

INTERPRETACIÓN MORFOTECTÓNICA DE LA FALLA IBAGUÉ PARA SU CARACTERIZACIÓN PALEOSISMOLÓGICA

Montes, N.¹; Velandia, F.¹; Osorio, J.¹; Audemard, F.²; Diederix, H.³

RESUMEN

La Falla Ibagué es una estructura de tipo transcurrente dextral que se extiende en dirección WSW-ENE y se encuentra ubicada en medio de una zona de cizalla transversal que afecta la parte central de la Cordillera Central de Los Andes Colombianos con dirección NEE. Utilizando imágenes de sensores remotos se realizó una interpretación morfotectónica de la falla, que permitió proponer la geometría de deformación y algunas características cinemáticas, conocimiento que, junto con datos geográficos, morfoclimáticos y sedimentológicos, es básico para la elección acertada de un sitio de trinchera de exploración paleosismológica. El trayecto de la falla a lo largo del Abanico de Ibagué se muestra regionalmente como un solo trazo, pero a mayor escala se observan numerosos y variados rasgos morfotectónicos característicos de fallamiento transcurrente, caracterizados por presentar un arreglo de cizallas *Riedel* dextrales y en *echelon* con saltos a la izquierda. Las mediciones microtectónicas en estaciones situadas a lo largo de la falla en el Abanico de Ibagué arrojaron un tensor de esfuerzos local, con un esfuerzo máximo horizontal (s_1) de dirección $311^\circ/18^\circ \pm 15^\circ$ y un factor de forma de $R=0,62$, que indican un régimen de esfuerzos de tipo transcurrente, resultado que es consecuente con las observaciones morfotectónicas y geológicas.

Palabras clave: Neotectónica, Transcurrencia, Falla Ibagué, Colombia.

MORPHOTECTONIC INTERPRETATION OF THE IBAGUE FAULT FOR PALEOSEISMOLOGICAL PURPOSES

ABSTRACT

The Ibagué Fault is a WSW-ENE right-lateral strike-slip structure located in the central part of the Central Cordillera and in the middle of transverse shear zone that affects the Colombian Andes. Morphotectonic interpretations of the fault from satellite images allow us to propose the style of deformation and the kinematics of the structure. These structural characteristics together with geographical, geomorphologic, sedimentologic and climatic data are key elements for the right selection of a paleoseismical investigation site. The strand appears to be as a single line along the Ibagué Fan at regional scale. However, detailed studies shown several morphotectonic features characteristic of wrench tectonics. Riedel and *en-echelon* array indicate dextral displacements. Additionally, microtectonic data show a local stress tensor with a $s_1=311^\circ/18^\circ \pm 15^\circ$ and a factor $R=0,62$, indicating a strike-slip regime, which is coherent with the observed geologic and morphotectonic features.

Key words: Neotectonics, Wrenching, Ibagué Fault, Colombia.

¹ INGEOMINAS, Sede Central, Diag. 53 N° 34-53, Bogotá,

Correo electrónico: nmontes@ingeominas.gov.co, fcovelan@ingeominas.gov.co, osorio@ingeominas.gov.co

² FUNVISIS, Caracas, Venezuela, Correo electrónico: faudem@funvisis.internet.ve

³ INDEPENDIENTE, Holanda, Correo electrónico: hansdiederix@cs.com

INTRODUCCIÓN

La Falla Ibagué presenta contundentes rasgos de actividad neotectónica asociados con su trazo, que la definen como una estructura potencialmente productora de grandes sismos. En su campo cercano contiene importantes centros poblados del país donde viven cerca de 13 millones de habitantes (Ibagué, Bogotá, Armenia, Pereira y Manizales son los más importantes). Por esta razón, el panorama de la amenaza sísmica asociada con esta estructura debe ser evaluado por medio de una combinación de diferentes técnicas que permitan conocer su verdadero potencial sismogénico.

La actividad neotectónica de la Falla Ibagué ha sido reportada por Raasveldt & Carvajal (1956), Lobo-Guerrero (1974), Pérez (1979), Mosquera et al. (1982), Murcia & Vergara (1987). Mediante un estudio fotogeológico y reconocimiento de campo Diederix et al. (1987) identifican y describen una serie de rasgos morfotectónicos característicos que les permiten clasificar esta estructura como una falla activa, de movimiento transcurrente dextralateral. Vergara (1989) demuestra que es una estructura activa en el Holoceno reciente y corrobora que la falla es principalmente de tipo transcurrente en sentido dextral, determina tasas de deformación de altas a moderadas y períodos de retorno de cientos a miles de años. Marquínez (2001) considera que la Falla Ibagué presenta una importante componente inversa, buzando hacia el norte con un ángulo fuerte en superficie que disminuye en profundidad, e identifica un sinclinal en formaciones Mesozoicas y Terciarias subyacente al abanico, con un eje de dirección este oeste, cuyo flanco norte está limitado por la Falla Ibagué. Estos estudios confirman a la Falla Ibagué como una de las principales estructuras activas de rumbo del país; sin embargo, los estudios han sido realizados sobre el Abanico de Ibagué siendo la parte más accesible y con evidencias morfotectónicas muy contundentes y no se conoce bien su continuidad hacia el occidente. En consecuencia, este trabajo incluye algunas observaciones sobre la continuación de la estructura y determina las fallas asociadas, así como también propone una geometría del tensor de esfuerzos actual y determina un sitio para realizar una trinchera de exploración paleosismológica.

Subdisciplinas de la neotectónica como la morfotectónica y la paleosismología son imprescindibles para ampliar el tiempo de observación para la determinación del grado de actividad sísmica derivada de una estructura (Audemard & Singer, 1994; Audemard & Singer, 1996, entre otros). La paleosismología integra estudios geomorfológicos y

estratigráficos por medio de la correlación de las geoformas y los procesos de su formación, asociadas con las fallas activas y su correspondiente ambiente deposicional (McCalpin, 1996). Basados en la importancia manifiesta de la Falla Ibagué en el esquema actual de actividad sísmica del país y en la incertidumbre de la evaluación de su potencial, se proyectó realizar un estudio completo de cartografía y caracterización sismotectónica y se programó, en su estado final, la apertura de una trinchera de exploración paleosismológica, que permitiera determinar sus parámetros sísmicos. En este trabajo se presentan los resultados de las fases llevadas a cabo para la selección del sitio de trinchera, durante las cuales se obtuvo el conocimiento básico de la geometría y la cinemática de la falla.

MARCO TECTÓNICO REGIONAL

La Falla Ibagué afecta la zona central de Los Andes Colombianos y hace parte de una compleja zona de transferencia de esfuerzos y deformación actual en la latitud 5° N (Toro-Ramírez & Osorio, esta publicación). Al norte de esta zona las estructuras regionales de dirección NNE se caracterizan por presentar movimientos transpresivos, de componente principal sinistral (por ejemplo, las fallas de San Jerónimo, Silvia - Pijao, Cauca - Almaguer, Murindó, Bituima - La Salina, Santa Marta - Bucaramanga, entre otras). Este régimen ha sido atribuido a la colisión del bloque Chocó en el occidente colombiano durante el Mioceno tardío (Audemard, 1993; 1998; Acosta, 2002; Audemard & Audemard, 2002, entre muchos otros). Al sur de la zona de transferencia se observan en las fallas con dirección NNE movimientos transcurrentes de tipo dextral principalmente (por ejemplo, las fallas Buesaco, Cauca - Almaguer, Cali - Patía, Sistema Algeciras, entre otras), producto de la partición de esfuerzos generados por la convergencia oblicua de la placa Nazca con la margen continental (Toro-Ramírez & Osorio, esta publicación) (FIGURA 1).

