

## Structural analysis of the Zipaquirá Anticline (Eastern Cordillera, Colombia)

Helbert García<sup>a</sup> & Giovanni Jiménez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. [helbertgarciad@gmail.com](mailto:helbertgarciad@gmail.com)

<sup>b</sup> Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. [gjimenezd@gmail.com](mailto:gjimenezd@gmail.com)

Received: April 30<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: October 9<sup>th</sup>, 2015. Accepted: November 26<sup>th</sup>, 2015..

### Abstract

We report geological mapping, recollection of kinematic data, fracture data and transverse sections along the Zipaquirá Anticline (ZA) used to recognize the deformation mechanisms involved in the kinematic evolution of the ZA. The Zipaquirá Anticline (ZA) is an asymmetrical fold with variation in the strike of fold axis and affected by some transverse faults (Transverse Zones) along its extension. The main fracture set in the ZA was formed in a pre-folding stage (J1), controlling the formation and propagation of sin-folding fractures (J2). Another fracture set (J3) was only recognized near the Zipaquirá Lineament where several factors converge to deform considerably the rocks (e.g. Salt diapirs). We calculate the stress tensor from kinematic data, resulting in fractures formed in an extensional environment induced by diapir intrusion in the fold core. According to the transverse sections and previous considerations, thickness variation in Upper Cretaceous-Paleocene formations may indicate the onset of the pre-Andean Orogeny and the uplift of separated blocks, controlled by the transverse zones.

*Keywords:* Fracture analysis, Transverse zones, Neusa Fault, Zipaquirá Lineament, Salt diapirs, Andean Orogeny.

## Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá (Cordillera Oriental, Colombia)

### Resumen

Se llevó a cabo un análisis estructural a partir de una revisión cartográfica, datos cinemáticos, datos de fracturas y secciones transversales a lo largo del Anticlinal de Zipaquirá (AZ) que permitieran plantear la evolución cinemática del pliegue. El AZ es una estructura que presenta curvatura en su eje axial y tiene un rumbo general en dirección N30E. A lo largo del pliegue se reconoce un patrón de fallas transversales (Zonas Transversales) que lo intersectan en diversos sectores. El análisis de fracturas nos permitió reconocer una distribución de planos perpendiculares a la estratificación que fueron formados con anterioridad al pliegue (J1) y que condicionaron la formación y propagación de un conjunto de fracturas sin-plegamiento (J2). Un tercer patrón (J3) fue reconocido únicamente en cercanías al Lineamiento de Zipaquirá donde diversos elementos interactúan y aumentan la complejidad de la deformación (e.g. diapiros salinos). Se calculó el tensor de esfuerzos demostrando un ambiente distensivo generado por cuerpos salinos en profundidad. Al observar las secciones transversales y las consideraciones previas, se reconocen variaciones de espesor notables en formaciones del Cretácico Superior-Paleoceno que podrían indicar el inicio de la deformación pre-andina y el levantamiento de bloques separados y controlados estructuralmente por las zonas transversales.

*Palabras clave:* Análisis de fracturas, Zonas transversales, Falla de Neusa, Lineamiento de Zipaquirá, Diapiros salinos, Orogenia Andina.

### 1. Introducción

La Cordillera Oriental de Colombia (CO) es un cinturón plegado bivergente cuya evolución ha sido influenciada por múltiples factores que afectaron su desarrollo y formación como fallas normales reactivadas, partición de la deformación, entre otros (Jiménez et al., 2014 y referencias). El Anticlinal de Zipaquirá (AZ), localizado en la zona central de la CO (Fig. 1), presenta curvatura y variación en el rumbo de su eje axial, está

limitado en diversos sectores por fallas inversas de alto ángulo consideradas probablemente como fallas normales reactivadas (Camargo, 1995) y cuyo núcleo está intruido por cuerpos salinos del Cretácico Inferior, lo cual lo convierte en un modelo a escala de la CO y un caso de interés para entender los caminos de evolución de una estructura que ha sido afectada por múltiples elementos. Trabajos previos realizados en la zona han estado orientados a estudios estratigráficos y estructurales parciales.

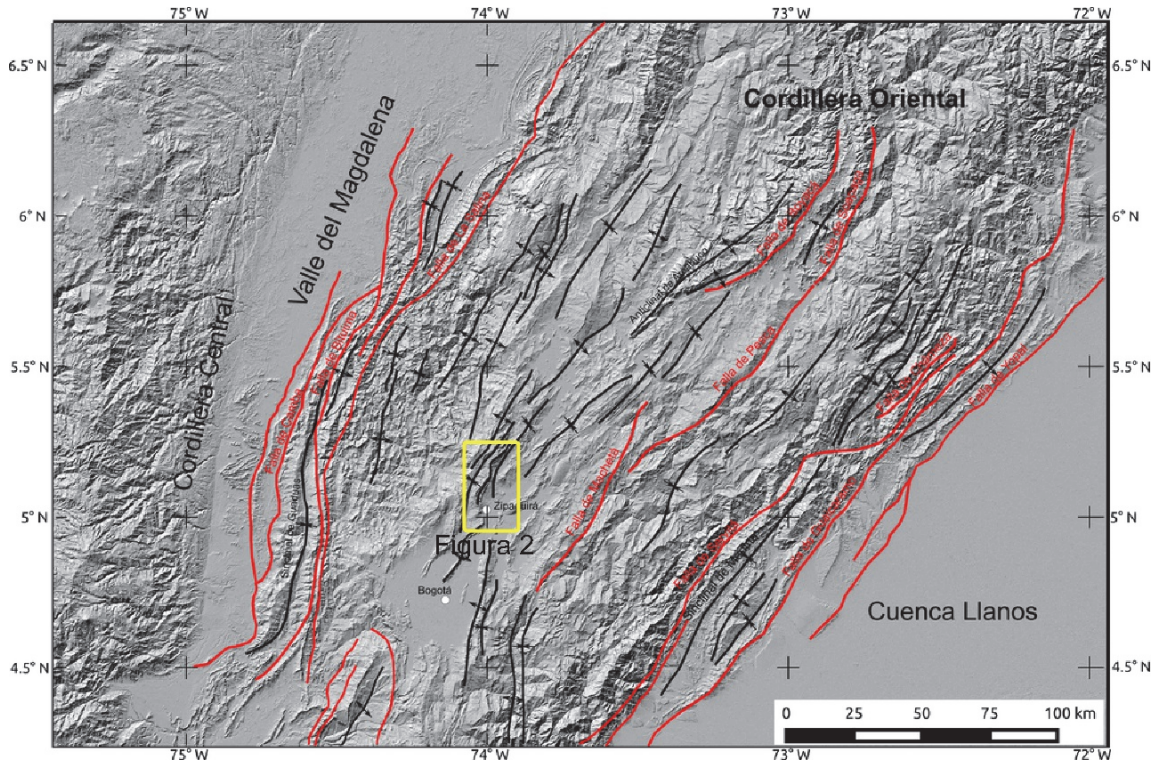


Figura 1. Modelo de sombras donde se muestra la dirección general de las estructuras y los límites estructurales que separan la Cordillera Oriental de las cuencas del Valle del Magdalena y Llanos. La zona de estudio está representada por el recuadro amarillo.

Fuente: Modificado de Bayona et al. (2013).

