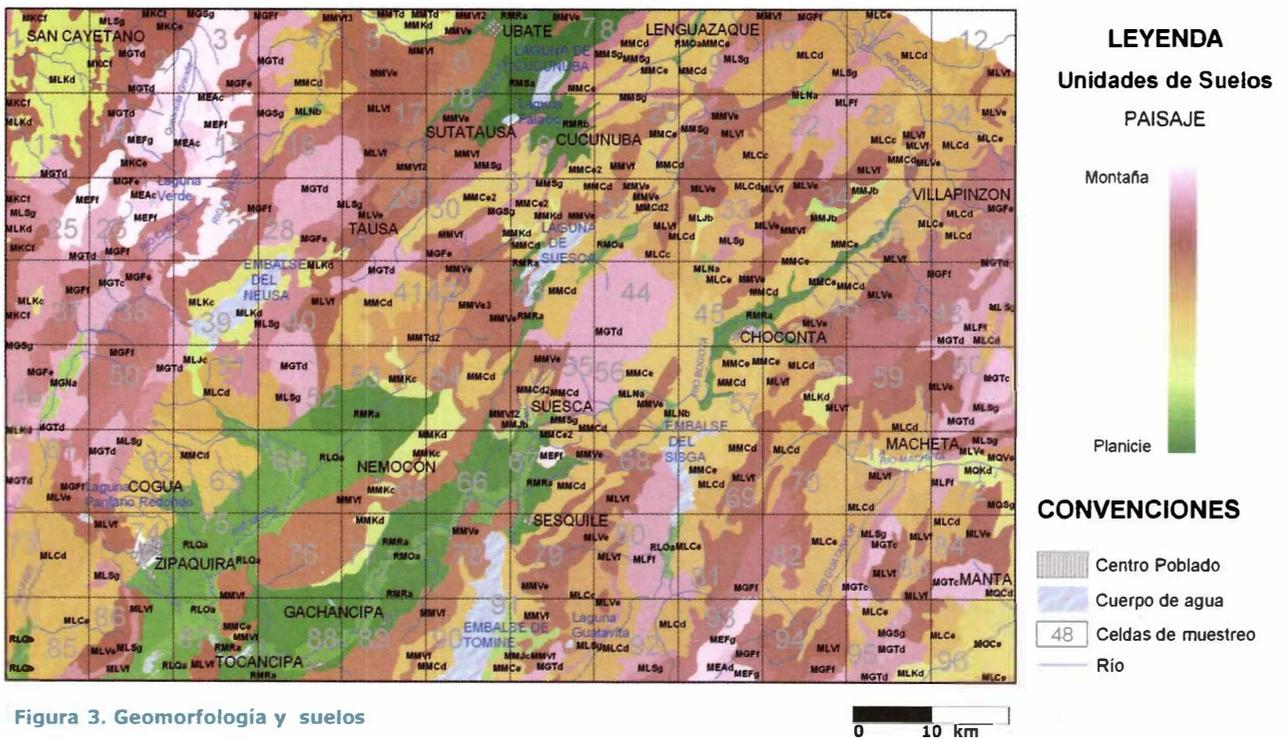


Figura 3. Geomorfología y suelos

**2) Suelos del paisaje de planicie:** Hace parte de la planicie fluvio-lacustre originada en gran parte por la dinámica del río Bogotá y sus afluentes. Se encuentra a una latitud entre 2.000 y 3.000 m, en clima ambiental frío húmedo y seco, con temperaturas que varían entre 12 y 18 °C. Esta conformada por planos de inundación y terrazas, influenciados por depósito de sedimentos en su mayoría finos y medios, que han servido de material basal a partir del cual se han originado los suelos.

Los suelos presentan diferente grado de evolución en concordancia con la posición que ocupan. En los planos de inundación predominan los suelos de menor evolución (Entisoles e Inceptisoles), influenciados en algunos sectores por cenizas volcánicas. En las terrazas se observa un mayor desarrollo de la población edáfica (Inceptisoles, Andisoles y Alfisoles), allí, el material de origen de los suelos (depósitos clásticos hidrogénicos de origen lacustre y aluvial) y el clima han dominado la génesis de los suelos.

**Marco geológico:**

La descripción geológica de la zona ha sido extraída en su totalidad del estudio geológico de INGEOMINAS titulado "Geología de la Plancha 209, Zipaquirá" de Montoya et. al., 2005.

Las unidades litológicas del área de estudio, están conformadas por rocas sedimentarias de origen marino y continental de edades que van desde el Cretácico al Holoceno. La secuencia sedimentaria cretácica de 3.200 m de espesor, se depositó en una cuenca en un mar somero; a partir del Albiano cesa la fase extensiva, comienza una inversión tectónica y se inicia una regresión con oscilaciones que terminan a comienzos del Paleógeno y da lugar a un ambiente continental en el cual se depositaron aproximadamente 2.400 m. En el Neógeno, en un ambiente tectónico compresivo se deformó la pila sedimentaria que constituye la actual Cordillera Oriental. (Ver Figura 4.)

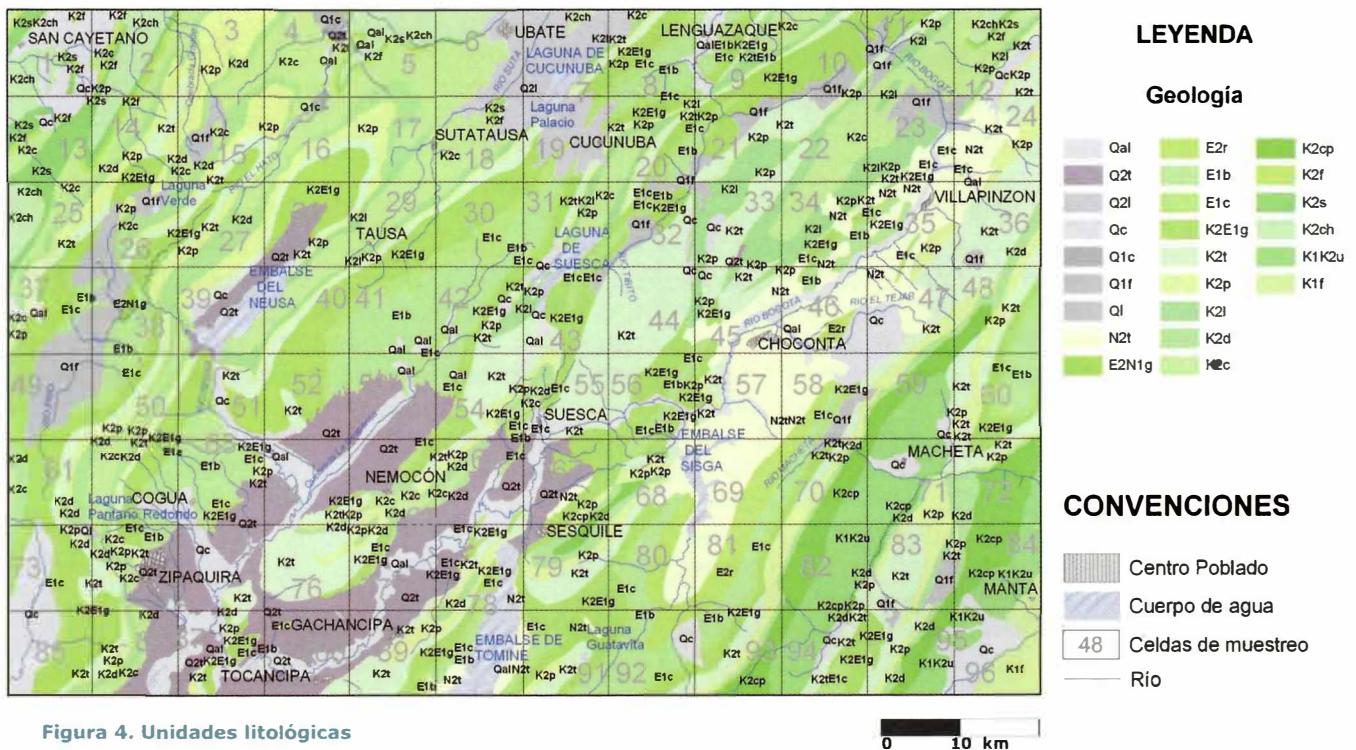


Figura 4. Unidades litológicas

La secuencia estratigráfica descrita, fue afectada por esfuerzos que generaron tres zonas estructurales: la occidental se caracteriza por fallas de cabalgamiento con vergencia al occidente con pliegues angostos y asimétricos; la zona central está limitada por las fallas de Sutatausa y Suralá, el fallamiento es sinuoso, con vergencia tanto al oriente como al occidente; los sinclinales son amplios y simétricos y los anticlinales angostos con flancos invertidos. En la zona oriental, las fallas son inversas de ángulos altos con componente transcurrentes y los pliegues son discontinuos y oblicuos a las fallas. (Ver **Figura 5.**)

El rumbo regional estructural es N45-50°E, pero hacia la parte suroccidental cambia a norte-sur y coincide con la presencia de diapirismo de sal, el cual se constituye en formador de estructuras como pliegues y fallas de corta longitud, y facilita los despegues de fallas, en este caso, como rampas laterales de corta longitud tal como se presenta en Zipaquirá, además de cierres estructurales muy simétricos en forma de domo, como se observa en la parte sur del anticlinal de Nemocón. Según las características estructurales, se subdivide la plancha en zonas: occidental, central y oriental.

### Recursos minerales:

El aprovechamiento de los recursos minerales en el área de la plancha 209 está orientado hacia los materiales de construcción (gravas y arenas), energéticos (carbón), industriales (sal, fosfatos y arcillas), aguas subterráneas y recursos geotérmicos. ver Figura 6.

El recurso energético identificado en el área y que lleva varias décadas en explotación es el carbón; se menciona también el petróleo considerado con posibilidades de encontrarse que puede haber dentro del área por estar presentes rocas y estructuras propicias para la generación, entrapamiento y acumulación de hidrocarburos.

**Minerales industriales:** Existe manifestación de arcillas, sal y fosfatos que han tenido gran tradición en su explotación.

Por su localización cercana a ciudades como Bogotá y Zipaquirá, entre otras, es una zona de interés para la exploración y explotación de materiales de construcción como arenas, gravas, arcillas y material de recebo.

Los recursos hídricos son de gran importancia en el área de estudio en lo que se refiere a embalses y acueductos. En el presente punto se hace énfasis únicamente en las aguas subterráneas por su relación con la geología. En el área existen unidades litoestratigráficas de moderada a gran importancia para el abastecimiento de aguas subterráneas, por esto, utilizada principalmente para el consumo humano y para riego.

Los recursos geotérmicos se encuentran representados en las fuentes termales conocidas en la plancha 209. Las fuentes termales se encuentran principalmente asociadas a unidades litológicas del Cretácico Superior, se presentan en altitudes entre 2.300 a 2.700 msnm, tienen pH entre 6.5 a 7.5 y han sido clasificadas por su temperatura como tibias a calientes y químicamente por aniones como bicarbonatadas y por cationes cálcica a sodio-potásica.

El origen de las aguas de estas fuentes no se ha definido, pero si se puede establecer una relación con la tectónica del área, al estar asociadas a fallas longitudinales, hecho que podría indicar un origen relativamente profundo de las aguas y que han aprovechado zonas de debilidad y permeabilidad para su ascenso. ( Alfaro, C. ; et.al\_.2003 )

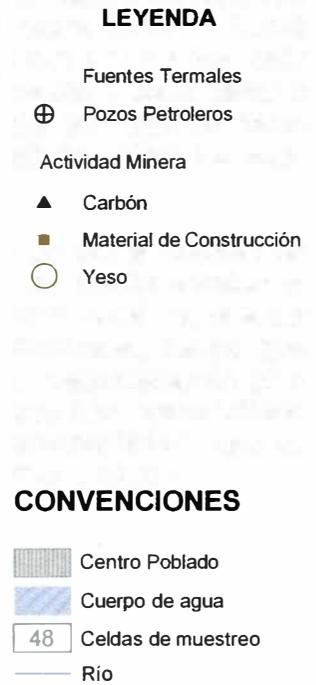
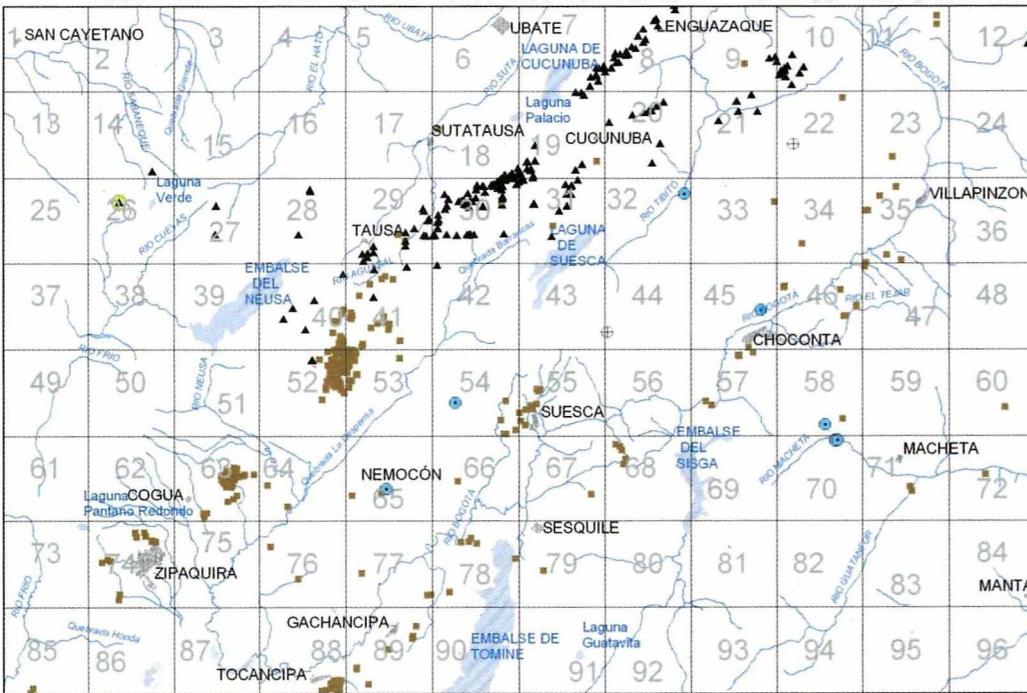
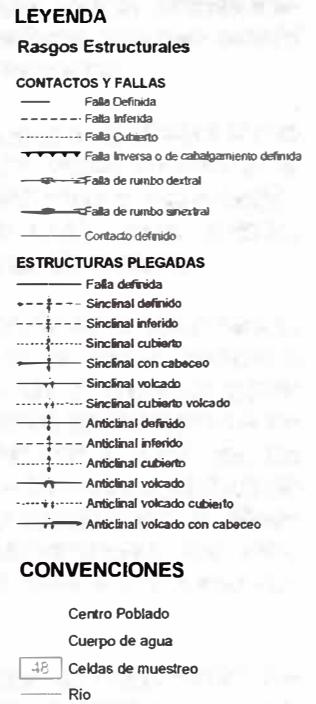
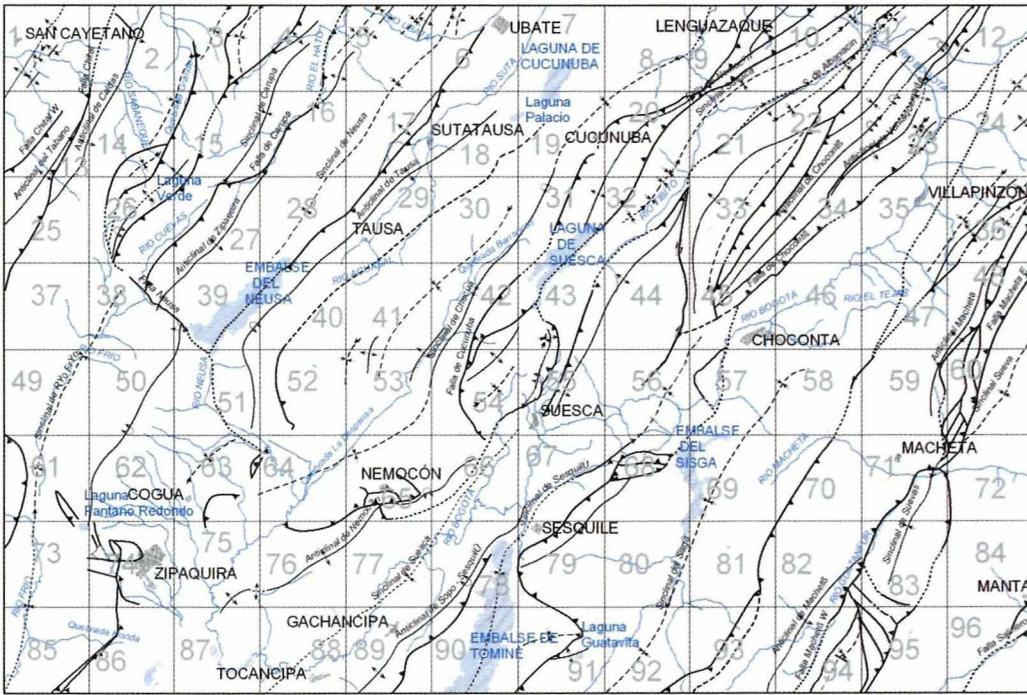


Figura 6. Recursos minerales



## 2. METODOLOGÍA CARTOGRAFÍA GEOQUÍMICA

La metodología utilizada en las diferentes etapas del trabajo incluye actividades de campo, de laboratorio para los análisis químicos de muestras y procedimientos estadísticos aplicados en la interpretación de los datos e información, en ambiente SIG (Sistema de Información Geográfica).

### Trabajo de campo

El muestreo se efectuó de acuerdo con los parámetros establecidos en el Manual de Campo para el Atlas Geoquímico de Colombia (INGEOMINAS, 2000), el cual cumple con normas internacionales como las del FOREGS (*Forum of European Geological Surveys* Salminen, 1998), y el proyecto internacional. "A global geochemical database, IGCP 259 y 360, (Darnley et al., 1995). De esta manera, se hizo un diseño de muestreo aleatorio, es-

tratificado, balanceado, basado en una red de muestreo bidimensional y por cuencas hidrográficas menores a 20 km<sup>2</sup>.

Los tipos de muestras recolectadas son: aguas, suelos y sedimentos activos. La información levantada en campo, para cada uno de los sitios de muestreo, fue consignada en los formularios de captura de datos de campo, diseñados para tal fin, de acuerdo con en el manual de campo antes mencionado.

En la Figura 7 se encuentran ubicadas las 96 sitios de muestreo, con su correspondiente cuenca hidrográfica o área de influencia.

### Análisis de laboratorio

En los laboratorios de INGEOMINAS, las muestras de agua se conservaron a baja tem-

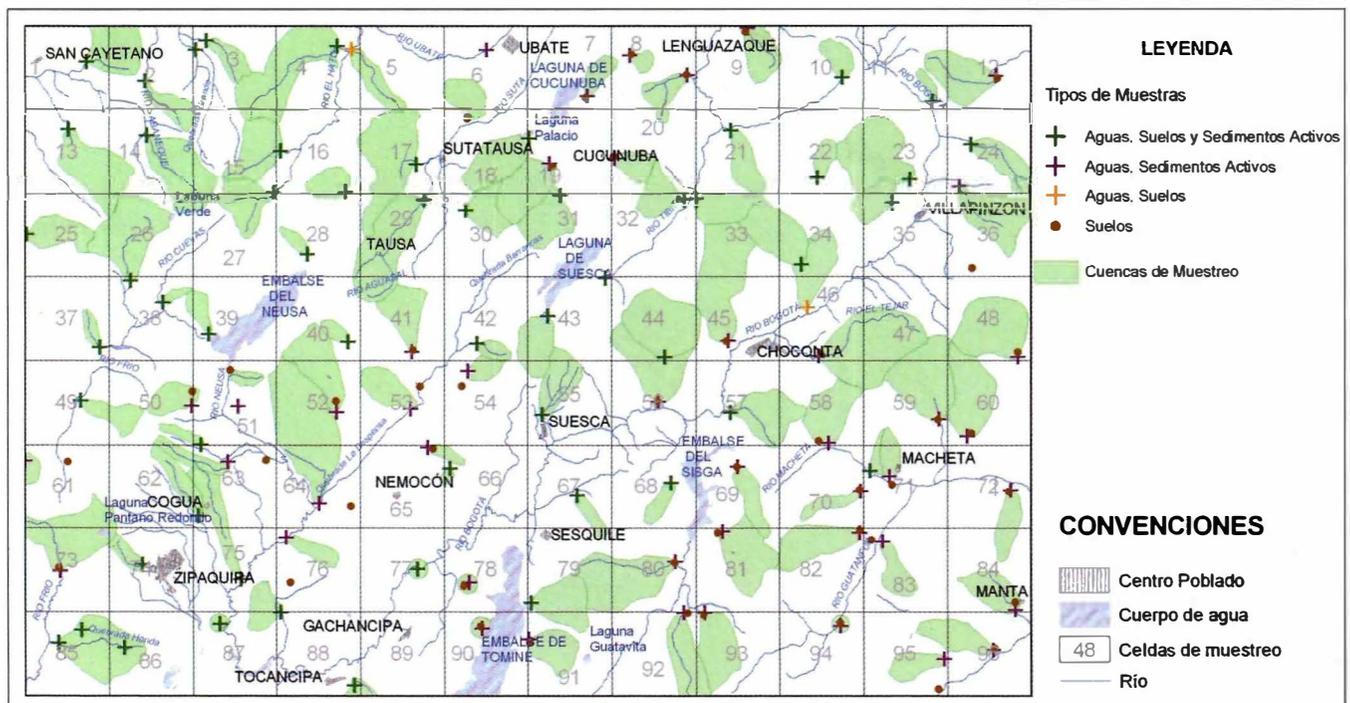


Figura 7. Subcuencas y sitios de muestreo

0 10 km

peratura, los suelos y sedimentos se sometieron a secado a temperatura ambiente (25°C) y, posteriormente, se realizó su preparación para efectuar los análisis químicos realizado en Activation Laboratories de Canadá.

En el caso de las muestras de agua, se utilizó la técnica y de alta sensibilidad, denominada Plasma acoplado a Masas (ICP-MS), para la determinación de 66 elementos con bajos límites de detección.

En sedimentos y suelos se analizaron 48 elementos, mediante el uso de las técnicas de Activación Neutrónica (INAA) y Plasma acoplado inductivamente (ICP). La primera de estas es una técnica no destructiva de análisis total, mientras que para la segunda se requiere colocar la muestra en solución; para tal efecto, se usó el ataque de digestión con cuatro ácidos: HF, HNO<sub>3</sub>, HCl y HClO<sub>4</sub>.

En la Figura 8 se muestran, en la tabla periódica, los elementos químicos analizados en

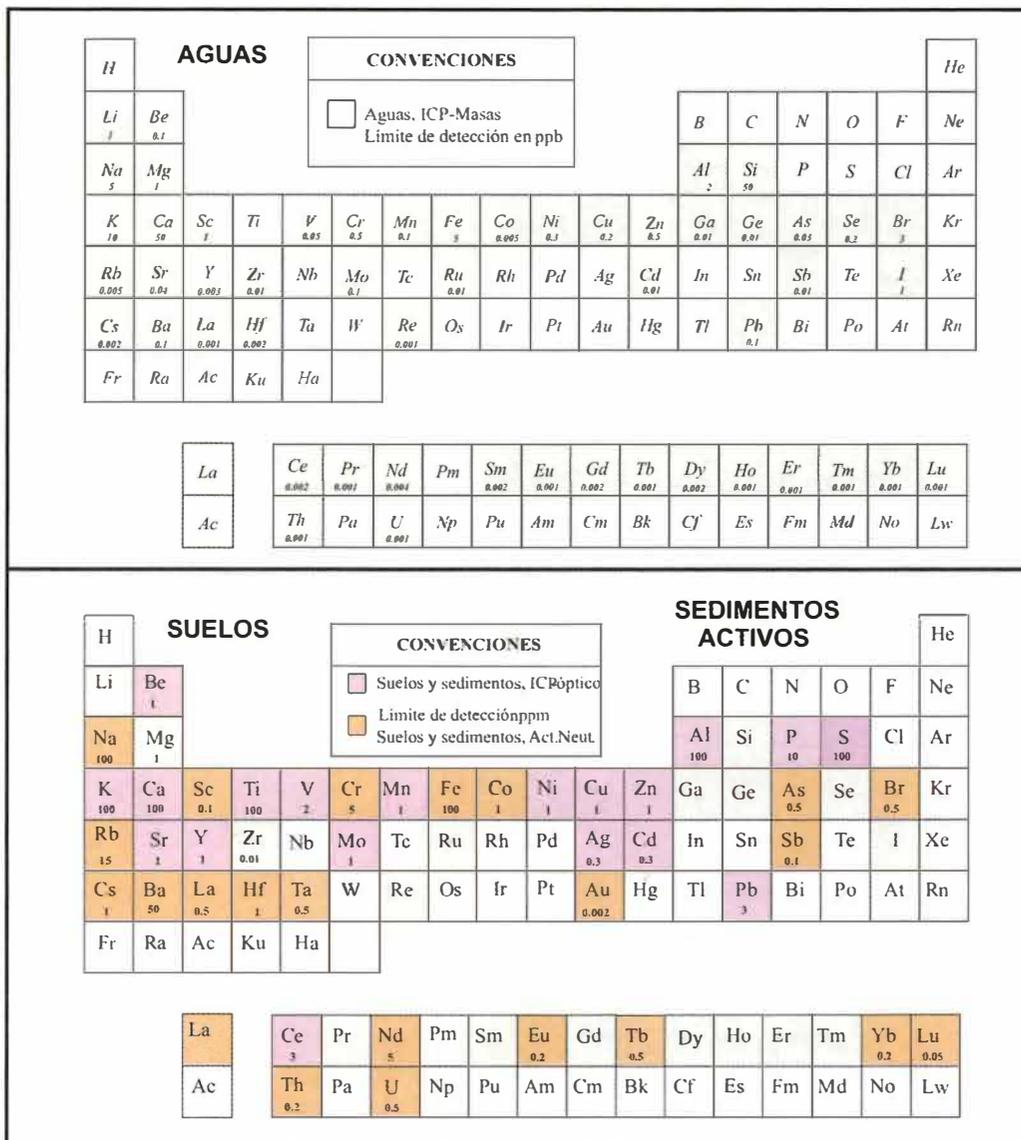


Figura 8. Tabla periódica de elementos analizados

aguas, suelos y sedimentos activos, con la correspondiente técnica analítica utilizada y el respectivo límite de detección. Para el control de calidad de resultados analíticos en los laboratorios se analizaron muestras por duplicado y patrones o estándares de referencia con valores certificados.

### Tratamiento y análisis de la información.

La metodología general se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 9, que sintetiza la metodología de análisis aplicada al procesamiento de datos e interpretación de los resultados químicos obtenidos.

Para la interpretación de los resultados geoquímicos desde el punto de vista ambiental, se tienen en cuenta varios factores como son el tipo de muestra (suelo, sedimento o agua), la normatividad existente tanto a nivel nacional como internacional, los elementos potencialmente peligrosos (EPP), tipo de análisis químico y factores de enriquecimiento.

Para las muestras de agua se tiene en cuenta el Decreto 475/98 de la legislación colombiana para calidad del agua; para suelos y sedimentos no existe normatividad colombiana, de manera que en el caso de suelos se utilizan los valores de referencia del Ministerio de Vivienda, Planeación y Ambiente de Holanda, VROM (1991,1994) y para sedimentos se compara con el contenido normal en *shales*, por ser común este material geológico en la

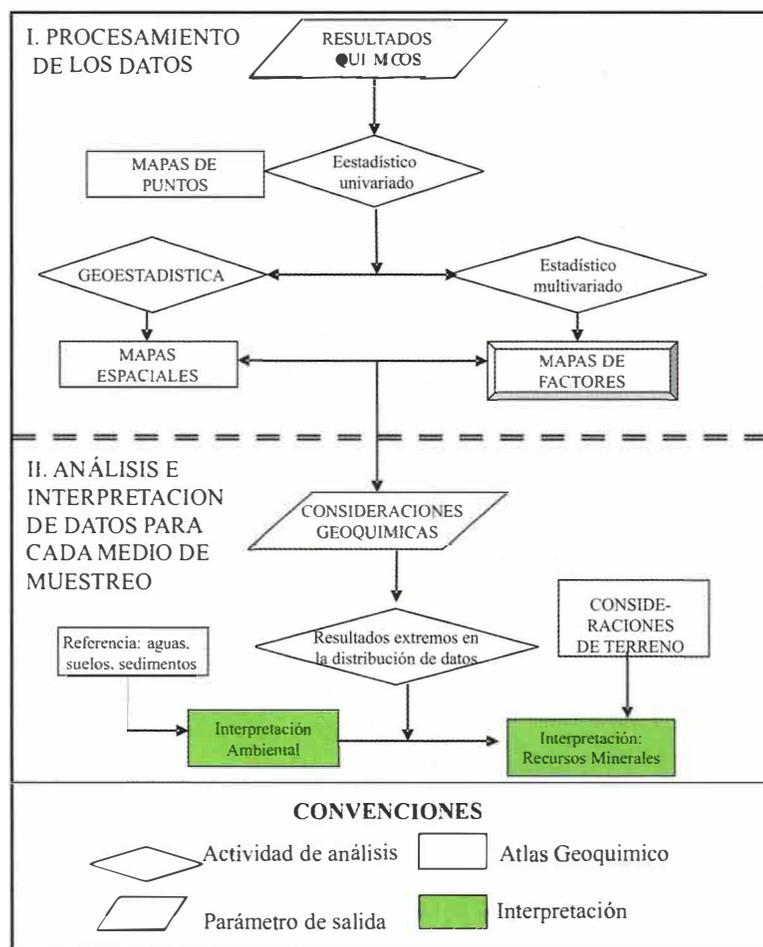


Figura 9. Metodología para procesamiento e interpretación geoquímica

zona de estudio y presentar contenidos altos en varios elementos químicos.

Finalmente, se muestra en los mapas el rango de peligrosidad teniendo en cuenta el tipo y contenido de elemento así: para el Cd, Pb, Hg, As se considera alto, medio para la combinación de elementos mayores con otros traza (Co, Cr, V, etc.) y bajo para elementos mayores.

Para exploración de recursos, se tienen en cuenta los valores extremos y los mapas de grupos de elementos, relacionándolos con las unidades geológicas y la presencia de recursos minerales, teniendo cuidado con aquellos sitios ubicados en zonas de conocida contaminación antrópica, como algunos de la Sabana de Bogotá.

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN GEOQUÍMICA

En la metodología anterior se describió el tratamiento estadístico realizado a los datos, enseguida se presenta lo relacionado con los análisis de los datos de campo, que son en su mayoría de tipo descriptivo.

#### AGUAS

Las aguas muestreadas corresponden principalmente a quebradas de cuencas menores de 20 km<sup>2</sup>, sin embargo en algunos casos se tomaron aguas de canales de riego denominados en la Sabana de Bogotá como vallados, también algunos afluentes a embalses o lagunas de corta longitud, es decir menores a 3 km.

Dependiendo del sitio de la toma de la muestra de agua, así mismo es la calidad de la misma; en los páramos el agua es limpia, transparente, mientras que hacia la Sabana es turbia y con mal olor; es en este último

tipo de aguas donde presenta mayor variabilidad en sus propiedades fisicoquímicas.

Estas características del agua se reflejan en la composición química de las mismas diferenciándose dos grupos, las aguas provenientes de la Sabana de Bogotá (con altos contenidos de la mayoría de elementos químicos) y las de las laderas de las montañas, afectadas por las características geológicas de la zona tales como presencia de carbón, *shales*, sal, etc.

El rango de pH varía desde muy ácido hasta muy básico, sin embargo el rango general está entre 5,5 a 7,5, relativamente neutro. Los puntos correspondientes a pH muy ácidos (<5) desde 2,9 a 5, corresponden en su orden a las quebradas Palacio (celda 18), río Charco de Nutria (54), quebrada Perico (65), quebrada Chorrillo (52) y quebrada Palcaguaita (8DC), mientras las celdas con pH >8 corresponden a: quebrada Media Luna con pH de 12,6 (celda 7), quebrada Zanja (31), quebrada La Chorrera (13) y quebrada El Volcán (19); estos puntos con alto contraste de pH se encuentran en la zona industrial entre Zipaquirá y Ubaté (Figura 10).

Se encuentran valores de conductividad eléctrica mayores que 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al sureste, entre las poblaciones de Tocancipá, Gachancipá y Zipaquirá, en los siguientes sitios: Vallado La Fuente (celda 88), quebrada Salinas (78), río Negro (74), río Charco de Nutria (54) y quebrada Perico (65).

Finalmente, la temperatura del medio muestreado, presenta valores anómalos en cercanías a las fuentes termales del área de estudio, como Suesca, Nemocón, Chocontá y Machetá.

#### Asociaciones Geoquímicas

A continuación se presenta la interpretación de los grupos de elementos separados mediante análisis factorial con coeficiente de correlación espacial >0,75 y explicación de

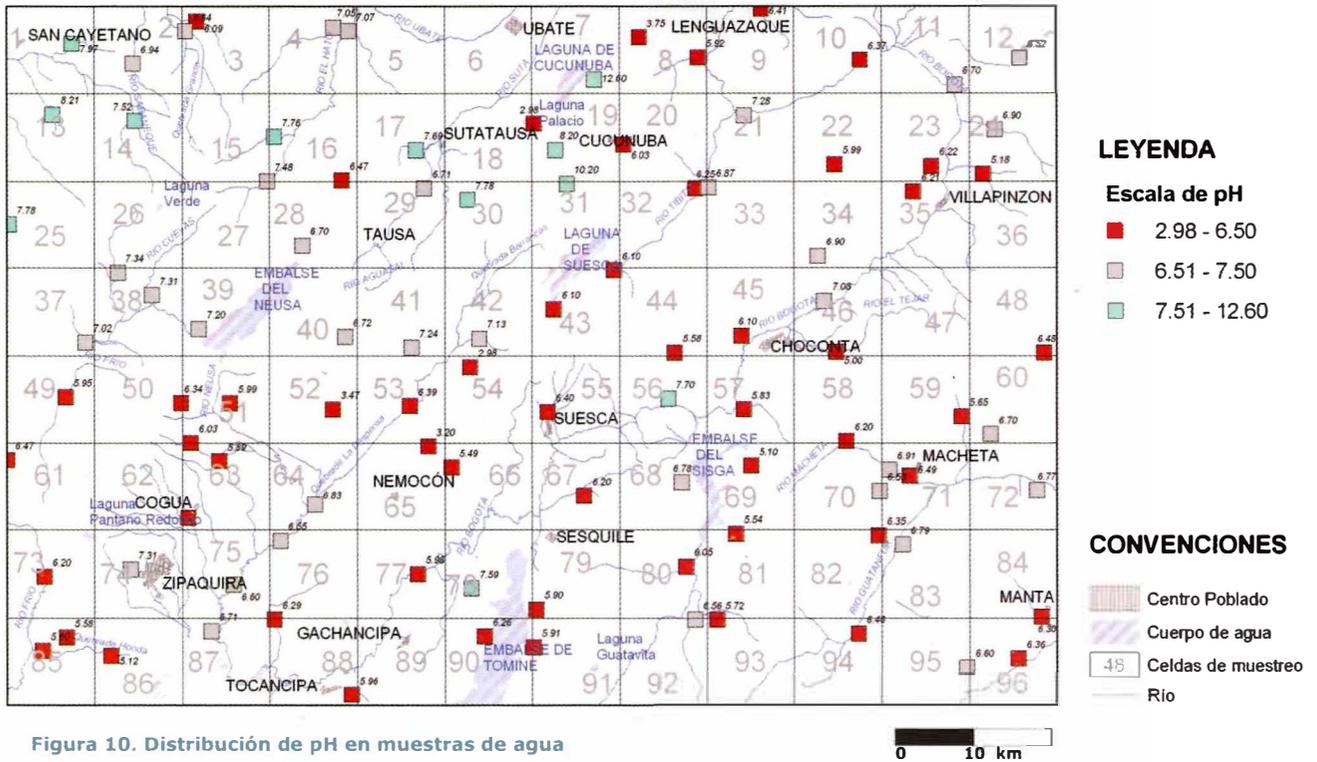


Figura 10. Distribución de pH en muestras de agua

variabilidad >75%, que se aprecian en los mapas de la Figura 11.

**Grupo 1:** Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Nd, Pr, Sm, Tb, Y, Yb. En el mapa se diferencian claramente dos zonas, una al oeste de menor contenido que la del este, se observan áreas de máxima concentración al sur de Ubaté, Chocontá, Lenguazaque y Nemocón, probablemente relacionadas con las fuentes termales y domos salinos.

El **Grupo 2:** Co, Mn, Ni, Zn. En el mapa se observa un alto contenido de los elementos de este grupo, hacia el centro del área de estudio, Suesca y Ubaté, en la cual existe minería de carbón.

El **Grupo 3** está formado por K, Na, Rb y Sr, que son elementos geoquímicamente relacionados, en este caso posiblemente por dilución de rocas calcáreas. En el mapa de este grupo se observa un incremento en el contenido en una franja central de dirección NE-SW

atravesando la totalidad de la plancha y un incremento en la esquina NW alrededor del municipio de San Cayetano.

En el mapa del Grupo 4, As y Sb, la distribución espacial, muestra una clara relación con la Sabana de Bogotá y la zonas industriales presentes en la plancha, mostrando un incremento de estos elementos por efectos antrópicos, mientras el incremento en el sector este de la plancha, al sur del municipio de San Cayetano, puede estar relacionado con la presencia de sulfuros en la Formación Churuvíta.

En algunos puntos de muestreo, los contenidos de elementos presentan valores extremos o estadísticamente altos (mayores al percentil 95), que se aprecian en el mapa de la Figura 12. Entre ellos se destacan las quebradas Palacio (Celda 18), Chorrillo (52) y Perico (65) y el río Charco de Nutría (54), cercanos a las fuentes de aguas termales de Suesca y Nemocón (Celdas 52, 54 y 65).

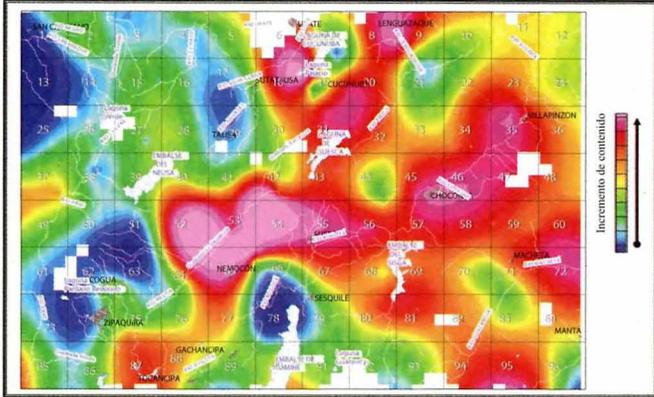


Figura 11.1 Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Nd, Pr, Sm, Tb, Y, Yb

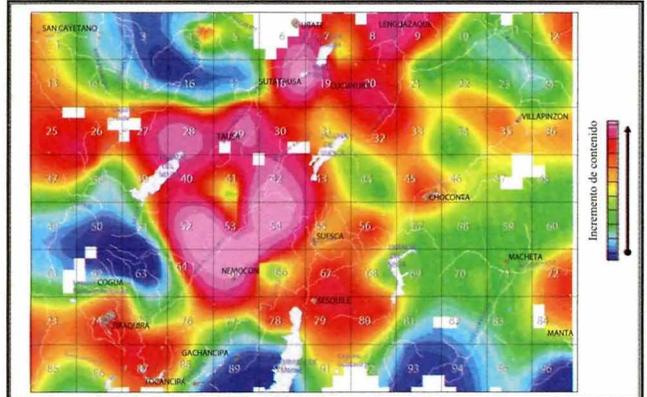


Figura 11.2 Co, Mn, Ni, Zn

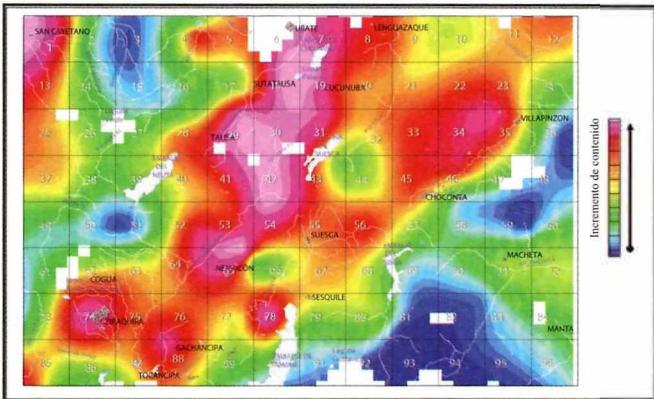


Figura 11.3. K, Na, Sr

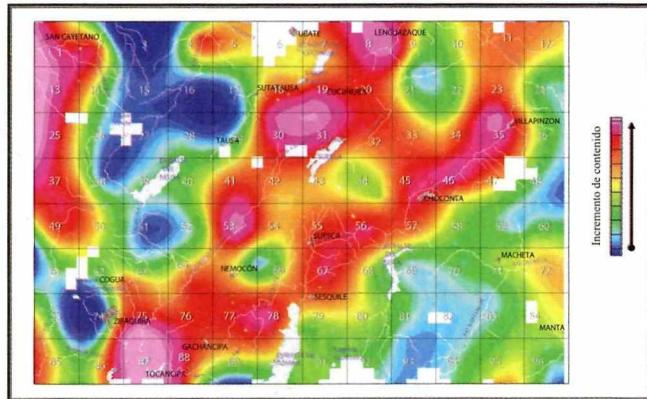


Figura 11.4. As, Sb



Figura 11. Distribución espacial de las asociaciones de elementos químicos para aguas

Para corroborar esta relación se realizó una comparación estadística entre los contenidos de algunos elementos traza (Ba, Cu, Mn, Pb, Sr) en aguas superficiales y fuentes termales, usando la prueba de Fisher (*Fisher's least significant difference (LSD) procedure*) que compara los valores de la media con intervalos de confianza al 95% y análisis de conglomerados para observar la semejanza o no de la composición de las diferentes fuentes termales.

Del análisis comparativo de la composición se observa que son relativamente similares, con variaciones para el caso del Mn y Sr. Por otra parte se observa similitud entre la relación composicional de las aguas superficiales de las quebradas Chorrillo (52) y Perico (64) con las aguas de las fuentes termales cercanas de Suesca y Nemocón, en tanto que los contenidos altos de las otras muestras, bien sea por la distancia (Q. Palacio-18), o por que el nacimiento se encuentra en otra dirección río Charco de Nutría -54), no se debe a fuentes termales.



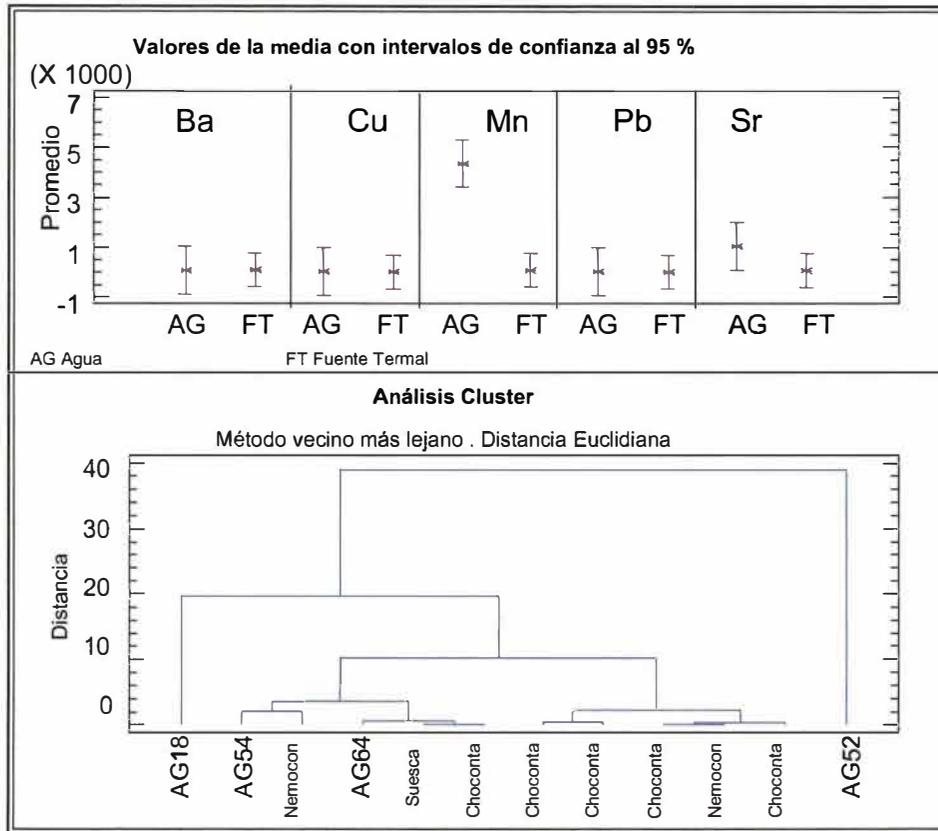


Figura 13. Comparación entre los contenidos anómalos de agua y las aguas termales.Z

nas, gravas y arcillas de depósitos aluviales recientes del Grupo Guadalupe, La quebrada el Zarzal no cumple con la norma porque supera el valor recomendado para mercurio.

Los mayores factores de enriquecimiento (relación entre el valor encontrado y el valor de referencia), se presentan para hierro en la celda número 18, perteneciente a la cuenca de la quebrada Palacio con un factor de 79, la celda número 54 de la cuenca del río Charco de Nutria con un factor de 91 y la quebrada Perico. El níquel presenta altos factores de enriquecimiento en las aguas de las mismas quebradas, el factor más alto (37) se presenta en el río Charco de Nutria.

El agua segura, de acuerdo con el Decreto 475 de 1998, es aquella que sin cumplir algu-

nas de las normas de potabilidad puede ser consumida sin riesgo para la salud humana en la eventualidad de un desastre o emergencia, que afecte el normal suministro del agua potable a la población y deberá ser ordenado por la autoridad sanitaria competente. Los requisitos para el agua segura son menos exigentes que para el agua potable.

Los nombres de las cuencas y de los elementos químicos que superan las concentraciones exigidas por el Decreto 475 de 1998, aparecen en la Figura 14.

