

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL AL NORESTE DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUÍZ, COLOMBIA – APORTE A LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Eliana L. Mejía<sup>1</sup>; Francisco Velandia<sup>2,3</sup>; Carlos A. Zuluaga<sup>1</sup>; Julián A. López<sup>2,4</sup>; Thomas Cramer<sup>1</sup>

## RESUMEN

Los estudios de geología estructural en los alrededores del Volcán Nevado del Ruíz (VNR) mediante la interpretación de fotografías aéreas y modelos digitales del terreno, en conjunción con el análisis de rasgos morfológicos – tectónicos, datos de estrías de falla y cálculo del campo de esfuerzos en el sector noreste del VNR, permitieron inferir un esquema estructural que explica el control en la localización de las fuentes termales y el tránsito de fluidos en general. Los rasgos tectónicos principales del VNR están dominados por fallas longitudinales NE y N-S (fallas Palestina y San Jerónimo) y un sistema transversal NW-SE a E-W (Falla Villamaría-Termale, Campoalegrito, San Ramón, etc). Para el Cuaternario se obtuvo un campo de esfuerzos con dirección de compresión WNW-ESE, que actúa en las estructuras longitudinales con cizalla simple y provoca cinemática predominante lateral derecha, mientras las estructuras transversales se expresan con rasgos similares, pero en cinemática lateral izquierda. Se resalta además, la expresión NE de la Falla Santa Rosa con rasgos que indican movimiento lateral derecho. También se obtuvo un campo de esfuerzos tentativo en rocas del Cretácico-Paleoceno y más antiguas, con una dirección de compresión WSW-ENE que implica una previa cinemática lateral derecha de las estructuras longitudinales como Palestina o San Jerónimo.

**Palabras Clave:** Volcán Nevado del Ruíz, Falla Palestina, Falla Villamaría – Termale, Campo de esfuerzos, Exploración geotérmica.

## STRUCTURAL ANALYSIS OF THE NORTHEAST NEVADO DEL RUIZ VOLCANO AREA, COLOMBIA – A CONTRIBUTION TO GEOTHERMAL EXPLORATION

## ABSTRACT

The structural geology studies around the Nevado del Ruiz Volcano (NRV), based on aerial photographs and digital terreno models interpretation, in conjunction with analysis of morphological, tectonic features, striated fault planes data and stress field calculation allow to propose a structural scheme that explains the pattern of location of hot springs and fluid released in the western part of the NRV. Structures and kinematics in the region are closely related to the dominant tectonic features of the NVR, nominally longitudinal NE-SW and N-S faults (Palestina, Santa Rosa and San Jerónimo) and a transverse NW-SE to E-W system (Villamaría-Termale, Campoalegrito, San Ramón faults). Quaternary stress tensor was obtained with a WSW-ENE direction of contraction, and dextral strike slip deformation by simple shear along main longitudinal faults, while left lateral displacement is transmitted to most of the NW transverse structures. A WSW-ENE direction of compression was also calculated from striated planes of Cretaceous-Paleocene and older rocks, meaning previous right lateral displacements along longitudinal faults (i.e. Palestina or San Jerónimo).

**Keywords:** Nevado del Ruiz Volcano, Palestina Fault, Villamaría-Termale Fault, Stress regime, Geothermal exploration

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia. [elmejia@unal.edu.co](mailto:elmejia@unal.edu.co), [cazulugacas@unal.edu.co](mailto:cazulugacas@unal.edu.co), [thrcramer@unal.edu.co](mailto:thrcramer@unal.edu.co)

<sup>2</sup> INGEOMINAS (actual Servicio Geológico Colombiano), Bogotá, Colombia

<sup>3</sup> Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga, Colombia. [favelanp@uis.edu.co](mailto:favelanp@uis.edu.co)

<sup>4</sup> Eco Oro Minerals Corp., Cra 27 No. 36-14, Bucaramanga, Colombia. [juanloizv@gmail.com](mailto:juanloizv@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

La caracterización de los sistemas geotérmicos en función de los ambientes favorables y los controles estructurales y estratigráficos es de vital importancia para el desarrollo de una adecuada exploración y desarrollo de dichos sistemas, en donde la interpretación geológico-estructural de una región permite establecer el grado de variación de la permeabilidad en función de la geología. Los sistemas geotérmicos pueden encontrarse en zonas asociadas con centros volcánicos y/o en zonas controladas estructuralmente (Ayaz *et al.*, 2010; Faults *et al.*, 2010). En presencia de centros volcánicos activos la fuente de calor estaría muy relacionada al magmatismo supracortical (Faults *et al.*, 2010), mientras que en relación a las zonas controladas estructuralmente la fuente de calor se debe a la circulación profunda de las aguas meteóricas (Ayaz *et al.*, 2010).

El Volcán Nevado del Ruíz (VNR) se localiza en el eje de la Cordillera Central de Colombia (4°53'43"N, 75°19'21"W), alcanza los 5.321 m.s.n.m. y corresponde a un estratovolcán activo. El volcanismo característico de esta zona es típico de un ambiente geodinámico de margen continental activo dominado regionalmente por una tectónica transcurrente, la cual da origen a fallas de carácter regional que sirven como canales alimentadores de los focos volcánicos (CHEC, 1983; Calvache y Monsalve, 1983). El ambiente tectónico transpresivo (Toro y Osorio, 2005) con tectónica transcurrente favorece también el desarrollo de fracturamiento que sirve como canal de circulación de fluidos y fallas sobre las que se localizan algunas fuentes termales (Thouret *et al.*, 1990; Borrero *et al.*, 2009). De acuerdo con Bohórquez *et al.* (2005), el régimen actual del marco tectónico del sector que encierra la cadena volcánica más septentrional de Colombia –en la que se incluye el VNR–, es originado por la colisión de la Placa Suramericana con el Bloque Panamá-Chocó, y está dominado por un conjunto de estructuras conjugadas sintéticas y antitéticas que responden de forma general al tensor de esfuerzos regional (con un  $\sigma_1$  en dirección NW-SE). Además estos autores relacionan las fallas longitudinales y transversales con la presencia de los volcanes, fuentes termales y yacimientos minerales.

Respecto del tema geotérmico, en Colombia no existe generación de energía eléctrica a partir de este recurso del subsuelo, pero la inquietud mundial por el acelerado proceso de cambio climático ha provocado interés en las fuentes no convencionales de energía, como los recursos geotérmicos, cuyo potencial está asociado principalmente a zonas de volcanismo activo. Con este

propósito, las entidades estatales y la empresa privada desarrollan estudios de prefactibilidad en diferentes sitios que presentan anomalías térmicas. El sistema geotérmico ubicado en los alrededores del Volcán Nevado del Ruíz (VNR) es uno de los sectores de interés actual para la generación y producción de este tipo de energía.

El presente trabajo tiene como objetivo aportar a la exploración geotérmica a partir del análisis de geología estructural, incluyendo la cinemática de las estructuras y su relación con el Volcán Nevado del Ruíz. Con el análisis estructural se presenta una propuesta de zonas potenciales para la exploración de los sistemas geotérmicos.

## METODOLOGÍA

Este estudio se realizó a partir de la revisión de información existente sobre tectónica, geología estructural, estratigrafía y vulcanología para la Cordillera Central y la zona del VNR. Las estructuras de la zona de trabajo se delinearon en modelos de elevación digital (DEM) obtenidos de la página de la NASA y fotografías aéreas a color, en escala 1:15.000. En campo se tomaron datos estructurales de diaclasas, foliación y planos de falla con estrías, con el fin de realizar un análisis de la deformación frágil a partir de los datos microestructurales colectados para el presente artículo y por el grupo de trabajo de INGEOMINAS que lleva a cabo estudios de exploración geotérmica en el país y en forma específica en la zona del VNR (López, 2010).

Para realizar el análisis microestructural se llevó a cabo el levantamiento sistemático de planos con estrías de falla, los cuales no abundan en la zona, debido a aspectos climáticos de alta humedad que generan espesos suelos y abundante vegetación. Los datos de estrías fueron procesados para deducir el campo de esfuerzos que las generó o tensor de paleoesfuerzos asociado, así como la cinemática de las estructuras producidas durante la deformación. Para la determinación del sentido del desplazamiento de las fallas se utilizaron indicadores cinemáticos como estructuras tipo riedel, superficies estriadas y escalones.