LA FALLA IBAGUÉ

La Falla Ibagué atraviesa la Cordillera Central y se extiende hacia el este en dirección N70°E hasta el valle del río Magdalena. A su paso afecta principalmente rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Cajamarca, rocas ígneas de edad jurásica del Batolito Ibagué, rocas sedimentarias paleógenas y neógenas de los grupos Gualanday y Honda y el depósito neógeno cuaternario del Abanico de Ibagué (INGEOMINAS, 1997 y Marquínez, 2001) (FIGURA 2). La manifestación morfológica más

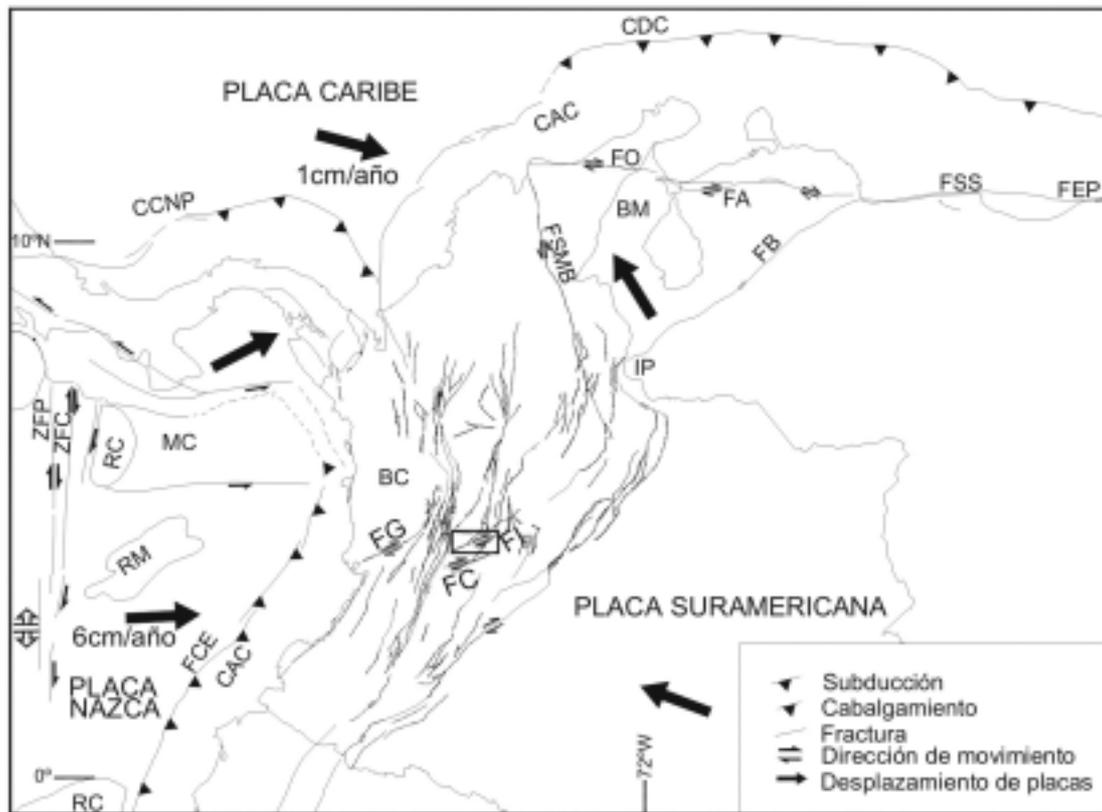


FIGURA 1. Esquema geotectónico de Los Andes del Norte. El recuadro corresponde a la zona de estudio. FG: Falla Garrapatas, FI: Falla Ibagué, FC: Falla Cucuana, CCNP: Cinturón Cabalgante Norte de Panamá, CAC: Cuña acrecionada del Caribe, CDC: Cinturón deformado del Caribe, ZFP: Zona de Falla de Panamá, ZFC: Zona de Falla de Coiba, RC: *Ridge* de Coiba, RM: *Ridge* de Malpelo, RC: *Ridge* de Carnegie, FCE: Fosa Colombo Ecuatoriana, CAC: Cuña acrecionada Colombiana, BC: Bloque Chocó, ID: Idéntor de Pamplona, FSM: Falla Santa Marta – Bucaramanga, BM: Bolque Maracaibo, FO: Falla Oca, FB: Falla Boconó, MC: Microplaca Coiba, FA: Falla Ancón, FSS: Falla San Sebastian, FEP: Falla El Pilar, (las flechas indican dirección de convergencia, tomadas de Arcila et al., 2002).

relevante a escala regional de la falla es que corta y desplaza la Cordillera Central en sentido dextral, al igual que las estructuras falladas más antiguas de dirección noreste que atraviesan la cordillera.

El trazo de la Falla Ibagué

A pesar de que la Falla Ibagué, en el sector donde cruza el Abanico de Ibagué, presenta contundentes rasgos de actividad neotectónica, hacia la Cordillera Central la continuidad de su trazo no se ha establecido con la misma definición, especialmente por tratarse de un área de constante nubosidad, espesa vegetación, abrupta topografía y difícil acceso.

La continuidad de la Falla Ibagué desde el valle del río Cauca y a través de la Cordillera Central se ha establecido principalmente con base en fotografías aéreas, imágenes Landsat TM y de radar. En especial la imagen Landsat

permite una interpretación de una zona de cizalla formada por segmentos rectos con saltos laterales a la izquierda. Los segmentos más occidentales que afectan el piedemonte occidental de la Cordillera Central se identifican cerca al Municipio de Tuluá, pasan por Génova y terminan en la divisoria de aguas donde está situado el límite de los departamentos de Quindío y Tolima. A partir de este punto, la falla presenta un salto lateral a la izquierda de 4,2 km, donde inicia otro segmento que con la misma dirección cruza el páramo de Los Gómez (Tolima) y termina en el lineamiento interpretado como la continuación sur de la Falla Pericos (FIGURA 3). Desde este sector, se observa otro salto lateral izquierdo, de aproximadamente 3,3 km, para definir el trazo regional de mayor longitud, el cual controla el valle del río Cocora en la cordillera y luego al salir de la cordillera continuar a través del Abanico de Ibagué en dirección de la población de Piedras cerca del río Magdalena. El trayecto de la falla a lo largo del Abanico de Ibagué se muestra regionalmente como un solo trazo, pero