Desde el punto de vista de los contenidos de elementos químicos, el 72% de las aguas de las cuencas estudiadas se podrían usar como aguas seguras. El 28% no cumplen porque superan las concentraciones recomendadas,

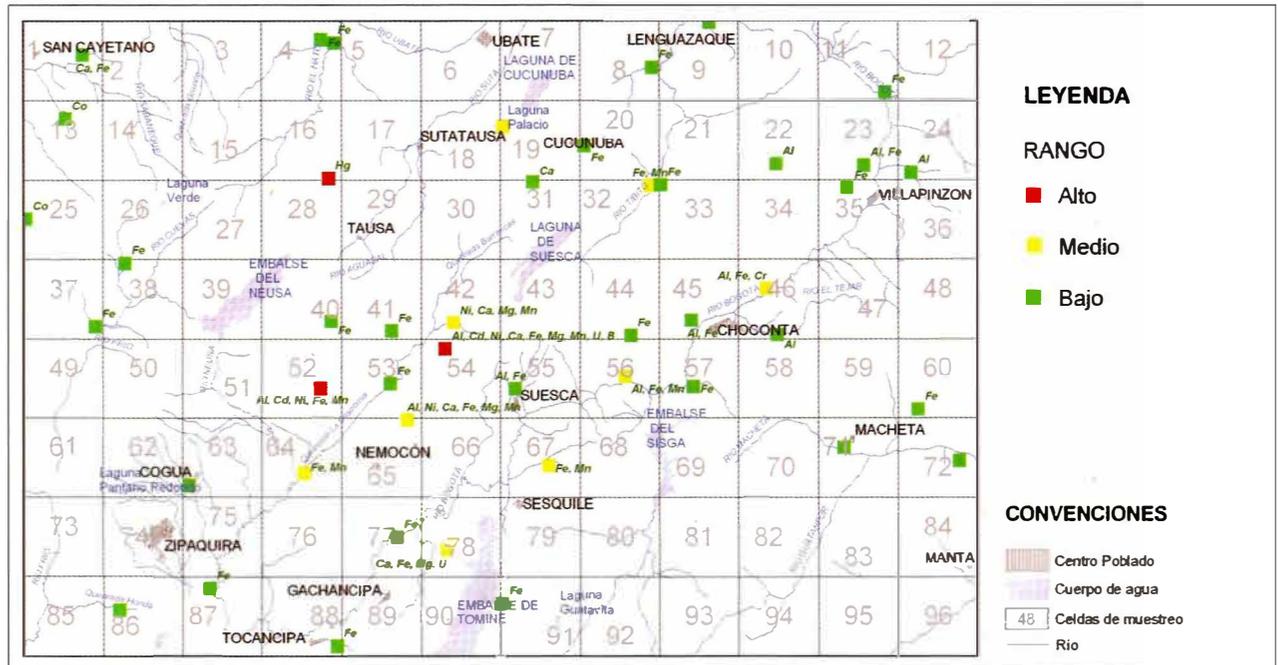


Figura 14. Elementos que superan los valores recomendados al Decreto 475 (calidad de agua).



especialmente para hierro en 24 cuencas y en seis cuencas superan el valor recomendado para calcio, magnesio, aluminio, níquel y manganeso.

### Calidad organoléptica

Algunos elementos químicos pueden afectar el olor, el sabor, el color y la apariencia del agua. Además pueden presentar problemas de corrosión y desteñido en el caso de que se usen para actividades industriales (USEPA, 1999).

Las cuencas que superan las concentraciones de Al, Fe y Mn para aguas potables y Ca y Mg para aguas seguras, también superan los valores recomendados por USEPA (1999) para calidad organoléptica. Las quebradas Media Luna, Aguasal, El Cajón, La Zanja, Salinas, y los ríos Charco de Nutria y Río Negro superan el valor recomendado para sodio. Las quebradas Palacio y La Alberca, además, tienen concentraciones superiores a las recomendadas para sodio y potasio. La quebrada El Perico y

vallado La Fuente superan el valor recomendado para potasio.

### Destinación del agua según el uso (Decreto 1594 de 1984).

Por uso agrícola del agua se entiende su empleo para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias y por uso pecuario el empleo del agua para el consumo del ganado en sus diferentes especies y demás animales, así como para otras actividades conexas y complementarias que el Ministerio de Salud o la Emar establezcan. Para uso agrícola la norma tiene en cuenta los siguientes elementos: Al, As, Be, B, Cd, Zn, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se y V. Las muestras de agua del río Charco de Nutria superan las concentraciones recomendadas de Al, Fe, Mn y Ni; la quebrada El Perico lo supera para Fe, Mn y Ni; la quebrada Palacio para Fe y Mn; la quebrada Chorrillo para Mn y Ni y el río Ovejero para Mn.

Para fines pecuarios se pueden usar las aguas de todas las cuencas, menos la del río Charco

de Nutria que no cumple con el valor recomendado para aluminio. Además el potencial de hidrógeno debe estar entre 4,5 y 9,0 unidades. Los sitios de muestreo con pH menor a 4,5 son: quebrada Palacio, quebrada Charco de Nutria, quebrada Perico, quebrada Chorriillo, quebrada Palasagueta y con pH superior a 9.0 quebrada Zanja y quebrada Media Luna.

### Suelos

Por la geomorfología de la zona de estudio, caracterizada principalmente por tener una región montañosa y otra de planicie correspondiente a la Sabana de Bogotá, los tipos de suelos son muy variables.

Cada tipo de suelo presenta características especiales que se observan en las muestras, tales como color, textura, estructura, humedad, etc., estas propiedades se anotaron en los formatos de campo. En muchos casos no fue factible tomar la muestra de suelo en el mismo sitio de la toma de muestra para agua y sedimento, por esta razón existen puntos con diferentes coordenadas.

### Asociaciones Geoquímicas

A continuación se presentan los componentes o grupos de elementos, resultantes del análisis factorial, extractando los que presentaron correlaciones mayores a 0,75 y explicación de varianza acumulada hasta el 75%, que aparecen en los mapas de la **Figura 15**.

En el mapa del **Grupo 1: Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th**, se observan los contenidos más altos al NW en San Cayetano, al SW cerca a Zipaquirá y al SE entre Manta y Machetá, al parecer se encuentran relacionados con la presencia de unidades litológicas cretácicas de origen marino.

En el mapa del **Grupo 2: As, Cr, V<sub>2</sub>** se observan altos contenidos al NE cerca San Cayetano, al SW cerca de Zipaquirá, al N cerca Lenguazaque y al SE cerca de Machetá, para los cuales se consideran dos tipos de aporte:

uno de origen geológico (San Cayetano, Machetá y Zipaquirá) y el otro de origen antrópico, debido a la zona agroindustrial ubicada entre Cogua y Ubaté.

El **Grupo 3 es Co, Cu, Ni**, los contenidos más altos se encuentran al E, en una franja NE (San Cayetano) a SW (Zipaquirá) y al SE (Machetá-Manta), también se consideran dos aportes, uno debido a las unidades litológicas cretácicas de origen marino y el otro por la actividad minera del carbón, específicamente en la región de Lenguazaque.

Finalmente, para el **Grupo 4: Be, K, y Rb**, la distribución espacial de contenidos altos es similar a las anteriores, resaltando de nuevo los límites W (San Cayetano) y SE (Machetá-Manta), probablemente originados por los *shales* del cretácico inferior, presentes en esta zona.

En algunos puntos de muestreo de suelos, se encuentran **contenidos extremos** altos o anómalos, como se aprecia en el mapa de la **Figura 16**. Se resaltan hacia el oeste elementos como Pb, As, Fe, Cu, Br; en la franja central Ubaté-Tocancipá: Br y Sb y hacia el este algunas tierras raras y radioactivos como Ce, La, Yb, Nd, Th. Se destaca el sitio de la Celda 25 con elementos como As, Cu y Mo, entre otros.

### Calidad ambiental de los suelos

Para la interpretación de los datos desde el punto de vista ambiental se comparan las concentraciones de los elementos químicos considerados como elementos potencialmente peligrosos encontrados en los suelos, contra los valores propuestos por el VROM (1994) y los valores promedio reportados por Kabata y Pendias (1992). Los elementos químicos que superan estas concentraciones propuestas como referencia en suelos para uso agrícola, desde el punto de vista de su toxicidad, aparecen con el nombre de la respectiva cuenca en la **Tabla 16** y el mapa de estos sitios en la **Figura 17**.

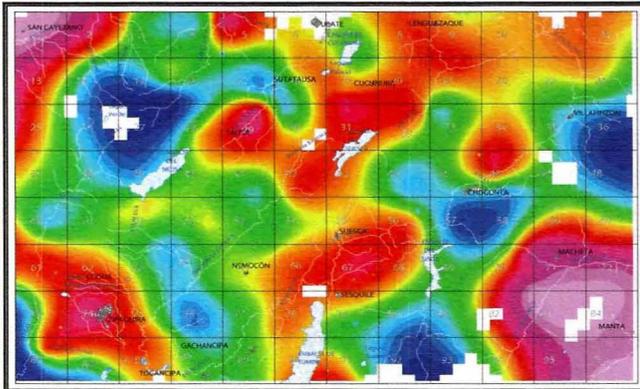


Figura 15.1 Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th

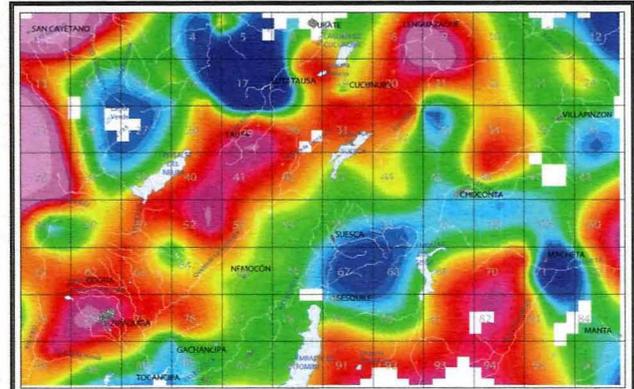


Figura 15.2 As, Cr, V

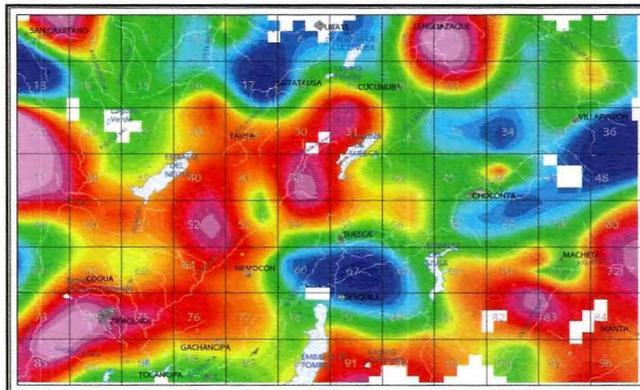


Figura 15.3. Co, Cu, Ni, Sc.

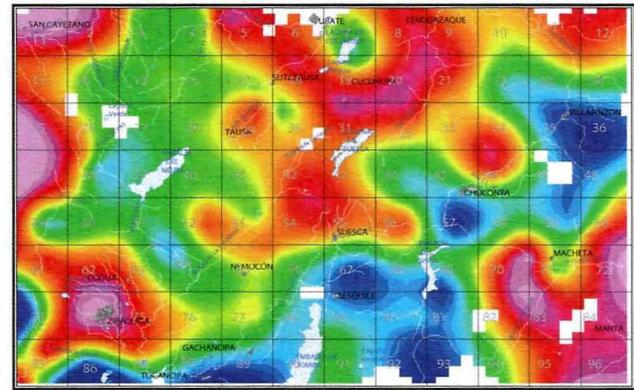


Figura 15.4. Be, K, Rb

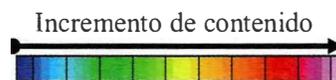


Figura 15. Distribución espacial de las asociaciones de elementos químicos para suelos

El 77% de los suelos estudiados en la plancha 209 Zipaquirá, no supera los valores de referencia de fitotoxicidad establecido para los elementos químicos en suelos dedicados a la agricultura. El 23% supera las concentraciones especialmente para vanadio, cadmio y zinc. Los suelos de las cuencas de las quebradas Canutillal (1), Arenosa (8) y el río Yayatá (25), superan los valores de referencia para el mayor número de elementos.

### Fertilidad de los suelos

Los elementos químicos (P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn, Mo y Zn), en ciertos rangos de concentración, son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La mayoría de los suelos de las cuencas estudiadas están dedicados a la agricultura. El contenido de los elementos químicos reportados son totales, por lo tanto no representan exactamente la fracción del elemento biodis-



ponible para la planta. No obstante, para la interpretación de la fertilidad de los suelos, se comparan las concentraciones de los elementos químicos considerados como esenciales desde el punto de vista agrícola con los valores promedio obtenidos a nivel mundial por Connor y Shacklette (1976). Los elementos fósforo, magnesio, y hierro, se presentan en concentraciones apropiadas desde el punto de vista de la fertilidad, en más del 88% de los suelos de las cuencas estudiadas.

Se presentan deficiencias de potasio, sodio, calcio, cobre, manganeso y molibdeno, en más del 80% de los suelos de las cuencas estudiadas.

### Sedimentos activos

Debido a las características del área de estudio se presentan dos tipos de drenaje cuyos sedimentos reflejan estas propiedades: los asociados a la región montañosa de bajo transporte constituidos por arenas medias a gruesas, de forma subangular, cuarzosas y con un porcentaje representativo fragmentos líticos y las de los drenajes de la Sabana, con sedimentos de arenas muy finas a finas, lodosas o lodolitas. Los puntos de muestreo de agua corresponden a la de los de sedimentos activos, en la celda 5 cerca a Ubaté no fue posible recolectar este tipo de muestras.

### Asociaciones Geoquímicas

Mediante análisis estadístico multivariado se obtuvieron cuatro componentes principales que resumen el 67% de las variables o elementos químicos y muestran entre sí un alto factor de correlación; su distribución espacial se observa en la **Figura 18**.

**Grupo 1:** Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, presenta altos contenidos al NW y W (San Cayetano) y al SE extendiéndose hasta Manta y Machetá; en la franja central de N a S (Lenguazaque a Zipaquirá, respectivamente).

En el mapa del **Grupo 2:** Cu, Ni, V, Sc, se aprecia un mayor nivel en el contenido de estos elementos, hacia el sector entre el Embalse del Neusa y la Laguna de Suesca (al sur de Ubaté), debido probablemente a la actividad minera del carbón.

El **Grupo 3** muestra la asociación del Lu e Yb, el valor más alto se encuentra al SE entre Machetá y Manta.

El **Grupo 4** formado por el par As-Sb tiene un alto coeficiente de correlación (0.93) y un porcentaje de explicación de varianza del 87% se resalta el alto contenido de estos elementos en una franja sur oeste –nor este (entre Zipaquirá y Lenguazaque), la cual coincide con la zona de actividad minera del carbón y en el límite oeste del área de estudio.

Los sitios de muestreo con valores estadísticamente extremos (por encima del percentil 95) y su distribución puntual se muestran en la Figura 19.

Hacia el NW (San Cayetano) se observan valores extremos para elementos como Ca, Cd, Mo, S, Sb, los cuales pueden encontrarse asociados a las unidades cretácicas aflorantes en este sector. En el área de Lenguazaque se observan valores extremos de Ba, Fe, Mn, Sb, entre otros, asociados probablemente a la actividad minera del carbón; al suroeste (Zipaquirá) Ag, Ba, Ce, Cu, La, posiblemente por diapirismo de sal y al sureste (Machetá-Manta) Ce, Au, Hf, por los *shales* de la formación Chipaque.

### Calidad ambiental relacionada con los sedimentos activos.

El estudio de los elementos químicos potencialmente peligrosos en los sedimentos permite conocer y complementar el estudio de la contaminación de las aguas. Para su interpretación ambiental se tienen en cuenta los valores de referencia reportados por Turekian y Wedepohl (1961) y McLennan (2000) en *shales*. Los elementos químicos

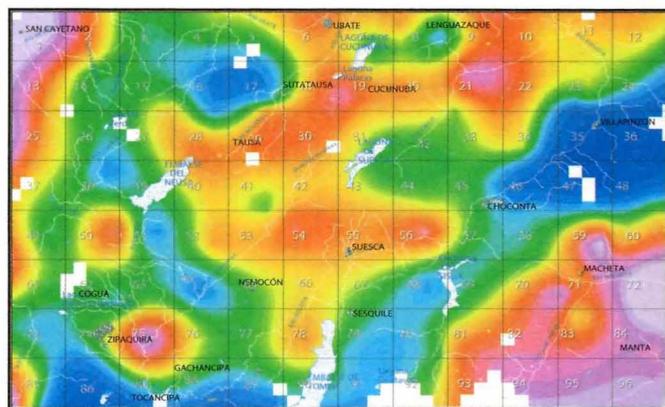


Figura 18.1. Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th

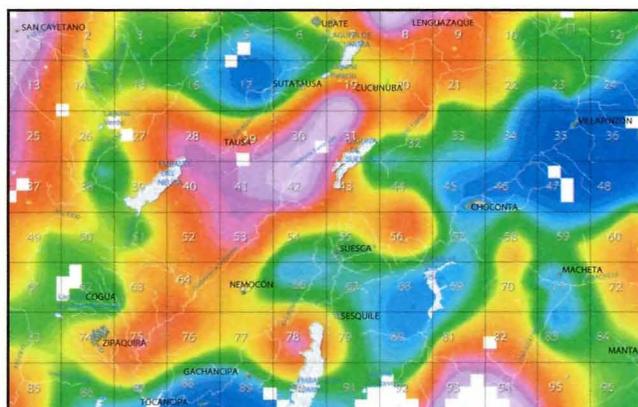


Figura 18.2. Cu, Ni, V, Sc

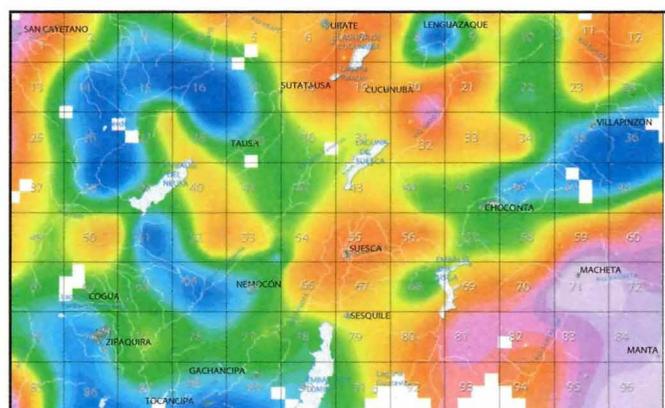


Figura 18.3. Lu, Yb

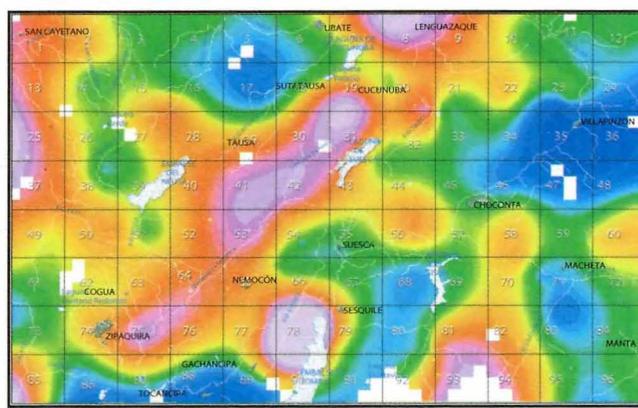


Figura 18.4. As, Sb

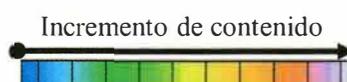


Figura 18. Distribución espacial de las asociaciones de elementos químicos para sedimentos

que superan estos valores y la ubicación de estos sitios de muestreo se observan en el mapa de la Figura 20.

Los elementos potencialmente peligrosos que superan en mayor proporción las concentraciones sugeridas por Turekian y Wedepohl (1961), en las 95 cuencas muestreadas son: cadmio que supera el valor aproximadamente en el 95% de las cuencas, cinc en el 60%, plomo en el 45%, molibdeno en el 38% y vanadio en el 27%. De estos elementos calcó-

filos, cadmio, cinc y plomo son considerados como muy tóxicos y accesibles (Förstner y Wittman 1975).

Los sedimentos, que superan los valores recomendados para el mayor número de elementos químicos, corresponden a las cuencas de las quebradas Arenosa (celda 8), Taitiva, Zanja, Salinas y ríos Neusa y Las Juntas.

Los mayores factores de enriquecimiento, que resultan de comparar la concentración

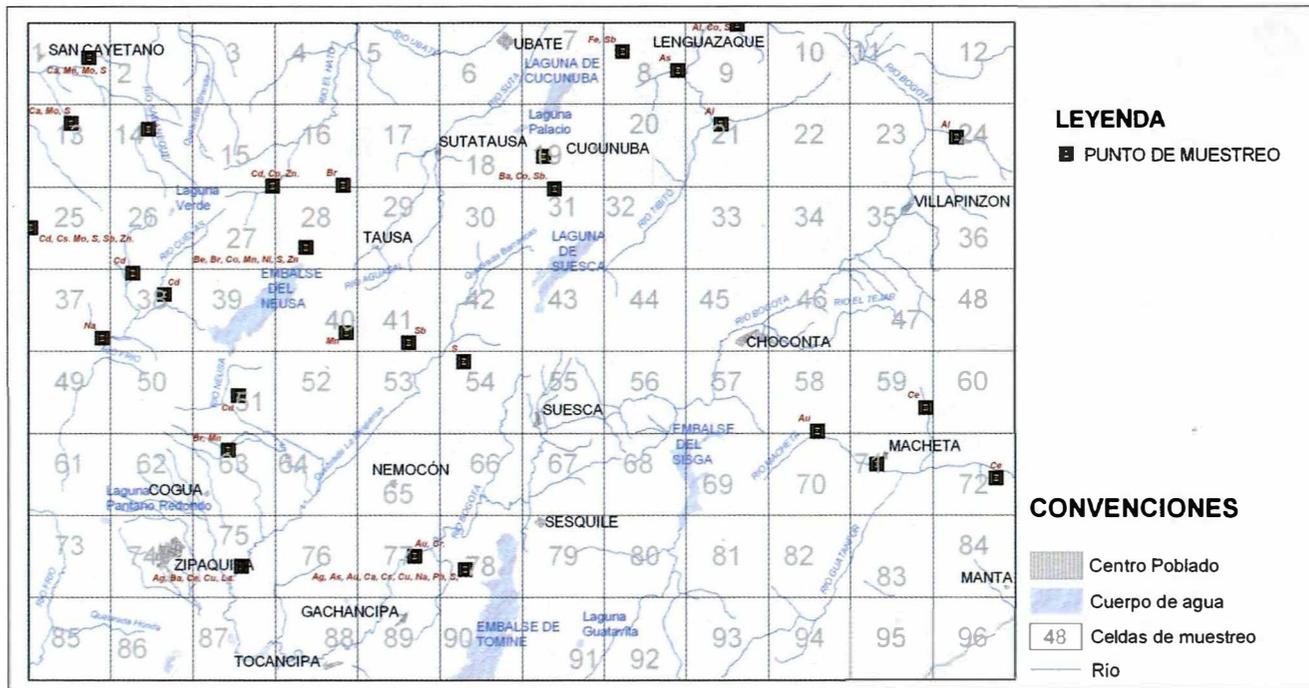


Figura 19. Valores extremos en sedimentos activos

0 10 km

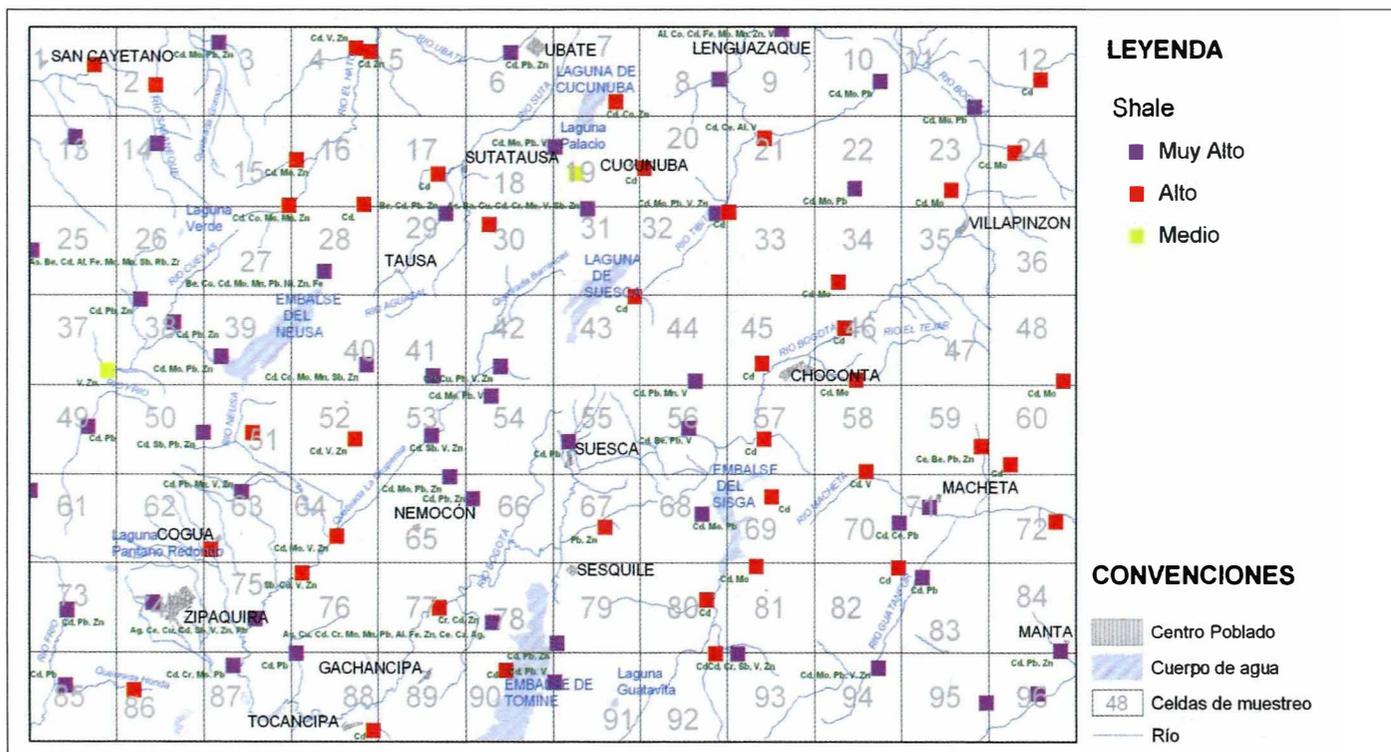


Figura 20. Elementos de sedimentos activos mayores al valor promedio en shale

0 10 km

del elemento en la celda con el valor tomado como referencia en shales, se presentaron para cadmio, en la cuenca del río Yayatá y en la cuenca del río Hato. El 15% de las muestras ubicadas en la parte occidental del anticlinal de Zipaquirá presentan factores de enriquecimiento iguales o superiores a 5. Estas muestras están ubicadas en las formaciones cretácicas de Chipaque y Guadalupe.

### **Perspectivas para exploración de recursos minerales**

Hasta el momento la interpretación de resultados se ha realizado con énfasis ambiental. A continuación se realiza la interpretación geoquímica para exploración de recursos minerales, mediante el análisis de los elementos de interés económico y la delimitación de zonas geoquímicas a partir de las asociaciones de elementos afines y valores extremos o anómalos.

### **Presencia y distribución de metales preciosos**

Debido a su importancia en recursos minerales, se hace especial énfasis en la distribución de los metales preciosos oro y plata, presentes en muestras de suelos y sedimentos (Tabla 1 y Figura 21).

Se encontraron contenidos para oro en muestras de sedimentos activos de 1 a 306 ppb y en suelos 1 a 222 ppb; para el caso de la plata el rango en los 2 tipos de muestras: 0,2 a 17.9 ppm en sedimentos y 0.2 a 9.1 en suelos.

Para sedimentos activos, el mayor valor de oro se ubica en la Quebrada Nápoles con 306 ppb, seguido de la Quebrada Salinas con 127 ppb y en el caso de la plata en el Río Neusa con 17.9 ppm. En otros sitios se presentan resultados más bajos: para oro, un Afluente del Río Machetá con 28 ppb, y un punto en el río Bogotá con 13 ppb; los demás valores

son menores a 7 ppb para oro y 3 ppm para plata.

En la Figura 21 se observa la presencia de oro y plata, tanto en suelos como en sedimentos, en los puntos que se mencionaron anteriormente. Se pueden plantear dos posibles zonas de interés en exploración de recursos metálicos usando como base los metales preciosos: al SW en el área de Zipaquirá –Sesquilé y al SW entre Manta-Machetá, en este sector cerca de la fuente termal de los Volcanes se observa el contenido más alto en oro en sedimentos activos.

os tipos de yacimientos minerales que se pueden encontrar en la plancha 209, relacionando las características geológicas del tipo de rocas sedimentarias, principalmente shales, con los resultados geoquímicos antes presentados, son los que se presentan en la Tabla 1.

### **Regiones geoquímicas**

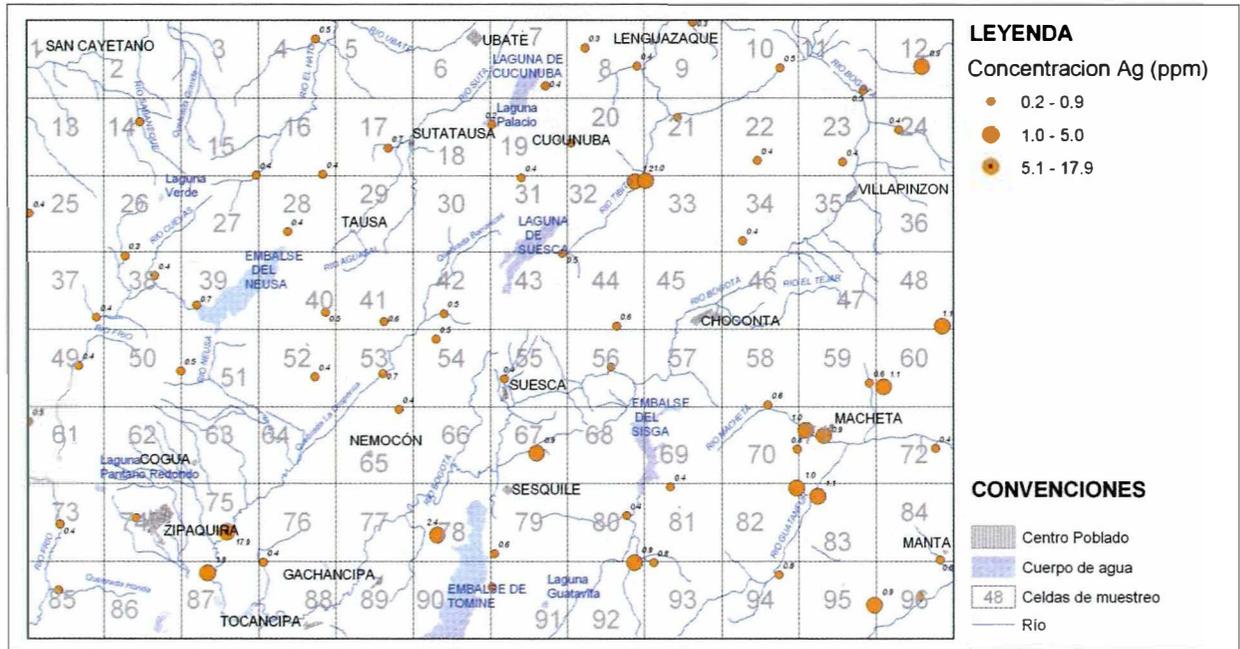
Se identifican dos regiones geoquímicas, que pueden ser consideradas de interés para exploración de recursos en la región de San Cayetano al NW y Machetá-Manta al SE, las cuales se encuentran relacionadas con la litología cretácica de origen marino, que se refleja especialmente en los altos contenidos de tierras raras, comparativamente, en la zona de estudio. En la región de Lenguazaque, se presenta influencia de la actividad minera del carbón en la composición química de los diferentes medios de muestreo, causando incrementos en los contenidos de elementos traza, principalmente en muestras de sedimentos y suelos. La región de Zipaquirá, por su asociación a eventos geológicos de las unidades litológicas cretácicas y el diapirismo salino, presenta incrementos en los contenidos de elementos como As, Ba, Cu, Sb, entre otros. Finalmente, para la Cuenca Alta del Río Bogotá, se pueden definir dos orígenes para los elementos en aguas, uno geológico hacia el nacimiento del río y posteriormente en su

Tabla 1. Tipos de yacimientos minerales asociados a rocas sedimentarias.

YACIMIENTO MINERAL	UNIDAD DE ROCA	DESCRIPCIÓN	EDAD DE MINERALIZACIÓN	INDICACIONES GEOQUÍMICAS	REGIÓN
SHALE-HOSTED Ni-Zn-Mo-PGE	QUÍMICA SEDIMENTARIA	Delgados estratos de pirita, vaesita (NiS <sub>2</sub> ), jordisita (MoS <sub>2</sub> amorfa) y esfalerita en subcuencas de shales asociados a chert fosfáticos y rocas carbonatadas.	Post Archeano. Los depósitos conocidos son del Cámbrico Temprano y Devoniano, sin embargo, pueden ser potenciales para depósitos de otras edades.	Valores elevados de Ni, Mo, Au, PGE, C, P, Ba, Zn, Re, Se, As, U, V y S en rocas y en sedimentos de río. El contenido orgánico correlaciona con contenidos en metales como Ni, Mo y Zn.	San Cayetano Zipaquirá Macheta-Manta
SEDIMENTARY EXHALATIVE Zn-Pb-Ag	CLÁSTICAS SEDIMENTARIAS: SHALES, SILTSTONE ARCILLOLITAS	Capas y laminas de esfalerita, galena, pirita, pirrotita y vestigios de calcopirita con o dentro de barita, en estratos sedimentarios marinos euxínicos clásticos. Los depósitos son típicamente de forma tabular a lenticular y rango de espesor de centímetros a cientos de metros.	Los principales eventos metalógenicos son Proterozoico medio, Cámbrico temprano, principios del Silúrico y Devonico medio a tardío.	Los depósitos son típicamente zonados con Pb con facies ricas en Zn. Cu es usualmente asociado con eventos exhalativos así como la barita, formación hierro hematita-chert, si se presentan, están usualmente asociadas a facies distales. Los sedimentos como calizas pelágicas interestratificadas con la zona de mena puede ser enriquecida en Mn.	San Cayetano Lenguazaque Macheta-Manta
IRISH-TYPE CARBONATE-HOSTED Zn-Pb	CARBONATOS SIN ROCAS IGNEAS ASOCIADAS	Esfalerita masiva, galena, sulfuros de hierro y lentes de barita asociada con calcita, dolomita y ganga de cuarzo. Los depósitos están estructuralmente controlados.	Los depósitos conocidos están en el Paleozoico y rocas encajantes más jóvenes.	Metales base elevados, valores de Ag y Mn en muestras de lodos y suelos; también, alto contenido de carbonatos, y por lo tanto el alto pH puede reducir efectivamente los lodos de los ríos.	San Cayetano Macheta-Manta
CARBONATOS-HOSTED DISSEMINATED Au-Ag	CLÁSTICAS SEDIMENTARIAS: SHALES, ARCILLOLITAS	Grano muy fino, oro del tamaño de micron y sulfuros diseminado en zonas carbonatadas. El oro se presenta eventualmente distribuido a través de zonas concordantes y brechas.	Principalmente terciario, pero puede ser de otra edad.	2 asociaciones geoquímica importantes: Au+As+Hg+W o ? Mo y As+Hg+Sb+Tl o Fe. Es importante el NH <sub>3</sub> en algunos depósitos importantes. Au:Ag 10:1 o mayor. Valores anómalos en rocas: As (100-1000 ppm); Sb (10-50 ppm); Hg (1-30 ppm).	Lenguazaque Zipaquirá
BLACKBIRD SEDIMENT-HOSTED Cu-Co	CLÁSTICAS SEDIMENTARIAS: SHALES, ARCILLOLITAS, ARENISCAS.	Pirita y (menor) pirrotita, cobaltita, calcopirita, arsenopirita y magnetita, aparece como diseminaciones, pequeñas venas y tabular y lentes en rocas sedimentarias. Alteración clorítica y brechas de turmalina están localmente asociadas con la mineralización.	Sin definir.	Enriquecido en Fe, As, B, Co, Cu, Au, Ag y Mn; puede haber decrecimiento en Ca y Na.	San Cayetano Zipaquirá Macheta-Manta
SEDIMENT-HOSTED Cu+/-Ag+/-Co	CLÁSTICAS SEDIMENTARIAS: SHALES, ARCILLOLITAS, ARENISCAS.	Diseminaciones de cobre nativo, calcopirita, bornita y calcopirita en una variedad de rocas sedimentarias continentales incluyendo shale negro, areniscas y calizas.	Proterozoico o más joven; proterozoico medio, Permico y Mesozoico inferior.	Valores elevados de Cu, Ag, Pb, Zn y Cd están determinadas en rocas encajantes, algunas con incrementos de Hg, Mo, V, U, Co y Ge.	San Cayetano Zipaquirá Macheta-Manta

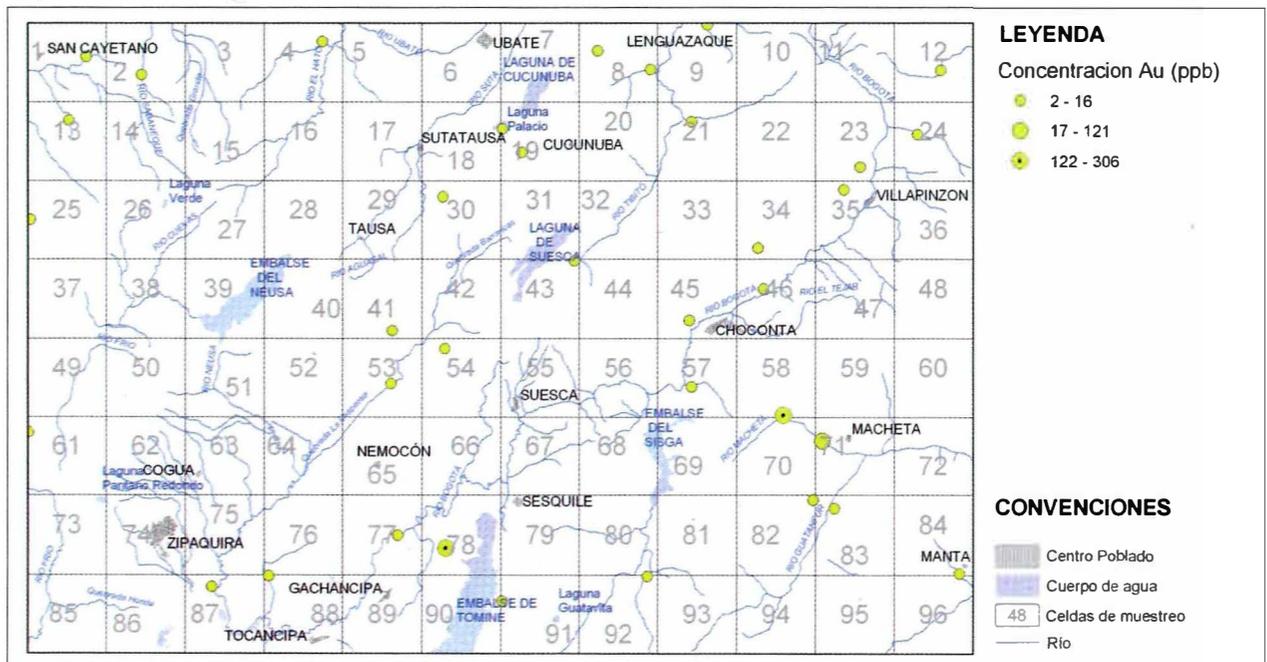
**Continuación Tabla 1. Tipos de yacimientos minerales asociados a rocas sedimentarias.**

YACIMIENTO MINERAL	UNIDAD DE ROCA	DESCRIPCIÓN	EDAD DE MINERALIZACIÓN	INDICACIONES GEOQUÍMICAS	REGIÓN
SEDIMENTARY-HOSTED, ESTRATIFORME BARITA	CLASTICAS SEDIMENTARIAS: SHALES, ARCILLOLITAS.	Sedimentary-hosted, cuerpos estratiformes o lentes de barita, que pueden ser ricos sobre decímetros en espesor y varios kilómetros de longitud. Las rocas ricas en barita (barititas) son comunmente en shale para depositos de Pb-Zn (SEDEX).	Los depósitos son hospedados por rocas del Arqueano, a Mesozoico pero son más comunes en rocas del fanerozoico, especialmente en el Paleozoico medio a tardío.	Bario enriquecido en la roca encajante de depositos Zn-Pb, altos contenidos de Zn, Pb, Mn, Cu y Sr, muestras de roca y sedimentos activos.	San Cayetano Zipaquirá Macheta-Manta
ARENISCAS-Pb	CLASTICAS SEDIMENTARIAS: ARENISCAS	Galena diseminada acompañada por esfalerita, en cuarcita basal transgresiva o areniscas cuarzosas limitadas a un basamento sialico.	Edad de mineralización no ha sido establecida con certeza; sin embargo los depositos han sido encontrados desde el Proterozoico medio al Cretaceo.	Geoquímica de superficie, sedimentos de río y suelos; analisis para Pb y Zn.	San Cayetano Cuenca Alta de Bogotá
COLOMBIA-TIPO ESMERALDAS	CLASTICAS SEDIMENTARIAS	Las vetas esmeraldíferas y las brechas se presentan encajadas principalmente en shales negros piritosos y en shales carbonosos, así mismo, asociadas a arcillolitas, areniscas, calizas y evaporitas. Las esmeraldas se presentan en racimos en rellenos de estructuras compuestas por carbonato-pirita-albita-cuarzo en echelon conjugadas y en brechas cementadas.	Los depositos colombianos se encuentran en shales de edad Cretaceo. Se considera casi contemporaneas .	Los shales dentro de los bloques tectónicos en los distritos mineros se presentan lixiviados en tierras raras, Li, Mo, Ba, Zn, V y Cr. Los sedimentos activos finos asociados a shales alterados tienen una proporción baja de K/Na. En las zonas de influencia se detecta Be.	San Cayetano Zipaquirá Macheta-Manta



0 10 km

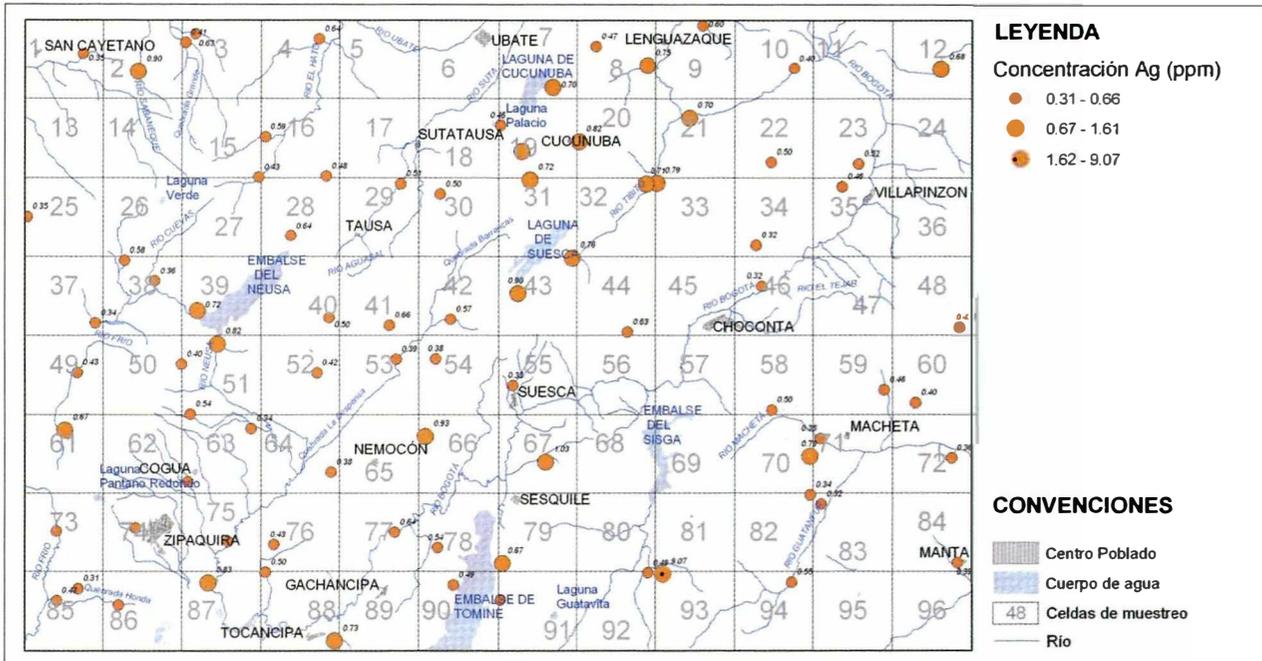
Figura 21.1. Sedimentos activos PLATA-Ag



0 10 km

Figura 21.2. Sedimentos activos ORO-Au

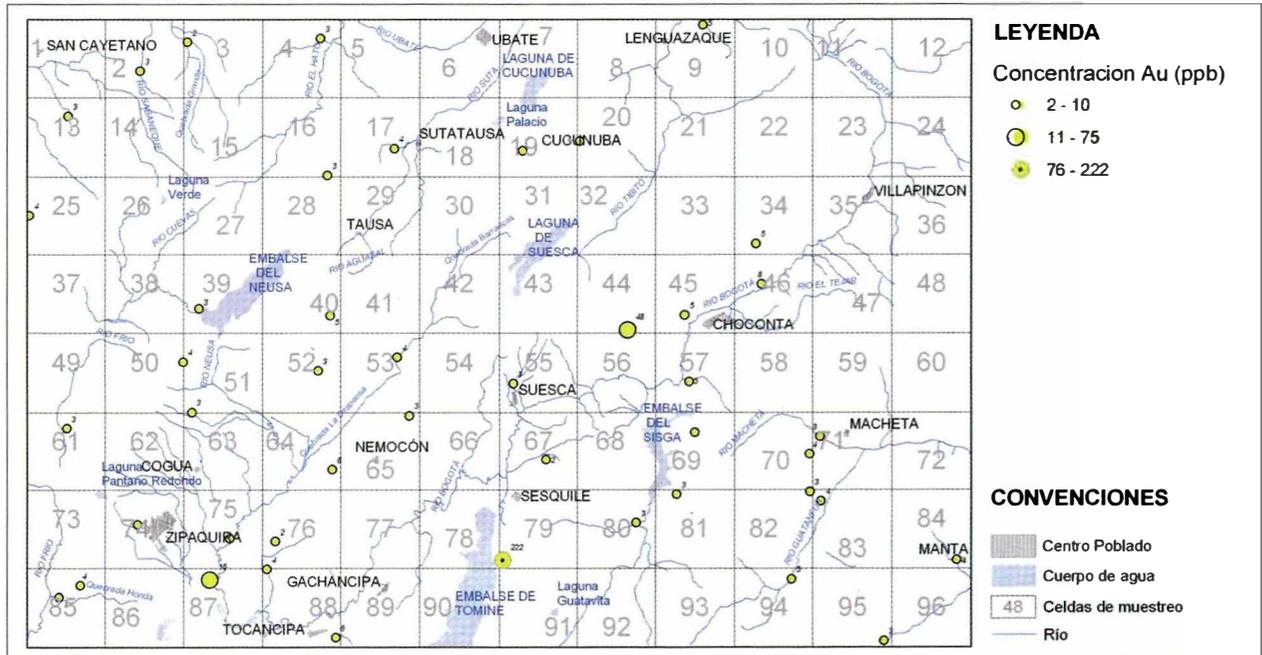
Figura 21. Concentración de metales preciosos en sedimentos activos y suelos



**LEYENDA**  
Concentración Ag (ppm)  
● 0.31 - 0.66  
● 0.67 - 1.61  
● 1.62 - 9.07

**CONVENCIONES**  
■ Centro Poblado  
■ Cuerpo de agua  
■ 48 Celdas de muestreo  
— Río

Figura 21.3.  
Suelos PLATA-Ag



**LEYENDA**  
Concentración Au (ppb)  
● 2 - 10  
● 11 - 75  
● 76 - 222

**CONVENCIONES**  
■ Centro Poblado  
■ Cuerpo de agua  
■ 48 Celdas de muestreo  
— Río

Figura 21.4.  
Suelos ORO-Au

Continuación Figura 21. Concentración de metales preciosos en sedimentos activos y suelos

recorrido, aporte antrópico, con incrementos en los contenidos de la mayoría de elementos químicos en las muestras de agua.

Se identificaron cinco regiones geoquímicas denominadas de oeste a este como: San Cayetano, Zipaquirá, Lenguazaque, Cuenca Alta

del Río Bogotá y Machetá-Manta, su ubicación se representa en el mapa de la Figura 22. Las características geospaciales y geoquímicas se resumen en la Tabla 1.

