

INTERPRETACIÓN DE TRANSCURRENCIA DE LAS FALLAS SOAPAGA Y BOYACÁ A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT TM

Velandia, F.¹

RESUMEN

La visión regional que ofrecen las imágenes del satélite Landsat TM5 en la interpretación tectónica de las fallas Soapaga y Boyacá, permite la identificación de estructuras indicadoras de fallamiento de rumbo, que sumado a la componente vertical, usualmente reconocida para estas fallas, sugiere una tectónica transpresiva para la zona axial de la Cordillera Oriental de Colombia. La disposición de segmentos de las fallas Soapaga, Chaguacá y Boyacá, y la conformación de un bloque con fallamiento interno en una estructura duplex, indican que el desplazamiento lateral izquierdo característico de la Falla Bucaramanga, continúa hasta una latitud aproximada de 5°50'. Hacia el sur de esta latitud se identifican rasgos regionales de transcurrancia dextral asociado a los cabalgamientos de las fallas Soapaga, Boyacá y otras relacionadas con esta última como resultado de la propagación de su cabalgamiento hacia el SE. Se sugiere la continuidad de las principales fallas longitudinales hacia la Sabana de Bogotá y la existencia de fallas de basamento relacionadas con lineamientos transversales que con un posible carácter distensivo tendrían influencia en la manifestación de fluidos hidrotermales.

Palabras clave: Tectónica, transcurrancia, neotectónica, Cordillera Oriental, Colombia.

WRENCHING INTERPRETATION ALONG THE BOYACA AND SOAPAGA FAULTS FROM LANDSAT TM IMAGES

ABSTRACT

Identification of strike-slip faulting indicators, along the trace of the Soapaga and Boyacá faults from Landsat TM5 images, suggest a transpressive tectonic regime in the axial zone of the Eastern Cordillera of Colombia. The array of the Soapaga and Chaguacá faults conforms a duplex structure, which together with the Boyacá Fault indicate that the lateral left displacement, typical of the Bucaramanga Fault, continues up to an approximate latitude of 5°50'. Southwards of this latitude, some regional features indicate right-lateral displacements along the Soapaga and Boyacá faults and along the thrusts related to the Boyacá Fault. The continuity of the major NE longitudinal faults towards the Sabana de Bogota is suggested, as well as the existence of basement faults related to transverse lineaments, which extensional or transtensional movements can influence the seeping of hydrothermal fluids.

Key words: Tectonic, wrenching, neotectonics, Eastern Cordillera, Colombia.

¹ INGEOMINAS, Sede Central, Diag. 53 No. 34-53, Bogotá. Correo electrónico: fcovelan@ingeominas.gov.co

INTRODUCCIÓN

Las fallas Soapaga y Boyacá se localizan en la zona axial de la Cordillera Oriental de Colombia y se han considerado como fallas de cabalgamiento, relacionadas con la amortiguación al sur de la Falla Bucaramanga (Boinet et al., 1989), una de las principales estructuras de transcurriencia de la Orogenia de Los Andes del Norte. Sin embargo, el carácter tectónico y la continuación de las fallas Soapaga y Boyacá hacia el Altiplano Cundiboyacense no han sido aclarados todavía y se presentan problemas entre la cartografía geológica existente y los modelos propuestos para la evolución de la Cordillera Oriental, lo que hace necesario un entendimiento de estas estructuras y su posible relación con la actividad neotectónica de la Falla Bucaramanga, especialmente por el riesgo asociado debido a la alta densidad de población de la zona.

Este trabajo muestra las ventajas de la visión regional de las imágenes de satélite Landsat en la interpretación tectónica, especialmente en el área de influencia de las fallas Soapaga y Boyacá, en el Macizo de Floresta y Altiplano Cundiboyacense (FIGURA 1). Esta interpretación se realizó en forma análoga, en escala 1:250.000, y en forma digital en escalas más detalladas, usando una escena de imagen Landsat TM de 1988, correspondiente al *path* 7 y *row* 56, la cual se procesó para obtener una composición en falso color RVA 452 (Rojo en la banda 4, Verde en la 5 y Azul en la 2), con expansión de contraste y filtro de realce de bordes para facilitar la identificación de estructuras. El área está comprendida aproximadamente entre 5°30' - 6°30' de latitud norte y 72°40' - 73°28' de longitud oeste e incluye centros urbanos de los departamentos de Santander y Boyacá, tales como Capitanejo, Soatá, Paz de Río, Sogamoso, Duitama, Paipa y Tunja, entre otros. Mapas geológicos publicados por INGEOMINAS fueron consultados, al igual que diferentes artículos científicos sobre la tectónica de la Cordillera Oriental de Colombia para soportar la interpretación de las imagen de satélite.

MARCO GEOLÓGICO TECTÓNICO

En la región afloran rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, así como intrusivas y extrusivas del Jurásico que forman el Macizo de Floresta y conforman el basamento de la zona axial de la Cordillera Oriental de Colombia (FIGURA1). También afloran rocas sedimentarias jurásicas en estructuras regionales como el Anticlinal de Arcabuco. Sobre el basamento ocurre la

secuencia cretácica sedimentaria que caracteriza a la cordillera, con diferencias en facies y espesores, marcadas por límites tectónicos como las fallas Boyacá y Soapaga. Se presentan igualmente rocas del Paleógeno y depósitos inconsolidados del Neógeno y Cuaternario que cubren parte del área y dificultan la interpretación de relaciones estructurales entre las unidades preneógenas en el Altiplano Cundiboyacense.

Los modelos de evolución de la parte central de la Cordillera Oriental muestran una etapa de acumulación en ambiente distensivo (*rifting*) durante la conformación de una cuenca de retroarco o *back-arc* desde el Triásico-Jurásico e inclusive parte del Cretácico temprano, con dos depocentros separados por un alto intra-cuenca constituido por un basamento somero denominado Alto Santander, cuya prolongación aflora hoy en el Macizo de Floresta (De Freitas et al., 1997). Para esta fase de *rifting* algunos autores como Dengo & Covey (1993) muestran la Falla Boyacá con movimiento normal, como uno de los límites de la serie de *grabens* de la cuenca. Esta etapa de *rifting* terminó en el Cretácico temprano para dar inicio a la fase de subsidencia termal (Acosta, 2002), durante la cual se dio el depósito de la espesa secuencia sedimentaria marina. A finales del Cretácico se presentó un cambio a ambiente y se depositaron sedimentos continentales en una cuenca de antepaís como resultado del levantamiento provocado por la acreción de la Cordillera Occidental (Cooper et al., 1995). Este ambiente continental prevalece durante el Paleógeno.

La orogénesis y progresiva erosión de la Cordillera Central durante el Eoceno-Mioceno se registra en las secuencias de conglomerados, areniscas y limolitas de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena y del borde occidental de la actual Cordillera Oriental (Butler & Schamel, 1988; Wellman, 1970); sin embargo, en el área entre las actuales fallas Soapaga y Boyacá, no hay registro del Oligoceno, ni del Mioceno temprano, lo que podría indicar que esta zona ya constituía un alto topográfico por influencia del levantamiento de la Cordillera Central y no hubo depósito o bien que las unidades fueron erosionadas durante las fases posteriores de levantamiento de la Cordillera Oriental. Estos aspectos son aún tema para posteriores estudios de estratigrafía y evolución tectónica de la Cordillera Oriental de Colombia.