Julivert (1963) hace un análisis de los factores que controlan la evolución del Anticlinal de Chía al sur de la zona de estudio y establece cuatro factores claves en su evolución: tectónica de revestimiento, haloquinesis, gravedad y erosión diferencial, además de proponer la presencia de fallas oblicuas que segmentan la estructura. Este patrón oblicuo corresponde a una serie de fallas y lineamientos de dirección NW-SE que generan inflexión en rocas del Cretácico, formación de bloques tectónicos y cuyo movimiento es principalmente sinistral (Camargo, 1995; Velandia y De Bermoudes, 2002; Fierro-Morales y Angel-Amaya, 2008). En algunas partes de la Sabana de Bogotá los lineamientos transversales están siendo cubiertos por sedimentos Plio-cuaternarios o presentan movimientos discretos superficiales (Mojica et al., 2007). El análisis estructural más detallado fue presentado por Castro y Lozano (2003) y Lozano et al. (2003), desarrollado en la parte central del AZ, en el sector del Embalse de Neusa. Utilizando información geológica de superficie, datos estructurales y secciones balanceadas, determinaron que el pliegue y las estructuras alledañas son el producto de cabalgamientos, retrocabalgamientos y cuñas tectónicas, además establecen que la complejidad estructural es producto del alto grado de deformación asociado a dos zonas de despegue en la Formación Chipaque y a rampas laterales. A pesar de los estudios mencionados previamente, ninguno ha considerado las estructuras transversales en la evolución cinemática de la sub-cuenca, en especial del AZ. El análisis de estructuras plegadas a menor escala, controladas por factores que se encuentran a nivel regional como fallas normales y zonas de acomodación reactivadas, fallas transversales, extensos niveles

salinos en la base de la secuencia sedimentaria y fracturas *s.l.* permitiría conocer los caminos de evolución y formación de las diferentes estructuras y así realizar comparaciones a nivel regional que permitan estimar las fases de desarrollo del orógeno. La curvatura del AZ puede ser analizada por al menos dos hipótesis: la primera hipótesis está asociada con un oroclino, el cual es definido por Carey (1955) como una estructura recta, la cual evoluciona a una estructura curva debido a rotaciones en los ejes verticales y que dichas rotaciones guardan una relación lineal con el rumbo de la estructura. La segunda hipótesis se asocia a un orógeno primario, donde las rotaciones en este caso no tienen relación lineal con el rumbo de la estructura y la curvatura es controlada por factores como anisotropías del basamento, forma de la cuenca, entre otros (Marshak, 2004) o por la influencia de zonas transversales. Respecto a las zonas transversales, Thomas (1990) las define como conectores paralelos u oblicuos a la dirección de transporte tectónico que ejercen un control estructural importante al producir terminación de pliegues, cambios en los niveles de despegue de las fallas, terminación de fallas, curvaturas, entre otros. Estas zonas transversales han sido reconocidas tanto en el Valle Superior del Magdalena (Jiménez et al., 2012) como en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental por Bayona et al. (2008). Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio se llevó a cabo en el AZ para entender la evolución cinemática de la estructura, definir si el AZ corresponde a un Oroclino o a un Orogeno Primario, para lo cual se realizó una cartografía geológica, modelos digitales de sombras, colección de datos de fractura, estrías de falla y secciones estructurales transversales al AZ.

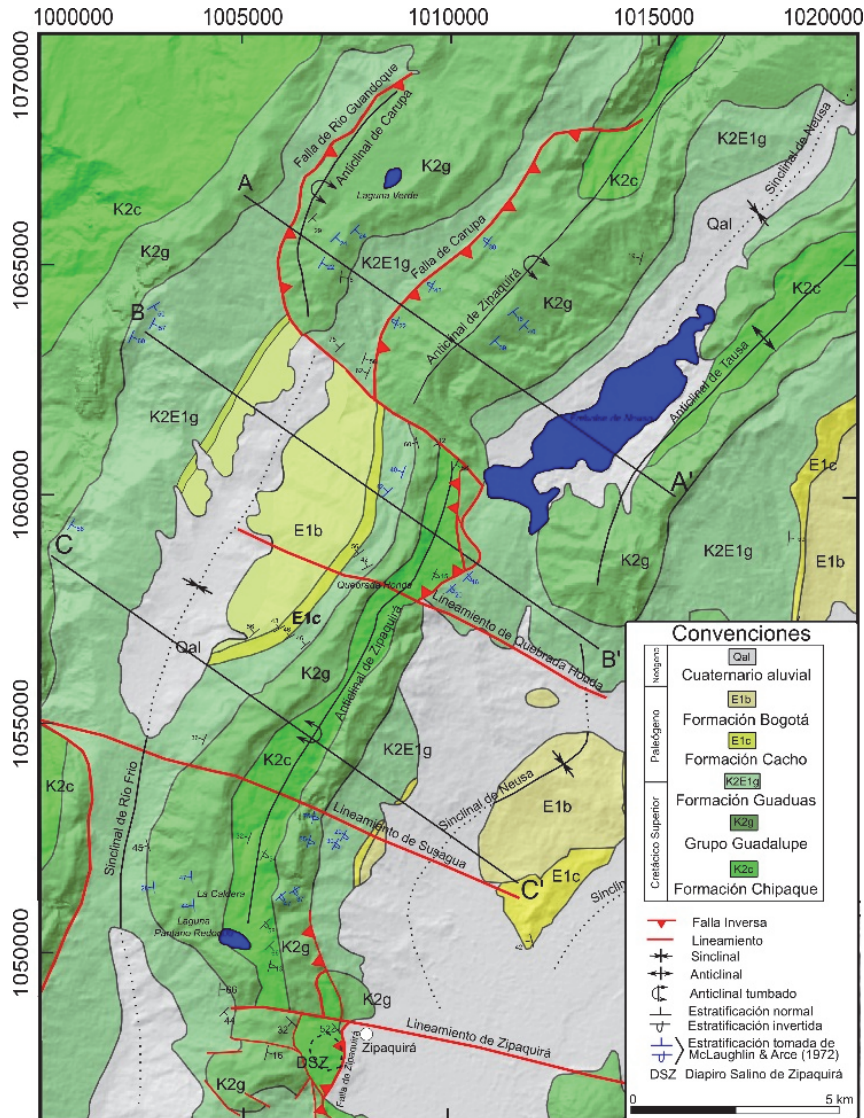


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio donde se observan las diferentes estructuras regionales como fallas y pliegues, el Diapiro Salino de Zipaquirá (DSZ) y la orientación de las secciones transversales.  
Fuente: Modificado de Montoya y Reyes (2003).

## 2. Marco geológico

La zona de estudio está localizada en la sub-cuenca de Cundinamarca, en el eje axial de la Cordillera Oriental (CO), la cual hace parte de los Andes del Norte. En esta zona se presenta la interacción de las placas Nazca, Caribe (ambas de afinidad oceánica) y Suramericana (de afinidad continental), además de numerosas subplacas y bloques tectónicos que presentan una historia geológica evolutiva que puede ser diferente respecto a la tectónica regional (e.g. Bloque Maracaibo). El bloque norandino ha sido afectado por múltiples eventos orogénicos que registran la actividad entre las placas Suramericana, Farallón (Nazca-Cocos) y Caribe al menos desde el Cretácico Superior con la acreción de los terrenos occidentales y la colisión del Plateau Caribe con la margen noroccidental de Suramérica (Kerr et al., 2005). Esta

colisión ha sido considerada clave para el inicio del levantamiento en la CO, lo cual llevó a la formación de dos cuencas foreland: cuenca Llanos al oriente y cuenca del Valle Medio del Magdalena al occidente. Trabajos recientes han permitido estimar que los primeros pulsos de deformación están asociados a la reactivación de fallas normales heredadas del régimen extensivo Mesozoico, el desarrollo de sub-cuencas sin-orogénicas y magmatismo, como respuesta a la colisión y posterior subducción de la placa Caribe en el Maastrichtiano-Paleoceno (Bayona et al., 2013). Durante el Eoceno continúa la reactivación de fallas y el desarrollo de un régimen compresivo a transpresivo fue evidenciado en la Cordillera Oriental, donde el estilo estructural fue dominado por la formación de abanicos imbricados que fueron erodados y cubiertos por el registro sedimentario del

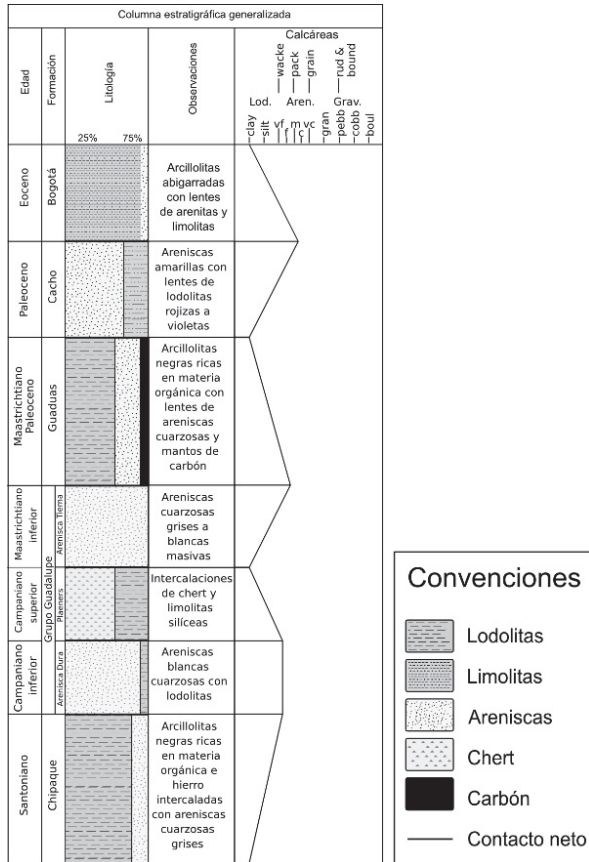


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio. Las litologías se muestran en forma horizontal y representa el porcentaje de cada tipo de roca en cada unidad litoestratigráfica. Fuente: Autores.