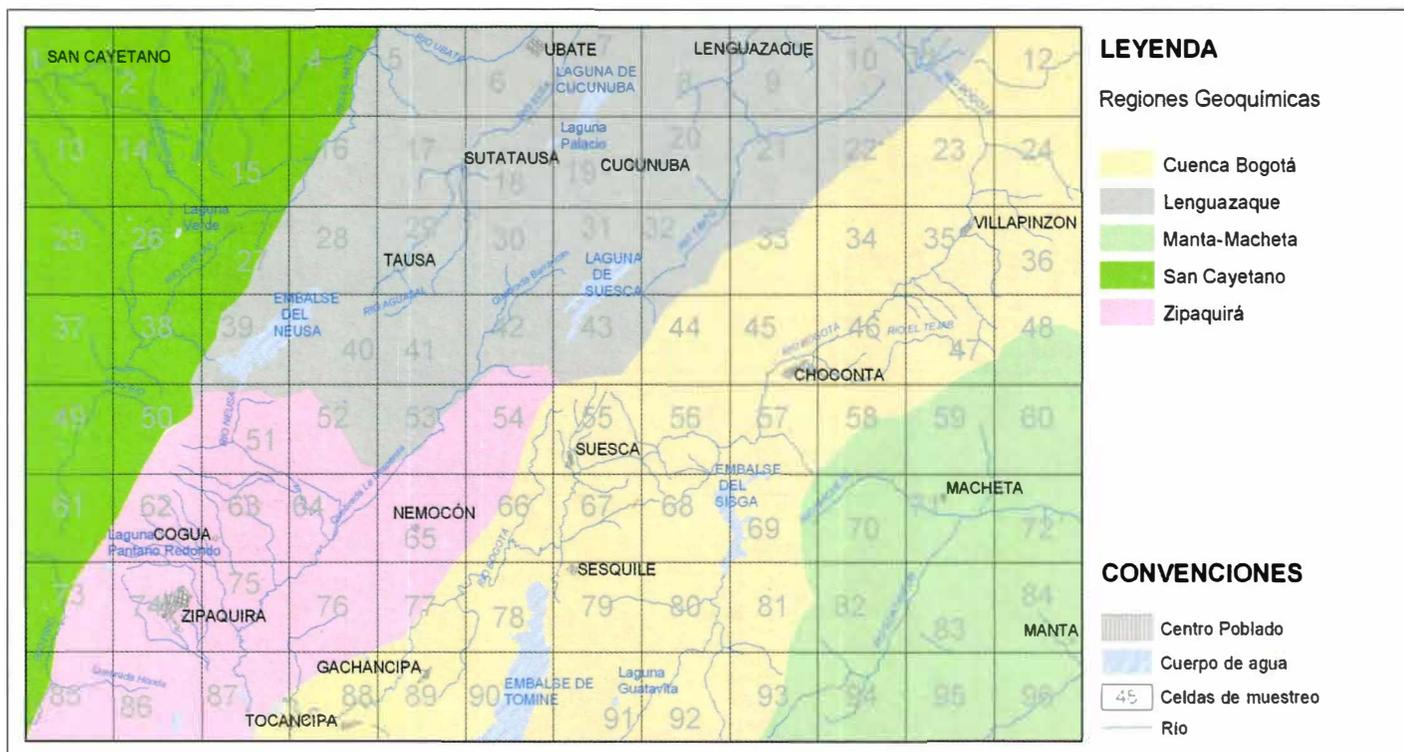


Figura 22. Mapa de regiones geoquímicas

0 10 km

TABLA 2. Características de las regiones geoquímicas.

REGIÓN	Características				Grupos de elementos			Valores extremos			Presencia de oro (Au) y plata (Ag)	
	Geología	Rasgo predominante	Geomorfología	Factores fisicoquímicos del agua	Agua	Sedimentos activo	Suelos	Agua	Sedimentos activo	Suelos	Sedimentos activo	Suelos
I. SAN CAVETANO	Formaciones del Cretácico Superior: Churumita, Simijaca, La Frontera, Conejo, Lidita Superior.	Shales	Paisaje montañoso, geoforras como: espinaldos, crestas, escarpes, lomas y glacis coluvial.	pH neutro a levemente básico. Conductividad eléctrica entre 2 a 60.	As, Sb, V, Sc, Fe, S.	Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, Cu, Ni, V, Sc, Fe, S.	Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, As, Cr, V, Be, K, Rb.	Ca, Sr, Ta, Ti, U	Ca, Cd, Cs, Mn, Mo, S, Sb	Al, As, Br, Co, Fe, Pb	Au (3 a 6 ppb) y Ag (0.3 a 0.5 ppm)	Au (2 a 4 ppb) y Ag (0.3 a 0.9 ppm)
II. LENGUAZAQUE	Formaciones Guaduas, Labor y Tierra, Plaeners.	Carbón	Paisaje montañoso con geoforras como: cuestas, fillos, valles; paisaje de Planicie con geoforras como terrazas.	pH neutro a levemente ácido, con fuertes fluctuaciones ácidas y básicas. Conductividad eléctrica entre 2 a 60.	Tierras raras, Co, Mn, Ni, Zn, K, Na, Sr, As, Sb.	Cu, Ni, V, Sc, Sm, Th, Cu, Ni, As, Sb, Fe, S.	As, Cr, V, Co, Cu, Ni, Rb.	Ca, Mg, Fe, Mn, Ni, Pb, Rb, Sr, Ti	Al, Ba, Co, Fe, Mg, Mn, S, Sb	Br, Cu, Ni, Sb	Au (2 a 5 ppb) y Ag (0.3 a 1.2 ppm)	Au (3 a 5 ppb) y Ag (0.4 a 0.8 ppm)
III. ZIPAQUIRA	Formaciones del Cretácico Superior como Guaduas, Labor y Tierra, Plaeners, Churumita, Conejo, Lidita Superior, Terrazas altas.	Sal	Paisaje montañoso con geoforras como: cuestas, fillos, glacis coluvial; paisaje de Planicie con geoforras como terrazas.	pH neutro a levemente ácido. Conductividad eléctrica entre 50 a 100.	As, Sb, Sm, Th, As, Sb.	Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, As, Sb.	As, Cr, V, Co, Cu, Ni, Be, K, Rb.	As, Br, Cs, Rb, Sb, Ti	Ag, Ba, Ce, Cu, La	As, Ba, K, Sb	Au (6 a 13 y valor anómalo de 127 ppb) y Ag (0.3 a 2.4 y valor anómalo de 17.9 ppm)	Au (2 a 15 ppb) y Ag (0.4 a 0.9 ppm)
IV. CUENCA ALTA DE BOGOTÁ	Formación Tilata, formaciones endógenas como Regadera, Bogotá, Cacho.	Contaminación antrópica.	Paisaje montañoso con geoforras como: lomas, cuestas, fillos, valles; paisaje de Planicie con geoforras como terrazas y planos de inundación.	pH neutro a levemente ácido. Conductividad eléctrica entre 2 a 60.	Tierras raras, K, Na, Sr, As, Sb.			Fe, Ca, Cu, Hf, U, Th, Ti, Zr		Bi, Yb	Au (2 a 7 ppb) y Ag (0.3 a 0.9 ppm)	Au (3 a 8 ppb) y Ag (0.3 a 0.8 ppm)
V. MACHETA-MANTA	Formaciones cretácicas del Interior al superior: Fomeque, Une, Chipaque y Arenisca Dura.	Shale	Paisaje montañoso, geoforras como: espinaldos, crestas, escarpes, lomas y glacis coluvial.	pH neutro a levemente ácido. Conductividad eléctrica entre 50 a 100.	Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, Lu, Yb.	Ce, Eu, La, Nd, Sm, Th, Be, K, Rb.	Cs, Ti	Au, Ce, Hf		Ce, Eu, La, Nd, Th	Au (2 a 28 y valor anómalo de 306 ppb) y Ag (0.4 a 1.1 ppm)	Au (3 a 5 ppb) y Ag (0.3 a 0.8 y valor anómalo de 9.07 ppm)

## 4. CONCLUSIONES

En la zona de estudio se pueden considerar dos tipos de origen para los metales potencialmente peligrosos presentes en las aguas, uno antrópico asociado a las zonas con uso industrial entre Zipaquirá y Ubaté y la cuenca del Río Bogotá, después de Villapinzón. El otro origen es de tipo geológico, observándose al noroeste, en los alrededores de San Cayetano un incremento en los contenidos de elementos traza mientras que al oeste principalmente elementos mayores y algunos trazas asociados al hierro.

Desde el punto de vista de calidad de aguas en cuanto a contenido de elementos químicos, el 54% de las aguas estudiadas cumple con los valores recomendados por el Decreto 475/98 (calidad de agua potable), el 46 % no cumple por superar las concentraciones recomendadas, especialmente para hierro, calcio, aluminio y manganeso.

De acuerdo con el Decreto 475/98 el 72 % de las aguas de las cuencas estudiadas se podría usar como aguas seguras. El 28% no cumple con la norma, en esta clasificación, porque superan las concentraciones recomendadas especialmente para hierro.

De acuerdo con el Decreto 1594/85 (destinación del agua según el uso) desde el punto de vista de los elementos químicos, el 5% de las corrientes de agua no se pueden usar en actividades agrícolas por superar los valores recomendados, especialmente para hierro, manganeso y níquel. Para uso pecuario se pueden usar aguas de todas las cuencas estudiadas, con excepción del río Charco de Nutría que supera el valor recomendado para aluminio.

Se observan dos zonas de interés en la asociación de tierras raras: Ce, La, Nd, Sm (tanto en suelos como en sedimentos) al NW (Len-

guazaque) y al SE (Machetá-Manta), en este último sector se asocian además Lu e Yb.

Los sedimentos que presentan el mayor número de elementos químicos que supera los valores establecidos para los *shales*, se encuentran entre el anticlinal de Zipaquirá y el anticlinal de Suesca, constituido por las formaciones del Grupo Guadalupe, formaciones de Bogotá y Chipaque, y depósitos cuaternario.

Los mayores factores de enriquecimiento se presentan para cadmio en los sedimentos ubicados en las formaciones Chipaque y Guadalupe, hacia el occidente de la Plancha.

El 23 % de los suelos estudiados superan los valores recomendados para suelos agrícolas, con posibles problemas de toxicidad especialmente por cadmio, vanadio y zinc, que deben comprobarse mediante estudios de biodisponibilidad.

El 80 % de los suelos de las cuencas estudiadas pueden presentar deficiencias de potasio, calcio, manganeso y molibdeno.

Se identifican dos regiones geoquímicas, que pueden ser consideradas de interés para exploración de recursos en la región de San Cayetano al NW y Machetá-Manta al SE, las cuales se encuentran relacionadas con la litología cretácica de origen marino, que se refleja especialmente en los contenidos de tierras raras, comparativamente altos, en la zona de estudio.

En la región de Lenguazaque, se presenta influencia de la actividad minera del carbón en la composición geoquímica de los diferentes medios de muestreo, originando incrementos en los contenidos de elementos traza, principalmente en muestras de sedimentos y suelos.

En la región de Zipaquirá, se presentan incrementos en los contenidos de elementos como As, Ba, Cu, Sb, entre otros, posiblemente por

influencia de eventos geológicos en las unidades litológicas cretácicas y el diapirismo salino.

Por las características geológicas y geoquímicas el área de estudio existe potencial de otros recursos minerales diferentes a los mencionados, principalmente barita, metales básicos y esmeraldas. Sin embargo, se requiere de estudios más detallados, enfocados hacia a este fin y es necesario comparar estos resultados a nivel regional para ratificar o descartar la posibilidad de encontrar los yacimientos minerales descritos en la Tabla 2.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soils. Second Edition. Blackie Academic & Professional. London.*
- Alfaro, C., AGUIRRE, A., BERNAL, N. & GOKCEN, G. 2003. Inventario de fuentes termales del departamento de Cundinamarca. INGEOMINAS. Informe inédito. 186p. Bogotá.
- Alfaro, C., 2005 b. Alteración Hidrotermal en el sistema geotérmico de Paipa. Informe Interno. INGEOMINAS. En preparación.
- Duran, R. & Mojica, P. 1981. Evaluación de reservas de carbón en siete zonas de Colombia. INGEOMINAS. Pub. Geol. Esp., 6:1-134. Bogotá.
- Forstner, V.; Wittman, G.T. 1979. *Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg, New York.*
- Foregs, 1998. *Geochemical Mapping Field Manual. Geological Survey of Finland, Guide 47, Espoo. Finland 36 pp.*
- Golterman, H.L., et al. 1983. *Study of the Relation Ship Between Water Quality and Sediment Transport.*
- Gonzalez L.M.; Vargas O. 1998. Parámetros reguladores de la retención de metales pesados en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS, Informe interno. Santa Fe de Bogotá.
- Güiza, s., espinosa, A. 2005. Cartografía geoquímica de la plancha 209-Zipaquirá. INGEOMINAS. Bogotá.
- IGAC. 1992. Cundinamarca, Características Geográficas. 189p. Santa Fe de Bogotá.
- IGAC, 2000. Mapa de suelos de Cundinamarca. Bogotá.
- INGEOMINAS. 1997 a. Inventario minero para materiales de construcción en la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS, Informe 2254, 128 p. Santa Fe de Bogotá.
- INGEOMINAS. 1999 a. Inventario minero del Departamento de Cundinamarca. INGEOMINAS, Informe 2326, 377 p. Santa Fe de Bogotá.
- INGEOMINAS. 2000. Manual de Campo para el Atlas Geoquímico de Colombia. Informe Interno. Bogotá.
- Kabata, A.; Pendias, H., 1992. *Trace Elements in Soils and Plants.*
- McLennan, S. M. 2001. *Relationship between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. G3, 2. Paper 2000GC000109.*
- McLaughlin, D. & ARCE, M. 1972. Geología del Área Zipaquirá (Zona IV). Informe Preliminar 109. INGEOMINAS. 267p. Bogotá.
- Minsalud. 1984. Ministerio de Salud. Decreto No. 1594 del 26 de junio de 1984. "Usos del agua y residuos líquidos".
- Minsalud. 1998. Ministerio de Salud. Decreto Número 475 del 10 de marzo de 1998. "Por

- el cual se expiden normas técnicas de calidad de agua potable”.
- Montoya, D.M.; Reyes, G.A. 2005. Geología de la plancha 209. INGEOMINAS. Bogotá.
- Perez, F.; Valderrama, G.; Blanco, G.; Gonzalez, L. & Garcia, F. 1987. Caracterización de carbones colombianos zona Checua-Lenguazaque. INGEOMINAS. Bol. Geol., 28 (2): 1-218. Bogotá.
- Perilla, C.E., 2001C. Informe sobre la preparación y muestreo de parte de la plancha 209 Escala 1:100.000 Duitama. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá. (Informe interno).
- Reimann, C., et al. 1998. *Environmental geochemical atlas of the central Barents region. Geological Survey of Norway*. Trondheim.
- Renzoni, G 1965. Mapa Geológico de Colombia-Cuadrángulo L11. INGEOMINAS.
- Salminen, R., et al. 1998. *FOREGS Geochemical Mapping Field Manual. Geological Survey of Finland. Guide 47*. Espoo. 1998.
- Smirnov, V.I. 1982. Geología de Yacimientos Minerales. Moscu.
- Turekian K. K.; Wedepohl K. H. 1961. *Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Bull. Geol. Soc. Am., 72:175-192*.
- Ulloa, C. & Rodríguez, E. 1979. Geología del Cuadrángulo K-12 Guateque, Colombia. INGEOMINAS, Informe 1701, Bol. Geol., 22(1):3-56. Bogotá.
- US-EPA, 1999. *National Recommended Water Quality Criteria - Correction. USEPA, Office of Water. New York*.
- Vrom. 1983. 1991.1994 *Environmental Quality Standards for Soil and Water. Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. The Hague*.
- Who, 1996. *Guidelines for drinking - water quality. Vol 2 Health criteria and other supporting information (1996), and addendum to Vol. 2 (1998). 2nd ed. Geneva, World Health Organization*.
- Wiedmann, J. 1978. En: Huberk; Wiedmann, J. Sobre el límite Jurásico-Cretácico en los alrededores de Villa de Leiva, Departamento de Boyacá, Colombia. 2 Congr. Col. Geol., Mem. WOKITTEL, R. 1957. Situación del yeso en Colombia. Inst. Geol. Nal., Informe 1217, Boletín minero. Bogotá.
- Zambrano, F. & Mojica, P. 1991. Exploración de roca fosfática en los municipios de Nuevo Colon, Turmequé y Ventaquemada, Boyacá. INGEOMINAS, Informe 2135. 1-57p. Bogotá.



## GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

Gloria Prieto, Luz Myriam González,  
Orlando Vargas, Adriana Matamoros  
luzgonz@ingeominas.gov.co;  
gprieto@ingeominas.gov.co;  
ovargas@ingeominas.gov.co

### RESUMEN

Con el objetivo de estudiar procesos geoquímicos ambientales y continuando con estudios adelantados anteriormente en suelos de la Sabana de Bogotá, el INGEOMINAS llevó a cabo un muestreo sistemático de suelos en la cuenca del río Bogotá. Se recolectaron 273 muestras de suelos con base en una red bidimensional de celdas de 5 x 5 km, tomando muestras superficiales (A 0-25) y de horizonte C.

En el INGEOMINAS se analizaron contenidos pseudo-totales de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, extraídos con agua regia y mezcla de ácidos, usando la técnica de ICP-AES y en Activation Laboratories de Canadá se determinaron 48 elementos, también por ataque con mezcla de ácidos y determinación por ICP-AES y activación neutrónica. Se efectuó un análisis estadístico y geoestadístico a los resultados y se elaboraron mapas de concentración puntual y de distribución espacial.

Los patrones de distribución geoquímica permiten diferenciar dos zonas, la primera correspondiente a la cuenca alta y media del río, incluyendo la Sabana de Bogotá y el Distrito Capital, en donde en la mayoría de los suelos se presentan niveles inferiores a los máximos de referencia y una segunda zona correspon-

diente a la cuenca baja, en donde se concentran elementos en niveles que sobrepasan los valores de referencia usados para establecer la calidad y el uso adecuado de los suelos.

En la primera zona, los suelos, de texturas variadas, tienden a la acidez (pH 4 a 6,5) y en general presentan concentraciones bajas para la mayoría de los elementos, con excepción de algunos sitios de la cuenca media donde se presenta acumulación de algunos metales. En la segunda zona, los suelos tienen textura predominantemente franco arcillosa, son más básicos (pH 6,6 a 9) y poseen altos contenidos de la mayoría de los elementos analizados.

Estadísticamente, se diferenciaron tres grupos de asociación de elementos, el grupo 1, integrado por As, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni y Zn; el grupo 2 por Co y Mn y el grupo 3 por Pb; estos grupos corresponden a asociaciones geoquímicas naturales, propias de rocas sedimentarias y adicionalmente representan residuos de actividades antrópicas industriales, agropecuarias y de transporte. El comportamiento del Pb, indica un origen posiblemente antrópico.

La información generada es útil para definir líneas base geoquímicas en esta importante zona del país, apoyar la planeación del uso del suelo y soportar la toma de decisiones sobre el manejo integral de la cuenca del río Bogotá.

**Palabras clave:** suelos, metales pesados, elementos potencialmente peligrosos, cuenca del río Bogotá, geoquímica.

## ABSTRACT

In order to study environmental geochemical processes in the Central Region of Colombia, the geochemistry project of INGEOMINAS, carried out a systematic geochemical sampling programme in soils along the Bogotá River basin. The sampling program was carried out based on a bi-dimensional net (5x5km cells), collecting one sample per 25 km<sup>2</sup> and one cell duplicate sample per 100 km<sup>2</sup>. 273 samples of superficial soil (A0-25) and C-horizon (up to 2m depth) were collected.

In the INGEOMINAS laboratories pseudo-total contents of Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu and Ni were determined (aqua regia and multi-acid digestion/ICP-AES); and in Activation Laboratories of Canada 48 elements were measured (multi-acid digestion/ICP-AES; INAA).

This paper presents results of As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, and Zn in the superficial horizon (A0-25) of the soil samples, including some data generated for previous projects carried out for INGEOMINAS in this region. The data were processed statistically and geo-statistically, dots and distribution maps by element were constructed.

Geochemical patterns allow differentiating two main zones. First zone covers the high basin of the Bogotá river including

the Savannah of Bogotá, and the Capital City, the soils have acidic pH (pH 4-6,5), textural variability and relatively low concentration of elements with the exception of some places in the middle basin. Second zone, comprises the low river basin, the soils have more basic pH (pH 6,6-9), texture predominantly argillaceous and high contents of trace elements.

Statistically three association groups were differentiated: **group 1:** As, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni and Zn; **group 2:** Co and Mn and **group 3:** Pb, not displaying significant correlation with any other element. These groups correspond to natural geochemical associations characteristic of sedimentary rocks. They represent also common associations of residues of activities such as industry, agriculture and transport. Lead behaviour, on the other hand seems to indicate mainly anthropic origin (old leaded gasoline and industrial emissions).

The systematic soil sampling carried out along the Bogotá River basin, allowed to determine accumulation levels of potentially harmful elements, to discriminate possible origin and to analyze parameters and factors that determine local mobility and bio-availability of these elements. This information contributes to the geochemical base lines definition, is basic to soil use planning and is support to the Bogotá River basin management.

## 1. ANTECEDENTES

La cuenca del río Bogotá es de vital importancia para el desarrollo social y económico de la zona central del país, razón por la cuál INGEOMINAS, adelantó un muestreo geoquímico sistemático de suelos con la finalidad de estudiar procesos geoquímicos locales. El manejo adecuado de la cuenca del río Bogotá no solo está relacionado con la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, sino también con la calidad de los suelos. Esta última depen-

de de sus propiedades físicas intrínsecas y de su composición geoquímica.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos son heredadas del material parental y modificadas tanto por procesos de meteorización antiguos y actuales, como por la actividad antrópica que los afecta. El estudio de procesos geoquímicos en suelos permite determinar zonas de acumulación o deficiencia de elementos químicos, que son esenciales para las plantas en ciertos niveles de concentración, pero que si exceden esos niveles, se convierten en potencialmente tóxicos; estos estudios también permiten identificar el origen de los elementos que puede ser natural o de carácter antrópico.

El conocimiento de los factores que intervienen en la movilidad, transporte y acumulación de elementos, así como el análisis de su biodisponibilidad y efectos en el entorno, es básico para la correcta planeación y desarrollo de actividades socio-económicas.

### 1.1 Localización

La zona de estudio comprende la cuenca del río Bogotá (**Figura 1**) desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque, municipio de Villapinzón, hasta su desembocadura en el río Magdalena, en la ciudad de Girardot. El área total de la cuenca es de aproximadamente 6.000 km<sup>2</sup>.

### 1.2 Características generales de la zona

**Geología regional.** La cuenca del río Bogotá es el resultado de la evolución geológica desde el Cretáceo, cuando el área hacia parte del fondo del mar y estaba constituida principalmente por sedimentos marinos, arcillas y arenas, pasando por diversos fenómenos geológicos y geomorfológicos que moldearon y dieron origen al paisaje actual que alberga intensa y variada actividad antrópica (Van der Hammen, 1998). La geología de la cuenca del

río Bogotá esta constituida principalmente por rocas sedimentarias con edades desde el Cretáceo hasta depósitos cuaternarios recientes (INGEOMINAS, 1997) y ha sido detallada en diferentes estudios geológicos (Acosta y Ulloa, 1996; Acosta y Ulloa, 1997; Acosta y Ulloa, 1998; Acosta et al., 2000; Montoya y Reyes, 2003). Entre los materiales que afloran se encuentran areniscas intercaladas con arcillas que conforman el Grupo Guadalupe, tal y como se presentan en el Cerro de Monserrate y el Salto del Tequendama.

**La Sabana de Bogotá,** se destaca por su topografía plana constituida por depósitos cuaternarios fluvio-lacustres. Las rocas del Cretácico inferior (formaciones Trinchera, Socota, Capotes e Hilo), afloran en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, haciendo parte de la cuenca baja del río Bogotá y las rocas del Cretácico superior afloran tanto en los flancos oriental y occidental como también en la parte central y corresponden a las formaciones Simijaca, La Frontera, Grupo Olini, Conejo y Grupo Guadalupe; sin embargo, el Grupo Olini solo aflora en el sector más occidental (cuenca baja del río Bogotá). En la cuenca baja del río Bogotá afloran rocas de la Formación Barzalosa del Paleógeno y el Grupo Honda del Neógeno y en la cuenca alta afloran las formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y Usme del Paleógeno y Tilatá del Neógeno.

**Hidrología.** El río Bogotá nace en el municipio de Villapinzón en el páramo de Guacheneque, a 3.300 m.s.n.m. y sus aguas fluyen hacia el suroeste para desembocar al río Magdalena en Girardot a 280 m.s.n.m. En su recorrido de 375 km, recibe las aguas de los ríos Siga, Neusa, Tibitó, Negro, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelito, Balsillas (recoge aguas de los ríos Subachoque y Bojacá), Calandaima y Apulo (CAR, 2.000). En su trayectoria se pueden identificar tres sectores: la cuenca alta (165 km) con aguas tranquilas por el relieve plano; la cuenca media (90 km) con caudal torrencioso debido a un desnivel mayor a 2.000 metros en un trayecto corto y la cuenca

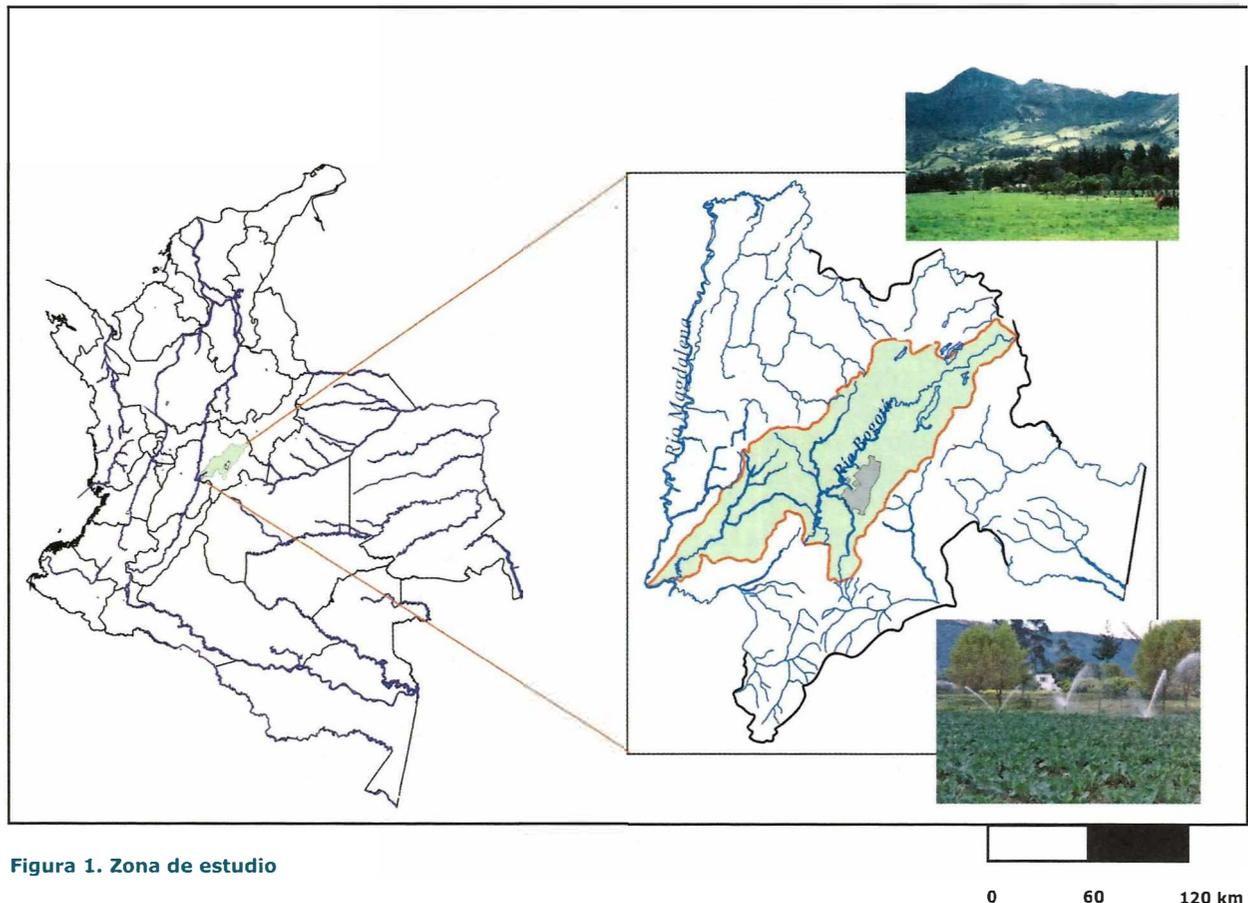


Figura 1. Zona de estudio

baja (120 km) con aguas tranquilas, en una zona de poco desnivel topográfico.

**Suelos, clima y vegetación.** Se destaca la presencia de suelos del paisaje de montaña, suelos del paisaje de planicie y suelos de paisaje de valle. En la cuenca del río Bogotá se presenta diversidad climática determinada por condiciones altitudinales, pluviometría y temperatura predominantes. Las formaciones vegetales predominantes son bosque seco montano bajo (bs-MB); bosque húmedo pre-montano (bh-PM); bosque húmedo montano bajo (bh-MB), bosque húmedo montano (bh-M) y bosque seco tropical (bs-T), (IGAC, 2000).

**Actividad socio-económica.** La actividad socioeconómica de la zona se ha incrementado y diversificado continuamente, y ha estado ligada al uso intensivo de recursos naturales

y a la expansión no planificada de la zona urbana, especialmente en la Sabana de Bogotá en donde se ubica la ciudad capital. Esta cuenca, incluyendo Bogotá D.C., en conjunto se ha convertido en una de las zonas de mayor densidad de población del país (19 % de la población total), es receptora de múltiples actividades humanas e industriales (30% de la industria nacional) y ejerce fuerte demanda de servicios públicos y de uso de recursos naturales.

## 2. METODOLOGÍA

El muestreo se realizó con base en una red bidimensional, para lo cual se tomó como referencia la cartografía del IGAC, se seleccionó el área correspondiente a la cuenca del río Bogotá y se dividió esta región en celdas de 5 x 5 km. La densidad de muestreo resultan-

te corresponde a una muestra cada 25 km<sup>2</sup>. En cada subcelda de 5 x 5 km se localizó un punto de muestreo y adicionalmente se ubicó un punto por cada 10 x 10 km para tomar duplicados de celda. Los puntos de muestreo se localizaron aleatoriamente sobre la red bidimensional, pero se consideraron aspectos como el uso del suelo, la influencia del río Bogotá o de sus tributarios. Todos los puntos de muestreo se georrefenciaron haciendo uso de planchas cartográficas (escala 1:25.000) y aparatos de posicionamiento satelital (GPS).

Se colectaron 273 muestras de suelos superficiales, horizonte A (0-25 cm) y de horizonte C (hasta máximo 2 m), siguiendo orientaciones sobre muestreo del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP), proyectos 259 y 360 y estándares del INGEOMINAS (Figura 2).

En los laboratorios de INGEOMINAS se determinaron contenidos pseudo-totales de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, mediante digestión ácida (agua regia y multiácido: HF, HNO<sub>3</sub>, HCl y HClO<sub>4</sub>, según el elemento) en un digestor de microondas y se realizó la cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado ICP-AES. En los laboratorios Activation Laboratories Ltd de Canadá se determinaron los contenidos totales de 48 elementos utilizando, según el elemento, análisis por activación neutrónica (INAA) o digestión ácida (multiácido) y cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente acoplada de plasma (ICP-AES). La calidad analítica se controló mediante uso de patrones primarios y secundarios (exactitud) y por análisis por duplicado (precisión).

Como base de análisis se tomaron los suelos superficiales (A 0-25) y se consideraron los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn, catalogados como elementos potencialmente peligrosos (EPPs) para la salud de ecosistemas, incluyendo al hombre. Los datos se sometieron a procesamiento estadístico usando el software SPSS y geoestadístico

usando ISATIS y SURFER, con los resultados se elaboraron mapas de concentración puntual y mapas de distribución espacial de los elementos de interés empleando Arc-GIS.

## 2.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico indica que en los suelos que se tomaron a lo largo de la cuenca del río Bogotá, se presenta una alta variabilidad espacial en el contenido de los elementos analizados, con algunos valores alejados de la distribución promedio de los datos. En la Tabla 1, se presentan las estadísticas para todos los datos y en la Tabla 2 el promedio, mínimo y máximo por municipio.

### 2.1.1 Correlación y asociación de elementos

Las correlaciones, entre pares de elementos o bivariadas, indican la existencia de relaciones positivas y altamente significativas entre las variables As-Cd, As-Cr, As-Mo, As-Ni, As-Zn, Cd-Mo, Cd-Ni, Cd-Zn, Co-Mn, Mo-Ni, Mo-Zn, Ni-Zn. Los análisis estadísticos multivariados, análisis factorial y de conglomerados jerárquicos, permiten diferenciar tres grupos de asociación de elementos, los cuáles corresponden a asociaciones naturales propias de los tipos de rocas presentes en la zona estudiada y a la vez son comunes en muchos residuos de actividades antrópicas industriales y agropecuarias:

**Grupo 1:** As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn;

**Grupo 2:** Co y Mn y **Grupo 3:** Pb, cuyo comportamiento es independiente de los demás elementos.

En la cuenca baja del río Bogotá, del municipio de La Mesa hacia el suroccidente, predominan rocas sedimentarias, tipo *shale* (lutitas), principalmente lodolitas, limolitas o arcillolitas negras, silíceas o calcáreas, las cuales acumulan metales durante su génesis y presentan asociaciones de elementos químicos similares a las encontradas en los suelos estudiados; aunque en los suelos, como

es natural, los contenidos son menores, por efecto de los procesos pedogenéticos que les dieron origen. El comportamiento del Pb, que no presenta asociación estadística significativa con otros metales, puede estar indicando un origen principalmente antrópico, originado en los residuos de la combustión de gasolina

a la que antiguamente se adicionaba plomo y de las emisiones de las diversas actividades industriales, que se desarrollan en algunas zonas específicas del área de estudio. Es posible que el riego con agua del río Bogotá, sea, junto con otras actividades antrópicas (agricultura, ganadería, industria), fuente de

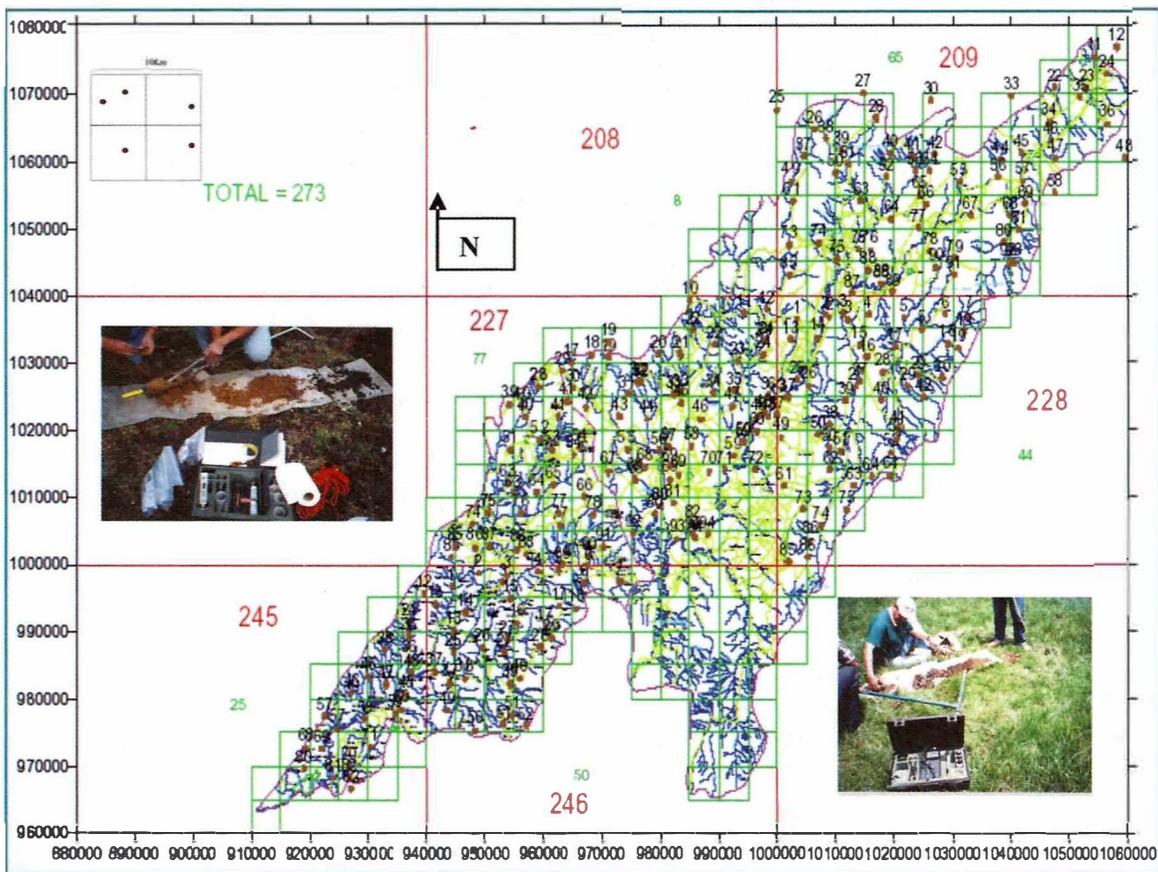


Figura 2. Sitios de muestreo

metales para los suelos de la cuenca del río Bogotá. Los aportes naturales del material geológico y parental de los suelos (en este caso lodolitas, lutitas, cenizas volcánicas, entre otros), contribuyen a la concentración de los metales en los suelos de la zona de estudio, con especial importancia en localidades de la cuenca baja.

### 2.1.2 Distribución espacial de elementos traza

La distribución de elementos que se aprecia en los mapas de distribución espacial, en suelos de la cuenca del río Bogotá, permite diferenciar dos zonas: una que va desde el nacimiento del río, en Villapinzón, hasta el embalse del Muña en Sibaté y corresponde a la cuenca alta, y otra que encierra la cuenca

baja del río hasta su desembocadura (Figura 3).

En la zona 1 que comprende la cuenca alta del río Bogotá, e incluye la Sabana de Bogotá, los suelos presentan tendencia ácida (pH 4 a

6.5), variabilidad textural y concentraciones relativamente bajas para la mayoría de los elementos. En algunas localidades específicas de ésta zona, en donde existen suelos de muy poca evolución, como los Epiaquents (Bogotá, Soacha, Guasca, Mosquera y Sopó), se pre-

Tabla 1. Parámetros estadísticos de los elementos y control de calidad analítica

Estadísticos		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
Numero datos	Válidos	218	235	234	234	234	235	221	234	235	234
	Unidad	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Media		6,2	1,2	5,7	58,0	19,1	245	4,7	21,8	23,1	103
Error típ. de la media		0,3	0,2	0,2	5,8	1,1	12,2	0,7	1,7	1,0	8,2
Mediana		4,8	0,3	5,0	50,0	15,7	197	2,4	14,9	20,6	65,0
Moda		3.5(a)	0,2	4,0	61,0	1(a)	1(a)	0,5	0,5	1,5	100,0
Desv. típ.		5,1	2,7	3,6	88,4	16,3	186	10,2	26,0	15,7	126,1
Varianza		26	7	13	7.814	266	34.750	104	679	246	15.897
Asimetría		2,9	4,2	1,6	12,4	5,5	1,9	5,8	3,8	4,2	3,4
Error típ. de asimetría		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Curtosis		10,5	20,1	3,5	175,9	43,3	6,4	41,4	16,7	32,5	12,0
Error típ. de curtosis		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Rango		34,3	19,1	20,5	1.310	166	1.383	96,7	188	167	750
Mínimo		0,26	0,15	0,5	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	3,3
Máximo		34,6	19,2	21,0	1.313	166	1.383	97,2	189	168	753
	25	3,5	0,2	3,8	31,0	11,3	113	0,5	9,9	14,6	45,7
	50	4,8	0,3	5,0	50,0	15,7	197	2,4	14,9	20,6	65,0
	75	6,8	0,9	7,0	70,9	21,6	323	4,1	22,9	28,0	105
	90	12,0	2,8	10,1	98,5	33,3	455	6,4	37,4	37,2	177
	95	16,6	6,4	13,0	111	42,2	605	19,8	67,4	45,0	388
	98	26,2	11,7	17,6	125	50,6	776	35,7	133	63,4	667

a. Existen varias modas. Se muestra el menor de los valores.

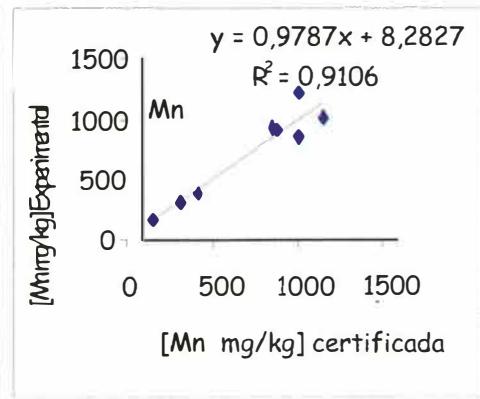
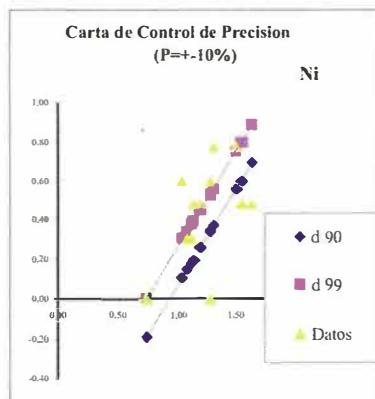
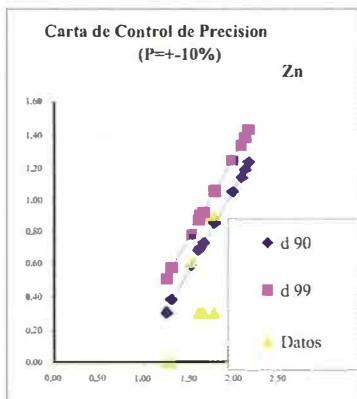


Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio

Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Agua de Dios	N	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Media	6	0,6	16	92	32	733	2	36	11
	Mínimo	4,3	0,2	13	74	28	454	0,5	28	2
	Máximo	9,6	1,4	21	112	41	877	4,5	41	17
Anapoima	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	19	6,4	11	111	36	312	19	78	29
	Mínimo	8,3	0,2	6	59	21	73	2,7	23	11
	Máximo	35	19,2	19	237	61	1.383	69	189	46
Anolaima	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	6	0,4	5	53	19	268	4	12	30
	Mínimo	3,5	0,2	3	29	12	44	0,5	6	21
	Máximo	8,9	1,4	7	93	47	378	11,3	19	44
Apulo	N	5	4	5	5	4	4	4	4	4
	Media	16	6,4	9	94	31	202	23	89	20
	Mínimo	12,0	0,2	6	69	27	137	0,5	25	7
	Máximo	21	14,8	12	118	40	234	61	130	47
Bogotá	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	3	1,6	5	161	37	267	1	19	41
	Mínimo	1,0	0,2	1	7	10	56	0,5	9	7
	Máximo	4,4	5,8	10	1.313	166	579	3,6	52	168
Bojacá	N	9	10	10	10	10	10	9	10	10
	Media	3	1,9	5	23	9	248	1	10	14
	Mínimo	0,4	0,2	1	3	1	8	0,5	1	2
	Máximo	6,2	8,7	8	52	15	500	3,3	22	28
Cachipay	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	16	5,1	5	85	19	174	38	65	22
	Mínimo	4,0	0,8	4	53	10	85	2,0	12	21
	Máximo	30	13,5	6	120	35	292	97	154	23
Cajicá	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	1	0,8	7	14	12	249	1	13	12
	Mínimo	0,3	0,2	1	3	1	3	0,5	1	2
	Máximo	2,5	1,4	20	20	22	703	0,8	22	19
Chifí	N	1	2	1	2	2	2	2	2	2
	Media	7	0,6	4	16	21	441	1	17	32
	Mínimo	7,2	0,5	4	15	17	148	0,6	13	22
	Máximo	7,2	0,7	4	17	26	734	1,0	21	42

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Chocontá	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Media	5	0,2	4	52	13	201	2	11	19	55
	Mínimo	3,2	0,2	2	37	5	29	0,5	7	12	35
	Máximo	7,6	0,2	7	84	17	407	4,5	16	26	85
Cota	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	2	0,8	5	17	16	168	1	12	14	48
	Mínimo	1,2	0,2	1	12	10	35	0,5	8	9	22
	Máximo	3,0	1,5	7	31	26	322	2,4	18	21	75
Facatativa	N	12	16	16	15	15	16	12	15	16	15
	Media	4	0,7	5	36	17	224	2	13	19	56
	Mínimo	0,5	0,2	1	10	6	1	0,5	3	1	7
	Máximo	6,6	2,7	8	76	44	510	4,8	23	37	111
Funza	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Media	4	1,7	5	12	15	453	1	11	16	55
	Mínimo	3,0	0,6	2	10	12	122	0,5	7	10	20
	Máximo	4,3	3,7	9	13	18	728	1,2	15	25	82
Gachancipá	N	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	4,6	0,2	2,3	24,8	6,6	49,4	0,5	4,8	25	58
	Mínimo	4,6	0,2	1	3	2	4	0,5	1	2	10
	Máximo	4,6	0,2	4	47	12	95	0,5	9	48	105
Girardot	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Media	4	0,6	7	55	18	239	2	21	10	103
	Mínimo	3,7	0,2	3	41	11	47	0,5	14	7	49
	Máximo	5,1	1,0	11	76	22	569	3,9	26	13	145
Guasca	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	5	0,2	4	45	17	245	3	11	20	44
	Mínimo	3,1	0,2	1	39	6	68	1,1	2	14	15
	Máximo	6,5	0,4	7	50	49	471	5,7	17	26	76
Guatavita	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	5	0,2	5	49	15	245	3	13	21	50
	Mínimo	3,4	0,2	4	37	8	134	1,3	10	16	40
	Máximo	5,8	0,4	6	76	24	371	5,1	18	27	65
La Calera	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	4	0,2	3	54	13	120	1	9	40	45
	Mínimo	0,8	0,2	1	28	6	19	0,5	1	16	17
	Máximo	6,8	0,7	6	82	23	338	3,8	22	95	72
La Mesa	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	12	3,4	8	89	22	188	8	44	25	268
	Mínimo	4,2	0,2	3	56	10	114	1,8	13	15	95
	Máximo	21	10,9	17	119	33	354	17,4	95	42	753

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Madrid	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	Media	3	2,1	7	19	21	468	1	18	15	80
	Mínimo	3,1	1,5	5	17	17	228	0,5	15	14	55
	Máximo	3,5	3,2	11	20	27	728	0,9	24	15	124
Mesitas del Colegio	N	8	8,0	8	8	8	8	8	8	8	
	Media	7	0,8	6	73	16	228	11	19	32	85
	Mínimo	2,6	0,2	2	46	9	37	2,1	8	27	44
	Máximo	10,6	1,7	10	103	23	574	29,2	35	42	139
Mosquera	N	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Media	4	2,0	5	10	14	163	1	13	14	97
	Mínimo	3,5	1,7	5	9	13	36	0,5	12	14	86
	Máximo	3,5	2,3	5	10	14	291	0,8	15	15	107
Nemocón	N	4	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Media	5	0,2	4	42	13	144	2	11	20	50
	Mínimo	2,8	0,2	1	16	8	43	0,5	5	5	18
	Máximo	6,2	0,2	7	55	20	256	4,1	15	28	70
San Antonio de Tena	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	Media	5	0,9	3	81	13	251	3	18	22	119
	Mínimo	2,0	0,4	2	38	11	165	0,5	11	20	97
	Máximo	6,3	1,2	5	119	15	340	7,4	25	24	150
San Antonio del Tequendama	N	2	2,0	2	2	2	2	2	2	2	
	Media	3	0,6	6	51	12	330	2	12	20	94
	Mínimo	3,0	0,2	4	44	9	226	1,9	10	18	85
	Máximo	4,0	1,1	8	57	15	434	2,4	13	21	104
Sesquillé	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Media	5	0,3	5	60	19	231	3	13	28	61
	Mínimo	4,3	0,2	2	53	16	117	1,2	8	17	42
	Máximo	5,8	0,8	6	67	22	317	4,8	16	37	75
Sopó	N	5	7	7	7	7	7	4	7	7	7
	Media	3	0,5	5	23	9	168	2	13	18	48
	Mínimo	1,2	0,2	2	10	4	91	0,5	6	14	34
	Máximo	4,5	1,2	11	53	13	204	4,3	20	30	60
Subachoque	N	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	Media	7	0,2	7	60	18	288	2	15	25	60
	Mínimo	4,1	0,2	5	38	11	209	0,5	10	19	43
	Máximo	11,4	0,5	9	90	33	444	4,2	21	28	77

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Suesca	N	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3
	Media	4	0,2	11	58	22	319	2	15	19	73
	Mínimo	4,1	0,2	6	57	14	197	1,6	9	17	59
	Máximo	4,7	0,2	15	59	29	457	3,7	24	21	93
Tabio	N	1	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	Media	1	0,8	5	21	13	124	1	16	15	66
	Mínimo	1,2	0,3	2	13	8	97	0,5	9	10	18
	Máximo	1,2	1,6	7	33	18	166	0,5	27	21	138
Tausa	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	6	0,3	6	55	19	280	3	19	28	78
	Mínimo	3,5	0,2	4	43	13	89	0,5	10	15	44
	Máximo	8,6	1,0	9	66	33	427	5,0	27	75	154
Tena	N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	5	0,2	4	51	16	238	3	14	26	99
	Mínimo	3,0	0,2	4	27	14	100	2,4	11	24	79
	Máximo	7,1	0,2	4	75	19	376	2,9	18	28	120
Tenjo	N	2	4	4	4	4	4	2	4	4	4
	Media	3	2,0	3	15	24	150	1	13	16	156
	Mínimo	2,0	0,5	2	9	16	67	0,5	5	8	19
	Máximo	3,6	6,1	7	23	30	354	0,5	26	34	563
Tocaima	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Media	8	2,1	7	84	25	272	10	46	16	180
	Mínimo	2,9	0,2	2	39	15	93	0,5	16	2	48
	Máximo	21	11,1	13	127	50	764	35	141	33	665
Tocancipá	N	3	5	5	5	5	5	3	5	5	5
	Media	4	0,4	3	28	11	87	2	11	21	44
	Mínimo	2,2	0,2	3	10	3	49	0,5	8	11	28
	Máximo	5,6	1,0	5	52	17	163	4,0	17	32	58
Villapinzón	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Media	5	0,2	4	50	12	180	3	13	24	41
	Mínimo	4,2	0,2	3	44	8	60	0,5	9	19	25
	Máximo	6,6	0,2	4	61	15	282	6,3	17	26	58
Viotá	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Media	6	0,3	5	64	27	187	4	19	27	83
	Mínimo	3,0	0,2	1	42	6	38	0,5	8	10	31
	Máximo	11,1	0,8	10	89	146	474	6,2	31	42	160
Zipacón	N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Media	4	0,4	5	40	14	435	4	10	25	75
	Mínimo	3,5	0,2	4	34	10	326	3,3	9	24	62
	Máximo	3,8	0,6	5	45	17	545	3,9	12	26	89

Continuación. Tabla 2. Promedio y rango de metales analizados, en suelos superficiales, por municipio.

