

ANÁLISIS DE FRACTURAS Y CINEMÁTICA DE FALLAS GEOLÓGICAS COMO PRIMER APOORTE AL MODELO CONCEPTUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA DE CHARTA, MACIZO DE SANTANDER-COLOMBIA

FRANCISCO VELANDIA ^{1,2}, MARÍA ALEJANDRA CETINA ¹, ESTEFANÍA CASTELLANOS ^{1,2}, SULLY GÓMEZ ³

¹ Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Colombia. e-mail: favelanp@uis.edu.co / mariacetina26@gmail.com, laecastellanossa@unal.edu.co

² Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: favelandiap@unal.edu.co

³ Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. e-mail: sgomez@uis.edu.co / sullygomez@gmail.com

Recibido: septiembre 2015

Aprobado para publicación: junio 2016

RESUMEN

El Macizo de Santander constituye una zona estratégica de la Cordillera Oriental de Colombia por la presencia de recursos minerales e hídricos. El presente estudio aporta criterios de geología estructural en el área de Charta, donde se identifican fallas que tienen continuidad hacia la parte centro occidental del macizo, y se ubican proyectos mineros, zonas de páramos y fuentes de agua para el consumo humano (más de un millón de habitantes, incluida la Ciudad de Bucaramanga). A partir de la cartografía geológica y del análisis estructural se obtuvo un modelo de deformación frágil que explica la distribución y cinemática de las fallas geológicas y pliegues. Se analizaron las tres direcciones principales del fracturamiento, una hacia el NNO asociada principalmente con fallas de cabalgamiento en estilo estructural de escamación gruesa y delgada y con vergencia al oriente, y dos direcciones transversales hacia el ONO y NE que exhiben desplazamientos bajo un régimen de rumbo. Con base en la medición de los atributos de las fracturas como intensidad, densidad y longitud, así como en el análisis cinemático y en la presencia de afloramientos de agua, se determinaron sectores de alta porosidad secundaria y zonas potencialmente abiertas, relacionadas con corredores o franjas de dirección NE. Por esto, se propone una conexión hidráulica entre las zonas de páramo y las partes bajas, a lo largo de las fracturas NE, las cuales se comportan como canales de flujo de aguas subterráneas y potencialmente de fluidos contaminantes.

Palabras clave: macizo de Santander, fracturas, análisis estructural, aguas subterráneas, páramos, Colombia

FRACTURE ANALYSIS AND KINEMATIC GEOLOGICAL FAULTS AS A FIRST CONTRIBUTION TO THE GROUNDWATER CONCEPTUAL MODEL IN THE CHARTA AREA, SANTANDER MASSIF - COLOMBIA

ABSTRACT

The Santander massif is a strategic area of the Colombian Eastern Cordillera by the presence of mineral and water resources. This study provides structural geology criteria around the Charta area where different faults that have continuity to the west-central part of the massif are identified, and mining projects, páramo zones and water sources for human consumption are located (more than one million inhabitants, including Bucaramanga city). A brittle deformation model was obtained from geological mapping and structural analysis, which is used to explain the distribution and kinematics of geological faults and folds. The three main fracturing trends were analyzed: one towards NNW related to east vergence thrust faults in thick and thin skinned structural style, and two transverse trends towards WNW and NE, exhibiting displacements under a strike slip regime. Areas of high secondary porosity and potentially open zones were identified based on fracture attributes measurement as intensity, density and length, as well as the kinematic analysis and water outcrops; specially related to the NE fracture corridors. Therefore, a hydraulic connection between the high páramo areas and the lowlands is proposed along the NE fracturing trend, which works as channels for groundwater flow and potentially contaminant fluids.

Keywords: Santander massif, fractures, structural analysis, groundwater, páramos, Colombia

INTRODUCCIÓN

El Macizo de Santander se localiza al nororiente de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos y separa las ciudades de Bucaramanga (al occidente) y Cúcuta (al oriente), los centros urbanos más poblados de esta región (Figura 1). Está conformado por unidades de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades del Precámbrico al Cretácico Tardío (Ward *et al.*, 1973, 1977a y b; Royero & Clavijo, 2001). El macizo presenta un relieve de topografía abrupta con cambios rápidos en elevación, de 1.000 m.s.n.m. en Bucaramanga a 4.290 m.s.n.m. en su parte central, donde se ubica el complejo de páramos de Santurbán, ecosistema vital para la producción de agua superficial y subterránea que abastece al nororiente colombiano. Sin embargo, en la zona también ha existido tradición minera, especialmente explotación de oro, lo cual ha generado diversos tipos de confrontación social.

En el presente trabajo se muestran los resultados del análisis estructural en un sector del Macizo de Santander. Incluye detalle en la cartografía de fallas geológicas, definición de estilos estructurales y análisis cinemático, los cuales, junto a la observación de los atributos de las fracturas, permiten proponer zonas de distensión y compresión, así como áreas con mayor porosidad secundaria asociada. Se busca que este modelo preliminar sirva de base para plantear estudios hidrodinámicos e hidroquímicos que confirmen la existencia de los canales de conexión entre la zona de páramos y las partes bajas del macizo, entre otras posibilidades de estudios geológicos detallados.

Se ha seleccionado un sector en los alrededores del municipio de Charta (Figura 1), al NE de Bucaramanga, donde los mapas geológicos (p. ej. Ward *et al.*, 1973, Gómez *et al.*, 2015) muestran fallas geológicas con todas las orientaciones que se presentan en el macizo, es decir, estructuras con rumbo norte-sur, noreste y noroeste (Figura 1), las cuales se concentran en un pequeño sector al suroccidente del Macizo de Santander (zona de Charta). Esta complejidad estructural representa una ventaja para realizar este estudio inicial de fracturas y entender la relación entre ellas.

La zona de trabajo hace parte de la microcuenca del río Charta, con un área de 207 km², donde se presentan características geográficas y geológicas especiales como la conexión directa de las fuentes superficiales de agua desde la zona de páramos y su desembocadura en el río Surata (Figura 1). El río Charta tiene su origen en inmediaciones del Páramo Complejo Jurisdicciones Santurbán (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2007).

MARCO GEOLÓGICO

Considerando el marco tectónico del norte de Suramérica, el Macizo de Santander hace parte del Bloque de Maracaibo (Figura 1) (Taboada *et al.*, 2000; Audemard & Audemard, 2002; Cediél *et al.*, 2003). Los modelos tectónicos muestran distintas visiones según conceptos de dinámica compresiva, distensiva o transcurrente; sin embargo, ante la complejidad estructural del Macizo de Santander, es muy probable la combinación de estos regímenes, según la localización geográfica. Hacia el sector del presente estudio, cerca de la falla de Bucaramanga (Figura 1), es evidente el predominio de deformación en rumbo (Kammer, 1999; Taboada *et al.*, 2000; Sarmiento, 2001; Cediél *et al.*, 2003), que ha sido atribuida incluso al movimiento dextral de la falla de Boconó hacia el borde occidental del Macizo (río Surata y Bucaramanga), con posible incidencia para el emplazamiento de fluidos mineralizados de California (Figura 1) a lo largo de una zona de transferencia transversal (Osorio *et al.*, 2008).

El área de estudio se localiza en el margen centro-occidental del Macizo de Santander, donde se presentan unidades geológicas de diversa litología y con edades desde el Precámbrico al Cretácico (Ward *et al.*, 1977b) (Figura 2). Morfológicamente sobresalen los escarpes de las areniscas de la formación Los Santos y las calizas de la formación Rosa Blanca, mientras las demás unidades, especialmente las cristalinas, se encuentran intensamente afectadas por la meteorización que genera saprolitos, regolitos y espesos suelos residuales.

En general, el Macizo exhibe tres tendencias estructurales principales al NNE, NNO y ONO. En el área de trabajo se presentan estructuras como las fallas Surata y Cucutilla (Ward *et al.*, 1977a y b) (Figura 1), oblicuas a la falla de Bucaramanga y relacionadas con las mineralizaciones de los distritos mineros aledaños (Mantilla *et al.*, 2011). En cuanto a estilos estructurales o cinemática de la zona, no existe información geológica publicada que explique la deformación. Los mapas y cortes geológicos de Ward *et al.* (1977b) muestran modelos de bloques hundidos y levantados, susceptibles de reinterpretación estructural con base en criterios más recientes y más datos de superficie.

METODOLOGÍA

Se realizó la revisión de la cartografía geológica existente por medio de la interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales y el respectivo control de campo para la adquisición de datos estructurales, especialmente planos de diaclasas y fallas relacionados con la deformación frágil de la zona. También se localizaron manantiales y se

tomaron fotografías de los afloramientos de roca, con el fin de determinar los patrones de fracturamiento. Con base en la revisión cartográfica y el análisis estructural se realizaron

cortes geológicos que explican los estilos estructurales presentes en la zona.