Oligoceno Superior (Corredor, 2003). En el piedemonte occidental se ve reflejado este evento por el inicio del levantamiento del Anticlinal de los Cobardes (Caballero et al., 2010). Para el Neógeno, se presenta la mayor deformación con una inversión tectónica fuerte de las fallas normales que limitaban el rift Mesozoico, como las fallas de Servitá-Lengupa y Pajarito en el piedemonte oriental (Mora et al., 2010), así como las fallas de Soápaga y Boyacá en la parte axial de la CO, donde han sido consideradas estructuras que afectan basamento (e.g. Kammer, 1996; Kammer y Sánchez, 2006). Ramirez-Arias et al. (2010) demuestra en el Sinclinal de Nunchía el levantamiento final de la Cordillera Oriental durante el Mioceno, siendo reflejado en el cambio de las paleocorrientes y un mayor aporte de componentes líticos sedimentarios durante la depositación de la Formación Guayabo.

El AZ es un anticlinal asimétrico separado en dos estructuras por la Falla de Neusa: Anticlinal de Zipaquirá Norte (AZN) y Anticlinal de Zipaquirá Sur (AZS) (Fig. 2). El AZN tiene vergencia al occidente, con su flanco posterior invertido y cortado por la Falla de Carupa. El núcleo está compuesto por rocas marinas Cretácicas de la Formación Arenisca Dura que comprenden areniscas blancas cuarzosas

con niveles de lodolitas (Fig. 3). Hacia los flancos afloran las formaciones Plaeners, Arenisca Tierna y Guaduas del Cretácico Superior, areniscas blancas masivas y arcillolitas negras ricas en materia orgánica con mantos de carbón respectivamente (Fig. 3). El AZS tiene vergencia el oriente, con su flanco posterior invertido (Fig. 2). El núcleo es una depresión generada por las rocas incompetentes de la Formación Chipaque, mientras los flancos muestran pendientes abruptas y escarpes estructurales de la Formación Arenisca Dura y Arenisca Tierna. El flanco anterior del AZS muestra franjas de rocas del Paleógeno que comprenden areniscas ocre conglomeráticas con limolitas (Formación Cacho) y arcillolitas abigarradas con lentes de areniscas y limolitas (Formación Bogotá) (Fig. 3). Al occidente de Zipaquirá y al sur del AZS, un diapiro salino intruye las rocas de la Formación Chipaque y se encuentra en fase pasiva (Fig. 2). Tiene una orientación NW-SE con apariencia elipsooidal donde su eje más largo mide 1.9 Km y su eje más corto de 1.1 Km (López et al., 1990).

### 3. Métodos

Para llevar a cabo el análisis del AZ se realizó como primera parte una revisión cartográfica a escala 1:50.000 donde se delimitaron las unidades lito-estratigráficas aflorantes así como las principales estructuras. Posteriormente se llevó a cabo la toma de datos estructurales (estratificación, fracturas s.l.) teniendo en cuenta la corrección de la declinación magnética del campo magnético terrestre, que para la zona de estudio es de aproximadamente -7° de acuerdo al National Geophysical Data Center del NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>). Finalmente, se comparó la cartografía geológica hecha por Montoya y Reyes (2003) con la revisión y se complementó con imágenes satelitales Landsat.

Los análisis de fracturas fueron desarrollados en 25 estaciones a lo largo del AZ y en cercanías a las zonas transversales donde se midió el azimuth de rumbo, la inclinación y el tipo de movimiento con respecto al plano para diferenciar diaclasas y fracturas de tensión, de fracturas de cizalla con desplazamientos milimétricos. Las formaciones que abarcan la zona de muestreo son Chipaque, Grupo Guadalupe (Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca Tierna) y Cacho. El procesamiento se realizó utilizando el software SG2PS (Sasvári y Baharev, 2014) donde se elaboraron gráficos de rosa que representan el azimuth de rumbo de cada uno de los conjuntos y se llevó a cabo la corrección del pliegue de los mismos. Los gráficos de contornos de polos fueron trabajados en el software OpenStereo (Grohmann y Campanha, 2010) y las estadísticas de la densidad de fracturas fueron obtenidas a partir de la metodología de Fisher que el software ofrece. El análisis de los datos de estrias se realizó en el programa Win-Tensor 5.0.5 (Delvaux y Sperner, 2003) utilizando los procedimientos de diedros rectos mejorado y optimización rotacional para separar los subconjuntos que fueran

mecánicamente coherentes para graficarlos en el software SG2PS. El subconjunto de estrías que mostraron coherencia mecánica se utilizó en el software FaultKin 6 (Allmendinger et al., 2012) para calcular el balón de playa y la solución del plano de falla. Las secciones estructurales transversales fueron construidas a partir de datos de campo integrados con datos de cartografías previas realizadas por McLaughlin y Arce (1972) y Montoya y Reyes (2003).

#### 4. Resultados

Se presentan inicialmente los resultados obtenidos en el análisis de fracturas para los dominios del AZN y del AZS. Desde un punto de vista general se reconocieron cuatro conjuntos de fracturas que fueron clasificadas con respecto a su posición en cada una de las unidades y sus relaciones ortogonales con la estratificación. El conjunto de fracturas dominante muestra un arreglo ortogonal entre sí que a su vez es perpendicular a la estratificación sin importar la inclinación de las capas ni la posición en el pliegue. Este conjunto se denotará como J1. Otro conjunto de fracturas se muestra oblicuo entre sí y a su vez con inclinaciones entre 60 y 78° con respecto a la estratificación, denominado conjunto J2. En el Cerro de la Virgen al NW de Zipaquirá y justo al norte del Lineamiento de Zipaquirá, un patrón de fracturamiento exclusivo de esta zona pudo ser reconocido: J1B, conjunto de fracturas perpendiculares a la estratificación y oblicuas al conjunto J1. Hacia el cabeceo sur del AZN, un tercer conjunto (J3) que no tiene relación ortogonal ni con los planos pre-existentes ni con la estratificación se puede encontrar y muestra orientación al norte, siendo menor del 5% del total de fracturas medidas.

##### 4.1. Fracturamiento en el Anticlinal de Zipaquirá

###### 4.1.1. Anticlinal de Zipaquirá Norte

En el sector del río Guandoque, el patrón de fracturamiento muestra una tendencia hacia el NW-SE con direcciones subordinadas hacia el NNW y SW siguiendo un patrón ortogonal (Fig. 4). Las diaclasas tienen mayor espaciamiento hacia los niveles de areniscas y calizas, mientras que hacia las limolitas y areniscas de grano fino de la Formación Plaeners, el patrón es mucho más denso y menos espaciado. Después de horizontalizar los datos de diaclasas, se observa que el 40% de las fracturas están en posición vertical con inclinaciones mayores a 78° (conjunto J1), mientras que el otro 60% presenta inclinaciones que van desde 55° hasta 70° (conjunto J2) (Fig. 5). Las diaclasas que son verticales tienen un rumbo preferencial E-SE, al igual que la mayoría de las diaclasas secundarias. Muchas de las fracturas están rellenas con óxidos, principalmente hematita supergénica. Se observa en las areniscas de la Formación Plaeners el desarrollo de pequeños desplazamientos y cizalla en algunos planos de fracturamiento.