Municipio		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Zipaquirá	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Media	6	0,5	6	46	21	302	3	15	29	97
	Mínimo	2,0	0,2	2	3	7	63	0,5	6	12	18
	Máximo	12,9	0,8	11	75	38	580	4,4	29	55	221
Total	N	218	235	234	234	234	235	221	234	235	234
	Media	6	1,2	6	58	19	245	5	22	23	103
	Mínimo	0,3	0,2	1	3	1	1	0,5	1	1	3
	Máximo	35	19,2	21	1.313	166	1.383	97	189	168	753

sentan arcillas y condiciones reductoras (saturación con agua) que favorecen formas no móviles y concentración de especies químicas reducidas, que pueden ser en algunos casos las más tóxicas para los seres vivos (ejemplo Cr+3). En términos generales, en los suelos de los municipios ubicados en la cuenca alta del río, la mayoría de los elementos estudiados se presentan en niveles de concentración inferiores a los máximos de referencia, a partir de los cuáles se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos. No obstante lo anterior, en algunas localidades de la cuenca alta se encontraron concentraciones importantes de Cd, Cu, Pb y Mn, cuya presencia además de ser de origen geogénico, puede relacionarse con emisiones del transporte automotor, especialmente en el caso de Pb y Mn; así como con aportes de residuos de agroquímicos y de actividades pecuarias e industriales para el caso de Cd, Cu y Mn.

En la zona 2, que comprende la cuenca baja del río, el pH de los suelos es más básico (pH 6,6 a 9), la textura es predominantemente franco arcillosa y se presentan contenidos altos de elementos trazas. La mayoría de suelos de la cuenca baja se desarrollan sobre lodolitas calcáreas, que por su naturaleza pueden contener elementos traza y ser fuente de cantidades apreciables de elementos a

los suelos. La presencia de arcillas y el pH alcalino, actúan sinérgicamente y aumentan la retención de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles en los suelos de ésta zona (Cu, Ni, Zn y Co especialmente). Los suelos de la cuenca baja, como los Typic Calciustolls o Typic Ustorthens concentran en general elementos en niveles que sobrepasan los valores de referencia, a partir de los cuales se pueden afectar las propiedades o calidad de uso de los suelos.

### 2.1.3 Influencia de parámetros fisicoquímicos en el comportamiento de los metales traza

Factores que van desde las condiciones climáticas (pisos climáticos dependientes de la altitud), confieren a los suelos determinadas condiciones físicas y químicas que guardan correlación y explican los procesos de concentración y acumulación de elementos químicos en los suelos de la cuenca baja (zona 2) y de movilidad en la cuenca alta del río Bogotá (zona 1).

Los valores de pH difieren de una zona a la otra. En la cuenca baja, en donde se acumulan mayores niveles de metales predominan valores de pH con tendencia básica (6.6 - 9.0); mientras que en la cuenca alta en la cual los metales se encuentran en menores

concentraciones, predominan valores de pH con tendencia ácida (4.0 - 6.5).

El predominio de suelos con pH ácido y neutro en la cuenca alta, favorece la existencia de formas móviles de Cu, Ni, Zn, Co, Mo, As y Cd, y facilita su migración explicando en parte, la menor concentración de elementos en los suelos de la cuenca alta del río, en comparación con la cuenca baja.

No obstante lo anterior, en algunos puntos de la cuenca alta y media, la presencia de material arcilloso y materia orgánica se conjugan, a pesar de las condiciones de acidez, dando como resultado acumulación de cantidades importantes de elementos cuyo origen puede ser geogénico o antrópico. En estos sitios, los colores oscuros de los suelos pueden relacionarse con la presencia de complejos órgano-minerales, materiales húmicos y minerales de bajo ordenamiento cristalino, provenientes de ceniza volcánica (material parental), presentes en varios sectores de ésta zona. La presencia de materiales provenientes de cenizas volcánicas fue confirmada con la prueba de Fieldes y Perrot, en suelos de la cuenca alta (alrededores de Zipacón, Tenjo y La Calera).

Además, específicamente en la parte central de la cuenca alta del río Bogotá, se presentan niveles casi impermeables de arcillas, que actúan como una barrera geoquímica dando lugar a procesos de concentración local como resultado del ciclo de períodos de lluvia intensos seguidos de otros más secos, llegando a encontrarse sitios con niveles de cadmio hasta de 5 a 14 ppm en las cercanías de Bojacá (Gonzalez, LM., Vargas, O, 1997).

Por otra parte, en la cuenca baja, los colores oscuros y marrones grisáceos en algunos de los suelos, puede relacionarse con la presencia de lutitas, limolitas y arcillolitas negras, que por su origen presentan alto contenido de material carbonoso. En ésta zona, predominan los suelos alcalinos, existen zonas caracterizadas por la presencia de rocas clásticas limoarcillosas con intercalaciones de calizas,

las cuáles además de conferir características alcalinas a los suelos, aportan carbonatos, material arcilloso y metales tales como As, Cr, Cu, Mn, Mo y Zn. Estas condiciones de existencia de material arcilloso y de pH alcalino, se complementan para aumentar la precipitación y concentración de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles. En esta zona se encontraron niveles hasta de 19 ppm de Cd, 189 ppm de Ni y 35 ppm de As en sectores cercanos a La Mesa, Apulo y Anapoima.

#### **2.1.4 Movilidad vs. acumulación de elementos traza**

En los suelos de la cuenca baja del río (zona 2), y en algunos sitios de la cuenca media, los elementos traza se presentan en general, en concentración superior a los máximos a partir de los cuáles, se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos (Ver Tablas 2 y 3 y Figura 3). Llama la atención el Cd que es el elemento que se presenta enriquecido en mayor número de localidades de la cuenca alta. Su origen además de aporte natural, puede estar relacionado con residuos de agroquímicos, riego con aguas residuales del río Bogotá, emisiones y residuos industriales, entre ellos residuos de curtiembres, que existen en algunas partes de ésta zona. Elementos como Zn, Cr y Pb, presentan altas concentraciones en algunos suelos de la cuenca alta, sin embargo a diferencia del Cd su distribución es muy local y se puede asociar a fuentes específicas en su zona de ocurrencia.

Por otra parte, en la cuenca baja del río Bogotá (zona 2), el Cd, Cr, Ni, Zn y Mo, son los elementos que con mayor frecuencia se encuentran por encima de los límites que definen calidad de uso del suelo (Tabla 3, Figura 3). Como se dijo anteriormente, el origen de éstos elementos se puede relacionar con los aportes de sus materiales parentales (principalmente lodolitas con intercalaciones de calizas, arcillolitas lodosas no calcáreas, lodolitas calcáreas), pero también con los aportes

de actividades antropogénicas, especialmente uso de agroquímicos; con residuos de actividades industriales y de transporte, y con el uso de agua del río Bogotá (luego de su paso por la zona urbana de la ciudad capital ) para riego de cultivos.

Los parámetros fisicoquímicos de esta zona, antes discutidos, pueden llevar a la formación de especies químicas inmóviles (Cu, Cd, Ni, Zn, Co, Mn y Pb), e incluso coprecipitados (en especial de Cd, Cu y Zn).

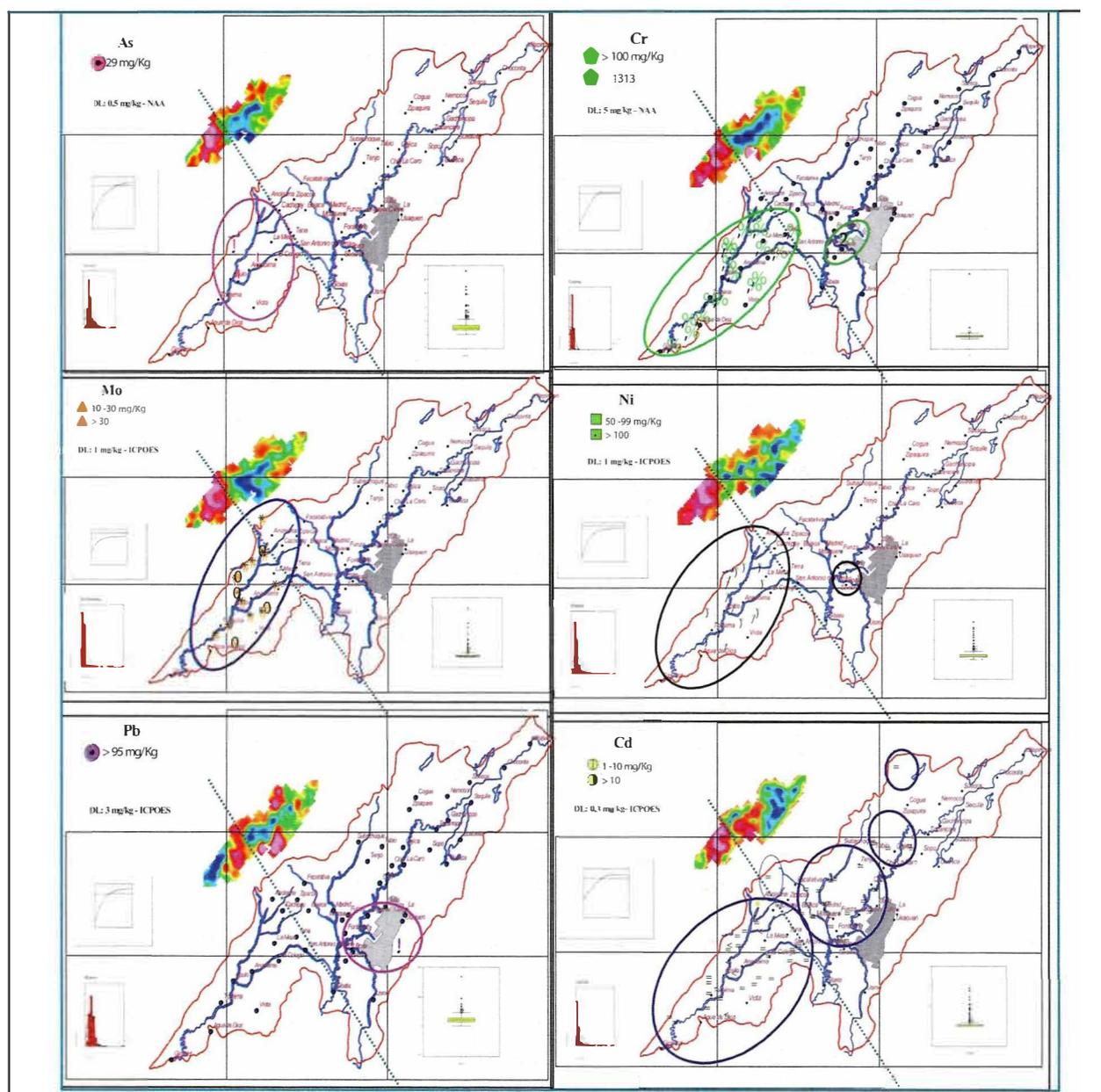


Figura 3. Distribución de As, Cr, Mo, Ni, Pb, Cd en la zona de estudio

Tabla 3. Sitios con niveles altos de elementos potencialmente peligrosos (EPPs) y valores internacionales de referencia

(concentraciones en mg/kg)

Elementos	Plancha	Subcelda	Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
Cr	245	71	Agua de Dios	4,3	0,6	21	112	30	877	2	31	9	103
Cd, Zn	245	57 DC	Agua de Dios	9,6	1,4	13	77	28	711	4	41	8	154
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	16	Anapoima	12,1	8,8	6	120	34	73	37	99	18	425
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	27	Anapoima	16,3	9,4	12	125	44	153	19	111	39	608
Zn	246	2	Anapoima	18,0	0,4	17	73	21	407	3	39	22	159
As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn	246	14	Anapoima	29,1	17,8	8	237	61	101	27	161	24	709
As, Zn	246	3 DC	Anapoima	32,4	0,2	19	65	46	1383	3	25	36	160
As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Zn	227	85 DC	Anapoima	34,6	19,2	6	149	52	113	69	189	11	697
Cd	227	28	Anolaima	4,4	1,4	5	37	14	378	3	9	27	76
Cd, Mo, Ni, Zn	246	26	Apulo	14,3	8,3	10	98	27	233	13	82	10	437
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	85	Apulo	17,9	2,3	6	118	27	137	20	121	16	431
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	1	Apulo	21,3	14,8	8	111	40	203	61	130	7	586
Cd, Zn	227	94 TC	Bogotá	1,0	5,8	10	7	40	579	1	26	31	207
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	227	94	Bogotá	1,1	3,7	5	1313	166	408	1	52	168	304
Cd	227	94 DC	Bogotá	3,4	2,8	5	25	44	305	1	23	27	114
Cd, Zn	227	55	Bojacá	3,3	8,7	8	8	13	500	1	14	13	200
Cd	227	68 DC	Bojacá	1,9	2,8	4	7	15	114	2	17	13	37
Cd	227	68	Bojacá	2,8	2,8	5	13	10	323	1	22	12	45
Cd	227	67	Bojacá	6,2	3,4	4	16	7	197		7	10	20
Cd, Mo, Zn	227	63 DC	Cachipay	13,5	1,0	4	82	13	146	15	28	23	179
As, Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	228	63	Cachipay	29,7	13,5	5	120	35	85	97	154	21	671
Cd	227	1	Cajicá	2,5	1,4	3	14	14	105	1	11	14	47
Cd	227	33	Facatativa		2,7	4	10	22	152	1	15	15	100
Cd	227	70	Funza	3,0	3,7	9	13	13	728	1	15	25	82
Cd, Zn	245	57	Girardot	4,2	1,0	11	57	19	569	4	26	10	145
Cd, Mo, Ni, Zn	227	74	La Mesa	10,5	4,6	6	94	23	159	16	55	17	315
Cd, Cr, Ni, Zn	227	88	La Mesa	10,9	3,8	17	104	29	354	5	60	31	308
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	75 DM	La Mesa	16,6	6,8	8	111	23	139	16	67	17	375
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	227	75	La Mesa	16,6	6,4	8	119	22	136	17	67	22	372
Cd, Cr, Ni, Zn	227	76	La Mesa	20,7	10,9	5	105	33	171	9	95	15	753
Cd	227	56	Madrid	3,1	3,2	11	17	17	728	1	24	15	124
Cd	227	57	Madrid	3,5	1,6	5	20	18	228	1	15	14	55
Cd, Mo	246	4	El Colegio	10,0	1,4	5	96	23	71	29	35	39	139
Mo	246	4 DM	El Colegio	10,1	1,0	4	83	23	68	29	32	42	138
Cd	227	69	Mosquera	3,5	1,7	5	9	14	291	1	12	15	86
Cd	227	81	Mosquera		2,3	5	10	13	36	1	15	14	107
Cd, Zn	227	90	San A. de Tena	5,5	1,2	3	87	15	165	7	25	20	150
Cd	227	12	Tabio		1,6	7	33	18	166	1	27	21	138
Cd, Zn	227	23	Tenjo		6,1	7	23	30	354		17	34	563
Cd, Zn	245	36	Tocaima	7,2	1,5	6	99	24	251	6	46	10	146
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	37	Tocaima	10,8	1,8	12	108	20	112	22	69	33	170
Cd, Cr, Mo, Ni, Zn	246	49	Tocaima	12,7	4,7	7	80	21	183	25	61	33	314
Cd, Mo, Ni, Zn	246	52	Viotá	21,4	11,1	6	77	33	147	35	141	19	665
Zn				5,4	0,2	8	58	15	474	4	23	24	160
Cu	246	29	Viotá	5,7	0,2	5	60	146	164	6	25	40	95
Valores de referencia, mg/kg (Kabata-Pendias, 2000)				0,8-	1	50	100	36-50	1500	10	50	85	140

### 3. CONCLUSIONES

El muestreo sistemático adelantado en suelos de la cuenca del río Bogotá, permitió determinar contenidos y acumulación de elementos potencialmente tóxicos, evaluar su posible origen (antropogénico o geogénico) y analizar localmente parámetros y factores condicionantes de la movilidad y bio-disponibilidad de estos elementos.

Los patrones de distribución geoquímica diferenciaron una zona con suelos de características ácidas y bajos valores de elementos potencialmente peligrosos (EPPs) que coincide con la cuenca alta del río Bogotá y una zona con suelos básicos y arcillosos con altas concentraciones de EPPs que coincide con la cuenca baja del río Bogotá. Además localmente en algunos puntos de la cuenca media se presenta acumulación de metales en el suelo.

La concentración actual, movilidad y acumulación de elementos en suelos de la cuenca del río Bogotá, han sido determinadas por las condiciones fisicoquímicas del material parental y de los productos de meteorización resultantes (pH, potencial redox, mineralogía, presencia de arcillas, entre otras), por condiciones climáticas y por la calidad y propiedades de los aportes antropogénicos recibidos. La información generada contribuye a la definición de líneas base geoquímicas, sirve de apoyo a la planeación de uso del suelo y es soporte en la toma de decisiones sobre el manejo integral de la cuenca del río Bogotá.

### BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J., Ulloa, C. 1996. Memoria explicativa de la geología de la plancha 208 Villeta. INGEOMINAS. Bogotá.

Acosta, J., Ulloa, C. 1997. Memoria explicativa de la geología de la plancha 227 Bogotá Nor-occidente. INGEOMINAS, Informe 2302. Bogotá.

Acosta, J., Ulloa, C. 1998. Geología de la plancha 246, Fusagasuga. INGEOMINAS, Informe 2374. Bogotá.

Acosta J., Guatame, R., Caicedo, J., Cardenas, J. 2000. Geología de la plancha 245, Girardot. INGEOMINAS, Informe 2474. Bogotá.

CAR, 2000. Manejo integral de cuencas, cuenca hidrográfica del río Bogotá. Un CD. Bogotá.

IGAC, 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá.

INGEOMINAS, 1997. Mapa geológico de Colombia. Bogotá D.C.

González, LM., Vargas, O. 2004. El problema de la contaminación de los suelos por metales pesados. En: Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. Publicación Especial No. 27. INGEOMINAS. Bogotá.

González, LM., Vargas, O. 1997. Estudio de la movilización de contaminantes en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. Informe Interno. Bogotá, 1997.

Montoya, D., REYES, G. 2003. Geología de la plancha 209, Zipaquirá. INGEOMINAS. Informe interno. Bogotá.

Kabata Pendias and Pendias. 2000. Standards for the assessment of soil and crop pollution with heavy metals as a guideline for agricultural land use.

USGS, 2001. Metals in continental soils. Washington D.C.

Van der hammen, T. 1998. Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial. CAR. Bogotá.

Vrom, 1991. Environmental quality standards for soils and water, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. The Hague.



## “Exploración regional de rocas ornamentales entre el Municipio de Valledupar y las inspecciones de Patillal y Badillo - Departamento del Cesar- Colombia”

Luis Enrique Bernal Vargas;  
lbernal@ingeminas.gov.co

### RESUMEN

Utilizando técnicas apropiadas de cartografía geológica y selección de áreas promisorias, se identificaron 3 sectores con rocas graníticas de potencial ornamental: Patillal, La Socola y Las Palomas; sectores que fueron muestreados y caracterizados sus materiales con fines ornamentales.

Los resultados de campo y los análisis de laboratorio efectuados confirman la bondad de las rocas graníticas con buen brillo y comportamiento al corte, buena permeabilidad aparente, dureza (6,5–7) e indicadores físico-mecánicos que los definen de condiciones similares a los granitos que se comercializan mundialmente y de aceptación en el mercado para su aplicación en pisos, mesones, muros, industria lapidaria, elementos decorativos y artesanales. En estos sectores se recomienda continuar con el proceso exploratorio de pre-factibilidad y viabilidad técnico económica.

**Palabras claves:** Roca Ornamental, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, áreas potenciales, granitos.

### ABSTRACT

Using appropriate geologic cartography techniques and selection of the promissory areas, 3 sectors were identified with granitic rocks of ornamental potential: Patillal, Socola and Palomas; the sampling areas and characterized their materials with ornamental purpose.

The results of field and the actual laboratory analyses confirm the kindness of the granitic rocks with good shine and behavior to the cut, good apparent permeability and hardness (6,5.–7) and the physical-mechanics indicators that define them from similar conditions to the granites that are marketed worldwide and of acceptance in the market for their application in floors, taverns, walls, lapidary industry, ornamental and handmade elements. Sectors where it is recommended to continue with the exploratory process of pre-feasibility and technician - economic viability.

Key words: Granites, ornamental rock, potential áreas, Sierra Nevada of Santa Marta, Valledupar.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un planteamiento de aceptación universal asegura que el crecimiento de la economía depende en gran parte de la producción de más y mejores bienes y servicios cuya fuente son los recursos naturales; sin embargo estos son cada vez inferiores a las necesidades del mercado.

Esta exploración regional de rocas ornamentales en el Departamento del Cesar (Colombia) estuvo dirigida a identificar la existencia del recurso e iniciar uno de los eslabones de una cadena productiva como son las Rocas Ornamentales, las cuales manejan importantes mercados a nivel mundial y que para nuestro entorno nacional no ha tenido la trascendencia requerida, dada la potencialidad del recurso y la estratégica ubicación geográfica de Colombia en el entorno mundial para el manejo del mercado. A nivel regional, el proyecto impulsa la apertura de un panorama de nuevas fuentes de inversión que contribuyan a la diversificación de la minería en departamentos tradicionalmente carboníferos como son el Cesar y la Guajira y, por ende, a proponer otras oportunidades para la planeación del desarrollo regional y el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes (Gobernación del Cesar 2001).

Rocas Ornamentales, como producto industrial, son consideradas todas aquellas rocas que después de un proceso de elaboración son aptas para ser utilizadas como materiales nobles de construcción, elementos de ornamentación, arte funerario y escultórico, objetos artísticos y variados, conservando íntegramente su composición, textura y características físico-químicas (López et al, (1996)). Actualmente estos recursos minerales están agrupados bajo el marco conceptual de la industria de los materiales de la construcción; industria de gran importancia para la economía mundial y el desarrollo nacional, que de acuerdo con datos de la Naciones Unidas representa un promedio entre el 10% y

12% del PIB mundial. Además, del impacto directo sobre el empleo, influye en el comportamiento macroeconómico de todos los países del mundo. En los países industrializados, la construcción aporta en promedio el 60% de la formación bruta de capital fijo (Alfonso, 2001).

### 1.1. Localización

El área está ubicada al noroccidente del Departamento del Cesar, entre el municipio de Valledupar por el sur y aproximadamente los límites departamentales del Cesar y la Guajira, por el norte. (IGAC, 1975; Tabla 1 ; Figura 1).

El área tiene una extensión de 382,5 km<sup>2</sup>, es atravesada por una importante red fluvial como son los ríos Guatapuri, San Francisco y Badillo y es cruzada de sur a norte por la troncal Bosconia-Valledupar-Riohacha, que

Tabla 1. Vértices del área. Coordenadas origen Bogotá. Fuente IGAC (1975)

Punto	Coordenada	
	X	Y
A	1.652.000	1.091.000
B	1.665.000	1.108.000
C	1.680.000	1.108.000
D	1.680.000	1.091.000

bordea el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), desde donde se desprenden carretables que permiten la interconexión con las actuales vías férreas de la región y poblaciones como Los Corazones, Patillal, Atanques, Badillo y Las Juntas, entre otras.

### 1.2 Metodología

La técnica de investigación utilizada para la prospección y exploración regional a escalas 1:50.000 y 1:25.000 se resume en la Figura 2.

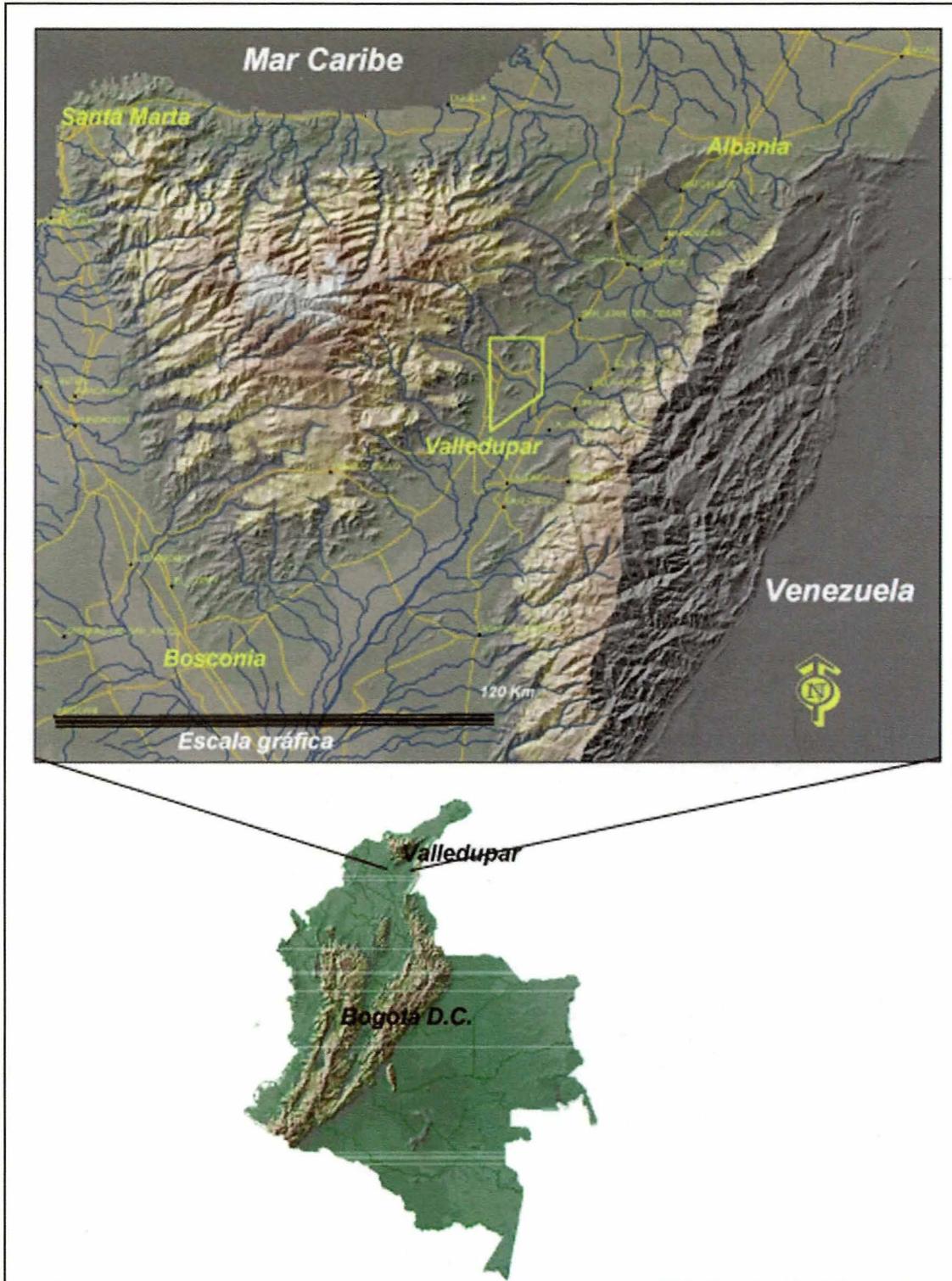


Figura 1. Localización del área

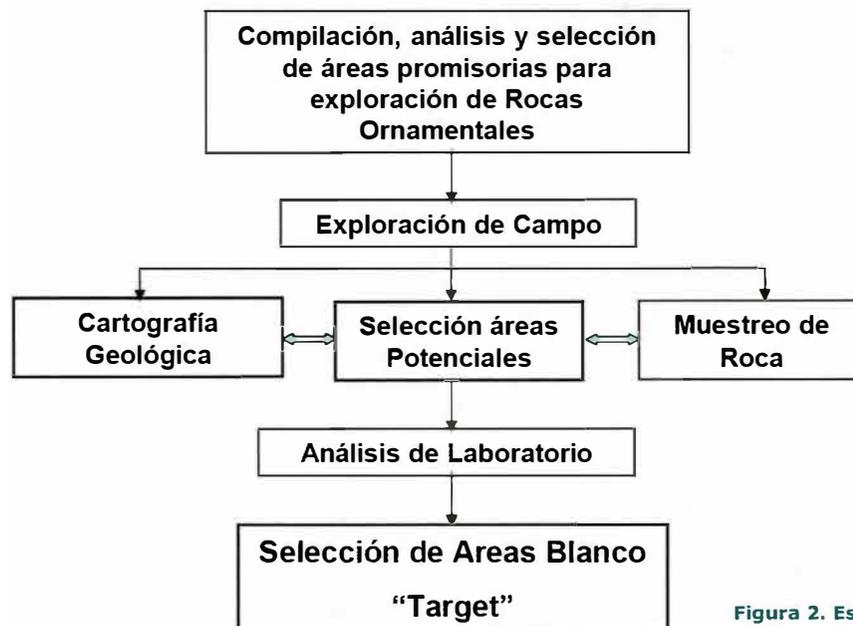


Figura 2. Esquema metodológico

Paralelamente con la cartografía geológica, se hace énfasis en la toma sistemática de datos para definir las principales familias de diaclasas, su espaciamiento, rugosidad, apertura, continuidad y la densidad del fracturamiento (**Jv**) (González, 2002); el resultado es la preselección de sectores apropiados con potencial del recurso ornamental. Es importante aclarar que unidades consideradas en la priorización inicial con potencial alto, al verificar el estado de diaclasamiento, no ofrecían en campo ninguna aptitud ornamental. Por lo tanto, el grado y densidad de diaclasamiento que definen los posibles tamaños de los bloques que conforman el macizo rocoso y la proyección de uso se analizan según las técnicas existentes como la proyección estereográfica, los diagramas rosa y la utilización del parámetro Jv.

En donde:

$$(1) \mathbf{Jv} = \frac{\Sigma \text{No de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}}$$

Una vez preseleccionados los sitios se inicia la valoración integral de los parámetros establecidos en la Tabla 2, los cuales afinan los criterios de selección y canterabilidad (sitio de probable explotación de roca) a tenerse en cuenta para la valoración de los sitios de interés ornamental, en donde "Cada parámetro se valora según una escala  $V_i$  de 0 a 9 (siendo 0 el mejor valor y 9 el de peor calidad), de acuerdo con el grado de importancia que se tiene en cada área. Este valor, a su vez, viene afectado por un coeficiente  $K_i$  que depende de la importancia o peso relativo que se concede a dicho parámetro en la valoración de las áreas y que es fijo para todas ellas" Muñoz et al, (1989 a-b).

La valoración **V** se estima según:

$$(2) \mathbf{V} = \frac{\Sigma K_i * V_i}{V_{\max} * n_i} * 100$$

$V_i$  = valoración del parámetro estudiado

$K_i$  = Coeficiente corrector

$V_{\max} = 9 * \Sigma K_i / n_i$ , que para la evaluación es una constante de valor  $9 * 55/10 = 49,5$

**Tabla 2. Valoración de área**

TABLA 2. VALORACION DE AREA																
Características de Afloramiento (morfología, recubrimiento, vegetación, etc.)				Recubrimiento: < 3 m, Vegetación monte bajo 3 m, Vegetación monte alto												
Litología																
Criterios de Valoración (V1)				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Coef. Ki	Valor K1V1	Observaciones
CRITERIOS DE SELECCIÓN PREVIA	Topografía													3		
	Accesos													6		
	Alteraciones a escala del yacimiento													7		
	Facturación, diaclasado, posibilidad Extracción y tamaño de bloques													8		
CRITERIOS DE CANTERABILIDAD PREVIA	Oxidación													10		
	Discontinuidades (Gabarros, diques, Enclaves, bandeados, filones, etc.)													9		
	Tamaño del Yacimiento													2		
	Impacto ambiental													4		
	Existencia de canteras o minas													5		
	Infraestructura industrial													1		
<b>Valoración K1V1</b>	<b>Area</b>	TOTAL K1V1														

Fuente: Manual de rocas ornamentales

En cada uno de los sitio seleccionados se efectúa el muestreo de bloques de roca de aproximadamente 70x70x70 cm de lado, de los cuales se elaboran las respectivas tabletas y probetas para los análisis físicos y comportamiento geomecánico que soportan la calidad de las rocas. Además, se efectúa el muestreo de material alterado y suelo para determinación de minerales de neoformación de tipo arcilloso con la técnica de Difracción de Rayos X (DRX).

Los análisis que principalmente soportan las primeras fases de una exploración regional con fines ornamentales son:

- Difracción de Rayos X : Define los minerales neoformados por la acción de los agentes meteorizantes (Thorez, 2005) y su incidencia en la calidad de roca.

- Petrográfico: contribuye en la definición de la homogeneidad, el grado de deterioro medio y actual, la porosidad, las discontinuidades, fisuras, rellenos, cuyas características influyen el comportamiento del material en su fase de utilización y condicionan su evolución en el transcurso del tiempo (Williams, Turner & Gilbert, 1979; Streckeisen, 1974 y Travis, 1955).

- Metalográfico: Este análisis determina la presencia de sulfuros, óxidos e hidróxidos de hierro (Ramdohr, 1980) y contribuye en la definición de la alteración y oxidación que presentan los materiales, cuya determinación se apoya en las técnica de análisis de secciones delgadas pulidas y la Difracción de Rayos X (DRX).

- Homogeneidad: Se estudian los cambios litológicos, variaciones de color y tamaño de grano, presencia y distribución de fenocristales.

tales, gabarros, diques, venas y cavidades rellenas de cristales.

- Calidad de la roca: Este parámetro se evalúa sobre la SD utilizada en el análisis petrográfico, con base en los criterios de alterabilidad y la calidad mecánica de la roca, según:

- El deterioro mineralógico medio de cada fase mineral, calculado mediante la fórmula

$$(3) D_m = \frac{V_i * n_i}{n}$$

$V_i$  = Grado de alteración tomado de la tabla de Ordaz-Esbert

$n_i$  = Numero de granos con alteración  $V_i$

$n$  = numero total de granos de la fase mineral X estudiada

- El deterioro mineral de la roca ( $D_m$ ) evalúa integralmente la roca en su conjunto, cuyo valor se obtiene ponderando el deterioro mineralógico medio de cada fase con su abundancia relativa en la roca ( $P_x$ ).

$$(4) D_x = \frac{D * P_x}{100} \%$$

- Deterioro actual de la roca ( $D_a$ ), considera el deterioro mineralógico ya conocido y la oxidación del granito.

$$(5) D_a = \frac{D * K_m + O_x * K_x}{K_m + K_x}$$

Siendo  $k_m$  y  $K_x$  coeficientes de ponderación de valor 1 y 3 respectivamente, según, Lopez et al (1996).

La valoración cualitativa del deterioro actual se efectúa con base en la **Tabla 3**.

- Fracturamiento: Es uno de los factores de mayor peso en la evaluación del recurso y su explotación, de su densidad y tipo depende la posibilidad de la extracción de bloques comerciales. Parámetro que es evaluado se-

gún el programa propuesto por Reiter & Acs (2003), y la medida del  $J_v$  de la fórmula (1).

- Brillo y color: Parámetros empíricos y subjetivos, pero decisivos, impuestos por los criterios del productor, que definen la aceptabilidad o rechazo del producto en el merca-

**Tabla 3. Valoración del Deterioro actual ( $D_a$ )**

<b><math>D_a</math></b>	<b>Valoración</b>
0-1	Muy bajo
1-2	Bajo
2-3	Medio
3-4	Alto

do. Por criterios geológicos se recomienda la utilización de la tabla de colores de Munsell (1991).

- Análisis geomecánicos: Estos ensayos se efectúan según las Normas internacionales ISO, debidamente acreditadas por los países especialmente productores, con procedimientos y especificaciones definidas por la ASTM, DIN, BSI, AENOR y UNE (22-170 a 179) entre otras, cuyos análisis están dirigidos a conocer el comportamiento de los materiales ante la heterogeneidad de utilización. Entre ellos se destacan la porosidad abierta, densidad aparente, coeficiente de absorción de agua por capilaridad, porosidad abierta, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al choque, resistencia al desgaste por rozamiento, coeficiente de resistencia al agua por capilaridad, resistencia a las heladas, módulo elástico, micro dureza Knoop y absorción de agua a presión atmosférica.

## 2. RESULTADOS

Con la información, obtenida en la fotointerpretación geológica más el análisis de la compilación de la información bibliográfica y cartográfica disponible, se evaluaron las condiciones estructurales, las características lito-

lógicas de cada una de las unidades geológicas, el color de las rocas y textura así como las restricciones ambientales de parques naturales y reservas indígenas, cuyo resultado permitió la Categorización de Unidades Promisorias (Tabla 4), a tenerse en cuenta en la etapa de exploración de campo, donde se resaltan 4 unidades roca con prioridad alta, 9 con prioridad media y 2 con prioridad baja.

Con esta información, se planificó la iniciación de las actividades de prospección y exploración geológica, con énfasis en la definición de las condiciones estructurales que presentan las unidades, la selección de los sitios de interés ornamental, la toma de muestras y la respectiva caracterización de los materiales seleccionados.

## 2.1 PROSPECCIÓN GEOLÓGICA

El corredor de interés definido para la prospección y exploración de campo, es dominado por rocas ígneas plutónicas félsicas a intermedias, efusivas, piroclásticas y sedimentarias del Mesozoico, intrusivos del Cretácico-paleógeno (?) y depósitos cuaternarios (Figura 3).

De las anteriores unidades se destacan por su composición, texturas, colores y condiciones estructurales, con potencialidad como roca ornamental las siguientes unidades:

### 2.1.1 Batolito de Patillal (Jcm- Jgr; 170±11 m.a)

Rocas de edad jurásica que toman su nombre del corregimiento de Patillal y junto con el Batolito de Pueblo Bello son considerados como una sola unidad con sus variaciones faciales desde granodioritas a granitos, de edad contemporánea y relaciones intrusivas con las rocas volcánicas (Tschanz et al. 1969).

Dentro del área presenta sus mejores afloramientos siguiendo los cauces de los arroyos Grande, la Malena y el río Badillo, con una composición predo-

minante granítica de colores gris crema a rosados dependiendo del contenido de feldespato potásico (microclina), es rico en cuarzo hialino de tamaño medio a grueso y como minerales accesorios biotita de tamaño fino a medio y hornblenda. La textura predominante es fanerítica gruesa a muy gruesa, equigranular y homogénea y en menor proporción porfírica. Estas rocas presentan sectores con alto contenido de xenolitos de sienitas y monzonitas, gabarros de color verde ligeramente redondeados que van desapareciendo gradualmente dentro de la roca original.

Microscópicamente, presentan una textura holocristalina muy gruesa a gruesa, equigranular homogénea, masiva, con cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, anfíboles, biotita y magnetita en intercrecimiento con ilmenita.

Dentro de esta unidad, por su textura, composición, color y grado de fracturamiento se evaluaron cinco sitios, en donde se seleccionaron dos de interés ornamental, definidos como Patillal y La Socola.

### 2.1.2 Pórfido de las Palomas (TKg ?)

Esta unidad se observa al norte de la Inspección de Badillo, tomando la vía principal que comunica los municipios de Valledupar (Departamento del Cesar) con San Juan del Cesar, Departamento de la Guajira), antes del cruce del puente de la quebrada Las Palomas. Presenta una morfología relativamente ondulada, cubierta por una vegetación densa de arbustos de baja altura y ratrojos (Figura 4).

Por relaciones de campo se observa que estas rocas intruyen una secuencia sedimentaria calcárea comparativamente equivalente a la Formación Cogollo de edad Cretácico superior. Macroscópicamente son de color gris verdoso de aspecto volcánico efusivo y brechoide, texturalmente heterogénea con fragmentos porfíricos gris claros de plagioclasas y xenolitos de calizas (figura 4), que permiten considerarlas como un evento posterior que afecta la secuencia calcárea que la supraya-

Tabla 4. Categorización de unidades litológicas con potencial para Ro			
EDAD	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	CARACTERÍSTICAS GENERALES	PRIORIDAD
TRIÁSICO-JURÁSICO	Formación Los Indios (Trpi)	"cuarcita" de grano grueso a medio, de color gris a gris oscuro, alternando con lutitas, localmente calcáreas	*
	Formación Corual (Trpc)	Basaltos negros a grises oscuros en la base; diabasas con intercalaciones de limolitas negras; lutitas intercaladas con capas de chert suprayacidas por rocas volcánicas.	**
	Formación Guatapuri (Trg)	basaltos porfíricos, basaltos andesíticos, andesitas, volcánicos piroclásticos, keratófidos, espilitas y ocasionalmente brechas y conglomerados con cantos subangulares. Todo el conjunto presenta colores de gris verdoso a gris claro que por meteorización se tornan anaranjados a rojizos	**
	Rocas Volcánicas e hipoabisales (Trs)	Rocas basálticas de color gris marrón, carmelito y menos común verde oscuro.	**
	Pórfidos Keratófidos Verdes (Trp)	Pórfido andesíticos gris verdoso a verde oscuro con fenocristales de epidota color verde claro y plagioclasa; esporádicamente fragmentos pequeños de rocas volcánicas afaníticas con pirta diseminada.	*
	Ignimbrita de Caja de Ahorros (Jca)	Ignimbritas de color gris, café verdosas, con abundantes bandas paralelas de colores claros.	***
	Ignimbrita de Los Clavos (Jlc)	Brecha volcánica piroclástica, de color negro a gris oscuro; constituida por cristales, fragmentos de cristales, fragmentos de rocas volcánicas y tobas; los fragmentos más comunes son autolitos negros	**
	Cuarzomonzonita de Patillal (Jcm)	Brecha piroclástica, negra a gris oscura; los fragmentos más comunes son autolitos negros.	***
	Plutón de Nueva Lucha (Jnl)	Se caracteriza por su color rosado (feldespato) y el contenido variable de cuarzo.	**
CRETÁCICO	Vitrófiro Riolíptico Negro (Jvr)	Rocas de apariencia gabroica, gris oscuras, cortada por diques de rocas graníticas	**
	Riodacita de Los Tábanos (Jt)	Roca negra, vítrea a semivítrea.	***
	La Riolita del Golero (Kg)	Riolitas a traquitas de color rosado a lila, en la parte basal presenta localmente líneas de flujo, cada una de diferente color y textura. En la parte alta, la unidad presenta microgranitos de color rosado a salmón. Felsitas afaníticas con bandas de flujo, de color rosado claro, salmón, lila o gris rojizo.	**
	Pórfidos graníticos hipobisales cretácicos (Kp)	Granito porfírico o riolita porfírica grises a marrón pálido	**
	Grupo Cogollo (K1)	caliza arcillosas de color gris claro, en bancos delgados a medios, algunos presentan abundantes fósiles de bivalvos, atravesados por venillas de calcita.	**

PRIORIDAD (Color-Textura y tectónica)	
R	Alta ***
A	Media **
V	Baja *

Fuente de información Geologica: Tschantz et al, (1969)

“Exploración regional de Rocas Ornamentales entre el Municipio de Valledupar y las inspecciones de Patillal y Badillo - Departamento del Cesar- Colombia”

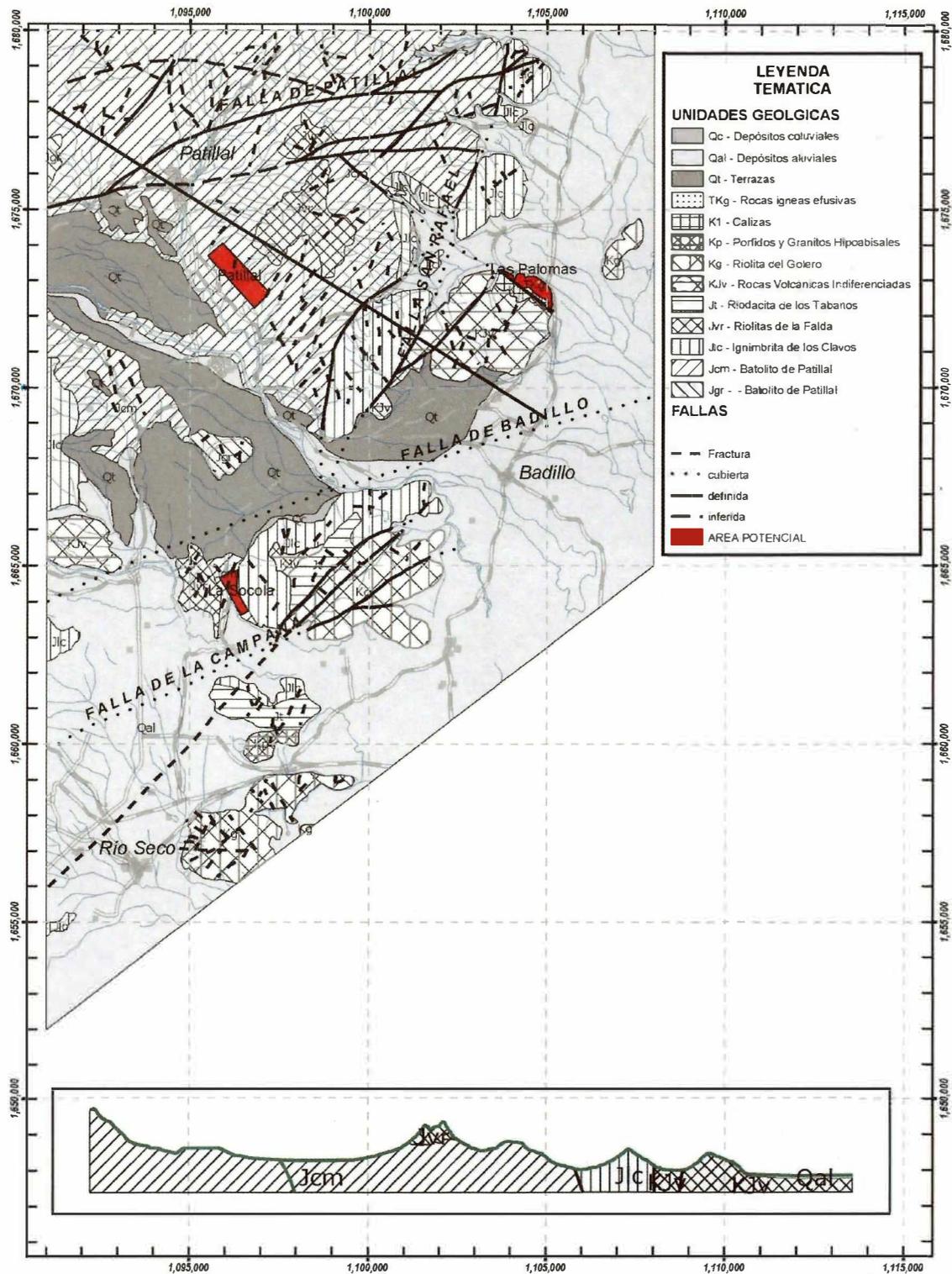


Figura 3. Mapa geológico y selección de áreas blanco para exploración detallada



Figura 4. Morfología y vegetación predominante del Porfido Andesítico Las Palomas, intruyendo la secuencia cretácica del Grupo Cogollo (arriba). Xenolitos centimétricos de calizas dentro del

ce, de relaciones diferentes a la unidad cartografiada y descrita por Tschanz et al (1969) como Riolita del Golero, redefinida en este trabajo, y para este sector, como Porfido de las Palomas de edad Cretácico superior - Paleógeno inferior (?).