Con la información obtenida en campo se realizó el procesamiento de los datos de diaclasas y estrías utilizando el *software* Tectonics FP (Reiter y Acs, 2000) que es un programa de uso fácil, útil para el análisis de la orientación de datos espaciales, a través de representación en diagramas rosa y red estereográfica, así como para el cálculo de paleoesfuerzos con información de fallas,

usando métodos gráficos o matemáticos. Los datos de entrada y almacenamiento que requiere el programa, son: - buzamiento (*dip direction*), -inclinación del plano (*dip*), dirección de inmersión o *plunge* (azimuth) e -inmersión o *plunge* para las lineaciones (estrias de falla). El valor válido para buzamiento y dirección de inmersión de líneas es de 0 a 359° contados en el sentido del reloj desde el norte; el ángulo de inclinación del plano y de *plunge* de línea debe ser entre 0° y 89°. Para las fallas, también se debe registrar el sentido relativo de deslizamiento (normal/inversa/dextral/sinistral) (Ortner *et al.*, 2002).

El tensor de paleoesfuerzos se obtuvo con el método de diedros rectos, el cual guarda una cierta similitud con el procedimiento de cálculo de los mecanismos focales de terremotos; con un plano auxiliar perpendicular a la estria de deslizamiento, la región en torno a una falla queda dividida en cuatro diedros rectos. El esfuerzo principal mayor  $\sigma_1$  queda contenido en los diedros de compresión y el menor  $\sigma_3$  en los de extensión. La superposición de los diedros de compresión y de extensión de todas las fallas de una población, define la orientación más probable de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , respectivamente. La aplicación calcula, para cada dirección del espacio, el porcentaje de fallas incluidas en el diedro de extensión; el valor máximo corresponderá a la posición óptima del eje de extensión y el mínimo al de compresión (Casa *et al.*, 1990). La razón para la utilización del método de los diedros rectos, es la facilidad de ver rápidamente, la orientación aproximada de los ejes de esfuerzos capaces de explicar el conjunto de fallas analizadas. El problema principal del método, estriba en la imposibilidad de separar las fallas compatibles con tensores de esfuerzos diferentes (Casa *et al.*, 1990; Vicente *et al.*, 1992).

El resultado del análisis e interpretación de los datos estructurales se plasmó en un mapa que presenta los rasgos principales con cinemática y campo de esfuerzos asociados, así como la relación con las fuentes termales y zonas de alteración hidrotermal, con el fin de visualizar la relación existente entre las fallas y el sistema geotérmico VNR.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio hace parte de la cadena volcánica activa más norte de la Cordillera Central Colombiana, donde el ambiente tectónico es el resultado de la convergencia de las placas Suramérica, Caribe, y Nazca y las microplacas de Coiba y Panamá (Taboada *et al.*, 2000, Bohórquez *et al.*, 2005). Esta interacción

es la responsable de los diferentes estilos estructurales presentes en la región y la convergencia entre las placas de Nazca y Suramérica de la generación de volcanismo a lo largo de la cordillera (Pennington, 1979; Taboada *et al.*, 2000).

Litológicamente, el sector se encuentra dominado por la presencia de unidades metamórficas e ígneas con diferentes grados de deformación, como lo son el Complejo Cajamarca, que constituye el núcleo de la Cordillera Central (González, 1993), el Complejo Quebradagrande (Maya y González, 1995) localizado al occidente de la Zona de Falla de San Jerónimo (Cuéllar *et al.*, 2003), la Milonita Granítica de Guacaica (Cuéllar *et al.*, 2003, López *et al.*, 2007), el Batolito del Bosque (Barrero y Vesga, 1976) y Tonalita Granodiorita de Manizales, haciendo referencia a esta unidad litoestratigráfica en el sentido definido por López y Aguirre (2005) - y que ha sido denominada antes como Stock de Manizales (Mosquera, 1978), Granodiorita de Manizales (González y Londoño, 2002) o Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales (Plazas, 2010). Estas rocas se encuentran cubiertas en forma discordante por depósitos piroclásticos y flujos de lava producidos principalmente por la actividad de los volcanes Cerro Bravo, Santa Isabel y Nevado del Ruíz (FIGURA 1). La historia eruptiva del Volcán Nevado del Ruíz comenzó hace 1.8 Ma y ha pasado por tres estados eruptivos constituidos por el Ruíz ancestral, viejo y presente (Thouret *et al.*, 1990).

A nivel regional, el marco tectónico está caracterizado por el desarrollo de un fallamiento dominado por estructuras N-S, denominado por algunos autores como el “Sistema de Fallas de Romeral”, pero correspondiente a las fallas Cauca-Almaguer, Silvia-Pijao y San Jerónimo de Maya y González (1995), estructuras a las que preferiblemente se hará relación en este trabajo. La Falla San Jerónimo corresponde a la estructura más oriental, marca el contacto entre el Complejo Cajamarca al oriente y el Complejo Quebradagrande al occidente y tiene expresión en el área de trabajo. Las estructuras NE-SW se relacionan con el sistema de Fallas de Palestina, que al igual que las anteriores coinciden en su dirección con la tendencia general del sistema tectónico andino (Page, 1986). Otras fallas importantes corresponden a las de orientación NW-SE a EW, como las fallas Villamaría – Termales, Campoalegrito, Río Claro, Campoalegre, San Eugenio, Nereidas y San Ramón, y algunos lineamientos en el complejo volcánico Ruíz-Tolima (González, 2001), además de la Falla de Santa de Rosa, con orientación N70°E (Bohórquez *et al.*, 2005).

## MAPA GEOLÓGICO - ESTRUCTURAL

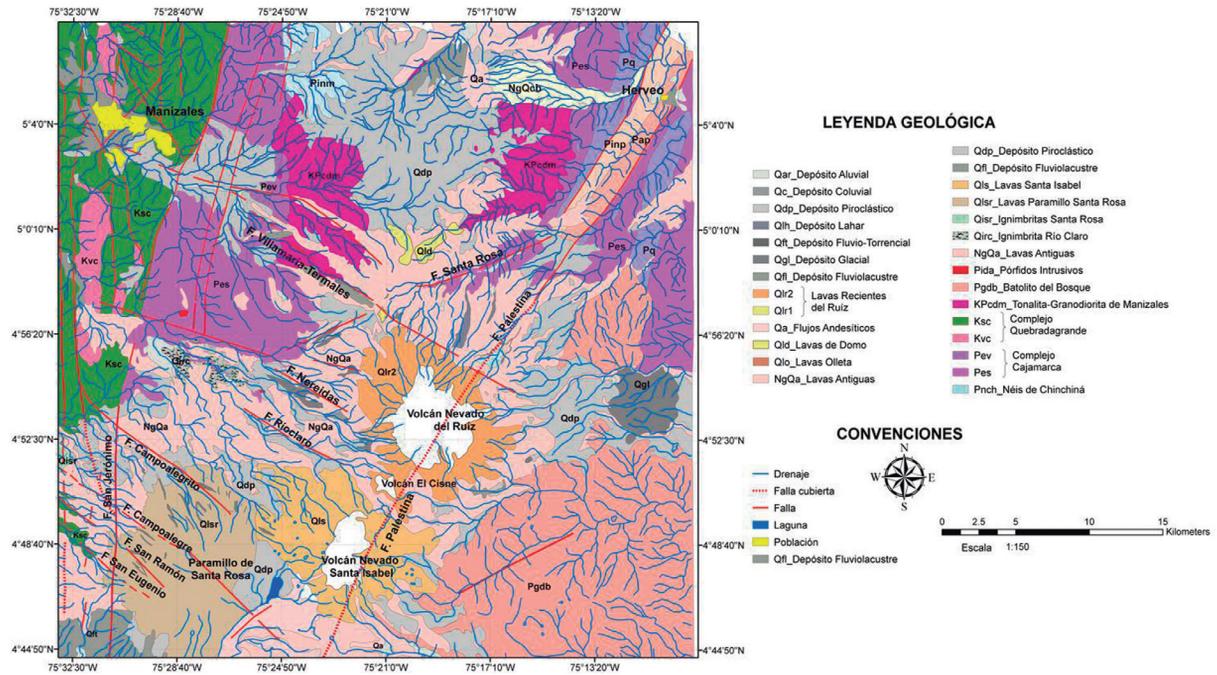


FIGURA 1. Mapa geológico regional en el sector del VNR. Modificado de González (2001).

Adicionalmente, algunos de los edificios volcánicos, como el Ruíz, El Cisne y Santa Isabel, se presentan alineados en dirección NE-SW, que coincide perfectamente con la prolongación al suroeste del trazo de la Falla de Palestina (CHEC, 1983; González y Jaramillo, 2001; Cárdenas, 2004; Cárdenas *et al.*, 2004; Acosta *et al.*, 2007).

### GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la zona de estudio se destacan tres sistemas de fallas, uno de dirección longitudinal N-S a NNE que coincide con la orientación de la Cadena Andina, los otros dos sistemas son transversales al anterior y tienen direcciones NW y E-W a ENE. La orientación N-S es más continua y consta de varios ramales subparalelos. En dirección WNW-ESE y ENE-WSW se presentan rasgos discontinuos y más cortos.