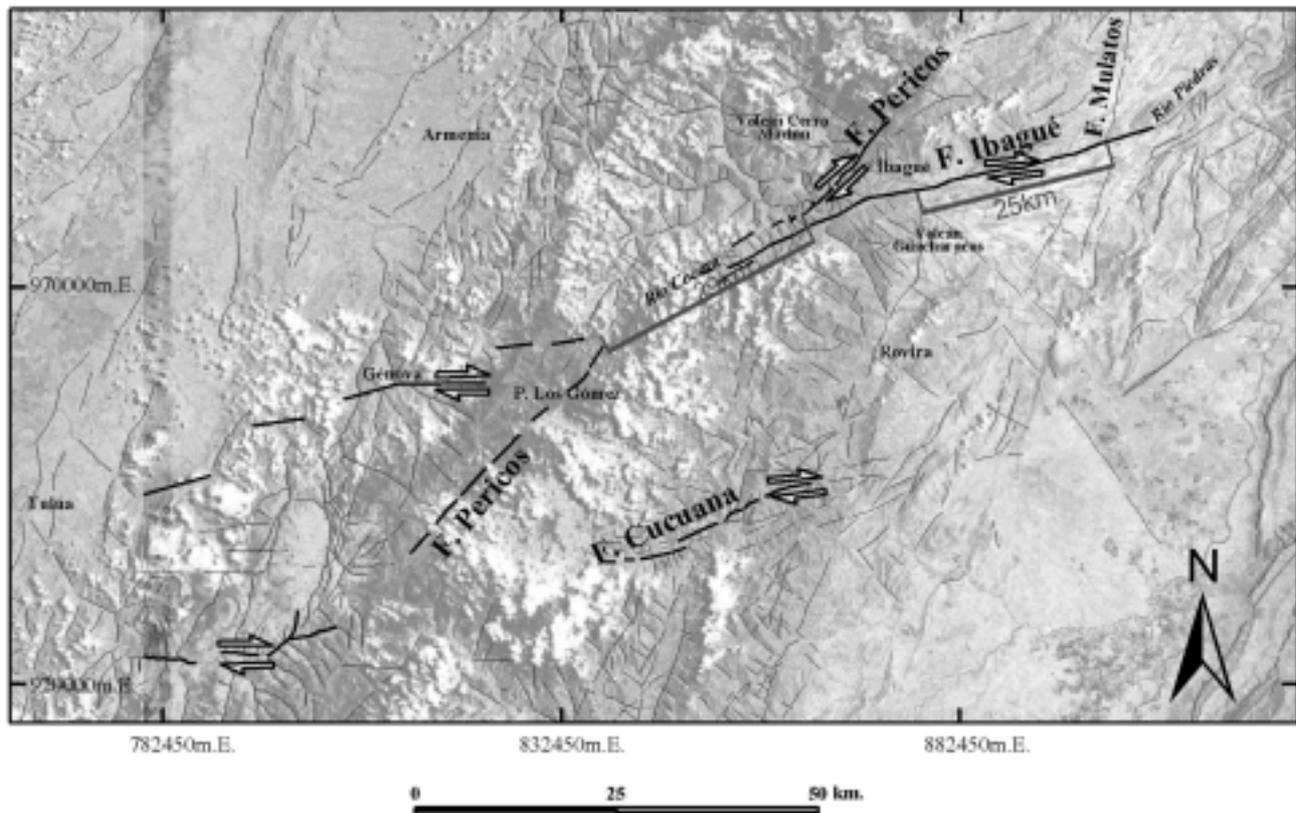
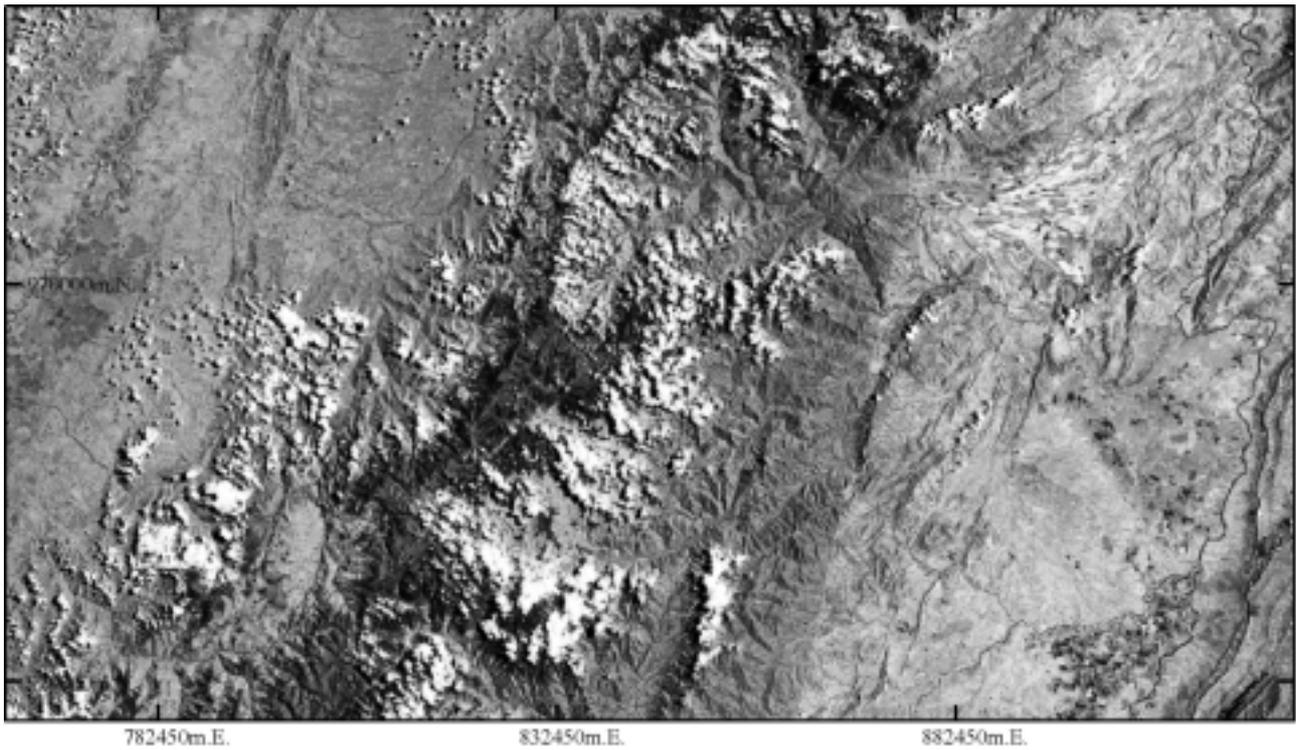


FIGURA 3. Interpretación regional imagen de satélite Landsat TM.