Hacia el cabeceo sur del AZN se midieron diaclasas en areniscas y rocas silíceas de las formaciones Dura y Plaeners respectivamente. Al igual que en el sector del río Guandoque

las rocas silíceas presentan un arreglo menos espaciado con fracturas que se propagan por los diferentes niveles de chert y limolitas silíceas. Las areniscas son más resistentes y las diaclasas se presentan cada 30 o 40 cm. La principal dirección de las diaclasas es hacia el NE con otro arreglo ortogonal en dirección E (Fig. 4). Después de horizontalizar los planos cerca del 60 % de las fracturas son verticales a sub-verticales con variaciones desde los 78° hasta los 89° y corresponden al conjunto J1, mientras el 35 % varía desde los 70° hasta los 77° y representan el conjunto J2 (Fig. 5). En este sector aparece un tercer conjunto de diaclasas (J3), considerado neoformado por sus relaciones de corte con otras fracturas y la estratificación. No se observa desplazamiento en las fracturas como si sucede en el sector del río Guandoque. En el flanco este del AZN se sigue observando el patrón de fracturamiento ortogonal en dirección SW con algunas variaciones hacia el NW (Fig. 4). Se utilizaron datos recolectados en areniscas y limolitas de la Formación Plaeners, evidenciando un espaciamiento de las fracturas entre 7 y 10 cm en los niveles menos espesos. En algunos sectores se observan fracturas de cizalla con desplazamientos de hasta 5 cm. Después de horizontalizar los planos se observa un predominio en dirección NE con cerca del 75 % de los datos correspondiendo al conjunto de fracturas J1, mientras que el otro 25% tienen valores de inclinación entre los 64 y 73° lo cual estaría asociado al conjunto J2 (Fig. 5).

###### 4.1.2. Anticlinal de Zipaquirá Sur

Hacia el flanco oeste y la charnela del pliegue, al sur de la Falla de Neusa, se observa un cambio entre las principales direcciones de fracturamiento. Mientras que hacia el AZN las fracturas tenían rumbo al NE-SW y al E-WSW, hacia el AZS el principal conjunto está orientado en dirección NW-SE o al E-SE (Fig. 4). Después de horizontalizar los datos, cerca del 90 % de los planos corresponden al conjunto J1 y tienen inclinaciones que van desde los 79° hasta los 88°, mientras que el 10 % restante corresponde al conjunto J2 con inclinaciones promedio de 71° (Fig. 5).

Hacia el sur en el sector de La Caldera, múltiples direcciones de fracturas se presentan subordinadas al rumbo principal, variando desde ESE a WNW (Fig. 4). Al observar el diagrama de polos se nota que el 100 % de los datos corresponde al conjunto J1 (Fig. 5). El clivaje de fractura que afecta los niveles incompetentes de la Formación Chipaque sigue el rumbo preferencial de diaclasas, al igual que algunas fallas con presencia de gouge que cortan el clivaje.

En la dirección principal (120° aprox.) el patrón de fracturamiento está formado por fallas, diaclasas, clivaje de fractura y venas rellenas con hematita supergénica, desarrolladas tanto en las areniscas como en los niveles de lutitas hematitizadas que muestran bandas de deformación.

A medida que se acerca al Lineamiento de Zipaquirá, se realiza una vez más la inversión en el patrón de fracturamiento, volviendo a ser dominante las direcciones al NE-SW con valores subordinados al SE (Fig. 4). En este sector se observaron principalmente diaclasas desarrolladas

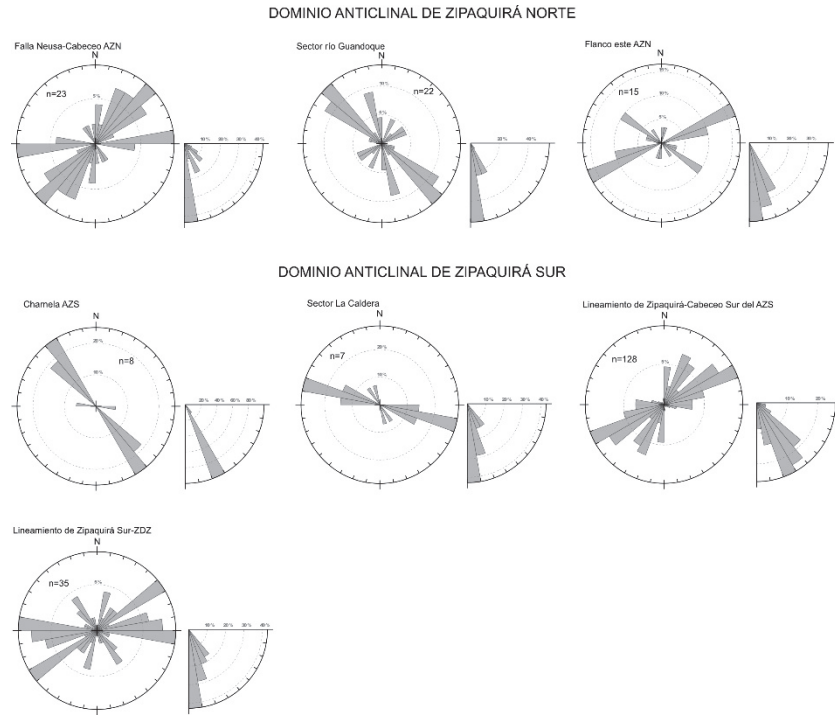


Figura 4. Diagramas de rosas para los dominios del AZN y AZS. En cada una de las proyecciones se representa el azimuth de rumbo e inclinación. Para cada gráfico se muestran los porcentajes de cada circunferencia y el número de fracturas medidos (n). Ver localización de los sectores en la Figura 2. Fuente: Autores.

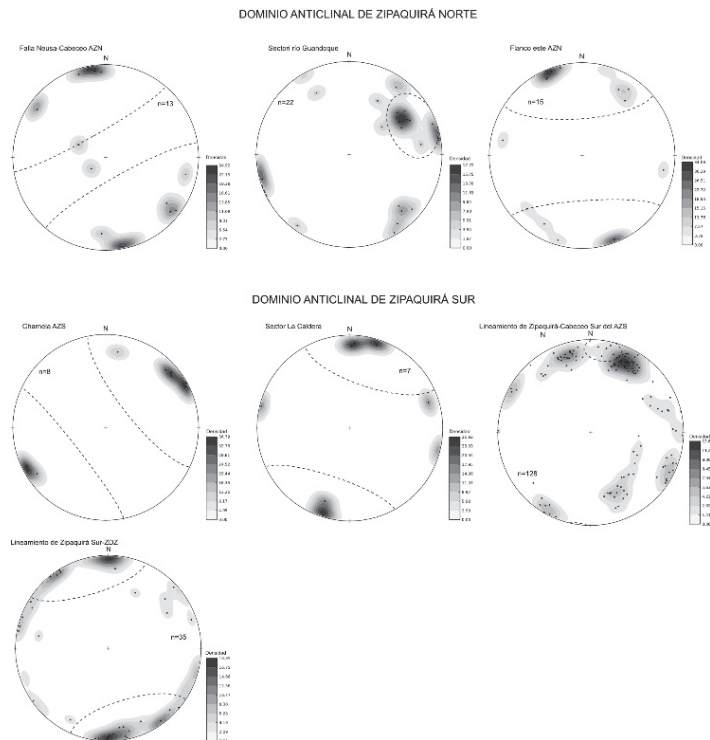


Figura 5. Proyecciones en hemisferio inferior de los contornos de polos de las fracturas después de la corrección por el pliegue. Se observan variaciones en las direcciones de fracturamiento en cada dominio y la presencia de los conjuntos J1 (polos horizontales) y J2 (polos subhorizontales) dependiendo del ángulo con respecto a la horizontal. Se plotó también el número de datos de fracturas por sector (n), el intervalo de confianza de 95% y la escala de densidad de datos. Fuente: Autores.

con alta frecuencia en las areniscas de las formaciones Dura y Tierra del Grupo Guadalupe. La zona presenta un desarrollo estructural complejo con inversión en la polaridad de las capas, segmentación en fallas menores, fracturamiento intenso y plegamiento a escala mesoscópica. Múltiples fracturas de cizalla normal con desplazamientos de hasta 0.8 cm se observan en las lodolitas de la Formación Chipaque, con rumbo promedio de  $111^\circ$ , siendo subparalelas con el lineamiento. Las diaclasas al ser horizontalizadas muestran que el 60 % corresponden al set J1, mientras que el conjunto J2 tiene un 25 % en el total de las fracturas (Fig. 5). Justo al norte del Lineamiento la secuencia está invertida, los planos de fracturas evidencian cizallamiento y relleno con óxidos de hierro. En el afloramiento se observa deslizamiento por flexura y pliegues a escala mesoscópica, oblicuos al lineamiento y cuyo eje axial tiene un rumbo medio de  $170^\circ$  y cuya orientación permite estimar una cinemática sinistral para el Lineamiento de Zipaquirá. El patrón de fracturamiento exhibe el arreglo ortogonal típico (conjunto J1) con desarrollo de un tercer conjunto de diaclasas oblicuas al J1 y que mantiene una relación perpendicular con la estratificación (J1B) (Fig. 6). En esta zona aparece el conjunto J3, cuya expresión es mínima pero constante en los sectores al norte con un rumbo casi N-S y que alcanza un 15 % del total de las fracturas. El último patrón está asociado a la deformación posterior al plegamiento, producto de deformación de cuerpo rígido.