Durante el Mioceno tardío y el Plioceno se generó un cinturón de plegamiento y cabalgamiento en la Cordillera Oriental, seguido por el levantamiento regional de toda la cadena en el Plioceno-Pleistoceno (Dengo & Covey, 1993). Estos autores caracterizan el levantamiento con fallas de

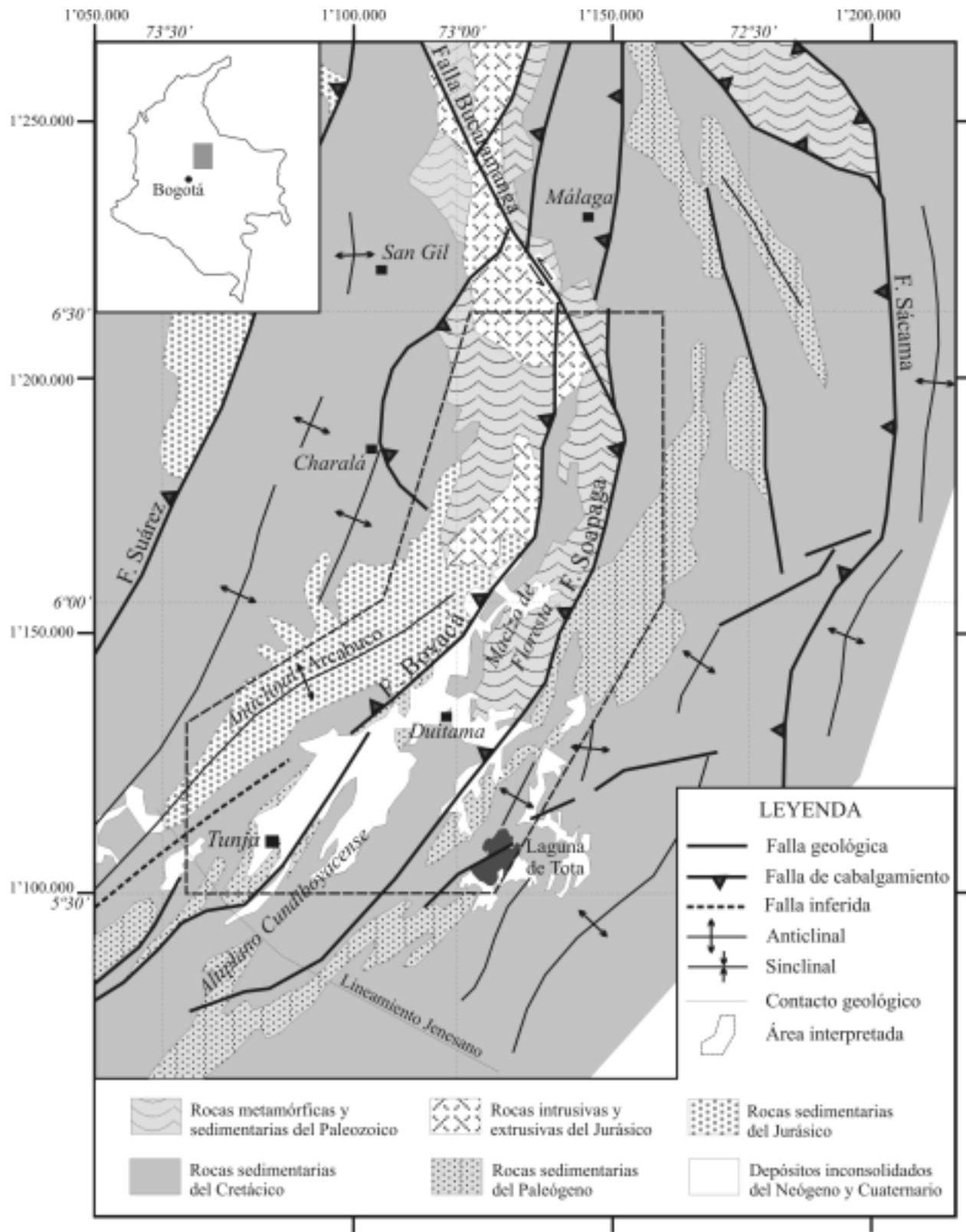


FIGURA 1. Mapa Geológico generalizado; en polígono se indica el área interpretada. Modificado del Atlas Geológico de Colombia, INGEOMINAS (1997) y De Freitas et al. (1997).

cabalgamiento y retrocabalgamiento con despegues en las unidades sedimentarias incompetentes del Cretácico y con fallas de basamento relacionadas con la inversión tectónica positiva a lo largo de antiguas fallas normales del Mesozoico como la Falla Boyacá. Esta inversión tectónica en la Cordillera Oriental ha sido documentada por autores como Fabre (1983), Colletta et al. (1990), Dengo & Covey (1993), Cooper et al. (1995), entre otros, que sin embargo no tienen en cuenta movimientos de rumbo para el levantamiento. Estos modelos interpretan en general una cordillera con transporte tectónico hacia los Llanos Orientales y regionalmente consideran las fallas del piedemonte oriental como cabalgamientos y las del borde occidental como retrocabalgamientos, con un nivel de despegue regional en la corteza media que alcanza a decapitar estructuras de *horts* y *grabens* del Mesozoico (Dengo & Covey, 1993).

La componente de rumbo durante el levantamiento de la Cordillera Oriental desde el Plioceno, es decir, una tectónica transpresiva, ha sido considerada por autores como De Freitas et al. (1997), Kammer (1999), Taboada et al. (2000), Sarmiento (2001) y Acosta (2002), y afectan incluso las estructuras con inversión tectónica en la zona axial de la cordillera, donde presenta su mayor simetría. Uno de los puntos de discusión entre los modelos compresivos y estos transpresivos es la inclinación de fallas como Soapaga y Boyacá. Para los primeros, estas fallas representan un estilo estructural de escama gruesa por involucrar basamento y, sin embargo, son cabalgamientos de muy bajo ángulo que afectan la cobertera sedimentaria. Para los segundos, estas fallas, si bien se comportan como cabalgamientos en algunos sectores, están relacionadas regionalmente con estructuras de alto ángulo o subverticales en profundidad que caracterizan la zona axial de la cordillera, y configuran una gran estructura en flor positiva como lo muestran Taboada et al. (2000).

Este trabajo pretende mostrar elementos que se interpretan como rasgos de transcurencia en la zona axial de la Cordillera Oriental y que apoyarían los modelos de evolución tectónica transpresiva.

INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS TECTÓNICO

La interpretación llevada a cabo se basa en los rasgos más destacados en la imagen de satélite con patrones lineales claros y control de drenaje. Los trazos interpretados como relacionados con las fallas Soapaga y Boyacá muestran en el sector septentrional del área una dirección aproximada NW-SE hasta una latitud de $6^{\circ}15'$, similar a la de la Falla

Bucaramanga, de la cual se desprenden como su prolongación hacia el sur, y cambian desde esta latitud su tendencia regional a NE-SW (FIGURA 1). La Falla Bucaramanga es una estructura transcurrente, con desplazamiento sinistral desde el Neógeno, que al sur se amortigua en una serie de cabalgamientos y de fallas inversas (Boinet et al., 1989), como las fallas Soapaga y Boyacá. La continuidad de estas estructuras y otras asociadas, hacia el Altiplano Cundiboyacense, está todavía por detallarse y darse a conocer, ya que aunque la cartografía regional existente (INGEOMINAS, 1988, 1997) no muestra importantes fallas en la zona, los trabajos de exploración petrolera ya las consideran (De Freitas et al., 1997).

La interpretación de imágenes Landsat permite reconocer rasgos lineales relacionados con la prolongación de las fallas Soapaga y Boyacá hacia el sur, así como la identificación de otras fallas asociadas. El análisis tectónico ofrece, además, argumentos para deducir el movimiento más reciente a lo largo de las fallas.

Estructura duplex por transpresión

Aproximadamente desde la latitud 6° hacia el norte, se distinguen en la imagen de satélite rasgos rectilíneos con control en el drenaje, los cuales se relacionan con trazos de las fallas Boyacá y Soapaga (FIGURA 2). Por su continuidad, ambas fallas se han interpretado como la prolongación sur de la Falla Bucaramanga, pero generalmente se han asociado con movimientos verticales, como fallas inversas, sin mayor énfasis en los desplazamientos de rumbo, principal objetivo de este trabajo.