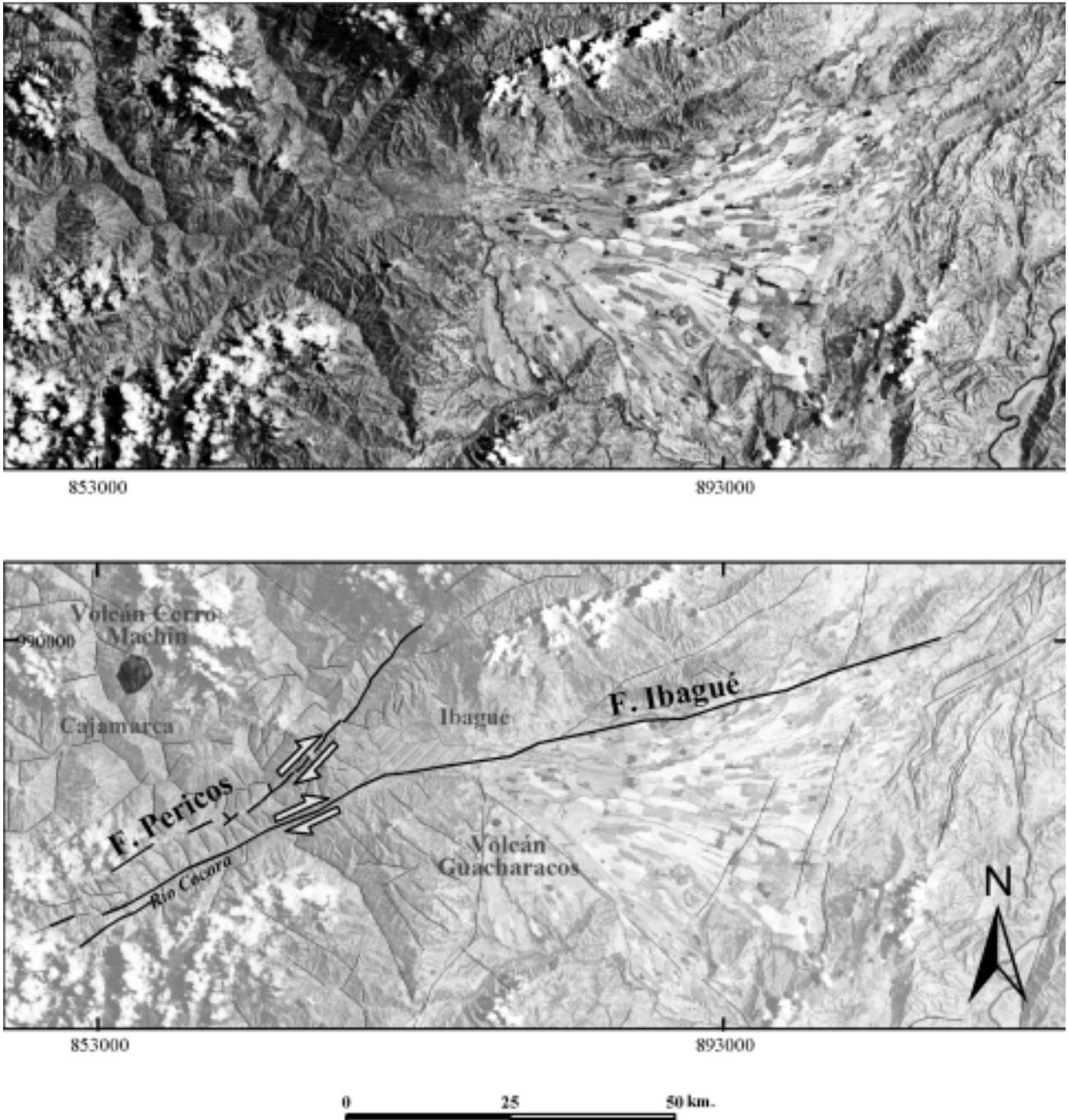


FIGURA 4. Detalle interpretación imagen de satélite Landsat TM, área de Ibagué.

en escala meso (morfoestructuras), se observa el mismo comportamiento de saltos laterales predominantemente a la izquierda, que conforman relevos transpresivos.

La Falla Ibagué desplaza en sentido lateral derecho las principales estructuras de los márgenes occidental y oriental de la Cordillera Central. La Falla Pericos es desplazada aproximadamente 29 km, desde el páramo de Los Gómez, hasta los sitios Chapetón - Pericos al noroccidente de la ciudad de Ibagué. Este valor es muy similar al desplazamiento de la margen oriental de la Cordillera Central donde bordea la parte plana del valle del río Magdalena, al norte de la Falla Ibagué, este borde parece ser controlado por la Falla Mulatos cuya continuación hacia el sur probablemente corresponde con el valle de Rovira. En la intersección de la Falla Ibagué con el trazo oriental de la Falla Pericos y con la falla que delimita el valle de Rovira, se presenta vulcanismo básico cuaternario que puede indicar localmente un ambiente extensivo relacionado con la profundidad del fallamiento y que evidencian estructuras corticales.

En la zona montañosa se ha identificado un arreglo especial desde Ibagué hacia el occidente, donde el trazo principal de la Falla Ibagué se acopla paralelamente con el trazo de la Falla Pericos. En el sector entre las dos fallas paralelas se genera una estructura que muestra un arreglo de fallas paralelas entre sí y ortogonales a los dos planos principales (FIGURA 4). Esta complejidad estructural puede actuar como un freno mecánico a la acción de la Falla Ibagué, que en términos de amenaza sísmica podría representar una zona de acumulación de esfuerzos tectónicos que puede resultar en un sismo de mayor magnitud.

La relación estructural de la Falla Ibagué con respecto a las demás estructuras regionales de dirección NNE, sugiere que la Falla Ibagué actúa como una rampa lateral, que desplaza un bloque cortical de la Cordillera Central en sentido oeste - este, acorta el ancho del valle del Magdalena en este sector y genera en su extremo más oriental la fuente sísmica activa denominada "Fuente Pulí". Esta fuente está ubicada en la intersección de la terminación de la Falla Ibagué con las fallas del sistema Bituima - La Salina, que controlan el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental. El piedemonte oriental de la Cordillera Central entre su intersección con la Falla Ibagué y la población de Mariquita (Tolima), en el norte, parece ser controlado por la Falla Mulatos, el cual se caracteriza por ser rectilíneo y coincidir con los ápices de grandes abanicos cuaternarios como los de Lérica y Venadillo, lo que sugiere un piedemonte activo.

Morfología cuaternaria de la Falla Ibagué

En el estudio morfotectónico de la Falla Ibagué se utilizaron fotografías aéreas multi temporales a diferentes escalas, que permitieron realizar el mapeo detallado de las estructuras y rasgos morfotectónicos asociados con la traza de falla, la interpretación se transfirió a las planchas topográficas en escala 1:10.000 y 1:25.000 para finalmente integrarlo a mapas en escala 1:100.000. Los principales rasgos de actividad neotectónica están desarrollados sobre el Abanico de Ibagué. Este es rasgo geomorfológico de gran extensión que mide en su eje longitudinal aproximadamente 35 km y está constituido por intercalaciones de estratos de origen volcánico y fluviovolcánico, predominantemente de grano muy grueso, provenientes del Nevado del Tolima. El depósito rellena una cuenca tectónica que probablemente es el resultado de la actividad misma de la Falla Ibagué. Marquín (2001), al utilizar sondeos eléctricos verticales y descripción de muestras de zanja de diferentes perforaciones, modela la paleogeografía existente bajo el abanico y realiza un mapa de isópacas, donde se observa que, en general, a lo largo de la Falla Ibagué, el espesor del abanico aumenta hacia el este.

El trayecto de la falla a lo largo del Abanico de Ibagué se muestra regionalmente como un solo trazo, aunque en la fase de campo e interpretación de fotos aéreas, se observaron numerosos y variados rasgos morfotectónicos característicos de fallamiento transcurrente, como lomos de presión lineales, lagos de falla, lomos desplazados, drenajes desplazados, trincheras de falla, escarpes de falla, escarpes de exposición opuesta, entre otros. A escala meso la traza de la falla se caracteriza por presentar un arreglo de cizallas tipo *Riedel* sintéticos dextrales en *echelon* con saltos a la izquierda. Esta geometría resulta en la formación de alrededor de 30 lomos de presión de diferentes tamaños, que oscilan entre 60 m y 1480 m en su eje mayor (FIGURA 5). Esta variedad en el tamaño de los lomos depende de la dimensión del espaciamiento del salto de la falla (FIGURA 6), pero también puede estar relacionada con la diferencia de espesor del abanico, el cual aumenta hacia el este al igual que las dimensiones de los lomos de presión. La forma de varios lomos sugiere el funcionamiento de los *Riedels* ya que muestran una segmentación marcada por lineamientos oblicuos y un contorno indentado acorde al modelo original cinemático de un juego o sucesión de *Riedels* (FIGURA 7).