Estas rocas al microscopio presentan textura porfirítica, con fenocristales distribuidos en una matriz de tendencia fluidal traquítica; con luz reflejada se observa desarrollo de cristales pequeños de magnetita y trazas de calcopirita y pirita.

*Existen fragmentos aglutinados por relleno de recristalización hidrotermal en venas de fracción milimétrica a centimétrica, con estructura bandeada verde oscura con clorita, calcita y cuarzo blanco a incoloro con manchas de tonalidades verdes por epidotización y cloritización, Figura 5.*

Por su color, brillo, textura y facilidad de acceso esta unidad es considerada de interés como roca ornamental; sin embargo, los xenolitos de composición calcárea, disminuyen su carácter promisorio, pero por su color y brillo determinado, se ha considerado como un blanco de exploración.

### 2.1.3 Tectónica

Dentro del contexto de las rocas ornamentales, las condiciones estructurales que presentan las rocas consideradas de interés, es uno de los factores determinantes para definir su potencialidad. Por lo tanto, se hace un esbozo del marco tectónico regional de la Sierra Nevada de Santa Marta y se enfatiza en las condiciones estructurales del área de interés, cuya interpretación es fundamentada en los trabajos realizados por autores como Raasvelt (1956), Doolan & MacDonald (1976), Tschanz et al (1969 y 1974), Duque (1980), Ujueta (1994), Forero (1990), Ujueta & Llínás (1990), Taboada et al (2000), Cediél et al (2003), Orozco y Osorio, (2004) y el recono-

cimiento de campo efectuado en el desarrollo del trabajo.

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), macizo aislado del cinturón andino colombiano de forma triangular, en donde se encuentran las máximas alturas del relieve colombiano, es una provincia geomorfológica compleja y tectónicamente activa, delimitada al suroeste por la Falla Santa Marta-Bucaramanga de rumbo sinistral e inversa; al norte por la Falla de Oca de rumbo dextral y por el sureste por el lineamiento tectónico del Cesar- Ranchería. En la SNSM son evidentes tres orogénesis con sucesos de metamorfismo, adosamientos de materiales alóctonos, eventos magmáticos, sedimentación y procesos denudativos intensos, que han permitido subdividirla estructuralmente en tres subprovincias, con basamentos metamórficos característicos de edades diferentes, claramente delimitadas y definidas como Santa Marta, Arco de Sevilla y Sierra Nevada, (Tschanz et al. 1974).

La subprovincia de la Sierra Nevada, en donde se ubica el proyecto, tiene un basamento de granulitas del Precámbrico (1400 m. a), las cuales probablemente hicieron parte del sector noroccidental del Escudo de Guyana, desgarrado quizás durante el Precámbrico superior y separadas de los esquistos del Precámbrico superior (Serranía del Perijá), por el lineamiento del Cesar, de rumbo Noreste, cubierto bajo los depósitos recientes del actual valle del Cesar – Ranchería.

Autores como Audemard (2002) y Cediél et al (2003) confirman las condiciones alóctonas de la SNSM y sugieren que el desplazamiento del bloque Maracaibo del cual hace parte la Sierra Nevada, son producto de la tectónica de placas en el Bloque Norte de Sur América y su levantamiento actual está relacionado con la colisión del arco de Panamá, (Placa Pacífica), con el Norte de Sur América.

Los límites tectónicos activos de la SNSM en regímenes transpresivos como el de la Falla de Oca, de tendencia predominante E-W y la

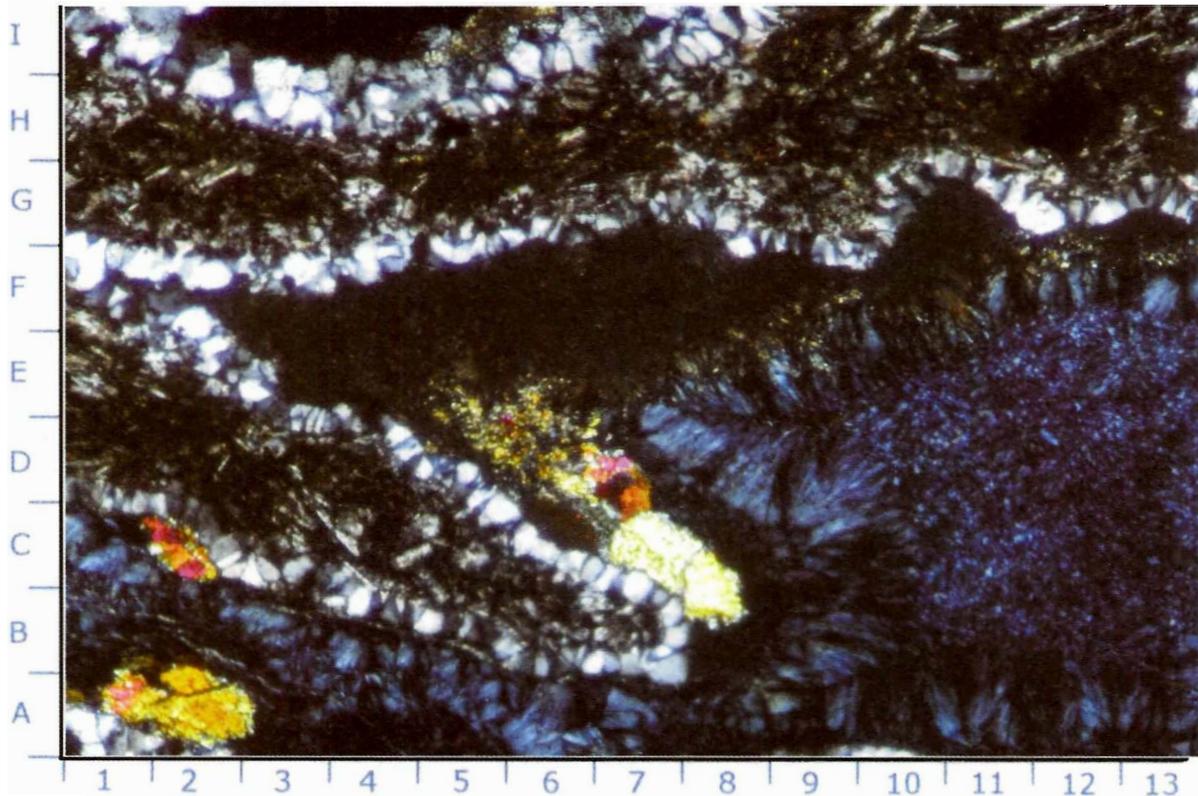


Figura 5. Amígdalas con clorita (C11), epidota (D6), bordeadas de calcedonia (F2). Matriz (G2) microcristalina pseudotaxítica en flujo envolviendo las amígdalas y fenocristales mayores de epidota (A2-Clinzoisita). Nícoles X, 4X,

Falla Santa Marta-Bucaramanga de dirección NW-SE, evidencian la deformación continental al norte de Colombia y son responsables de buena parte de la intensa deformación que han sufrido las rocas que componen el macizo de la SNSM, (Orozco y Osorio, (2004)).

A nivel regional el mapa de vectores de desplazamiento relativos de placas (Trenkamp et al., 2002), muestra que el Bloque Maracaibo se desplaza en dirección NNW lo cual genera campos de esfuerzos locales en dirección SE a NW facilitando la reactivación de los segmentos curvos a manera de fallas inversas, una de de las cuales es la falla de Badillo que se inicia en la falla Santa Marta-Bucaramanga, desde cerca de la población de Purificación, sur de Aracataca, y cruza cerca de la población de Badillo y se infiere que se intercepta con el lineamiento del Cesar (Figura 3).

A partir de la falla inversa de Badillo de dirección SW-NE, cubierta dentro del área por los depósitos torrenciales del cuaternario (Qt), provenientes de la SNSM, se desprenden fallas locales como La Campana, San Rafael, La Colorada y Patillal. Existen fallas menores como la falla de las Palomas de Rumbo SE-NW que evidencian un sistema deformativo de bloques con rampas laterales y frentes de cabalgamiento, cuyos limites son fallas de rumbo NNE y NNW de expresiones morfológicas características y el alto fracturamiento que presentan las rocas afectadas por su desplazamiento.

El análisis del fracturamiento regional muestran dos grandes sistemas de diaclasas: el primero con azimut entre 20-30° relacionado al mecanismo de la cizalla principal de la Falla Badillo en posición sintético y el otro sistema

antitético 320-330° con buzamientos mayores a 70°, formando entre ellos ángulos agudos de aprox. 60°, en una simetría triclinica, típica de diaclasamiento por cizalla.

## 2.2 DEFINICIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS

Efectuada la categorización de la Tabla (4) y la prospección geológica de campo, se seleccionaron los sectores con menor grado de fracturamiento, en donde se evaluó el Jv (fórmula 1), cuyos valores  $\leq 2,2$  (Tabla 5) permitieron seleccionar 7 sitios a los que se les efectuó la valorización de los parámetros definidos a nivel de exploración regional (Tabla 2), de los cuales 3 fueron definidos como áreas favorables: Patillal, La Socola y Las Palomas (Tabla 6). cuyos valores son comparados con la Tabla (7) del Manual de Rocas Ornamentales, (1996) y definidos como aceptables

En cada una de las localidades anteriormente seleccionadas, se efectuó una exploración geológica de mayor detalle y la toma de medidas del diaclasamiento para identificar el número de familias, espaciamientos y su continuidad, parámetros que corroboran la potencialidad de cada una de las áreas seleccionadas, condicionan el tamaño de los bloques a extraer y desde luego limitan su uso. Además, fueron objeto de un muestreo de roca para análisis de tipo industrial para la elaboración de las secciones delgadas pulidas (SDP), probetas y tabletas para los respectivos análisis petrográficos y metalográfico, brillo, color y la caracterización geomecánica, (Figura 6).

A las SDP se les efectuó el análisis petrográfico y metalográfico para definir el grado de deformación de la roca, su estado de oxidación y el deterioro actual. Además se efectuó el muestreo de material meteorizado para los análisis de los minerales de neoformación por meteorización utilizando la técnica DRX.(Thorez, 2005), cuyos resultados se resumen en la Tabla (8).

Las tabletas fueron enviadas a los laboratorios de Adalid Ltda en Bogotá para la determinación del brillo, color, dureza, comportamiento del material al cortado de las tabletas y a INTROMAC de España las probetas para efectuar los análisis de comportamiento geomecánico. Los resultados se presentan en la Tabla (8).

La Tabla 9, compara los valores exigidos para granitos por las normas vs los resultados obtenidos en cada uno de los sitios seleccionados, evidenciando la calidad que presentan las rocas, su color, permeabilidad, calidad de brillo y dureza, que permiten considerarlos de buenas expectativas de comercialización, tanto en el mercado nacional como internacional; dependiendo de la ubicación de los sectores que permitan extracciones de bloques de 2 m<sup>3</sup>.

## 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las rocas identificadas dentro del área son Ígneas plutónicas, hipoabisales, efusivas y piroclásticas, denominadas Batolito de Patillal (Jcm), Ignimbrita de Los Clavos (Jlc), Riolita de La Falda (Jvr), Riodacita de Los Tábanos (Jt), rocas volcánicas indiferenciadas (KJv), Riolita del Golero (Kg) y Pórfidos graníticos hipoabisales (Kp), de edad Jurásico y Cretácico, (Tschanz et al. 1969) y se identificaron 2 unidades que afloran en el sector, como son las Calizas (K1) al Parecer equivalentes al Grupo Cogollo y el porfido intrusivo de las Palomas (TKp).

Las unidades geológicas con potencial como roca ornamental son el Batolito de Patillal (Jcm) y el Porfido Intrusivo de las Palomas (TKp), sobre los cuales se ubican los blancos de exploración de Patillal (110 Ha), La Socola (35,5 Ha) y las Palomas (46,6 Ha).

**Tabla 5. Tamaño orientativo del bloque en función del parámetro  $J_v$**

Fuente: Manual de Rocas Ornamentales, (1996)

<b>PARAMETRO <math>J_v</math></b>	<b>TAMAÑO ORIENTATIVO DEL BLOQUE</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
$\leq 1,7$	Grande	Bloque Comercial Bloque no Comercial
1,7	Optimo	
2,2	Aceptable	
$\geq 2,2$	No aceptable	

Fuente: Manual de Rocas Ornamentales, (1996)

**Tabla 6. Selección de áreas favorables para caracterización de Rocas Ornamentales.**

Fuente: Manual de Rocas Ornamentales (1996)

<b>Clasificación</b>	<b>I. de Valoración</b>	<b>Patillal</b>	<b>La Socola</b>	<b>Palomas</b>
Muy Buena	0-20			
Buena	20-40			
Aceptable	40-60	<b>50</b>	<b>52,4</b>	<b>46,8</b>
Mala	60-80			
Muy Mala	80-100			

**Tabla 7. Comparación de los índices de Valoración Vs áreas seleccionadas.**

<b>Parámetros</b>	<b>Constante (K)</b>	<b>Las palomas (Vi)</b>	<b>La Socola (Vi)</b>	<b>Patillal (Vi)</b>
Topografía	3	2	6	6
Accesos	6	2	5	5
Alteración	7	4	3	3
Fracturas	8	5	7	6
Oxidación	10	6	2	2
Gabarros - xenolitos	9	4	7	7
T. del Yacimiento.	2	3	5	5
Impacto Ambiental	4	3	5	4
Exist. de canteras	5	6	4	4
Infr. Industrial	1	4	4	4
V. del Área KiVi		234	262	250
Total KiVi x 0.202		46.8	52.4	50



**Figura 6. Tamaño de un bloque de granito requerido para efectuar los análisis de caracterización geomecánica del material. Sitio de muestreo, cerro de Las Palomas.**

El fracturamiento regional muestra dos sistemas de diaclasas, la primera con azimut entre  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  relacionado al mecanismo de la cizalla principal de la Falla Badillo en posición sintético y el otro sistema antitético  $320$ - $330^{\circ}$  con buzamientos mayores a  $70^{\circ}$ , formando entre ellos ángulos agudos de aprox.  $60^{\circ}$ , en una simetría triclinica, típica de diaclasamiento por cizalla.

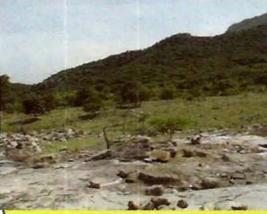
La Falla de Badillo es el principal rasgo tectónico regional en arco de tipo inverso, la cual se inicia sobre la Falla Santa Marta-Bucaramanga, y se infiere que se intercepta con el lineamiento del Cesar; es un rasgo regional que evidencia el desplazamiento de la SNSM en Dirección NNW asociada al Bloque Maracaibo, como respuesta a la acción de las placas de Nazca, el arco de Panamá y la placa de Suramérica.

De los  $382,5 \text{ Km}^2$  explorados, solamente el 0.49% muestra condiciones aceptables, dado el alto grado de fracturamiento que presentan las rocas, posiblemente reflejando la actividad tectónica que ha sufrido la SNSM a través del tiempo geológico.

Los análisis de la mineralogía de arcillas muestran, que a pesar de ser una muestra de roca superficial de amplia composición (granitos a andesitas basálticas), el mineral neoforado por meteorización es de composición caolinítica, relativamente estable, condiciones que favorecen la estabilidad del brillo y color de los materiales para uso ornamental.

Las áreas identificadas como blancos de exploración se caracterizan por ser rocas ígneas de brillos y colores atractivos para el mercado, de permeabilidad y dureza buena, con características geomecánicas buenas, infraestruc-

**Tabla 8. Muestra las características físico-mecánicas de los blancos de exploración de Patillal, La Socola y Las Palomas, Departamento del Cesar.**

CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES			
PARAMETROS	PATILLAL	SOCOLA	PALOMAS
			
Jv	1,5	1,5	1,4
Minerales de Arcilla	Caolinita	Caol + Illita	Caol + Illita
Calidad del Brillo	Buena	muy Buena	Regular
Color	Rosado Grisáceo	Rosado Naranja	Verde Amarillo
Dureza	6	7	6
Clasif. Petrográfica	Granito Hornblendico	Granito Porf., biot.	Brecha And.a Basaltica
Clasif. Metalográfica	Magnetita Titanifera	Ilmenita	Mag. titanifera, Calcpy
º Oxidación	1-Baja	1-Baja	2- Medio
Deterioro Medio (Dm)	2,6	1,73	2,08
Deterioro Actual (Da)	1,4	1,8	2,3
COMP. GEOMECANICO			
Tamaño de grano	Fino	Fino	Fino
Porosidad Abierta	1%	2.6%	1.3%
Densidad Aparente (Kg/m3)	2600	2520	2680
Resistencia al desg. por rosamiento (mm)	3,3	3,05	1.72
Resit a la Compresión (Mpa)	154	190	190
Rsist.,a la Flexión (Mpa)	14,6	16,9	21,5
Microdureza Knoop (Mpa)	2478	7905	1542
Resistencia al Choque (cm)	37,5	45	49
Resistencia a las Heladas (%)	0,056 Perd de M	0,32	0
Absorción de agua a P. Atm. (%)	0,2	0,7	0,3
Calidad de la Roca	Buena	Muy Buena	Buena
			
RECURSOS (Mm3)	70,3	17,6	25,3

tura vial y eléctrica muy buenas, las cuales dada la variedad de colores incentivan continuar con la siguiente fase de exploración.

Las recursos geológicos inferidas son del orden de: 70,3 millones de m<sup>3</sup> para Patillal; 25,3 millones de m<sup>3</sup> para Las Palomas y 17,6 millones de m<sup>3</sup> para La Socola.

Se recomienda, como actividad inicial para continuar con el proceso exploratorio, la elaboración de trincheras para la toma de datos estructurales de diaclasamiento y la medida del parámetro Jv que permite definir con mayor precisión el tamaño de los bloques que se pueden extraer y las alternativas de uso del material.

Se plantea una metodología para iniciar el proceso de exploración regional de rocas ornamentales, fundamentada en la información técnica que utilizan los principales productores, adecuada a las condiciones de nuestro entorno, la cual nos permite definir blancos de exploración o “Targets” para continuar con el proceso de exploración detallada hasta la apertura de canteras, el cual en el futuro debe normalizarse para que se constituya en un estándar de acreditación para Colombia de los Materiales de la Construcción como son las Rocas Ornamentales.

**Tabla 9. Cuadro comparativo de los valores exigidos por las normas para Granitos Vs los valores obtenidos en las muestras de Patillal, La Socola y las Palomas.**

Parámetro Mecánico	Valores Exigidos por la Norma	Valores Obtenidos			Calidad de la Roca		
		Patillal	La socola	Palomas	Patillal	La socola	Palomas
							
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	≥ 2,5 (ASTM)	2,52	2,52	2,68	Aceptable	Aceptable	Buena
Modulo heladicidad (% en peso)	0,04 (N.T.E)	0,056	0,032	0.000	Regular	Buena	Muy Buena
Resistencia a la Compresión (N/mm <sup>2</sup> )	133 (ASTM)	190	190	196	Buena	Buena	Muy Buena
Coficiente de resistencia al desgaste por Rozamiento (mm)	1,3 (N.T.E)	3,05	3,05	1.72	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena
Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> )	> 10 (ASTM)	16,9	16,9	21,5	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena

Fuente: Lorenz & Gwosdz (2003); Aenor (2000) e Intromac (2005)

## BIBLIOGRAFÍA

- Aenor (2000). Asociación Española de Normalización. Granitos Ornamentales. Madrid.
- Alfonso, R., Rafael., 2001. Proyecto Piedras Ornamentales en la Sierra Nevada de Santa Marta-Republica de Colombia. Bogotá, UPME: pag.167.
- Audemard, F., y Audemard, F. A. (2002). "Estructure of the Merida Andes, Venezuela: relation with the South America-Caribbean Geodynamic interaction." *Tectonophysics* **345**(1-4): 299-327.
- Cediel, F., et al. 2003. "Tectonic assembly of the northern Anden Block." *AAPG Memoir* 79: 815-848.
- Dooland, B. L., & Mcdonald, W.D. (1976). "Estructure and metamorphism of the Santa Marta area, Colombia." *Memoria Primer Congreso Colombiano de Geología*: p 187-216.
- Duque-Caro, H. 1980. "Geotectonica y evolución de la región noroccidental de Colombia." *Boletín Geologico* 23(3): 5-37.
- Duque-Caro, H. 1979. "Major structural element and evolution of Northwestern Colombia." *AAPG Memoir* 29: 329-351.
- Edwards, A. 1954. *Textures of the Ore Minerals and their Significance*. Melbourne, Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Forero S., A. 1990. "The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allochthonous terrane in northwestern South America." *Juornal of South America Earth Sciences* **3**(2/3): 141-151.
- Gobernación del Departamento del Cesar (2001). *Plan de Desarrollo Departamental 2001-2003*. Valledupar, Gobernación del Cesar.
- González de Vallejo, L., et al 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España., Prentice Hall.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1975. *Planchas Cartográficas*. Bogotá, IGAC: Planchas 27 II A, B, C, D., 27 IV A.
- IGAC, I. G. A. C. 1990. *Cuadrangulo C-12 Lineas de vuelo*. Décadas del 50 al 74 y del 80 al 90. Bogotá.
- Intromac 2005. *Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción de España*. Resultados de análisis de Laboratorio de caracterización geomecánica.
- Julivert, M. e. a. 1968. *Lexique Stratigraphique International, americque Latine Colombia Premiere Parte*. Paris, Francia., Centre National de la Recherche Scientifique. 5, (4a), Colombie, .
- López J. C. et al 1996. *Manual de rocas Ornamentales*. Madrid, Graficos Arias Montano, S. A. Mostoles.
- Lorenz, W., & Gwosdz, W 2003. *Manual on the Geological-technical Assessment of Mineral Construction Material*. Hannover, Thomas Schubert.
- Lucchessy, D. 1973. *Esayos Mecánicos de los Materiales Metalicos*. Barcelona, Editorial Labor S.A.
- Ministerio de Minas y Energía 2001. Ley 685 de 2001 "Código de Minas", Unidad de Planeación Minero Energética.
- Munsell, S. (1991). *Rock Color Chart*, Geological Society of America.
- Muñoz P. et al 1989a. *Metodología de investigación de piedras naturales: granitos*. Madrid, Rock-maquinas, tercer trimestre.
- Muñoz P. et al 1989b. *La investigación de Rocas Ornamentales en el I.T.G.E., Roc-maquina*, 4to trimestre.

- Orozco. L & Osorio J 2004. Propuesta de definición de provincias sismotectónicas y modelo de bloques de deformación actual para Colombia. Bogotá, Ingeominas, informe interno: 168.
- Ramdohr, P. 1980. The ore minerals and their intergrowths. Oxford, United Kingdom, Pergamon Press.
- Rasveldt, H. C. 1956. "Fallas de rumbo en el Nordeste de Colombia." Revista del Petroleo **I**: 19-26.
- Reiter F. and Acs P. 2003. Tectonics FP, version 1,62.
- Rodriguez Arias., L. 2005. Informe técnico interno. Bogota, Gerente Adalit Ltda.
- Streckeisen, A. 1974. "Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks." Geologische Rundschau 63(2): 773-786.
- Streckeisen, A. L. 1967a. "Classification and nomenclature of igneous rocks (final report of an inquiry)." Neues Jahrbuch fuer Mineralogie. Abhandlungen 107(2): 144-214.  
Modal composition as basis for classification-nomenclature scheme, color-index variation, literature review
- Taboada., A., et al. 2000. "Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intra-continental deformation (Colombia)." Tectonics Vol. 19: p. 787 - 813.
- Thorez J. 1976. Practical Clay identification of Clay Minerals. Belgique.
- Travis, R. B. 1955. Classification of Rocks. Colorado, Qaterly of the Colorado school of Mine.
- Thorez J. 2005. XRD analysis of clay minerals. Universidad de Lieja. 2a Theory; 2b Practical exercises. Lieja, Belgica.
- Trenkamp R. et al 2002. "Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America; CASA GPS." Journal of South American Earth Sciences Vol 15(2): 157-171.
- Tschanz C. H. et al 1969. Mapa Geológico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá. Escala 1:200.000. Ingeominas, tomos I-II. Informe interno 1829. Bogotá, Ingeominas: 285.
- Tschanz C. M. et al. 1974. "Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia." Geological Society of America Bulletin 85: 273 - 284.
- Ujueta, G. 1994. Modelo de desplazamiento entre la Cordillera Oriental de Colombia y los Andes de Merida. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá. V:19 No 72: p 5-27.
- Ujueta G. & Llinas R. 1990. Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la Serranía del Perija. Geología Colombiana. Bogotá. No 17: p 197-209.
- Upme-Ingeominas-Minercol 2000. Minerales Estrategicos para el Desarrollo de Colombia -MEDC2000. Bogotá, UPME
- Williams, H., Turner, F., Gilbert Ch 1979. Petrografia. Mexico, Compañía editorial continental S.A.



## GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO – CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Claudia Alfaro Valero y Alcides Aguirre Corrales.  
calfaro@ingeminas.gov.co

### RESUMEN

El Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín, localizado entre los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Tolima, tiene un área aproximada de 2.000 km<sup>2</sup> y, de norte a sur, está conformado por el volcán Cerro Bravo, los volcanes del Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN) y el volcán Cerro Machín.

En el área de este complejo volcánico, se localiza un gran número de manantiales, muchos de ellos identificados y caracterizados químicamente en el marco la Investigación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz (CHEC et al., 1983). Tomando como base dicha investigación y la información generada por INGEOMINAS, a través de la vigilancia geoquímica de la actividad de los volcanes de la zona y de un inventario de manantiales termales del municipio de Santa Rosa de Cabal, se llevó a cabo la reinterpretación de la geoquímica de manantiales para estimar las temperaturas de los reservorios geotérmicos del área e identificar procesos de ebullición, dilución y mezcla de los fluidos geotérmicos. Adicionalmente, y con base en la composición química y la temperatura, se plantearon recomendaciones sobre usos potenciales de las fuentes minerales y termales.

De acuerdo con su distribución espacial y su posible asociación a los volcanes, los cien (100) manantiales registrados, fueron divididos en nueve (9) grupos: 1) volcán Cerro Bravo, 2) Nevado del Ruiz, sector oriental, 3) Batolito de El Bosque, 4) Nevado del Ruiz, sector occidental, 5) Santo Domingo, 6) Santa Rosa de Cabal, 7) El Bosque (Santa Isabel -Cerro España), 8) Nevado del Tolima y 9) volcán Cerro Machín.

De los 74 manantiales termales registrados (con temperaturas de descarga superiores a 4°C por encima de la temperatura ambiente promedio), 27 son de agua caliente (temperatura mayor a 50°C). Las temperaturas de descarga más elevadas, cercanas al punto de ebullición del agua, se encuentran en manantiales de los grupos 4, 6 y 9. Adicionalmente se registran 26 manantiales de agua mineral de baja temperatura.

La geoquímica de los manantiales señala la probabilidad de existencia de sistemas de temperatura intermedia (entre 125 y 225°C), en el Batolito de El Bosque (grupo 3), en el área de Santo Domingo (grupo 5) y en el Nevado del Tolima (grupo 8) y de temperatura alta (>250°C), en el área del volcán Cerro Bravo, en la zona occidental del Nevado del Ruiz (grupo 4), en Santa

Rosa de Cabal (grupo 6) y en el volcán Cerro Machín (grupo 9).

En Santa Rosa de Cabal, se identifica un área de máximo interés como recurso energético y desde el punto de vista geoquímico, dado que los geotermómetros indican la mayor temperatura en el reservorio de toda el área de estudio y la composición de los manantiales permite identificar con mucha claridad procesos de ebullición y posterior dilución (manantiales de San Vicente) y dilución directa a partir del agua del reservorio (manantiales de Santa Rosa). De acuerdo con la Investigación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz, es difícil asociar los manantiales de Santa Rosa de Cabal con una fuente de calor cercana, dado que el volcán más cercano, Paramillo de Santa Rosa, es relativamente antiguo comparado con los otros volcanes de la zona. No obstante, la temperatura del reservorio inferida a partir de los manantiales de Santa Rosa, mayor a la inferida para la zona occidental del Nevado del Ruiz (Botero Londoño), permite plantear la posibilidad de que la fuente de calor de Santa Rosa sea independiente y quizás asociada al Paramillo de Santa Rosa (Alfaro & Jaramillo, 2002), aun cuando la cámara magmática en enfriamiento no haya promovido una actividad eruptiva reciente.

El potencial de aplicación del recurso geotérmico identificado en la zona de estudio es muy amplio y suficiente aún para los usos de máximo requerimiento energético (generación eléctrica). Sin embargo teniendo en cuenta la facilidad de implementación de los diferentes desarrollos geotérmicos posibles, los usos mineromedicinales son quizás los más viables. Estos elevarían la calidad de vida de las comunidades locales e impulsaría actividades paralelas como el turismo, con el consecuente impacto positivo en la economía local.

**Palabras clave:** geotermia, geoquímica, aguas termales, Nevado del Ruiz, Cerro Bravo, Cerro Machín, Colombia.

## ABSTRACT

The Cerro Bravo - Cerro Machín Volcanic Complex, located amongst Caldas, Risaralda, Quindío and Tolima departments, has an average extension of 2000 km<sup>2</sup>. From North to South, it consists of Cerro Bravo Volcano, the volcanoes from Los Nevados National Natural Park and Cerro Machín Volcano.

A great number of springs are located in this area. They were identified and chemically characterized in the frame of the frame of the geothermal research of the Ruiz Volcanic Complex (CHEC et al., 1983). From this research and compiling additional information generated by INGEOMINAS, through the geochemical surveillance of the volcanic activity and from an inventory of springs in Santa Rosa de Cabal municipality, a reinterpretation of the geochemistry of springs was carried out in order to estimate the temperatures of the geothermal reservoirs from the area and to identify boiling, mixing and dilution processes of the geothermal fluids. Additionally, based on the chemical composition and the temperature, recommendations for potential uses of the mineral and thermal springs were proposed.

One hundred (100) registered springs were grouped, according to their spatial distribution and possible association to the volcanoes of the area, in nine (9) groups: 1) Cerro Bravo volcano, 2) Nevado del Ruiz, Eastern sector, 3) El Bosque Batholit, 4) Nevado del Ruiz, Western sector, 5) Santo Domingo, 6) Santa Rosa de Cabal, 7) El Bosque (Santa Isabel - Cerro España), 8) Nevado del Tolima and 9) Cerro Machín volcano.

From the 74 registered hot springs (with discharge temperature higher than 4°C over the environment average temperature), 27 are hot springs (temperature over 50°C). The higher discharge temperatures, close to the boiling point, are located in the groups 4, 6 and 9. Additionally 26 low temperature mineral springs, are registered.

The geochemistry of the springs points out the probability of existence of intermediate temperature geothermal systems (between 125 and 225°C), at El Bosque Batholit (group 3), Santo Domingo (group 5) and Nevado del Tolima (group 8) and, of high temperature systems (>225°C) at Volcán Cerro Bravo (group 1), Nevado del Ruiz, Western sector (group 4), Santa Rosa de Cabal (group 6) and Cerro Machín volcano (group 9).

From the geochemical approach, the highest interest area, as energy resource, is identified in Santa Rosa de Cabal. The aqueous geothermometers indicate the highest reservoir temperature and the springs composition allows to identify clearly boiling followed by dilution (San Vicente springs) and direct dilution from the reservoir water (Santa Rosa springs). According to the cited geothermal research, it is difficult to relate the springs from Santa Rosa de Cabal with a close heat source, given that the closest volcano (Paramillo de Santa Rosa) is relatively ancient compared with the other volcanoes from the zone. However, the reservoir temperature inferred from the springs from Santa Rosa, which is higher than the one inferred at the Western sector at Nevado del Ruiz (Botero Londoño), allows to propose the possibility of an independent heat source probably related to Paramillo de Santa Rosa (Alfaro & Jaramillo, 2002), even though the cooling magmatic chamber body has not promoted a recent eruptive activity.

The potential application of the geothermal resources identified in the study zone is very wide and enough to the utilization of highest energetic demand (electricity generation). However taking into account the implementation easiness of the different possible geothermal developments, the utilization in thermalism is probably the most feasible. This utilization would improve the living quality of the local communities and would promote parallel activities such as tourism, with the subsequent positive impact on the local economy.

**Keywords:** geothermics, geochemistry, hot springs, Nevado del Ruiz, Cerro Bravo, Cerro Machín, Colombia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo resume los resultados del producto del INGEOMINAS "Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados" (Alfaro et al., 2002), desarrollado en el marco del proyecto Exploración y evaluación de los recursos geotérmicos, el cual se basó en la compilación y la interpretación de información geológica y geoquímica de la zona.

### 1.1 Marco geológico

#### 1.1.1 Estratigrafía

En términos globales, la estratigrafía de la zona de estudio está conformada por un basamento polimetamórfico de edad paleozoica, el cual infrayace depósitos de flujos de lava masivos de los edificios iniciales del sistema volcánico en la Cordillera Central de edad pliocena. Los depósitos más recientes son flujos piroclásticos, flujos de lava y flujos de lodo, producto de la actividad volcánica del Cuaternario.

La estratigrafía de la zona fue resumida por Geocónsul (1992) en nueve unidades estratigráficas: (1) Grupo Cajamarca, (2) Rocas intrusivas de edad cercana a 200-207 millones de años (Triásico tardío), (3) Formación Quebrada Grande, (4) Cuerpos intrusivos de edad y composición semejante al Stock de Manizales y el Batolito de El Bosque, (5) Rocas volcánicas andesíticas, (6) Rocas producto de los derrames lávicos cuaternarios de los aparatos volcánicos del Macizo del Ruiz, desde Cerro Bravo hasta el Cerro Machín, (7) Productos piroclásticos no erosionados, producidos en el Cuaternario por los aparatos volcánicos (8) Productos de erosión y (9) Casquete glaciar.

El Grupo Cajamarca representa las rocas metamórficas del basamento depositadas durante el Precámbrico tardío al Paleozoico temprano y metamorfozadas durante la orogenia del Paleozoico medio (Jaramillo, 1980, en Calvache & Monsalve, 1982).

Las rocas intrusivas de edad cercana a 200-207 millones de años (Triásico tardío), afloran al norte del macizo y agrupa varias unidades ígneas conocidas como, Intrusivo Néisico de Padua, Intrusivo Néisico del Noroeste de Manizales, la Anfibolita de Padua, y Batolito de Sonsón.

La Formación Quebradagrande es una unidad de origen sedimentario. A nivel regional, esta formación aflora sólo entre las trazas de las fallas de Romeral y Aranzazu - Manizales, en una franja de dirección casi N-S. Esta formación está compuesta por un miembro sedimentario y otro volcánico. El sedimentario está constituido por rocas pelíticas de ambiente marino de aguas profundas y areniscas, megabrechas y conglomerados depositados en un ambiente marino de aguas más someras y turbulentas. El miembro volcánico está constituido por derrames de lavas basálticas, intercalaciones de tobas y algunos diques basálticos.

Los cuerpos intrusivos similares en edad y composición al Stock de Manizales y al Batolito de El Bosque. El primer cuerpo aflora en el sector septentrional del macizo, al oriente y suroeste del volcán Cerro Bravo. Este cuerpo fue datado por el método K/Ar y se obtuvo una edad de 57,5 +/- 1,7 millones de años. El Batolito El Bosque es un cuerpo que aflora en el sector oriental del Macizo del Ruiz, es de composición granodiorítica con variaciones a cuarzdiorita, con una edad radiométrica calculada en 49,1 +/- 1,7 Ma. (Eoceno temprano). Debido a la similitud en composición, es probable que ambos intrusivos pertenezcan a un solo cuerpo.

Las rocas volcánicas andesíticas afloran en los sectores céntricos del macizo volcánico del Ruiz y están constituidas por rocas de tipo ignimbrítico, esencialmente andesíticas con pequeñas variaciones a andesitas basálticas. Son producto de vulcanismo andino, previo a la actividad actual, y constituyen el basamento volcánico sobre el cual se edificó parcialmente el Macizo del Ruiz. Estas rocas suprayacen rocas de la Formación Quebradagrande y las rocas intrusivas.

Las rocas producto de los derrames lávicos cuaternarios de los aparatos volcánicos del Macizo del Ruiz, desde Cerro Bravo hasta el Cerro Machín son rocas predominantemente andesíticas, con variaciones desde riocacitas y dacitas (volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, domos, páramo de Santa Rosa y Machín) hasta andesitas basálticas de los nevados del Quindío y Tolima; producto de la actividad durante el Pleistoceno y el Holoceno. Las rocas presentan formas tanto de coladas como dómicas. Estas rocas descansan sobre las rocas volcánicas andesíticas de la unidad anterior.

Los productos piroclásticos no erosionados, producidos en el Cuaternario por los aparatos volcánicos, los cuales afloran en los alrededores de Cerro Bravo y en la periferia

del volcán Cerro Machín y del Nevado del Tolima. En el sector de Cerro Bravo corresponde a depósitos plinianos de caída, flujo y surge, compuesto por arenas, cenizas, pumitas, bloques y bombas de composición dacítica. En el caso del Nevado del Tolima, esta unidad está constituida por depósitos plinianos de pumitas de caída, intercalados con tobas de surge y rellenan los cauces del río Combeima, Toche Coello y Bermellón (piroclastos del volcán Cerro Machín). Todos estos depósitos son de edad holocénica y producto de las escasas fases explosivas del macizo.

Los productos de erosión del área incluyen morrenas frontales y laterales, depósitos piroclásticos retrabajados, algunos depósitos lacustres (Machín y laguna del Otún), depósitos de lahares y de flujos de lodo y depósitos aluviales indiferenciados. El casquete glaciar cubre permanentemente a los nevados del Ruiz, Santa Isabel y Tolima, desde los 4.600 m hacia arriba.

Según Monsalve et al. (1998), la geología del Pozo Nereidas 1, único pozo geotérmico perforado en Colombia hasta 1.469 m de profundidad sobre el flanco occidental del Nevado del Ruiz, a 3.450 msnm, permitió definir la secuencia volcánica que incluye rocas piroclásticas, piroxenos andesíticos, anfíboles andesíticos y dacitas, que suprayacen rocas metamórficas del Complejo Cajamarca afectadas por un evento termal "Terciario". Los minerales secundarios, encontrados a lo largo de la columna, permitieron establecer 4 zonas de alteración hidrotermal producidas por la interacción fluido (débilmente ácido a alcalino) – roca: zona argílica entre la superficie y 396 m, argílica-sericítica entre 396 y 640 m, sericítica entre 640 y 1067 m y propilítica o termometamórfica entre 1.067 y el fondo del pozo. En la última zona se identificaron minerales muy importantes desde el punto de vista geotérmico, como epidota, la cual

sugiere una temperatura superior a 250°C, adularia, calcita y sílica.

### 1.1.2 Tectónica

Estructuralmente, el Macizo del Ruiz está enmarcado por los sistemas de fallas Romeral, Palestina y Mulato, con dirección NNE-SSW (Geocónsul, 1992). La Falla Romeral, que divide la corteza oceánica hacia el occidente y la corteza continental hacia el oriente, representa una antigua zona de subducción (Barrero et al., 1969, en Calvache & Monsalve, 1982). Los esfuerzos de compresión en esta zona dan como resultado el levantamiento de la Cordillera Central y la formación de nuevos sistemas de fallas como Mulato, Palestina, Marulanda Salamina y Salento.

Según *CHEC* et al. (1983) la Falla Palestina ha servido de camino para la emisión de las lavas de gran parte del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, al menos las más antiguas.

Localmente, se encuentran varias fallas asociadas a los sistemas Romeral y Palestina, como son las fallas normales de Río Claro, Quebrada Negra y Río Molinos, las cuales tienen una dirección aproximada N20-40° W, y fallas subparalelas a la Palestina; como la del Termal con dirección aproximada N 0-10° E (Calvache & Monsalve, 1982). Estas fallas representan esfuerzos de distensión evidenciados por la presencia de diques dacíticos relacionados con ellas. Las manifestaciones actuales de estas fallas están representadas por la ocurrencia de sismos volcánico tectónicos, lo que a su vez ha permitido la formación de campos fumarólicos (Nereidas y La Olleta) y la ocurrencia de fuentes termales.

Generalizando, transversalmente a los principales sistemas de fallas NNE-SSW (Romeral, Mulato y Palestina) se presenta un

patrón de estructuras con dirección NW-SE hasta E-W, al cual corresponden fallas como Neira y Salento, que delimitan el macizo volcánico, y otras fallas como Marulanda - Salamina, Villamaría Termal del Ruiz, Río Claro, Campoalegrito, San Eugenio, Pereira, San Ramón y La Cristalina, las cuales son posteriores en el tiempo a las de patrón NNE-SSW (Geocónsul, 1992). Inicialmente, la mayoría de los aparatos volcánicos estaban alineados por la Falla Palestina y, con el tiempo, las fallas con dirección NW-SE hasta E-W, las cuales tienen movimiento en el rumbo, han desplazado al eje volcánico original y ésta es la razón por la cual se ha perdido la alineación de los volcanes (CHEC et al., 1983).

Adicionalmente, se presentan otros dos patrones estructurales con menor expresión que los anteriores. Uno de ellos agrupa fallas y fracturas como las fallas Termales y Laguna Baja, las cuales son de carácter normal y tienen una dirección NE-SW. Estas fallas conforman una tectónica de bloques al interceptarse con las fallas de patrón NW-SE (Geocónsul, 1992).

Por último, hay un patrón N-S con poca expresión. Se destaca la Falla Río Toche - Río Coello, al occidente del volcán Cerro Machín, y una fractura al sur del Nevado del Tolima (cauce del río Combeima) (Geocónsul, 1992).

## 1.2 Marco geoquímico

Las primeras caracterizaciones químicas de los manantiales de la zona de estudio, referenciadas por la literatura, son las realizadas por la Contraloría General de la República (1937) (en Forero, 1958), las incluidas en los trabajos de Wallace Fetzer en el Hotel Termales y Villamaría (Fetzer, 1941a en Forero 1958) y en Santa Rosa de Cabal (Fetzer, 1941b) y la de la Alcaldía de Ibagué en

los termales de El Rancho (en Forero, 1958). Los estudios de exploración geotérmica se iniciaron con la etapa de reconocimiento, a finales de los 60's en el área del Complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín (CHEC y ENEL, 1968). En este trabajo se realizaron análisis químicos e isotópicos de algunos pocos manantiales, en las áreas de El Espíritu Santo, Departamento de Antioquia y norte de Caldas, Santa Rosa de Cabal en Risaralda, y Botero Londoño y Termales del Ruiz, en Caldas. A partir de este trabajo plantea un origen meteórico para las aguas termales y dos sistemas de circulación (somero y profundo). En Botero Londoño se postuló una circulación más profunda responsable de la temperatura y el cambio isotópico en oxígeno-18. Con base en esta investigación, Arango et al. (1970) presentaron la primera publicación sobre el llamado proyecto geotérmico del Ruiz.

El estudio de prefactibilidad (CHEC et al., 1983), que es la investigación más extensa de manantiales termales en el área de interés, incluye 165 sitios de muestreo: manantiales termales, manantiales fríos, aguas superficiales (ríos, lagos y quebradas). La caracterización química incluyó los análisis de: Ca, Mg, Na, K,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl,  $\text{SiO}_2$ , Fe total, B,  $\text{NH}_4$ , Li y las determinaciones de pH y temperatura. Adicionalmente realizaron el análisis de gases no condensables:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2+\text{Ar}$  y  $\text{N}_2$ , en alrededor de 26 manantiales y oxígeno-18 y tritio en 46 muestras de agua.

Esta investigación (CHEC et al., 1983) estableció que en la zona norte del Complejo Volcánico (Cerro Bravo - Cerro España), el área limitada por Termales de San Vicente, la Laguna del Otún, el Cerro España, el Nevado del Ruiz (Botero Londoño), es la de mayor interés geotérmico, con manifestaciones de gases (Laguna del Otún y Las Nereidas) y manantiales con temperatura de emergencia de 93°C y temperaturas

geoquímicas mayores que 200°C. Las Nereidas y la Laguna del Otún fueron definidas como las áreas de máxima probabilidad de éxito para la exploración geotérmica, entre otras cosas, teniendo en cuenta la elevada relación  $H_2/CH_4$  de sus gases calientes y que de acuerdo con la geofísica, allí se encuentran los espesores mayores en la cobertura volcánica, que aumentan la probabilidad de hallazgo de reservorios profundos en la serie lávica. En el área de San Vicente – Botero Londoño, se estableció homogeneidad en su composición química típica de aguas de origen profundo y alta temperatura, a partir de lo cual postularon un único acuífero que por su gran extensión areal sería muy importante como objetivo geotérmico. Sin embargo, la misma investigación plantea la emergencia de los manantiales a lo largo de fallas que cortan el basamento epimetamórfico de baja permeabilidad, lo cual hace poco probable la existencia de un reservorio de suficiente extensión lateral horizontal.