#### 4.2. Datos cinemáticos en el Anticlinal de Zipaquirá

El desarrollo de planos con cizallamiento es muy común en diversas partes del AZ, sin embargo la presencia de planos estriados o con evidencia de desplazamiento medible es poca. En total se midieron 13 datos de planos estriados y 11 datos de fallas en las cuales se podía observar la cantidad de desplazamiento y/o su cinemática. Después de procesarlos en el software Win-Tensor 5.0.5 (Delvaux & Sperner, 2003) y discriminarlos se obtuvo un subconjunto con coherencia mecánica y que permitió realizar interpretaciones generales acerca del estado de esfuerzos y esbozar un análisis cinemático preliminar siguiendo la metodología propuesta por Marret y Allmendinger (1990).

El subconjunto que incluía la mayoría de datos (6) y que corresponde con los esfuerzos que predominan en el AZ tiene un esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) de  $109^\circ$  con una inclinación de  $82^\circ$ , un esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) de rumbo  $215^\circ$  con inclinación  $2^\circ$  y un esfuerzo mínimo ( $\sigma_3$ ) con rumbo  $305^\circ$  e inclinación  $8^\circ$  (Fig. 7). El radio de esfuerzos calculado es de 0.067 que puede ser asociado a un régimen radial extensivo, evidenciando de manera indirecta el emplazamiento de cuerpos salinos en profundidad que llevan a inducir un campo de esfuerzos local con desarrollo predominante de fallas normales.

En la Tabla 1 se muestran los datos de las fallas del subconjunto 1 con los ejes cinemáticos. A partir de los ejes P y T se llevó a cabo el cálculo de la solución del plano de falla por el método de Linked Bingham en el programa Faultkin, obteniendo así los planos nodales P1 con azimuth  $24.5^\circ$  e inclinación

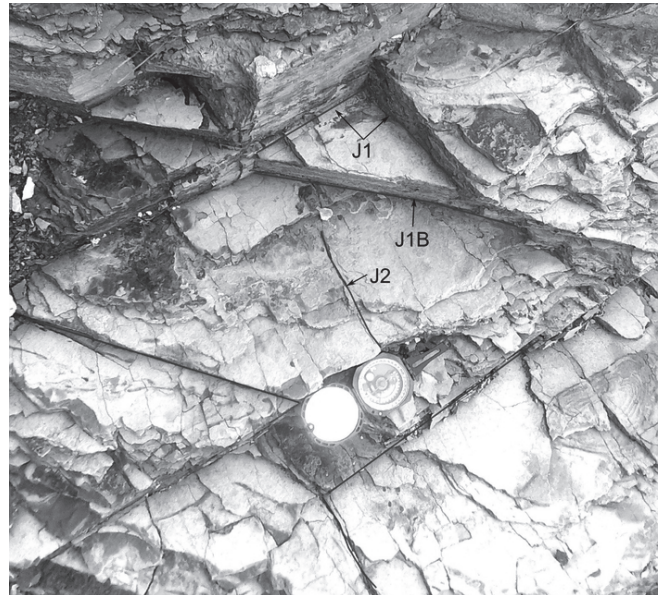


Figura 6. Patrón de fracturamiento al norte del Lineamiento de Zipaquirá donde se observa la estratificación y su relación con los conjuntos de fracturas J1, J2 y J1B.  
Fuente: Autores.

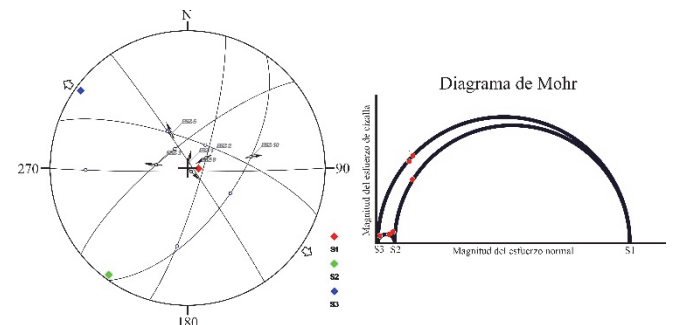


Figura 7. Proyección estereográfica en hemisferio inferior con los planos de falla y el movimiento usando el método de Angelier. Se muestra la orientación de los ejes de esfuerzos y el movimiento predominantemente extensivo en dirección NW-SE. El diagrama de Mohr permite reconocer que el 50% de los planos son neoformados, mientras que el otro 50% están en el campo de los reactivados.  
Fuente: Autores

$59.1^\circ$  y el P2 con azimuth  $284.1^\circ$  e inclinación  $73.2^\circ$  (Fig. 8). Es de resaltar que el plano P2 corresponde con las estructuras transversales que intersectan el AZ como la Falla de Neusa y el Lineamiento de Zipaquirá, y que de acuerdo a la orientación de los ejes de presión y tensión puede estimar una cinemática sinistral-normal, al igual que lo habían reportado autores como Velandia y De Bermoudes (2002), Fierro-Morales y Angel-Amaya (2008).

#### 4.3. Análisis estructural del Anticlinal de Zipaquirá

En la zona de estudio se definen claramente dos dominios estructurales limitados por la Falla de Neusa: Anticlinal de Zipaquirá Sur (AZS) y Norte (AZN). El AZS es un pliegue asimétrico cuyo eje axial muestra un rumbo N40E. Hacia su núcleo afloran las rocas de la Formación Chipaque,

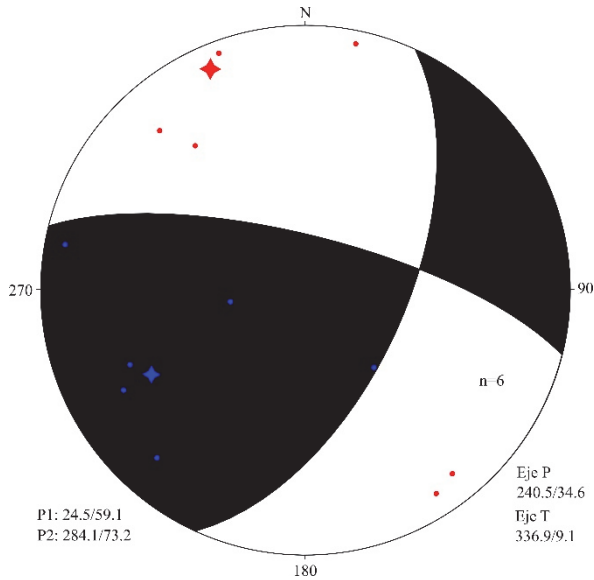


Figura 8. Balón de playa donde se muestra la solución al plano de falla utilizando los ejes de presión (puntos azules) y tensión (puntos rojos). Las estrellas representan el promedio para el eje P (estrella azul) y el eje T (estrella roja).  
Fuente: Autores.

generando pendientes bajas redondeadas, rodeado por zonas escarpadas hacia los flancos que corresponden con las rocas competentes del Grupo Guadalupe. Su extensión está limitada hacia el norte por la Falla de Neusa, mientras al sur lo limita la Zona de Deformación de Zipaquirá (ZDZ), donde es controlado por el Lineamiento de Zipaquirá (LZ). Es en este sector donde se muestra la mayor complejidad de la zona de estudio, incluyendo múltiples cuñas con fallas inversas y normales, además de ser el punto donde se presenta la exposición de cuerpos salinos controlados en su emplazamiento por el LZ. El AZS es un anticlinal tumbado, con su flanco este invertido, siendo más notable entre la ZDZ y el Lineamiento de Quebrada Honda (LQH), donde el escarpe de la Formación Arenisca Dura lo hace evidente. Hacia el norte, la Falla de Las Margaritas inicia en el punto de inflexión del eje axial en el LQH, poniendo en contacto la Formación Chipaque con la Formación Guaduas y alcanzando una inclinación de 45° al W a partir de los datos estructurales obtenidos (Fig. 9, sección B-B'). Hacia el cabeceo del AZS, en la Falla de Neusa, la deformación es más

evidente a nivel de afloramiento, donde el fracturamiento es menos espaciado. Fracturas de cizalla con desplazamientos milimétricos son comunes a lo largo del AZS, en su mayoría con cinemática normal.