En el primer grupo se encuentran las fallas de Palestina y San Jerónimo, las cuales tienen una expresión geomorfológica evidente, con cuchillas, quiebres de pendientes y drenajes deflectados y rectilíneos. Se observan zonas de cizalla caracterizadas por sectores muy fracturados y plegados, además de movimientos en masa, asociados al trazo de las fallas. Localmente, las rocas presentan ornamentación y texturas que

evidencian la influencia de las fallas, entre las que se pueden mencionar estrías, cizallamiento y alineación de minerales. El segundo sistema de fallas está representado por las fallas de Villamaría-Termalés, Río Claro, San Eugenio, Campoalegrito, Campoalegre, Nereidas y San Ramón (FIGURA 2), las cuales son de gran interés en la zona de estudio debido a que la mayoría parece estar asociada a los conos volcánicos recientes y a las fuentes termalés. Al último sistema pertenecen la Falla Santa Rosa que ejerce control sobre el cauce del río Gualí y corta en este sector la Falla Palestina (López, 2010).

### Fallas

A continuación se presentarán las descripciones de las fallas y lineamientos observados en la zona de estudio (FIGURA 2).

**Falla Palestina:** es una falla con desplazamiento lateral derecho y dirección general N10°-30°E. Su rumbo coincide con la alineación de los focos volcánicos del Ruíz, El Cisne y Santa Isabel y constituye una zona de alimentación de la actividad volcánica que se desarrolla desde el Terciario (CHEC, 1983; González y Jaramillo, 2001; Cárdenas, 2004; Cárdenas *et al.*, 2004; Acosta *et al.*, 2007) (FIGURA 3a).

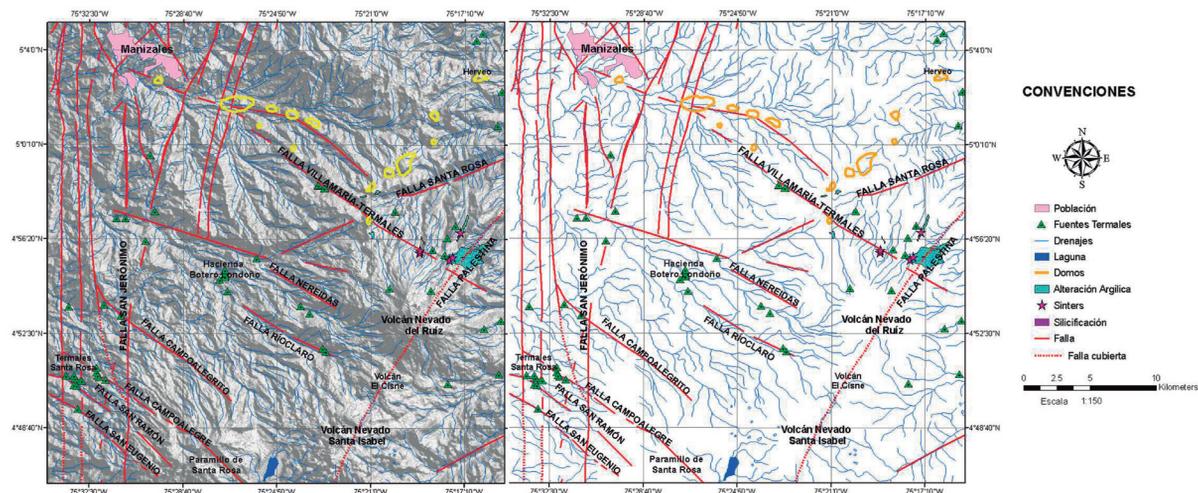


FIGURA 2. Mapa estructural con fallas y lineamiento obtenidos de modelos digitales del terreno y fotografías aéreas. Se destaca ubicación de fuentes termales y domos volcánicos.

**Falla San Jerónimo:** se relaciona como un trazo del denominado “Sistema de Fallas de Romeral” compuesta por numerosas fallas paralelas a sub-paralelas en dirección N-S principalmente (FIGURA 3b). En el área, la Falla de San Jerónimo es inversa con desplazamiento lateral izquierdo; pone en contacto las rocas metamórficas continentales paleozoicas del Complejo Cajamarca al este, con rocas de afinidad oceánica y edad Cretácica del Complejo Quebradagrande al occidente (Maya y González, 1995). Cuéllar *et al.*, (2003) establecieron en cercanías de Manizales dos estadios generales de deformación para esta falla; el primero caracterizado por movimientos subhorizontales dextrales y el segundo por movimientos subverticales inversos, compatibles con un modelo tectónico de transpresión dextral. En el área de estudio la Falla San Jerónimo, tiene una dirección N5°E/80°E, con evidencia geomorfológica muy fuerte y zonas de brechas y milonitas asociadas de espesores variables.

**Falla Santa Rosa:** la cinemática de esta estructura se ha reportado con distinto movimiento en rumbo: -con desplazamiento lateral derecho por Guzmán *et al.* (1998) y -lateral izquierdo con componente normal en Bohórquez *et al.* (2005); sin embargo, en el área de estudio esta falla presenta una cinemática inversa con componente lateral derecha, la cual controla el cauce del río Gualí con una dirección de aproximadamente N60°-70°E (FIGURA 3c) y define el límite entre domos volcánicos y cuellos volcánicos inactivos (Cárdenas, 2004).

**Falla Villamaría - Termales:** es una falla normal con dirección WNW (FIGURA 3d), asociada con el

emplazamiento de domos como Sancancio, Gallinazo y Tesorito a lo largo del rumbo de esta estructura (González y Jaramillo, 2001).

**Fallas NW-SE a E-W:** son fallas que se reconocen especialmente al oeste del VNR y que controlan los canales de los ríos Campoalegre, San Eugenio, San Ramón, Campoalegrito, Nereidas y Río Claro, de donde derivan sus nombres. Estas fallas tienen control sobre las fuentes termales localizadas en el área de San Vicente, Santa Rosa y Botero Londoño (FIGURAS 3e y 3f).

### Análisis por sectores

Se realiza un análisis estructural en sectores con suficientes datos para procesar y obtener un campo de esfuerzos. Se considera además, que los datos representen en lo posible la misma litología y que el sector se pueda relacionar con el trazo de fallas específicas. En este caso, se calculó el tensor de paleoesfuerzos, a partir del análisis de los datos de estrías de fallas colectados en los sectores de La Florida, Río Azufrado-La Hedionda, Barro Azul y Termales del Ruíz (FIGURA 4), donde se identificaron trazos relacionados con las fallas de Santa Rosa, Palestina, San Jerónimo y Villamaría-Termales, respectivamente.

**Sector La Florida:** se localiza al NE del Volcán Nevado del Ruíz, en el cañón del río Gualí, cuyo cauce es controlado por la Falla Santa Rosa. En esta zona afloran rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (principalmente esquistos cuarzo grafitosos), conformando una geomorfología abrupta, con pendientes moderadas a altas (>40°), cubiertas

parcialmente por flujos de lavas, depósitos piroclásticos y puntualmente depósito de lahar. Las mediciones de estrías de falla se efectuaron sobre esquistos del Complejo Cajamarca, en su mayoría sobre los planos de foliación, destacándose un fallamiento con cinemática lateral derecha. Para esta zona se encontró

un tensor de paleoesfuerzo con  $\sigma_1$  en dirección SW-NE, con la incertidumbre dada por la imposibilidad de separar en el análisis las estrías de fallas asociadas a los diferentes eventos tectónicos que han afectado las rocas del Complejo Cajamarca y las rotaciones de bloques que hayan sucedido.



**FIGURA 3.** Vista panorámica y de afloramiento del área de influencia de los trazos de los principales sistemas de falla. a) Control estructural del río Azufrado y afloramiento de lavas recientes diaclasas afectadas por la Falla Palestina. b) Afloramiento de esquistos negros del Complejo Cajamarca afectados por la Falla San Jerónimo en el sector de Barro Azul. c) Trazo de Falla Santa Rosa controlando el río Gualí en el sector de la Florida. d) Trazo de la Falla Villamaría en el sector de Termaleles del Ruíz, domos alineados controlados por esta misma falla y afloramiento con alteración hidrotermal. e) Control estructural del río Campoalegrito y metadiabasas afectadas frágilmente por la Falla Campoalegrito. f) Grietas de tensión en pórfidos sobre el río San Eugenio afectados por la falla del mismo nombre.

**Sector río Azufrado-La Hedionda:** se localiza al NW del VNR en la vía que conduce de Brisas al municipio de Murillo, en el cauce del río Azufrado y quebrada La Hedionda. Este sector está influenciado por la Falla Palestina y afecta lavas recientes de la actividad del Complejo Volcánico Ruíz-Tolima, en las cuales se identificaron hasta cinco familias de fracturas y alteración argílica moderada a alta. Para esta zona se tiene un régimen distensivo con  $\sigma_1$  en la dirección SE-NW y  $\sigma_3$  en la dirección SW-NE.