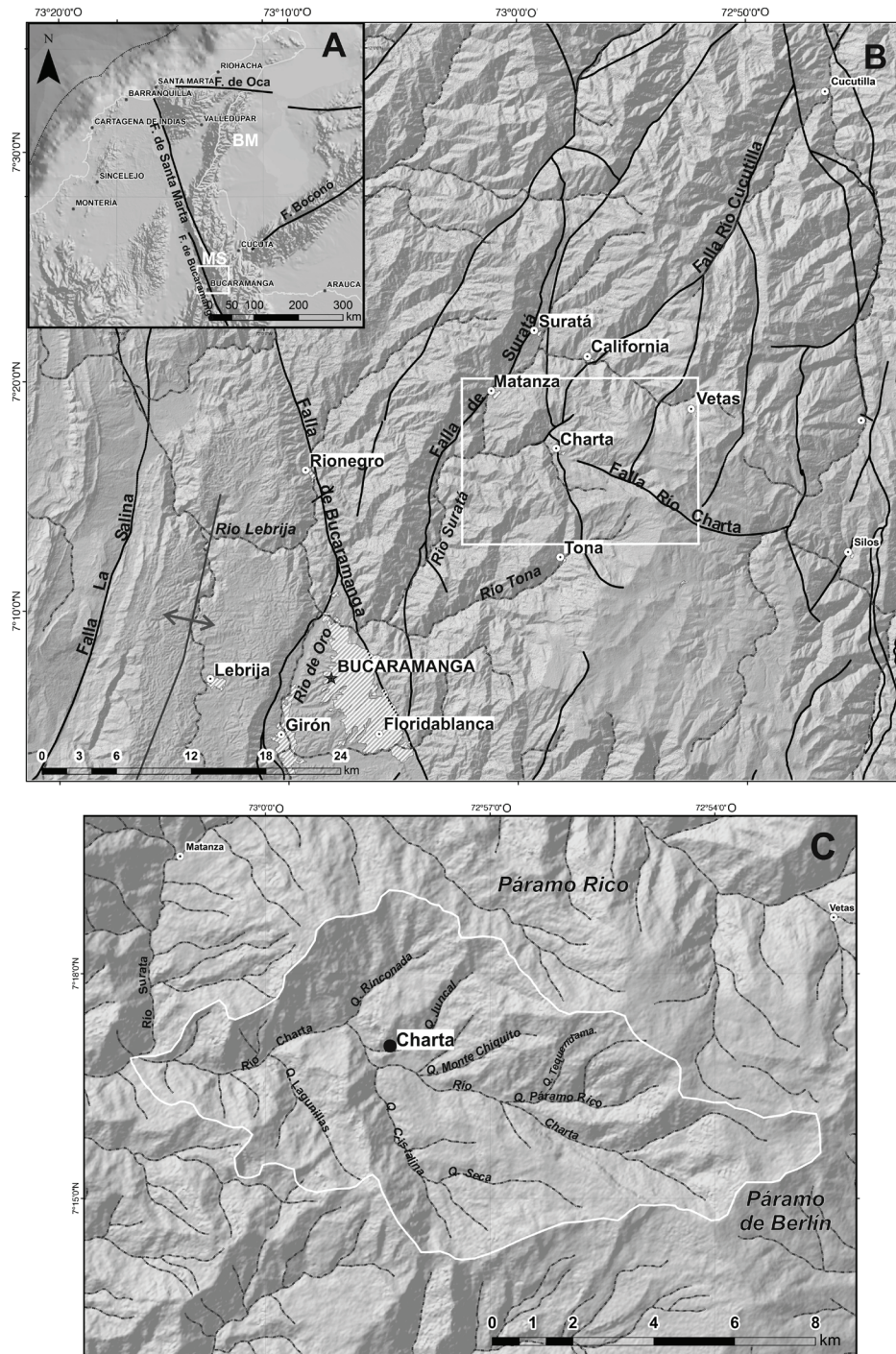
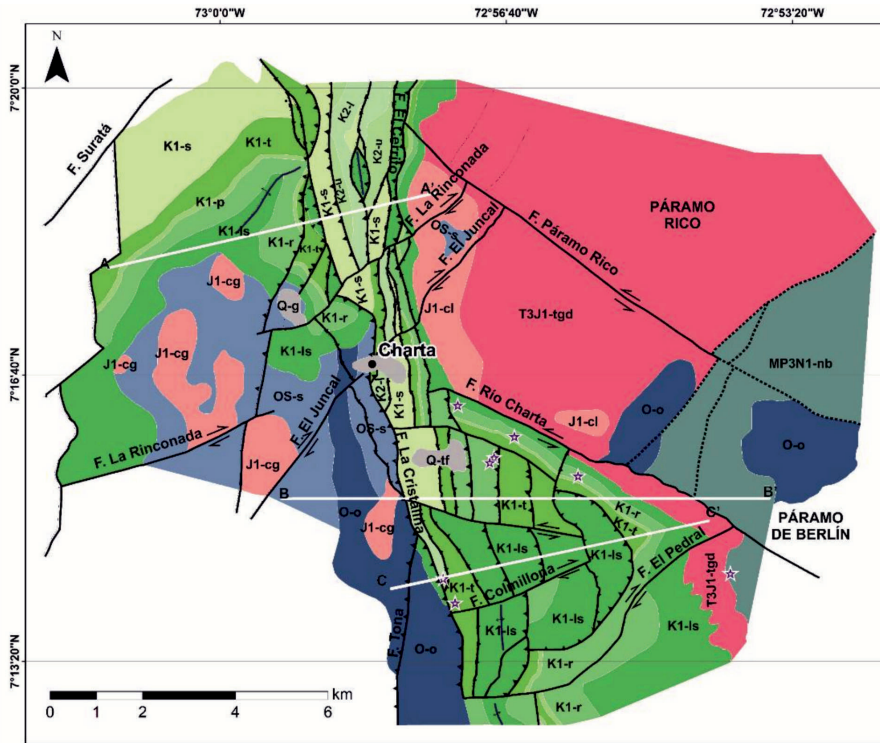


Figura 1. Localización del área de trabajo y del municipio de Charta. A. Esquema del Bloque de Maracaibo (BM), limitado por las fallas de Oca, Santa Marta-Bucaramanga y Boconó (Audemard & Audemard, 2002). B. Fallas geológicas del Macizo de Santander (MS) (modificado de Gómez et al., 2015). C. Delimitación de la microcuenca del río Charta, se muestra parte del complejo de páramos de Santubán. Mapa de sombras a partir del Modelo Digital del Terreno de JAXA/METI (2016)



LEYENDA

| | | | |
|---|---|---|--|
| Q-tf Terrazas aluviales | Q-g Depositos glaciares | K1-p Formación Paja Lutitas negras, blandas; dispuestas en capas delgadas | T3J1-tgd Tonalita y Granodiorita Tonallitas y granodioritas de colores grises |
| K2-u Formación Umir Shales negros con laminas carbonáceas | K1-r Formación Rosa Blanca Micritas, esparuditas, intraesparuditas y biomicritas ralas, en diferentes tonalidades de grises | K1-s Formación Simiti Shales negros, carbonosos, ligeramente calcareos. | OS-s Formación Silgará Esquistos micaceos, metareniscas y esquistos anfíbolicos minoritarios |
| K2-l Formación Luna Lutita negra, con capas delgadas de chert negro. | K1-ls Formación Los Santos Areniscas cuarzosas, intercaladas con areniscas limosas y areniscas ligeramente conglomeráticas. | J1-cl Cuarzomonzonita de la Corcova Cuarzomonzonita gris, biotítica. | O-o Ortoneis Principalmente compuesto por metagranitos que exhiben un claro lineamiento de sus minerales máficos |
| K1-s Formación Simiti Shales negros, carbonosos, ligeramente calcareos. | J1-cg Cuarzomonzonita de la Corcova Cuarzomonzonita gris, biotítica. | J1-cg Cuarzomonzonita y Granito Cuarzomonzonitas y granitos, biotíticos y muscovíticos, de colores grises a rosados | Mp3 Neis de Bucaramanga Paragneises y esquistos minoritarios formados por un alto grado de metamorfismo |
| K1-t Formación Tablazo Areniscas de grano fino a limosas, de colores grisáceos, intercaladas con lodolitas grises | | | |

Figura 2. Mapa geológico de área de estudio, modificado de los mapas geológicos de los cuadrángulos H-12 y H-13 (Ward et al., 1977a, 1977b), donde se ubican los puntos de afloramiento de agua subterráneas (estrellas blancas) y las líneas de los cortes geológicos A-A', B-B' y C-C' de la Figura 4

El procesamiento de los datos estructurales se realizó de manera independiente para planos de falla y diaclasas; las fallas más enfocadas al análisis cinemático y las diaclasas a la caracterización de patrones y atributos del fracturamiento. Los datos de estrías de falla se seleccionaron utilizando los criterios de compatibilidad o coherencia mecánica (Angelier, 1984), en la cual los planos de falla, con su respectiva cinemática determinada en afloramiento, deben cumplir las relaciones angulares que permitan los movimientos bajo un mismo campo de esfuerzo (elipsoide de deformación). Una vez seleccionados los datos se procesaron en los programas Tectonics FP (Reiter & Acs, 2013) y Stereonet 8.8.5 (Allmendinger et al., 2012) para generar los diagramas que permiten la determinación de las direcciones preferentes del fracturamiento y para realizar el análisis cinemático.

Este análisis cinemático puede estar expresado completamente en términos geométricos sin tener en cuenta el esfuerzo y la dinámica que los genera (Marrett & Peacock, 1999). Solo se requiere de las mediciones (a escala de afloramiento) de indicadores del desplazamiento, tales como estrías de falla, planos tipo Riedel, escalones neomineralizados, entre otros. La cinemática de las fallas es definida con datos de diferentes planos que pertenezcan a una misma familia. Huang & Angelier (1989) definen una familia de fallas como aquellas que no han sido reactivadas ni reorientadas (fallas neoformadas) y que son producto de un solo evento tectónico. Sin embargo, cuando existen planos de fallas reactivadas se puede asumir que éstas se mueven por el mismo campo de esfuerzo de las fallas neoformadas.

Siguiendo lo explicado en Fossen (2010) sobre fracturas, se pueden distinguir los planos de falla que se ubican entre los estados crítico e inestable según respondan a los criterios de Coulomb y la envolvente de Mohr. Cuando se conoce la orientación y sentido del movimiento de cada falla de una familia es posible asignar ejes de presión y tensión (Huang & Angelier, 1989) causantes de la deformación (direcciones de acortamiento y extensión), los cuales a su vez se pueden asociar de manera indirecta con el campo de esfuerzos que causa o controla el fracturamiento.

El modelo de deslizamiento (Reches, 1983; De Vicente, 1988) predice la existencia de una simetría ortorrómbica en poblaciones de fallas, cuyos movimientos dan lugar a elipsoides de deformación triaxiales. Los diagramas P-T (o P-B-T) muestran los ejes de presión (P) y tensión (T) que en la deformación da como resultado un plano de falla o una familia de fallas. Este método fue descrito por Turner (1953, en Reiter & Acs, 2013) y es frecuentemente utilizado para inferir regímenes tectónicos (Célérier, 2010). El programa TectoniscFP (Reiter & Acs, 2013) utiliza también el método de Análisis Numéricos Dinámicos (NDA por sus siglas en inglés) para procesar los datos de estrías de los planos de falla. Los resultados del método de NDA son parámetros de deformación (no de esfuerzo), pero se hace la presunción de estos valores como parámetros indirectos de esfuerzo.

Las relaciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , representadas en el círculo de Mohr, muestran el régimen de esfuerzos que actuó en la formación de las fallas. Según esto, si se tienen fallas de cabalgamiento, los círculos de Mohr pueden mostrar compresión axial, neta compresión o compresión radial; en fallas normales se identifican regímenes de extensión axial, extensión neta (pura) o extensión radial; y en fallas de rumbo se mostrará transpresión, rumbo neto o transtensión (Burg, 2011). Dicha relación se puede observar cuantitativamente por medio del indicador R (para fallas de rumbo, R=0,25 transpresión, R=0,5 rumbo neto, y R= 0,75 transtensión).

Para la caracterización de las fracturas se siguió la metodología de la ventana de muestra propuesta por Mauldon *et al.* (2001), explicada también por Moreno & García (2006), en la cual por medio de fotografías perpendiculares a los afloramientos, con una escala visible y medible, se graficaron círculos de muestreo para calcular los atributos de intensidad, densidad y longitud promedio de las fracturas, información que fue plasmada de manera gráfica sobre un mapa y tabulada para realizar las interpretaciones pertinentes. Según la localización de las estaciones y el análisis de planos de diaclasas y estrías se mostrarán relaciones con las fallas regionales del área,

unidades geológicas deformadas y direcciones preferentes de flujo.

El método de Mauldon *et al.* (2001) propone la ventana de muestra para medir la intensidad, densidad y longitud promedio de las fracturas, ya que el uso de estas líneas circulares reducen el sesgo direccional en la medición de las orientaciones de fractura y permite manejar de forma conveniente el sesgo por “censuramiento”. En este caso se puede presentar submuestreo de sectores con alta intensidad y arrojar un valor errado de fracturamiento debido a fenómenos de anisotropía espacial.

Una explicación sencilla de estos atributos medibles es la siguiente:

- La intensidad de fracturamiento es un parámetro que se relaciona con el espaciamiento promedio entre fracturas (distancia entre las fracturas) a través de una línea de muestreo definida en alguna dirección determinada (Moreno & García, 2006). Para medir esta intensidad de fracturamiento por medio de las ventanas de muestra es necesario determinar el número de intersecciones entre las fracturas y la circunferencia externa (Figura 3A), por medio de la siguiente expresión:

$$I = \frac{n}{4r} \quad (1)$$

Donde n es el número de intersecciones entre la circunferencia de la ventana de muestra y las trazas de fractura y r es el radio de la circunferencia usada (Mauldon *et al.*, 2001).

- La densidad del fracturamiento se refiere al número de fracturas por unidad de área:

$$\rho = \frac{m}{2\pi r^2} \quad (2)$$

Donde m es el número de inicios y terminaciones de las fracturas dentro de la ventana de muestra (Figura 3B) y r el radio de la circunferencia usada (Mauldon *et al.*, 2001).