En la zona sur (Tolima - Machín), dicha investigación (CHEC et al., 1983) selecciona al Cerro Machín como de notable interés geotérmico, entre otras condiciones, por su elevada relación  $H_2/CH_4$  típica de gases calientes, de las temperaturas de emergencia de los manantiales (hasta 94°C) y las temperaturas geoquímicas estimadas para el reservorio (alrededor de 180°C).

En 1992, la firma Geocónsul realizó una revisión de la información compilada en el proyecto de prefactibilidad (CHEC et al., 1983), con el fin de realizar la primera perforación exploratoria. Este trabajo recomienda como zonas de interés para dirigir las etapas siguientes en la exploración: Las Nereidas – Botero Londoño, Volcán Cerro Machín y por último la Laguna del Otún y continuar con algunos trabajos complementarios en Cerro Bravo, la zona de la falla Villamaría - Termales y Santa Rosa – San Vicente.

A partir de los datos del estudio de prefactibilidad, se han hecho investigaciones adicionales (Sturchio et al., 1988, Giggenbach et. al., 1990, Larios, D., 1992) sobre los sistemas hidrotermal y volcánico - magmático, motivados por la reactivación del volcán Nevado del Ruiz.

También a partir de dicha reactivación, el INGEOMINAS inició el programa de vigilancia de la actividad de volcanes del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, el cual ha incluido la caracterización química de gases y aguas termales. Este programa aportó información sobre la composición de nuevos manantiales, presumiblemente asociados a los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Machín (GilCruz et al., 1998; INGEOMINAS 1994; INGEOMINAS 1995; INGEOMINAS 1996; INGEOMINAS, 1997), los cuales fueron incluidos en el presente trabajo.

### 1.3. Objetivos

- Contribuir con el conocimiento de las condiciones fisicoquímicas de reservorios y la identificación procesos que registran los fluidos hidrotermales en su trayectoria a la superficie, en sistemas geotérmicos localizados en el Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, a partir de la reinterpretación de la información geoquímica disponible.
- Promover la utilización del recurso geotérmico en favor del desarrollo social y económico de la región, a partir del análisis de usos potenciales basado en la composición química y la temperatura de los manantiales.

## 2. METODOLOGÍA

El procedimiento seguido para elaborar el presente inventario fue el siguiente:

- **Compilación de información.** Investigación de prefactibilidad geotérmica del Complejo volcánico del Ruiz (*CHEC et al., 1983*) y Programa de vigilancia de la actividad volcánica de volcanes del PNNN, de la Unidad Operativa de Manizales (*INGEOMINAS, 1994, 1995, 1996, 1997*).
- **Conformación de grupos de manantiales.** Los manantiales fueron repartidos en nueve (9) grupos, en función de su distribución espacial.
- **Clasificación de los manantiales en función de su temperatura** (manantiales con temperatura inferior a 40°C, entre 40 y 60°C y mayor que 60°C) y de la composición relativa de aniones dominantes, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, expresada en mg/l (*Giggenbach, 1991*) y cationes mayores, Na+K, Ca, Mg, expresada en meq/l.
- **Cálculo de la composición relativa Na-K-Mg,** para (1) establecer la madurez (equilibrio fisicoquímico entre el fluido geotérmico y las rocas que lo hospedan), (2) visualizar procesos de dilución y (3) estimar la temperatura del reservorio (*Giggenbach, 1988*).
- **Cálculo de la composición relativa de las especies conservativas -no formadoras de roca-, Cl-B-Li,** para postular el origen de la fuente que alimenta los manantiales termales (*Giggenbach, 1991*).
- **Cálculo de la composición relativa Cl-B-HCO<sub>3</sub>,** para visualizar la incursión de aguas bicarbonatadas características de aguas someras o zonas periféricas del sistema geotérmico (*Koga, 2000*).
- **Estimación de parámetros térmicos.** Con base en la clasificación por aniones dominantes y la aplicación de los criterios de clasificación de manantiales someros y profundos, propuestos para el Mapa Geotérmico de Colombia (*Alfaro, 2000*), se calcularon los geotermómetros alcalinos (Na/K, K/Mg), a aguas consideradas profundas (pH superior a 5,5, concentración de cloruros relativa a aniones dominantes superior a 20% y concentración de litio mayor que 1mg/l o de boro mayor que 5 mg/l), el geotermómetro de cuarzo con máxima pérdida de vapor, a manantiales con temperatura cercana al punto de ebullición del agua, en superficie, y el geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor y calcedonia, se aplicaron a todos los manantiales, excepto a los fríos (con temperatura en superficie inferior a la temperatura promedio ambiental, asumida en 15°C, más 4°C).
- **Modelo de mezcla.** Se aplicaron los modelos de mezcla Entalpía - Sílice y Entalpía -Cloruros, para visualizar y verificar posibles procesos que el fluido geotérmico puede sufrir en su ascenso a la superficie, como mezcla o dilución, ebullición y enfriamiento conductivo y para estimar temperatura del reservorio (y en el caso del primer modelo, su concentración de sílice) (*Nicholson, 1993, y Arnorsson, 2000*).
- **Recomendación de usos potenciales directos** (aprovechamiento de la energía térmica) e indirectos (aprovechamiento en generación eléctrica), a partir del Diagrama Lindal (*Gudmundsson et al, 1985, en Lund, 1999*), a partir de la temperatura estimada en el reservorio geotérmico.

- Recomendación de posibles aplicaciones de las aguas termales en termalismo, según utilizaron criterios de clasificación de acuerdo con los parámetros disponibles, específicos para fines terapéuticos: temperatura en superficie, anión dominante, concentración de cationes específicos y mineralización global y como agua de mesa, definidos por Armijo & San Martín (1994).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Geoquímica de los manantiales del Complejo volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín.

La Tabla 1 presenta la composición química de los manantiales agrupados como se muestra en la Figura 1.

**El Grupo 1**, ubicado al norte de área de estudio, está conformado por 12 manantiales, de aguas neutras bicarbonatadas, probablemente asociados al volcán Cerro Bravo. La temperatura máxima se registra en los termales de San Luis, en los que adicionalmente se encuentra la mayor salinidad reflejada en una conductividad eléctrica de 2200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Aunque se trata de aguas bicarbonatadas como muestra la Figura 1, la contribución de fluido geotérmico en estos manantiales se refleja en concentraciones relativamente altas de cloruros (213 mg/l), litio (1,1 mg/l) y boro (3,6 mg/l).

Como se espera, a partir del carácter bicarbonatado de estos manantiales, la entrada de aguas subterráneas frías se hace evidente en el mayor contenido relativo de magnesio. La composición de estos manantiales, presentada en la (Figura 2), describe una tendencia lineal que señala una temperatura Na/K alrededor de 190°C, en el reservorio.

La composición relativa de especies conservativas para los manantiales del Grupo 1 (Figura 3), señala: (1) la contribución de agua de un reservorio de composición típica de sistemas geotérmicos asociados a sistemas volcánico-magmáticos, caracterizada según Giggenbach & Goguel (1989), por el enriquecimiento en cloro y boro por absorción de vapores magmáticos de alta temperatura ricos en estas especies, antes o durante la disolución de las rocas por parte de las aguas de circulación profunda, (2) la naturaleza riolítica del sistema volcánico - magmático, a partir del apilamiento de los puntos sobre la línea de disolución de este tipo de rocas, y (3) una fuente común, dada la semejanza en la relación Cl/B. Se salen de este comportamiento, los manantiales de menor temperatura (6, 7 y 10).

Dado el carácter bicarbonatado de estos manantiales, su alta dilución con aguas someras frías y su baja temperatura en superficie, la temperatura estimada solamente a partir de los geotermómetros de sílice (Tabla 2) señalan hasta 156°C como temperatura mínima probable en el reservorio. No obstante, aplicando el modelo Entalpía-Sílice (Figura 4), a partir de los manantiales con mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  (San Luis) y la dilución a partir de agua separada por ebullición del fluido geotérmico, la temperatura probable del reservorio, según la entalpía inferida de 850 kJ/kg, sería de unos 200°C y la concentración en sílice del reservorio, de alrededor de 280 mg/l. No se descarta, sin embargo, la posibilidad de que haya enfriamiento conductivo.

**El Grupo 2**, localizado al norte y oriente del Nevado del Ruiz, está conformado por 15 manantiales cuya composición es principalmente sulfatada, como se observa en la Figura 1. La principal característica de este grupo es la acidez de sus manantiales que alcanza valores de pH tan bajos como 1,3, en el manantial de Aguas Calientes (punto 4). Los balances iónicos calculados para los manantiales de

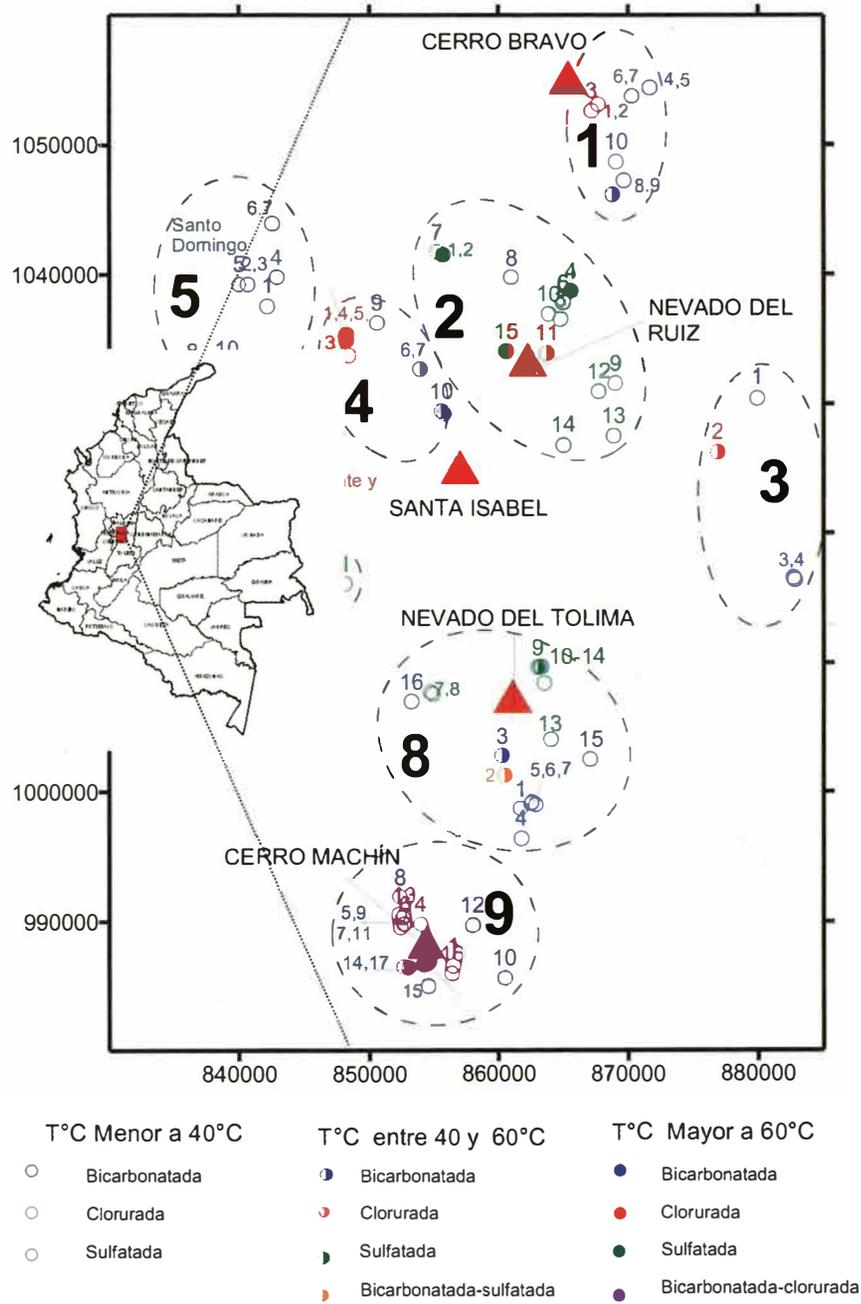


Figura 1. Localización y clasificación de manantiales del Complejo Volcánico Cerro Bravo- Cerro Machín. Se indican los 9 grupos conformados, de acuerdo con su distribución espacial.

Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Balance Iónico	Fuente información
GRUPO 1																					
1	Aguacatal I	1053100	867700	May-82	37	6,16	1.500	170	19	88	22	1,04	2,27	2,0	0,25	142	36	573	84	0,7	CHEC, 1983
2	Aguacatal II	1053100	867700	May-82	37	6,10	1.500	166	19	90	22	1,04	2,05	2,0	0,25	142	36	573	90	0,3	CHEC, 1983
3	El Aserradero	1052600	867200	May-82	20	7,77	1.300	223	21	72	20	0,83	1,95	N.A	0,09	103	29	671	102	3,8	CHEC, 1983
4	El Jordán I	1054400	871700	May-82	25	6,09	2.000	170	14	92	132	0,59	1,73	15,1	0,25	131	389	732	102	0,7	CHEC, 1983
5	El Jordán II	1054400	871700	May-82	19	5,82	820	51	7	34	47	0,18	0,52	3,5	0,10	35	125	287	90	-1,0	CHEC, 1983
6	El Retiro	1053750	870300	Jun-82	14	5,35	250	9	2	16	7	0,02	0,00	N.A	0,02	1	4	110	84	-2,0	CHEC, 1983
7	Río Aguacatal	1053750	870300	Jun-82	14	7,27	130	4	2	4	1,4	0,00	0,03	N.A	0,03	2	3	27	31	-1,0	CHEC, 1983
8	La Calera I	1047300	869700	Jun-82	26	6,62	1.300	184	16	74	18	0,55	1,73	0,5	0,45	85	96	567	102	0,04	CHEC, 1983
9	La Calera II	1047300	869700	Jun-82	28	6,67	1.100	152	14	64	16	0,49	1,62	0,5	0,07	71	86	500	102	-1,9	CHEC, 1983
10	Ventiladeros (La Calera)	1048750	869100	Jun-82	11	7,61	47	3	2	3	0,6	0,00	0,00	N.A	0,06	0	3	20	27	-3,4	CHEC, 1983
11	Termal S. Luis I	1046200	868800	Jun-82	42	6,09	2.200	368	25	96	20	1,18	3,57	1,5	0,14	209	163	793	138	2,4	CHEC, 1983
12	Termal S. Luis II	1046200	868800	Jun-82	45	6,23	2.200	391	25	114	20	1,11	3,57	1,3	0,14	213	168	854	138	3,6	CHEC, 1983
GRUPO 2																					
1	Hotel Termales El Ruiz 1	1041500	855700	May-82	63	1,65	22.000	506	144	300	240	0,69	6,38	201	3,06	1064	8640	0	252	-49,2	CHEC, 1983
2	Hotel Termales El Ruiz 2	1041500	855700	May-82	61	1,58	21.000	483	140	280	240	0,69	6,38	201	3,06	1064	8160	0	228	-48,5	CHEC, 1983
3	La Hedionda	1036500	864800	May-82	14	2,84	2.900	99	16	138	91	0,11	1,30	50	0,49	191	1200	0	102	-16,3	CHEC, 1983
4	Aguas Calientes	1038700	865600	May-82	60	1,32	29.000	299	234	240	168	0,31	7,89	201	0,45	1347	9600	0	168	-62,1	CHEC, 1983
5	Fuente Fria Aguas Calientes I	1037800	865000	May-82	11	4,42	370	10	3	24	16	0,00	0,00	0	0,03	0	149	0	78	-2,0	CHEC, 1983
6	Fuente Fria Aguas Calientes II	1037800	865000	May-82	13	5,67	480	12	3	32	29	0,00	0,00	N.A	0,02	1	178	85	72	-5,8	CHEC, 1983
7	Termales El Ruiz	1041750	855250	Jun-82	36	1,90	13.000	299	78	166	132	0,39	3,68	0	1,58	567	4560	0	162	-52,8	CHEC, 1983
8	Hacienda Nieto	1039750	861050	Jun-82	13	5,62	140	6	3	7	3	0,00	0,00	N.A	0,03	1	8	43	59	1,2	CHEC, 1983
9	Agua Blanca	1031600	869050	Jun-82	35	2,82	3.600	131	21	400	110	0,15	1,73	2	0,20	241	1834	0	138	-11,6	CHEC, 1983
10	Arenales	1036900	863875	Jun-82	9	5,77	140	8	3	16	6	0,00	0,00	1	0,01	1	72	17	66	-0,2	CHEC, 1983
11	El Calvario *	1033866	863734	Mar-97	57	2,77		197	40	221	100	0,1				10	1577		324	-6,9	Ingeominas, 1997
12	El Coquito *	1031001	867742	Sep-96	33	2,99		72	14	488	66	<0,01				121	1676		103	-7,0	Ingeominas, 1996
13	El Oso *	1027570	868870	May-94	22	6,11		122	21	192	100	0,06				22	720	584	111	-3,1	Ingeominas, 1994
14	Corralitos *	1026858	865035	Oct-94	29	3,90		118	17	518	120	0,07				187	1782		62	-1,3	Ingeominas, 1994
15	Guali *	1034019	860610	May-95	62	2,73	3.300	39	18	316	52	<0,01		1		58,6	962		201	-1,4	Ingeominas, 1995
GRUPO 3																					
1	Murilloa	1030500	879950	Jun-82	14	5,42	120	12,7	9	6	2	0,00	0,05	N.A.	0,03	14	6	29	38	12,1	CHEC, 1983
2	Granates	1026325	876925	Jun-82	55	6,81	3.800	483,0	13	86	0,9	2,50	3,35	N.A.	0,25	744	67	153	72	2,3	CHEC, 1983
3	La Yuca	1016560	882720	Jul-82	37	9,24	190	48,3	0,8	0,6	0,1	0,15	0,00	0	0,03	8	0	98	51	8,8	CHEC, 1983
4	La Yuca	1016400	882820	Jul-82	40	9,32	210	55,2	0,6	0,5	0,04	0,16	0,00	0	0,03	12	0	98	51	12,0	CHEC, 1983

GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL  
COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO-CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Balance iónico	Fuente información
GRUPO 4																					
1	Hacienda Termales Botero Londoño I	1035400	848200	May-82	92	7,04	3.400	529	74	40	5	3,47	17,30	0,00	4,68	815	53	244	174	-0,04	CHEC, 1983
2	El Bosque	1033800	848400	May-82	34	6,16	2.800	345	39	44	5	2,01	9,95	0,10	3,06	496	72	226	84	-0,28	CHEC, 1983
3	La Piscina (B. Londoño)	1034700	847800	May-82	57	6,27	2.700	414	55	42	13	2,29	12,97	0,89	3,06	638	27	268	168	0,38	CHEC, 1983
4	El Billar	1034900	848200	May-82	92	7,42	3.600	529	70	32	4	3,26	17,30	0,00	4,50	815	40	207	234	0,42	CHEC, 1983
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	1035400	848200	May-82	93	7,22	3.800	552	74	44	5	3,47	18,38	0,00	5,76	851	43	256	180	0,42	CHEC, 1983
6	Las Nereidas II	1032700	853900	May-82	46	5,81	810	87	14	92	32	0,05	0,16	0,00	0,99	5	202	476	168	-2,82	CHEC, 1983
7	Las Nereidas II	1032700	853900	May-82	28	6,21	540	35	7	50	17	0,02	0,06	0,00	0,25	1	86	177	102	8,08	CHEC, 1983
8	El Recodo	1029300	855800	Jun-82	54	6,42	1.300	161	43	42	34	0,20	0,82	N.A.	0,31	9	336	323	192	1,77	CHEC, 1983
9	La Poa	1036275	850575	Jun-82	12	6,42	60	6	3	5	2	0,00	0,00	N.A.	0,02	1	6	38	66	1,17	CHEC, 1983
10	Chorro Negro*	1029512	855590	Jun-95	51	6,31		146	43	42	35	0,12					302	381	189	-0,53	Ingeominas, 1995
GRUPO 5																					
1	La Telaraña	1037600	842200	May-82	17	6,43	83	3	2	7	3	0,00	0,00	N.A.	0,02	0,3	5,8	42	32	-4,3	CHEC, 1983
2	Santo Domingo I	1039300	840700	May-82	29	6,66	11.000	2001	86	220	101	5,90	34,60	1	32,40	1914	1,2	3355	25	1,0	CHEC, 1983
3	Santo Domingo II	1039300	840700	May-82	32	6,42	3.400	575	28	102	46	1,53	7,46	N.A.	8,64	425	3,4	1342	54	2,1	CHEC, 1983
4	Papayal	1039800	842900	May-82	17	6,74	110	6	3	8	4	0,00	0,00	5	0,02	0,7	8,2	53	59	-1,2	CHEC, 1983
5	Santo Domingo III	1039300	840000	May-82	25	5,88	2.400	368	17	60	29	0,97	5,30	N.A.	5,76	319	5,8	793	96	1,5,	CHEC, 1983
6	El Pino	1044000	842550	May-82	17	5,43	99	5	1	5	3	0,00	0,00	10	0,02	0,6	4,0	40	45	-0,4	CHEC, 1983
7	Pozo del Perro	1044000	842550	Jun-82	19	6,20	260	14	4	11	6	0,00	0,10	N.A.	0,02	5,7	7,7	48	66	23,0	CHEC, 1983
8	Fonda Santa Rita	1032650	836400	Jun-82	18	6,88	140	9	25	9	4	0,00	0,05	N.A.	0,03	2,5	4,8	67	84	17,4	CHEC, 1983
9	Cristalina Alta	1031975	840350	Jun-82	15	6,24	170	9	3	17	13	0,00	0,00	N.A.	0,06	0,5	3,7	140	57	0,7	CHEC, 1983
10	Cristalina Baja	1032800	839075	Jun-82	21	5,98	1.100	184	14	114	58	0,67	3,14	N.A.	1,80	152	5,8	854	108	1,5	CHEC, 1983
GRUPO 6																					
1	Termales Santa Rosa	1026800	836800	May-82	52	7,43	2.100	230	37	70	42	1,87	8,65	0,0	5,76	319	12	573	228	-0,5	CHEC, 1983
2	La Piscina	1027300	836900	May-82	63	6,34	2.300	276	43	78	59	1,94	9,62	0,0	5,94	355	26	671	240	2,0	CHEC, 1983
3	El Cortijo I	1027100	837300	May-82	65	6,25	2.200	276	51	62	43	2,36	10,81	0,3	9,00	425	9	525	270	0,1	CHEC, 1983
4	El Cortijo II	1027100	837300	May-82	65	6,48	2.300	276	47	64	44	2,22	10,81	0,8	8,46	390	9	586	246	0,2	CHEC, 1983
5	Santa Helena	1027500	836200	May-82	19	6,05	2.700	345	20	182	40	0,90	5,19	0,5	4,68	319	0	1159	72	0,5	CHEC, 1983
6	San Vicente I	1027400	838700	May-82	84	6,50	3.200	437	55	38	10	4,16	17,30	0,5	10,80	674	34	244	150	1,3	CHEC, 1983
7	San Vicente II	1027400	838700	May-82	90	6,46	4.100	483	62	40	9	4,58	18,38	0,8	12,06	744	41	256	162	1,2	CHEC, 1983
8	San Vicente III	1027750	838500	Jun-82	20	6,00	170	23	6	6	2	0,28	0,58	3,5	0,22	19	1	73	78	2,1	CHEC, 1983
9	San Vicente IV	1028100	838500	Jun-82	66	6,48	2.500	368	47	50	36	3,33	12,97	N.A.	7,92	496	28	500	252	1,7	CHEC, 1983

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	HCO3 mg/l	SiO2 mg/l	Balance iónico	Fuente información
10	San Vicente V	1027200	839200	Jun-82	43	6,12	870	127	15	14	4	1,32	4,65	N.A.	3,42	184	26	49	72	5,6	CHEC, 1983
11	San Vicente VI	1027500	838600	Jun-82	91	6,87	3.600	552	74	46	10	5,62	22,70	N.A.	13,14	886	30	275	168	0,7	CHEC, 1983
12	Peñaranda Río San Eugenio	1025000	837100	Jun-82	16	6,34	260	28	2	12	5	0,69	0,40	N.A.	0,22	28	3	85	34	2,0	CHEC, 1983
13	El Cortijo III	1027100	837400	Jun-82	19	6,43	100	4	2	5	2	0,02	0,06	8,9	0,18	2	1	57	45	4,6	CHEC, 1983
14	Quebrada La Piscina	1027500	836800	Jun-82	16	6,98	100	7	3	7	3	0,03	0,08	N.A.	0,03	3	5	49	59	-1,2	CHEC, 1983
15	Termales S. Rosal	1026750	837000	Jun-82	50	7,30	2.000	253	37	76	29	1,94	8,9	N.A.	1,26	344	5	555	198z	-1,2	CHEC, 1983
<b>GRUPO 7</b>																					
1	El Bosque del Otún	1016150z	848100	30103	22	4,01	1.100	22,77	5	168	16	0,00	0,03	0,40	0,06	1,21	528	0,00	49,8	-0,9	CHEC, 1983
<b>GRUPO 8</b>																					
1		998725	861724	Jul-82	21	7,45	460	25	7	32	28	0,02	0,50	N.A.	0,05	16	91	177	72	-0,9	CHEC, 1983
2	El Rancho	1002800	860300	Jul-82	53	6,71	3.200	253	43	168	276	0,55	4,00	N.A.	1,01	206	768	1281	204	0,6	CHEC, 1983
3		1001300	860520	Jul-82	45	6,30	3.000	173	39	150	252	0,36	3,57	2,0	1,01	177	864	915	192	-1,4	CHEC, 1983
4		946450	861790	Jul-82	19	7,47	560	25	7	32	26	0,02	0,31	0,0	0,04	15	96	177	102	-2,5	CHEC, 1983
5	La Florida (El Turpial)	999000	862875	Jul-82	28	6,21	2.400	108	19	128	144	0,19	1,51	3,0	0,32	85	374	854	138	-1,2	CHEC, 1983
6	La Florida (El Turpial)	999200	862600	Jul-82	37	6,25	2.400	166	32	164	216	0,30	1,95	2,0	0,29	142	398	1281	144	1,3	CHEC, 1983
7	La Florida (El Turpial)	999100	862550	Jul-82	20	8,57	710	46	8	44	48	0,06	0,54	N.A.	0,03	27	120	311	78	-0,004	CHEC, 1983
8	Romerales	1007650	854900	Ago-82	16	5,24	710	28	6	80	29	0,02	0,00	4,0	0,05	2	259	146	120	0,7	CHEC, 1983
9	Romerales	1007800	854725	Ago-82	18	5,36	750	30	7	86	31	0,02	0,00	6,1	0,04	1	269	177	126	0,9	CHEC, 1983
10	Zona del Termal El Cebollar	1009725	863025	Ago-82	45	5,83	1.400	115	19	80	83	0,13	0,00	21,8	0,20	0,6	624	323	144	-2,3	CHEC, 1983
11	Zona del Termal El Cebollar	1009750	863175	Ago-82	39	5,90	1.400	106	14	84	78	0,15	0,00	17,0	0,22	1,1	624	329	120	-5,3	CHEC, 1983
12	Zona del Termal El Cebollar	1009775	863300	Ago-82	28	5,97	1.200	87	15	92	72	0,13	0,00	12,8	0,10	1,4	528	232	72	1,9	CHEC, 1983
13	Zona del Termal El Cebollar	1008500	863525	Ago-82	39	5,54	1.200	67	7	92	70	0,15	0,00	21,8	0,06	1,4	427	256	138	5,3	CHEC, 1983
14	Zona del Termal El Cebollar	1004100	864050	Ago-82	32	5,77	1.000	85	8	72	59	0,11	0,00	11,7	0,52	1,9	350	293	120	3,4	CHEC, 1983
15		1002550	867125	Ago-82	10	5,69	100	4	1	6	2	0,00	0,00	0,0	0,06	0,7	5	32	39	0,8	CHEC, 1983
16	Aquilino	1007081	853217	Abr-98	24	6,19	1.400	60	10	110	64	0,10				4,8	63	1188	139	-21,1	GilCruz, et al., 1998

GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL  
COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO-CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH <sub>4</sub> mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Balance iónico	Fuente información
GRUPO 9																					
1		986550	856500	Jul-82	15	7,65	210	5	2	18	10	0,01	0,00	0,0	0,05	0	35	79	39	-1,4	CHEC, 1983
2	La Piscina- Machín	986650	854150	Jul-82	94	8,01	2.000	460	39	19	22	2,71	15,14	0,0	1,67	298	182	793	204	-2,0	CHEC, 1983
3	La Piscina- Machín *	986850	854675	Jul-82	74	6,99	1.100	322	28	20	13	2,22	15,14	0,0	2,70	184	173	549	276	-1,5	CHEC, 1983
4	San Juan - Río San Juan - Machín	989800	853950	Jul-82	36	6,23	2.600	322	21	142	102	1,11	9,19	1,0	0,18	496	91	1098	126	-5,7	CHEC, 1983
5	Río Tochea	990325	852575	Jul-82	40	6,45	2.400	69	55	560	17	0,60	3,89	7,8	5,94	113	1,9	2013	150	-2,4	CHEC, 1983
6	Río Toche	989825	852750	Jul-82	36	6,22	2.800	90	11	540	64	0,76	6,05	24,0	5,58	131	0	2013	162	1,8	CHEC, 1983
7	Río Toche	989800	852625	Jul-82	25	6,39	650	19	0	82	18	0,11	0,71	1,0	0,43	20	2,0	342	55	2,3	CHEC, 1983
8	Río Toche	991925	852350	Jul-82	24	6,02	1.500	48	6	200	53	0,12	0,80	15,1	0,52	22	0	976	108	2,4	CHEC, 1983
9	Río Toche	990550	852275	Jul-82	34	6,46	2.500	81	7	0,46	62	0,56	4,76	2,5	3,42	103	0	1891	138	-57,2	CHEC, 1983
10		985650	860500	Jul-82	18	5,32	210	6	3	34	10	0,01	0,24	6,1	0,11	2	13,9	146	46	7,4	CHEC, 1983
11	Río Toche	989550	852400	Jul-82	20	6,63	1.200	76	12	150	49	0,16	1,73	10,1	0,50	57	0	793	51	3,8	CHEC, 1983
12	Río Toche	189750	858000	Jul-82	37	6,38	2.300	69	9	400	53	0,59	5,41	11,7	3,96	103	0	1830	144	7,2	CHEC, 1983
13	Río Toche	990500	852675	Jul-82	38	6,53	2.500	69	9	480	61	0,61	5,95	11,7	4,50	131	0	1952	144	-3,7	CHEC, 1983
14	Puente Tierra Alta	986400	853050	Jul-82	57	7,24	1.400	322	34	70	37	2,22	15,14	0,0	1,10	277	144	793	318	-4,4	CHEC, 1983
15	California, Toche Bajo	984975	854550	Jul-82	23	6,22	740	60	11	98	30	0,46	1,51	1,2	1,80	71	0	488	102	2,3	CHEC, 1983
16		985950	856400	Jul-82	17	6,70	150	7	3	17	7	0,01	0,26	0,4	0,06	0	34	67	46	1,5	CHEC, 1983
17	Puente Tierra	986453	852661	Abr-95	56	7,21	2.200	370	27	72	32	3,8				182	121	921	291	1,7	CHEC, 1983

\* Localización tomada de Garzón, G., 2001

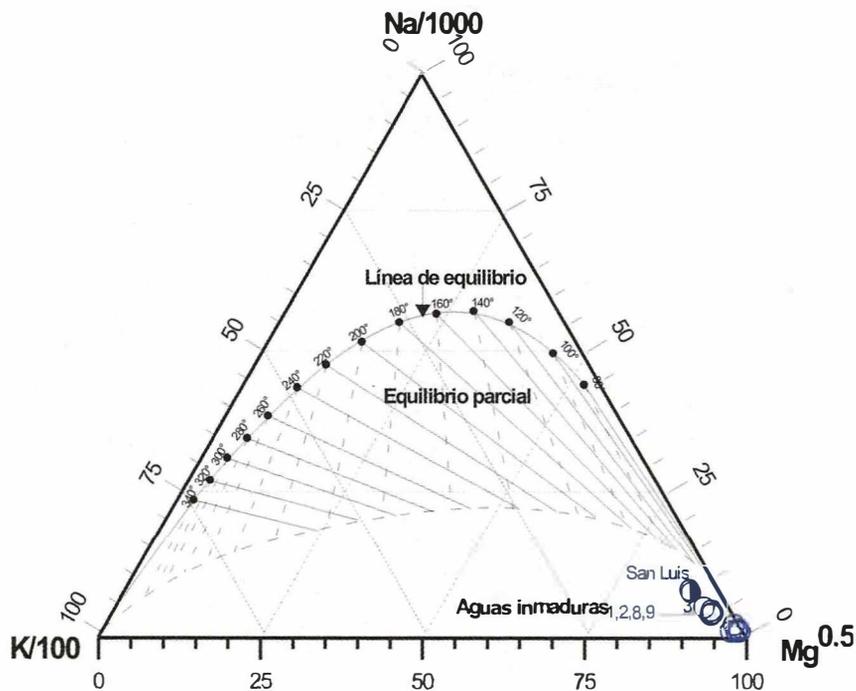
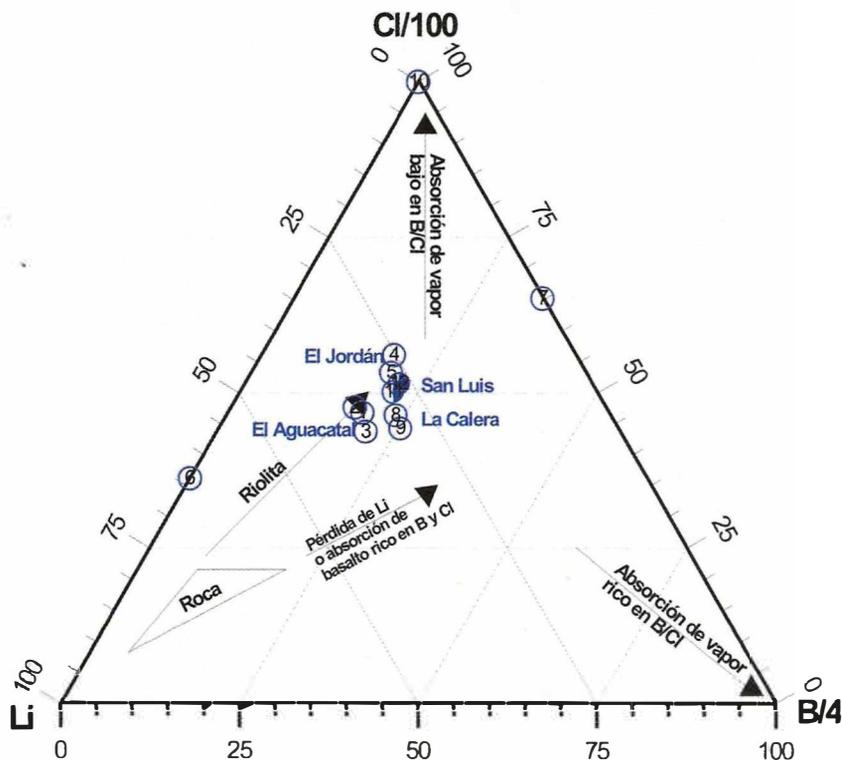


Figura 2. Composición relativa Na-K-Ca (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 1. La alta proporción de magnesio refleja la importancia de la contribución de agua somera fría. Los manantiales menos afectados por el proceso de dilución, inferido de la tendencia lineal, son los de mayor temperatura en superficie (San Luis).

Figura 3. Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991), para manantiales del Grupo 1. Estos manantiales exhiben la composición típica de sistemas geotérmicos asociados a sistemas volcánico magmáticos. Obsérvese el apilamiento de los puntos hacia la línea que representa composición riolítica, coincidente con la naturaleza del Volcán Cerro Bravo con el cual seguramente están asociados estos manantiales.



**Tabla 2** Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	QTZ (Sin pérdida vapor) (1)	Calcedonia (2)	Na/K (3)	K/Mg (4)	Q T Z (Máxima pérdida vapor) (5)
<b>TEMPERATURA (°C)</b>						
<b>GRUPO 1</b>						
1	Aguacatal I	128	100			
2	Aguacatal II	132	104			
3	El Aserradero	138	112			
4	El Jordán I	138	112			
8	La Calera I	138	112			
9	La Calera II	138	112			
11	Termal S. Luis I	156	132			
12	Termal S. Luis II	156	132			
<b>GRUPO 3</b>						
2	Granates	120	91	145	70	
3	La Yuca	103	73			
4	La Yuca	103	73			
<b>GRUPO 4</b>						
1	Hacienda Termales Botero Londoño I	171	148	261		
2	El Bosque	128	100	242	72	161
3	La Piscina (B. Londoño)	169	146	256	71	
4	El Billar	191	172	256	81	
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	173	151	257	80	177
6	Las Nereidas I	169	146			163
7	Las Nereidas II	138	112			
8	El Recodo	177	156			
10	Chorro Negro *	176	154			
<b>GRUPO 5</b>						
2	Santo Domingo I	73	41	173	64	
3	Santo Domingo II	106	76	180	56	
5	Santo Domingo III	135	108	177	54	
10	Cristalina Baja	142	115			

Continuación Tabla 2 Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	QTZ (Sin pérdida vapor) (1)	Calcedonia (2)	Na/K (3)	K/Mg (4)	Q T Z (Máxima pérdida vapor) (5)
<b>GRUPO 6</b>						
1	Termales Santa Rosa	189	170	273	60	
2	La Piscina	193	174	270	60	
3	El Cortijo I	202	184	286	63	
4	El Cortijo II	195	176	278	62	
6	San Vicente I	161	138	251	73	153
7	San Vicente II	166	143	254	75	157
9	San Vicente IV	196	178	252	63	
10	San Vicente V	120	91	248	63	
11	San Vicente VI	169	146	257	76	159
15	Termales S. Rosa II	179	158	266	62	
<b>GRUPO 8</b>						
1		120	91			
2	El Rancho	181	161			
3		177	156			
5	La Florida (El Turpial)	156	132			
6	La Florida (El Turpial)	159	135			
7	La Florida (El Turpial)	124	96			
10	Zona del Termal El Cebollar	159	135			
11	Zona del Termal El Cebollar	148	122			
12	Zona del Termal El Cebollar	120	91			
13	Zona del Termal El Cebollar	156	132			
14	Zona del Termal El Cebollar	148	122			
16	Aquilino	157	132			

**Continuación Tabla 2 Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.**

GRUPO 9						
2	La Piscina-Machín	181	161	220	64	
3	La Piscina-Machín	203	186	222	63	
4	San Juan - Rio San Juan - Machín	151	126	201	49	
5	Río Toche	161	138			
6	Río Toche	166	143	249	45	
7	Río Toche	107	77			
8	Río Toche	142	115			
9	Río Toche	156	132	217	40	
11	Río Toche	103	73			
12	Río Toche	159	135	153 (6)	44	
13	Río Toche	159	135	191 (6)	43	
14	Puente Tierra Alta	214	199	237	60	
15	California, Toche Bajo	138	112			
17	Puente Tierra	207	191	208	58	

(1) QTZ Sin pérdida de vapor= Geotermómetro de cuarzo de Fournier =  $(1309/(5.19 - \text{LOG}(\text{SiO}_2))) - 273$

(2) Calcedonia = Geotermómetro correspondiente =  $(1032/(4.69 - \text{LOG}(\text{SiO}_2))) - 273$

(3) Na/K = Geotermómetro Na/K de Giggenbach =  $(1390/(\text{LOG}(\text{Na/K}) + 1.75)) - 273$

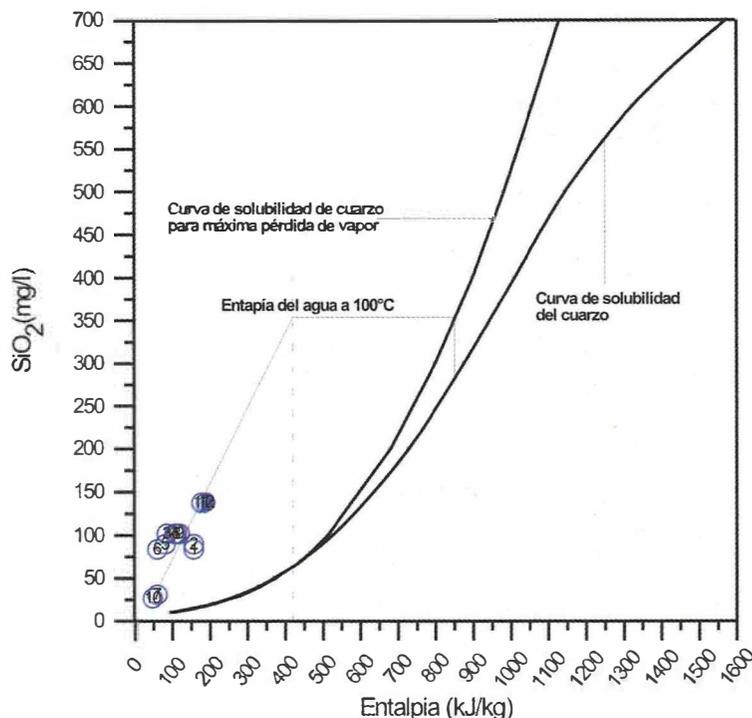


Figura 4. Modelo Entalpía – Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 1. Asumiendo pérdida de vapor antes de la evidente dilución, a partir de los manantiales de San Luis (de mayor temperatura y concentración en sílice), se estima que el reservorio tendría una temperatura de unos 200°C (850 kJ/kg) y una concentración de sílice de 280 mg/l.

este grupo (hasta de -68%) indican que los analitos medidos no representan a la mayoría de las especies mayores disueltas.

Como se ha dicho, la composición relativa de aniones está dominada por los iones sulfato. La alta acidez (pHs inferiores a 2) y las concentraciones altas de sulfatos y cloruros, de los manantiales de Hotel Termales del Ruiz (puntos 1, 2 y 7) y Aguas Calientes (4), son compatibles con un aporte significativo de un fluido de origen volcánico - magmático. De otra parte, en manantiales como El Calvario (11) y El Oso, con temperaturas en superficie relativamente altas (57 y 22°C, respectivamente), muy probablemente son vapor- calentados, como indica su moderada acidez (pHs 2,77 y 6,11), su concentración alta en sulfatos y muy baja en cloruros.

Las características enunciadas permiten establecer que los fluidos descargados por los

manantiales del Grupo 2 son inmaduros; es decir, no reflejan equilibrio con las rocas del reservorio geotérmico. Su composición está alterada por la disolución a alta temperatura y pH ácido, de las rocas que los hospedan, con el consecuente incremento en la concentración de la mayoría de las especies disueltas, como se determina a partir de su alta conductividad (hasta 29.000  $\mu$ S/cm). Los manantiales vapor - calentados señalan la ocurrencia del proceso de ebullición probablemente asociado al flujo ascendente (upflow) del fluido geotérmico.

**El Grupo 3**, ubicado en la margen derecha de la zona de estudio, está conformado por cuatro manantiales, tres de ellos de composición bicarbonatada y uno clorurada, como se observa en la Figura 1. El manantial clorurado neutro, Hacienda Granates, descarga aguas maduras, es decir, que recibe una contribución significativa de agua del reservorio

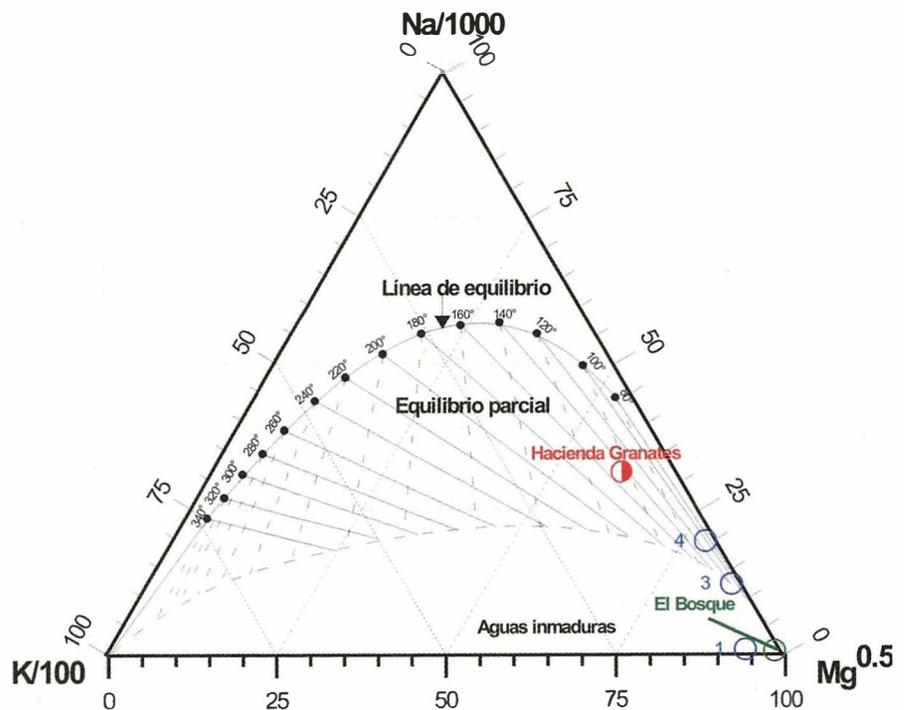
geotérmico en equilibrio fisicoquímico, con los minerales de sus rocas. Las concentraciones relativamente altas de litio (2,5 mg/l) y boro (3,4 mg/l) son consistentes con el origen geotérmico de esta agua. La composición de los otros manantiales de este grupo está dominada por la contribución de una fuente de agua bicarbonatada.

La composición relativa Na-K-Mg, de la Figura 5, permite establecer que los manantiales de Hacienda Granates (3) y de La Yuca (3 y 4), se hallan parcialmente en equilibrio con agua de reservorio geotérmico. La Hacienda Granates está sobre la línea de 140°C, del geotermómetro, mientras que los manantiales de La Yuca, alrededor de 100°C. Dado que estos manantiales no están relacionados por una tendencia lineal, se puede plantear que provienen de fuentes diferentes, como se concluye de la gran dispersión en composición relativa Cl-Li-B (Figura 6).

La temperatura probable estimada a partir de los geotermómetros acuosos para este grupo (Tabla 2), indican una temperatura máxima de 145°C (Na/K). La temperatura mínima probable, estimada a partir del geotermómetro de cuarzo, señala 103°C para los manantiales de La Yuca y 120°C para la Hacienda Granates. El modelo Entalpía - Sílice (Figura 7) señala la posibilidad de un enfriamiento conductivo sin precipitación de sílice en la Hacienda Granates (alta concentración de sílice a una temperatura de descarga relativamente baja). Para los manantiales de La Yuca, a partir de este modelo, se estima una temperatura máxima alrededor de 125°C (correspondiente a la entalpía de 525 kJ/kg) y una concentración de sílice del orden de 90 mg/l para el reservorio.