El AZN es un anticlinal tumbado con su flanco oeste invertido (en el AZS es el flanco este el que aparece invertido), y cuyo núcleo está formado por rocas de la Formación Arenisca Dura. El rumbo de su eje axial es generalmente N30E. El flanco este, está formado por la Formación Guaduas, generando zonas con pendientes suaves a moderadas, mientras que el flanco oeste está formado por la Formación Plaeners, pasando hacia el norte a las formaciones Arenisca Dura y Tierna en contacto fallado en la mayor parte de su extensión con la Formación Guaduas. Ése contacto fallado se reconoce por la presencia de la Falla de Carupa, cuya inclinación es de ~35° con vergencia al NW. En el sector de Laguna Verde la Falla de río Guandoque pone en contacto la Formación Plaeners con la Formación Guaduas, mientras que hacia el norte el contacto es entre las formaciones Arenisca Dura y Guaduas. Pendientes estructurales son generadas por los escarpes de la Formación Arenisca Dura evidenciando una inclinación para la Falla de río Guandoque de aprox. 48° (Fig. 9, sección A-A'). Con base en los análisis obtenidos por la cartografía geológica inicial, así como los datos de fracturas y los datos cinemáticos, se obtuvo un reconocimiento de la zona, tanto de fallas como de lineamientos, siendo más importantes éstos últimos. El Lineamiento de Zipaquirá (LZ) (Lineamiento Salinas en Velandia & De Bermoudes (2002)), de Quebrada Honda (LQH), de Susagua (LS) y la Falla de Neusa, presentan la evidencia tanto geomorfológica como estructural de un sistema transversal (i.e. zonas transversales) que afecta los pliegues y las fallas al menos en el AZ. El patrón de fracturamiento es uno de los factores que varía a medida que se acerca a los lineamientos: hacia el norte de la Falla de Neusa, en el AZN, el rumbo de las fracturas tiene rumbo dominante hacia el SW, mientras que hacia el sur de la falla, en el AZS este rumbo preferencial es hacia el NW-SE. Hacia el LZ sucede algo similar, ya que el rumbo varía de SW-NE al norte del lineamiento a W-NW al sur del mismo.

Tabla 1.

Datos de fallas y ejes cinemáticos correspondientes al sub-conjunto 1 que muestran coherencia mecánica y a partir de los cuales se realizó la solución del plano de falla. Los datos están en azimuth de rumbo.

Id	azimuth de rumbo	Datos de fallas			Ejes cinemáticos					
		Inclinación	Trend	Plunge	P		B		T	
					Azim	Inc	Azim	Inc	Azim	Inc
ESZ-1	326	88	326	88	281	8	135	80	11	6
ESZ-2	16	81	16	81	241	23	36	65	147	10
ESZ-3	231	77	231	77	138	58	231	2	323	32
ESZ-5	290	74	290	74	247	29	79	61	340	5
ESZ-9	90	88	90	88	222	17	94	64	318	20
ESZ-10	35	60	35	60	261	67	47	20	141	12

Fuente: Autores.



Otro factor notable es la extensión y rumbo de las estructuras: la Falla de Zipaquirá cambia abruptamente de dirección en su eje axial a medida que se acerca al LZ y la ZDZ, pasando de una dirección N-S a NNW, terminando abruptamente justo al norte de la ZDZ. El cambio de rumbo en las estructuras es visible igualmente con el eje axial del AZS y el Sinclinal de Neusa.

Otro factor reconocible en las secciones estructurales (Fig. 9) es la variación en el espesor de las formaciones Guaduas y Cacho, lo cual podría tener un origen sin-genético y estar asociada a un control estructural durante su depositación en el Cretácico Superior-Paleoceno y corresponder con la deformación pre-andina propuesta por Bayona et al. (2013). Los rasgos geomorfológicos y estructurales más notables que demuestran la influencia de la zona transversal del Neusa (Falla de Neusa) sobre la evolución de la zona de estudio pueden ser resumidas en: (i) Cambios en la vergencia de los pliegues, siendo NW para el AZN y SE para el AZS, (ii) terminación de fallas inversas y cambios en los niveles estratigráficos de despegue como la Falla de Las Margaritas, Falla de Carupa y Falla de río Guandoque, (iii) variaciones en la acomodación de la deformación bajo un mismo acortamiento, generando un pliegue anticlinal tumbado hacia el sur, mientras hacia el norte la deformación está acomodada en dos anticlinales tumbados cortados por fallas inversas de alto ángulo (Anticlinal de Carupa y AZN cortados por la fallas de río Guandoque y Carupa respectivamente).

## 5. Discusión

De acuerdo a la cartografía geológica y al análisis estructural obtenido de los datos cinemáticos y de fracturas s.l. uno de los factores que controlaron la evolución del AZ ha sido la presencia de éstas fallas transversales, identificadas en este trabajo como los Lineamientos de Zipaquirá (LZ), Lineamiento de Susagua (LS), Lineamiento de Quebrada Honda (LQH) y la Falla de Neusa (FN). Estudios regionales en la Sabana de Bogotá reportan sistemas de fallas con dirección NW-SE, transversales al rumbo general de la CO (e.g. Camargo, 1995; Velandia & De Bermoudes, 2002; Fierro & Amaya, 2008). Sarmiento-Rojas (2001) reconoce la presencia de paleo-fallas con dirección NW-SE que actuaban como zonas de transferencia separando las sub-cuencas mesozoicas y sirviendo de límite estratigráfico, marcando diferencias notables en los espesores de las secuencias sedimentarias cretácicas. De acuerdo a la cartografía geológica y al análisis estructural obtenido de los datos cinemáticos y de fracturas s.l. se puede estimar que uno de los factores que afectaron y controlaron la evolución del AZ ha sido la presencia de éstas fallas transversales, identificadas en este trabajo como los Lineamientos de Zipaquirá (LZ), Lineamiento de Susagua (LS), Lineamiento de Quebrada Honda (LQH) y la Falla de

Neusa (FN). Evidencias geomorfológicas, estructurales y paleomagnéticas que describen la influencia de las estructuras transversales con el desarrollo de pliegues y fallas longitudinales han sido propuestas por Jiménez et al. (2012) en el Anticlinal de la Hocha y el Sinclinal de San Jacinto en el Valle Superior del Magdalena.

El primer rasgo reconocible en el control estructural generado por las zonas transversales es la curvatura del eje axial del AZ a medida que es intersectado por cada una de las fallas o lineamientos (Fig. 2). Otro rasgo importante es la terminación de las fallas inversas y la conformación de estructuras en cola de caballo, siendo claro con las fallas de Carupa y río Guandoque. La revisión del patrón de fracturamiento permite identificar que en la mayoría (más del 90%) de los sitios, tanto las diaclasas como otros tipos de fracturas muestran una orientación preferencial ortogonal a la estratificación.

Este patrón (J1) muestra diaclasas que son perpendiculares entre si y que han tenido influencia en el desarrollo de planos de debilidad que han servido como punto de ruptura para la formación de fracturas asociadas al plegamiento y deformación reciente. Sólo en los afloramientos cercanos a la Zona de Deformación de Zipaquirá (ZDZ) aparece un tercer conjunto de fracturamiento ortogonal a la estratificación y oblicuo al conjunto J1. Al horizontalizar los polos de las fracturas se observa que la mayoría de las diaclasas han sido de origen diagenético o al menos pre-plegamiento, cuando las capas estaban aún en posición horizontal a sub-horizontal. Bergbauer & Pollard (2004) proponen un modelo de fracturas en los anticlinales Oil Mountain y Emigrant Gap (Wyoming, USA), donde encuentran dos conjuntos de diaclasas J1 y J2, formados en una etapa pre-plegamiento, lo cual permitió que a medida que avanzara la deformación, las diaclasas pre-existentes controlaran el campo de esfuerzos local, influenciando el desarrollo y propagación de nuevas fracturas en una dirección paralela a sub-paralela, independiente de la inclinación de las capas a medida que sufrían el plegamiento.

