


Contribuciones geológicas al modelo conceptual geotérmico en la región de los volcanes Chiles - Cerro Negro (Colombia-Ecuador)

Yohanna K. García¹; John J. Sánchez^{2*}

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019008> 

Forma de citar: García, Y.K., y Sánchez, J.J. (2019). Contribuciones geológicas al modelo conceptual geotérmico en la región de los volcanes Chiles - Cerro Negro (Colombia-Ecuador). *Boletín de Geología*, 41(1), 151-171. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019008

RESUMEN

Se refina el modelo conceptual geotérmico del área del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro (CVCCN), mediante la inclusión de detalles litológicos, geotécnicos y del sistema hidrológico. Se visitaron 21 sitios en su mayoría ubicados dentro del área de interés del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño Chiles - Cerro Negro. La petrografía y clasificación geoquímica se realizaron para cuatro muestras utilizando los diagramas K_2O vs SiO_2 , $SiO_2 - FeO/MgO$, AFM y $Na_2O + K_2O$ vs SiO_2 . La clasificación geotécnica de cinco sitios siguió el procedimiento del sistema de clasificación de macizos rocosos (*RMR - Rock Mass Rating*). Se encontró que la litología varía entre rocas duras (lavas andesíticas y dacíticas) y depósitos de naturaleza variable incluyendo derrubios, till, lahares y flujos piroclásticos. Los parámetros geotécnicos de los macizos rocosos presentan los siguientes rangos y valores medios: $90 \leq \%RQD \leq 96$; $52 \leq RMR \leq 77$; $8,89 \leq \sigma_{cm} \leq 35,67$; y $-1,13 \leq \sigma_{tm} \leq -0,11$; $RQD_{mediana} = 92\%$; $RMR_{mediana} = 69\%$; $\sigma_{cm-mediana} = 22,87$ MPa; y $\sigma_{tm-mediana} = -0,494$ MPa. Se estima que la porosidad y la permeabilidad en el área de estudio son moderadas a altas. Se concluye que la variabilidad litológica y estructural influyen la permeabilidad regional y local y que en general se favorece la circulación de fluidos acuosos entre las áreas de recarga y descarga del sistema geotérmico.

Palabras clave: Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro; sistema geotérmico; modelo geotérmico conceptual.

Geological contributions to the conceptual geothermal model in the region of the volcanoes Chiles – Cerro Negro (Colombia-Ecuador)

ABSTRACT

A preliminary conceptual geothermal model for the Chiles-Cerro Negro Volcanic Complex (CCNVC) is refined through the addition of details related to lithology, geotechnical properties, and hydrology of the system. A total of 21 sites were visited, mostly located within the area of the Tufiño-Chiles-Cerro Negro Binational Geothermal Project. The petrography and geochemical classification were obtained for four samples using the K_2O vs SiO_2 , $SiO_2 - FeO/MgO$, AFM and $Na_2O + K_2O$ vs SiO_2 diagrams. The geotechnical classification of five sites followed the Rock Mass Rating-RMR system. Lithology varies between hard rocks (andesite and dacite lavas) and unconsolidated deposits of variable nature, including talus, till, lahars and pyroclastic flows. The geotechnical parameters of rock masses vary in the following ranges and have median values: $90 \leq \%RQD \leq 96$; $52 \leq RMR \leq 77$; $8.89 \leq \sigma_{cm} \leq 35.67$; and $-1.13 \leq \sigma_{tm} \leq -0.11$; $RQD_{median} = 92\%$; $RMR_{median} = 69\%$; $\sigma_{cm-mediana} = 22.87$ MPa; and $\sigma_{tm-mediana} = -0.494$ MPa. The porosity and permeability of the study area exhibit moderate to high values. It is concluded that the varying lithology and structures influence the regional and local permeability, which favors circulation of aqueous fluids between the recharge and discharge areas of the geothermal system.

Keywords: Chiles-Cerro Negro Volcanic Complex; geothermal system; conceptual geothermal model.

¹ Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ykgarciaz@unal.edu.co

² Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. (*) jjsanchezag@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro (CVCCN) se ubica cerca al Municipio de Cumbal (Departamento de Nariño), en la frontera con Ecuador a 80 km al SW de San Juan de Pasto en las coordenadas 0,82°N y 77,93°W (volcán Chiles, VC) y 0,82°N – 77,95°W (Volcán Cerro Negro, VCN) (FIGURA 1). El sistema geotérmico Tufiño-Chiles-Cerro Negro, que incluye el CVCCN, es compartido con el vecino país Ecuador y reviste especial interés, entre otros aspectos, por el promisorio potencial de energía eléctrica en una

planta planeada con capacidad instalada en exceso de 130 MW (Mejía *et al.*, 2014), que haría parte de colaboración entre las dos naciones en el marco del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro. En este trabajo se presentan resultados de: 1) exploración geológica superficial en el CVCCN para estudiar unidades litológicas; 2) análisis de estructuras geológicas, y 3) reconocimiento de manifestaciones hidrotermales y manantiales, con el objetivo de contribuir al refinamiento del modelo geotérmico conceptual de este sistema.

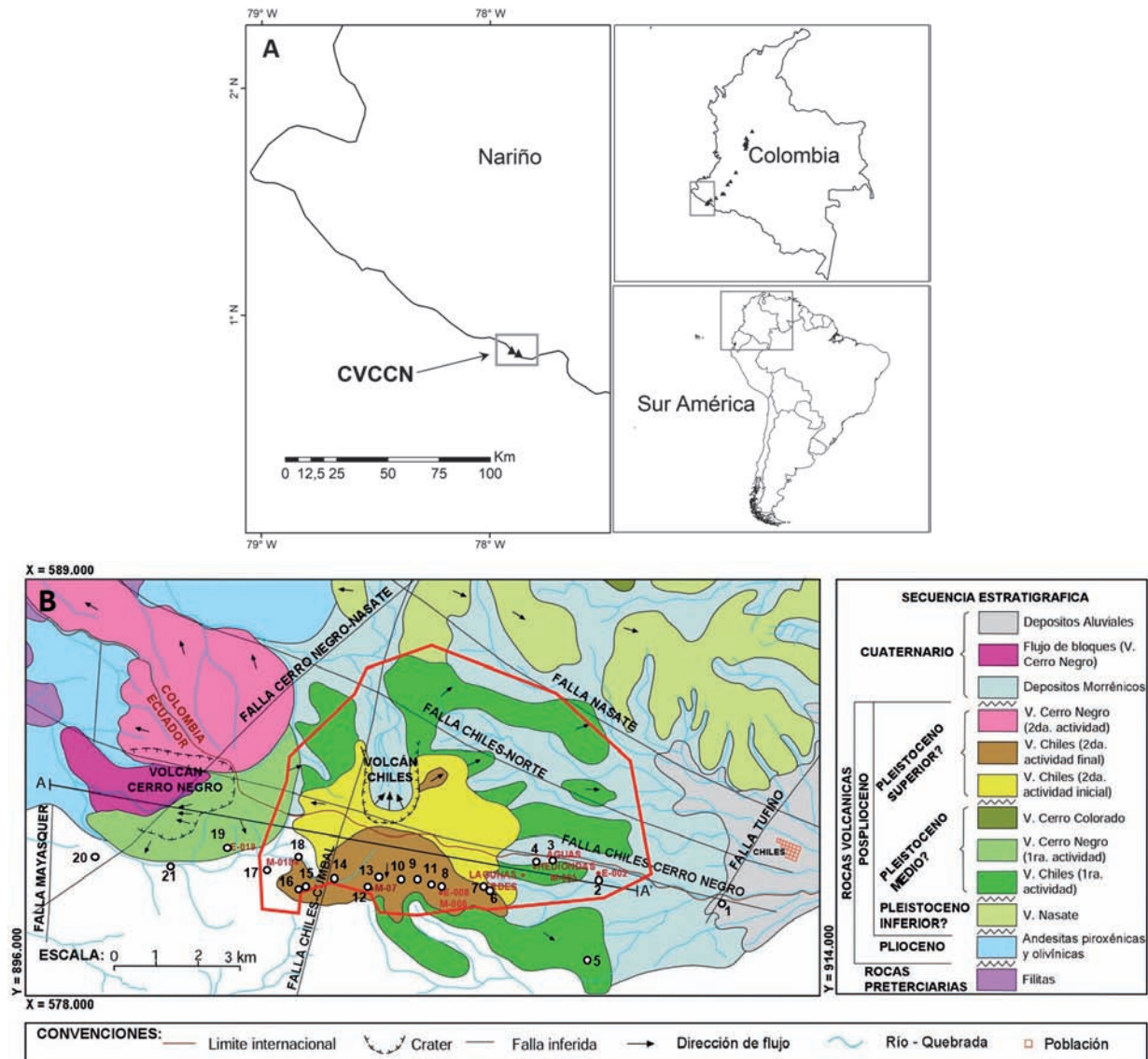


FIGURA 1. A. Mapa de localización con la ubicación del área de estudio (CVCCN). Triángulos negros: volcanes activos. **B.** Mapa geológico simplificado (modificado de Perdomo *et al.*, 1986) de la región de los volcanes VC y VCN. Círculos negros numerados: Estaciones de Campo (García, 2016). Puntos rojos: Ubicación de manantiales (E-002, E-008, E019) y fuentes termales (Aguas Hediondas y Lagunas Verdes) y sitios de muestras con análisis petrográfico y químico (M-005, M-006, M-007 y M-008). Polígono rojo: Área de interés del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño Chiles Cerro Negro. Línea A-A': Dirección y extensión del perfil geológico mostrado en la FIGURA 8.

La energía geotérmica es el calor que proviene del interior terrestre e impulsa fenómenos geológicos a escala global. En la actualidad, sin embargo, el término “energía geotérmica” se usa para referirse a aquella parte del calor terrestre que puede ser recuperada y explotada. Los recursos del calor geotérmico no están distribuidos uniformemente en el planeta, ya que son característicos de regiones flujo de calor elevado y circulación de fluidos, típicamente a lo largo de límites de placas litosféricas. Así es entendible que, por ejemplo, los mayores productores de electricidad derivada de energía geotérmica están en regiones de volcanismo activo. Un sistema geotérmico incluye tres rasgos principales: la fuente de calor, el reservorio y el fluido, que es el agente que transporta el calor. La fuente de calor puede ser una intrusión magmática superficial (5 km -10 km) con temperaturas periféricas de 600°C o puede ser una región con flujo de calor proveniente del gradiente geotérmico, que aumenta con la profundidad. El reservorio es un volumen de rocas permeables desde las cuales los fluidos en circulación extraen el calor y que en muchos casos está relacionado con un área superficial de recarga que reemplaza parcial o totalmente la descarga natural del sistema que ocurre a través de manantiales o fuentes termales. El fluido geotérmico es el agua, en la mayoría de los casos agua meteórica, en fase líquida o vapor que con frecuencia contiene compuestos disueltos (Dickson y Fanelli, 1995).