**El Grupo 4**, localizado al occidente del Nevado del Ruiz, está conformado por 10 manantiales, 5 de los cuales son clorurados neutros de alta temperatura (hasta 93°C) y con altas

**Figura 5. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 3. Los manantiales Hacienda Granates y La Yuca (3 y 4) se encuentran parcialmente en equilibrio y señalan temperaturas del orden de 140 y 100°C, respectivamente. Se incluye el manantial de El Bosque, del Grupo 7, cuya proporción de magnesio indica la contribución dominante de aguas someras.**



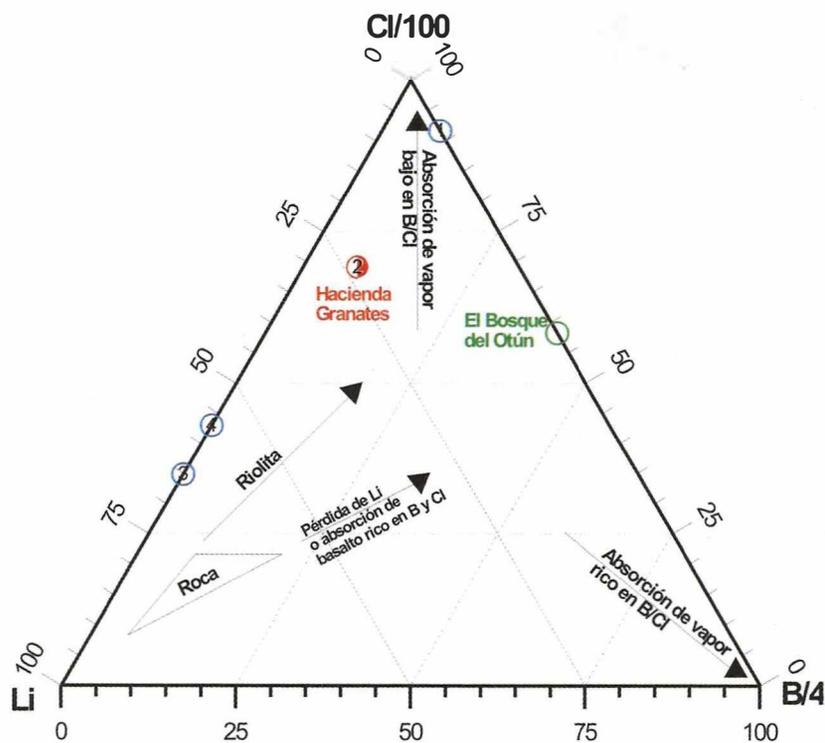
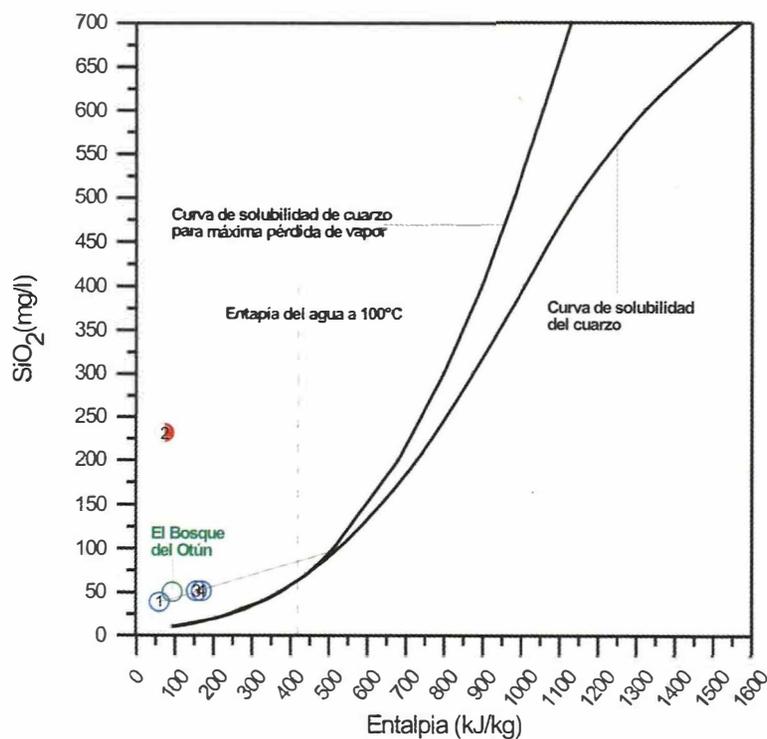


Figura 6 Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991), para manantiales del Grupo 3. La dispersión de los manantiales de este grupo revela su diferencia de origen. Si bien las concentraciones de boro en los manantiales de La Yuca no son detectables, dada su dilución, este proceso no justifica sus diferencias en composición con el de la Hacienda Granates, como se vio en la figura anterior. El manantial de Hacienda Granates no exhibe la composición relativa típica de los originados en sistemas hidrotermales asociados a sistemas volcánico magmáticos, como el observado en los manantiales del Grupo 1.

Figura 7. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 3. El alto contenido de sílice del manantial Hacienda Granates, frente a su temperatura superficial, probablemente está relacionado con un proceso de enfriamiento conductivo. La temperatura inferida para los manantiales La Yuca (3 y 4), está alrededor de 125°C.



concentraciones de litio y boro, lo que refleja el contacto del fluido geotérmico con la superficie. Éstos corresponden a una de las áreas seleccionadas por la Investigación geotérmica (CHEC et al., 1983) como una de las prioritarias para la exploración (Botero Londoño). Los manantiales restantes bicarbonatados y sulfatados no reciben contribución significativa de agua clorurada geotérmica.

La composición relativa Na-K-Mg (Figura 8) señala una alta concentración relativa de magnesio, aun para manantiales clorurados, a partir de lo cual se infiere la mezcla del agua geotérmica, con agua subterránea fría. La dilución es de una magnitud tal que aleja a los manantiales de la línea de equilibrio y los ubica como aguas inmaduras. Estos manantiales describen una clara tendencia de mezcla en la que los manantiales más representativos del miembro extremo caliente (fluido geotérmico) son los de la Hacienda Botero Londoño (1, 5 y 6), la cual señala sobre la línea de equilibrio una temperatura de unos 255°C en el reservorio. Los manantiales clorurados neutros de Botero Londoño tienen una relación Cl/B muy cercana que sugiere un origen común, diferente de la de los manantiales calentados por vapor de Nereidas y Recodo.

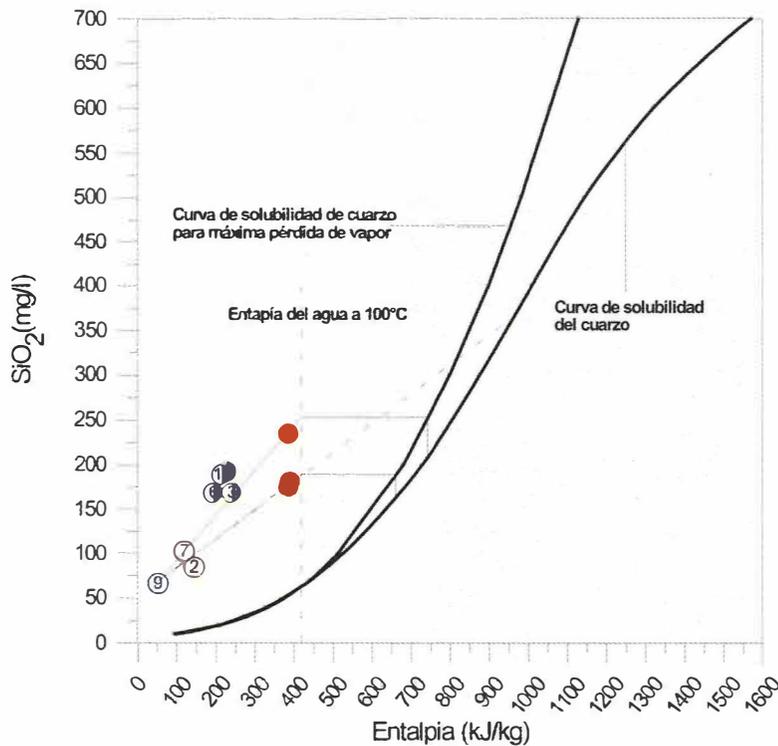
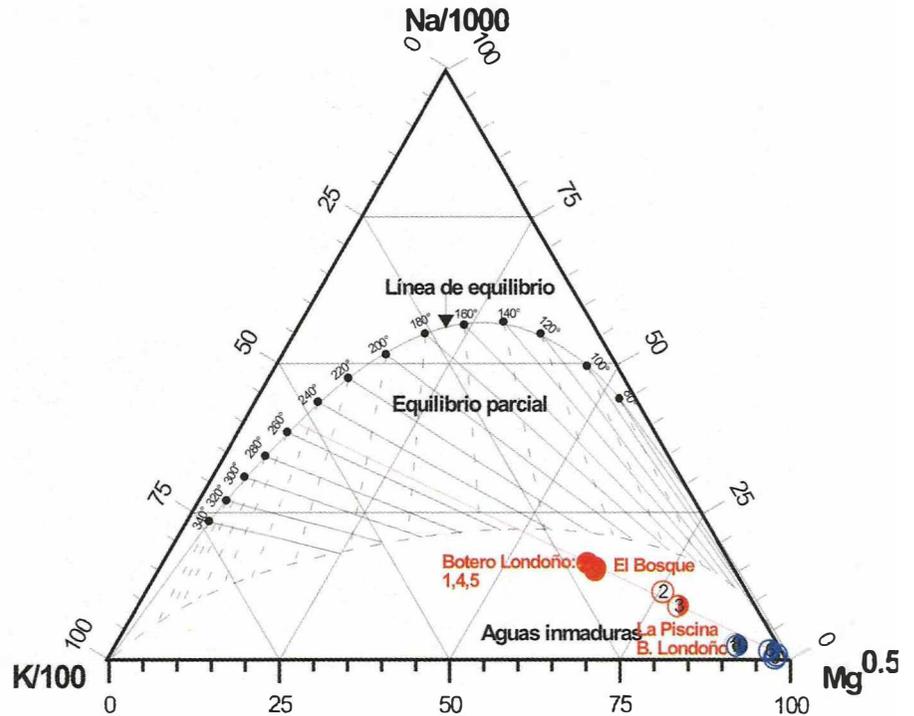
Con base en el geotermómetro Na/K, en los manantiales de mayor temperatura superficial, las temperaturas estimadas en el reservorio son hasta de 260°C, como se indica en la Tabla 2. La dilución que el fluido geotérmico sufre con agua somera de menor temperatura se evidencia en la diferencia de dicha temperatura, con la calculada a partir de los geotermómetros restantes. El geotermómetro de cuarzo señala una temperatura mínima probable de hasta 177°C. El modelo Entalpía - Sílice (Figura 9), aplicado con base en el manantial de mayor concentración de sílice (El Billar), asumiendo ebullición, señala la misma temperatura del geotermómetro de cuarzo (177°C) correspondiente a una entalpía de 750 kJ/kg y una concentración probable de

sílice en el reservorio de 210 mg/l. El resultado cambia considerablemente si se asume que el manantial de El Billar sufre enfriamiento conductivo y se extrapola la entalpía para los manantiales 1 y 5 de Botero Londoño, si se despreja la ebullición superficial. La temperatura resultante es cercana a 220°C (950 kJ/kg) y una concentración de sílice en el reservorio de 360 mg/l.

**El Grupo 5** está constituido por 10 manantiales bicarbonatados neutros (Figura 1), en su mayoría de temperatura baja, ubicados al sur de Manizales, alrededor del área conocida como Santo Domingo, margen izquierda de la zona de estudio. Las altas concentraciones de cloruro, litio y boro, y baja en sulfatos hacen presumir la contribución de fluido geotérmico. El manantial Santo Domingo I registra la mayor concentración de sales, superada solamente por los manantiales ácidos sulfatados que evidencian contribución volcánico - magmática, del Grupo 2. Sin embargo, su baja temperatura permite plantear la posibilidad de contribución de otra fuente salina, como depósitos hidrotermales originados en episodios de actividad hidrotermal anteriores. Los manantiales restantes son fríos y de agua dulce.

La composición relativa Na-K-Mg, ilustrada en la Figura 10, indica una línea de mezcla en la cual el manantial Cristalina Baja (punto 10), con el mayor contenido relativo de magnesio, es el más representativo del miembro extremo de la mezcla de menor temperatura y Santo Domingo I, del miembro extremo de mezcla de mayor temperatura (menos alejado de la línea de equilibrio). La tendencia lineal extrapolada sobre la línea de equilibrio señala una temperatura Na/K del orden de 160°C. La relación Cl/B es muy semejante para los 4 manantiales de mayor temperatura de este grupo, lo que señala un origen también semejante.

**Figura 8. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 4. La contribución de agua subterránea fría se infiere a partir de la alta concentración relativa de magnesio. Los manantiales de Botero Londoño, que son los más calientes en superficie, son los manantiales más representativos del agua geotérmica involucrada en el proceso de mezcla. La temperatura del reservorio estimada a partir de la extrapolación de la línea de mezcla sobre la de equilibrio, es del orden de 255°C.**



**Figura 9. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000) para manantiales del Grupo 4. A partir del manantial con mayor concentración de sílice (4), asumiendo la existencia del proceso de ebullición, evidente en superficie, se infiere una temperatura de 177°C (750 kJ/kg) la cual es relativamente baja (cercana a la estimada por el geotermómetro de cuarzo). En el caso de asumir que el proceso de ebullición cercano a la superficie no es significativo y que manantiales 1 y 5 son el resultado de una dilución simple, la temperatura interpolada es del orden de 220°C (equivalente a una entalpía de unos 950 kJ/kg), la cual es más cercana a la estimada a partir del geotermómetro Na/K (260°C). La concentración de sílice estaría alrededor de 360 mg/l.**

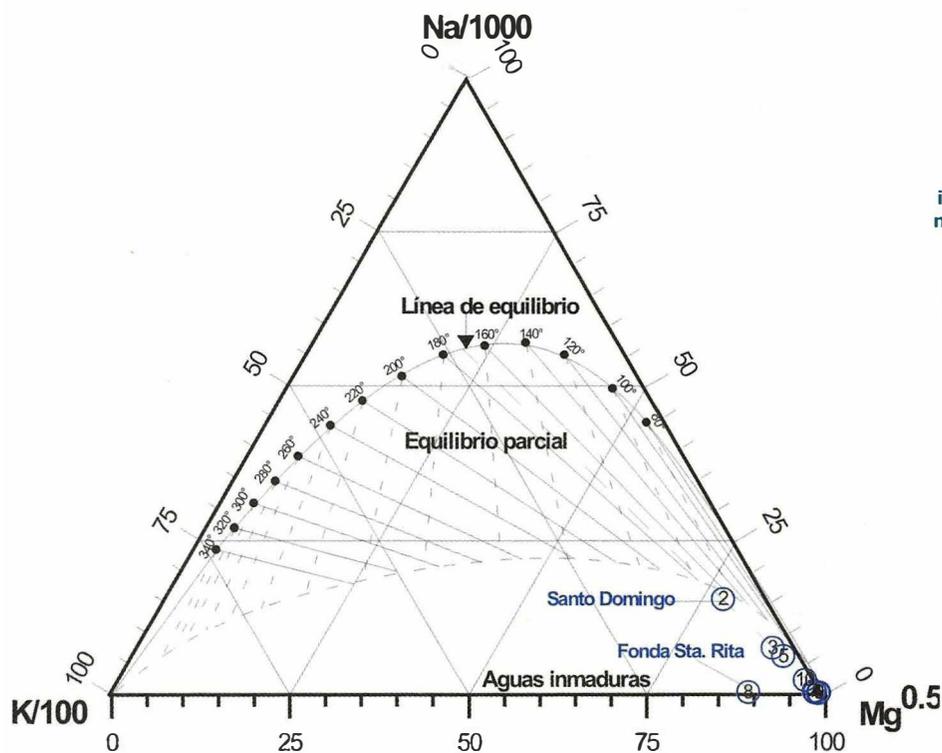


Figura 10. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 5. El manantial tibio de Santo Domingo I (29°C) es el más representativo del agua caliente que interviene en el proceso de mezcla definido por la línea trazada. La temperatura Na/K del reservorio sería del orden de 160°C, según se extrapola sobre la línea de equilibrio.

La temperatura máxima estimada para el reservorio que alimenta los manantiales del Grupo 5 estaría alrededor de 180°C, según el geotermómetro Na/K, mientras que la mínima probable, calculada con el geotermómetro de cuarzo, sería del orden de 130-140°C, como se indica en la Tabla 2. No fue factible aplicar para estos manantiales el modelo Entalpía-Sílice, ya que al parecer sufren un enfriamiento conductivo muy significativo, además de una gran dilución.

**El Grupo 6**, conformado por 15 manantiales, está ubicado en el Municipio de Santa Rosa de Cabal, al sur del grupo anterior, como se indica en la Figura 1. La mayoría de estos manantiales son de alta temperatura. Su concentración de cloruros, litio, boro y sulfato son compatibles con fluido geotérmico profundo (Tabla 1). La temperatura máxima en superficie es de 91°C y corresponde a manantiales de San Vicente.

Como se señala en la Figura 1, la composición relativa de aniones dominantes permite clasificar la mayoría de los manantiales del grupo como bicarbonatados, aunque los más calientes son clorurados. Según se ilustra en la Figura 11, en donde se representa la composición relativa Na-K-Mg, estos manantiales están relacionados por una línea de mezcla entre agua geotérmica, caracterizada por aguas maduras originadas en el reservorio: San Vicente I, II, V y VI y otra somera, de aguas subterráneas frías: El Cortijo III (punto 13) y Quebrada La Piscina (punto 14). La dilución que sufren las aguas maduras o de reservorio es considerable como la elevada composición relativa de magnesio.

La tendencia lineal que define el proceso de mezcla, extrapolada sobre la línea de equilibrio, indica una temperatura Na/K del orden de 250°C. El miembro extremo de mezcla más representativo del fluido geotérmico es el ma-

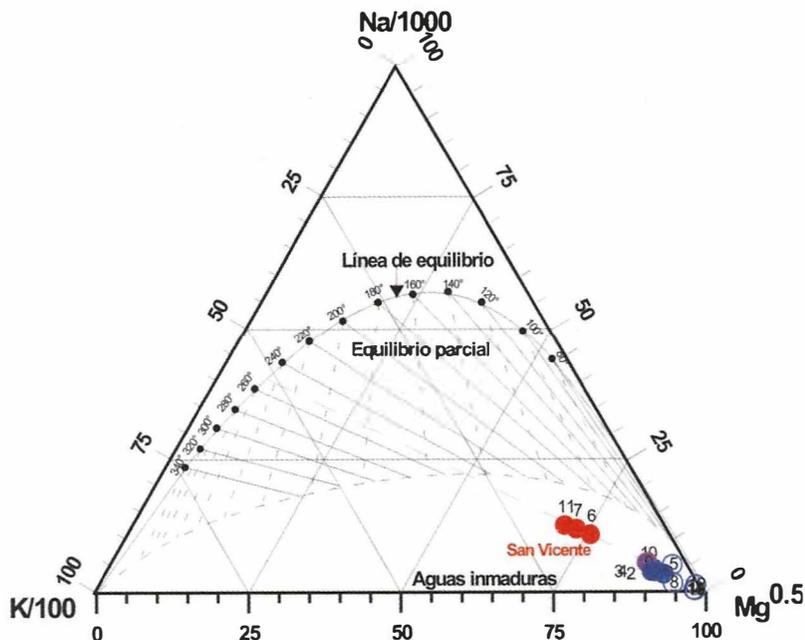


Figura 11. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 6. Se define una tendencia de mezcla, en la cual los manantiales calientes de San Vicente, son los más representativos de la fuente caliente. La temperatura Na/K extrapolada sobre la línea de equilibrio, es del orden de 250°C.

nantial San Vicente VI (punto 11), mientras que el miembro extremo de baja temperatura y alta concentración en magnesio (y en bicarbonato), se identifica en los manantiales Santa Helena (punto 5), San Vicente III (punto 8), Peñaranda Río San Eugenio (punto 12), El Cortijo III (punto 13) y Quebrada La Piscina (punto 14). En su mayoría estos manantiales registran una relación Cl/B semejante, la cual permite asociarlos a un origen común.

La mezcla se confirma con base en la composición relativa Cl-B-HCO<sub>3</sub>, presentada en la Figura 12. Como se espera, los manantiales más fríos y de mayor concentración en magnesio son los de mayor contenido relativo en bicarbonato. Las aguas de los manantiales clorurados de alta temperatura superficial, de San Vicente, nuevamente se identifican a través de este diagrama como las más representativas del fluido profundo.

Las temperaturas geoquímicas presentadas en la Tabla 2 señalan las temperaturas máxi-

mas de toda el área de estudio, alrededor de 280°C para el geotermómetro de Na/K. El efecto del proceso de dilución con agua fría, ya mencionado, se refleja también en las bajas temperaturas calculadas con el geotermómetro K/Mg (entre 60 y 76°C) y en el de cuarzo. Este último registra valores menores al de Na/K, pero alcanza temperaturas hasta de 200°C. Los manantiales de este grupo definen dos tendencias lineales en el modelo de mezcla Entalpía - Sílice presentado en la Figura 13. La primera, entre el agua subterránea de baja temperatura y las aguas bicarbonatadas calientes, principalmente de Santa Rosa y El Cortijo, cuyo contenido de sílice es el más alto del grupo y la segunda, entre el agua subterránea de baja temperatura y las aguas cloruradas calientes (San Vicente), de menor contenido en sílice que las bicarbonatadas. De estas tendencias, se podrían plantear tres condiciones diferentes de temperatura y concentración de sílice, en el reservorio: (1) A partir de las aguas bicarbonatadas, cuya concentración elevada de sílice podría sugerir

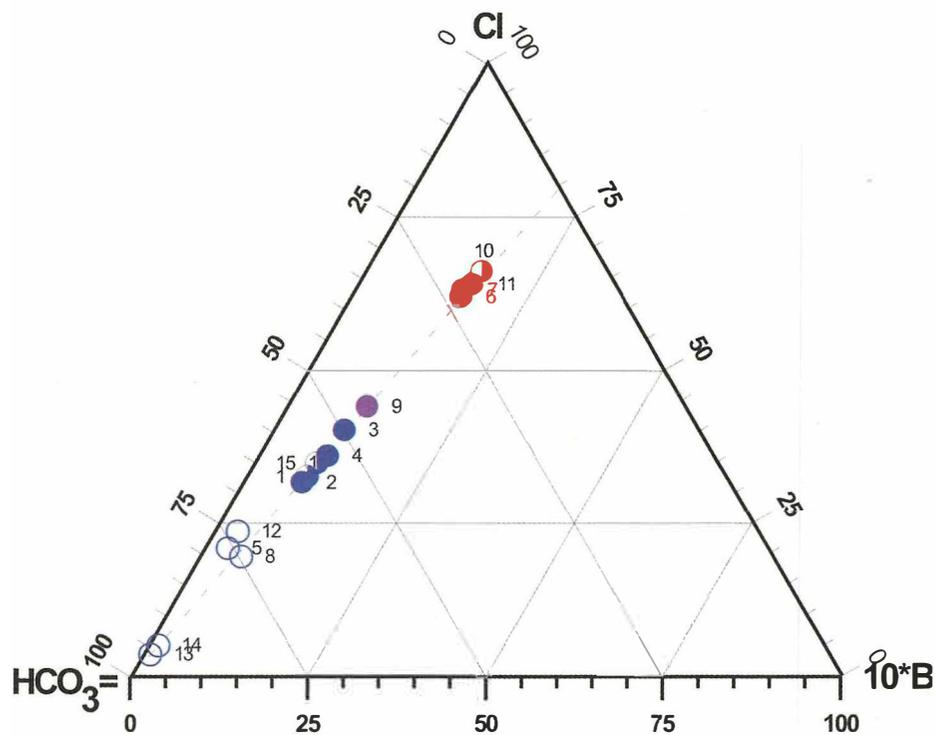
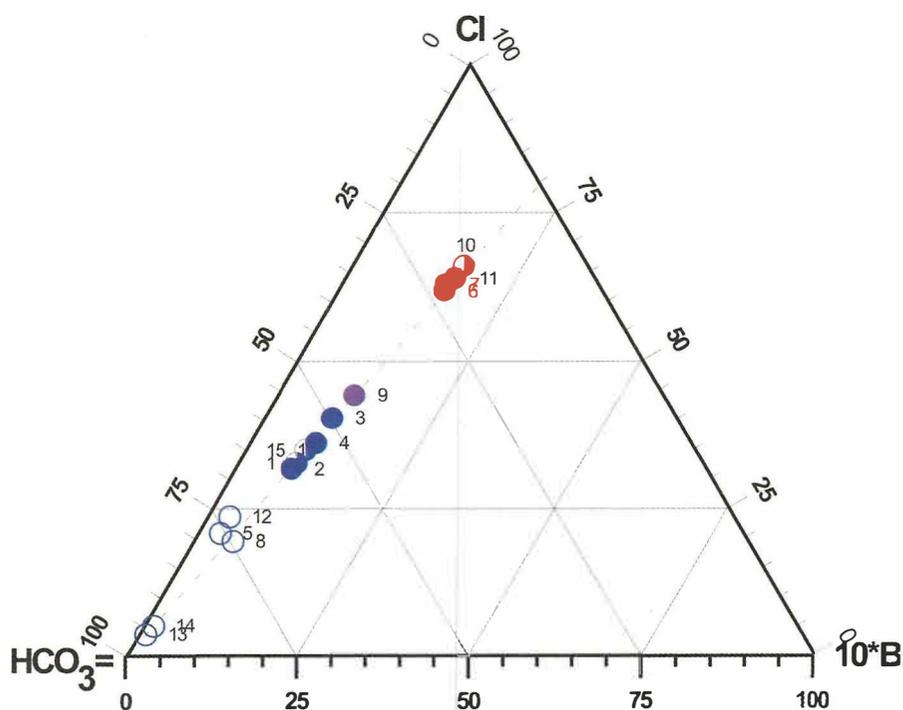


Figura 12. Composición relativa Cl-HCO<sub>3</sub>-B (Koga, 2000), para manantiales del Grupo 6. El avance del proceso de dilución se visualiza con el incremento de la concentración relativa de bicarbonato, de manera análoga al incremento de magnesio de la figura anterior.

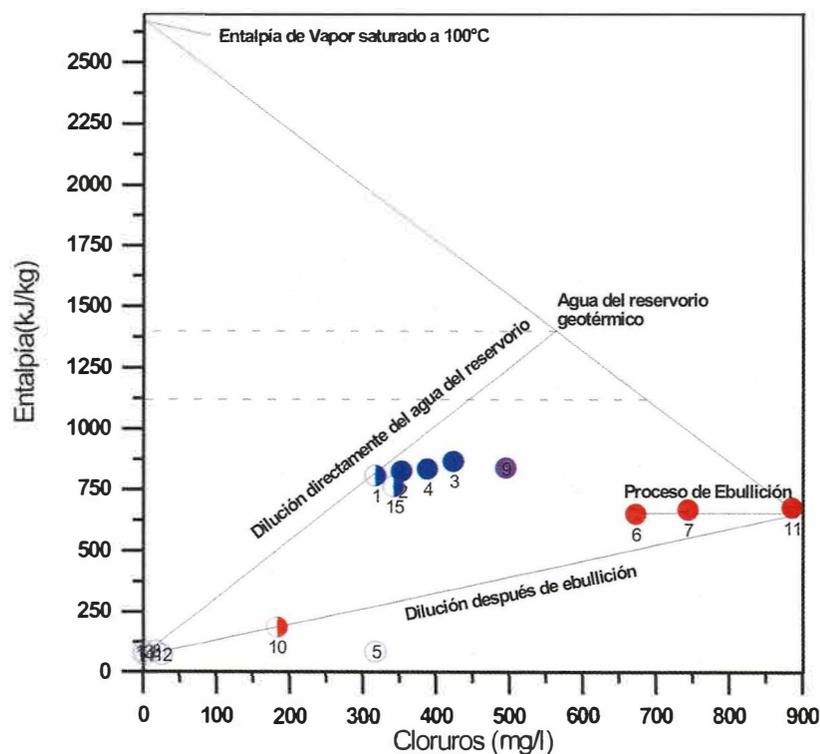
Figura 13. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 6. Los manantiales de San Vicente y Santa Rosa parecen seguir procesos diferentes. Si se asume la formación de los manantiales clorurados de San Vicente a partir de la dilución de fluido profundo, se interpola una temperatura de 263°C (1.250 kJ/kg). Si por el contrario, se asume la ocurrencia del proceso de ebullición a 100°C, se interpola una temperatura relativamente baja, de 155°C (650 kJ/kg) para las aguas de San Vicente y de 220°C (950 kJ/kg) para las de Santa Rosa.



enfriamiento conductivo sin precipitación, la temperatura del reservorio se estima en unos 220°C (entalpía de 950 kJ/kg) y su concentración en sílice, en unos 350 mg/l, si se asume que se originan por la dilución de agua separada por ebullición a 100°C, (2) A partir de las aguas cloruradas, si se asume dilución de agua separada sin ebullición la temperatura del reservorio sería de 263°C (1250 kJ/kg) y la concentración de sílice, de 550 mg/l, y (3) A partir de las aguas cloruradas formadas separadas por ebullición a 100°C, la temperatura estaría alrededor de 155°C (650 kJ/kg) y su concentración de sílice, alrededor de 150 mg/l. Para las aguas cloruradas, como en el Grupo 4, la estimación si se asume la ocurrencia del proceso de ebullición, resulta en temperaturas muy bajas.

Para evaluar cuál de los procesos planteados podría explicar mejor la composición de los

manantiales del Grupo 6, se aplicó el modelo Entalpía - Cloruros, presentada en la Figura 14. En éste también se identifican dos tendencias muy claras, para los manantiales bicarbonatados (de Santa Rosa, principalmente) y para los clorurados (San Vicente). A partir de este modelo, las dos tendencias se explican a partir de procesos diferentes observados en caracterizaciones recientes de los manantiales de la zona (Alfaro, & Jaramillo, 2001). Dichos procesos corresponden a: (1) la ebullición del fluido geotérmico (inferida a partir de los manantiales San Vicente I (punto 6), San Vicente II (punto 7) y San Vicente VI (punto 11)) y posterior dilución con agua subterránea de baja temperatura (San Vicente V (punto 10) y manantiales bicarbonatados fríos), y (2) la dilución directamente a partir del fluido geotérmico (inferida a partir del manantial Termales de Santa Rosa I (punto 1). En los manantiales Santa Rosa II



**Figura 14. Modelo Entalpía - Cloruros (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 6.** Como en el modelo entalpía - sílice se identifican procesos diferentes para los dos grupos de manantiales. Los manantiales de San Vicente, al parecer, son el resultado de un proceso de ebullición por el cual incrementa su concentración de cloruros, mientras que los de Santa Rosa, con una entalpía mayor, al parecer provienen de la dilución directa desde el fluido de reservorio.

(punto 15), La Piscina (punto 2), El Cortijo I y II (puntos 3 y 4) y San Vicente IV (punto 9) se infiere la combinación de ebullición y mezcla. La entalpía estimada en el reservorio, a partir de la gráfica Entalpía - Cloruros con referencia en el manantial Termales Santa Rosa I (punto 1), es de 1.400 kJ/kg, equivalente a 310°C.

En resumen, el modelo Entalpía - Cloruros permite establecer que los manantiales de Santa Rosa no sufren enfriamiento conductivo y que son la resultante de un proceso de dilución a partir del agua de reservorio con agua somera que disminuye su concentración en cloruros y en sílice y la incrementa en bicarbonato (así como magnesio y calcio).

Por su parte, los manantiales de San Vicente reflejan un proceso de ebullición a entalpía constante de un fluido con temperatura inferior a la del reservorio, en el que su concentración de cloruros se incrementa. La concentración de sílice de estos manantiales es menor que la de los de Santa Rosa porque el agua de partida para el proceso de ebullición tiene un contenido menor de sílice.

**El Grupo 7** incluye solamente al manantial del Bosque del Otún, el cual es tibio (22°C), sulfatado, ligeramente ácido y normalmente relacionado con el volcán Santa Isabel. Su rasgo principal es un caudal muy abundante, estimado en 1.000 l/s (CHEC, et al., 1983). Sin embargo teniendo en cuenta las características citadas, su contenido en especies conservativas (Cl: 1,21 mg/l, B: 0,03 mg/l y Li: 0 mg/l), y su composición relativa Na-K-Mg (representado en la Figura 5 junto con los manantiales del Grupo 3), el agua de este manantial es vapor calentada, no representativo de un reservorio geotérmico (aunque probablemente está asociado a su proceso de ebullición en el ascenso a la superficie) ni revela la contribución de un sistema volcánico magmático. Su origen superficial también se refleja en su composición relativa de cationes

mayores, la cual es dominada por el ión calcio (Tabla 1).

**El Grupo 8** está conformado por 16 manantiales, tibios en su mayoría, ubicados alrededor del volcán Nevado del Tolima (Figura 1), clasificados como bicarbonatados y sulfatados, probablemente vapor - calentados. En general, considerando su contenido en cloruro, litio, boro y sulfato, indicado en la Tabla 1, estos manantiales no reciben contribución significativa de aguas de reservorio geotérmico.

El origen superficial y la consecuente inmadurez de los manantiales de este grupo también se ve reflejado en un contenido relativo de magnesio (Na/1.000-K/100-Mg<sup>0,5</sup>) superior a 96%. Aunque se trata de aguas inmaduras, se aplicaron los geotermómetros basados en la concentración de sílice, para estimar su temperatura mínima probable en el subsuelo, teniendo en cuenta su pH neutro. Como se indican en la Tabla 2, esta temperatura alcanzaría los 180°C, para los manantiales de El Rancho. A partir del modelo Entalpía - Sílice, presentado en la Figura 15, se estima para el reservorio una temperatura alrededor de 210°C (900 kJ/kg) y su concentración de sílice, en 310 mg/l, si se asume que las aguas de El Rancho (puntos 2 y 3) se generan por dilución de agua separada después de ebullición a 100°C.

Como observaron Gil Cruz et al., 1998, los manantiales sulfatados mezclados con bicarbonatados, según señala su pH neutro, indican una probable zona de ebullición del fluido geotérmico hacia el norte del Nevado del Tolima. El agua geotérmica clorurada en este sistema no alcanzaría la superficie, excepto por moderadas contribuciones mencionadas, en los manantiales de El Rancho (concentración de cloruros cercana a 10%).

Finalmente, **el Grupo 9**, ubicado al sur de la zona de estudio, consta de 17 manantia-

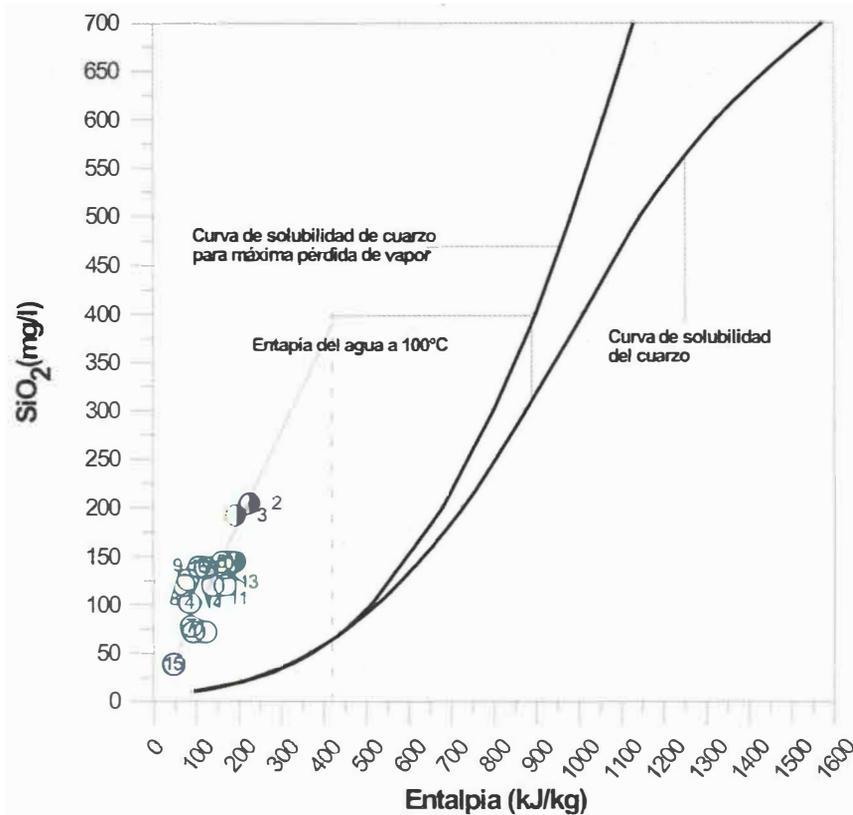


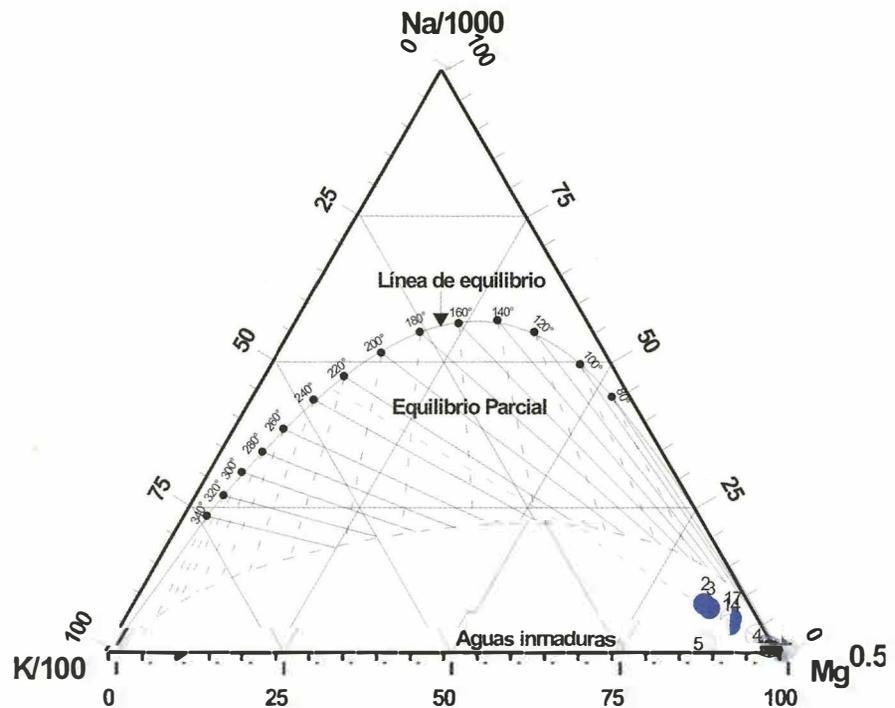
Figura 15. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 8. Aunque no se registran aguas cloruradas, los manantiales de este grupo exhiben concentraciones relativamente altas de sílice. Asumiendo que estos manantiales se generan por dilución de agua separada por ebullición a 100°C, el reservorio geotérmico tendría una temperatura de unos 230°C.

les bicarbonatados (Figura 1), ubicados sobre el río Toche en cercanías de la caldera del volcán Cerro Machín. Las temperaturas más altas (94 y 74°C) se registran en La Piscina (manantiales 2 y 3). A partir de la composición química, presentada en la Tabla 1, los manantiales calientes y tibios de este grupo, con concentraciones relativamente altas de cloruros, litio y boro, reflejan la contribución significativa de aguas cloruradas de reservorio geotérmico, aun cuando son dominadas por el ión bicarbonato. En general, en sistemas hidrotermales asociados a estrato - volcanes, las aguas bicarbonatadas se forman en la región marginal superficial del sistema, en donde el gas carbónico es absorbido en aguas subterráneas frías (Simmons, 1997). En este caso, las aguas bicarbonatadas alcanzan hasta 94°C, lo cual permite plantear que el agua de los manantiales de este grupo

es una mezcla de fluido de dos acuíferos, uno profundo y caliente de agua clorurada originada en el reservorio geotérmico y uno menos profundo formado por agua subterránea calentada por vapor condensado y gases, separados por ebullición del fluido geotérmico, que lo enriquecen en bicarbonato y, en menor proporción, en sulfato. Esta posibilidad es consistente con las concentraciones de bicarbonato y de sulfato de los manantiales más calientes. Esta mezcla, a poca distancia del Cerro Machín, hace suponer un sistema hidrotermal de dimensiones pequeñas, como había sido planteado a partir de criterios geovolcanológicos y tectónicos (CHEC et al., 1983).

La composición relativa Na-K-Mg, presentada en la Figura 16, señala la inmadurez de los manantiales del Grupo 9, derivada de la mezcla con aguas menos profundas. Dicha

**Figura 16. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 9. Aunque la alta composición relativa de magnesio señala la mezcla con aguas someras frías, se identifica claramente una tendencia de mezcla, en la que los manantiales de La Piscina (2 y 3) serían los afectados en menor proporción. La temperatura indicada por la extrapolación de dicha tendencia sobre la línea de equilibrio es de unos 230°C.**



mezcla se ilustra muy bien en la tendencia lineal que describen los puntos, cuya extrapolación sobre la línea de equilibrio indica una temperatura del reservorio de unos 230°C. Los manantiales más calientes (2 y 3) se identifican como los menos alejados de la línea de equilibrio y, en consecuencia, como los más representativos del fluido geotérmico.

La composición relativa de especies conservativas (Cl-B-Li), presentada en la Figura 17, muestra diferencias significativas en la relación Cl/B entre las aguas de los manantiales del río Toche (5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13), el San Juan (4) y los más calientes cercanos al volcán Cerro Machín (2, 3 y 14). Esta diferencia plantea la posibilidad de que la mezcla identificada por la relación Na-K-Mg, esté conformada, además del fluido geotérmico y del agua somera fría, por otra fuente. Las aguas más calientes muestran una mayor concentración relativa de boro, la cual podría

explicarse por la absorción de vapores magnésicos más ricos en la relación B/Cl, en el sistema hidrotermal, o por una absorción más reciente, comparada con la de los sistemas a que pertenecen los grupos anteriores de manantiales termales, si se tiene en cuenta la mayor volatilidad del boro respecto del cloruro, que hace que en las etapas más tempranas y calientes, de evolución del sistema geotérmico, el boro (y otros componentes de alta volatilidad como As, Sb y Hg), salgan del sistema, con la consecuente disminución de su concentración en el fluido geotérmico remanente (Giggenbach & Goguel, 1989).

La temperatura estimada para el reservorio alcanza 220-240°C con el geotermómetro Na/K, como se indica en la Tabla 2. En los manantiales más calientes, el geotermómetro de sílice, aunque altamente afectado por el proceso de dilución, alcanza temperaturas superiores a 200°C. El modelo Entalpía - Sí-

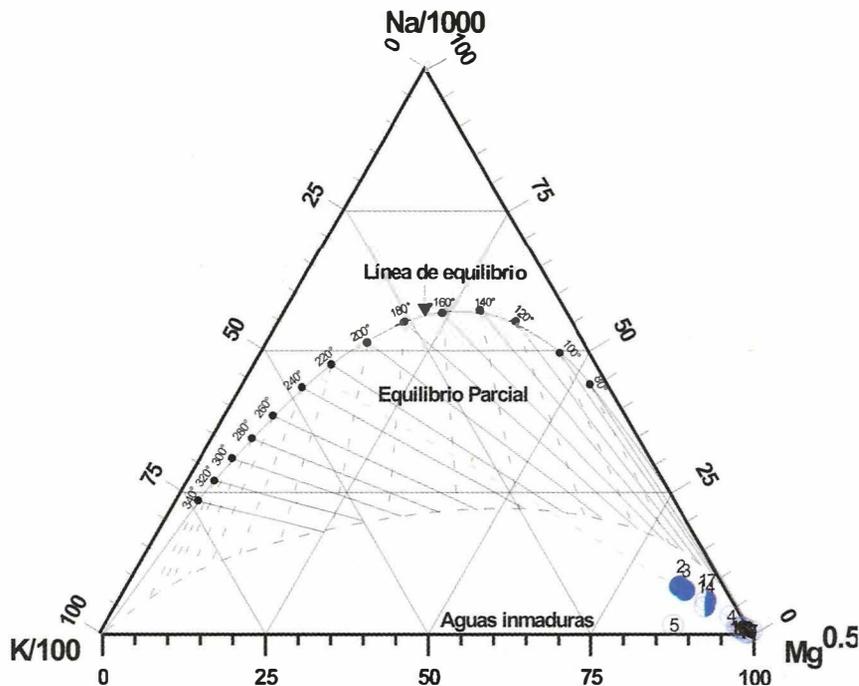


Figura 17. Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991) para manantiales del Grupo 9. Las diferencias evidentes en la relación Cl/B sugieren diferencias en el origen de las fuentes que alimentan estos manantiales. Es decir, que la mezcla observada a partir de la composición relativa Na-K-Mg no es solamente una dilución y que otra fuente podría estar involucrada. Los manantiales más calientes registran la mayor composición relativa en boro, lo cual estaría asociado con una absorción de gases magmáticos más reciente que en los grupos restantes.

lice presentado en la Figura 18 sugiere que los manantiales con mayor concentración de sílice (y más calientes) se han formado por dilución del fluido geotérmico después de un proceso de ebullición o que han sufrido enfriamiento por conducción sin precipitación de sílice. La primera opción hace posible estimar a partir de los manantiales de Puente Tierra, una temperatura del reservorio alrededor de 245°C (1.060 kJ/kg) y la concentración de sílice en 450 mg/l.

La aplicación del modelo Entalpía - Cloruros, presentado en la Figura 19, pone una vez más en evidencia las diferencias en la composición de los manantiales de los ríos Toche - San Juan y las más cercanas al Cerro Machín. Las primeras se alinean en una tendencia independiente a las más calientes del Cerro Machín y al parecer reciben la contribución de una fuente clorurada de menor temperatura, de la que el manantial del río San Juan (punto 4) es el más representativo, con 496 mg de

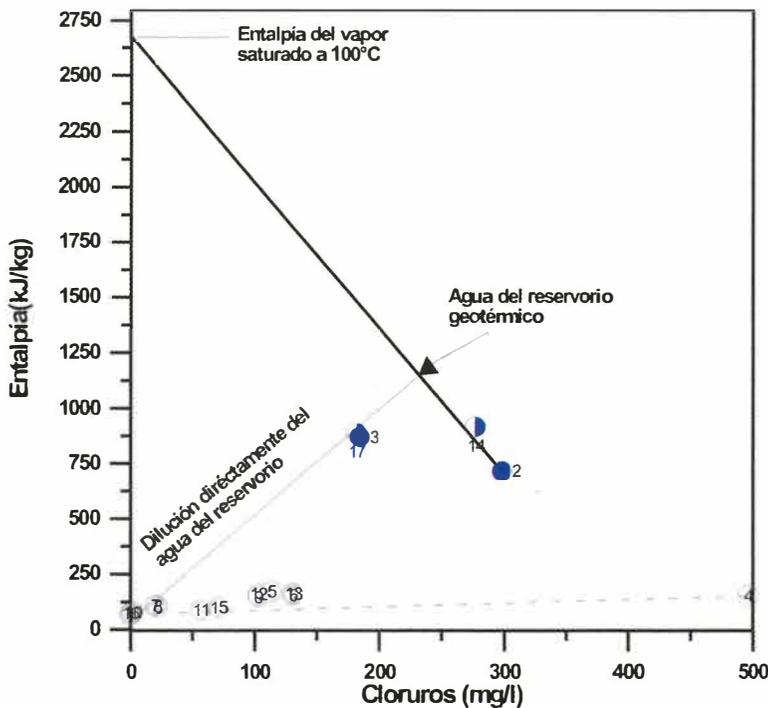
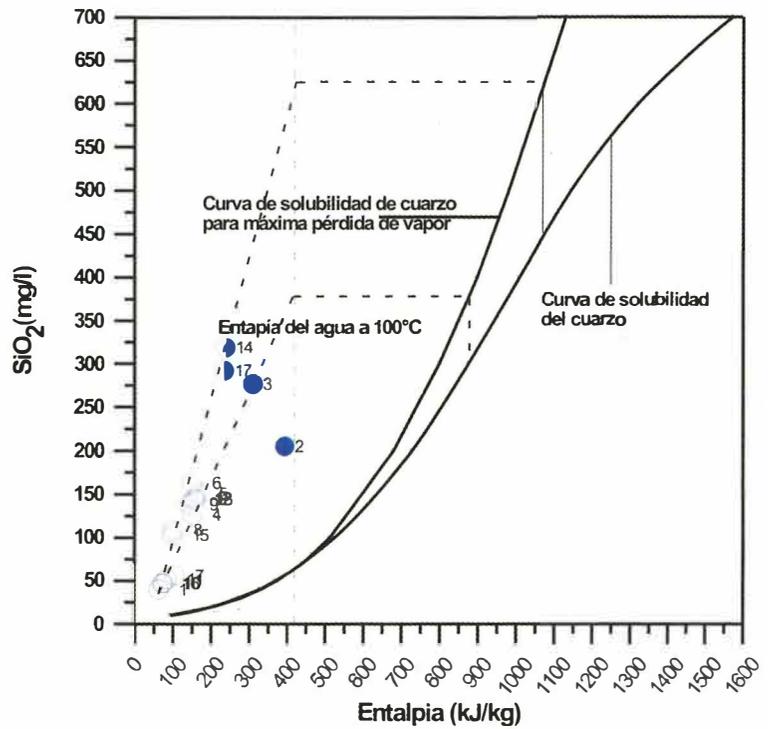
cloruro. Probablemente, dicha fuente es rica en otras especies iónicas (bicarbonato, calcio y magnesio) que incrementan su salinidad por encima de la de los manantiales más calientes, como ilustra la Figura 20. Volviendo al modelo Entalpía - Cloruros, si los manantiales 3 y 17 se forman directamente por dilución del agua de reservorio, como se indica en el diagrama por la línea recta de pendiente positiva, su temperatura estaría alrededor de 267°C (1.170 kJ/kg).