**Sector Barro Azul:** se localiza en la vía Papayal – Nereidas, entre el sector de Barro Azul y quebrada La Parroquia, en el área de influencia de la Falla San Jerónimo, la cual delimita en esta zona el Complejo Quebradagrande al occidente y el Complejo Cajamarca al oriente. Las mediciones se realizaron en rocas del Complejo Cajamarca y pórfidos andesíticos que intruyen esta unidad. Para esta zona se tiene un tensor de paleoesfuerzos en un régimen compresivo con  $\sigma_1$  en la dirección SE-NW y  $\sigma_3$  en la dirección SW-NE (FIGURA 4).

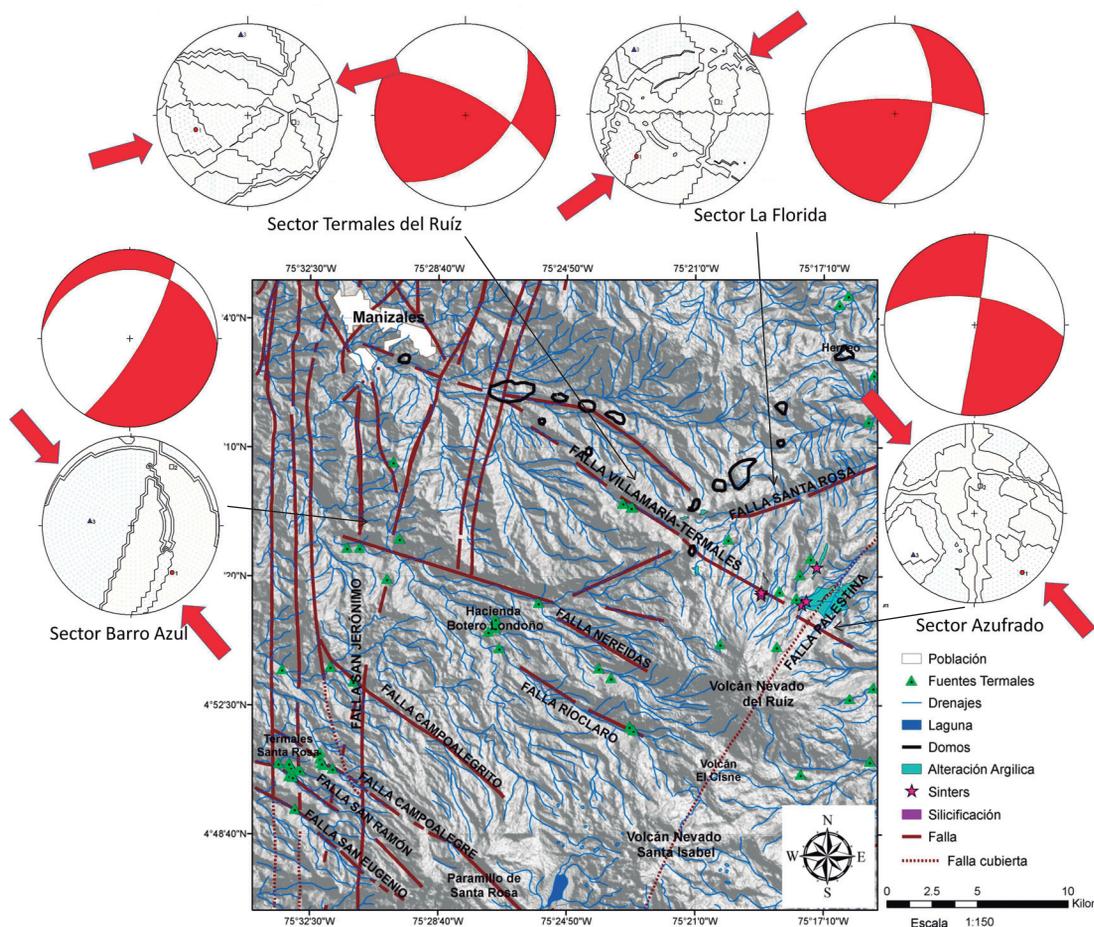


FIGURA 4. Mapa estructural y representación en diedros rectos del campo de paleoesfuerzos para el conjunto de lavas y rocas de basamento (Cretácico-Paleoceno y más antiguas) en los sectores de La Florida, Río Azufrado, Barro Azul y Termales del Ruíz, relacionados con los trazos de las fallas de Santa Rosa, Palestina, San Jerónimo y transversales NW, respectivamente.

**Sector Termales del Ruíz:** se localiza sobre la vía Gallinazo-Termales del Ruíz, en el área de influencia de la Falla Villamaría - Termales. Las mediciones se realizaron sobre rocas de la Tonalita Granodiorita de Manizales con meteorización fuerte a moderada, donde se determinaron cuatro sistemas de fracturas. En esta zona se encontró un tensor de paleoesfuerzo en un régimen extensivo con  $\sigma_1$  en la dirección SW-NE y  $\sigma_3$  en la dirección SE-NW (FIGURA 4).

## CINEMÁTICA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL - DISCUSIÓN

El conjunto total de planos estriados medidos en campo (TABLA 1), representado en un diagrama rosa (FIGURA 5), muestra relación con las fallas conocidas en la zona, principalmente con las estructuras longitudinales como Palestina (N30°). También se reconocen trazos de las fallas transversales NW y otras que en forma directa se pueden asociar con la orientación de la Falla Santa Rosa (N70°E).

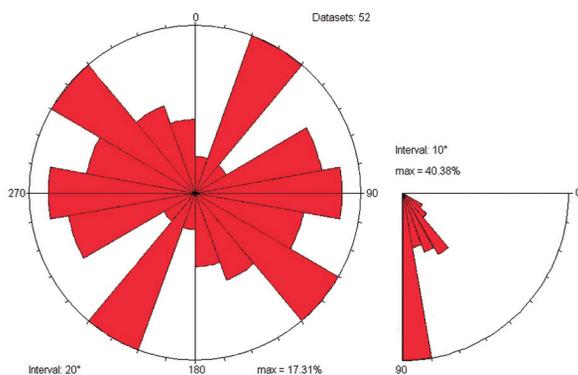


FIGURA 5. Diagrama rosa de los planos medidos con estrías de falla en las distintas unidades geológicas que afloran en el área (n=52). Predominan los rasgos asociados con las fallas longitudinales tipo Palestina, así como planos NW y W-E que se pueden asociar con las fallas transversales y con la falla Santa Rosa. Se incluye un gráfico para mostrar la predominancia de los planos con alta inclinación.

**Tabla 1.** Datos de planos y estrías de falla levantados en la zona noreste del Volcán Nevado del Ruiz. Cinemática (I:Inversa, N:Normal, D:Dextral, S:Sinestral)

ESTACIÓN	Coord. (X)	Coord. (Y)	Localidad	UNIDAD GEOLÓGICO	PLANO ESTRIADO		ESTRÍAS					
					Azimuth de Buzamiento	Inclinación	Azimuth de Plunge	Plunge	Pitch	Dirección Pitch	Cinemática	
GNR-EM-085	843108	1039693	Barro Azul	Pórfidos andesíticos	190	70	268	30				DN
GNR-EM-085	843108	1039693	Barro Azul	Pórfidos andesíticos	190	70	263	40				I
OL-225049	842563	1039209	Barro Azul	Complejo Cajamarca	110	88			76	S		SI
T-EM-056	854977	1042413	Sector Termales del Ruiz	Stock de Manizales	220	55	308	4				SN
T-EM-056	854977	1042413	Sector Termales del Ruiz	Stock de Manizales	152	70	219	47				DN
T-EM-057	854898	1042964	Sector Termales del Ruiz	Stock de Manizales	6	80	284	40				D
GNR-EM-180	864561	1042184	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	212	55	150	33				DI
GNR-EM-181	863732	1042191	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	0	89	270	30				DN
GNR-EM-181	863732	1042191	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	128	50	145	49				DN
GNR-EM-182	863926	1042207	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	218	50	155	29				DN
GNR-EM-182	863926	1042207	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	212	65	128	14				SN
GNR-EM-184	864190	1042235	Río Guali-Sector la Florida	Complejo Cajamarca	230	85	147	55				I
T-EM-001	842543	1041222	Barro Azul	Complejo Cajamarca	110	65	40	36				DN
T-EM-001	842543	1041222	Barro Azul	Complejo Cajamarca	130	89	46	80				DN
GNR-EM-175	836350	1032305	Sector Santa Ana	Complejo Quebradagrande	152	80	66	22				SN
GNR-EM-175	836350	1032305	Sector Santa Ana	Complejo Quebradagrande	152	80	154	80				I
GNR-EM-175	836350	1032305	Sector Santa Ana	Complejo Quebradagrande	254	89	344	02				D
GNR-EM-177	837015	1032014	Sector Santa Ana	Complejo Quebradagrande	290	30	258	26				I
GNR-EM-177	837015	1032014	Sector Santa Ana	Complejo Quebradagrande	300	55	236	32				I
GNR-EM-050	837947	1042270	Puente Río Claro	Complejo Quebradagrande	80	40	60	38				ND
GNR-EM-050	837947	1042270	Puente Río Claro	Complejo Quebradagrande	238	60	320	14				D
T-EM-031	833586	1032106	Vía Santa Rosa-Termales San Vicente	Complejo Quebradagrande	80	50	99	48				DN
OL-225033	850281	1033212	Río Claro	Lavas viejas	210	85			6	NW		SN
OL-225033	850281	1033212	Río Claro	Lavas viejas	220	82			18	NW		SN
OL-225033	850281	1033212	Río Claro	Lavas viejas	22	82			18	NW		S
OL-225033	850281	1033212	Río Claro	Lavas viejas	254	80			24	NW		S
OL-225024	857123	1027392	Santa Isabel	Lavas recientes	335	81			4	SW		SN
OL-225054	842153	1029770	Campoalegrito	Lavas viejas	110	72			30	NE		DN
OL-225054	842153	1029770	Campoalegrito	Lavas viejas	90	74			30	NE		DN
OL-206020	864148	1047372	-	Lavas viejas	236	87			30	SE		DN
GNR-EM-110	850713	1029496	Potosí	Lavas viejas	344	45	268	14				I
GNR-EM-171	839527	1029570	-	Lavas viejas	216	35	289	11				DN