Los sistemas geotérmicos se han clasificado en cinco categorías de acuerdo a criterios geológicos,

geofísicos, hidrológicos, e ingenieriles: 1) Sistemas ígneos jóvenes asociados con volcanismo cuaternario e intrusiones; 2) sistemas tectónicos en los cuales hay flujo de calor elevado sin actividad ígnea; 3) sistemas geopresurizados encontrados principalmente en cuencas sedimentarias; 4) sistemas de roca seca y caliente relacionados a calor almacenado en rocas impermeables de baja porosidad, y 5) sistemas de aprovechamiento de magma que involucran perforación en cuerpos magmáticos superficiales (Goff y Janik, 2000). Un aspecto clave en la exploración, desarrollo, y utilización de cualquier tipo de sistema geotérmico es la clara definición y entendimiento de su naturaleza y características, lo cual se logra óptimamente a través de la construcción de un modelo conceptual para el sistema de interés. Un modelo conceptual geotérmico es una idea descriptiva o cualitativa que incorpora los rasgos esenciales del sistema (FIGURA 2). Los modelos conceptuales geotérmicos se construyen con base en el análisis de información geológica y geofísica, datos de temperaturas y presiones, información sobre las propiedades del reservorio e información sobre la dinámica y química de los fluidos (Axelsson, 2013).

Actualmente en Colombia se desarrollan investigaciones con diferentes estados de avance en cinco áreas estratégicas con sistemas geotérmicos: 1) Volcán Nevado del Ruiz, 2) Sistema geotérmico Tufiño-Chiles-Cerro Negro; 3) Área geotérmica de Paipa; 4) Volcán Azufral, y 5) Área geotérmica San Diego (Alfaro, 2015).

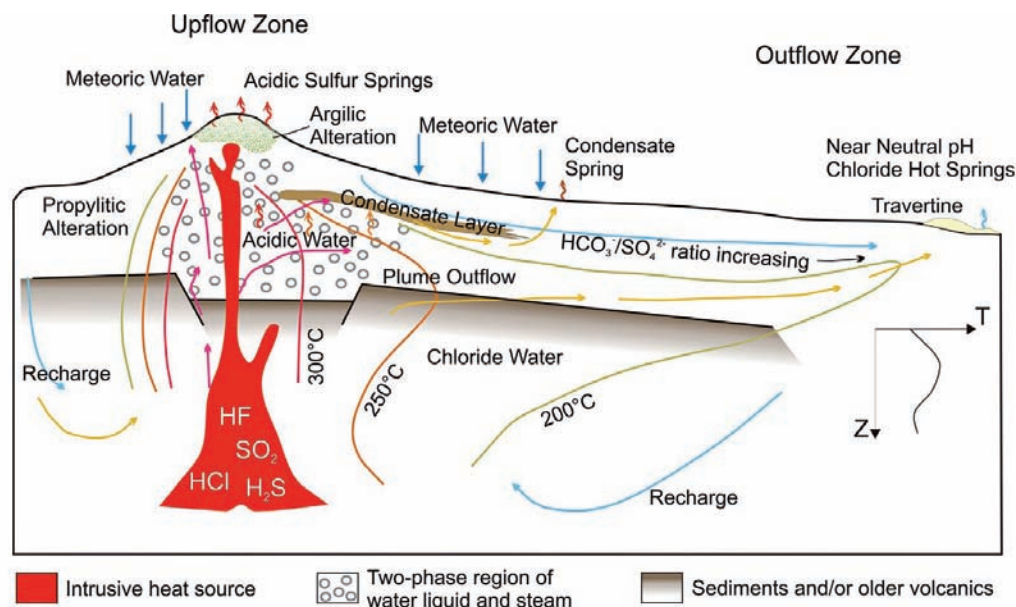


FIGURA 2. Esquema de un sistema geotérmico idealizado relacionado a un campo activo típico de arco volcánico. Tomado de Moeck (2014).

TRABAJOS ANTERIORES Y CONOCIMIENTO ACTUAL DE LA GEOLOGÍA Y GEOTERMIA DEL CVCCN

Regionalmente, la geología del CVCCN incluye rocas de los grupos de edad cretácica Dagua y Diabásico (Nelson, 1962) en la base y productos de efusiones y explosiones de varios volcanes al techo, con edad aproximada Pleistoceno Inferior para productos del VC (Pinilla *et al.*, 2008). Con base en dataciones de ~194,000 años

para las lavas más antiguas del volcán Cumbal (Gorman, 1997), argumenta que debido a la avanzada incisión del VC y su perfil de meteorización (en relación al volcán Cumbal), la base del VC debe ser más antigua que la del volcán Cumbal. En particular, el VC se encuentra en la intersección de la Falla Chiles-Cerro Negro con la Falla Chiles-Cumbal. Los afloramientos de la zona fueron caracterizados como pequeños, poco continuos y con alto grado de meteorización (Velásquez y Parra, 2002). La TABLA 1 resume los rasgos principales de ambas unidades.

TABLA 1. Resumen de rasgos principales de la geología regional del CVCCN. Modificado de Velásquez y Parra (2002).

Unidades basales	
Grupo Dagua (Nelson, 1962)	Dos unidades: (1) Arcillolitas y areniscas de colores negros a grises, con ocasionales estratos gruesos de conglomerados; (2) Limolitas silíceas de colores grises y verdes asociadas a tobas volcánicas básicas y chert.
Grupo Diabásico (Nelson, 1962)	Basaltos y diabasas de color verde, masivas, solamente en las últimas se distinguen algunos cristales milimétricos de piroxeno.
Episodios efusivos y piroclásticos	
Andesitas del Cumbal moderno	Lavas andesíticas de textura porfírica con plagioclasas, piroxenos y fragmentos de rocas andesíticas con olivino.
Depósito de avalancha (¿?) de escombros	Depósito de colapso del edificio volcánico, bloques y cantos en matriz arenosa.
Andesitas del VC	Lavas andesíticas masivas compuestas principalmente por plagioclasas y piroxenos.
Andesitas del VCN	Depósitos piroclásticos de obsidiana, pómez y ceniza. Lavas andesíticas con textura cordada y en bloques.

Los volcanes del CVCCN han presentado cada uno dos etapas de actividad similares, separadas por discordancias menores de acción glaciario. La primera etapa, incluyó la emisión de lavas predominantemente andesíticas piroxénicas y en la segunda se emplazaron lavas con claras estructuras de flujo y de composición dacítica. De acuerdo al estado de conservación de los edificios volcánicos y de sus productos se ha sugerido que el volcanismo del sistema Chiles-Cerro Negro inició en el Plioceno y ha continuado hasta el presente, alternando con algunos episodios de calma (Perdomo *et al.*, 1986). La actividad predominantemente efusiva del VC ha sido caracterizada como una secuencia de seis episodios (Cortés y Calvache, 1996), del más antiguo al más reciente: 1) Cordones de lava andesítica con grado bajo-medio de alteración, 2) Cordones de lavas dacíticas, 3) Franja de lava alargada en dirección S78°E de composición dacítica, 4) Lavas cordadas con dirección S72°E de composición dacítica, 5) Lavas andesíticas con apariencia columnar alargadas en dirección N50°E, y 6) Flujos cortos de lavas dacíticas y andesíticas. De otra parte, el edificio volcánico del VCN es una secuencia de flujos de lava y flujos piroclásticos emplazados en 5 episodios (Cortés y Calvache, 1996), que del más antiguo al más reciente son: 1) lavas de composición andesítica, 2) flujo de lava en bloques de composición dacítica, 3) depósitos

de flujo piroclástico, con clastos de composición dacítica, 4) flujo de lava dacítica en bloques, 5) lavas cordadas de composición dacítica. Algunos depósitos de caída son observables en los alrededores de ambos volcanes, pero la fuente correspondería al volcán Azufral o un volcán ecuatoriano. Aunque se evidencian episodios de actividad explosiva y el CVCCN está compuesto por dos volcanes ya colapsados (INGEOMINAS, 1999), estos se clasifican como estratovolcanes activos con dominio efusivo y en estado de reposo.

En lo referente a manifestaciones superficiales de actividad geotérmica, Perdomo *et al.* (1986) atribuyeron la alteración hidrotermal observada, a fluidos de altas temperaturas con evidencia de silicificación y argilización evidenciados por caolín y otras arcillas; dada la cercanía de los centros volcánicos y similitud en su evolución, se propone una cámara magmática común para el VC y el VCN. Lesmes *et al.* (2004) identifican dos fuentes termales importantes en el VC, estas son: Aguas Hediondas (AH) y Baños Chiles (BC). Algunas características fisicoquímicas determinadas por estos autores son: $T_{AH}^{\circ} = 46^{\circ}\text{C}$, $T_{BC}^{\circ} = 42^{\circ}\text{C}$; $\text{pH}_{AH} = 4,9$, $\text{pH}_{BC} = 5,3$. También encontraron diferencias en conductividad eléctrica (σ , mS/cm) de: $\sigma_{AH} = 1,80$, $\sigma_{BC} = 1,50$ por lo que se infiere mayor concentración de sólidos disueltos en el

caso de AH. El nivel de radiación gama (DRG) ($\mu R/h$) en ambas fuentes termales es de 1,0. Además, los autores encontraron que las rocas del VC presentan alteración hidrotermal por acción del vapor de agua y de los gases ácidos sulfatados.

En años recientes, las empresas ISAGEN y CELEC EP participaron conjuntamente en el denominado Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, firmado por los gobiernos de Colombia y Ecuador. El proyecto, en etapa de prefactibilidad (ISAGEN, 2012), ha financiado actividades que incluyen estudios geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos y geofísicos, así como diseños de pozos de exploración, infraestructura y estudios de impacto ambiental. El área en la cual se ha desarrollado el proyecto se extiende a lo largo 490 km², y se espera un potencial de 138 MW (Mejía *et al.*, 2014).

METODOLOGÍA

Levantamiento geológico

El trabajo se desarrolló teniendo en cuenta la guía metodológica para el reconocimiento geológico en campos geotérmicos (INGEOMINAS, 2009a), que se resume a continuación. Debido a la finalidad y alcance del presente estudio, sólo es posible presentar consideraciones acerca de algunos de los aspectos de la guía, en los que efectivamente se presenta un aporte (FIGURA 3). A continuación se enuncian estos aspectos: recopilación de información existente (revisión bibliográfica y adquisición de mapas topográficos y geológicos); trabajo de campo (estudio vulcanológico general, estudio estratigráfico, recolección de muestras); levantamiento de la cartografía geológica (geología de los afloramientos, geometría de los contactos y las estructuras, alteraciones, manifestaciones termales); estudio estructural de detalle (consideraciones sobre permeabilidad, densidad y características de las fracturas); trabajo de laboratorio (descripción de muestras, análisis petrográficos, análisis químicos); resultados e interpretación (existencia y posible ubicación de la fuente de calor, condiciones estratigráficas y estructurales para acumulación de fluidos geotérmicos en el reservorio, existencia de condiciones para la recarga del reservorio); elaboración de un modelo conceptual (descripción de aspectos del sistema geotérmico, litología del reservorio, unidades que favorecen la circulación de fluidos en el reservorio).