- La longitud promedio de las fracturas tiene el inconveniente de ser siempre sesgada debido a los inconvenientes de las mediciones en campo y a que en la mayoría de los casos no se cuenta con una vista de las tres dimensiones de las rocas; sin embargo, se puede tener una aproximación de la medida aplicando la metodología propuesta por Mauldon *et al.* (2001), en la cual se consideran tanto las intersecciones de

las fracturas con la circunferencia externa (n) como el número de puntos terminales que caen dentro de la misma (m), junto con el radio de la circunferencia (r).

$$\mu = \frac{\pi r}{2} \left(\frac{n}{m} \right) \quad (3)$$

La ecuación anterior es dimensionalmente correcta y las unidades obtenidas corresponden a unidades de longitud. Algo interesante del método para hallar esta medida es que permite calcularla sin realizar ningún tipo de medida de longitud.

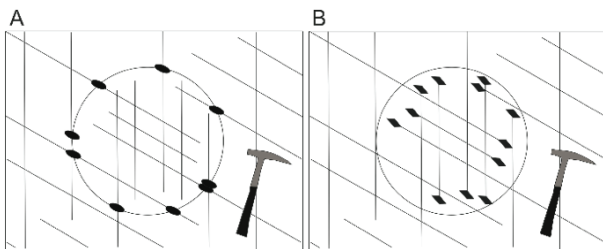


Figura 3. Método de ventana de muestra para medir intensidad y densidad de fracturas. A. Intensidad de fracturamiento, intersecciones de la circunferencia con las trazas de fractura (óvalos). B. Densidad de fracturamiento, número de puntos terminales que caen dentro de la ventana de muestra (rombos). Tomado de Moreno & García (2006)

ESTILOS ESTRUCTURALES Y CINEMÁTICA

Cartografía geológica

La revisión de la cartografía geológica permitió identificar estructuras plegadas y falladas que no estaban en los mapas de Ward *et al.* (1977a y b) o que apenas aparecían como lineamientos geológicos o fallas inferidas. En el mapa resultante (Castellanos & Cetina, 2013) se define el tipo de fallas que afectan la zona y se identifican sus respectivas vergencias (Figura 2). La cinemática y los desplazamientos a lo largo del rumbo de las fallas se determinaron a partir de las observaciones en campo (relaciones y contactos de las unidades litológicas) y las evidencias plasmadas en los planos estriados, mientras que las direcciones de transporte tectónico de los cabalgamientos (predominan hacia el oriente, u occidente si se trata de retrocabalgamientos) se determinaron con base en las relaciones estratigráficas y pliegues menores asociados.

Las fallas inversas de bajo ángulo afectan principalmente a las rocas sedimentarias y presentan un rumbo aproximado norte-sur. Los estilos estructurales identificados en el mapa geológico se explican con base en perfiles o cortes geológicos transversales (Figura 4). Las principales fallas geológicas identificadas se muestran en la Figura 2, así como algunos anticlinales con dirección aproximada norte-sur y vergencia al oriente (Figura 4A).

En general, las estructuras con rumbo norte-sur corresponden a fallas inversas que levantan rocas del basamento respecto de la secuencia sedimentaria (escamación gruesa), la cual a su vez es afectada por cabalgamientos en abanicos imbricados con despegue en los niveles blandos de la formación Los Santos (Figura 4) (escamación delgada). La falla La Cristalina, con vergencia al oriente, es la estructura más representativa del área y constituye el límite occidental de la cuenca remanente que conforma la secuencia sedimentaria de esta zona del Macizo de Santander, junto con la falla de Suratá (relacionada además con la posible zona de transición transversal que proponen Osorio *et al.*, 2008).

Los cortes geológicos que representan el estilo estructural interpretado para el área se muestran en la Figura 4. La escamación gruesa asociada con la falla La Cristalina involucra basamento de la formación Silgará (rocas metamórficas del Paleozoico) y se muestra como el origen de un abanico imbricado de tipo arrastrado que evoluciona hacia el frente (al oriente) en la secuencia sedimentaria, mientras la falla El Cerrito representa también escamación gruesa, pero con vergencia al occidente (Figura 4A). Entre la zona triangular definida por estas dos fallas inversas se forma un anticlinal, indicio de otra falla que en profundidad controla la formación de este pliegue.

El corte geológico B-B' (Figura 4B) se localiza en la secuencia sedimentaria que reposa en forma discordante sobre la Tonalita y Granodiorita y muestra que a partir de la falla La Cristalina se desarrolla escamación delgada con vergencia al oriente con despegue en las intercalaciones de areniscas limosas de la formación Los Santos; además se observa que a medida que la cuña sedimentaria se adelgaza en el frente de deformación se configura un retrocabalgamiento con vergencia al occidente. En la parte sur del área se observa que la deformación involucra más retrocabalgamientos asociados con el mayor espesor de la secuencia sedimentaria en el occidente (Figura 4C).

Las fallas transversales presentes en la zona reflejan un estilo estructural transcurrente dominante (Figura 2). Fallas con orientación al NO (como páramo Rico) presentan un

movimiento sinistral y algunas, además, componente inverso (falla de Río Charta). Las fallas con tendencia NE muestran un desplazamiento dextral, tales como El Juncal,

El Pedral y La Rinconada, esta última con componente vertical normal.

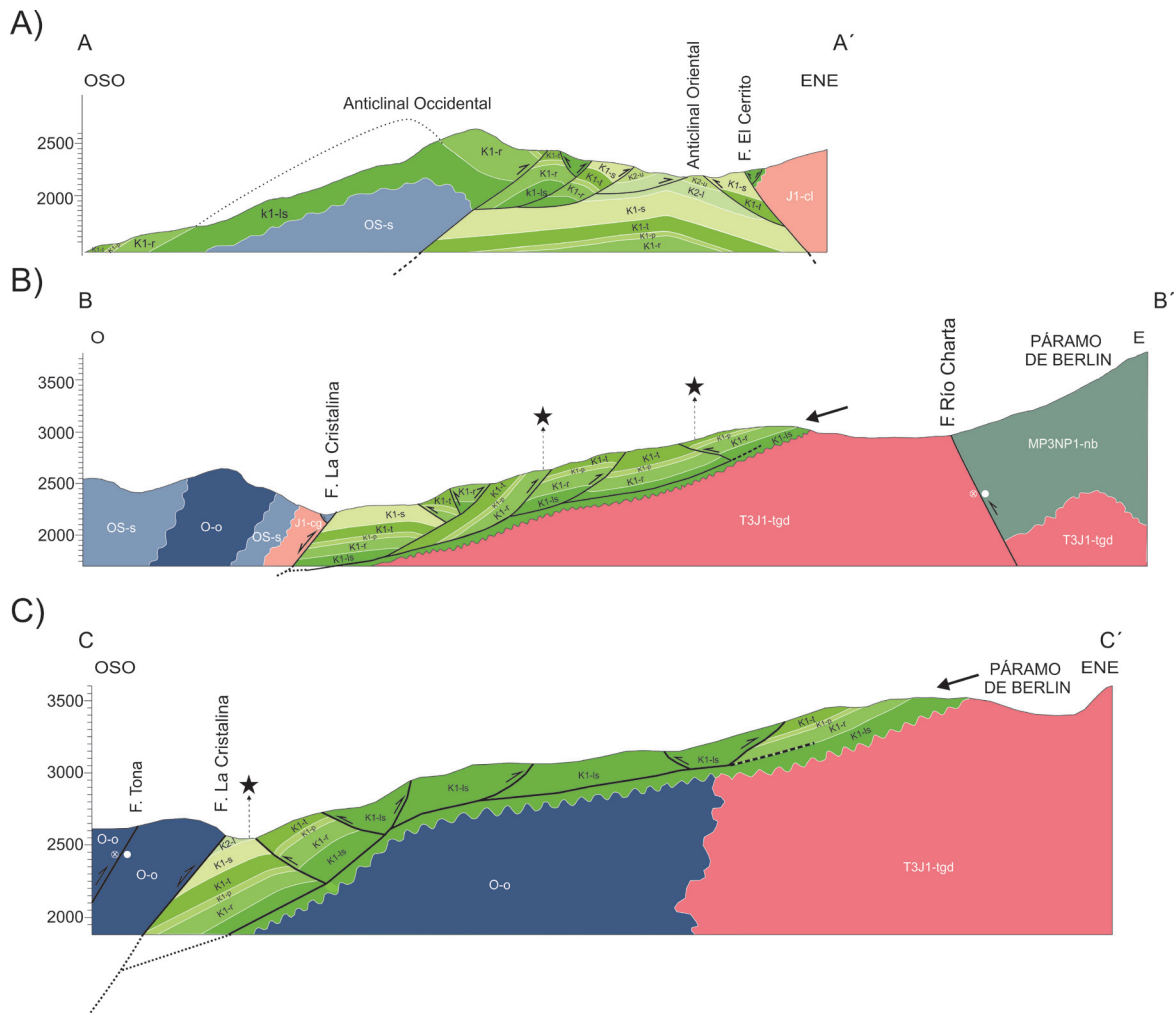


Figura 4. Cortes geológicos para ilustrar los estilos estructurales del área (localización en Figura 2), ver explicación en el texto. En B y C se indican con estrellas los puntos de afloramiento de agua subterránea y con flechas se señalan los sectores donde se presentaría la infiltración de agua que pasaría a alimentar el caudal de la quebrada La Cristalina

Análisis cinemático

Según los criterios mecánicos explicados en la metodología, se reitera que aunque las estrías de falla pueden ser producto de distintos campos de esfuerzos en el tiempo, es posible separar los datos de fallas neoformadas o reactivadas (por el actual campo de esfuerzos) y los correspondientes a fallas más antiguas que no sean compatibles mecánicamente con las fallas recientes. Esto a pesar de que los datos se presenten en las rocas cretácicas o más antiguas que afloran en la zona.

Se analizaron los datos de planos con estrías de falla medidos en campo. A partir de la cartografía geológica,

la ubicación de las estaciones de campo con estrías y los diagramas NDA obtenidos, se relacionan las fallas resultantes del procesamiento de los datos con las trazas de fallas identificadas en campo. Los diagramas de Angelier son de utilidad para observar las direcciones y cinemática de todo el conjunto de planos de falla (Figura 5). La relación de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), representada en el círculo de Mohr y cuantificada con el identificador R, es utilizada para inferir el régimen de esfuerzos que generan los planos de falla (Tabla 1, Figura 5). Se estableció que la falla de Río Charta presenta una cinemática sinistral, con un trazo que controla el río. Se observa un régimen transpresivo con los datos de las estaciones EA-003 y EA-004, con un R calculado de 0,2756 y uno transcurrente (de

rumbo neto) de los grupos de estaciones EA-006 y EA-025 con $R=0,4754$ y $R=0,4998$, respectivamente, lo que comprueba el componente horizontal sinistral de la falla de Río Charta y además permite establecer un componente inverso.

Hacia el norte del área de estudio se encuentra parte del trazo de la falla La Cristalina (Figura 5), la cual presenta un movimiento inverso predominante. Los datos de la estación EA-010 (ubicados en la formación Los Santos) reflejan una tendencia que se podría aplicar en general tanto a la falla La Cristalina como a los retrocabalgamientos. Por otro lado, el círculo de Mohr obtenido a partir de estos datos refleja un régimen transpresivo (Tabla 1) con un valor de $R=0,3566$. Hacia el oeste se encuentra una zona afectada por dos fallas paralelas de dirección NE-SO, las fallas La Rinconada y El Juncal, que poseen una cinemática dextral

normal determinada por el análisis del mapa geológico y corroborada por los datos de la estación EA-028 (Fm. Los Santos). El componente normal de la falla La Rinconada es evidenciado por el carácter transtensivo mostrado en el círculo de Mohr que presenta $R=0,6708$ (Tabla 1).