Algunos de los lomos mayores parecen estar cortados y desplazados por el plano de la falla principal como sucede con el lomo ubicado en la hacienda Calicanto, donde la parte norte de la geofirma está desplazada en sentido

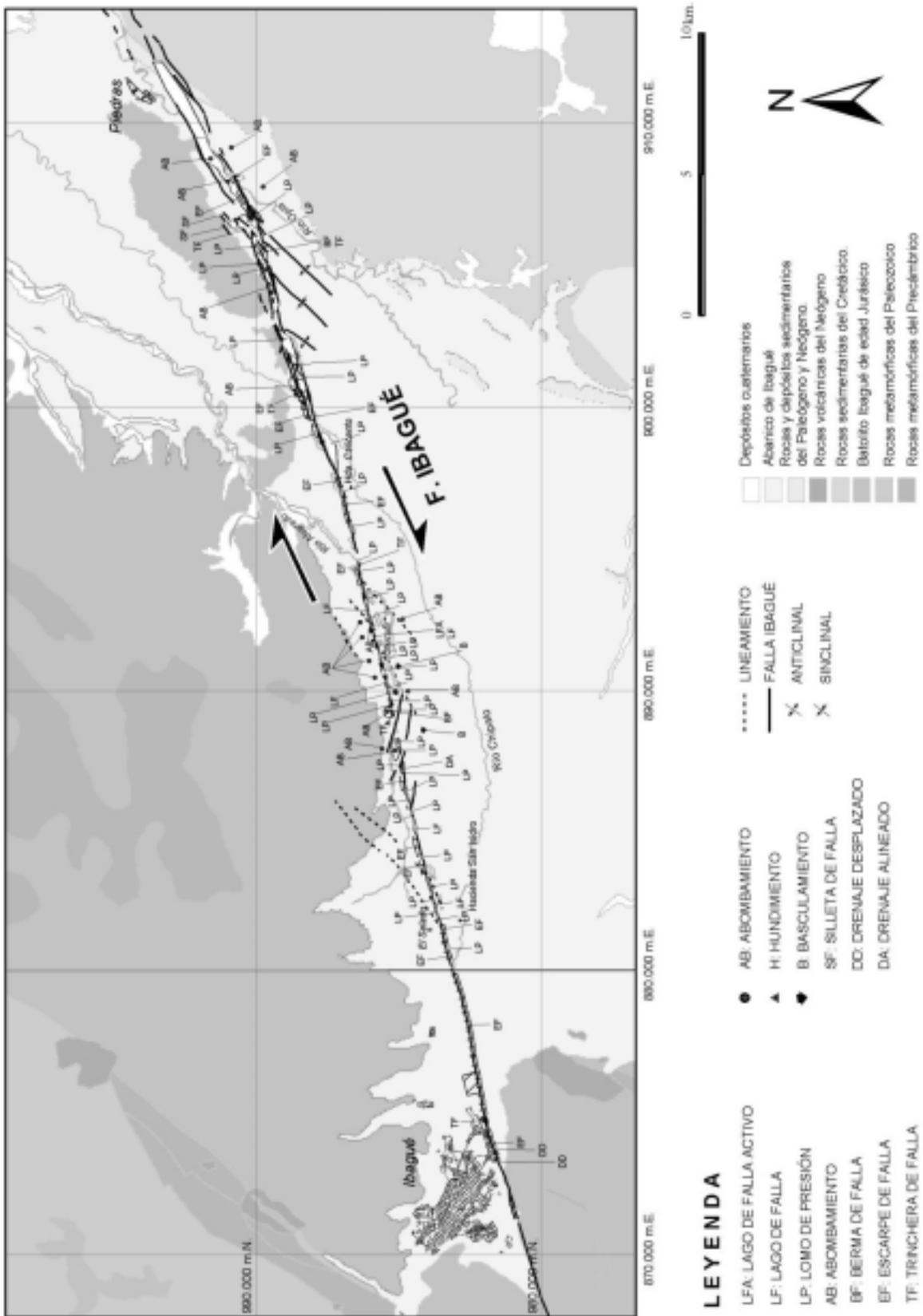


FIGURA 5. Rasgos morfotectónicos y estructuras asociadas con el trazo de la Falla Ibagué

Geometría de la Falla de basamento

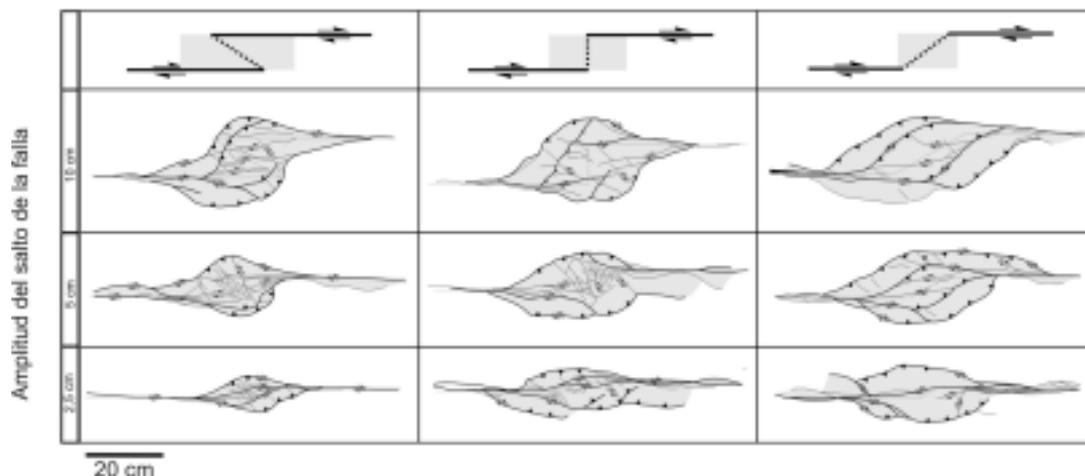


FIGURA 6. Estructuras *pop-up* generadas por saltos compresivos espaciados desde 10 a 2,5 cm. En todos los experimentos el desplazamiento en las fallas maestras de basamento es de 10 cm, el espesor del paquete de arena es de 5 cm (Modificado de McClay & Bonara, 2001).

dextral por aproximadamente 565 metros (FIGURA 8). Al parecer en un estadio tardío de la formación del lomo se presentó un re-arreglo cinemático por el cual la falla principal cortó a los *Riedels* que entonces dejaron de funcionar. De igual manera, el lomo ubicado en la Vereda Chucuní está cortado por un nuevo segmento de la falla que tiende a simplificar el arreglo por medio de un trazo más continuo que une las estructuras en *Riedel*, dispuestas a 22° de la estructura principal.

La gran cantidad de lomos de falla que son tan característicos de la Falla Ibagué contrasta marcadamente con la escasez de lagos de falla (“*sagponds*”) que cuentan no más que 5 comparado con 30 lomos. Esta discrepancia numérica se puede explicar por la cinemática del sistema de *Riedels* dextral en echelon. En la zona de traslape de cada sucesión de *Riedels* se crea un ambiente transpresivo que favorece la formación de lomos de falla. Evidentemente predominan los *Riedels* sintéticos con saltos a la izquierda sobre los saltos de relevo a la derecha, dando como resultado un número mayor de sitios transpresivos (lomos de falla) que localidades transtensivas (cuencas de tracción con lago de falla). Este modelo es idéntico a lo que en escala pequeña se llama “*mole-tracks*” o “*huellas de topo*” frecuentemente observado en deformaciones superficiales generados durante sismos mayores (FUNVISIS, 1997; Philip et al., 1992).

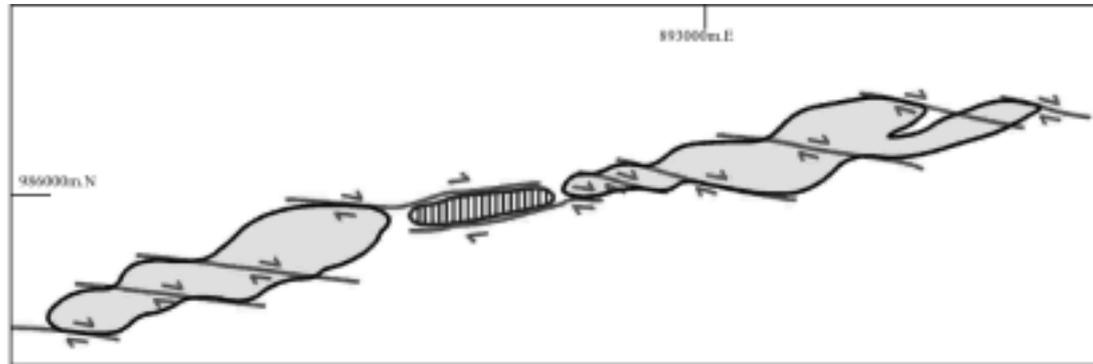
Los lagos de falla en cuencas de tracción (*pull-apart basins*) generados en zonas locales de relevo transtensional, generalmente son considerados como los sitios más promisorios para excavar trincheras paleosismológicas ya

que favorecen la acumulación de sedimentos finos con material orgánico en una secuencia continua. Sin embargo, con frecuencia la erosión regresiva del sistema de drenaje local puede eliminar las evidencias sedimentológicas. También con mucha frecuencia, por tratarse de lagos o depresiones naturales, son objeto de aprovechamiento o intervención antrópica que igualmente lleva a la destrucción de evidencia. Un problema universal con los lagos de falla es el alto nivel freático que hace imposible o difícil su excavación en trinchera. Por lo anterior, aunque los lagos de falla representen sitios muy promisorios, en realidad hay muy pocos que son idóneos para la ubicación de una trinchera paleosismológica.