La revisión de información y adquisición de imágenes incluyó: 1) base topográfica a escala 1:100.000 (IGAC) e imágenes satelitales (ASTER GDEM 2);

2) mapa geológico a escala 1:100.000 (Velásquez y Parra, 2002); y mapa geológico a escala 1:50.000 (Perdomo *et al.*, 1986); 3) reportes y estudios acerca de las manifestaciones termales; 4) otros datos del subsuelo (columnas estratigráficas, registros varios) y 5) datos publicados o disponibles sobre la hidrología e hidrogeología.

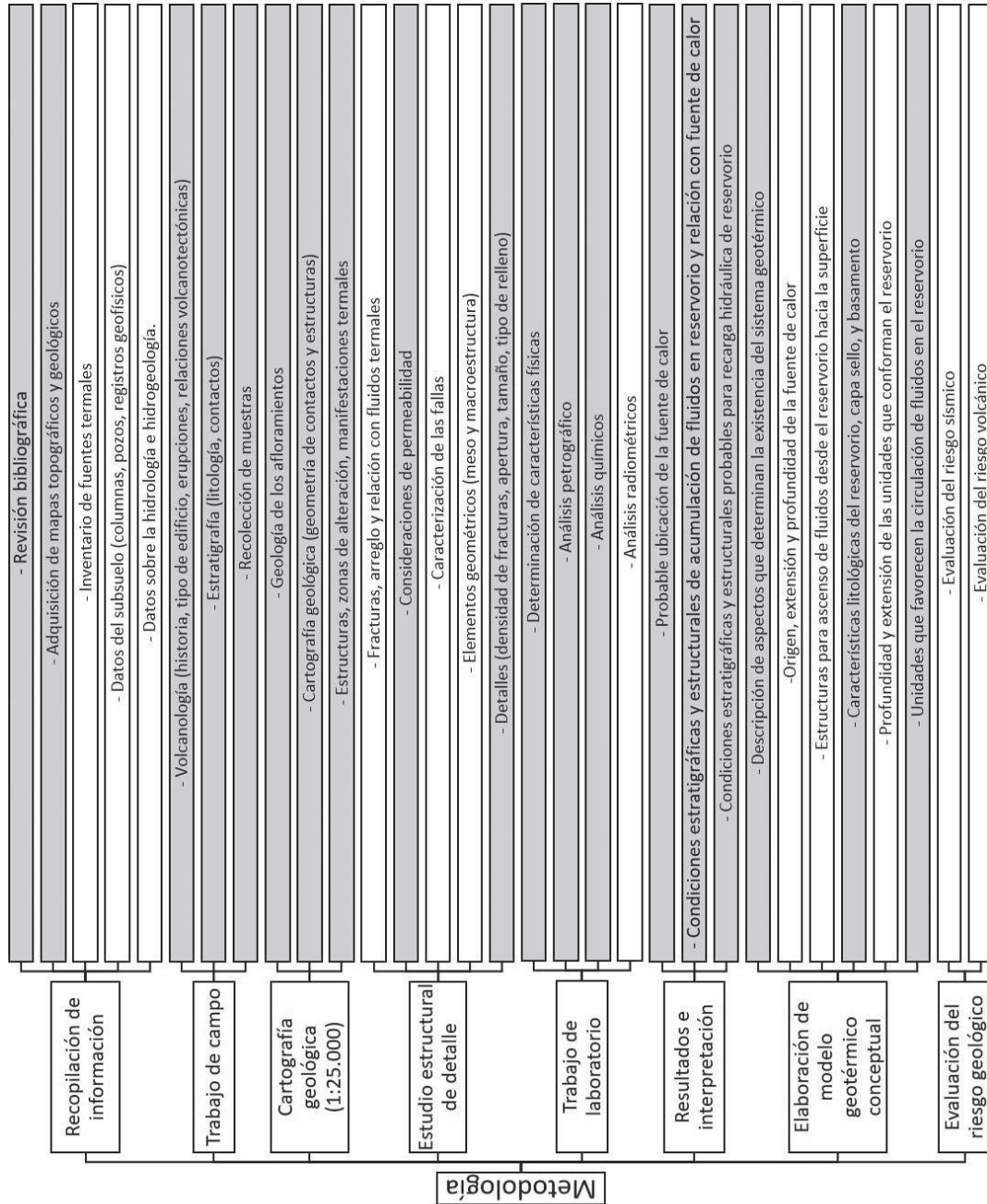
Se siguió la metodología para levantamiento geológico de Coe *et al.* (2010) y se enfatizó en la corroboración de litologías y adquisición de datos de detalle en los sitios. Se realizó una visita de campo durante los días septiembre 21-25 de 2015, y el trabajo incluyó la toma de datos geológicos de superficie en 21 afloramientos ubicados principalmente sobre la vía que comunica a Tufiño con Maldonado y en el sitio conocido como Aguas Hediondas (todos los sitios en Ecuador) (FIGURA 1). En los afloramientos rocosos se enfatizó la identificación de rasgos como el estado de alteración de las rocas y su condición de humedad, se tuvo en cuenta la intensidad, origen (térmico o estructural), patrones de orientación, dimensiones y espaciamiento de las diaclasas y fracturas observadas. En el caso de depósitos, se identificó su posible origen teniendo en cuenta, tanto las estructuras como la naturaleza de los clastos y la matriz, y se observaron las características de la matriz para cualificar su permeabilidad (FIGURAS 4 y 5).

Tratamiento de muestras

Se seleccionaron cuatro muestras de rocas frescas (lavas) para su respectiva descripción macroscópica, petrográfica y geoquímica elemental en roca total.

Las muestras previamente partidas se trituraron en un molino de bolas de ágata, el material pulverizado fue secado y se generaron pastillas prensadas de 37 mm de diámetro para análisis de química de roca total (elementos mayores y traza) por el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Para un análisis FRX semicuantitativo se utilizó el software SemiQ, realizando 11 barridos para detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos. La información de los análisis fue procesada usando las rutinas incluidas en *GeoChemical Data toolkit-GCDkit* versión 4.1 (Janoušek *et al.*, 2006). La descripción y clasificación petrográfica se realizó en las secciones delgadas correspondientes mediante la técnica de conteo de puntos en cinco campos visuales seleccionados, determinando en cada campo visual los porcentajes de vidrio, microlitos y fenocristales, así como los porcentajes de minerales esenciales y secundarios: Plagioclasas, olivinos, piroxenos y opacos.

FIGURA 3. Resumen de la guía metodológica para el reconocimiento geológico en campos geotérmicos (INGEOMINAS, 2009a). Los campos resaltados en gris representan los aspectos en los que este trabajo hace contribución.



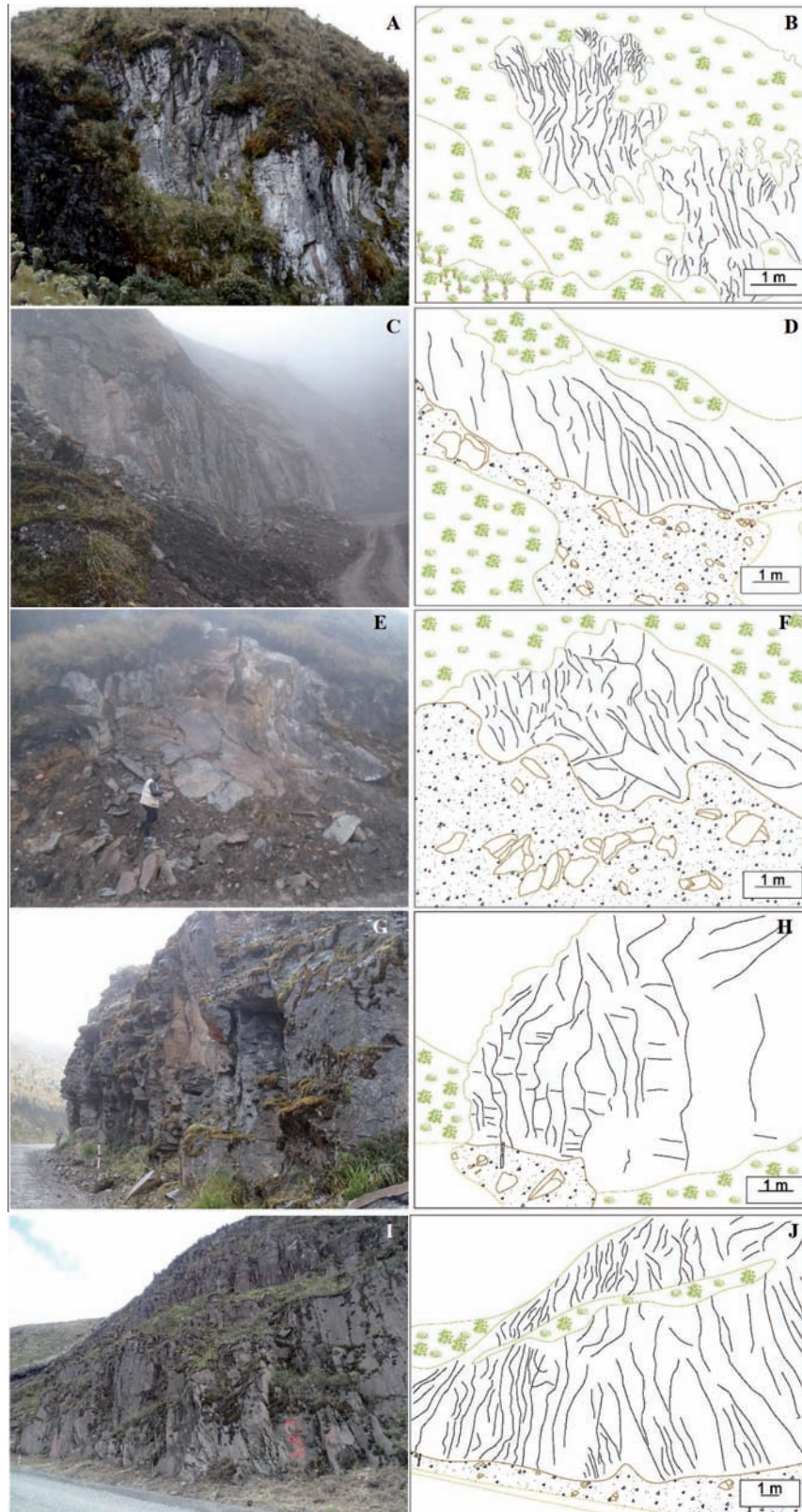


FIGURA 4. Fotos y dibujos esquemáticos de afloramientos rocosos. Las líneas negras resaltan las dimensiones y configuraciones de estructuras (fallas, diaclasas, fracturas) y las líneas de color café representan contactos. **A y B.** Estación 008. **C y D.** Estación 010. **E y F.** Estación 012. **G y H.** Estación 018. **I y J.** Estación 020.