La falla de Páramo Rico marcada con un fuerte lineamiento en la parte norte del área, corta las quebradas La Rinconada y El Juncal y continúa afectando la unidad Tonalita y Granodiorita. Se tienen datos de estrías de las estaciones EA-015 y EA-016 que muestran una falla con cinemática sinistral y una considerable componente vertical a la que se le determinó una vergencia al SO (Figura 5); por otro lado, el círculo de Mohr para estos datos muestra un carácter transtensivo con $R=0,6922$ (Tabla 1). El movimiento sinistral de la falla de Páramo Rico es acorde en su paralelismo con la falla de Río Charta.

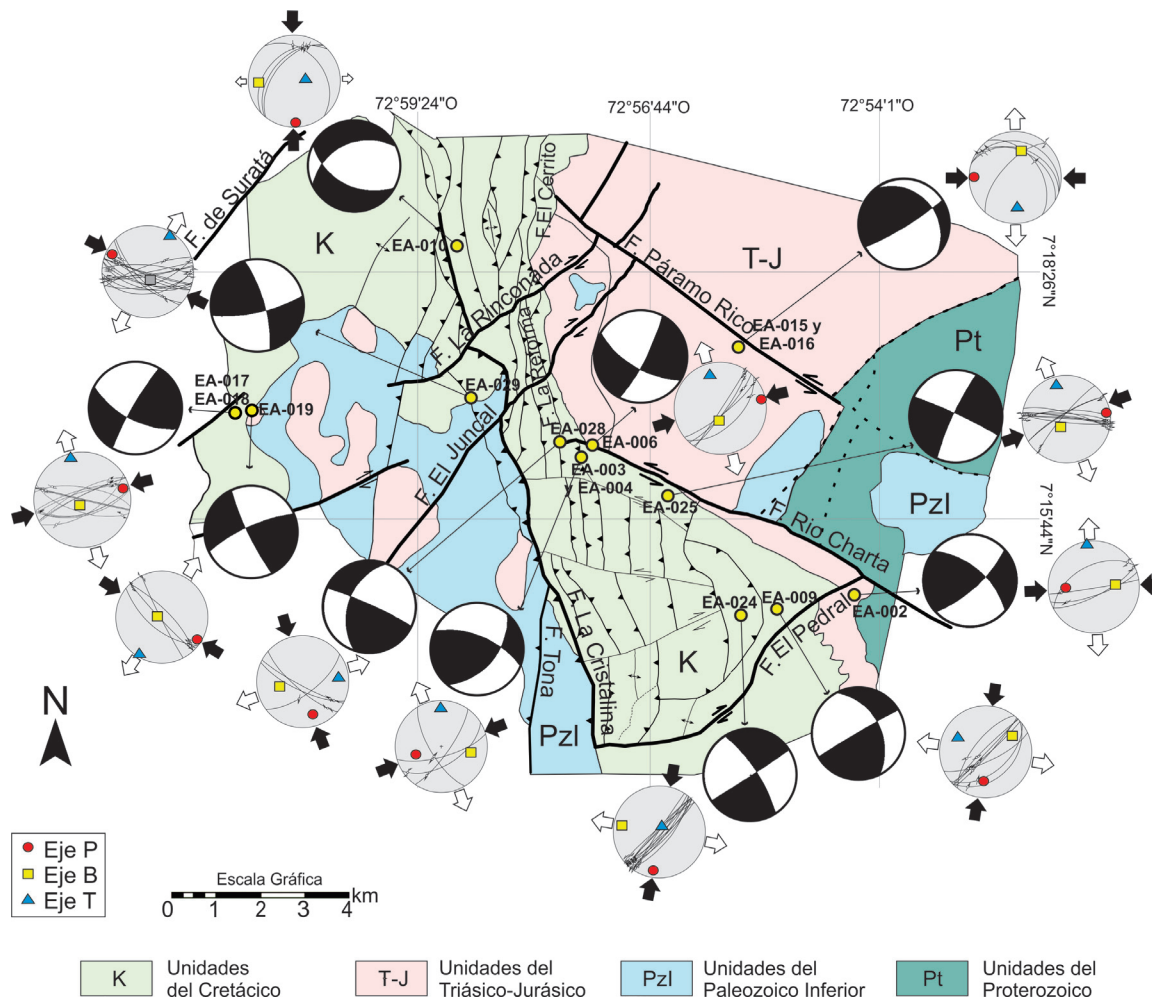


Figura 5. Ubicación de las estaciones de campo en el mapa geológico generalizado. Se muestran diagramas de Angelier con los ejes P-B-T y DNA generados a partir de los datos de estrías de falla y los tensores locales interpretados. Las flechas negras indican el eje de compresión (σ_1) y las blancas indican los de tensión (σ_3)

Tabla 1. Relación de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) determinados para cada estación de campo, valor del identificador R y régimen tectónico

| ESTACIÓN | n | Ejes de Esfuerzo Principales | | | R | Régimen Tectónico |
|-----------------|----|------------------------------|------------|------------|--------|-------------------|
| | | σ_1 | σ_2 | σ_3 | | |
| EA-002 | 4 | 281/40 | 84/48 | 176/02 | 0,7297 | Transtensión |
| EA-003 y EA-004 | 4 | 249/44 | 105/35 | 360/16 | 0,2756 | Transpresión |
| EA-006 | 5 | 76/18 | 189/68 | 342/20 | 0,4754 | Rumbo |
| EA-009 | 8 | 188/39 | 57/33 | 298/28 | 0,5147 | Rumbo |
| EA-010 | 4 | 178/01 | 267/21 | 79/68 | 0,3566 | Transpresión |
| EA-015 y EA-016 | 5 | 271/07 | 11/39 | 177/35 | 0,6922 | Transtensión |
| EA-017 y EA-018 | 12 | 75/11 | 201/79 | 345/08 | 0,5516 | Rumbo |
| EA-019 | 4 | 122/08 | 279/83 | 211/0 | 0,4794 | Rumbo |
| EA-024 | 12 | 191/08 | 63/77 | 282/10 | 0,4898 | Rumbo |
| EA-025 | 11 | 70/02 | 326/82 | 160/08 | 0,4998 | Rumbo |
| EA-028 | 4 | 163/29 | 259/48 | 81/23 | 0,8034 | Transtensión |
| EA-029 | 17 | 300/12 | 162/71 | 30/06 | 0,6708 | Transtensión |

Nota: n= Total de datos medidos. R: Relación de los esfuerzos ($\sigma_2-\sigma_3$)/($\sigma_1-\sigma_3$)

Los datos de planos de estrías de las estaciones EA-009 y EA-024 reflejan el comportamiento del cabalgamiento en arco que se encuentra al extremo oriental de la cuña desarrollada al sur de la zona de estudio (Figura 5). La cinemática que se obtiene es sinistral en un régimen transcurrente mostrado en el círculo de Mohr, con R de 0,5147 y 0,4898 para las dos estaciones, respectivamente (Tabla 1), lo cual puede estar relacionado a la influencia del movimiento relativo de la falla de Río Charta. De la falla El Pedral se tiene control de datos medidos en la unidad Tonalita y Granodiorita de la estación EA-002 (Figura 5), que muestra claramente su carácter de rumbo en sentido dextral; su traza sigue el lineamiento cartografiado en el cuadrángulo H-13 (Ward *et al.*, 1977b), la cual culmina en la falla de Río Charta. Se observa por medio del círculo de Mohr un carácter transtensivo con R de 0,7297.

Por otro lado, hacia el oeste del área de estudio (EA-017 y EA-018; EA-019) se observan algunos trazos de la falla Suratá, en la formación Los Santos y en las rocas intrusivas, que evidencian un componente en rumbo dextral. Los círculos de Mohr no muestran la componente vertical del movimiento de la falla, ya que la relación de los círculos internos indica transcurrentencia con R de 0,5519 y 0,4794, respectivamente, lo que puede indicar un régimen muy local en el comportamiento de esta falla regional.

Adicionalmente, para obtener una orientación de los ejes de deformación en la zona de trabajo, se integran los datos obtenidos con el fin de realizar un análisis conjunto. Para empezar se grafica el círculo de Mohr para el total de 101 datos (Figura 6A), en el cual se observa una importante cantidad de planos ubicados hacia la envolvente de Mohr-Coulomb. Con base en lo explicado en Fossen (2010) se seleccionan y se procesan por separado los planos ubicados entre la situación crítica y el campo inestable, los cuales se asumen como correspondientes a las fallas neoformadas y algunas reactivadas (Figura 6B), de donde resulta un $R=0,72$ indicativo de un régimen transtensivo. Así se obtiene una orientación de ejes mejor relacionada con el tensor que dio origen a la deformación mostrada por estas fallas, el cual se considera como el último o actual tensor en la zona (Figura 6C).

Con base en lo anterior se determinan las direcciones de los ejes principales de deformación que de manera indirecta se relacionan con los de esfuerzos principales: eje principal de presión P (σ_1) S56°O/11, eje principal intermedio B (σ_2) S84°E/82 y eje principal de tensión T (σ_3) N22°O/09, los cuales muestran un régimen de cizalla simple (o rumbo neto) para la zona de estudio, con σ_1 y σ_3 más próximos a la horizontal y σ_2 en la vertical (Figura 6C).

Con estos ejes de deformación resultantes del análisis geomecánico se genera una elipse que de manera general explica el régimen de cizalla simple en la zona y la cinemática de las fallas de rumbo, inversas y normales, así como de los pliegues presentes en el área (Figura 6D). Esta cinemática es coherente con la identificada por cartografía y con las relaciones angulares encontradas. Los resultados del procesamiento de las estaciones de campo (Tabla 1) y el análisis P-B-T del conjunto de planos neoformados muestran el predominio de un régimen de rumbo (Figura 6C), bajo el cual se puede explicar la apertura de las fracturas NE que tienen una relación paralela a subparalela con el tensor resultante (σ_1 -NE, Figuras 2, 5 y 6D), por donde en general se facilita el tránsito de fluidos.

ATRIBUTOS DE LAS FRACTURAS

Para realizar un análisis de las fracturas medidas en campo se generaron diagramas rosa agrupados en siete bloques delimitados por fallas o zonas de falla (Figura 7), esto con el fin de observar la distribución de las direcciones preferenciales de las fracturas y la densidad de los datos. Los límites de los bloques están definidos por las principales fallas y contactos litológicos: La Cristalina separa el bloque 7 al occidente del bloque 2 y los más pequeños 4, 5 y 6 al oriente; a su vez el bloque 2 está separado del bloque 3 por la falla de Río Charta y del bloque 1 por la falla El Pedral, conformando una cuña con ápice al oriente; el bloque 3 se encuentra separado de los bloques 4, 5 y 6 por el contacto litológico entre la secuencia sedimentaria y el cuerpo ígneo.

Se definieron tres tendencias principales de las fracturas que se reflejan en cada uno de los bloques y que en general afectan toda el área de estudio; además, en cada bloque hay una tendencia asociada a las fallas principales cartografiadas. Los tres patrones principales son:

- NE: esta dirección coincide con el trazo de las fallas El Juncal, La Rinconada y El Pedral, y a su vez refleja el rumbo regional de las fallas Suratá y Cucutilla (Figura 2)
- ONO: este patrón de fracturamiento está estrechamente relacionado con las fallas sinestrales de Río Charta y Páramo Rico.
- NNO: esta tendencia va siguiendo el rumbo de la falla La Cristalina, junto con los cabalgamientos que afectan la secuencia sedimentaria, así mismo refleja la tendencia de la falla de Bucaramanga a un nivel más regional (Figura 2).