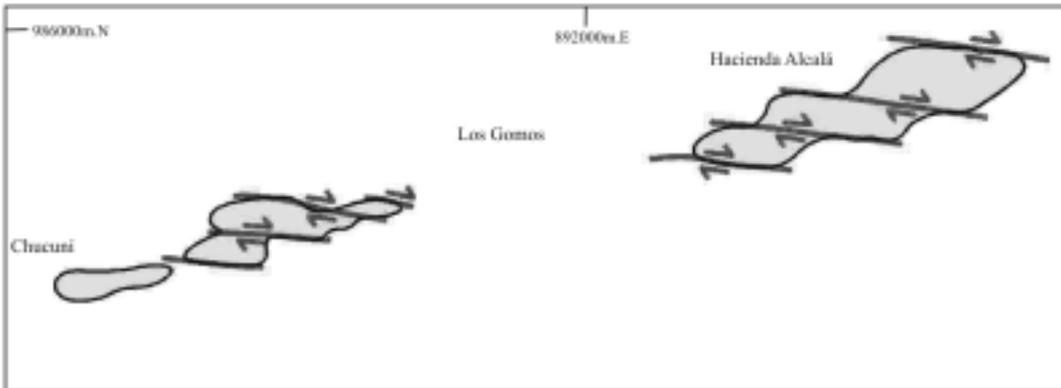
La abundancia de los lomos de falla es la manifestación morfotectónica más destacada de la Falla Ibagué donde atraviesa el Cuaternario del abanico. Sin embargo, se ha notado en varios lugares la presencia de abombamientos en la superficie del abanico que son de mayor envergadura que los lomos. Estos carecen de su linealidad, no se restringen al trazo mismo de la falla y están ubicados a un lado, como sucede en el sector de la Vereda Chucuní. El abombamiento más notorio se encuentra en el sector próximo a la población de Piedras en el extremo más oriental de la falla, el cual se puede interpretar como un lomo de presión clásico. Los otros abombamientos en cercanías de Chucuní son más difíciles de interpretar y posiblemente tienen relación con la proximidad de la cordillera, con el plano de la falla buzando hacia el norte en profundidad y con la presencia de unas fallas paralelas satélites que solo se manifiestan como lineamientos débiles.

La deformación a lo largo de una falla transcurrente como la Falla Ibagué crea condiciones de cizalla simple (“*simple shear*”) dando origen a una extensión en la dirección del eje mayor del elipsoide de deformación y compresión en dirección ortogonal conforme los experimentos y el modelo de *Riedel* (Harding, 1974 y Wilcox et al., 1973) (FIGURA 9). Esto puede dar como resultado la formación de

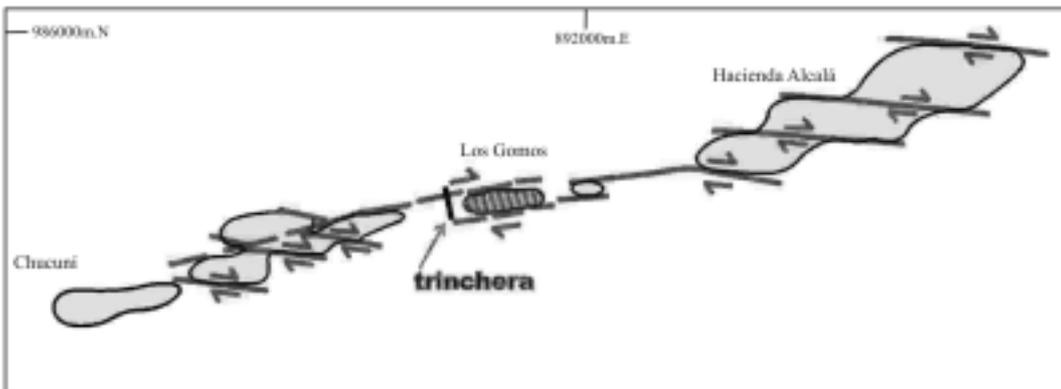
anticlinales y sinclinales con ejes paralelos al eje principal del elipsoide de deformación (Harding, 1974; Wilcox et al., 1973). En varios lugares a lo largo de la Falla Ibagué se ha encontrado evidencia de plegamiento con ejes en un ángulo de aprox. 30° con la traza principal de la falla. Este es el caso entre los ríos Chipalo y Opia donde se observan ondulaciones notables en la superficie del abanico. En el



a.



b.



c.

FIGURA 7. Modelo propuesto para la formación de los lomos de presión, planteado con un juego o sucesión de *Riedels* sintéticos dextrales. a. sitio Hacienda Alcalá. b. sitio Chucuní, situación anterior a la formación de la cuenca. c. Formación de la cuenca en escalón de relevo dextro.