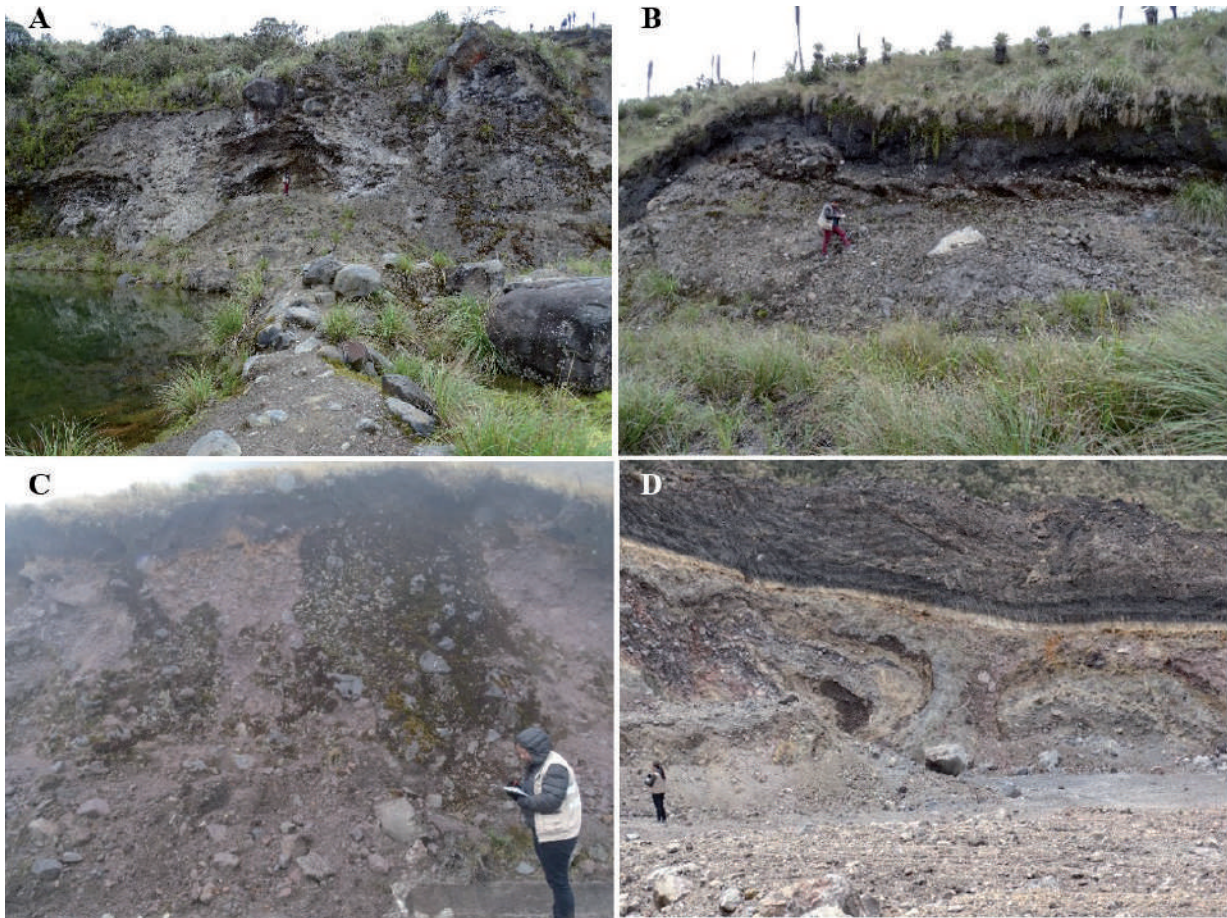


FIGURA 5. Fotos de afloramientos de depósitos. **A.** Posible depósito de lahar. **B.** Depósito glaciar (morrena). **C.** Depósito de talus. **D.** Depósito de corriente de densidad piroclástica.

La identificación del tipo de plagioclasa se realizó con base en las medidas de ángulos de extinción del método de Michel-Levy.

Los análisis de petrografía y geoquímica (FIGURAS 6 y 7) fueron comparados con la información bibliográfica sobre geología consignada en la cartografía geológica de mayor resolución disponible, a escala 1:50.000 (Perdomo *et al.*, 1986), la cual contiene además datos sobre los productos explosivos y efusivos, rasgos estructurales, zonas de alteración y manifestaciones termales.

Caracterización geomecánica

Para el estudio estructural y de caracterización geomecánica cualitativa y semicuantitativa de cinco sitios, se utilizó el sistema de clasificación de macizos

rocosos (*RMR-Rock Mass Rating*) (Bieniawski, 1989; Jerram y Petford, 2011) el cual usa cinco parámetros para identificar las características geotécnicas de la roca: 1) resistencia de la roca intacta bajo compresión uniaxial; 2) porcentaje de calidad de la roca (*%RQD-Rock Quality Designation*); 3) espaciamiento de discontinuidades; 4) condición de las discontinuidades y 5) condición general de agua. A continuación, se describe paso a paso el procedimiento para la clasificación de macizos rocosos.

Paso 1: Asignar valores para los cinco parámetros mencionados, de acuerdo a los criterios de la TABLA 2. Dependiendo del tipo de roca, y usando valores predeterminados (Hoek y Brown, 1997), se asigna un valor al parámetro 1.

TABLA 2. Criterios del sistema de clasificación de un macizo rocoso (*RMR*). Traducido y modificado de Bieniawski (1989).

1. Resistencia de la roca intacta a la compresión uniaxial (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Valoración	15	12	7	4	2	1	0
2. % RQD	90-100	75-90		50-75	25-50		< 25
Valoración	20	17		13	8		3
3. Espaciamiento entre discontinuidades (m)	> 2	0,6-2		0,2-0,6	0,06-0,2		< 0,06
Valoración	20	15		10	8		5
4. Condición de las discontinuidades	Muy rugosa, segmentaciones, no separación, sin erosión	Paredes rugosas, separación < 0,1 mm, algo de meteorización		Levemente rugosas, separación < 1 mm, altamente meteorizada	Caras suaves o salbanda con < 5 mm espesor, o separación uniforme de 1 – 5 mm		Salbanda suave con espesor > 5 mm, o separación uniforme > 5 mm, roca encajante descompuesta
Valoración	30	25		20	10		0
5. Condiciones generales de agua	Completamente seca	Húmeda		Mojada	Empapada		Fluida
Valoración	15	10		7	4		0

Para obtener valores del parámetro 2, se usa la fórmula:

$$\%RQD = \frac{\Sigma(\text{longitud de bloques continuos de roca en línea de referencia, } >0,1 \text{ m})}{\text{longitud línea de referencia (1,0 m)}} \times 100 \quad (1)$$

donde el numerador es la suma de las separaciones mayores a 0,1 m (10 cm) entre discontinuidades que intersectan una línea horizontal de referencia en el afloramiento. En la ecuación 1 debe tenerse presente que, si la longitud de la línea de referencia cambia, también debe actualizarse la condición del numerador para mantener las proporciones. Por ejemplo, si la longitud de línea de referencia es 10 m, entonces la condición del numerador ahora es “> 1 m” (100 cm).

Para la valoración del parámetro 3 se usa la mediana de los valores observados de separaciones entre discontinuidades, luego de descartar separaciones de acuerdo a la condición del numerador en la ecuación 1. Se continúa con la evaluación de los parámetros 4 y 5. Al final se obtendrán cinco valoraciones individuales cuya suma, el valor *RMR*, será ≤ 100 .

Paso 2: Estimar la resistencia de la masa rocosa. El método usa el valor *RMR* y la relación empírica entre resistencia de las rocas y los valores relativos entre los esfuerzos principales durante la fractura (Hoek y Brown, 1982). El proceso involucra el cálculo de dos parámetros Hoek-Brown: *m* y *s*, usando las relaciones:

$$m = m_i e^{\frac{(RMR-100)}{28}} \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{(RMR-100)}{9}} \quad (3)$$

donde $m_i = 25 \pm 5$ (Brown, 1981; Jerram y Petford, 2011). Estos parámetros son usados para la determinación de dos de las principales propiedades mecánicas y geotécnicas de una masa rocosa, a saber: resistencia compresiva del macizo rocoso (σ_{cm}) y resistencia tensional del macizo rocoso (σ_{tm}), en las fórmulas:

$$\sigma_{cm} = (s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_c}{2} [m - (m^2 + 4s)^{1/2}] \quad (5)$$

donde σ_c es la resistencia compresiva de la roca intacta, que para el caso de andesitas se toma con un valor de 128 MPa (Brown, 1981).

Adicionalmente se realizó el reconocimiento de fuentes termales, manantiales, lagunas y solfataras que permitieron cualificar la permeabilidad de las rocas y los depósitos como insumos adicionales para el planteamiento del modelo conceptual geotérmico.