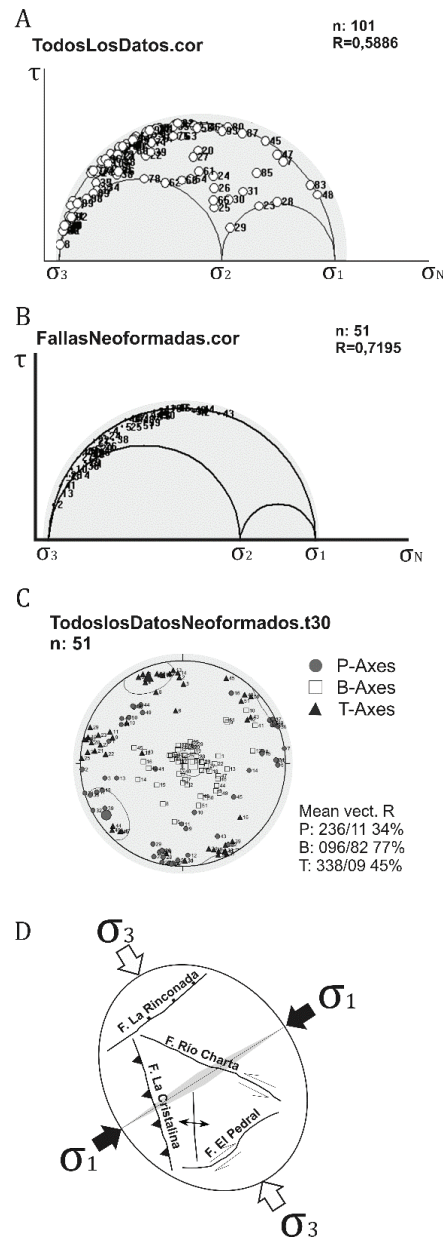
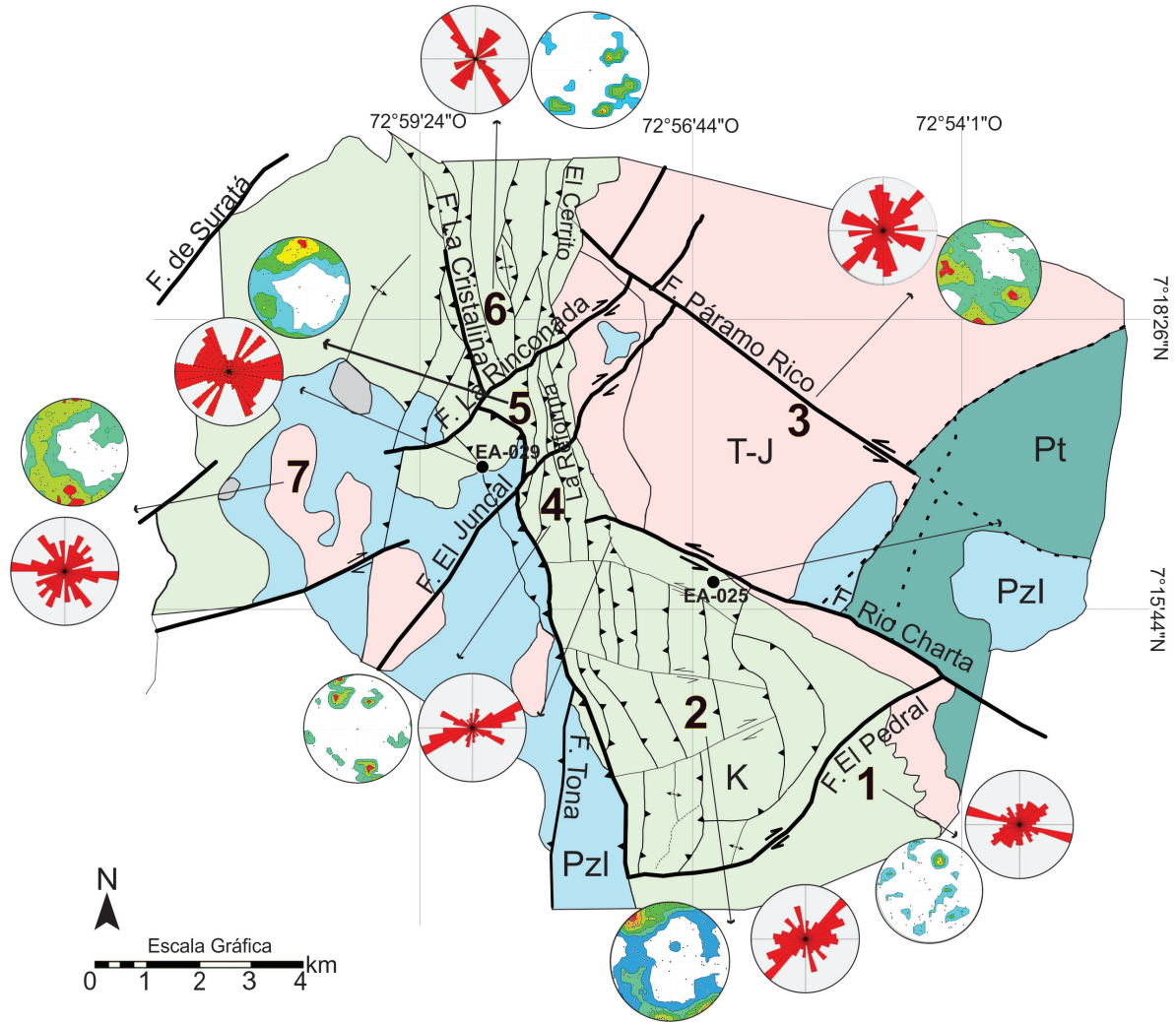


Figura 6. Resultados del análisis geomecánico para determinar el tensor de la zona de trabajo. A. Círculo de Mohr con todos los datos de los planos estriados ($n=101$). B. Círculo de Mohr con los datos de fallas neoformadas seleccionadas ($n=51$) según su distribución con la envolvente de Mohr-Coulomb. C. Diagrama P-B-T con los datos de fallas neoformadas. D. Elipse de deformación con base en la distribución de las estructuras y el campo de esfuerzos inferido

Las fracturas presentes en las rocas pueden ser aleatorias o sistemáticas y en este último caso, si además se encuentran a escala regional, tienden a interpretarse como producto de campo de esfuerzos tectónicos (Arlegui & Simón, 1993). Su importancia reside en que contribuyen de

forma significativa a la formación de conductos por los cuales pueden transportarse agua, hidrocarburos, fluidos mineralizados o fundidos magmáticos permitiendo que en muchos lugares del mundo estos recursos se encuentren asociados exclusivamente a fracturas.



K Unidades del Cretácico **T-J** Unidades del Triásico-Jurásico **Pzl** Unidades del Paleozoico Inferior **Pt** Unidades del Proterozoico

Figura 7. Mapa geológico generalizado dividido en siete bloques donde se presentan las principales direcciones de fracturas en diagramas rosa y densidad de polos. Los contornos se generaron por el sistema del 1 % del área para estaciones con menos de 100 datos y por el sistema Kamb para estaciones con más de 100 datos, según las recomendaciones de Hatcher (1995)

Para caracterizar los patrones de diaclasas y en general de fracturas (incluyendo los planos estriados), se aplicó el método antes explicado en las estaciones donde se obtuvo una buena exposición de afloramiento de roca. Para esto, sobre las fotografías tomadas en campo se dibuja la ventana

de muestra circular teniendo en cuenta la escala y se procede a trazar las diferentes fracturas para poder determinar los atributos de intensidad, densidad y longitud promedio de las fracturas (Figura 8). Los resultados de las mediciones de atributos son presentados en la Tabla 2, junto con los datos

de las unidades afectadas y las estructuras que se asocian a cada punto medido. Se observa que en general la longitud promedio de las fracturas medidas es menor a un metro, resultado que se atribuyó a las diaclasas desarrolladas perpendicularmente a los principales patrones de fracturas. Estos patrones en general traspasan las ventanas y continúan, mientras que los desarrollados localmente no lo hacen. Como se explicó en el análisis cinemático anterior, en la zona abundan fallas de rumbo y transtensivas (Tabla 1), por lo que se asume que las tendencias de fracturamiento aquí identificadas se repiten en el macizo rocoso asociadas con la zona de deformación frágil de la corteza.

De los datos de intensidad y densidad se determinan rangos de muy baja, baja, media, alta y muy alta intensidad y densidad relativa de fracturas. Para ello se tuvo en cuenta la dispersión de los datos, por lo que se utilizó un método estadístico básico, en el cual se eliminaron los datos que quedaban fuera de la media \pm desviación estándar para reducir los sesgos en el establecimiento de los rangos. Los resultados son mostrados en los mapas de las Figuras

9 y 10, donde se observa que las mayores intensidades y densidades se encuentran en los puntos asociados a la zona conformada por las fallas La Rinconada y El Juncal, quizás por la cercanía entre las dos estructuras y la suma del fracturamiento asociado. Los puntos cercanos a la falla de Río Charta presentan una intensidad media que no varía según la litología y una densidad que sí varía, siendo baja en las rocas ígneas (unidades del Triásico-Jurásico) con respecto a las medidas sobre las rocas sedimentarias (unidades del Cretácico). La zona afectada por la falla Páramo Rico arroja intensidades y densidades con valores medios en las rocas del Triásico-Jurásico, mientras que las medidas asociadas a la falla el Pedral presentan valores bajos, afectando a unidades del Proterozoico, Triásico-Jurásico y Cretácico. Por último, los valores de intensidad y densidad de fracturas asociados a cabalgamientos son altos, relacionados por un lado a la falla La Cristalina al norte del área de estudio, y por otro, al cabalgamiento con trazo en arco de la cuña sedimentaria que se encuentra al extremo oriental de la zona de estudio.

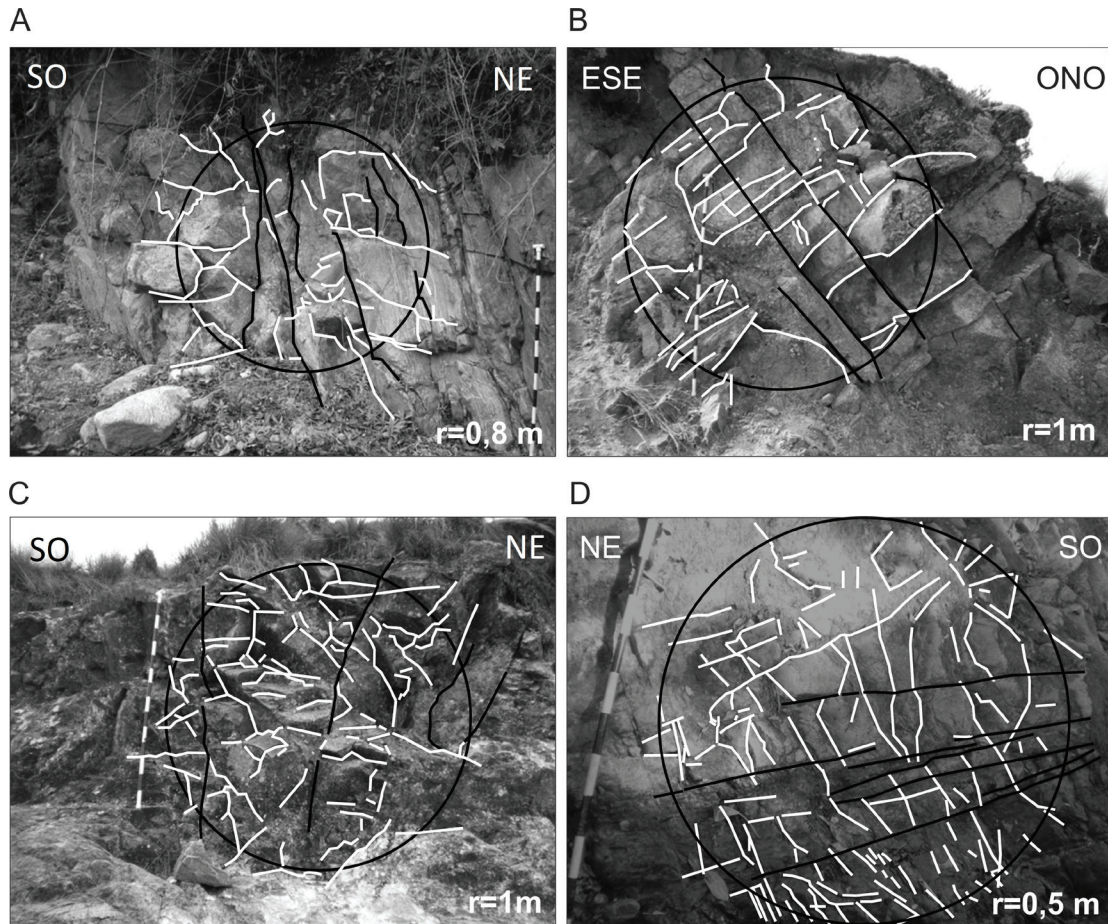


Figura 8. Ejemplos de ventanas de muestra sobre las cuales se marcan los principales patrones de fracturamiento (líneas negras) así como las fracturas más pequeñas asociadas. En las fotografías se muestran las unidades Tonalita-Granodiorita, que aflora en la margen derecha del río Charta (A) y sobre la vía que comunica los municipios de Charta y Vetas (B y C); y la cuarzomonzonita de La Corcova, sobre la quebrada El Juncal (D)