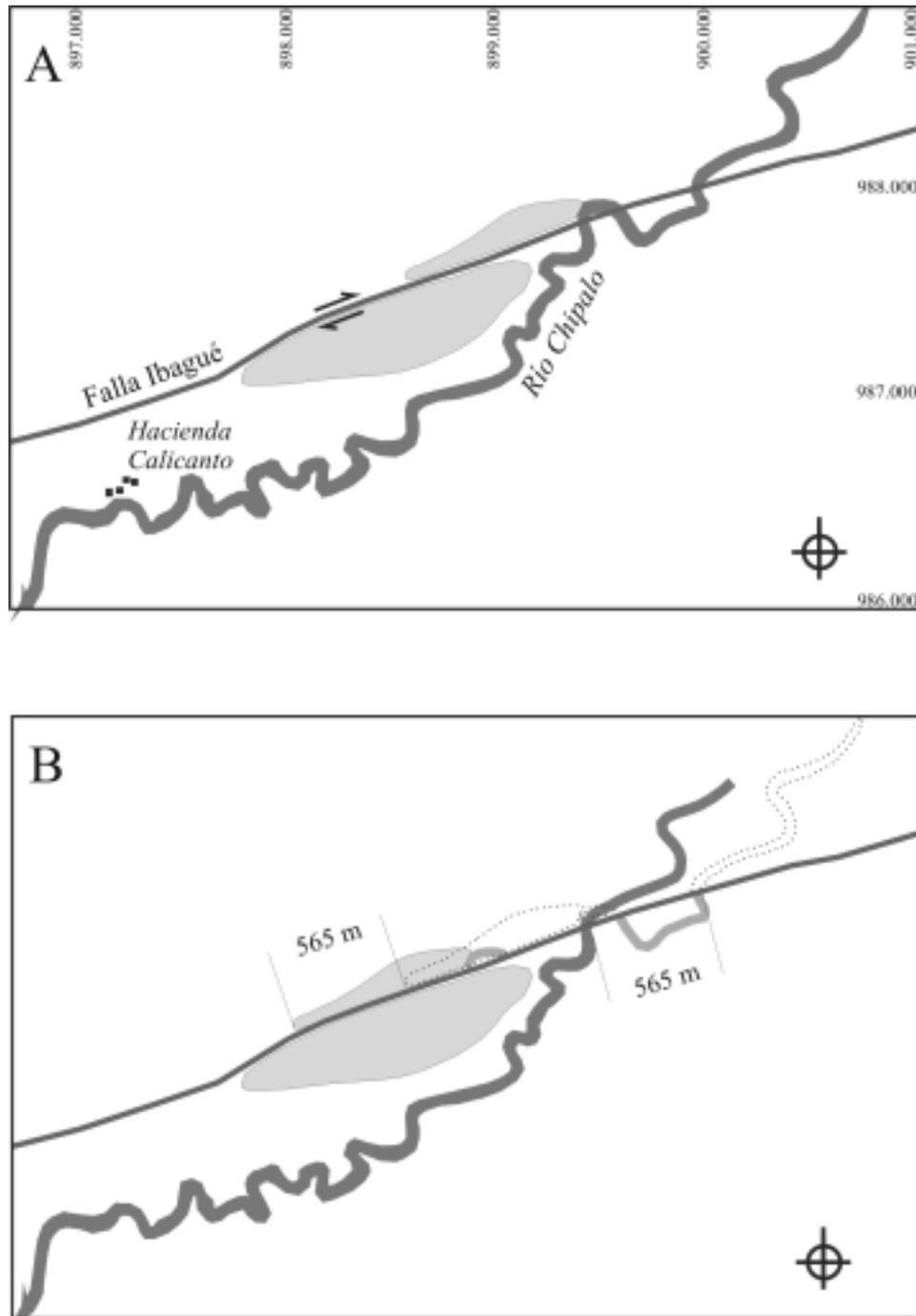


FIGURA 8. A. Geoforma actual del lomo de presión ubicado en la hacienda Calicanto, el cual ha sido cortado y desplazado en sentido dextral por la Falla Ibagué. El cauce del río Chipalo también ha sido afectado por la falla. B. Situación hipotética del lomo de presión en una fase anterior del proceso de actividad de la falla Ibagué, en la cual el lomo y el cauce el río Chipalo aún no han sido desplazados. Obsérvese en color gris los meandros actuales del río Chipalo y la coincidencia del cauce del río al norte y sur de la falla al devolver el desplazamiento dextral inferido, así como la ubicación actual del lomo y del río en trazos punteados. Se calcula un desplazamiento de 565 m.

sector occidental en la propiedad San Isidro directamente al oeste del pueblo El Salado, es notable una depresión ovalada situada parcialmente sobre la traza de la falla, que se puede interpretar como un sinclinal. La presencia de suelos hidromórficos encima de un paleosuelo oxidado es evidencia de deformación reciente.

Además de estas manifestaciones morfotectónicas, es notorio también la presencia de escarpes de falla o escarpes de línea de falla con frentes opuestos que marcan la traza de la falla. Es una característica típica de fallas transcurrentes y su origen es en el desplazamiento horizontal de la topografía y los efectos de erosión que aprovecha el relieve así creado.

MEDICIONES MICROTTECTÓNICAS Y CAMPO DE ESFUERZOS DERIVADO

Durante la etapa de campo se tomaron datos de estrías de falla en depósitos del Abanico de Ibagué en diferentes sitios localizados en la traza de falla (finca Los Gomos y hacienda San Isidro). Estos datos se invirtieron utilizando el software *stress* (Reches, 1996, Versión 2,9) y arrojaron un tensor de esfuerzos local, con esfuerzos máximo horizontal (s1) de dirección $311^{\circ}/18^{\circ} \pm 15^{\circ}$, intermedio (s2) $106^{\circ}/70^{\circ} \pm 15^{\circ}$, mínimo horizontal (s3) $209^{\circ}/4^{\circ} \pm 9^{\circ}$ (FIGURA 10a) y un factor de forma $R=0,62$, que indica un régimen de esfuerzos de tipo transcurrente; resultado que es comparable con la dirección del esfuerzo máximo regional definido para esta zona (Toro-Ramírez & Osorio, esta publicación). Para esta solución se evaluaron los márgenes de confianza de acuerdo con el método *bootstrapping* definido por Michael (1987) y desarrollado en el programa *stress* de Reches (1996), donde se encuentra una solución ideal para una población de fallas teóricas evaluadas en este tensor, y los ángulos críticos de estabilidad para cada componente del tensor (FIGURA 10b). Asimismo, se usaron métodos de análisis poblacional de fallas que utilizan

una aproximación de estabilidad geométrica con el fin de tener un punto de vista diferente para la solución física mecánica definida por el método de Reches.

Se calculó el diagrama de Diedros Rectos, basados en el desarrollo por Angelier & Mechler (1977) que muestra un diedro recto de tipo transcurrente donde el valor propio para el s1 es $310^{\circ}/4^{\circ}$, para s2 $60^{\circ}/79^{\circ}$ y para s3 es $219^{\circ}/11^{\circ}$; solución concordante con la definida por el método de Reches (FIGURAS 10c y 10d). Se calculó la solución de dispersión de los ejes P y T para las estrías medidas con el diagrama de estabilidad de la solución definido por los ángulos máximos de desviación de la solución ideal y la solución particular para cada estría (FIGURA 10e), y se definió el ángulo de correlación crítico Theta en 34° ; así se obtuvieron los ejes P en dirección $306^{\circ}/5^{\circ}$ con un factor de correlación $R=86\%$, T de $211^{\circ}/7^{\circ}$ $R=84\%$, y B de $359^{\circ}/86^{\circ}$ $R=83\%$, que muestra una excelente correlación de todas las estrías para la solución general, que a su vez es muy cercana a las soluciones encontradas por los métodos anteriores.

El diagrama de planos y estrías muestra dos familias típicas (FIGURA 10a); la primera en dirección promedio $110^{\circ}/70^{\circ}$ se caracteriza por ser la más común y presentar movimientos de tipo dextral interpretados como el sistema de *Riedel* sintéticos asociado a la falla principal mientras la segunda en dirección promedio $350^{\circ}/80^{\circ}$ con movimientos de tipo sinistral que han sido asociados como un sistema de *Riedel* antitéticos, comparable con el modelo teórico (Riedel, 1929; Wilcox et al., 1973; Tchalenko, 1968, entre otros), tal como lo ilustra Price & Cosgrove, 1990 (FIGURA 9). Asimismo, es muy característico que se encuentran muy pocas estrías en planos asociados directamente con la geometría de la falla principal, lo que indica que el estilo deformativo del sistema en superficie se basa en las fallas tipo *Riedels* responsables de la formación característica de lomos de presión entre sus saltos a la izquierda. Las fallas antitéticas conforman

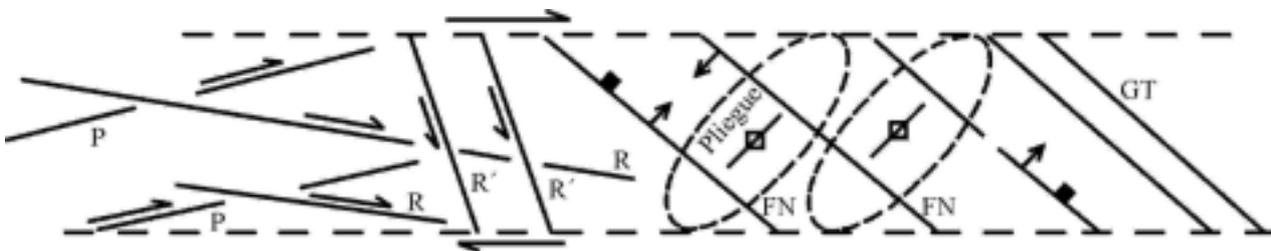


FIGURA 9. Tipos de estructuras secundarias formadas en rocas de cobertera sobre una falla principal rumbo deslizante lateral derecho en el basamento, producidas por cizalla simple. R: cizalla Riedel sintética, R': cizalla Riedel antitética P: estructuras P, FN: Falla normal, GT: Grieta de Tensión (modificado de Price & Cosgrove, 1990).