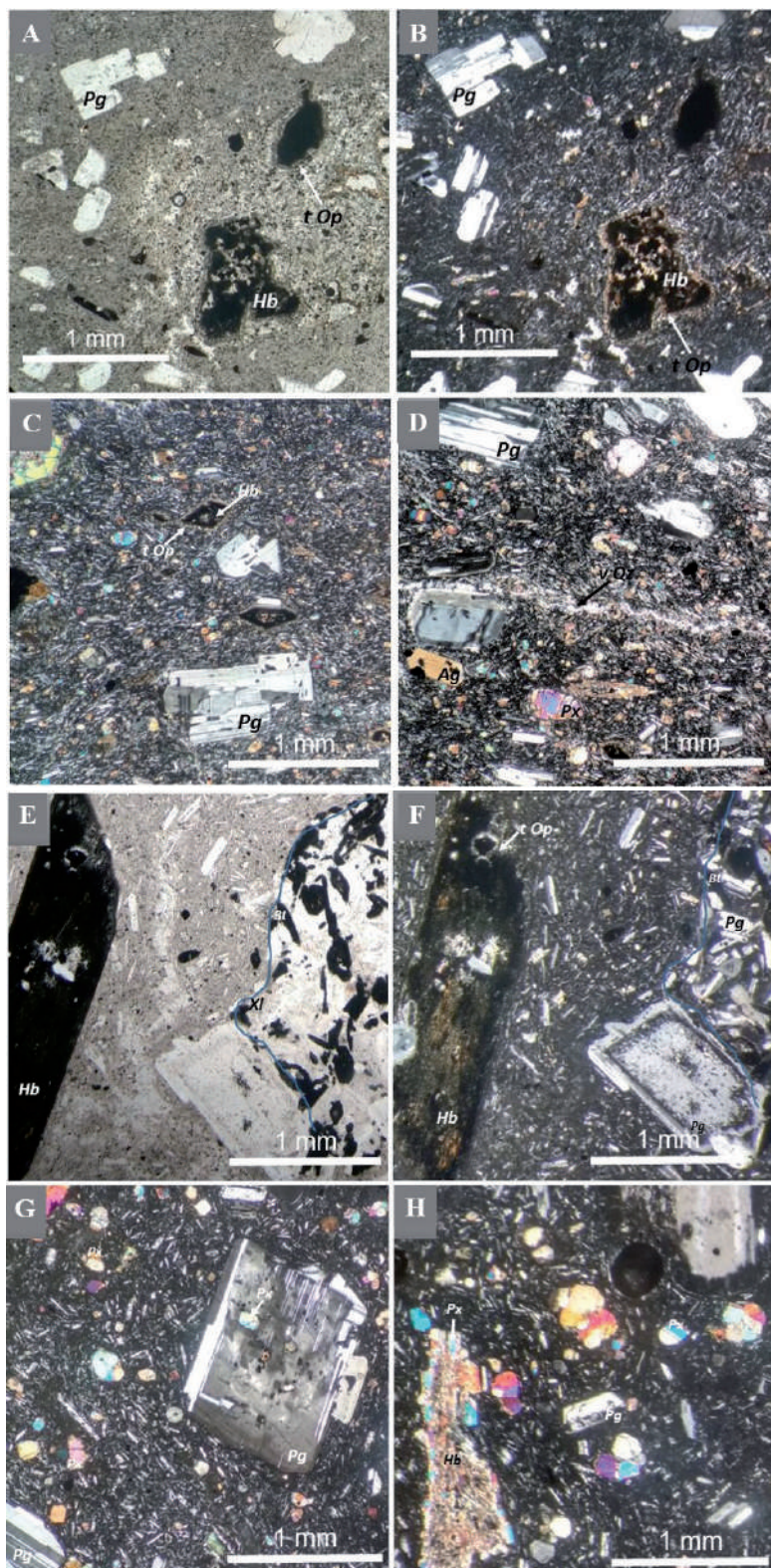


FIGURA 6. Microfotografías de campos visuales seleccionados por muestra. **A y B.** Muestra M-005 PPL y XPL, respectivamente (aumento 4X). **C y D.** Muestra M-006, dos campos visuales, XPL (4X). **E y F.** Muestra M-007 PPL y XPL, respectivamente (aumento 4X). **G y H.** Muestra M-008, dos campos visuales, XPL (4X). Pg: Plagioclasa; Hb: Hornblenda; Cpx: Clinopiroxeno; Opx: Ortopiroxeno; Ag: Augita titanífera; Bt: Biotita; vQz: Venilla de cuarzo; tOp: Textura de opacitización.

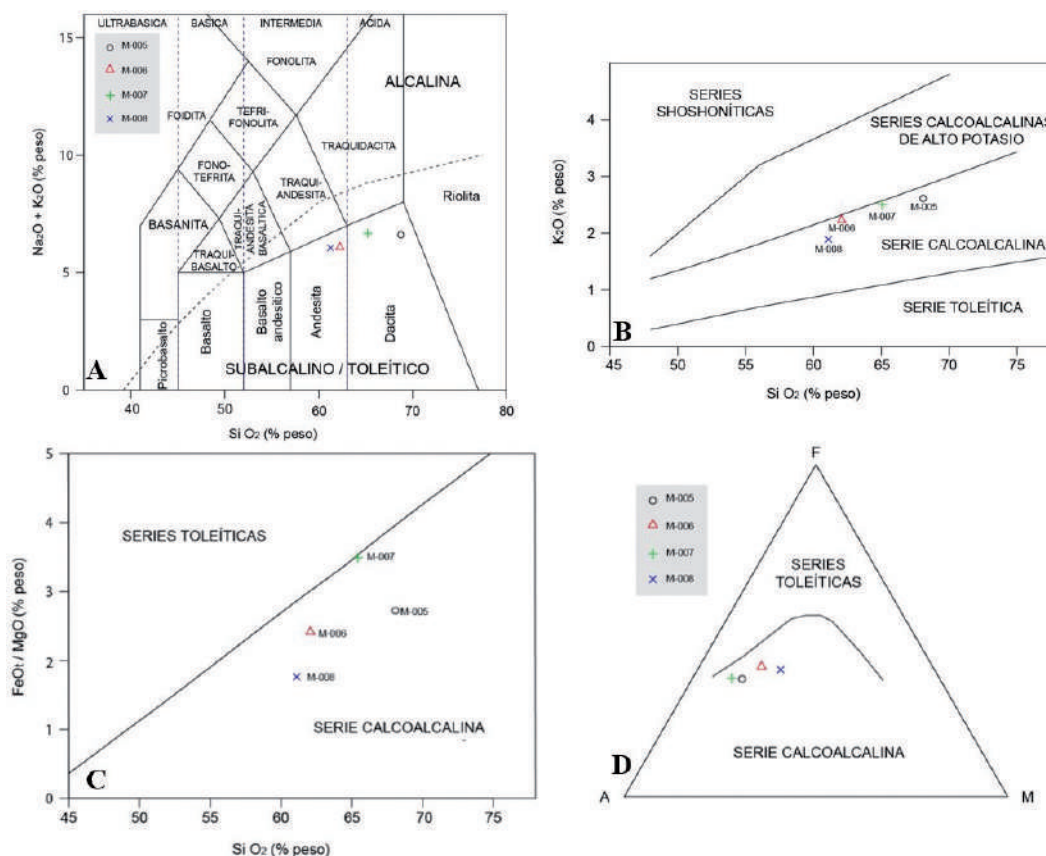


FIGURA 7. Diagramas de variación y discriminación para las muestras analizadas del CVCCN. **A.** Diagrama de variación y clasificación geoquímica $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 (Le Bas *et al.*, 1986). **B.** Diagrama K_2O vs SiO_2 de discriminación de las series de toleítica a shoshonítica (Peccerillo y Taylor, 1976). **C.** Diagrama SiO_2 - FeO/MgO de discriminación de las series toleítica y calcoalcalina (Miyashiro, 1974). **D.** Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971).

RESULTADOS

Los análisis químicos, petrográficos, y de mediciones en campo brindan resultados de detalle en relación a las dos subsecciones previamente presentadas en la Metodología: levantamiento geológico y caracterización geomecánica de los sitios visitados. A continuación, se presentan dichos resultados.

Levantamiento geológico

Se inspeccionaron 21 afloramientos de rocas y depósitos, todos ubicados dentro o en las inmediaciones del área de interés del Proyecto Geotérmico Binacional (FIGURA 1). Todos los afloramientos rocosos corresponden a lavas (FIGURA 4) y los afloramientos de materiales no litificados incluyen depósitos de sedimento glacial (morrenas), depósitos volcánoclasticos (lahares y flujos piroclásticos) y depósitos de talus (FIGURA 5). Los resultados de observaciones en los afloramientos se presentan en la

TABLA 3. De las nueve muestras de rocas recolectadas se prepararon cuatro (codificadas como M-005, M-006, M-007, y M-008) para realización de análisis petrográficos en secciones delgadas y correspondientes análisis químicos (ver sección Metodología).

Análisis petrográficos

Las cuatro muestras analizadas, clasificadas como andesitas (Streckeisen, 1973), exhiben los siguientes rasgos comunes: 1) Carácter hipocrystalino o hipohialino y textura microporfírica con contenido moderado a bajo de fenocristales (principalmente inequigranulares y con formas anhedrales o suhedrales) y dominio de matriz mixta con textura fluida; 2) Mineralogía principalmente de plagioclasa andesina, augita, biotita, hornblenda y opacos; 3) Opacitización en hornblendas o biotitas (FIGURA 6). La TABLA 4 resume los resultados del análisis petrográfico y la correspondiente clasificación.

TABLA 3. Resumen de las características de los afloramientos visitados en el área de estudio. La FIGURA 1 muestra la ubicación de las estaciones.

Est.	Lat. (°)	Lon (°)	Altura (m.s.n.m.)	Litología	Permeabilidad	Observaciones	Muestra
1	0,79773	-77,86333	3327	Lavas	Moderada	Diaclasas de origen térmico.	M-001
2	0,80819	-77,89032	3538	Depósito de lahar	Moderada	Fracturas métricas, laguna con agua a T° por encima de ambiente, profundidad 1,5 m.	M-002
3	0,81011	-77,90278	3565	Depósito de lahar	Moderada	Cristales aciculares de color naranja y ocre, alteración hidrotermal. A 300 m en dirección NW acantilado de lavas con apariencia estratificada, fracturas métricas abiertas.	M-003 M-004
4	0,8098	-77,9058	3596	Lavas	Alta	Fracturas, alteración hidrotermal, diaclasas con estructura en rampa. Termal "Aguas Hediondas", T° ~59°, alteración hidrotermal, pátina de azufre, solfataras con cristalización de azufre. Muestra de mano con carácter leucocrático.	M-005
5	0,7819	-77,89356	3620	Till	Alta	Masivo, alto contenido de materia orgánica, paralelo a un valle glaciar de orden mayor, morfología glaciar.	
6	0,79791	-77,91267	3893	Depósitos no consolidados suprayacidos por capa de ceniza y suelo	Alta	Estructura estratificada incipiente (capas, gradación). A 50 m al E afloran lavas muy diaclasadas, se midió el dato de una familia con dirección N25E/72NW.	
7	0,79871	-77,91409	3894	lavas	Alta	Diaclasas con dirección N10W/65SE, fracturas métricas buzando al SE. En algunas paredes de diaclasas se aprecian estructuras lineales no identificadas.	
8	0,79718	-77,9197	3933	Lavas	Alta	Diaclasas con dirección N54E/15SW, intenso diaclasamiento con múltiples orientaciones, se observa manantial de agua fría a la base. Muestra de mano con carácter leucocrático.	M-006
9	0,79999	-77,92624	3995	Depósitos no consolidados	Baja	Posible depósito de movimiento en masa (derrubio, deslizamiento de rocas, talus) o sedimento glaciar.	
10	0,80011	-77,93085	4006	Lavas	Baja	Diaclasas métricas, verticales con dirección SE.	
11	0,79744	-77,9224	3961	Lavas	Alta	Diaclasas con múltiples orientaciones, apariencia prismática en los bloques.	
12	0,79837	-77,93461	4026	Lavas	Moderada	Masivas. Diaclasas con aperturas milimétricas, fracturas métricas de aperturas milimétricas a centimétricas. Muestra de mano con carácter leucocrático.	M-007
13	0,80173	-77,93682	4028	Depósito de talus	Alta	Posible depósito de talus, clasto soportado y en algunas secciones matriz soportado.	
14	0,80056	-77,94476	4079	Lavas	Alta	Muy alteradas y diaclasadas, algunas familias de diaclasas (subhorizontales) con superficies de oxidación que reducen la permeabilidad. En contacto discordante con depósitos de talus y de caída.	