ESTACIÓN	Coord. (X)	Coord. (Y)	Localidad	UNIDAD GEOLÓGICO	PLANO ESTRIADO		ESTRÍAS				
					Azimuth de Buzamiento	Inclinación	Azimuth de Plunge	Plunge	Pitch	Dirección Pitch	Cinématica
OL-225052	838566	1028198	San Vicente	Lavas viejas	345	68			24	W	I
OL-225023	859440	1037854	Vía Brisas-Murillo	Lavas recientes	3	81			78	NW	DN
OL-225018	863973	1037007	Azufrado	Lavas recientes	56	85			27	NW	I
OL-225002	860167	1033219	El Refugio	Lavas recientes	243	61			13	NW	D
OL-225002	860167	1033219	El Refugio	Lavas recientes	210	79			57	SW	DN
GNR-EM-179	860104	1039536	-	Lavas viejas	72	85	159	28			I
OL-225007	858483	1039693	Vía Brisas-Murillo	Lavas recientes	185	50			7	W	3
T-EM-039	865130	1036000	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	128	88	40	45			I
T-EM-039	865130	1036000	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	128	88	40	50			I
T-EM-039	865130	1036000	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	130	85	43	35			I
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	26	30	94	12			DN
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	0	45	86	4			D
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	4	50	90	5			D
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	350	55	267	10			D
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	356	50	270	5			D
T-EM-040	865216	1036043	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	96	40	22	13			I
T-EM-042	864856	1036133	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	348	58	64	21			DN
T-EM-042	864856	1036133	Río Azufrado-La Hedionda	Lavas Recientes	10	66	81	35			DN
OL-225011	868022	1035890	La Llorona	Lavas Recientes	198	88			30	SE	I
GNR-EM-044	862090	1042751	San Isidro	Lavas Recientes	304	78	30	20			D

Los datos de estrías medidos en las lavas producidas por el VNR (posteriores a 1.8 Ma, según Thouret *et al.*, 1990), permiten resaltar la importancia de estas unidades geológicas y asignar una edad Pleistoceno-Holoceno al campo de esfuerzos actual. Por esta razón, el análisis microestructural se llevó a cabo en dos grupos, por un lado los datos en lavas antiguas y recientes, y por otro las estrías medidas en rocas que se denominarán “de basamento” por constituir el paleorelieve de los depósitos volcánicos, es decir, rocas de la Tonalita Granodiorita de Manizales y de los complejos Cajamarca y Quebradagrande que afloran en los alrededores del VNR, entre otras.

En este último caso, el campo de esfuerzos resultante tiene mayor incertidumbre porque estaría dado por datos que pueden reflejar varios movimientos en diferentes tiempos (con rotación de bloques implícita), lo que impediría asignar una edad más probable al campo de esfuerzos obtenido. Sin embargo, en este trabajo se

intenta deducir un tensor tentativo para el basamento al asociarlo con datos levantados: - en la misma litología, - a lo largo de fallas específicas y – en sectores particulares con densidad apropiada de datos, en parte explicado antes, en la sección de Análisis por Sectores.

Los planos medidos en las lavas y representados en diagrama rosa (FIGURA 6A) muestran predominancia en su orientación al W-E, sin embargo, -aunque algo dispersos- la proyección estereográfica de los planos estriados (FIGURA 6B) destaca la relación con orientaciones propias de las fallas de Santa Rosa (N60°-70°E), transversales NW y Palestina (N30°). El campo de esfuerzos resultante del análisis de estrías muestra compresión WNW-ESE y extensión en dirección SSW-NNE (FIGURA 7), con ubicación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  hacia la horizontal, mientras el esfuerzo principal  $\sigma_2$  tiende a la vertical, distribución que se relaciona con un régimen netamente transcurrente, bajo el cual las fallas con disposición

oblicua a la compresión se moverán a lo largo del rumbo, en forma lateral derecha o izquierda según la orientación

de la estructura y la consecuente descomposición de los vectores de esfuerzo.

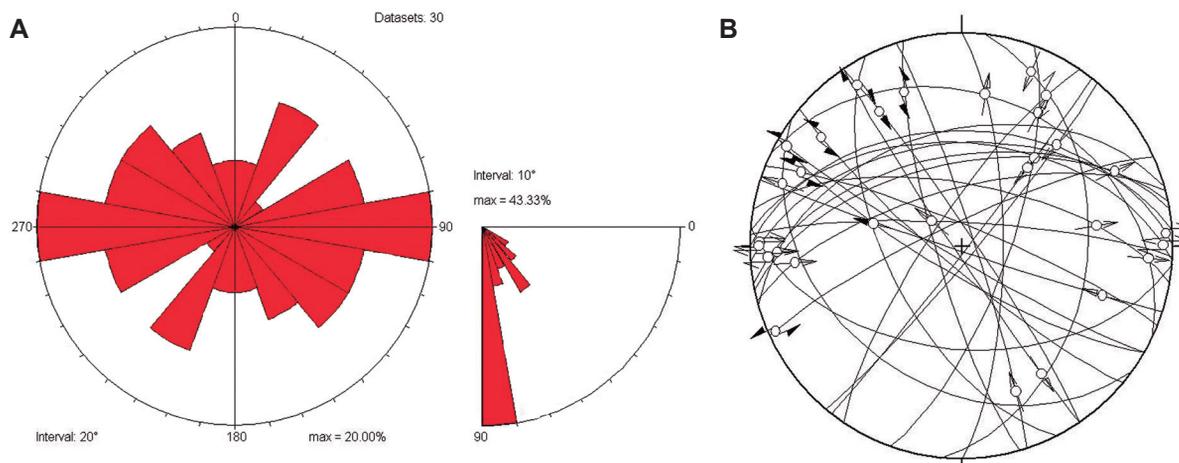


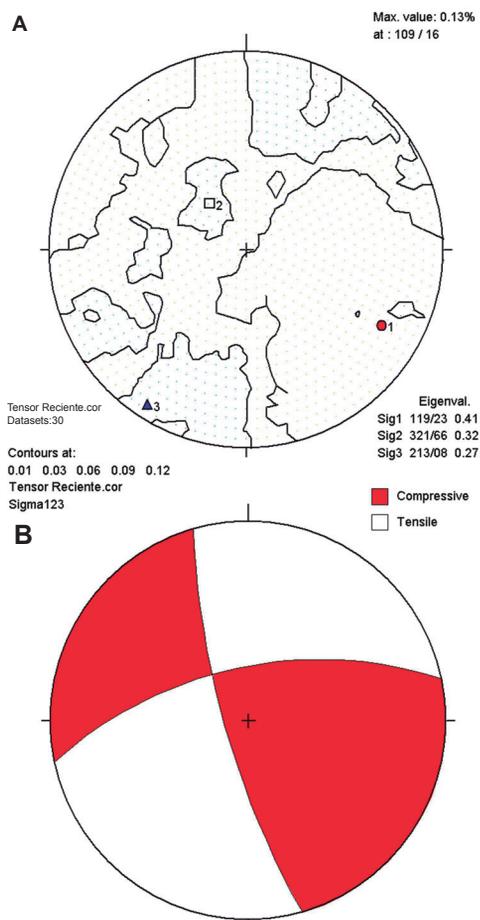
FIGURA 6. A-Diagrama rosa de los planos de falla medidos en lavas antiguas y recientes, n=30, max=20%, en la inclinaciones de los planos max=43%. B-Representación estereográfica de los planos de falla. Predominan los rasgos relacionados con las fallas transversales, pero en B se observa especial relación con la Falla Santa Rosa (N70°E), así como con Palestina (aprox. N30°E) y con las fallas NW.