En la imagen de satélite el trazo más claro y continuo es el de la Falla Soapaga, que controlan el curso del río Chicamocha, mientras la Falla Boyacá se identifica al occidente de la anterior, a lo largo de los ríos Onzaga y Susa (FIGURA 2A). Estas fallas se han cartografiado usualmente en forma subparalela e individual, incluso desde donde cambian de dirección al SW, y conforman un bloque levantado donde afloran rocas precámbricas a cretácicas (Vargas et al., 1984, 1987; Ulloa et al., 1998).

En este análisis se reconoce la Falla Soapaga como el principal trazo de la continuación de la Falla Bucaramanga, pero para el primer segmento de la Falla Boyacá se hace una interpretación diferente a la cartografía regional que la muestra como una estructura independiente desde la bifurcación de la Falla Bucaramanga (FIGURA 1). Su trazo desde el norte hasta el Municipio de Onzaga se asume como una estructura que tiene continuación al sur y es conocida

en la cartografía de Vargas et al. (1984) como Falla Chaguacá (FIGURA 2B), la cual se vuelve a unir al trazo de la Falla Soapaga cerca de los 6° de latitud norte, y configuran así un bloque asociado a una estructura lineal de tipo regional.

Este bloque levantado y limitado por la Falla Soapaga al oriente y la Falla Chaguacá al occidente, se encuentra afectado en su interior por otra falla subparalela a las anteriores (dirección NNW) y por fallas menores, transversales (NE) y dispuestas en échelon (FIGURA 2B), que desplazan tanto unidades del basamento de edad precámbrica – jurásica, como rocas de la cobertera sedimentaria de edad cretácica. La disposición de estas fallas es comparable con resultados de modelos de laboratorio (FIGURA 3) desarrollados para fallamiento de rumbo en arcilla (Tchalenko, 1970) y cajas de arena (Naylor et al., 1986), y permiten definir el bloque levantado como un duplex por contracción (FIGURA 4), como resultado de movimientos combinados en la vertical y en la horizontal por el desplazamiento lateral izquierdo. Al respecto, Woodcock & Fischer (1986) muestran cómo las estructuras de duplex son importantes en movimientos transcurrentes y que no se restringen a tectónica de cabalgamiento. El esquema obtenido en este caso para la interpretación de la estructura duplex es igualmente comparable con otros ejemplos que Woodcock & Fischer (1986) muestran en otras partes del mundo, algunos de los cuales se ilustran en la FIGURA 5.

La estructura duplex que conforma parte del Macizo de Floresta se interpreta como resultado de la contracción en un sector de salto lateral a la derecha (*step over*), en la prolongación sur del movimiento sinistral de la Falla Bucaramanga. La cizalla simple que origina esta estructura también da lugar a la configuración de lentes a menor escala, con posible rotación de pequeños bloques al interior del duplex, como se observa en la cartografía de Vargas et al. (1987) (FIGURA 6). En un área al noroeste del Municipio de Soatá, se observa cómo el fallamiento interno dentro de un lente, corta y desplaza en forma sinistral aparente a las unidades sedimentarias cretácicas, con la orientación de las fallas en sentido opuesto a la cizalla simple, acorde con los modelos de rotación de bloques por pequeñas fallas (Peacock et al., 1998).

Falla Soapaga

A partir de la estructura duplex, la Falla Soapaga continua con dirección al SW y con su trazo es posible relacionar rasgos geomorfológicos (FIGURA 7), como la cuenca donde se localizan los municipios de Corrales, Sogamoso

y Firavitoba, y lomos conformados por la interacción de sus segmentos en Riedel. Además, se identifican ejes de pliegues que terminan oblicuos contra el trazo principal de la falla hacia el sur del área, cerca al límite Boyacá-Cundinamarca. Estas características sugieren que hacia el sur la Falla Soapaga, además de su comportamiento como estructura inversa (cabalgamientos cerca de Firavitoba y Pesca), presenta movimientos transcurrentes en forma dextral, ilustrados para un modelo ideal en la FIGURA 8, en cuyo caso la depresión de Sogamoso (alargada y en forma de S) sería una cuenca de tracción originada por una curva de relajamiento.

El cambio de movimiento dextral a sinistral de la Falla Soapaga se localizaría en el área de Corrales, aproximadamente a una latitud de 5°50', ya que hacia el norte de esta localidad, se aprecia otro pliegue oblicuo al trazo principal (Ulloa et al., 1998), pero indica un movimiento lateral izquierdo de la falla. Sin embargo, por datos de microtectónica de Kammer (1999), este cambio podría localizarse cerca de 5°55', ya que a esta latitud aún infiere movimientos dextrales, que el mismo autor reconoce como menos evidentes que los sinestrales relacionados con la Falla Bucaramanga más al norte.

Esta distribución de los desplazamientos es respuesta concordante con un régimen compresivo que genera un tensor actual de esfuerzos orientado 118° según Toro-Ramírez & Osorio (esta publicación) ó 125° según Taboada et al. (2000). Si este tensor se aplica sobre una zona de cizalla curva como en el caso de las fallas Soapaga y Boyacá, la dirección de movimiento a lo largo de los segmentos de falla variará según su orientación, es decir, que dependiendo de la geometría de las fallas se dará una partición del esfuerzo en desplazamiento lateral y deformación en la vertical (transpresión) como se explica en la FIGURA 9. Para la Falla Soapaga y estructuras paralelas al aplicar un tensor promedio de 122° en compresión, se favorecen desplazamientos de transpresión sinistral hacia el norte de aproximadamente 5°50' y transpresión dextral hacia el sur de esta latitud; localmente y según la geometría de los segmentos de falla pueden predominar los cabalgamientos y plegamientos, como en los alrededores de la latitud mencionada, ya que la dirección del movimiento por el tensor es casi perpendicular a la dirección de los trazos de falla.

Falla Boyacá

El trazo de la Falla Boyacá es claro desde Onzaga hasta el occidente de Paipa, y cabalga rocas del Jurásico sobre