Continuación TABLA 3.

Est.	Lat. (°)	Lon (°)	Altura (m.s.n.m.)	Litología	Permeabilidad	Observaciones	Muestra
15	0,79828	-77,94846	4053	Lavas	Moderada	Intenso diaclasamiento, posible cataclasis, alteración hidrotermal (sílicea). Debido al estado de diaclasamiento la permeabilidad debe ser alta pero la alteración sílicea puede reducirla.	
16	0,7976	-77,94959	3999	Lavas	Alta	Intenso diaclasamiento, dos familias dominantes con direcciones N55W/50NE y N36E/57SE que producen patrones rómbicos y prismáticos en los bloques de diferentes tamaños, el diaclasamiento favorece la meteorización esferoidal.	
17	0,80554	-77,95696	3921	Lavas	Moderada a alta	Diaclasamiento intenso. Familia de diaclasas verticales con orientación N24E.	
18	0,80717	-77,95487	3914	Lavas	Moderada	Disyunción columnar. Diaclasamiento térmico dominante (patrón normal, se intensifica de base a techo). Lavas con textura porfírica fina a media (olivinos alterados, piroxenos y plagioclasas). Presentan alteración hidrotermal, con cristales aciculares de colores anaranjados a ocre. Muestra de mano con carácter leucocrático.	M-008
19	0,80879	-77,96634	3725	Depósito de flujo piroclástico	Alta	Granulometría variable (cm-m) principalmente lavas y escorias basálticas, en contacto con depósitos de caída y suelos ricos en materia orgánica muy agrietados, grietas perpendiculares a la morfología algunas afectando incluso el depósito. Posible fuente: Volcán Cerro Negro. Se observan manantiales cercanos. Las unidades de flujo piroclástico presentan morfología de depósito de canal.	
20	0,80857	-77,99953	3535	Lavas	Moderada a alta	Diaclasamiento intenso con aperturas milimétricas. Las diaclasas térmicas están verticalizadas.	M-009
21	0,8068	-77,9814	3674	Lavas	Alta	Lavas muy alteradas y diaclasadas en contacto discordante con posible depósito epiclástico (material retrabajado, con clastos redondeados estratificación incipiente) suprayacido por depósitos de caída y suelos.	

Análisis geoquímicos

Las muestras analizadas del CVCCN presentan un contenido de SiO₂ entre 61,12% y 68,08% en peso (TABLA 5), que corresponden a composiciones intermedias a félsicas. El valor más bajo del rango corresponde a la muestra M-008 y el valor más alto a la muestra M-005.

El diagrama de variación (Na₂O+K₂O vs SiO₂) confirma la clasificación modal QAPF (Streckeisen,

1973) de las muestras M-006 y M-007 como andesitas y se observa que las muestras M-005 y M-007 corresponden a dacitas (FIGURA 7A). Los diagramas de discriminación (K₂O vs SiO₂, FeO_t/MgO vs SiO₂, y AFM) ubican las muestras en la serie calcoalcalina de magmas. Teniendo en cuenta la estrecha relación que hay entre el ambiente geotectónico y las series de magmas, se confirma el ambiente tectónico de zona de subducción y arco continental para estas lavas.

TABLA 4. Resultados de análisis petrográficos. Pl=plagioclasa, Aug=augita, Id=iddingsita, Hb=homblenda, Op=opacos, Bt=biotita.

Muestra	Patrón textural				Rasgos de matriz y rasgos de las fenocristales			Composición y rasgos de las plagioclasas					Observaciones	Clasificación			
	Grado de cristalinidad	Tamaño relativo	Tamaño absoluto	Textura general	Texturas específicas	% Matriz	% Vidrio-microlitos	% Fenocristales	Pl	Aug	Id	Hb			Op	Bt	
M-005	Hipocristalino	Inequigranular	Fino granular (0,05-1 mm)	Microporfírica, criptocristalina	Fluida en matriz	81,6	72-9,6	18,4	An35-40, zonación, maclas polisiméticas, alteración a sericita (0,8%)	10	3	1,6	1,2	0,2	Cristales anhedrales a subhedrales, desvitrificación, hipersteno 1,6%, leucocrática	Andesita	
M-006	Hipocristalino	Inequigranular	Fino granular-Mesogranular (0,05-5 mm)	Microporfírica	Subofítica, fluida en matriz	79,2	5-74,2	20,8	An30-37, zonación, maclas polisiméticas, alteración a sericita (0,2%)	10	5,6	0,2	1,4	1,8	Cristales anhedrales a subhedrales, epidota (0,2%), leucocrática	Andesita	
M-007	Hipocristalino	Inequigranular	Fino granular-Mesogranular (0,05-5 mm)	Microporfírica	Fluida en matriz	70	35-35	30	An30-37, zonación, maclas polisiméticas	17	4	2	4		Cristales anhedrales a subhedrales, enstatita 1%, leucocrática	Andesita	
M-008	Hipohialino	Inequigranular	Fino granular-Mesogranular (0,05-5 mm)	Microporfírica	Fluida en matriz, subofítica, bahías de corrosión en piroxenos	60,8	54-6,8	39,2	An37-40, zonación, maclas polisiméticas	24	6,2	0,4	1,2	0,8	1,4	Cristales anhedrales a subhedrales, Cuarzo β 1,6%, leucocrática	Andesita

TABLA 5. Datos de elementos mayores (% en peso) y traza (ppm) de las muestras del CVCCN.

Elementos mayores (% peso)	M-005	M-006	M-007	M-008
SiO_2	68,081	62,076	65,061	61,106
Al_2O_3	13,268	16,870	16,268	15,742
Fe_2O_3	5,000	5,921	4,869	6,404
CaO	4,191	5,721	4,882	6,287
Na_2O	3,933	3,842	4,049	4,150
K_2O	2,613	2,225	2,61	1,89
MgO	1,651	2,207	1,254	3,267
TiO_2	0,648	0,605	0,526	0,640
P_2O_5	0,192	0,142	0,16	0,174
SO_3	0,149	0,064	0,027	0,010
MnO	0,075	0,102	0,086	0,108
Elementos traza (ppm)				
<i>Ba</i>	690	760	770	480
<i>Sr</i>	400	360	410	400
<i>Zr</i>	200	170	190	160
<i>Cl</i>	140	280	110	300
<i>V</i>	140	150	220	220
<i>Cr</i>	110	110	80	330
<i>Co</i>	90	70	70	90
<i>Rb</i>	90	80	90	50
<i>Zn</i>	60	80	70	80
<i>Cu</i>	50	110	50	70
<i>Y</i>	30	40	30	20
<i>Pb</i>	0	60	0	0

Análisis de estructuras y propiedades geotécnicas en afloramientos rocosos

En todos los afloramientos rocosos se observaron discontinuidades clasificables como diaclasas (tanto térmicas como debidas a otros esfuerzos), y fracturas, con diferentes orientaciones, inclinaciones, espaciamientos, y condiciones de relleno (FIGURA 4). En varios sitios, dependiendo de las condiciones de acceso, la inspección visual permitió corroborar la superposición de los diferentes efectos o el dominio de un tipo de deformación sobre otro. Los efectos de la meteorización química y física, la cubierta vegetal y procesos superficiales de remoción en masa enmascaraban comúnmente los rasgos primarios de interés. También se encontraron evidencias de alteraciones hidrotermales en grados variables de avance, principalmente en los alrededores de las fuentes termales, y variabilidad en las condiciones de humedad

de los sitios incluyendo en algunos casos manantiales fríos en zonas rocosas y de depósitos (TABLA 3). Se midieron espaciamientos entre discontinuidades en el rango 20 cm-80 cm, con aperturas en el rango 0,1 mm – 15 mm, en condiciones de roca húmeda principalmente. Se asignaron valores según los criterios del sistema *RMR* (Bieniawski, 1989; TABLA 2) en cinco sitios (E8, E10, E12, E18, y E20) en los cuales la resistencia compresiva de la roca intacta fue tomada con valor uniforme de 128 MPa (andesitas en todos los casos), dando como resultado valores de %*RQD* en el rango 90% - 96% (TABLA 6). En conjunto, se encontró que el valor *RMR* de cinco sitios varía en el rango 52 - 77 (TABLA 7). De acuerdo a lo anterior, se calcularon valores de resistencia compresiva y tensional de los cinco afloramientos que varían en los rangos $8,89 \leq \sigma_{cm} \leq 35,67$ y $-1,13 \leq \sigma_{tm} \leq -0,11$, respectivamente (TABLA 8).

TABLA 6. Características de las rocas y sus discontinuidades en cinco sitios seleccionados.

Parámetros de clasificación de un macizo rocoso (RMR)	Estación 008	Estación 010	Estación 012	Estación 018	Estación 020
1. Resistencia de la roca (MPa)*	128	128	128	128	128
2. % RQD	90%	92%	93%	96%	90%
3. Espaciamiento entre discontinuidades (m)**	0,2	0,4	0,5	0,8	0,6
4. Condición de discontinuidades	Separación < 1 mm	Separación <0,1 mm	Separación 5 – 15 mm	Separación < 1mm	Separación < 1mm
5. Condiciones generales de agua	Roca empapada	Roca húmeda	Roca húmeda	Roca húmeda	Roca húmeda

*Valores uniformes (Hoek y Brown, 1997) para todas las muestras relacionadas, correspondientes a andesitas.

**Se reporta el valor de la mediana (como medida central) de los espaciamientos entre discontinuidades, una vez descartados los valores inferiores a 10 cm.

TABLA 7. Valoraciones para clasificación RMR de los cinco afloramientos.

Parámetro*	Estación 008	Estación 010	Estación 012	Estación 018	Estación 020
1	12	12	12	12	12
2	17	20	20	20	17
3	8	10	10	15	10
4	20	25	0	20	20
5	4	10	10	10	10
$\Sigma=RMR \rightarrow$	61	77	52	77	69

*De acuerdo a número en la primera columna de las TABLAS 2 y 6.

TABLA 8. Valores de las principales propiedades mecánicas y geotécnicas de los cinco afloramientos.