### 3.2 Usos potenciales

#### 3.2.1 Usos como recurso energético

Considerando únicamente el criterio de temperatura estimada a partir de la composición de los manantiales evaluados y a partir del diagrama Lindal, presentado en la Figura 21, los reservorios que alimentan los manantiales de los grupos 1, 4, 5, 6 y 9, probablemente tienen potencial de utilización en generación

**Figura 18. Modelo Entalpía – Sílice** (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000) para manantiales del Grupo 9. Asumiendo el origen de estos manantiales a partir de la dilución de agua separada después de un proceso de ebullición a 100°C, la temperatura máxima probable inferida con base en los manantiales de Puente Tierra (11 y 14) que, aunque contienen la mayor concentración de sílice, y no son los más calientes en superficie, sería de unos 245 °C (1.060 kJ/kg).



**Figura 19. Modelo Entalpía – Cloruros** (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 9. Los manantiales con temperatura inferior a 40°C (a lo largo de los ríos Toche y San Juan) podrían estar relacionados en un proceso de mezcla independiente de los más calientes cercanos al Cerro Machín. El manantial más concentrado de la mezcla propuesta sería el manantial del río San Juan (4), cuya concentración en cloruros y temperatura, sugiere la contribución de una fuente salina de baja temperatura. Es probable que los manantiales más calientes se originen por ebullición (14 y 2) y por dilución del agua del reservorio (3 y 17), que estaría a unos 267°C (1.170 kJ/kg).

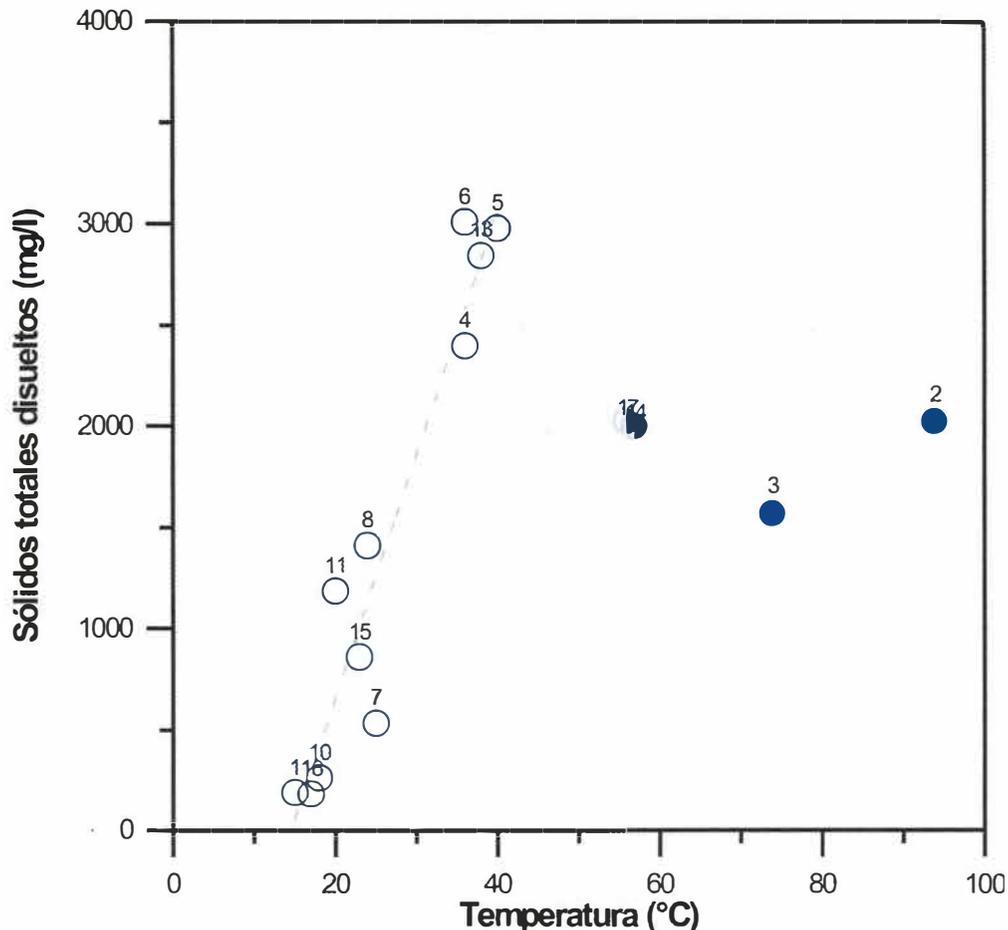


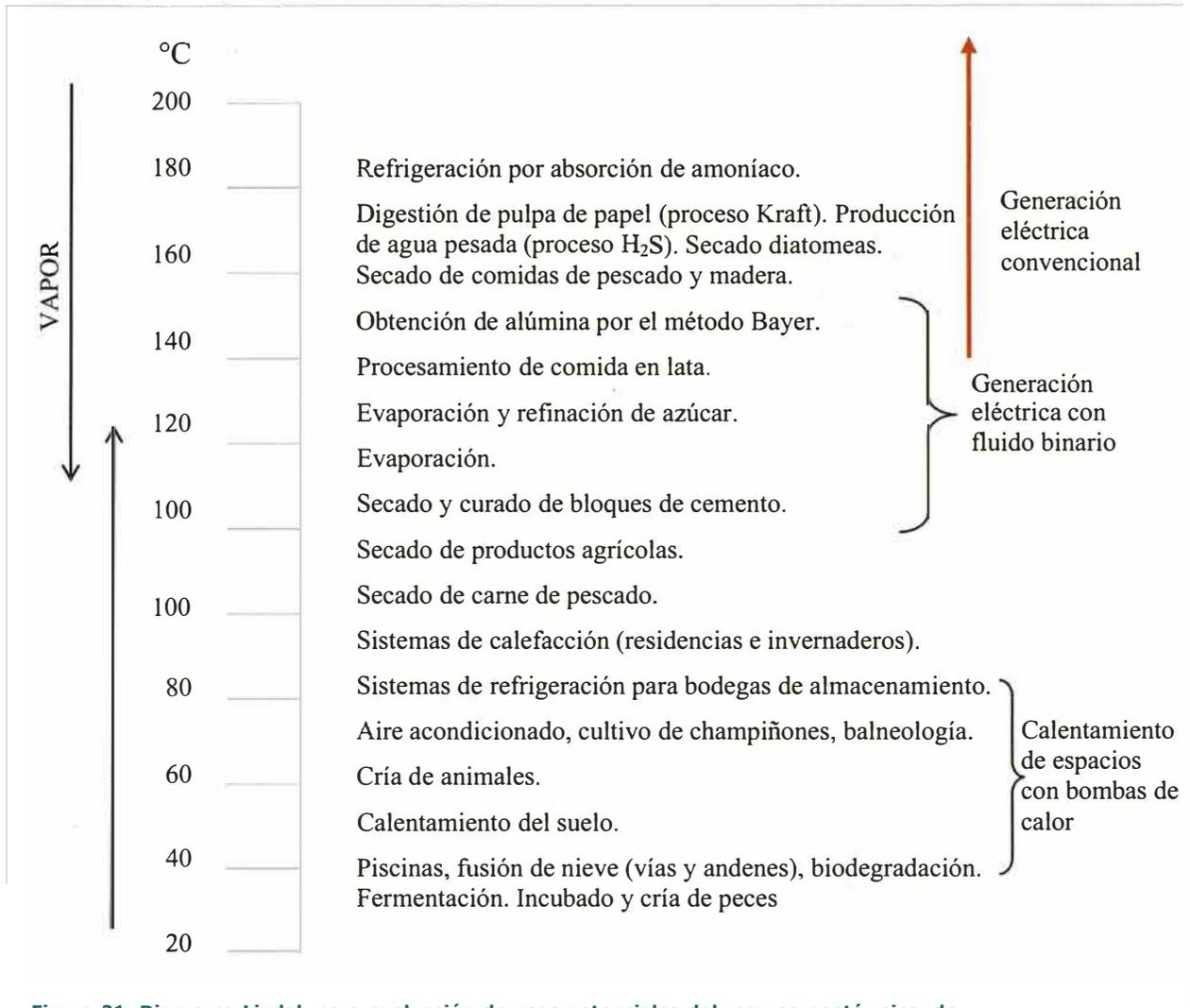
Figura 20. Variación de la concentración de sólidos totales en función de la temperatura para manantiales del Grupo 9. Como se observa en la figura anterior a partir de la concentración de cloruros, los manantiales con temperatura inferior a 40°C al parecer reciben la contribución de una fuente salina de menor temperatura la cual es rica, además, en bicarbonato, calcio y magnesio.

eléctrica, por métodos convencionales (vapor de agua como motor de turbinas), dado que exceden los 180°C. Adicionalmente, los recursos de los grupos citados y de los Grupos 3 y 8 podrían ser utilizados en cualquiera de los usos de menor requerimiento energético indicados en el diagrama Lindal, tales como la generación eléctrica por ciclo binario (isopentano u otro hidrocarburo liviano gasificado como motor de turbinas), procesos de evaporación, secado industrial (cementos, produc-

tos agrícolas, carne de pescado), sistemas de calefacción, refrigeración, aire acondicionado, usos agrícolas, acuicultura y balneología.

### 3.2.2 Usos en termalismo

Los usos en termalismo o como aguas mine-romedicinales incluyen la balneología médica y el aprovechamiento como agua natural embotellada. Teniendo en cuenta que este es uno de los usos de más fácil implementación



**Figura 21. Diagrama Lindal, para evaluación de usos potenciales del recurso geotérmico, de acuerdo con la temperatura del reservorio. (Gudmundsson et al., 1985, en Lund et al., 1999 y <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull18-3/art48.htm>). En la generación eléctrica se utilizan sistemas hasta de 325°C.**

y que en la práctica es el único aprovechamiento que se ha dado en Colombia al recurso geotérmico (manantiales), los manantiales del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín se clasificaron individualmente, con los resultados presentados en la Tabla 3, de acuerdo con criterios de clasificación para estos usos, propuestos por Armijo & San Martín (1994), resumidos en la Tabla 4.

### 3.2.2.1 Usos tópicos

Las propiedades como (1) estimulante, mejorador de la circulación de órganos internos, activadores de cambios metabólicos y vasoconstrictores, (2) sedante, y (3) para combatir contracciones e hipertonia muscular, derivadas de la temperatura, se indican para cada manantial, en la Tabla 3. Sin embargo, un buen número de manantiales registran

temperaturas hipertermales para el cuerpo humano (más de 50°C) y su aplicación en termalismo depende de la temperatura de utilización después de su enfriamiento.

### **Aguas cloruradas (> 20% en meq/l, de aniones totales)**

Alrededor de 35 manantiales distribuidos en los Grupos 1 (San Luis, Aguacatal), 3 (Hacienda Granates), 4 (área de Botero Londoño), 5 (Santo Domingo), 6 (Santa Rosa) y 9 (Machín) se clasifican como aguas cloruradas para uso tópico (más de 20% de cloruro en meq/l). A este tipo de aguas se asocian, entre otras propiedades, las de servir como coadyuvantes en tratamientos de enfermedades reumáticas y envejecimiento articular (Tabla 4).

Los manantiales clorurados de Santo Domingo, Santa Rosa y Machín extienden su potencial de utilización a tratamientos en neuralgias, dermatopatías y ginecopatías, dado su carácter bicarbonatado. De igual manera, los manantiales de Hacienda Granates, Botero Londoño, Santo Domingo, Santa Rosa, San Vicente y Machín, por ser además silíceos, flexibilizan y elastizan la piel y alivian la esclerodermia o endurecimiento de la piel.

### **Aguas bicarbonatadas (más de 50% en meq/l, de aniones totales)**

El tipo bicarbonatado es el que se registra con mayor frecuencia en todos los grupos de la zona de estudio. Las aguas termales de este tipo, como se expresó anteriormente, son utilizadas para tratamiento de reumatismos, neuralgias, dermatopatías y ginecopatías.

Las aguas termales de La Calera (Grupo 1), La Yuca (Grupo 3), Las Nereidas (Grupo 4), El Rancho y La Florida (Grupo 8), Machín y

Río Toche (Grupo 9) por su carácter silíceo, podrían ser utilizadas en tratamientos para flexibilizar la piel. Adicionalmente, los manantiales de El Rancho podrían servir en el tratamiento de psoriasis por su contenido de sulfatos.

### **Aguas sulfatadas (más de 50% en meq/l, de aniones totales)**

A este tipo de agua corresponden Hotel Termales, Aguas Calientes, Quebrada Corralitos, El Oso, El Coquito y Gualí (Grupo 2), El Recodo y Chorro Negro (Grupo 4) y los manantiales de El Cebollar (Grupo 8). La principal aplicación tópica reconocida para este tipo de aguas es el tratamiento de algunos problemas de la piel como la psoriasis. También, por el carácter silíceo de todos estos manantiales, podrían ser utilizados para otros problemas de piel como la esclerodermia.

Aunque el pH natural de la piel está entre 5,5 y 6,5, es posible que los manantiales de Hotel Termales y Aguas Calientes, con pHs extremos alrededor de 1,6 y 1,3, tengan propiedades en el tratamiento de algunas dermatopatías tales como la dermatitis atópica, como se ha demostrado en manantiales sulfatados de acidez muy elevada <sup>1</sup>.

Adicionalmente, el contenido de sulfuros, superior a 1 mg/l en Hotel Termales y Aguas Calientes <sup>2</sup>, del Grupo 2, les confiere las propiedades indicadas en la Tabla 4, que extienden su potencial de utilización a tratamiento de enfermedades respiratorias, entre otras.

#### **3.2.2.2 Agua natural embotellada**

Para evaluar el potencial como agua natural embotellada, se consideraron solamente los manantiales con temperatura igual o inferior a 20°C.

<sup>1</sup> Disponible en <http://www.soc.nii.ac.jp/jarm/english/abstract/vol34/340040EA.html>. Julio de 2003

<sup>2</sup> Ingeominas. Tablas de variación de la composición de manantiales termales del Nevado del Ruiz. Proyecto de vigilancia de la actividad volcánica.

**Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo  
- Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.**

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
<b>GRUPO 1</b>								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO <sub>4</sub>	>50% meq/l HCO <sub>3</sub>	> 50 mg/l H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> mg/l
1	Aguacatal I	37	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
2	Aguacatal II	37	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
4	El Jordán I	25	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	La Calera I	26	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
9	La Calera II	28	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
11	Termal S. Luis I	42	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
12	Termal S. Luis II	45	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
<b>GRUPO 2</b>								
1	Hotel Termales El Ruiz 1	63	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
2	Hotel Termales El Ruiz 2	61	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
4	Aguas Calientes	60	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
7	Termales El Ruiz	36	Mesotermal	Sedante		Sulfatada		Silícea
9	Agua Blanca	35	Mesotermal	Sedante		Sulfatada		Silícea
11	El Calvario	57	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
12	El Coquito	33	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores		Sulfatada		Silícea
13	El Oso	22	Hipotermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silícea
14	Corralitos	29	Hipotermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silícea
15	Guali	62	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
<b>GRUPO 3</b>								
2	Granates	55	Hipertermal		Clorurada			Silícea
3	La Yuca	37	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
4	La Yuca	40	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
<b>GRUPO 4</b>								
1	Hacienda Termales Botero Londoño II	92	Hipertermal		Clorurada			Silícea
4	El Billar	92	Hipertermal		Clorurada			Silícea
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	93	Hipertermal		Clorurada			Silícea
6	Las Nereidas I	46	Mesotermal				Bicarbonatada	Silícea
7	Las Nereidas II	28	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	El Recodo	54	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
10	Chorro Negro	51	Hipertermal			Sulfatada		Silícea

Continuación Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo – Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
<b>GRUPO 5</b>								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO <sub>4</sub>	>50% meq/l HCO <sub>3</sub>	> 50 mg/l H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> mg/l
2	Santo Domingo I	29	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	
3	Santo Domingo II	32	Mesothermal	Estimulante, mejor circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
5	Santo Domingo III	25	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
10	Cristalina Baja	21	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
Manantial		Temperatura			Usos tópicos			
<b>GRUPO 6</b>								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO <sub>4</sub>	>50% meq/l HCO <sub>3</sub>	> 50 mg/l H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> mg/l
1	Termales Santa Rosa	52	Hiperthermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
2	La Piscina	63	Hiperthermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
3	El Cortijo I	65	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
4	El Cortijo II	65	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
6	San Vicente I	84	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
7	San Vicente II	90	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
9	San Vicente IV	66	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
10	San Vicente V	43	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada			Silíceas
11	San Vicente VI	91	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
15	Termales S. Rosa II	50	Mesothermal		Clorurada			Silíceas
<b>GRUPO 7</b>								
1	El Bosque del Otún	22	Hipothermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silíceas
<b>GRUPO 8</b>								
1		21	Hipothermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silíceas
2	El Rancho	53	Hiperthermal					Silíceas
3		45	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular				Silíceas
5	La Florida (El Turpial)	28	Hipothermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silíceas
6	La Florida (El Turpial)	37	Mesothermal	Sedante			Bicarbonatada	Silíceas
10	Zona del Termal El Cebollar	45	Mesothermal			Sulfatada		Silíceas
11	Zona del Termal El Cebollar	39	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular		Sulfatada		Silíceas
12	Zona del Termal El Cebollar	28	Hipothermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silíceas
13	Zona del Termal El Cebollar	39	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular		Sulfatada		Silíceas

**Continuación Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo – Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.**

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO <sub>4</sub>	>50% meq/l HCO <sub>3</sub>	> 50 mg/l H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> mg/l
14	Zona del Termal El Cebollar	32	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores		Sulfatada		Silícea
16	Aquilino	24	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
<b>GRUPO 9</b>								
2	La Piscina- Machin	94	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
3	La Piscina-Machín	74	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
4	San Juan - Rio San Juan - Machín	36	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
5	Río Toche	40	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
6	Río Toche	36	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
7	Río Toche	25	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	Río Toche	24	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
9	Río Toche	34	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores			Bicarbonatada	Silícea
12	Río Toche	37	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
13	Río Toche	38	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
14	Puente Tierra Alta	57	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
15	California, Toche Bajo	23	Hipotermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
17	Puente Tierra	56	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
		54						

**Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,  
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994**

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Cloruradas	Mayor de 20% de aniones totales en eq/l Más de 607 mg/l	Estimulantes de la cicatrización y reparación de afecciones óseas y ganglionares, favorables en el tratamiento de afecciones respiratorias y cutáneas. Coadyuvante o apoyo a tratamientos en: reumatismos crónicos, espondilartritis reumática, artrosis vertebrales, neuralgias ciáticas, envejecimiento articular, secuelas de traumatismos, recuperación de fatiga muscular, hipotrofia estatura-ponderal de los niños, retardo en la aparición de la pubertad, adenitis, osteomielitis y osteoartritis psoriasis, acné, úlceras varicosas, secuelas de quemaduras, afecciones ginecológicas, afecciones del aparato circulatorio (pacientes sin hipertensión), trastornos funcionales ligados a distonias vegetativas, enfermedades psicósomáticas y estado de stress psíquico.	Balneación a temperatura variable, una vez al día, durante 3 a 4 semanas. Duración de cada sesión: de 5 a 7 minutos para niños y aumento gradual hasta 13 minutos. En adultos, de 10 a 15 minutos con aumento gradual hasta 20 ó 30 minutos. Otras técnicas de administración son aplicaciones locales, utilización de duchas y chorros, pulverizaciones, inhalaciones y aerosoles, lavados e irrigaciones.
Cloruradas	> 200 mg/l	Estimulan la secreción y la motilidad gástrica e intestinal, lo cual facilita la salida de la bilis al intestino y reduce la flora entérica y una vez absorbidas activan el metabolismo general	Ingestión
Sulfatadas	> 200 mg/l de sulfatos. Anión dominante sulfato, sódicas y magnésicas	Purgantes, laxante, acción colagoga (favorables en colecistopatías y colediscinesias), agentes hepatoprotectores (mejora la actividad de la célula hepática y estimula la actividad enzimática).	Ingestión, de 5 a 15 g como purgantes osmóticos salinos, 3 g como purgante y hasta 1 g como laxante.
Sulfatadas	> 200 mg/l de sulfatos. Anión dominante sulfato, Cálcicas	Acción sobre el equilibrio neurovegetativo (simpático), acción diurética (prevención de formaciones calculosas), procesos hepatobiliares (en tratamiento de migraña, colitis)	Ingestión
Sulfatadas	Con salinidad superior a 1g/l, el anión predominante es el sulfato	Enfermedades de la piel (psoriasis)	Tópico, Baños
Sulfuradas	Más de 1 mg de sulfuro	Desensibilizante, mejora respuestas anafilácticas y alérgicas (facilitan recuperación de rinitis, faringitis, sinusitis, laringitis, bronquitis, asma. Potencia la actividad de la insulina, acción eutrófica en el aparato respiratorio (mucosa), acción mucolítica mejoradora de la circulación local, antiinflamatoria, eutrófica y cicatrizantes. Tratamiento de psoriasis, afecciones reumatológicas	Absorbido por todas las vías. Puede atravesar la piel y las mucosas. Inhalaciones para problemas respiratorios (nebulizadores y aerosoles)

**Continuación Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,  
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994**

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Sulfuradas		Antitóxicas. Acción antiácida y antipéptica en el aparato digestivo, estimulante del peristaltismo.	Ingestión (dosis pequeñas)
Sulfuradas		Afecciones odonto-estomatológicas, tratamiento de manifestaciones edematosas. Procesos ginecológicos: mejora la vascularización y el trofismo tisular	Aplicaciones tópicas/irrigaciones, pulverizaciones
Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Bicarbonatadas	> 600 mg de bicarbonato	Generalmente utilizadas como agua de mesa. Neutralizantes de la acidez gástrica. Favorece la acción de los fermentos pancreáticos y el poder saponificante de la bilis. Tratamientos de gastritis primitivas, estados dispépticos, hernia hiatal.	Ingestión
Bicarbonatadas	Con salinidad superior a 1g/l, el anión predominante es el bicarbonato	Las aguas calientes de este tipo son utilizadas para reumatismos, neuralgias, dermatopatías, ginecopatías	Baños, duchas
Oligometálicas o indeterminadas	Salinidad inferior a 1g/l y temperatura por encima de 20°C = Acratotermas	Procesos álgicos y contracturantes de aparato locomotor, articulares o musculares, de origen reumático, traumático, distrófico, algias pelvianas, enterocolitis espasmódicas y álgicas, dermatosis crónicas pruriginiosas, gota articular.	Baños, duchas, chorros
Sódicas	> 200 mg/l de sodio	Poder hidratante, acción reguladora de los procesos de permeabilidad celular. Con el Ca, actual sobre el potencial de membrana, procesos enzimáticos (ya que actúa en equilibrio iónico). Mantiene la excitación neuromuscular	Ingestión
Cálcicas	> 150 mg/l de calcio	Funciones en los líquidos extracelulares, esencial para la actividad normal del sistema nervioso, corazón, musculatura vascular, coagulación de la sangre, equilibrio electrolítico, osificación.	Ingestión
Magnésicas	> 50 mg/l de magnesio	Indispensable para mantener la integridad neuromuscular. Depresor del sistema nervioso, activador de varios sistemas enzimáticos	Ingestión
Potásicas		Mantenimiento del equilibrio iónico. Indispensable como catión intracelular. Contribuye a mantener el potencial negativo de la célula, el tono muscular y las actividades del sistema nervioso vegetativo.	Ingestión
Ferrosas	> 1 mg/l de hierro II	Estimulantes de la hematopoyesis y de las oxidaciones tisulares	
Silíceas	>50 mg/l de H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Flexibiliza, elastiza la piel, alivia la esclerodermia (endurecimiento de la piel)	Tópico, baños

Continuación Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,  
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Silíceas		Combatir algunas enfermedades gástricas como úlceras, gastritis, caries	Ingestión
Radioactivas		Sedantes, analgésicas, reguladoras de equilibrio neurovegetativo	Tópico, baños
Débilmente mineralizadas	Hasta 1000 mg/l de residuo seco	Diuréticas (en tratamiento de litiasis, infecciones urinarias y ciertas nefropatías), facilitan la eliminación de orina, catabolitos, arenillas y pequeños litos	Ingestión
Temperatura	Acción biológica de aguas termales		
30-34	Estimulantes. Mejoradores de la circulación de órganos internos. Activadores de cambios metabólicos. Vasoconstrictores		
35-37	Sedantes		
37 - 50 (1)	Revulsivos y resolutivos: Combatir contracciones e hipertonia muscular		
(1) Por encima de 50°C, se registran quemaduras de la piel	50° se registran quemaduras en la piel		
Rango (°C)	Tipo de manantial		
Hasta 20	Frías		
20-30	Hipotermiales		
30-50	Mesotermiales		
>50	Hipertermiales		

Entre los 32 manantiales distribuidos en todos los grupos, solamente tres pueden considerarse minerales, con contenido superior a 1 g/l. Estos, con composición y propiedades diferentes, relacionadas con el sistema digestivo y el metabolismo, son: El Aserradero (Grupo 1), Santa Helena (Grupo 6) y el manantial No. 11 en el río Toche (Grupo 9).

El Aserradero es un manantial bicarbonatado sódico. Este tipo de agua se utiliza como neutralizante de la acidez gástrica y en otras funciones del sistema digestivo indicadas en la Tabla 4. Por su contenido en sodio, tiene propiedades hidratantes y acción reguladora de los procesos de permeabilidad celular.

El manantial Santa Helena, de mineralización fuerte por su contenido de sólidos disueltos superior a 1.500 mg/l, se clasifica como clorurado, bicarbonatado, sódico y cálcico. Además de las propiedades gástricas e hidratantes que le confieren su contenido de bicarbonato y sodio, por su carácter clorurado, el agua de este manantial podría ser utilizado como estimulante de la secreción y motilidad gástrica e intestinal, para facilitar la salida de la bilis al intestino y reducir la flora entérica y, una vez absorbidas, activar el metabolismo general. Adicionalmente, debido a su composición cálcica, el agua de este manantial podría aprovecharse para mantener la excitación neuromuscular, para favorecer la osificación y en procesos enzimáticos, junto con el sodio (Tabla 4).

El manantial 11 en el río Toche es bicarbonatado cálcico, magnésico. Además de las propiedades derivadas de la naturaleza bicarbonatada y cálcica de este manantial, su contenido de magnesio le atribuye beneficios en el mantenimiento de la integridad neuromuscular y en la activación de varios sistemas enzimáticos.

Los 29 manantiales restantes, que corresponden a El Jordán II, El Retiro, Río Aguacatal y

Ventiladeros (La Calera), del Grupo 1; las dos fuentes frías del área de Aguas Calientes, La Hacienda Nieto y Arenales, del Grupo 2; Murillo del Grupo 3; La Poa del Grupo 4; La Telaraña, Papayal, El Pino, Pozo del Perro, Fonda Santa Rita y Cristalina Alta, del Grupo 5; San Vicente III, Peñaranda Río San Eugenio, El Cortijo III y la Quebrada La Piscina, del Grupo 6; manantial 4, 7 (La Florida), Romerales 8 y 9 y 15, del Grupo 8, y los manantiales 1, 10, 15 y 16, del Grupo 9, son de mineralización débil y muy débil, y, como tales, podrían ser utilizadas como diuréticas (en tratamiento de litiasis, infecciones urinarias y ciertas nefropatías). Éstas facilitan la eliminación de orina, catabolitos, arenillas y pequeños litos.

Los tres manantiales minerales y algunos de los de mineralización débil son, además, silíceos, de donde se deriva la posibilidad adicional de utilizarlos para combatir algunas enfermedades como úlceras, gastritis y caries.

## 4 CONCLUSIONES

**4.1** Los sistemas hidrotermales asociados al Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, se evidencian en la superficie a través de la ocurrencia de por lo menos 74 manantiales de agua termal, 27 de los cuales son de agua caliente (con temperatura superior a 50°C). Las temperaturas de descarga más elevadas (ebullición) se encuentran en manantiales de los Grupos 4 (Nevado del Ruiz, sector occidental), 6 (Santa Rosa de Cabal) y 9 (Volcán Cerro Machín).

**4.2** La interacción entre los sistemas volcánico-magmático e hidrotermal asociados al Nevado del Ruiz se refleja en la composición sulfatada - clorurada ácida de los manantiales Hotel Termales y Aguas Calientes (Grupo 2), que alcanzan pHs extremos de 1,6 y 1,3, respectivamente.

**4.3** En los volcanes Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima se pueden postular zonas de ebullición del fluido geotérmico, a partir de los manantiales termales sulfatados ácidos. En el Nevado del Ruiz la zona de ebullición esta señalada en superficie por los manantiales del Grupo 2, que son los más cercanos al cráter volcánico (y por una fumarola hidrotermal - Las Nereidas - entre el límite de los Grupos 1 y 2), mientras que el agua geotérmica (clorurada neutra), como propuso Giggenschbach, 1990, fluye en dirección occidental. En el Nevado del Tolima, la zona de ebullición está localizada al nororiente del volcán y el agua geotérmica parece fluir en dirección sur, como sugiere el incremento en la concentración relativa de cloruros.

**4.4** Los manantiales termales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín están asociados a sistemas hidrotermales de temperatura intermedia (entre 125 y 225°C) y alta (>225°C). Los sistemas de temperatura intermedia se identifican en los Grupos 3 (al oriente del Nevado del Ruiz), 5 (área de Santo Domingo) y 8 (Área del Nevado del Tolima). Los sistemas de temperatura alta están indicados por los Grupos 1 (Área del Volcán Cerro Bravo), 4 (Zona occidental del Nevado del Ruiz), 6 (Zona de Santa Rosa de Cabal) y 9 (Área del Volcán Cerro Machín), de los cuales el de Santa Rosa de Cabal parece ser el de mayor temperatura (hasta 310°C).

**4.5** El sistema geotérmico del área de Santa Rosa de Cabal podría ser un sistema independiente del Nevado del Ruiz, como sugieren las temperaturas geoquímicas estimadas. En este sistema, que sería de mayor temperatura, la diferencia en composición de las dos áreas termales (Santa Rosa y San Vicente), se explica por dilución del agua de reservorio geotérmico con alto contenido en sílice y enriquecimiento en bicarbonato a medida que la dilución ocurre, en el área de Santa Rosa, y por ebullición isoentálpica, no necesariamente a partir del agua del reservorio, con el con-

secuente incremento en la concentración de cloruros, en el área de San Vicente la fuente de calor de este sistema podría estar asociada a cuerpos magmáticos del Paramillo de Santa Rosa, aunque no a su último evento eruptivo, cuya ocurrencia ha sido estimada como muy antigua (CHEC et al., 1983).

**4.6** El desarrollo social y económico, y en consecuencia la calidad de vida de las comunidades locales y del país, podrían reforzarse en el aprovechamiento de los recursos geotérmicos que ocurren en la zona del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín, el cual es muy amplio y suficiente aún para los usos de máximo requerimiento energético (generación eléctrica). Considerando la facilidad de implementación de los diferentes desarrollos geotérmicos posibles, las aplicaciones de uso directo como sistemas de calefacción (residencial y en invernaderos), cría de animales, calentamiento del suelo agrícola, cría de peces y los usos mineromedicinales, son las más viables.

**4.7** Los usos de los manantiales en balnearios, implementados desde hace varias décadas en algunos manantiales de la zona, principalmente para fines recreativos, tienen múltiples posibilidades específicas derivadas de la diferencia en temperatura y composición de estos manantiales. Aquí se plantean usos posibles de acuerdo con clasificaciones médicas.

## 5. RECOMENDACIONES

**5.1** Actualizar la caracterización química de los manantiales y evaluar su estabilidad en el tiempo.

**5.2** Dar continuidad a los programas de exploración hasta las fases de perforación, para establecer la existencia de reservorios, sus

dimensiones, características de recarga, temperatura y composición.

**5.3** Ampliar la caracterización de los manantiales con potencial para usos mineromedicinales, a especies químicas y microorganismos contaminantes e integrar la investigación médica para hacer posible la implementación de balnearios especializados y la optimización de los ya existentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, C. 2000. Mapa Geotérmico Versión 1.0. Escala a:1'500.000. INGEOMINAS. Memoria Explicativa. 41 p. Bogotá. No publicado.
- Alfaro, C, Jaramillo, L.F. 2002. Inventario y geoquímica de las fuentes termales de Santa Rosa de Cabal (Risaralda). INGEOMINAS. Informe Técnico, 26 p. Bogotá
- Alfaro, C.; Aguirre, A., Jaramillo, L.F. 2002. Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados. INGEOMINAS. Informe Técnico, 101 p. Bogotá
- Arnorsson, S. 2000. Mixing Process in Upflow Zones and Mixing Models. En: Arnorsson, S. (ed.). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. IAEA. 200-211. Viena
- Arango, E.; Buitrago, J.; Cataldi, R.; Ferrara, G.C.; Panichi, C. and Villegas, V. 1970. Preliminary Study on the Ruiz Geothermal Project (Colombia). Geothermics. Spe. Iss. 2. pp 43-44.
- Armijo, M.; San Martín J. 1994. Curas balnearias y climáticas. Talasoterapia y Helioterapia. Editorial Complutense. 688 p. España.
- Calvache, M. y Monsalve, M.L. 1982. Geología, Petrografía y Análisis de Xenolitos en el Área A (Zona de Manizales) del Proyecto Geotérmico en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias. Tesis de Grado. Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Sección Geotermia, 118 p. Manizales.
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y Ente Nazionale per L'energia Elettrica (ENEL). 1968. Proyecto de Investigación Geotérmica en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Translation. 41 p. Manizales
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). 1979. Investigación geotérmica en la región del Macizo Volcánico del Ruiz (Colombia), Fase I, Programa de Trabajo. 47 p. Colombia.
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC); Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL); Consultoría Técnica Colombiana LTDA. (CONTECOL) y Geotérmica Italiana. 1983. Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A. Vol. I, II, III y IV. Bogotá.
- Fetzer, W.G. 1941. Fuentes Minerales y Yacimientos de Carbonato de Calcio de Santa Rosa de Cabal (Río San Ramón). Servicio Geológico Nacional, Compilación de los Estudios Geológicos de Colombia, Tomo VI, págs. 433-454. Bogotá.
- Forero, H. 1958. Fuentes Termales de Colombia. Investigación de Geología Económica. Servicio Geológico Nacional. 274 p. Bogotá.
- Garzón, G. 2001. Catálogo de fuentes termales del Parque Nacional Natural de los Nevados. INGEOMINAS. Informe Técnico. 105 p. Manizales
- Geocónsul, S.A. de C.V. 1992. Evaluación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz. Informe Final. Preparado para Constructora y

- Perforadora Latina, S.A. de C.V. 57p. Morelia (Mexico)
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 2749-2765. U.S.A.
- Giggenbach, W. F. & Goguel, R. L. 1989. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Report No. CD 2401. Fourth Edition. Department of Scientific and Industrial Research. 81 p. Petone, New Zealand.
- Giggenbach, W. F.; García, N.; Londoño, A., Rodríguez, L.V., Rojas S, N.; Calvache, M. L. 1990. The Chemistry of fumarolic vapor and thermal-springs discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 42: 13-39. Netherlands.
- Giggenbach, W. F. 1991. Chemical Techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. 119-142. Rome.
- GilCruz, F., Ramirez, J y Alfaro, C. 1998. Evaluación sísmológica, glaciológica y geoquímica del Volcán Nevado del Tolima. Información de Abril de 1998. INGEOMINAS. Informe Técnico, 61 p. Bogotá
- INGEOMINAS. 1994. Informe de Vigilancia de la Actividad Volcánica del Complejo volcánico Cerro Bravo – Machín.
- INGEOMINAS, 1995. Boletín Semestral Actividad de los volcanes colombianos. Vol. 1. No. 1. 89 p. Bogotá
- INGEOMINAS, 1996 y 1997. Tablas de datos de monitoreo de manantiales termales. Proyecto de Vigilancia de volcanes del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Machín. Unidad Operativa Manizales. Grupo de Geoquímica. Manizales.
- Jaramillo, L.F. 2001. Informe de Inventario de Fuentes Termales en la Zona de Santa Rosa de Cabal (Departamento de Risaralda), Sector Occidental del Parque Nacional Natural Los Nevados. INGEOMINAS, Informe inédito, 13 p. Bogotá.
- Koga, A. 2000. Hydrothermal geochemistry. Handout from the First Group Training Course on Geothermal Energy and Environmental Sciences. Kyushu University. 26 p. Japan.
- Larios, D. A. 1992. The hidrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Tesis Doctoral. Louisiana State University. 296 p. Louisiana.
- Lund, J. W. 1999. En Popovski, K.; Luna, J.W.; Gibson, D.J.; Boyd, T.L. (Ed). *Direct Utilization of Geothermal Energy*. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology. 5-18. Klamath Falls.
- Monsalve, M.L.; Rodríguez, G.I.; Méndez, R.A. and Bernal, N.F. 1998. Geology of the well Nereidas 1, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Geothermal Resources Council Transactions*. Vol 22, p 263 – 267
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Springer Verlag. 263. Germany.
- Simmons, S. 1997. Overview of the chemistry of geothermal fluids. *Geochemistry Lecture Handout*. Geothermal Institute. The University of Auckland. 12 pp
- Sturchio, N.C. ; Williams, S.N., García, P., N.; Londoño, C., A. 1988. The hydrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Bull. Volcanol.*, 50: 399-412.

## NORMAS PARA PUBLICACIÓN DE ARTICULOS CIENTÍFICOS

Los autores interesados en que se incluyan sus documentos en alguna de las publicaciones del Instituto, ya sean ellos funcionarios de la entidad o autores externos, se registrarán por las siguientes normas editoriales

Corresponder a investigaciones relacionadas a los campos de las geociencias, minería, química, aspectos nucleares y ambientales

Los documentos a publicar deberán pertenecer a las siguientes categorías:

Artículo de investigación científica y tecnológica  
Artículo de reflexión  
Artículo de revisión  
Reporte de caso  
Traducción (idiomas diferentes al inglés)

Para el BOLETÍN GEOLÓGICO Los artículos no deben exceder de treinta (30) páginas en tamaño carta, a una sola columna y a doble espacio, con márgenes de 2.5 cm, incluyendo tablas, fotografías, diagramas, imágenes y figuras

Para las PUBLICACIONES ESPECIALES DEL INGEOMINAS; Los artículos no están restringidos a un máximo de páginas, el formato es en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes de 2,5 cm, incluyendo tablas y figuras, fotografías, diagramas e imágenes

El título del artículo debe estar en español y en inglés; ser breve (no mayor de veinte (20) palabras), conciso y reflejará la esencia de la investigación.

Se aceptan trabajos en español o inglés.

Todos los trabajos deben contener resumen, Abstract, tabla de contenido, palabras de búsqueda,

quedará, keywords, conclusiones y referencias bibliográficas

El texto debe estar escrito en procesador de palabras WORD, en letra Times New Roman de 12 puntos. Se debe acompañar el artículo con un resumen en español y uno en inglés (abstract), no mayores de trescientas (300) palabras, con una lista de palabras clave en español e inglés (keywords), que serán en número mínimo de cuatro (4) Estas palabras clave se escribirán en el mismo orden, tanto en inglés como en español.

En la primera página del trabajo deberá incluirse el título del mismo en español e inglés. Posteriormente el(los) nombre(s) del (los) autor(es), su filiación, la dirección de envío de correspondencia y sus correos electrónicos. Para señalar filiaciones diferentes, deben utilizarse los superíndices de la siguiente manera:

Roberto Terraza <sup>1</sup>

Nadejda Tchegliakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INGEOMINAS, Diagonal 53 No. 34-53, Bogotá D.C., Colombia

E-mail: rterraz@ingeominas.gov.co

<sup>2</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 14490, Bogotá D.C.

E-mail: ntchegliacovan@unal.edu.co

Los autores deben relacionar sus nombres de acuerdo con el siguiente orden: Primer nombre, segundo nombre o inicial de este y apellido(s); seguido de punto y coma y así con los demás autores

*Resumen* Una vez consignada esta información, seguirá el resumen en español, las palabras claves, el resumen en inglés y sus respectivas palabras claves (keywords). Luego continuará el texto del artículo, subdividido en secciones como Introducción, Metodología, Resultados, Conclusiones, Agradecimientos y Bibliografía. Las páginas del trabajo irán

numeradas en la esquina superior derecha de cada hoja respectiva.

*Citas:* En el texto, las citas se organizarán de manera cronológica y tendrán los siguientes formatos: cuando se citan trabajos de un mismo autor, se ordenan cronológicamente separados por comas: (Velandia, 1997, 2001, 2002); cuando se citan trabajos de varios autores, se ordenan de forma cronológica separados por puntos y comas: (Vergara, 1996; Chorowicz et al., 1996); cuando un trabajo tenga más de dos (2) autores, se citará con la abreviación "et al.", por ejemplo: (Naylor et al., 1986). En la bibliografía deberán reseñarse la totalidad de los autores. En el texto no se admiten notas al pie de página.

*Referencias bibliográficas:* Para un artículo incluido en una publicación seriada: Autor(es), (apellido(s), nombre(s)) año de publicación, título del artículo, nombre de la publicación, volumen y número, páginas, ciudad donde se publicó. Ejemplo: Bürgl, H.. 1981. Sedimentación Cíclica en el Geosinclinal Cretáceo de la Cordillera Oriental de Colombia. Boletín Geológico INGEOMINAS, Vol. 7 (1 - 3): 85-118. Bogotá.

*Para libros:* Autor(es), (apellido(s), nombre(s)), año de publicación, título, institución o casa editorial, ciudad, número de páginas. Ejemplo: Maynard, J.B., 1983. Geochemistry of Sedimentary Ore Deposits. Springer - Verlag. Nueva York. 305 p.

*Para congresos, seminarios, etc.:* Autor(es), (apellido(s), nombre(s)), año del evento. Título del trabajo, nombre del evento, nombre de la publicación, páginas, ciudad. Ejemplo: Duque-Caro, H., 1972. The geology of Montecaría area. 14th. Annual Conference. Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. Guidebook. p.397 - 431. Bogotá.

*Para mapas:* Autor(es), (apellido(s), nombre(s)), año de publicación, título, esca-

la, institución o casa editorial. Ejemplo: Behrendt, J.C. and Bajwa, L.Y., 1972. Bouguer gravity map of Colorado. Scale 1:500.000. U.S. Geological Survey.

Para otros casos no indicados aquí, se deben seguir normas internacionales.

*Tablas:* Las tablas deben procesarse en WORD y en un archivo aparte del texto; si esto no es posible se presentarán en EXCEL. La leyenda de las mismas deberá ir en la parte inferior, y no deben exceder el tamaño carta.

*Figuras:* Las fotografías, figuras y mapas deben haber sido generadas o escaneadas a una resolución mínima de 300 dpi. Cada figura, esquema o fotografía no debe exceder el tamaño carta, será citada en el texto y se acompañará de una leyenda explicativa y concisa, que incluye el crédito de quien la generó. Para el caso de figuras creadas por el autor o autores del trabajo, el crédito se consigna como una cita bibliográfica, por ejemplo: Fig. 1. Mapa de Localización (Gonzalez, 2006). Cuando se toma material visual de artículos ya publicados, se da crédito de la siguiente manera: Fig. 9. Mapa de espesores del Abanico del Quindío a partir de modelos gravimétricos y magnetométricos (modificado de Vargas et al., 2005).

Es posible presentar algunos mapas al doble del tamaño carta. Las leyendas de estos y las anotaciones de las fotografías o cualquier otro tipo de imagen (de satélite por ejemplo), necesariamente tendrán que sufrir algún tipo de reducción que afectará las líneas, achurados y leyendas. Tamaños de letras menores de ocho (8) puntos o grosores de líneas menores de 0.25 mm no aceptan reducción alguna.

*Los mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite* deben incluir siempre una escala gráfica. Cuando se incluyan cifras, si son decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto (.); los millares y millones se separarán

---

con punto. Para la remisión del trabajo en formato análogo, las figuras deben imprimirse en forma nítida. Las fotografías aéreas, las fotografías convencionales y las imágenes de satélite, sea que estén en color o blanco y negro, deben estar muy bien contrastadas.

*Las leyendas* de las figuras irán en hoja aparte. Cada figura estará impresa en una hoja tamaño carta, su número consecutivo se anotará con lápiz en la esquina superior derecha. Remisión de artículos: Si el trabajo es aceptado para publicación, el autor o autores tendrán que enviar la versión definitiva del mismo en formato digital, que debe incluir las correcciones sugeridas por el Comité Editorial y los especialistas asignados por el mismo. Los archivos de texto deben estar en WORD y los gráficos en formatos TIFF ó JPG; todo almacenado en CD ROM.

*El texto* debe ser enviado al Secretario del Comité Editorial con su solicitud de publicación y debe enviarse en papel, acompañado de disquete o Disco Compacto.

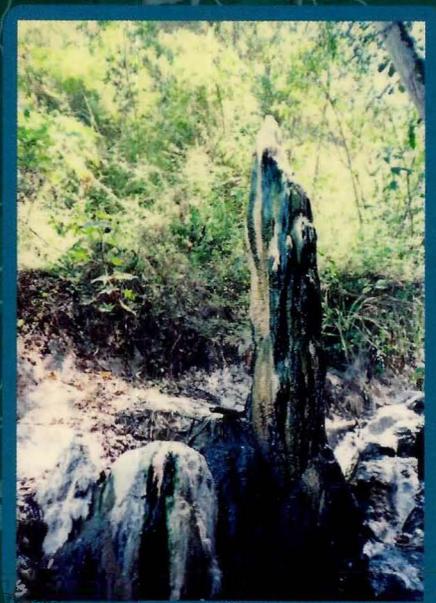
*El autor* debe suministrar dirección postal, correo electrónico y teléfono.

Para autores externos, además de las anteriores, deben incluir el nombre de la institución donde labora, cargo o función que desempeña y fax

El texto debe ser enviado en versión impresa y digital al Comité Editorial de INGEOMINAS, a la siguiente dirección: Diagonal 53 No. 34-53, Bogotá – Colombia

ISSN-0120-1425

Boletín  
**Geológico**



Termals de las Estatuas, quebrada Agua Caliente, cerro Machin



Localización del área ubicada al noroccidente del Departamento del Cesar, entre el municipio de Valledupar por el sur y aproximadamente los límites departamentales del Cesar y la Guajira.



Libertad y Orden

**INGEOMINAS**

Instituto Colombiano de Geología y Minería

Ministerio de Minas y Energía

República de Colombia