Este modelo también propone que algunas de las diaclasas han acomodado algo de desplazamiento a lo largo del rumbo de la estructura, además aportan que la deformación de cuerpo rígido (deformation) ha sido dominante en los flancos del pliegue, donde no hay evidencia de deformación interna (strain). La diferencia de este modelo con aquellos propuestos previamente (e.g. Stearns, 1968) es considerar la formación e influencia de fracturas anteriores al plegamiento. Teniendo en cuenta las condiciones de formación y evolución de la CO, el modelo propuesto por Bergbauer y Pollard (2004) se acerca más a la complejidad estructural observada, incluso Sánchez-Villar et al (2011) identifican patrones de fracturamiento con relaciones similares al modelo pre-plegamiento en el piedemonte oriental de la CO.

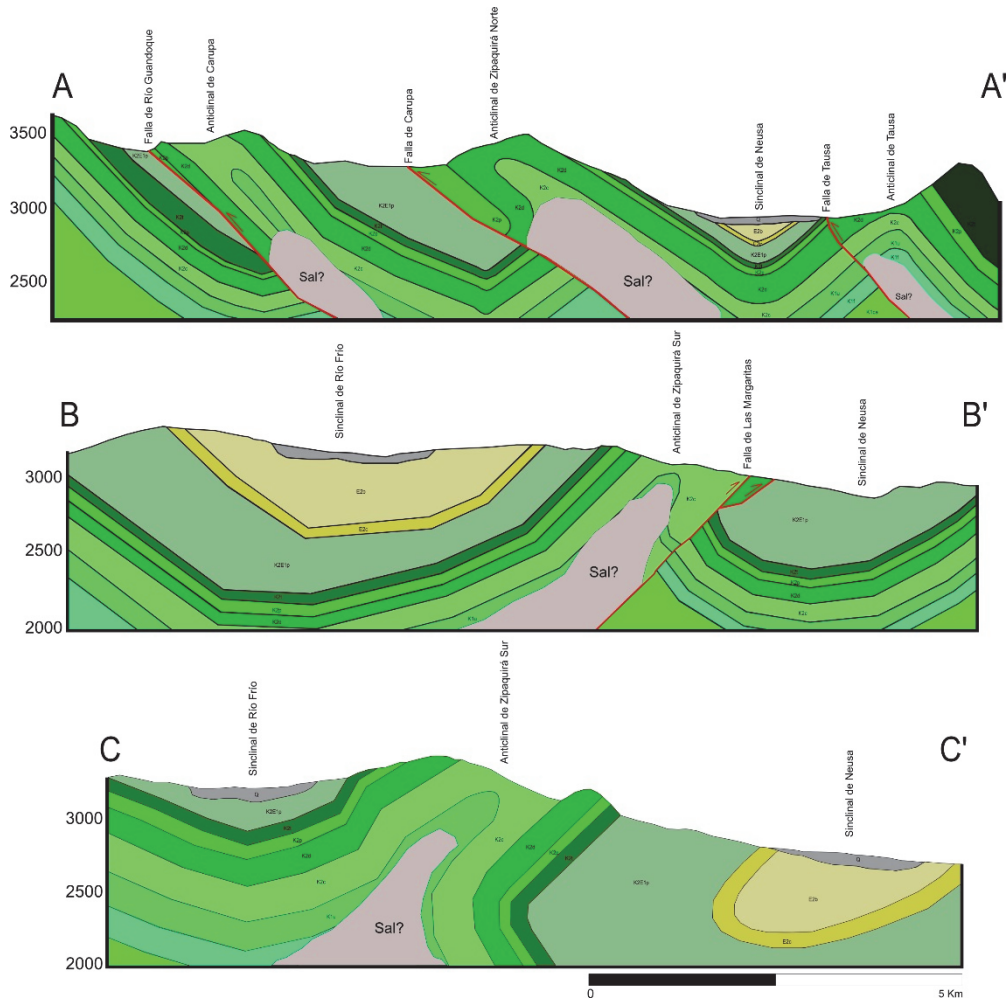


Figura 9. Secciones transversales elaboradas a lo largo del AZ donde se muestran las relaciones entre las diferentes estructuras y las unidades aflorantes. Nótese las variaciones laterales en los espesores de las formaciones Guadua y Cacho. La escala vertical está exagerada en 2x para resaltar las diferencias geomorfológicas entre el AZN y el AZS. Ver localización de las secciones en la Figura 2. Fuente: Autores.

Siguiendo el modelo de Bergbauer & Pollard (2004) se puede estimar por lo tanto que el conjunto J1 encontrado a lo largo del AZ fue un factor anisotrópico fundamental para el desarrollo de las fracturas (J2) asociadas al inicio del levantamiento de la CO y la formación del pliegue, mientras que hacia las zonas con intensa deformación como la ZDZ, tanto el LZ como la anisotropía pre-existente influenciaron la deformación frágil que afectó la zona. Aunque el conjunto J1 presenta la misma relación ortogonal con la estratificación tanto en el AZS como en el AZN, su dirección es diferente en los dos dominios. Como se muestra en los resultados, la Falla de Neusa y el LZ han actuado de límite estructural, controlando las fracturas J1. Mientras las diaclasas pre-formadas dominaron la orientación preferencial de las diaclasas sin o pos-pliegue (J2), las estructuras transversales controlaron la extensión y formación de las diaclasas J1. A partir de lo anterior se propone que los lineamientos y fallas transversales reconocidas fueron formadas con anterioridad al plegamiento y al desarrollo

inicial de las fracturas, mostrando así, que éstas estructuras heredadas han estado actuando en forma pasiva al menos desde el Cretácico, donde aportaron en la fase extensiva como zonas de relevo. Estas zonas transversales serían la (i) Zona Transversal del Neusa, (ii) Zona Transversal de Quebrada Honda, (iii) Zona Transversal de Susagua y (iv) la Zona Transversal de Zipaquirá.

La Zona Transversal de Zipaquirá es la de mayor relevancia estructural en la zona de estudio, definida por el Lineamiento de Zipaquirá y la Falla de Zipaquirá. La Zona Transversal de Zipaquirá hace parte de la terminación sur del AZS. De acuerdo al análisis cinemático, estas estructuras transversales tienen un componente normal, asociado a un régimen extensivo. En el presente estudio se propone que el sistema de fracturamiento ortogonal a la estratificación está relacionado con la carga litostática; al desarrollarse este fracturamiento aumenta la diferencia de energía potencial sobre el cuerpo salino y la liberación de presión en la roca de sobrecarga causa la intrusión (diapirismo activo) del Diapiro

Salino de Zipaquirá. Este mecanismo es reconocido para la intrusión de sal en niveles estratigráficos superiores (e.g. Hudec y Jackson, 2007; Fossen, 2010).

## 6. Conclusiones

El Anticlinal de Zipaquirá presenta una evolución cinemática compleja, debido a que múltiples factores controlan su extensión y geometría como lo son las zonas transversales, los niveles salinos y las fracturas preformadas. Estas zonas transversales, i.e. los lineamientos en dirección NW-SE y la Falla de Neusa, han actuado al menos desde el Cretácico determinando la orientación y propagación de las fracturas, mientras que para el Mioceno, facilitaron el ascenso de diapiros, la formación de dos dominios estructurales cuya evolución geológica fue diferenciada (AZS y AZN), la curvatura del AZ y sirvieron de límite estructural de las fallas longitudinales.

El 90% de las fracturas presentes a lo largo del AZ fueron formadas pre-plegamiento posiblemente por carga litostática (J1), ejerciendo una anisotropía mecánica durante la fase de crecimiento del pliegue y controlando la orientación de las nuevas fracturas (J2). Sólo hacia las zonas complejas como la Zona de Deformación de Zipaquirá se observa un tipo de fracturas N-S neoforzado (J3).

El predominio de una cinemática extensiva radial en diferentes sectores del AZ permiten inferir un emplazamiento diapírico en el núcleo de la estructura facilitado por las zonas transversales que de acuerdo a la solución de plano de falla muestran una cinemática normal-sinistral, lo cual favorecería la creación de espacios de acomodación para los cuerpos salinos por liberación de la presión de sobrecarga.