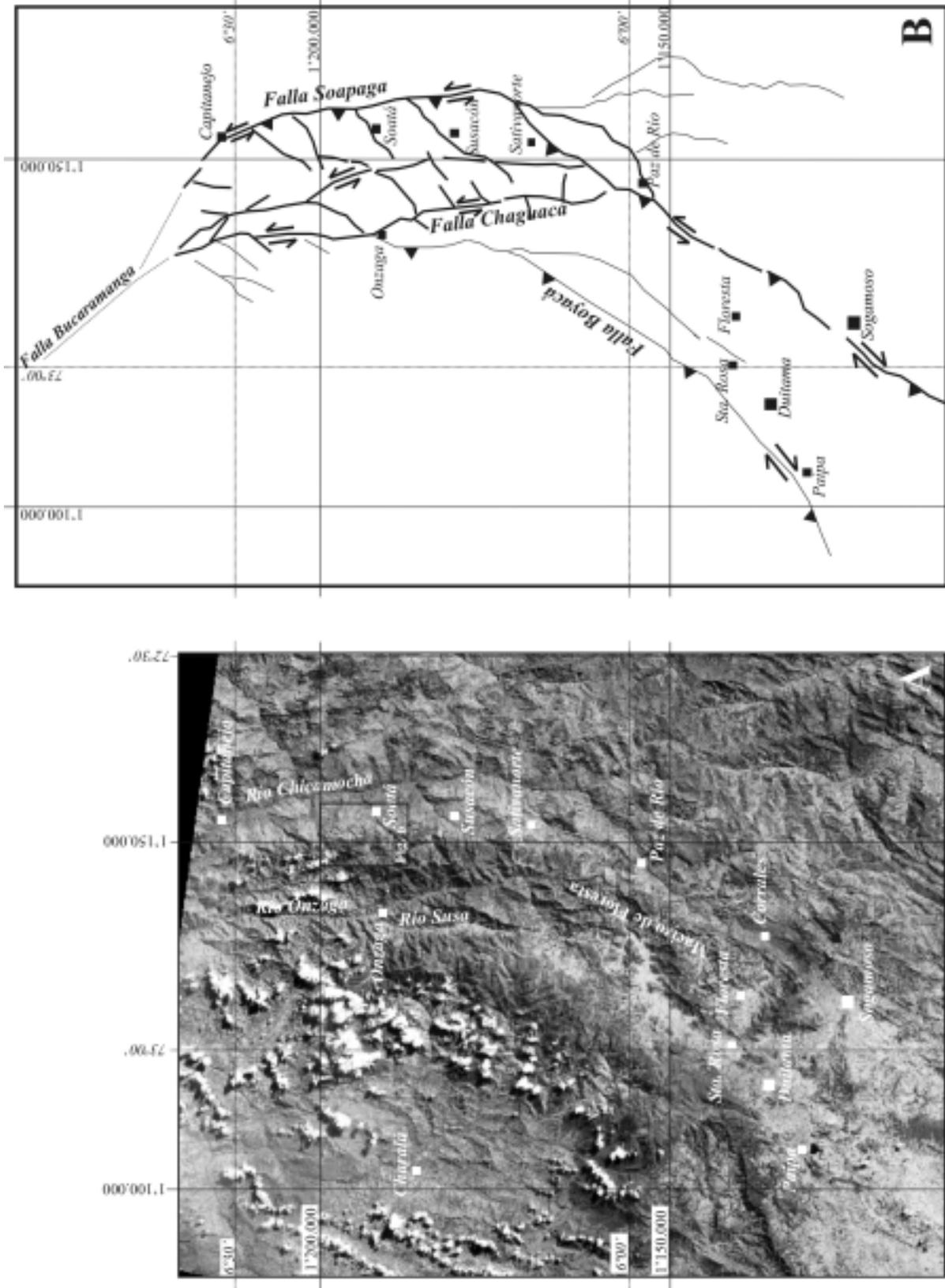


FIGURA 2. A. Imagen Landsat TM con los principales sitios geográficos del área; además, recuadro con la ubicación de la estructura duplex por combinación de movimientos verticales y transcurrentes. Se resaltan los trazos internos de la estructura y de las fallas Soapaga y Chaguaca que la limitan y se infiere el trazo de la Falla Bucaramanga. Ver explicación en el texto.

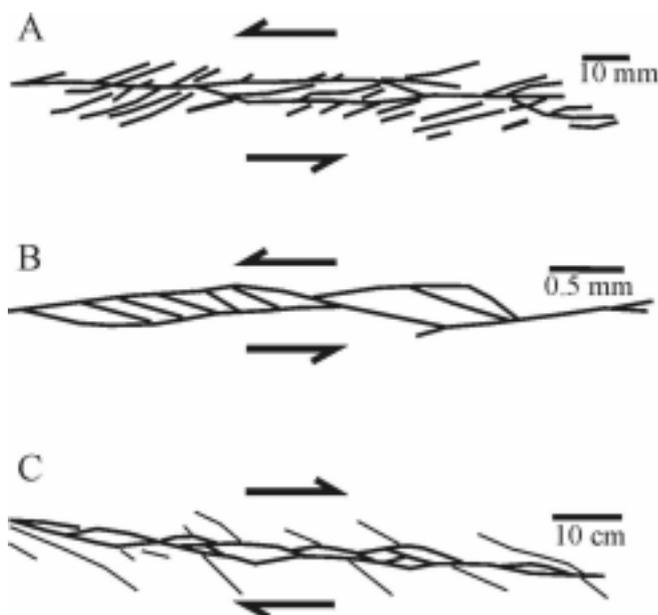


FIGURA 3. Modelos de laboratorio que muestran la conformación de estructuras duplex por cizalla simple. A y B con experimentos en arcillas elaborados por Tchalenko (1970) y C con la evolución de fallas por transcurrencia en experimentos en cajas de arena elaborados por Naylor et al. (1986). Tomado de Woodcock & Fischer (1986).

sedimentarias cretácicas y paleógenas (Vargas et al., 1987, Ulloa et al., 1998, Renzoni & Rosas, 1983). La mayoría de autores coinciden en que la falla aflora hasta el sector de Sotaquirá, pero la imagen de satélite permite identificar un lineamiento que se prolonga hacia el SW (FIGURA 7), con posible continuidad al valle de Ubaté, el cual ocurre a lo largo del flanco SE del Anticlinal Arcabuco. En relación con el trazo principal, donde la falla es bien reconocida, se identifican algunos ganchos de flexión al norte de Paipa (FIGURA 7), los cuales afectan depósitos nombrados como Aluvial Antiguo del Plioceno por Reyes (1997, 2001) y que han sido cartografiados como parte de la Formación Tilitá por Renzoni & Rosas (1983), lo que indicaría actividad tectónica durante el Plioceno o quizás posterior.

La cuenca de Sotaquirá parece tener origen en la tracción por un salto lateral a la derecha de la Falla Boyacá en su

movimiento de rumbo dextral, el cual es favorecido por la geometría de la falla en una partición de esfuerzos con un tensor de 122° en compresión (FIGURA 9). Se identifican otras estructuras regionales y rectilíneas asociadas a la Falla Boyacá, como las fallas Chivatá y Tunja (Reyes, 2001; Renzoni & Rosas, 1983), la primera de las cuales se desprende desde Paipa y continua hacia Machetá en Cundinamarca. Estas fallas asociadas se interpretan como un sistema imbricado de la Falla Boyacá por la propagación del cabalgamiento, pero se debe tener en cuenta que también pueden tener componente de rumbo dextral, como lo sugiere la terminación oblicua de pliegues contra el trazo principal de la Falla Chivatá (FIGURA 7B).

Lineamientos transversales

Lineamientos transversales con dirección E-W y SE-NW también son comunes en el área (FIGURA 7), algunos cortan localmente a las estructuras mayores longitudinales, como lo muestra Reyes (2001) en los sectores de Iza y Tuta - Toca. Entre los lineamientos con orientación NW-SE sobresale el que relaciona los cuerpos volcánicos de Iza y Paipa, y el costado norte de la cuenca de Sotaquirá (FIGURA 7), el cual marca, además diferencias en la litología del Cretácico con la presencia del Sinclinal Los Medios hacia el norte (Renzoni & Rosas, 1983). Este lineamiento se puede interpretar como una falla de basamento que en la etapa de *rifting* hizo parte de una zona de transferencia perpendicular a las fallas principales normales y que en la fase de levantamiento andino puede tener relación con el origen de los cuerpos volcánicos y fuentes termales de la zona, especialmente si se relacionan con un tensor actual compresivo de 122° , cuya dirección casi paralela a los lineamientos NW les daría un carácter distensivo o en algunos casos transtensivo si se involucra una componente de rumbo. De hecho, a la mayoría de los lineamientos transversales regionales de la Cordillera Oriental se les ha atribuido un movimiento de rumbo sinistral (Gómez, 1991; Reyes, 1993, y Ujueta, 1993).

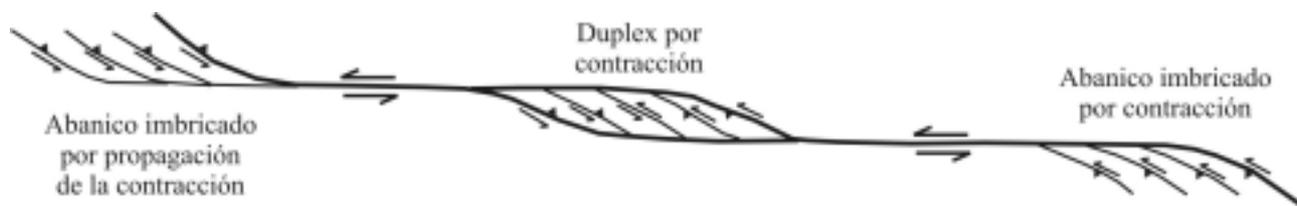


FIGURA 4. Esquema idealizado de un sistema de rumbo sinistral que ilustra la conformación de estructuras por contracción. Modificado de Woodcock & Fischer (1986).