Parámetro	Estación 008	Estación 010	Estación 012	Estación 018	Estación 020
m_{min}^*	4,97	8,80	3,60	8,80	6,61
m_{max}^{**}	7,45	13,19	5,40	13,19	9,92
m_{avg}^{**}	6,21	11,00	4,50	11,00	8,26
s	0,013	0,078	0,005	0,078	0,032
(σ_{cm}) , Mpa	14,66	35,67	8,89	35,67	22,87
$(\sigma_{tm})_{min}^{\dagger}$, Mpa	-0,338	-1,129	-0,172	-1,129	-0,618
$(\sigma_{tm})_{max}^{\dagger}$, Mpa	-0,225	-0,753	-0,114	-0,753	-0,412
$(\sigma_{tm})_{avg}^{\dagger}$, Mpa	-0,270	-0,903	-0,137	-0,903	-0,494

m_{min}^* , m_{max}^{**} , m_{avg}^{**} : Valores mínimos, máximos y promedios, del parámetro Hoek-Brown, m , asumiendo valores extremos y centrales de la variable m_i en la ecuación 2.

σ_{cm} : Resistencia compresiva del macizo rocoso calculada con la ecuación 4.

$(\sigma_{tm})_{min}^{\dagger}$, $(\sigma_{tm})_{max}^{\dagger}$, $(\sigma_{tm})_{avg}^{\dagger}$: Valores mínimos, máximos, y promedios, de resistencia tensional del macizo rocoso calculados con la ecuación 5, asumiendo valores extremos y centrales de la variable m_i en la ecuación 2.

Condiciones generales de las aguas: subterráneas, manantiales fríos y manifestaciones hidrotermales

Durante los recorridos se evaluó la condición general de las aguas en los sitios mediante inspección visual de las discontinuidades en las rocas y documentando la presencia de manantiales fríos y fuentes termales. En las estaciones E8, E10, E12, E18 y E20, el criterio de la condición de aguas subterráneas fue valorado en el rango 4-10, correspondiente a las cualificaciones “roca empapada” y “roca húmeda” (TABLAS 2, 3 y 6). En dos sitios (E8 y E19) se encontraron manantiales fríos, y en la estación E2 se encontró un manantial con agua a temperatura superior a la ambiental. La estación E4 corresponde al sitio conocido como los termales de “Aguas Hediondas”, donde las temperaturas reportadas son 46°C y 58°C (Lesmes *et al.*, 2004; Carrera y Guevara, 2016).

DISCUSIÓN

La exploración geológica de áreas geotérmicas en Colombia ha contribuido en parte al avance de proyectos para la construcción de plantas de energía geotérmica hasta las etapas actuales de conclusión de estudios de prefactibilidad, como en el caso del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz, e inicio de prefactibilidad, como en

el CVCCN (Mejía *et al.*, 2014; Alfaro, 2015). En esta última área, uno de los objetivos principales dentro de los estudios complementarios de prefactibilidad es la construcción de un modelo conceptual, del cual se han ubicado en la literatura dos versiones (Beate, 1991; INER, 2013). Desde esa perspectiva, en el presente trabajo se integran elementos relacionados a 1) estudio geológico superficial en el CVCCN para caracterizar algunas unidades litológicas, 2) análisis de estructuras y propiedades geotécnicas en afloramientos rocosos y 3) condiciones generales de aguas subterráneas y superficiales, todos insumos para refinar el modelo conceptual en preliminar.

En términos del mapa de unidades geológicas de mejor resolución disponible a la fecha (Perdomo *et al.*, 1986) fue posible confirmar la litología aflorante, consistente principalmente de emplazamientos de lava de la primera y segunda actividad del VC (episodios 4 y 6 de Cortés y Calvache, 1996) y depósitos de material fragmental de naturaleza variable, incluyendo derrubios, *till*, lahares y flujos piroclásticos (TABLA 3, FIGURA 1). La mayor parte de los edificios del CVCCN está formada por acumulaciones de lavas que han alcanzado elevaciones importantes, constituyéndose así en las áreas de precipitación y recarga del sistema hidrogeológico regional (FIGURA 8).

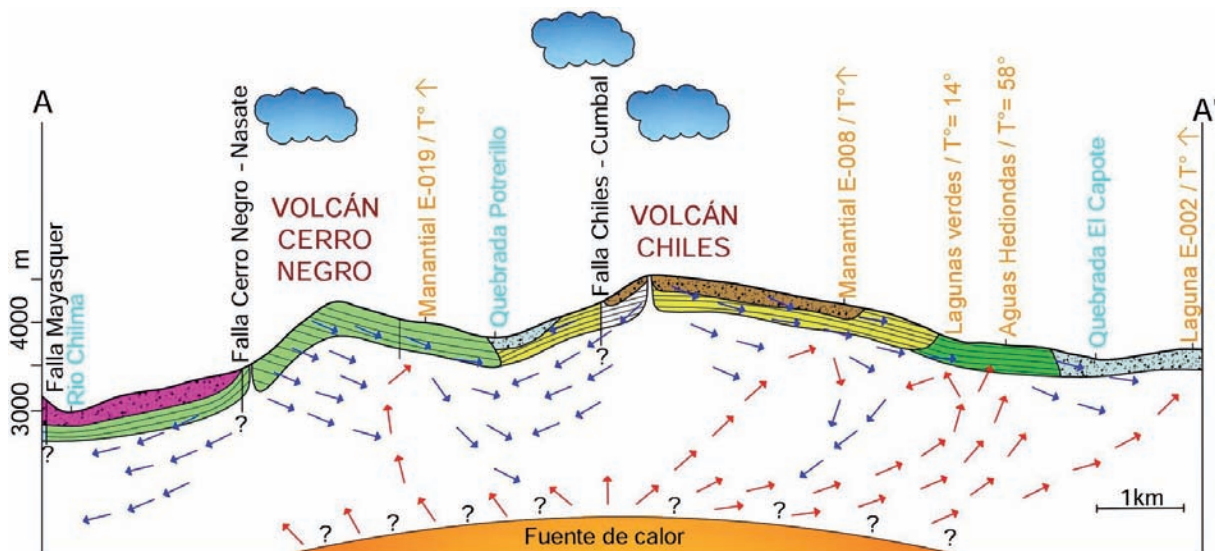


FIGURA 8. Perfil A-A' (ver FIGURA 1) con el modelo geotérmico conceptual propuesto. Nubes: área de recarga. Flechas azules: dirección de flujo del sistema de recarga. Flechas rojas: Dirección de flujo de calor. En naranja: posibles áreas de descarga de aguas termales (se indica temperatura de las aguas cuando se conoce, de lo contrario, se indica temperatura por encima de la temperatura ambiente como “T°↑”. Convención de colores en litología como en la FIGURA 1. Los valores de temperatura de las fuentes termales de Aguas Hediondas son valores máximos reportados recientemente por Carrera y Guevara (2016), aunque para la misma fuente, otros autores anteriores reportan T=55°C (Beate, 1991) y T=46°C (Lesmes *et al.*, 2004).

Una implicación de la variabilidad litológica superficial son las diferencias en calidad de las rocas, que a su vez influyen en las características de la red permeable a niveles someros. En principio las lavas frescas y masivas tendrían menos permeabilidad que los depósitos no consolidados, pero la presencia de fallas, fracturas y diaclasas hace que incluso las lavas adquieran permeabilidades importantes. Esto es particularmente relevante en lavas que exhiben disyunción columnar por contracción durante enfriamiento, ya que de acuerdo con resultados experimentales se estima que la geometría y dimensiones las columnas influyen significativamente la permeabilidad, pudiendo esta incrementarse varios órdenes de magnitud, con valores máximos medidos cercanos a 10^{-10} m² (Lamur *et al.*, 2018). En ese sentido, el análisis de estructuras para caracterizar algunas propiedades geotécnicas de los macizos rocosos muestra, de manera semicuantitativa, que la calidad de las rocas, evaluada a partir del *RQD* (Bieniawski, 1989) exhibe valor medio $RQD_{mediana}=92\%$ y que la clasificación *RMR* se sitúa en valor medio $RMR_{mediana}=69$ (TABLAS 6 y 7). Evidentemente, los valores de resistencia compresiva y tensional dependientes del valor *RMR*, y determinados en este trabajo para cinco afloramientos del CVCCN, son inferiores a los medidos en laboratorio para rocas intactas (Brown, 1981), en concordancia con la observación general de que las resistencias de los edificios volcánicos son mucho menores que las resistencias de los materiales mismos que los conforman (Jerram y Petford, 2011). Las propiedades mecánicas de cinco sitios adicionales en el sector norte del CVCCN fueron también calculadas siguiendo la misma metodología (Bocanegra y Sánchez, 2017), encontrándose los valores medios de $RQD_{mediana}=92\%$ y $RMR_{mediana}=82$, estos últimos más altos que los calculados en este trabajo. En términos generales, la clasificación *RMR* y los valores de calidad y resistencia de los macizos rocosos en el CVCCN están en el rango esperado para la mayoría de macizos rocosos (Jerram y Petford, 2011). Así, los estimados geotécnicos y la evidencia morfológica de colapsos en ambos edificios (VC y VCN) (Cortés y Calvache, 1996), sugieren estructuras débiles. De otra parte, en varios afloramientos de lavas se observó dominio de disyunción columnar por enfriamiento (TABLA 3, FIGURA 4), rasgo que aumentaría la permeabilidad de las rocas en superficie (Lamur *et*

al., 2018). Las diferentes litologías, la diversidad de estructuras y discontinuidades, y las propiedades geotécnicas de los macizos también influyen en las condiciones de porosidad y permeabilidad, que en general se observaron variables, tanto a nivel de afloramiento como a nivel regional (TABLAS 3 y 6). Las condiciones de humedad de los afloramientos, y la observación de manantiales o agua de escorrentía en tres sitios reportados aquí (TABLA 3), al igual que las observaciones de Bocanegra y Sánchez (2017) para el sector norte del CVCCN, implican que se favorece la circulación de agua y otros fluidos en niveles superficiales, y se sugiere, con base en las observaciones de campo en rocas y depósitos, que la porosidad y la permeabilidad son moderadas a altas, lo que favorece la circulación de fluidos acuosos entre las áreas de recarga y descarga previamente sugeridas por otros autores (Beate, 1991; INER, 2013) (FIGURAS 1 y 8).

Las fuentes de información consultadas reportan que, en el área de interés, las estructuras geológicas mayores (fallas y lineamientos) presentan orientaciones dominantes SW-NE (sistema longitudinal) y SE-NW (sistema transversal) (Perdomo *et al.*, 1986; Bocanegra y Sánchez, 2017). A nivel de detalle en el presente estudio se reporta que en cuatro sitios se midieron orientaciones de familias de diaclasas en dirección NE y dos sitios mostraban familias de diaclasas en dirección NW (FIGURA 9) ambos grupos de orientaciones consistentes con las tendencias regionales.