## Agradecimientos

Los autores queremos agradecer por el apoyo económico brindado por la ACGGP y la Corporación Geológica ARES a través del Fondo Corrigan 2014, sin el cual está investigación no se hubiera desarrollado. A Agustín Cardona y Santiago Hincapié y finalmente a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios.

## Bibliografía

- [1] Allmendinger, R., Cardozo, N. and Fisher, D., Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology, Cambridge University Press, Cambridge, 2012. DOI: 10.1017/CBO9780511920202.
- [2] Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J.J. and Reyes-Harker, A., An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and Llanos foreland basin of Colombia, GSA Bulletin, 120 (9), pp. 1171-1197, 2008. DOI:10.1130/B26187.1.
- [3] Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jimenez, G., Mesa, A. and Valencia, V., Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean-South American convergence in early Paleogene time, In: Thick-Skin-Dominated Orogens: From initial inversion to Accretion, editado por M. Nemcok, A. R. Mora, J. W., Cosgrove, Geological Society of London, Special Publication, 377, 2013, 31 P., DOI:10.1144/SP377.5.
- [4] Bergbauer, S. and Pollard, D., A new conceptual fold-fracture model including pre-folding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. Geological Society of America Bulletin, 116 (3), pp. 294-307, 2004. DOI: 10.1130/B25225.1
- [5] Caballero, V., Parra, M. y Mora, A., Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca del Valle Medio del Magdalena, Boletín de Geología, 32 (1), pp. 45-77, 2010.
- [6] Camargo, G., Elementos estructurales del área de la Sabana de Bogotá y alrededores. VI Congreso Colombiano del Petróleo. Bogotá. 1995. 8 P.
- [7] Carey, W., The Orocline concept in Geotectonics, Papers and Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 89, pp. 255-288, 1955.
- [8] Castro, W. y Lozano, A., Modelamiento geométrico y análisis de la evolución estructural del sector central del Anticlinal de Zipaquirá (Zipaquirá, Cundinamarca). Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2003. 111 P.
- [9] Corredor, F., Eastward extent of the Late-Eocene-Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: Constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 16, pp. 445-457, 2003. DOI:10.1016/j.jsames.2003.06.002.
- [10] Delvaux, D. and Sperner, B., New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program, en Nieuwland, D. New insights into structural interpretation and modelling, Geological Society of London, Special Publication, 212, pp. 75-100, 2003. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
- [11] Fierro-Morales, J. y Angel-Amaya, J., Tectónica activa y sismicidad en la Sabana de Bogotá (Colombia-Suramérica). XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Perú. 2008. 6 P.
- [12] Fossen, H., Structural Geology, Cambridge University Press, 1<sup>st</sup> edition, New York, 2010. DOI: 10.1017/CBO9780511777806.
- [13] Grohmann, C.H. and Campanha, C.A., OpenStereo: Open source, crossplatform software for structural geology analysis, AGU Fall meeting. San Francisco (USA). 2010. 2 P.
- [14] Hudec, M. and Jackson, M., Terra infirma: Understanding salt tectonics, Earth-Sciences Reviews, 82, pp. 1-18, 2007. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.01.001.
- [15] Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A. and Sierra, D., Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 39, pp. 184-201, 2012. DOI: 10.1016/j.jsames.2012.04.006.
- [16] Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G. and Mora, A., Paleomagnetism and magnetic fabric of the Eastern Cordillera: Evidence for oblique convergence and non-rotational reactivation of a Mesozoic intracontinental rift. Tectonics, 33, pp. 1-28, 2014. DOI: 10.1002/2014TC003532.
- [17] Julivert, M., Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de la formación de las estructuras, Boletín de Geología, 11, pp. 5-21, 1963.
- [18] Kammer, A., Estructuras y deformaciones del borde oriental del Macizo de Floresta, Geología Colombiana, 21, pp. 65-80, 1996. DOI: 10.15446/gc.
- [19] Kammer, A. and Sánchez, J., Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyaca Faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. Journal of South American Earth Sciences, 21, pp. 412-422, 2006. DOI: 10.1016/j.jsames.2006.07.006.
- [20] Kerr, A. and Tarney, J., Tectonic evolution of the Caribbean and northwestern South America: The case for accretion of two Late Cretaceous oceanic plateaus. Geological Society of America, 33(4), pp. 269-272, 2005. DOI: 10.1130/G21109.1
- [21] López, C., Briceño, A. y Buitrago, J., Edad y origen de los diapiros de sal de la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional

- de Colombia. Bogotá, Colombia. 1990, 40 p.
- [22] Lozano, A., Castro, W. y Linares, R., Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Zipaquirá y su aplicación a la interpretación a zonas de piedemonte. VIII Simposio Bolivariano-Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. 2003, 11 P.
- [23] Marret, R. and Allmendinger, R., Kinematic analysis of fault-slip data, *Journal of Structural Geology*, 12(8), pp. 973-986, 1990. DOI: 10.1016/0191-8141(90)90093-E.
- [24] Marshak, S., Salients, recesses, arcs, oroclinal and syntaxes-A review of ideas concerning the formation of map-view curves in fold-thrust belts, en McClay, K.R. ed., *Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir 82*, pp. 131-156, 2004.
- [25] McLaughlin, D. y Arce, M., Mapa geológico del cuadrángulo K11 (Zipaquirá). INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 1975.
- [26] Mojica, J., Arévalo, O.J. e Ibáñez-Mejía, M., Fallas plioceno-cuaternarias ocultas bajo los sedimentos de la zona urbana de Bogotá: Importancia para la evaluación de la amenaza sísmica potencial. *Memorias XI Congreso Colombiano de Geología*. Bucaramanga, Colombia, 2007, 16 P.
- [27] Montoya, D. y Reyes, G., *Geología de la Plancha 209 Zipaquirá*. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 2003, 156 P.
- [28] Mora, A., Horton, B., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, A., Parra, M., Blanco, V., García, D. and Stockli, D., Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: implications for petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 94, pp. 1543-1580, 2010. DOI: 10.1306/01051009111.
- [29] Ramírez-Arias, J.C., Mora, A. y Parra, A., Indicadores sedimentológicos de la evolución tectónica durante el Mioceno en el Sinclinal de Nunchía, piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 32(2), pp. 29-44, 2010.
- [30] Sarmiento-Rojas, L., Mesozoic Rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes; Inferences from tectonic models. *Ecopetrol-Netherlands Research, School of Sedimentary Geology*, Bogotá, Publication 295, 2001.
- [31] Sasvári, Á. and Baharev, A., SG2PS (Structural Geology to Post Script Converter) - A graphical solution for brittle structural data evaluation and paleostress calculation, *Computers and Geosciences*, 66, pp. 81-93, 2014. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.12.010.
- [32] Stearns, D.W., Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks, en: Riecker, R., ed., *Rock mechanics seminar*, Beldford, Terrestrial Sciences Laboratory, pp. 97-118. 1968.
- [33] Thomas, W., Controls on location of transverse zones in thrust belts, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83(3), pp. 727-744, 1990.
- [34] Velandia, F. y De Bermoudes, O., Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Boletín de Geología*, 24(39), pp. 37-48, 2002.

**H. García**, es Geólogo egresado en el año 2015 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Su principal interés es la integración de la geología estructural, cartografía geológica y magnetismo de rocas para entender los mecanismos de deformación en estructuras curvas y heredadas, así como rotación y traslación de bloques en los Andes del Norte. Actualmente trabajando en el Proyecto Vial Mulaló-Loboguerrero como Geólogo de Campo.  
ORCID: 0000-0002-7714-7161.

**G. Jiménez**, es Geólogo egresado en el año 2005 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Realizó su Maestría en la Universidad Nacional de Colombia-Bogotá (2008) y el Doctorado en la Università degli studi Roma TRE (2013). Geólogo con experiencia e interés en geología estructural, paleomagnetismo, modelamiento análogo y estratigrafía del Cenozoico de la Cordillera Oriental. Como geólogo el principal interés y el área de trabajo ha sido en el cálculo de rotaciones y traslaciones de bloques, evolución de estructuras curvas a diferentes escalas usando el paleomagnetismo, estudio de zonas transversales y cartografía geológica.  
ORCID: 0000-0001-9274-1874.