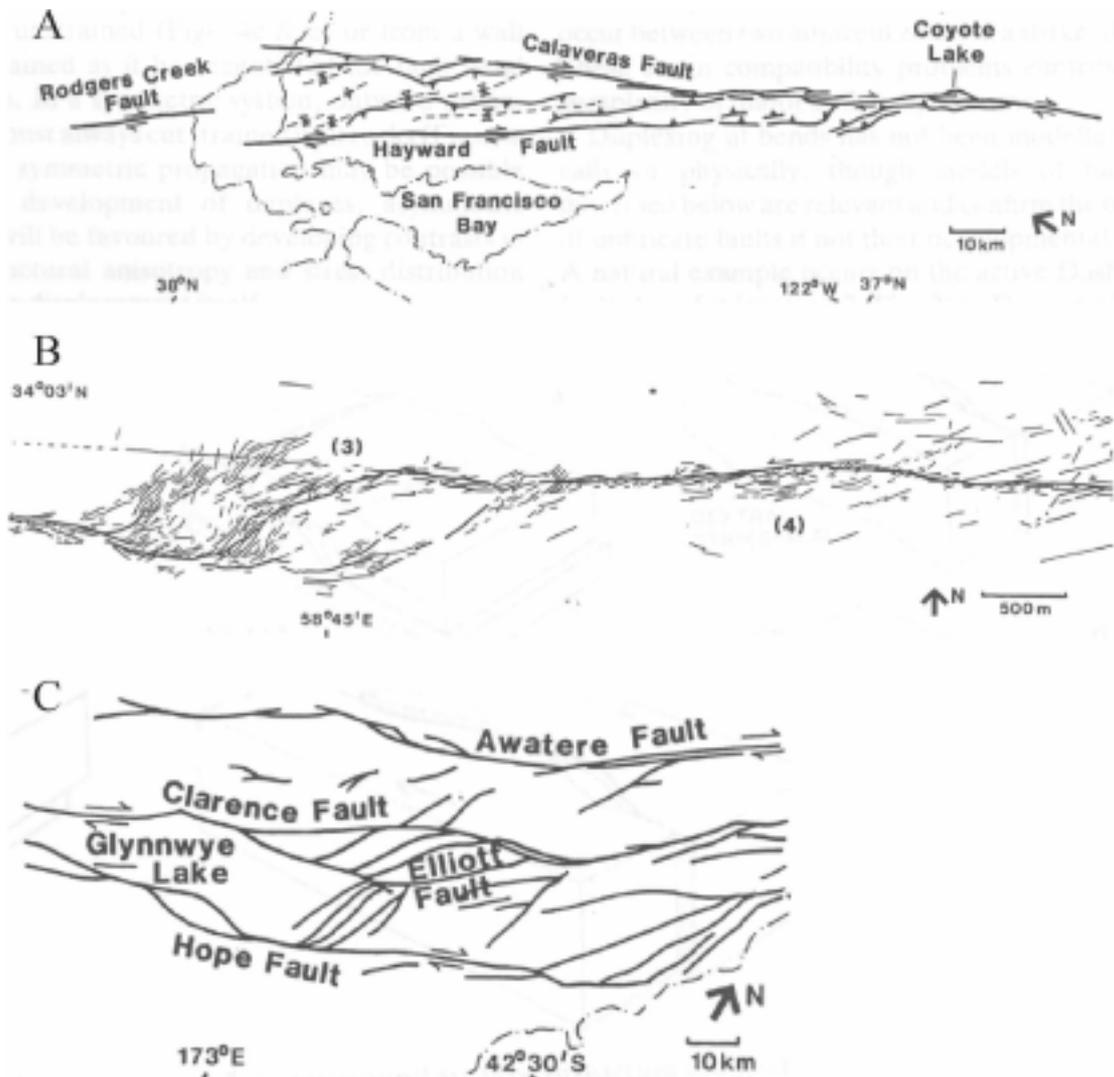


FIGURA 5. Ejemplos de estructuras duplex por fallamiento transcurrente. A East Bay Hills, California, Estados Unidos. B Dasht-e-Bayaz Fault Nimbluk Valley, Iran. C Marlborough Fault System, Nueva Zelanda. Tomado de Woodcock & Fischer (1986).

De Freitas et al. (1997) muestra el Lineamiento Jenesano (FIGURA 1) como una estructura transversal que limita el cabeceo del Anticlinal Arcabuco al sur y diferencia la deposición de la secuencia cretácica a lado y lado y actúa como una zona de transferencia durante la etapa de *rifting*, la cual ha sido reactivada con movimientos de rumbo durante el levantamiento de la Cordillera Oriental. Acosta (2002) observa que hacia el borde occidental de la cordillera, las fallas principales de dirección NE han sido desplazadas por las fallas transversales de dirección NW. En general, estas interpretaciones soportan la idea acerca de la formación de las estructuras transversales en el pre-Cretácico y su reactivación durante la Orogenia Andina hasta la actualidad.

DISCUSIÓN

Las estructuras de la zona axial de la Cordillera Oriental reflejan el ambiente geotectónico que le ha dado origen. Autores como Kellogg & Vega (1995) y Ego et al. (1996) muestran la influencia de la convergencia del Bloque Chocó en la esquina noroccidental de Suramérica, el cual provoca transpresión con componente sinistral, como en la prolongación sur de la Falla Bucaramanga en las de Soapaga y Boyacá, y de otra parte, el efecto de la subducción oblicua de la Placa Nazca bajo la Suramericana que genera transpresión con desplazamiento dextral en la parte sur del área.

Estas estructuras reflejan, además, la dinámica actual. La Falla Bucaramanga se considera como una falla activa por reportes de rasgos geomorfológicos indicativos (Montes et al., 2000; Carrillo & Vergara, 2001), mientras que las fallas de Soapaga y Boyacá se catalogan como fallas potencialmente activas por algunos indicadores como fracturamiento de cantos, corrientes controladas y basculamiento de la Formación Tiltatá (Montes et al., 2000). Además, la intensa remoción en masa en el Municipio de Paz de Río y vecinos parece estar relacionada con los trazos que conforman lentes asociados a la transpresión (FIGURA 2), tal como lo indican los modelos de evolución de transcurrencia llevados a cabo en laboratorios, que muestran cómo la actividad más reciente de la falla se concentra en lentes cada vez más relacionados con el trazo principal (FIGURA 3), mientras que fallas sintéticas se vuelven inactivas a medida que se alejan de los lentes. Al trazo de la Falla Soapaga se ha asociado el sismo de

Firavitoba de 1646, de intensidad máxima reportada de VIII y Magnitud Ms entre 6 y 6,5, la cual sugiere una posible actividad histórica de la falla.

Entender el esquema tectónico regional de la zona axial de la Cordillera Oriental, en especial bajo la influencia del actual tensor de esfuerzos, es importante para hacer una reevaluación de la actual zonificación de amenaza sísmica de la región, ya que es posible identificar y delimitar segmentos de falla cuya actividad sísmica pueda afectar a la población u obras de infraestructura. Un esquema evolutivo y posible reactivación de fallas de basamento tiene incidencia, además, en la evaluación del potencial de recursos energéticos, geotérmicos y minerales del área. En este sentido, se deben identificar los sectores donde se pueden presentar movimientos de rumbo con transtensión, tanto en estructuras longitudinales como transversales, ya que son zonas favorables para el tránsito de fluidos hidrotermales.