Tabla 2. Datos de las mediciones de los atributos de intensidad, densidad y longitud promedio de las fracturas, determinadas por medio del método de ventana de muestra

| Estación | Coordenadas | | Altura | Unidad afectada | Falla asociada | r [m] | n | m | I [1/m] | D [1/m ²] | Lp [m] |
|----------|-------------|--------------|--------|-----------------|--|-------|-----|-----|---------|-----------------------|--------|
| | Norte | Oeste | | | | | | | | | |
| EA-001 | 7°17'20"N | 72°57'42"O | 2.134 | J1-cl | Falla El Juncal | 0,5 | 41 | 94 | 20,5 | 59,84 | 0,34 |
| EA-002 | 7°14'44.5"N | 72°54'02.7"O | 3.752 | T3J1-tgd | Falla El Pedral | 1 | 12 | 25 | 3 | 3,98 | 0,74 |
| EA-005 | 7°16'16.8"N | 72°56'58.1"O | 2.281 | K1-ls | Falla Río Charta | 0,5 | 11 | 51 | 5,5 | 32,46 | 0,33 |
| EA-006 | 7°16'28.4"N | 72°57'13.3"O | 2.196 | T3J1-tgd | Falla Río Charta | 1 | 24 | 64 | 6 | 10,18 | 0,58 |
| EA-007 | 7°14'08.7"N | 72°53'59.4"O | 3.697 | Mp3N1-nb | Falla El Pedral | 1 | 8 | 31 | 2 | 4,93 | 0,4 |
| EA-008 | 7°14'36.3"N | 72°55'02.6"O | 3.272 | K1-r | Falla El Pedral | 1 | 17 | 31 | 4,25 | 4,9 | 0,86 |
| EA-009 | 7°14'34.3"N | 72°55'08.6"O | 3.268 | K1-r | Cabalgamiento en arco al oriente del área de estudio | 1 | 39 | 125 | 9,75 | 19,89 | 0,49 |
| EA-010 | 7°18'47.6"N | 72°58'58.1"O | 2.546 | K1-ls | Cabalgamientos, Falla La Cristalina | 0,5 | 15 | 128 | 7,5 | 81,48 | 0,18 |
| EA-011 | 7°17'40.4"N | 72°54'12.8"O | 3.538 | T3J1-tgd | Cabalgamiento en arco al oriente del área de estudio | 1 | 25 | 92 | 6,25 | 14,64 | 0,42 |
| EA-012 | 7°17'59.7"N | 72°53'25.2"O | 3.569 | T3J1-tgd | Falla Parámo Rico | 1 | 21 | 70 | 5,25 | 11,14 | 0,47 |
| EA-013 | 7°17'14.2"N | 72°54'00.6"O | 3.551 | T3J1-tgd | Falla Parámo Rico | 1 | 29 | 159 | 7,25 | 25,3 | 0,28 |
| EA-014 | 7°17'40.9"N | 72°54'33.7"O | 3.589 | T3J1-tgd | Falla Parámo Rico | 0,75 | 18 | 46 | 6 | 13,01 | 0,61 |
| EA-015 | 7°17'32.6"N | 72°55'24.9"O | 3.527 | T3J1-tgd | Falla Parámo Rico | 1 | 29 | 142 | 7,25 | 22,6 | 0,3 |
| EA-017 | 7°16'48.7"N | 73°01'31.4"O | 1.390 | K1-ls | Trazos de la falla Suratá | 1 | 7 | 70 | 1,25 | 11,14 | 0,15 |
| EA-019 | 7°16'50.2"N | 73°01'10.3"O | 1.458 | J1-cg | Trazos de la falla Suratá | 1 | 26 | 139 | 6,5 | 22,12 | 0,29 |
| EA-020 | 7°16'48.4"N | 73°00'59.9"O | 1.480 | OS-s | Trazos de la falla Suratá | 1 | 15 | 85 | 3,75 | 13,53 | 0,27 |
| EA-021 | 7°16'42.2"N | 73°00'50.2"O | 1.500 | OS-s | Trazos de la falla Suratá | 1 | 204 | 25 | 6,25 | 32,46 | 0,19 |
| EA-022 | 7°16'47.9"N | 73°00'47.0"O | 1.565 | OS-s | Trazos de la falla Suratá | 0,5 | 20 | 98 | 10 | 62,38 | 0,32 |
| EA-023 | 7°16'54.9"N | 72°59'59.5"O | 1.597 | J1-cg | Falla la Rinconada | 1 | 40 | 243 | 10 | 38,67 | 0,26 |
| EA-024 | 7°14'38.5"N | 72°55'27.1"O | 3.162 | K1-ls | Cabalgamiento en arco al oriente del área de estudio | 0,5 | 14 | 89 | 7 | 56,65 | 0,24 |
| EA-026 | 7°16'08.1"N | 72°56'28.8"O | 2.383 | T3J1-tgd | Falla Río Charta | 0,8 | 19 | 76 | 5,9 | 18,89 | 0,31 |
| EA-027 | 7°16'30.3"N | 72°57'33.6"O | 2.168 | K1-ls | Falla Río Charta | 0,5 | 15 | 104 | 4 | 16,55 | 0,24 |
| EA-029 | 7°16'59.4"N | 72°58'41.4"O | 1.866 | K1-ls | Falla La Rinconada y falla El Juncal | 0,75 | 257 | 31 | 10,33 | 72,71 | 0,14 |

Convenciones= r [m]: radio de la ventana de muestra en metros; n: número de intersecciones de las diaclasas con la ventana de muestra; m= número de terminaciones de las diaclasas dentro de la ventana de muestra I [1/m]: intensidad del diaclasamiento expresada en metros a la menos uno; D [1/m²]: densidad del diaclasamiento expresada en metros a la menos dos y Lp [m]: longitud promedio de las diaclasas en metros.

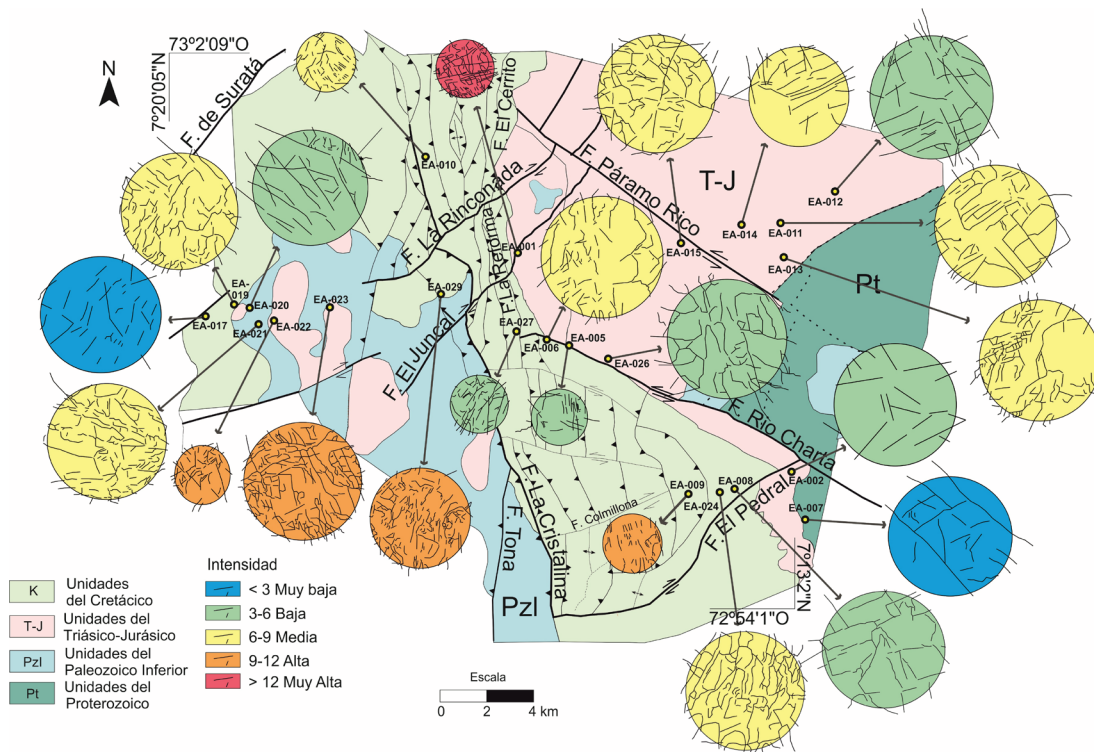


Figura 9. Intensidad del fracturamiento de la zona a partir del método de ventana de muestra. El diámetro de las ventanas circulares guarda proporción con el empleado en la medición sobre las fotografías. Pt: Unidades del Proterozoico, PzI: Unidades del Paleozoico inferior, T-J: Unidades Triásico-Jurásico y K: Unidades del Cretácico