Un aspecto a destacar del análisis cinemático es la configuración de diaclasas y fallas normales (estructuras abiertas o distensivas) según su disposición paralela o subparalela al máximo esfuerzo principal (elipsoide de deformación) o compresión, en este caso se hace referencia a las estructuras transversales NW, como Villamaría-Termales, San Eugenio, Campoalegrito, Ríoclaro y Nereidas (FIGURA 2). Mientras las fallas dispuestas más perpendiculares a la compresión WNW-ESE se comportan como fallas inversas con deslizamiento en el rumbo, según la dirección de la traza, como en el caso de las fallas longitudinales San Jerónimo y Palestina, cuyo desplazamiento en el rumbo es sinistral y dextral (donde el trazo en más NE), respectivamente, coherentes con los desplazamientos reportados por otros autores (Cuellar *et al.*, 2003; Cárdenas, 2004; Cárdenas *et al.*, 2004; Bohórquez *et al.*, 2005; Atehortúa y Gutiérrez, 2003; Hincapié, 2005; Suter *et al.*, 2008). Es de aclarar que la actual cinemática inversa con leve componente lateral derecho de la Falla Palestina al norte del área, corresponde con la dirección de su traza a N40°E, casi perpendicular con la orientación del esfuerzo principal  $\sigma_1$  a 120° en *azimuth*, pero es de esperar que si el mismo tensor se mantiene para el norte de la zona, -con un rumbo más N-S de la Falla Palestina-, su cinemática será inversa con componente lateral izquierdo, tal como lo reportan Paris *et al.* (2000) en su trabajo sobre fallas y pliegues del Cuaternario de Colombia.

Aunque con los datos de este estudio sólo es posible afirmar que el actual campo de esfuerzos WNW-ESE está presente desde el Pleistoceno (por la edad de las lavas con datos de estrías), es probable que el mismo, esté relacionado con la convergencia del Bloque Chocó-Panamá desde el Mioceno, como lo analizan Duque-Caro (1990) y Taboada *et al.* (2000). Esto además soportado en trabajos como Suter *et al.* (2008), que mediante cálculos de inversión de paleoesfuerzos en rocas plegadas del Oligoceno-Mioceno al norte de la cuenca del valle del Cauca (al SE del Nevado del Ruíz), encuentran una dirección de máximo esfuerzo horizontal similar a la del presente trabajo (WNW-ESE), la cual relacionan también con el choque o “indentación” del Bloque Chocó-Panamá.

Para las rocas de “basamento” se obtuvo un tensor de esfuerzos diferente al actual (FIGURA 8), situación predecible si se consideran los distintos eventos tectónicos que han afectado a la Cordillera Central. Los datos medidos sólo permiten deducir que las rocas del Tonalita Granodiorita de Manizales (Paleoceno) -emplazada durante una fase tectónica tardía coincidente con las últimas etapas de la fase tectónica transpresiva del Cretáceo Tardío (Cuéllar *et al.*, 2003) asociada a una zona de subducción-, y más antiguas (como los Complejos Cajamarca y Quebradagrande), presentan evidencia de fallas causadas por eventos tectónicos posteriores a la edad de la Tonalita Granodiorita de Manizales, quizás durante el mismo Paleoceno, y que

posiblemente fueron reactivadas posteriormente por el actual campo de esfuerzos, antes mencionado.



**FIGURA 7.** Representación del actual campo de esfuerzos, resultante del procesamiento de las estrías de falla medidas en lavas antiguas y recientes ( $n=30$ ). **A**-Diagrama de diedros rectos (círculo  $\sigma_1$ , cuadrado  $\sigma_2$  y triángulo  $\sigma_3$ ). **B**-Diedros rectos con sombras. Resulta una compresión en sentido WNW-ESE ( $120^\circ$  de *azimuth* para  $\sigma_1$ ) que implica una deformación en corteza de fallas rumbo deslizantes ( $\sigma_1$  cercano a la horizontal y  $\sigma_2$  cercano a la vertical).

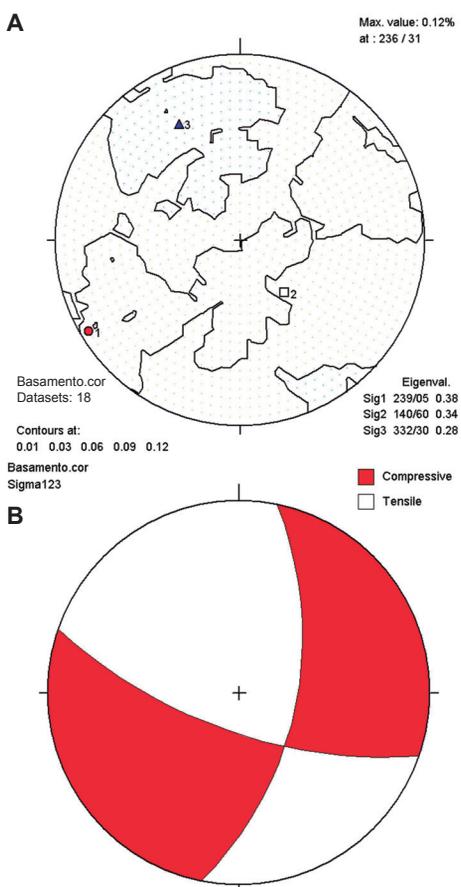
El campo de paleoesfuerzos obtenido para el “basamento” muestra compresión WSW-ESE (con  $\sigma_1$  a  $240^\circ$  de *azimuth*) y extensión NNW-SSE (FIGURA 8), con los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  cercanos a la horizontal y  $\sigma_2$  a la vertical, distribución relacionada con un ambiente transcurrente que debió imprimir en su momento un desplazamiento de rumbo lateral derecho a las fallas longitudinales N-S. La dirección de esta compresión WSW-ESE se asocia con la convergencia oblicua de la Placa Farallón antes del Eoceno, dado que las rocas de basamento más jóvenes, donde se midieron estrías, son de la Tonalita Granodiorita de Manizales de edad Paleoceno (López

y Aguirre, 2005) y en la zona no afloran rocas que hayan registrado la deformación regional del Eoceno relacionada con el levantamiento de la Cordillera Central. Volviendo a la Falla de Palestina, la dirección del compresión del “basamento” en sentido WSW-ESE puede explicar la cinemática con fuerte componente lateral derecho de esta falla reportada por Feininger (1970), movimiento que cambia a lateral izquierdo en la mayor parte de los segmentos de la estructura, mínimo desde el Pleistoceno, como lo anotan Paris, *et al.* (2000), -se debe aclarar que en su trabajo reportan un rumbo menor en *azimuth* a  $N30^\circ E$  para esta falla-, por efecto del actual tensor WNW-ESE ( $120^\circ$  en *azimuth*), el cual favorece el movimiento sinistral en los segmentos de esta falla que se orienten más al N-S.

Resultados comparables de la actual dirección de compresión han sido obtenidos en trabajos anteriores, como Taboada *et al.* (2000) y Cortés *et al.* (2005), este último con abundantes datos de microtectónica en rocas sedimentarias de la Cordillera Oriental a una latitud cercana a los  $5^\circ N$  (similar al VNR). Cortés *et al.* (2005) muestran también la dirección de compresión WNW-ESE desde el Pleistoceno y entre otras, una dirección comparable con la compresión WSW-ESE que asignan al Paleoceno tardío.

## RELACIÓN FALLAS CON EL SISTEMA GEOTÉRMICO VNR

El actual campo de esfuerzos y su efecto en deformación frágil, así como la dirección de las distintas fracturas generadas o reactivadas, definen en el área del VNR, algunos sectores favorables para el tránsito de fluidos, como el agua termal (FIGURA 9). Estos resultados constituyen un insumo importante para la exploración detallada del recurso como generador de energía eléctrica. Se presenta un mapa estructural y una propuesta de zonas potenciales para el flujo de calor y tránsito de fluido (FIGURA 9), donde se destacan las estructuras paralelas al esfuerzo principal  $\sigma_1$  o dirección de compresión, es decir aquellas de orientación NW-SE, las cuales se comportan como diaclasas abiertas o fallas normales, en la mayoría de los casos con algún movimiento de rumbo lateral izquierdo. A lo largo de algunas de estas estructuras transversales NW-SE, también se ha presentado emplazamiento de domos volcánicos (González y Jaramillo, 2002; Borrero *et al.*, 2009; Thouret *et al.*, 1990).