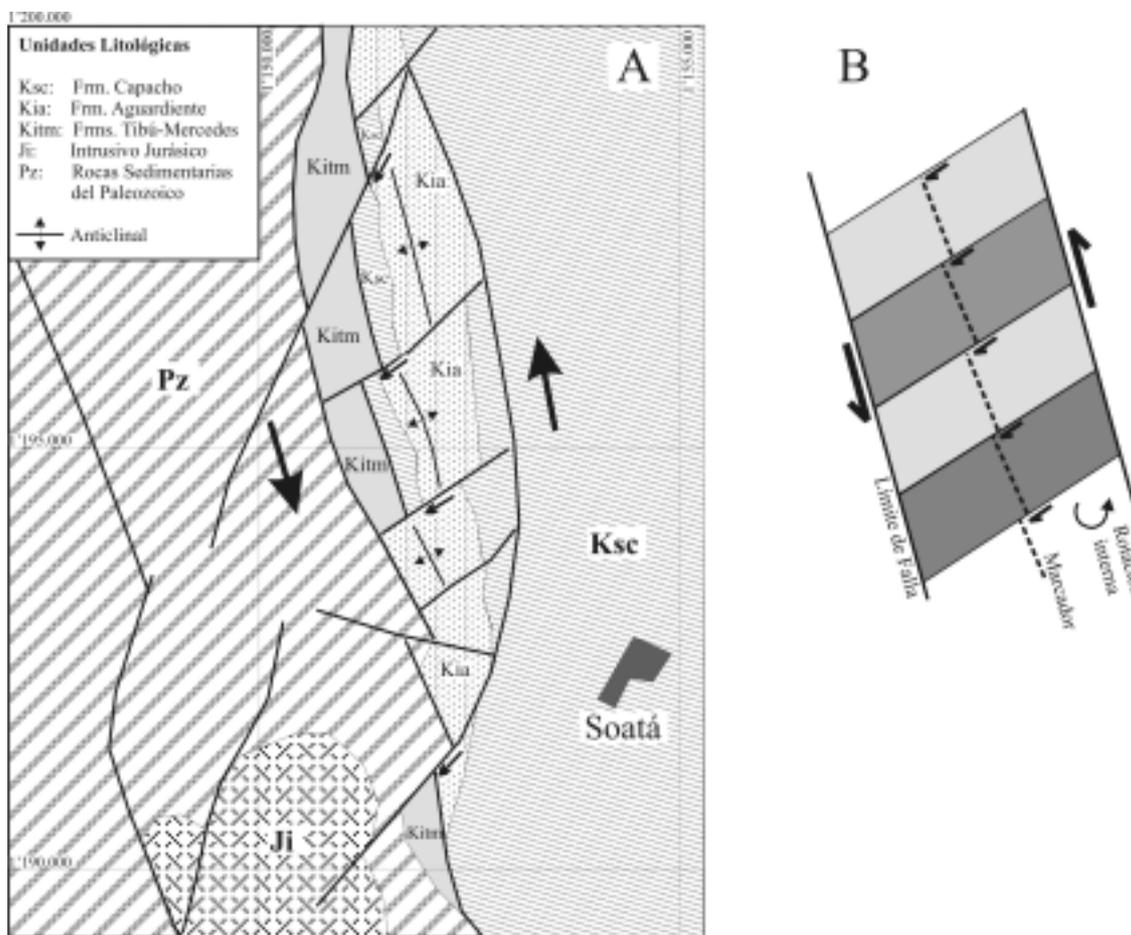


FIGURA 6. Rotación interna de bloques por cizalla simple. A. Detalle geológico dentro de la estructura duplex (ver recuadro en la FIGURA 2A). Internamente se forman lentes afectados por fallas locales que desplazan y rotan la secuencia cretácica. Modificado del mapa geológico de Vargas et al. (1987). B. Esquema que ilustra la rotación de bloques por fallas internas que tienen un sentido opuesto al de la cizalla simple. Modificado de Peacock et al. (1998).

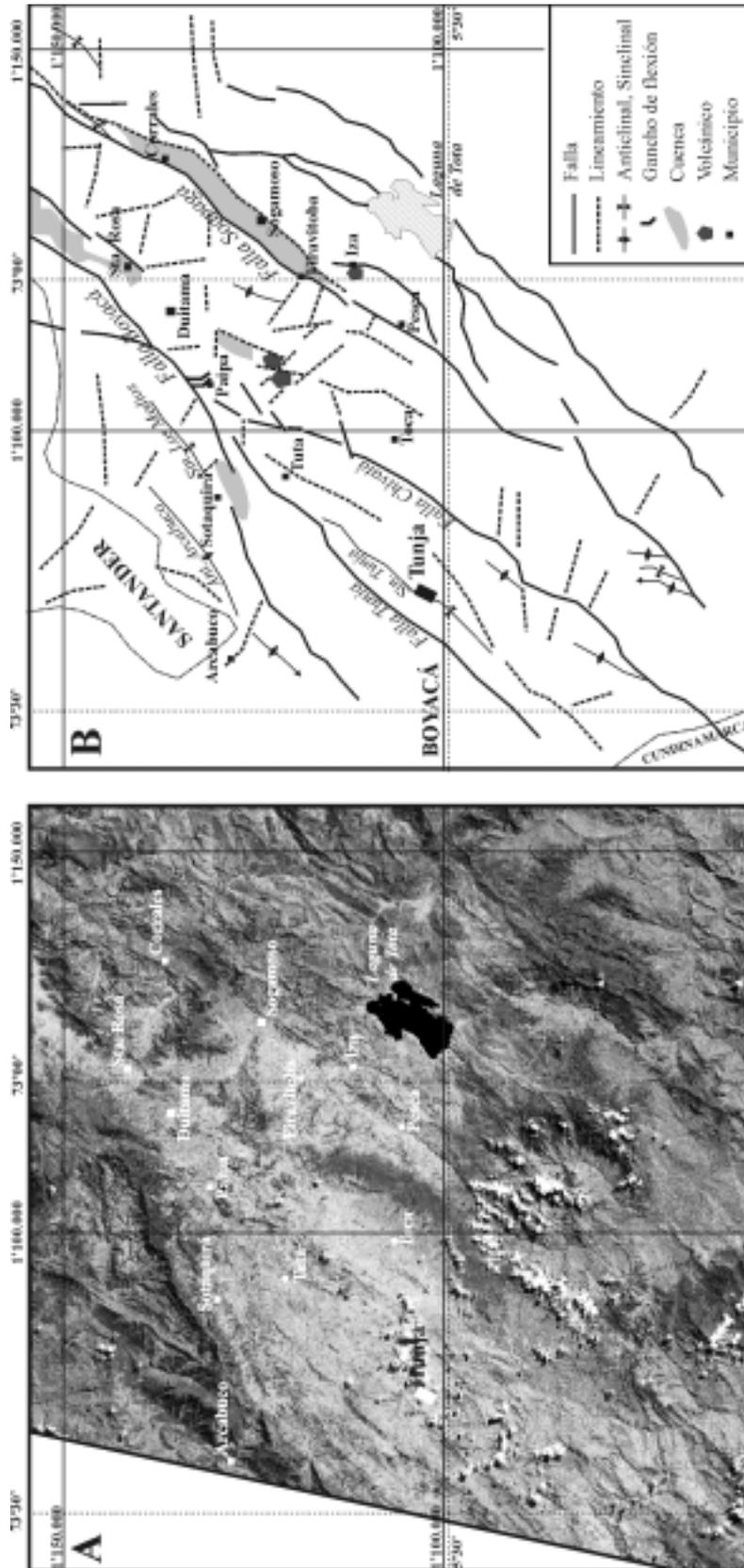


FIGURA 7. Sector sur del área interpretada. A. Imagen Landsat con las principales localidades. B. Esquema tectónico resultado de la interpretación; se indica la continuidad de fallas Boyacá, Tunja, Chivatá y Soapaga hacia el sur y la relación de los trazos con pliegues oblicuos, cuencas y cuerpos volcánicos. Ver explicación en el texto.