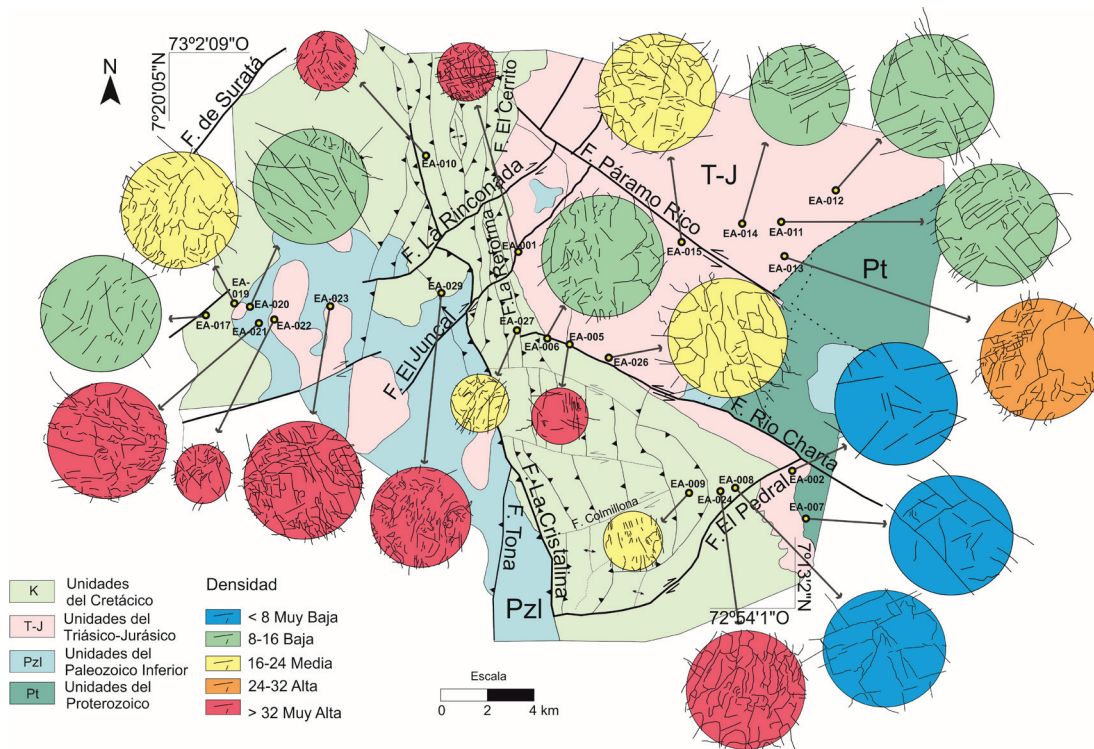


Figura 10. Densidad del fracturamiento de la zona a partir del método de ventana de muestra. Mismas condiciones y unidades de la figura anterior

DISCUSIÓN-APLICACIÓN

Los resultados del presente trabajo permiten un avance en el conocimiento de las estructuras geológicas de este sector del Macizo de Santander, especialmente porque se redefine su estilo estructural, buzamientos y vergencias. Además de establecer su cinemática, se propone un comportamiento en profundidad, al modelar las estructuras correspondientes con escamación de piel delgada o gruesa, y mostrar desplazamientos combinados en la horizontal y vertical en las fallas que afectan basamento. La inversión tectónica interpretada para la Cordillera Oriental colombiana (Cooper *et al.*, 1995; Sarmiento, 2001) también se puede documentar en este sector, principalmente a lo largo de la falla de La Cristalina, que con vergencia al E hace aflorar basamento al occidente y genera un abanico imbricado de cabalgamientos hacia el oriente, el cual afecta la secuencia sedimentaria.

En cuanto a los ejes de deformación, se interpretan como relacionados con el actual campo de esfuerzos, con compresión en sentido SO-NE y con presencia de estructuras de rumbo (en transpresión y transtensión) y cabalgamientos. Esto se suma al conocimiento estructural del Macizo de Santander con datos de estrías Kammer (1999) y Taboada *et al.* (2000) que se refieren de manera general al origen transpresivo de la Cordillera Oriental y que han sido compilados por Sarmiento (2001) (Figura 11) para complementar su versión sobre la inversión transpresional de la cordillera. Hacia Bucaramanga (más al sur de la zona de trabajo), Taboada *et al.* (2000) muestran tensores con régimen de rumbo NO-SE, más asociados con la falla de Bucaramanga, y tensores OSO-ENE relacionados con un régimen de compresión, los cuales están orientados un poco más al O (aprox. S70°O) que los encontrados en Charta (S56°O) durante el presente estudio.

De acuerdo con los resultados del análisis estructural, se muestra que, de los tres patrones de fracturamiento, el NE es paralelo a la dirección del eje principal de presión P (σ_1) calculado con las estrías. Se asume que las fracturas en esta dirección son de tensión (abiertas) y, por tanto, permiten la fácil circulación de fluidos. Con esta dirección del eje P se resalta una zona configurada entre las fallas de rumbo dextral de El Juncal y La Rinconada (franja gris en la Figura 12), donde la densidad e intensidad de fracturamiento presentan los valores más altos (Figuras 9 y 10) y, por tanto, una mayor porosidad secundaria en esta zona (condición favorable para el flujo y almacenamiento de agua). En el recuadro superior de la Figura 12 se muestra el círculo de Mohr obtenido a partir de datos de planos estriados medidos en la zona gris (n=17), en donde la relación de sus círculos

internos muestra el comportamiento transtensivo de estas fallas (R=0,66). Además, la falla La Rinconada presenta un componente de movimiento vertical normal asociado con esta zona de distensión, que también favorece el flujo de agua.

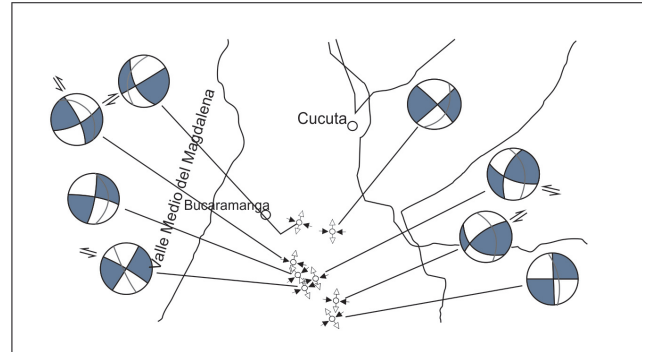


Figura 11. Compilación de análisis cinemáticos realizados en el Macizo de Santander. Las flechas negras indican acortamiento y las blancas, extensión. El balón de playa se ha adaptado con los cuadrantes negros y blancos, respectivamente, para comparar con los balones procesados en el presente trabajo. Modificado de Sarmiento (2001) a partir de Kammer (1999) y Taboada *et al.* (2000)

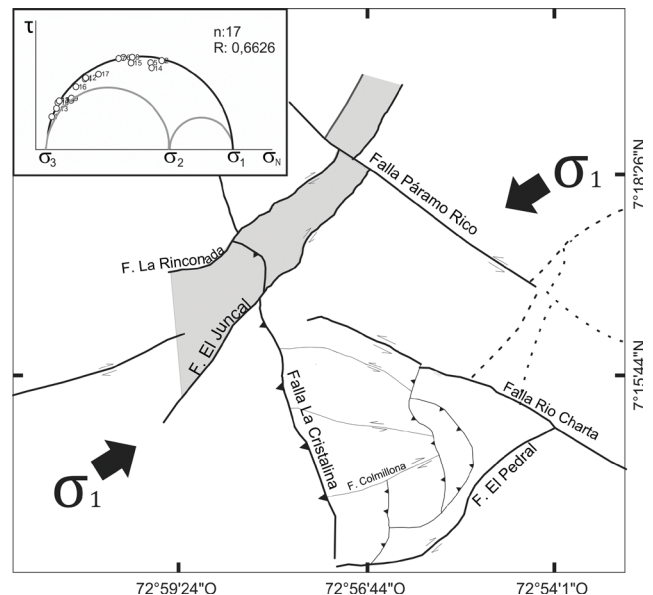


Figura 12. Relación entre las principales estructuras y el tensor determinado. Ver explicación en el texto

Con lo anterior, se propone una conexión hidráulica entre las zonas altas del complejo de páramos de Santurbán con las zonas bajas de la microcuenca del río Charta, por medio de la porosidad secundaria de las rocas, asumiendo como corredor principal la zona transversal NE, entre las fallas El Juncal y La Rinconada (Figura 12). Esta dirección

NE asociada a fracturas abiertas también es corroborada con la elipse de deformación resultante para el área y las distribución de las estructuras relacionadas (Figura 6D). En los sectores de Páramo Rico y Páramo de Berlín (Figura 1) se localizan los nacimientos de las corrientes de agua que alimentan los drenajes de la margen derecha del río Charta (quebradas El Juncal, La Rinconada, Tequendama, Páramo Rico, etc.). En estos sectores afloran rocas cristalinas correspondientes a las unidades Tonalita y Granodiorita y Gneis de Bucaramanga (Figura 2), donde la porosidad secundaria facilitaría la infiltración y circulación del agua subterránea que abastece o recarga a los acuíferos presentes en las zonas bajas y los caudales de los diferentes drenajes. Mediante estudios isotópicos en cuencas vecinas (río Tona y río de Oro –Figura 1) se ha encontrado que la recarga de los acuíferos de las zonas bajas proviene de alturas mayores a 1.800 m.s.n.m. (Gómez & Anaya, 2004). Algunos resultados de estudios geológicos regionales con enfoque en aguas subterráneas (INGEOMINAS-UIS, 2008), y especialmente los datos de isótopos (Gómez *et al.*, 2015), han mostrado que la parte alta del Macizo de Santander (Páramo de Berlín, al sur de la zona de estudio) contribuye en mayor proporción a la recarga de los acuíferos que están en contacto con el río de Oro en su zona baja (Piedecuesta).

Los factores que corroboran la conexión establecida se relacionan también con la cinemática de las principales fallas y la configuración de cuñas asociadas a las mismas (Figura 13), ya que debido al desplazamiento relativo a lo largo de las fallas que limitan los bloques involucrados se generan zonas de distensión y de compresión. Las de distensión son las más favorables para el paso de agua subterránea y precisamente se presentan en los sectores de Páramo Rico y Páramo de Berlín, donde se facilitaría la recarga de acuíferos. En la Figura 13 se muestra que las áreas con mayor porosidad secundaria (valores altos de intensidad y densidad de fracturas) coinciden principalmente con el corredor delimitado por las fallas La Rinconada y El Juncal, mientras que las de menor porosidad se encuentran asociadas a la falla de Río Charta.

Por otro lado, en la margen izquierda del río Charta nacen quebradas como La Cristalina y Lagunillas (Figura 1), donde se configura –en vista de planta– una cuña sedimentaria con predominio de areniscas cuarzosas, limosas y ligeramente conglomeráticas, calizas, lutitas y areniscas de grano fino que en su mayoría presentan una porosidad primaria muy baja. Sin embargo, estas rocas presentan una porosidad secundaria importante que se expresa por el fracturamiento y la presencia de manantiales (Figura 2).

Además de la conexión NE-SO establecida, se plantea que los puntos de afloramiento de agua subterráneas

reportados en el área de estudio (la mayoría ubicados en la cuña sedimentaria y en la unidad Gneis de Bucaramanga –Figura 2) están asociados a posibles flujos de agua provenientes del Páramo de Berlín, relacionados con el patrón de fracturamiento ONO, la falla de Río Charta y la disposición de las capas sedimentarias (Figuras 2 y 4) con buzamiento al occidente. En la actualidad las fracturas NE constituyen potenciales canales que permiten el flujo de aguas subterráneas, así como de fluidos contaminantes que ponen en riesgo tanto los acuíferos como las corrientes superficiales de las zonas más bajas, de las cuales se abastecen los municipios de Charta y alrededores, y las bocatomas del acueducto de la ciudad de Bucaramanga. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten proponer una dirección de flujo de agua subterránea (Figura 13) como primer paso para una hipótesis de flujo de agua regional en esta zona, que posteriormente deberá ser validada mediante estudios de hidroquímica y trazadores.

CONCLUSIONES

El análisis de fracturas en esta parte del Macizo de Santander permitió identificar las tres direcciones principales de deformación frágil al NE, NNO y ONO, las cuales afectan tanto el basamento cristalino de rocas metamórficas e ígneas como a la secuencia sedimentaria del Cretácico. En el sector centro occidental de macizo se presentan estilos estructurales de escamación gruesa y delgada, representados especialmente por las fallas de cabalgamiento con dirección aproximada NNO y vergencia al oriente, mientras las fracturas transversales con orientación al ONO y NE muestran desplazamientos asociados principalmente a un régimen de rumbo. A partir del análisis geomecánico de los planos con estrías de falla, se obtuvo para el área una elipse de deformación con su eje mayor en dirección NNO, la cual refleja un régimen de cizalla simple (eje principal de presión oblicuo a las fallas) que genera especialmente fallas de rumbo neto y de transtensión y explica la distribución y cinemática de las principales fallas y pliegues de la zona de estudio. La deformación general para este sector indica un eje principal de presión P a $S56^{\circ}O/11$ que se relaciona con un σ_1 orientado SO-NE, casi horizontal, bajo el cual se esperan fracturas abiertas si se localizan aproximadamente paralelas al tensor.