**FIGURA 8.** Representación de antiguo campo de esfuerzos resultante del procesamiento de los planos estriados medidos en rocas de basamento (Complejos Cajamarca y Quebradagrande, Tonalita Granodiorita de Manizales) (n=18). **A**-Diagrama de diedros rectos (círculo  $\sigma_1$ , cuadrado  $\sigma_2$  y triángulo  $\sigma_3$ ). **B**-Diedros rectos con sombras. Resulta una compresión en sentido WSW-ENE ( $240^\circ$  de *azimuth* para  $\sigma_1$ ) que implica un régimen transcurrente.

Por su carácter distensivo, las fallas transversales con dirección NW-SE pueden permitir el paso de fluidos, al igual que las fallas longitudinales de orientación NE-SW asociadas a la Falla Palestina, por involucrar en los sectores del río Azufrado y quebradas La Hedionda y Aguas Calientes, andesitas fuertemente fracturadas y depósitos espesos de lahar con alta porosidad.

La interrelación entre la cinemática de las distintas fallas bajo el actual campo de esfuerzos (descomposición de vectores: -esfuerzo máximo horizontal, -esfuerzo normal a la estructura y -esfuerzo de cizalla), induce en algunos sectores una tectónica de escape a pequeña escala (FIGURA 9), donde el desplazamiento de algunos “bloques” a lo largo de fallas colindantes provoca apertura de algunas esquinas y cierre de otras, es decir, se produce sintaxis compresional y dilatacional, -citando un ejemplo regional de Rossello *et al.* (2004). Las

fuentes termales afloran concentradas en estas esquinas abiertas, al igual que a lo largo de algunas de las fallas transversales NW-SE y su intersección con estructuras N-S a NE-SW.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el sistema geotérmico del Volcán Nevado del Ruíz se identificaron tres direcciones estructurales dominantes; la primera con tendencia N-S, la segunda con rumbo WNW-ESE y la última orientada ENE-WSW. La orientación N-S es más marcada y consiste en varios ramales subparalelos. Las tendencias WNW-ESE y ENE-WSW son más cortas y contienen fuentes termales asociadas.

El campo de esfuerzos resultante para el Cuaternario tiene una dirección de compresión en sentido WNW-ESE ( $\sigma_1$  a  $120^\circ$  en *azimuth*) que puede estar relacionado con la convergencia del Bloque Chocó-Panamá desde el Mioceno, que según Taboada *et al.* (2000) produce un tensor actual de esfuerzos con compresión a  $125^\circ$  (por mecanismos focales).

La distribución actual de los esfuerzos principales está relacionada con un ambiente transcurrente, donde la mayor parte de las fallas orientadas de manera oblicua a la compresión, adquieren un componente de desplazamiento a lo largo del rumbo, así: -San Jerónimo inversa con deslizamiento lateral izquierdo, -Santa Rosa inversa con rumbo lateral derecho, - Palestina inversa con leve desplazamiento derecho y -fallas transversales NW como fallas normales con componente lateral izquierdo, la mayoría.

Se obtuvo un campo de esfuerzos para las rocas de “basamento” del Cretácico-Paleoceno y anteriores, con una dirección de compresión WSW-ENE (con  $\sigma_1$  a  $240^\circ$  de *azimuth*), la cual se asume relacionada con un evento de deformación anterior al Eoceno, quizás del Paleoceno (posterior a la edad de la Tonalita Granodiorita de Manizales), posiblemente por la convergencia de la Placa Farallón antes de su fragmentación en Nazca y Cocos. Este tensor debió facilitar movimientos de rumbo lateral derecho en las estructuras longitudinales de la Cordillera Central, tales como San Jerónimo y Palestina, en concordancia con Feininger (1970), desplazamiento que sin embargo ha variado bajo el actual campo de esfuerzos.

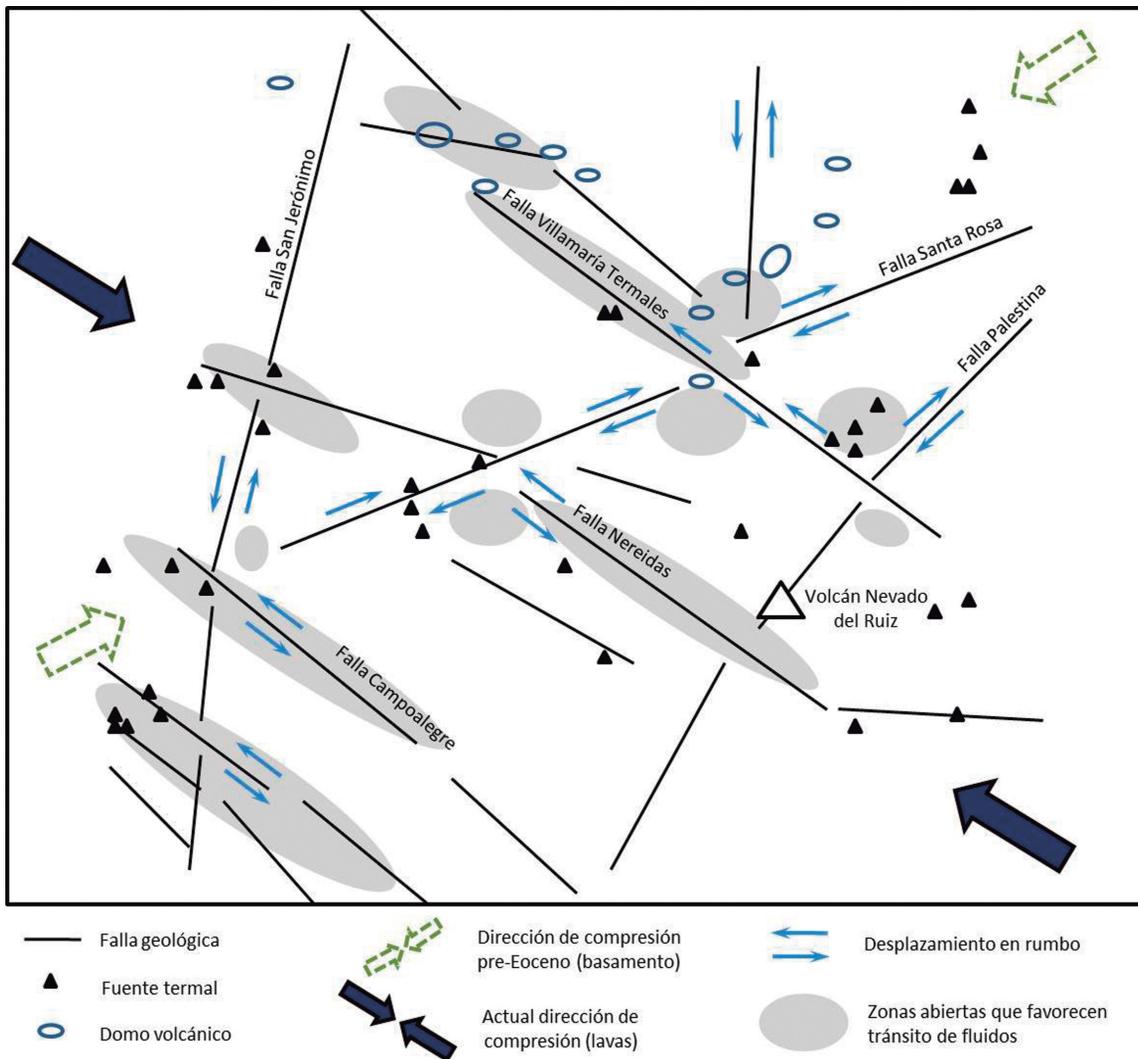
Teniendo en cuenta el actual campo de esfuerzos y su efecto en deformación frágil, así como la dirección de las distintas fracturas generadas o reactivadas y la

configuración de una tectónica de escape, es posible definir para el área de estudio, algunos sectores donde se favorece el tránsito de fluidos, como el agua termal (FIGURA 9). Estos resultados constituyen un insumo importante para la exploración detallada del recurso como generador de energía eléctrica.

Se propone intensificar la exploración geotérmica en los sectores demarcados en la FIGURA 9, siempre y cuando no estén ubicados en zonas con restricciones ambientales, como zonas de páramo. Con este tipo de estudios es posible ubicar sectores atractivos para

otros usos del recurso geotérmico como balneología, calefacción o invernaderos, incluso detectar zonas de recarga de aguas subterráneas o de emplazamiento de cuerpos mineralizados.

Se sugiere incrementar los estudios geofísicos y pozos de perforación en el área del sistema geotérmico VNR, enfocados a determinar con mejor precisión las características de las zonas de falla en profundidad y así mejorar los modelos de exploración y explotación del recurso energético.