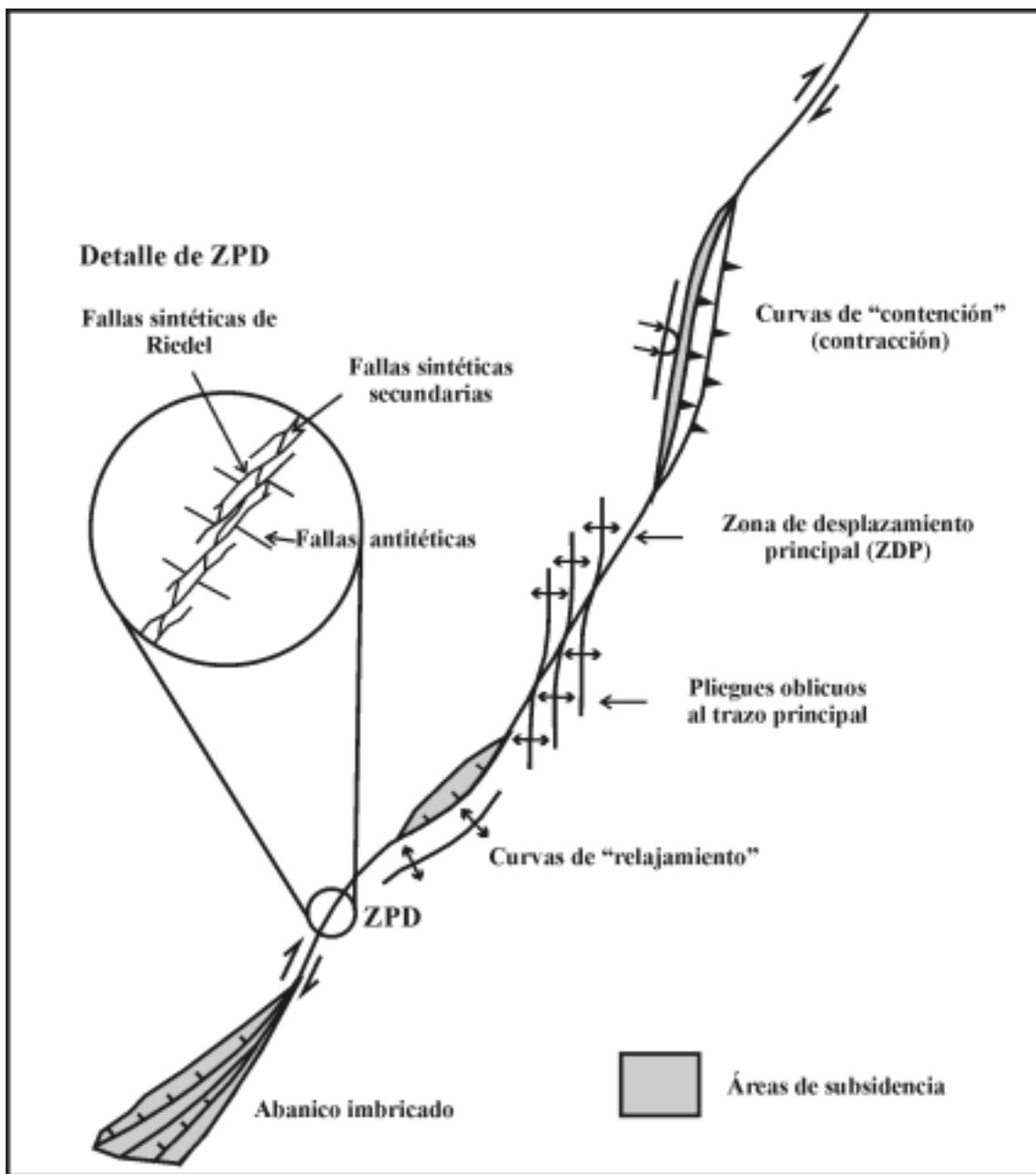


FIGURA 8. Esquema de estructuras formadas por fallamiento transcurrente dextral. Obsérvese la disposición de pliegues oblicuos al trazo principal de la falla y cuencas de tracción en las curvas de relajamiento. Modificado de Biddle & Christie-Blick (1985).

CONCLUSIONES

Movimientos de rumbo sinestrales se manifiestan en los trazos de la Falla Soapaga hasta una latitud aproximada de $5^{\circ}50'$. Esta falla junto con un segmento de la Falla Boyacá y la Falla Chaguacá configuran una estructura duplex cuya disposición y fallamiento interno confirman un movimiento transcurrente con desplazamiento lateral izquierdo causado por cizalla simple. El movimiento de rumbo de estas fallas

se suma al componente inverso con el que han sido tradicionalmente caracterizadas cuando se les relaciona con la continuación y el amortiguamiento de la Falla Bucaramanga hacia el sur.

Desde la latitud mencionada hacia el sur, las fallas Soapaga y Boyacá presentan rasgos de transurrencia dextral, como cuencas de tracción, ganchos de flexura, fallas sintéticas de Riedel, pliegues oblicuos y conformación de lentes.

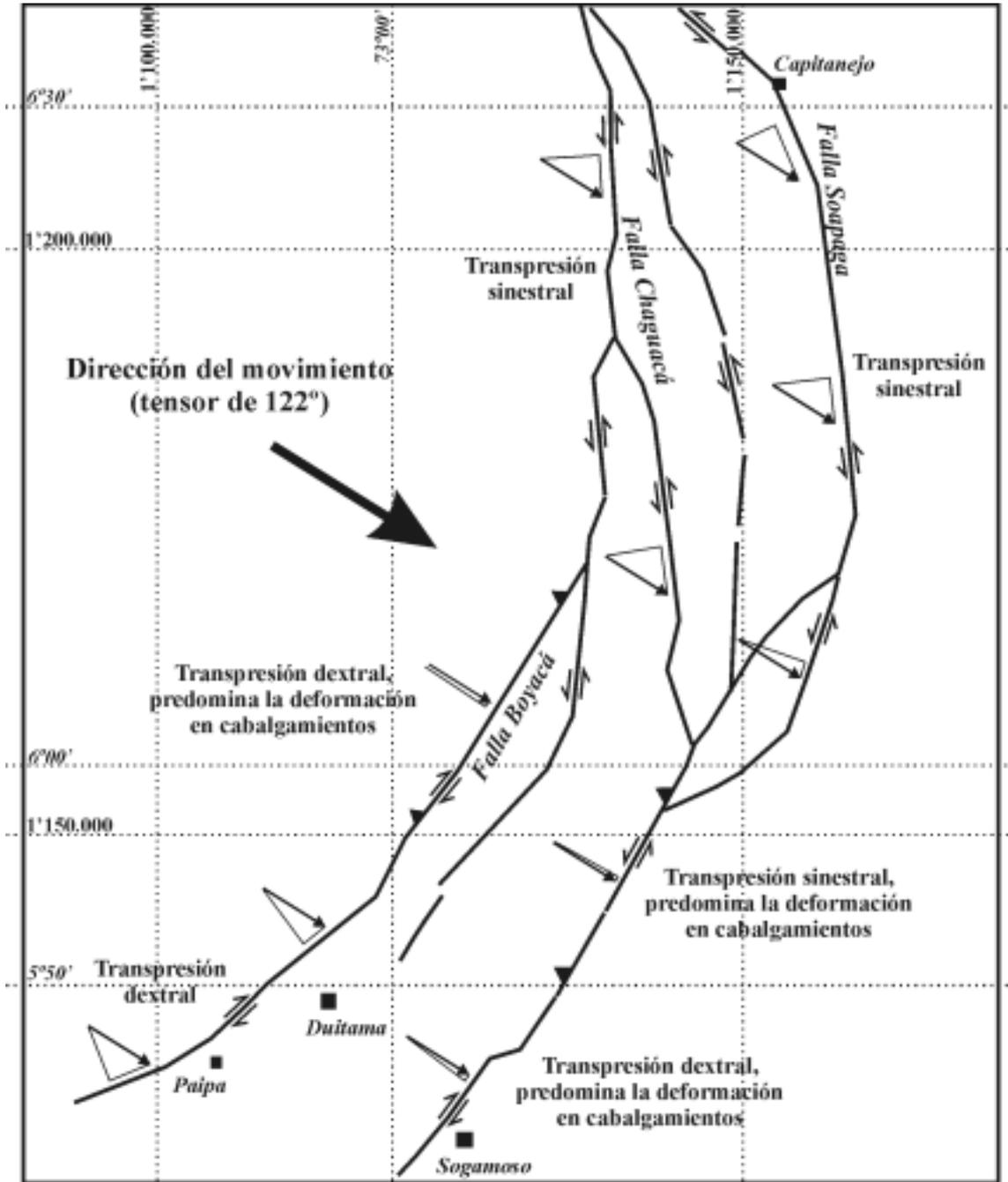


FIGURA 9. Esquema de las fallas Soapaga, Chaguacá y Boyacá con ilustración de la correspondencia de la dirección de movimiento por un tensor compresivo de 122° (promedio entre Toro-Ramírez & Osorio, esta publicación y Taboada et al., 2000) y la cinemática producida en los diferentes segmentos de las zonas de cizalla curvas. La longitud de los vectores paralelos al segmento de falla indican el relativo desplazamiento transcurrente que se combina con el vertical. Hacia la latitud de 6° predomina la deformación en cabalgamientos, pero a lo largo de la Falla Soapaga se alcanza a dar un desplazamiento sinistral hasta 5°50' y dextral desde esta latitud hacia el sur. El cambio a lo largo de la Falla Boyacá se localizaría más al norte de 6°.