El sistema hidrogeológico del altiplano nariñense fue estudiado por INGEOMINAS (2009b), incluyendo marginalmente el área de los volcanes VC y VCN en el extremo SW del altiplano, y cartografiando datos de direcciones de flujo para el agua subterránea en sentido NW-SE y N-S en el área del VC. Aunque en dicha investigación las lavas fueron caracterizadas con porosidad secundaria y sin aparente interés hidrogeológico, el presente estudio aporta nuevos datos que refinan el conocimiento acerca del comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas. Desde la actual perspectiva y con base en las observaciones aquí reportadas es razonable sugerir que el agua y los fluidos pueden estar controlados en cierto grado por las estructuras regionales y locales documentadas.

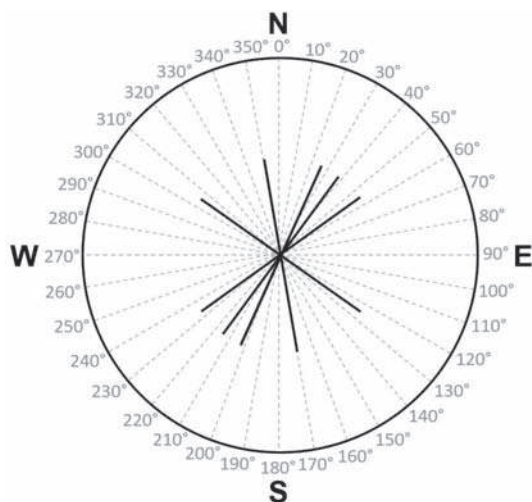


FIGURA 9. Diagrama rosa. Orientación de las estructuras medidas en seis afloramientos, se observa tendencia predominante SW-NE.

El modelo conceptual geotérmico en construcción para el área de interés, de acuerdo a los estudios disponibles, incluye los siguientes elementos (Beate, 1991; Prieto, 2006; CEPAL, 2000; INER, 2013): 1) indicación del área de recarga potencial y dirección de flujo del agua subterránea, 2) dirección de flujo de fluidos calientes en profundidad, 3) configuración general de las isothermas, 4) potencial extensión del reservorio, 5) potencial configuración y extensión de dos fallas, 6) extensión y configuración de una posible capa sello y 7) ubicación de dos sitios de descarga de aguas termales. El presente trabajo aporta los siguientes elementos a dicho modelo conceptual geotérmico: a) sugerencia de posibles complejidades al régimen de recarga y circulación de agua subterránea (flanco oriental del VCN); b) tres reportes de posibles áreas adicionales de descarga de aguas termales, una en el costado oriental del VCN (manantial E-019) y dos en el costado oriental del VC (manantial E-008 y laguna E-002); c) la influencia de la geología superficial y el estado geomecánico de las rocas aflorantes, incluyendo la geometría de las diaclasas, la porosidad y la permeabilidad de las rocas en superficie. Por tanto, el presente estudio contribuye al refinamiento de un modelo conceptual preliminar (FIGURA 8), que no incluye lo relacionado a la extensión y configuración de la capa sello del sistema, debido a que este aspecto está fuera del enfoque del presente trabajo.

Finalmente se plantean algunos interrogantes que pueden ser resueltos en estudios posteriores: ¿Cuál es la profundidad más probable de la fuente de calor?, ¿Cuáles son las características fisicoquímicas de las potenciales nuevas áreas de descarga?, ¿Están asociadas las nuevas

zonas de descarga reportadas al sistema geotérmico?, ¿Son consistentes las características geológicas y geomecánicas de los afloramientos visitados con sitios ubicados en otros sectores de los volcanes? Estas preguntas pueden resolverse con la integración de resultados de estudios futuros más detallados, los cuales requerirán una aproximación multidisciplinaria.

CONCLUSIONES

El presente estudio, permite proponer un modelo conceptual geotérmico preliminar para el área del CVCCN, principalmente basado en la valoración de las condiciones generales de aguas y las propiedades geotécnicas de varios macizos rocosos, ubicados en el flanco sur del complejo. Varios sitios, como E8, E10, E12, E18 y E20 fueron clasificados como de “roca húmeda” y “roca empapada”, mientras que en los sitios E8 y E19 se encontraron manantiales fríos. Lo anterior implica porosidad y permeabilidad de moderada a alta. Los rangos de valores para algunas propiedades geotécnicas de cinco macizos rocosos en el sector sur del CVCCN son: $90 \leq \%RQD \leq 96$; $52 \leq RMR \leq 77$; $8,89 \leq \sigma_{cm} \leq 35,67$; y $-1,13 \leq \sigma_{tm} \leq -0,11$. Los valores medios (la mediana como medida de tendencia central) de estos parámetros son: $RQD_{mediana} = 92\%$; $RMR_{mediana} = 69\%$; $\sigma_{cm-mediana} = 22,87$ MPa; y $\sigma_{tm-mediana} = -0,494$ MPa. Las condiciones superficiales de la litología y las estructuras favorecen la circulación de fluidos en el sistema geotérmico del CVCCN.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento de Geociencias, a la Facultad de Ciencias, y a la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá por el apoyo para la realización de este trabajo. Los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos ayudaron a mejorar la calidad del artículo.

REFERENCIAS

- Alfaro, C. (2015). Improvement of perception of the geothermal energy as a potential source of electrical energy in Colombia, country update. *World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia.
- Axelsson, G. (2013). *Conceptual models of geothermal systems-introduction*. Presented at “Short course V on conceptual modelling of geothermal systems”, El Salvador, February 24-March 2,

- <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-16-07.pdf>.
- Beate, B. (1991). La geotermia: conceptos generales, aplicaciones y estado actual en el Ecuador. En: P. Mothes (Ed.). *El paisaje volcánico de la sierra ecuatoriana: geomorfología, fenómenos volcánicos y recursos asociados* (pp. 71-83). Quito: Corporación Editora Nacional, Colegio de Geógrafos del Ecuador.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Bocanegra, L., y Sánchez, J. (2017). Mapa de fallas de los volcanes Chiles - Cerro Negro (Nariño) a partir de minería de datos y confirmación de campo. *Boletín de Geología*, 39(3), 71-86. doi: 10.18273/revbol.v39n3-2017005.
- Brown, E.T. (1981). *Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon Press.
- Carrera, D.V., y Guevara, P.V. (2016). *Fuentes termales del Ecuador*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- CEPAL. (2000). Proyecto OLADE/CEPAL/GTZ. Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional "Tufiño-Chiles-Cerro Negro". Informe Interno, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Coe, A.L., Argles, T.W., Rothery, D.A., and Spicer, R.A. (2010). *Geological field techniques*. Londres: Wiley-Blackwell.
- Cortés, G., y Calvache, M. (1996). Investigación sobre la evolución y composición de los volcanes de Colombia: Galeras y Volcanes del Sur. Geología de los Volcanes Chiles y Cerro Negro. Informe Interno. INGEOMINAS, 53p.
- Dickson, M., and Fanelli, M. (1995). Geothermal background. In: M. Dickson, M. Fanelli (Eds.). *Geothermal energy* (pp. 1-36). Chichester: John Wiley & Sons.
- García, Y.K. (2016). Contribuciones geológicas al modelo geotérmico conceptual en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro. Trabajo de Grado, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Goff, F., and Janik, C.J. (2000). Geothermal systems. In: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, J. Stix (Eds.). *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 817-834). San Diego: Academic Press.
- Gorman, C. (1997). The constructive history and petrology of volcan Cumbal, Southern, Colombia. Master Thesis, Arizona State University, Tempe.
- Hoek, E., and Brown, E.T. (1982). *Underground Excavations in Rock*. London: E & FN Spon.
- Hoek, E., and Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. doi: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
- INER. (2013). *Taller de energía geotérmica-avances en el desarrollo de la geotermia en Ecuador*. Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Consultado el 10 de septiembre de 2015. <http://www.iner.gob.ec/>.
- INGEOMINAS. (1999). Atlas de amenaza volcánica en Colombia. Informe Interno, 121p.
- INGEOMINAS. (2009a). Guía metodológica para el reconocimiento geológico en campos geotérmicos. Informe interno, 31p.
- INGEOMINAS. (2009b). Evaluación hidrogeológica regional del Altiplano nariñense. Informe interno, 67p.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548.
- ISAGEN S.A ESP (2012). Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. 78p.
- Janoušek, V., Farrow, C.M., and Erban, V. (2006). Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6), 1255-1259. doi: 10.1093/petrology/egl013.

- Jerram, D., and Petford, N. (2011). *The field description of igneous rocks*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Lamur, A., Lavallée, Y., Iddon, F.E., Hornby, A.J., Kendrick, J.E., von Aulock, F.W., and Wadsworth, F.B. (2018). Disclosing the temperature of columnar jointing in lavas. *Nature Communications*, 9, 1-7. doi: 10.1038/s41467-018-03842-4.
- Le Bas, M., Le Maitre, R., Streckeisen, A., and Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total Alkali-Silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745-750. doi: 10.1093/petrology/27.3.745.
- Lesmes, L., Bobadilla, L., Hernández, M., Cañón, Y., Mojica, J. and Garzón, G. (2004). Mineralogía y fisicoquímica de las fuentes termales del Departamento de Nariño. *Boletín de Geología*, 26(42), 57-66.
- Mejía, E., Rayo, L., Méndez, J., and Echeverri, J. (2014). Geothermal development in Colombia. *Short course VI on Utilization of Low-and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization*. El Salvador.
- Miyashiro, A. (1974). Volcanic rocks series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274(4), 321-355. doi: 10.2475/ajs.274.4.321.
- Moeck, I.S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.032.
- Nelson, W. (1962). Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. Sección carretera Cali - Buenaventura. *Boletín Geológico*, 10(1-3), 81-108.
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63-81. doi: 10.1007/BF00384745.
- Perdomo, G., Ardila, R., y Meneses, L. (1986). Estudio geológico para prospección de azufre en el área de Cumbal – Chiles – Mayasquer (Nariño). Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pinilla, A., Ríos, P., Rodríguez, B., Sánchez, J., Pulgarin, B., Borrero, C., y Roa, H. (2008). El Neógeno Volcánico en el Altiplano Nariñense, suroccidente colombiano. *Geología Colombiana*, 33, 69-78.
- Prieto, A. M. (2006). Diagnóstico del potencial geotérmico en la zona del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño Chiles Cerro Negro. Trabajo de grado, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Streckeisen, A. (1973). Plutonic Rocks: Classification and Nomenclature Recommended by the IUGS. Sub-Commission on the Systematic of Igneous Rocks. *Geotimes*, 18, 26-30.
- Velásquez, M.E., y Parra, E. (2002). Geología de la plancha 447 – Ipiales y 447BIS – Tallambí. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, 118.

Yohanna K. García
ORCID: 0000-0002-7188-8911

John J. Sánchez
ORCID: 0000-0002-9024-7554

Trabajo recibido: enero 26 de 2017
Trabajo aceptado: septiembre 25 de 2018