La medición y análisis de atributos de las fracturas tales como intensidad, densidad y longitud, permitió identificar sectores con alta porosidad secundaria que coinciden con las fracturas abiertas según la elipse de deformación. Igualmente, se determinaron sectores que facilitan la infiltración de fluidos o zonas distensivas, generadas por el desplazamiento relativo de los bloques según la cinemática de las fallas que los limitan.

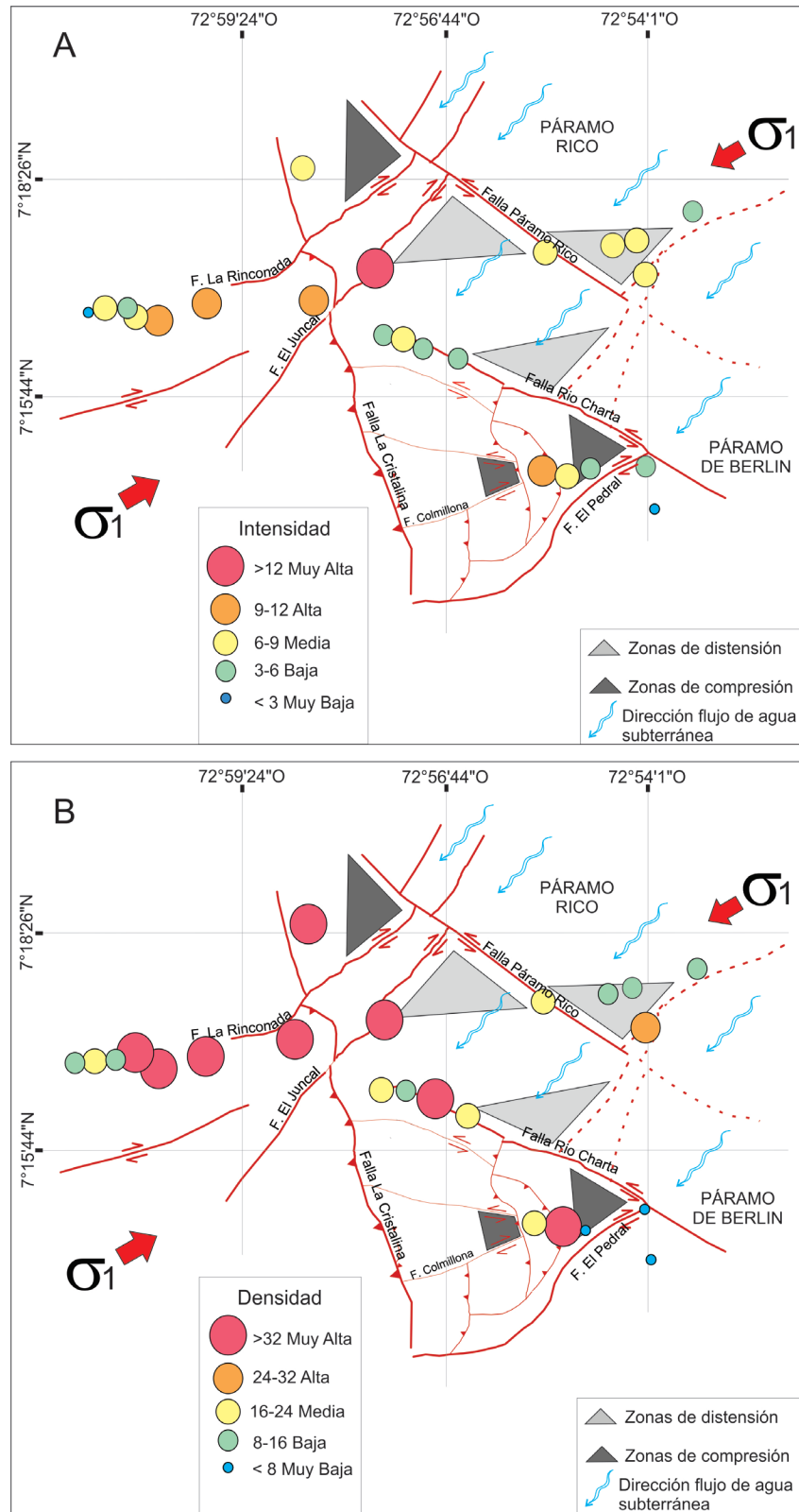


Figura 13. Resumen de los resultados de Intensidad (A) y Densidad (B) en un esquema de las principales estructuras del área de estudio con la definición de zonas de distensión y compresión según la cinemática de las fallas. Se indica también la dirección propuesta para el flujo de agua subterránea

Se propone una conexión entre la zonas altas del páramo con la zonas bajas de la microcuenca del río Charta, a lo largo del patrón de fracturas NE que indica importante porosidad secundaria de las rocas cristalinas, con presencia de diaclasas y fallas abiertas o de tensión, las cuales se comportan como canales de flujo de aguas subterráneas y potencialmente de fluidos contaminantes, lo cual deberá ser validado mediante estudios de hidroquímica y trazadores. Estos resultados son base para estudios de posibles efectos de las actividades de minería en las zonas de recarga y evaluación de potenciales consecuencias para las comunidades que habitan las partes más bajas de las cuencas involucradas.

AGRADECIMIENTOS

Estos resultados hacen parte de los estudios del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander Colombia, y del doctorado del primer autor (UNAL) en el Macizo de Santander. Se agradece a los colegas que aportaron observaciones al manuscrito inicial y de manera especial a los árbitros de la revista por su revisión y comentarios que permitieron mejorar el artículo.

REFERENCIAS

- ALLMENDINGER, R., CARDOZO, N., FISHER, D. (2012). Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology. Cambridge: University Press, 302 p.
- ANGELIER, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal Geophysical Research*, 89(7); pp. 5835-5848.
- ARLEGUI, L. & SIMÓN, J. (1993). El sistema de diaclasas N-S en el sector central de la Cuenca del Ebro. Relación con el campo de esfuerzos neógeno. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6(1-2); pp. 115-122.
- AUDEMARD, F.E. & AUDEMARD, F.A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345; pp. 299-327.
- BURG, J. (2011). *Structural Geology and Tectonics*. Zürich. ETH Zürich and Universität Zürich. Recuperado el 8 de septiembre de 2014 de <http://www.files.ethz.ch/structuralgeology/jpb/files/english/5paleostress.pdf>
- CASTELLANOS, L.E. & CETINA, M.A. (2013). Determinación de patrones de fracturamiento y análisis cinemático en inmediaciones del municipio de Charta, Macizo de Santander. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga, Colombia, 169 p.
- CEDIEL, F., SHAW, R., CÁCERES, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block, in Bartolini, C., Buffler, R. T., and Blickwede, J., (eds). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 79; pp. 815-848.
- CÉLÉRIER, B. (2010). Remarks on the relationship between the tectonic regime, the rake of the slip vector the dip of the nodal planes, and the plunges of the P, B, and T axes of earthquake focal mechanisms. *Tectonophysics*, 482; pp. 42-49.
- COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, J., TABORDA, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79 (10); pp. 1421-1443.
- DE VICENTE, G. (1988). Análisis Poblacional de Fallas. El Sector de enlace Sistema Central-Cordillera Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid. 331 p.
- FOSSEN, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge: University Press, New York, 463 p.
- GÓMEZ, S. & ANAYA, A. (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 11; pp. 37-50.
- GÓMEZ, S., TAUPIN, J.D., RUEDA, J.A. (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia). *Revista Peruana Geo-Atmosférica, RPGA* (4); pp. 44-61.
- GÓMEZ, J., MONTES, N.E., NIVIA, Á., DIEDERIX, H. COMPILADORES. (2015). *Mapa Geológico de Colombia 2015*. Escala 1:1'000.000. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- HATCHER, R. (1995). *Structural Geology. Principles, Concepts, and Problems (Vol. 2)*. New Jersey: Prentice Hall, 525 p.

- HUANG, Q. & ANGELIER, J. (1989). Inversion of Field Data in Fault Tectonics to Obtain the Regional Stress-II Using Conjugate Sets within Heterogeneous Families for Computing Palaeostress Axes. *Journal Geophysics*, 96; pp. 139-149.
- INGEOMINAS-UIS. (2008). Investigación geológica e hidrogeológica en La Mesa de Los Santos, sector nordeste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander. Informe interno convenio de cooperación INGEOMINAS – Universidad Industrial de Santander. 363 p.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. (2007). Atlas de Páramos de Colombia. Realizado por Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, C., Olaya, E., Posada, E., Cárdenas, L. Recuperado el 9 de septiembre del 2014 de <http://www.humboldt.org.co/es/noticias/item/299-atlas-de-paramos-de-colombia>
- JAXA/METI (2016). ALOS PALSAR (DTM - Resolución 12,5 m). A través de ASF DAAC, <https://www.asf.alaska.edu>, acceso 18/08/2016
- KAMMER, A. (1999). Observaciones acerca de un origen transpresivo de la Cordillera Oriental. *Geología Colombiana*, 24; pp. 29-53.
- MANTILLA, L., MENDOZA, H., BISSIG, T., CRAIG, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo miocénico en el distrito minero de Vetas- California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33(1); 43-58.
- MARRETT, R. & PEACOCK, D. (1999). Strain and Stress. *Journal of Structural Geology*, 21; pp. 1057-1063.
- MAULDON, M., DUNNE, W., ROHRBAUGH, JR, M. (2001) Circular Scanlines and Circular Windows: new tools for characterizing. *Journal of Structural Geology*, 23; pp. 247-258
- MORENO, G. & GARCÍA, O. (2006). Caracterización Cuantitativa de Patrones de Fracturamiento mediante Ventanas Circulares y Análisis Fractal. *Geología Colombiana*, 31; pp. 73-90.
- OSORIO, J., HERNÁNDEZ, C., TORRES, E., BOTERO, P. (2008). Modelo geodinámico del Macizo de Santander. Informe interno INGEOMINAS, 152p.
- RECHES, Z. (1983). Faulting of Rocks in Three-Dimensional Strain Fields II. Theoretical Analysis. *Tectonophysics*, 95; pp. 133-156.
- REITER, F. & ACS, P. (2013). Operating Manual TectonicsFP 1.7.7.
- ROYERO, J., VARGAS, R. (1999). Geología del Departamento de Santander, escala 1:300.000. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).
- ROYERO, J. & CLAVIJO, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander, Memoria Explicativa, escala 1:400.000. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).
- SARMIENTO, L. (2001). Mesozoic rifting and cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. PhD. Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam, 296 p.
- TABOADA, A., RIVERA, L., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J., RIVERA, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5); pp. 787-813.
- WARD, D.E., GOLDSMITH, R., CRUZ B., J., RESTREPO A.H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico, Publicaciones Especiales*, 130 p.
- WARD, D.E., GOLDSMITH, R., RESTREPO, H., GÓMEZ, E.R. (1977a). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, escala 1:100.000. Colombia: Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).
- WARD, D.E., RICHARD, G., CRUZ, J., JARAMILLO, L., VARGAS, R. (1977b). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-13, Pamplona, escala 1:100.000. Colombia: Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).