Esto indicaría la influencia en la zona axial de la tectónica transpresiva dextral que caracteriza el sur del Cordillera Oriental (Velandia et al., 2001). Además, se sugiere la continuidad de las fallas Soapaga, Boyacá, Chivatá y Tunja hacia el área de la Sabana de Bogotá.

Los lineamientos transversales identificados se pueden interpretar como estructuras de basamento, que actuaron como zonas de transferencia en la etapa de *rifting* del Mesozoico (cuenca de retroarco) y que durante la Orogenia Andina se reactivaron con movimientos de rumbo y con carácter distensivo por tener una orientación subparalela al actual tensor compresivo del área.

Tanto las fallas longitudinales (Soapaga, Boyacá y subparalelas) como las transversales son estructuras que potencialmente pueden presentar actividad neotectónica con posibles efectos sobre la población y obras civiles, especialmente a lo largo de los segmentos de fallas que configuran los lentes relacionados la estructura duplex, lomos y cuencas.

Adicionalmente, desde el punto de vista de recursos, es posible identificar sectores con segmentos de falla en distensión, por donde se favorece el tránsito de fluidos. Por esto se recomienda llevar a cabo estudios neotectónicos, geofísicos y geoquímicos en los segmentos que configuran lentes en las fallas principales y a lo largo de los lineamientos transversales con especial énfasis en los cruces con las fallas longitudinales.

AGRADECIMIENTOS

El autor lleva a cabo la interpretación de imágenes de satélite dentro de las actividades del Proyecto de Geodinámica de INGEOMINAS para caracterizar las principales estructuras falladas y detectar su posible actividad neotectónica, como aporte al Mapa Geológico de Colombia y en este caso en el sector del Altiplano Cundiboyacense, donde es necesaria una actualización cartográfica. Además, es un insumo para la generación de un modelo estructural que permita evaluar el potencial geotérmico en la zona. Gracias al jefe de proyecto, Dr. Jorge Acosta por el apoyo a esta actividad, la corrección del manuscrito y la discusión técnica, también al geólogo Henry Villegas por el procesamiento de la imagen de satélite.

REFERENCIAS

- Acosta, J. (2002). Structure, tectonics and 3D models of the western foothills of the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. PhD. Thesis. Imperial College. London.
- Biddel, K., Christie-Blick, N. (editors). (1985). Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. Society of Economic Palontologists and Mineralogistics. Special Publication, 37. Oklahoma.
- Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., Vargas, R. (1989). La Falla de Bucaramanga (Colombia): Su función durante la Orogenia Andina. Revista Norandina, Bogotá, Vol. 11, pp. 3-10.
- Butler, K., Schamel, S. (1988). Structure along eastern margin of the Central Cordillera, Upper Magdalena Valley, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 1 (1), pp. 109-120.
- Carrillo, E., Vergara, H. (2001). Neotectónica y fallas activas del nororiente colombiano. VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias. Manizales.
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., Rudkiewicz, J. (1990). Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross-section. In Letouzey, J., ed., Petroleum and tectonics in mobile belts: Paris, Editions Technip, pp. 81-100.
- 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, Vol. 79, No. 10, pp. 1421-1443.
- Dengo, C., Covey, M. (1993). Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics. AAPG Bulletin, Vol. 77, No. 8, pp. 1315-1337.
- Ego, F., Sébrier, M., Lavenu, A., Yepes, H., Egues, A. (1996). Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. Tectonophysics, Vol. 259, pp. 101-116.
- Fabre, A. (1983). La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario. Segunda Parte: Esquema de evolución tectónica. Revista Norandina, Bogotá, No. 8, pp. 21-27.

- Freitas de, M., Froncolin, J., Cobbold, P. (1997). The Structure of the axial zone of the Cordillera Oriental, Colombia. VI Simposio Bolivariano "Exploración petrolera en las cuencas subandinas". Memorias. Cartagena, Tomo II, pp. 38-41.
- Gómez, H. (1991). La Paleomegacizalla transversal de Colombia, base para un nuevo esquema geotectónico. Revista CIAF, Bogotá, Vol. 12 (1), pp. 49-61.
- Ingeominas. (1988). Mapa Geológico de Colombia Escala 1:1'500.000. Bogotá.
- Ingeominas. (1997). Atlas Geológico de Colombia. Plancha 5-09. Escala 1:500.000. Bogotá.
- Kammer, A. (1999). Observaciones acerca de un origen transpresivo de la Cordillera Oriental. Geología Colombiana, Bogotá, Vol.24, pp. 29-53.
- Kellogg, J., Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. Geological Society of America. Special Paper 295, pp. 75-90.
- Montes, N., Sandoval, A., Vergara, H. (2000). Base de datos y mapa de fallas activas de Colombia. INGEOMINAS. Bogotá.
- Naylor, M., Mandl, G., Sijpesteijn, C. (1986). Fault geometries in basement induced wrench faulting under different initial stress states. Journal of Structural Geology, Vol. 8, pp. 737-752.
- Peacock, D., Anderson, M., Morris, A., Randall, D. (1998). Evidence for the importance of "small" faults on block rotation. Tectonophysics, Vol. 299, pp. 1-13.
- Renzoni, G., Rosas, H. (1983). Geología Plancha 171-Duitama. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Reyes, I. (1993). La tectónica y su influencia en la recarga de los acuíferos profundos de la Sabana de Bogotá, Colombia. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología, Cartagena, Tomo I, pp. 32-42.
- Reyes, I. (1997). Observaciones sobre el Cuaternario del altiplano Tunja-Sogamoso. Geología Colombiana, Bogotá, Vol. 17, pp. 151-157.
- Reyes, I. (2001). Neotectónica del corredor industrial de Boyacá, Colombia. VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias. Manizales.
- 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, 296p.
- 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, Vol. 19 (5), pp. 787-813.
- Tchalenko, J. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 81, pp. 1625-1640.
- Toro-Ramírez, A., Osorio, J. (Esta publicación). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de los Andes calculadas a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Ingeominas. Bogotá.
- Ujueta, G. (1993). Lineamientos Muzo, Tunja y Paipa en los departamentos de Boyacá y Casanare. Geología Colombiana, Bogotá, Vol. 18, pp. 65-73.
- Ulloa, C., Guerra, A., Escovar R. (1998). Geología Plancha 172 - Paz de Río. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., Téllez, N. (1984). Geología Plancha 136 - Málaga. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., Téllez, N. (1987). Geología Plancha 152 - Soatá. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Velandia, F.; Terraza, R.; Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas de Algeciras hacia el suroeste de Colombia y la actual transpresión de los Andes del Norte. VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias. Manizales.
- Wellman, S. (1970). Stratigraphy and petrology of the nonmarine Honda Group (Miocene), Upper Magdalena Valley, Colombia. Geological Society American Bulletin, Vol. 81, pp. 2353-2374.
- Woodcock, N., Fischer, M., 1986. Strike-slip duplexes. Journal of Structural Geology, Vol. 8, No. 7, pp. 725-735.

Trabajo recibido: julio 6 de 2004

Trabajo aceptado: septiembre 6 de 2004