**FIGURA 9.** Mapa estructural y propuesta de zonas potenciales de fácil tránsito de fluidos bajo la actual dirección de compresión WNW-ESE. Las fallas y fracturas dispuestas en forma paralela al tensor de compresión se consideran abiertas y es allí donde coincide el afloramiento de fuentes termales o el emplazamiento de domos volcánicos (representados por elipses alargadas). La distribución de la deformación transmite movimientos de rumbo a lo largo de la mayoría de fallas y en algunos sectores se puede presentar una tectónica de escape a pequeña escala (representada por elipses pequeñas), que provoca apertura y fácil flujo de líquidos. El mapa también incluye la dirección de paleoesfuerzos según los datos medidos en rocas de la Tonalita Granodiorita de Manizales y complejos Quebradagrande y Cajamarca, por lo que se asume correspondencia con un evento de deformación anterior al Eoceno.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo hace parte de los resultados obtenidos para “Programa estratégico para la investigación y modelamiento del Sistema Hidrotermal-magmático en áreas con potencial geotérmico localizadas en el flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia” (Contrato de financiación 762 de 2009) que con el apoyo de COLCIENCIAS llevan a cabo la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS) e ISAGEN S.A. E.S.P. Agradecemos al proyecto de exploración de recursos geotérmicos de INGEOMINAS, en especial a su coordinadora, química Claudia Alfaro, así como al geólogo Iván Darío Ortiz por el acompañamiento en las labores de campo. Especial gratitud con los geólogos John Forero y Lorena Rayo por su colaboración en este trabajo. También se agradecen los comentarios constructivos de los evaluadores anónimos.

## REFERENCIAS

- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., and Mora, H. 2007. Strike-Slip deformation within the Colombian Andes. From: Ries, A. C., Butler, R. W. H. and Graham, R. H. (eds) 2007. Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward. Geological Society, London, Special Publications, 272, 303-319.
- Atehortúa F., y Gutiérrez G. 2003. Análisis estructural de las rocas aflorantes en los alrededores de la Falla Silvia-Pijao al oeste de Manizales. Tesis pregrado, Universidad de Caldas, CD-ROM. Manizales.
- Ayaz A., M., Sánchez, P., y Parada, A. 2010. Interplay of Volcanism and Structural Control in Defining the Geothermal System(s) along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, in the South-Central Chile. GRC Transactions, 34: 747-750.
- Barrero, D., y Vesga, C. J. 1976. Mapa geológico del cuadrángulo K-9 Armero y parte del J-9 La Dorada. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.
- Bohórquez, O., Monsalve, M. L., Velandia, F., Gil-Cruz, F., y Mora, H. 2005. Determinación del Marco Tectónico Regional para la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia. Boletín de Geología, UIS, 27 (44): 55-79.
- Borrero, C., Toro, L. M., Alvarán, M., and Castillo, H. 2009. Geochemistry and tectonic controls of the effusive activity related with the ancestral Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Geofísica Internacional*, 48 (1): 149-169.
- Cárdenas, P. 2004. Modelo y Cartografía Estructural del Sistema de Fallas de Palestina en Sector del Parque Natural de los Nevados. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, 103p.
- Cárdenas, P., Ocampo, P., Cocuy, C., Garcés, J. F., y Marín, L. 2004. Modelo y Cartografía Estructural del Sistema de Fallas de Palestina y Mulatos. INGEOMINAS. Bogotá, 104p.
- Casa, A. M., Gil, I., y Simón, J. 1990. Los Métodos de Análisis de Paleoesfuerzos a partir de Poblaciones de Fallas: Sistemática y Técnicas de Aplicación. Estudios geológicos, 46: 385-398.
- CHEC S.A. 1983. Investigación Geotérmica Macizo Volcánico del Ruiz. Vol I. Informe Final. 127 p.
- Cortés, M., Angelier, J., and Colletta, B. 2005. Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 24, 27: TC1008, doi:10.1029/2003TC001551.
- Cuéllar, M., Sánchez, C. y Vañencia, M. 2003. Caracterización petrográfica y deformativa de las rocas aflorantes en los alrededores de la Falla San Jerónimo, al este del Municipio de Manizales. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, 179p.
- Duque-Caro, H. 1990. El Bloque del Chocó en el noroccidente Suramericano: Implicaciones estructurales tectonoestratigráficas y paleogeográficas. Boletín Geológico. INGEOMINAS. 31 (1): 47-71.
- Faulds, J., Coolbaugh, M., Bouchot, V., Moeck, I., and Oğuz, K. 2010. Characterizing structural controls of geothermal reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: Developing successful exploration strategies in extended terranes. Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 11p.
- Feininger, T. 1970. The Palestina Fault, Colombia. Geological Society American. Bull. 81: 1201 – 1216.
- González, H. 2001. Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Memorias explicativas de los mapas. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. 120p
- González, H. 1993. Mapa geológico de Caldas, escala 1:250.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Bogotá, 62p.
- González, H., y Londoño, A.C. 2002. Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia. Granodiorita

- de Manizales (K2E1gdm). (Stock de Manizales). Cordillera Central. Departamento de Caldas. Comisión Estratigráfica de INGEOMINAS. 17p.
- González, L., y Jaramillo, C. 2001. Estudio neotectónico multidisciplinario aplicado a la Falla Villamaría Termales. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, 168p.
- Guzmán, G., Franco, G., y Ochoa, M. 1998. Proyecto para la mitigación y el riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa. Evaluación Neotectónica. CARDER. Pereira, 144p.
- López, J. 2010. Análisis Estructural de fracturas zona Nevado del Ruiz – Santa Rosa de Cabal. Informe Interno, INGEOMINAS. Bogotá. 34p.
- López, J.A., y Aguirre, R. 2005. Tonalita Granodiorita de Manizales: Revisión formal de la nomenclatura litoestratigráfica de la Granodiorita de Manizales (Stock de Manizales). Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá. CD Room.
- López, J., Cuéllar, M., Aguirre, R., Valencia, M., y Sánchez, C. 2007. Evidencias petrográficas y de campo de una intrusión sintectónica en la Cordillera Central de Colombia: el caso de la Milonita Granítica del Guacaica: Memorias XI Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga. CD Room.
- Maya, M., y González, H. 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, 35 (2-3): 43-57.
- Mosquera, D. 1978. Geología del Cuadrángulo K-8 Manizales. Informe preliminar 1763. INGEOMINAS.
- NASA. 2005. Shuttle Radar Topography Mission: Instruments (versión 06 August 2008). <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instr.htm>
- Ortner, H., Reiter, F., and Acs, P. 2002. Easy handling of tectonic data; the programs TectonicVB for Mac and TectonicsFP for Windows. Shareware and freeware in the geosciences; II, A special issue in honour of John Butler. Pergamon, New York- Oxford-Toronto, International.
- Page, W. 1986. Geología sísmica y sismicidad al noroeste de Colombia. Integral, Medellín. 155p.
- París, G., Machette, M., Dart, R., y Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its offshore Regions. U. S. Geological Survey. Open Report 00-284, 66p.
- Pennington, W. 1979. The subduction of the eastern Panamá Basin and the seismotectonics of northwestern south América. Tesis doctoral, University Wisconsin Madison, 108p.
- Plazas, J.M. 2010. Caracterización Petrográfica y Termobarométrica del Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, pp. 1-21 y Anexos.
- Reiter, F., and ACS, P. 2000. Tectonics FP. Software for Structural Geology. Microsoft Windows.
- Rossello, E.A., Nevistic, V.A., Araque, L., Bettini, F., Bordarampé, C., Castro, E., Colo, C., Córscico, S., Covellone, G., Haring, C., Pina, L., Pinilla, C., Ruiz, J.C., and Salvay, R.O. 2004. La sintaxis tectónica Neógena de las Cordilleras Oriental y Santander: Aportes modelos analógicos y controles regionales sobre los sistemas petroleros. 3ra Convención Técnica de la ACGGP.
- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., and Gorin, M. 2008. Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: Field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia. Tectonophysics, 460: 136-157.
- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., y Rivera, C. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, Vol. 19 (5): 787-813.
- Toro, M., y Osorio, J. 2005. Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Boletín de Geología, UIS, 27 (1): 13-24.
- Thouret, J. C., Cantagrel, J. M., Salinas, R., and Murcia, A. 1990. Quaternary Eruptive History of Nevado del Ruiz (Colombia). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41: 225-251.
- Vicente, G., Muñoz, A., y Giner, J. 1992. El Uso del Método de los Diedros Rectos: Implicaciones a partir del Modelo de Deslizamiento del Análisis Poblacional de Fallas. Revista Sociedad Geológica de España, 5: 3-4.

---

Trabajo recibido: Septiembre 20 de 2011

Trabajo aceptado: Abril 27 de 2012