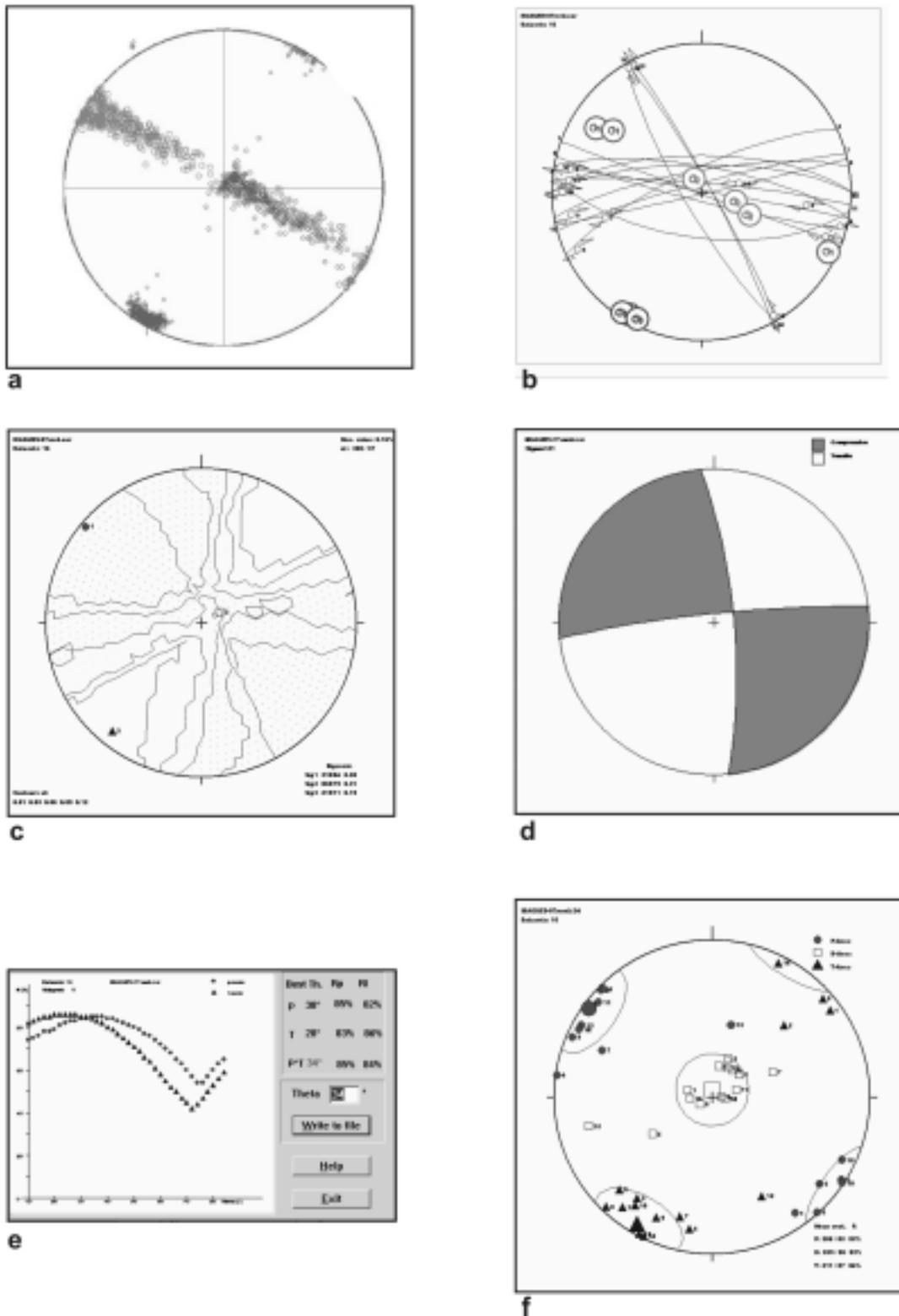


FIGURA 10. Diagrama de esfuerzos resultante de la inversión de estrías medidas en la Falla Ibagué. **b.** Diagrama de dispersión para la solución de inversión, para las figuras a y b. se utilizó el método de Reches, 1996. **c.** Diagrama de diedros rectos calculado en base al desarrollo de Angelier & Mechler (1977). **d.** Representación con sombras del diedro recto. **e.** Diagrama de estabilidad geométrica de la dispersión de los ejes P y T calculado con el *software Tectonicsfp*. **f.** Diagrama de dispersión de ejes P y T.

estructuras abiertas como grietas de relajación que posteriormente son rellenas con material. Por lo tanto, estas fallas se pueden convertir en estructuras importantes para desarrollar estudios paleosísmicos, ya que allí queda preservado el vestigio de un evento sísmico instantáneo asociado a todo el sistema.

SELECCIÓN DEL SITIO DE TRINCHERA DE EXPLORACIÓN PALEOSISMOLÓGICA

Con base en la cartografía elaborada de las diferentes estructuras y geformas asociadas a la Falla Ibagué, se definieron los sitios más favorables y se llevó a cabo una campaña de campo para evaluar los sitios identificados previamente. Para esta labor se tuvo en cuenta las principales condiciones que se deben cumplir para hacer factible y provechosa la excavación de una trinchera paleosismológica. Reconociendo que algunas de estas condiciones pueden variar en ambientes geográficos distintos, se aprovecha aquí la experiencia de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) en el ambiente morfoclimático andino (Audemard, 2003; Audemard, 2004). Se destacan los siguientes criterios principales:

- La geometría de la traza de falla debe ser lo más simple posible y se debe tener la mayor probabilidad de que la trinchera corte el trazo de la falla que se está investigando.
- Debe ser un sitio de continua sedimentación donde haya acumulación de sedimentos finos y orgánicos datables.
- No debe tener erosión natural ni intervención antrópica, lo cual asegura que no haya pérdida de registros y, por consiguiente, que la historia paleosismológica esté completa.
- La longitud de la trinchera es proporcional con la longitud de los rasgos morfotectónicos. Si el rasgo es muy grande, la trinchera, por ende, será de mucha longitud y los costos se elevarán.
- El nivel freático no debe estar muy somero, ya que la acumulación de agua en la trinchera puede afectar la estabilidad de las paredes y dificultar las labores de excavación.
- Debe haber buen acceso al sitio para permitir la entrada y la operación de la maquinaria.

- El rasgo morfotectónico a excavar no debe involucrar infraestructura que no se pueda afectar; es decir, carreteras, canales de riego, entre otros.
- Por último, se debe contar con los permisos necesarios de las autoridades y propietarios del terreno para ejecutar la excavación.

Evidentemente es muy excepcional encontrar en cualquier falla activa un sitio que cumpla con todos estos criterios. Entonces hay que conciliar entre los aspectos positivos y negativos de cada sitio y llegar a una ponderación de todas las condiciones actualmente encontradas. Por eso es recomendable hacer un listado de todas las condiciones presentes en los sitios indicados que permita hacer una comparación que sirva como base para elaborar una categorización prioritaria de los sitios potenciales para trinchera. Para la Falla Ibagué el listado de sitios para trinchera se presenta en la TABLA 1.

Durante la campaña de campo en la cual se visitaron y analizaron todas las posibilidades, se seleccionaron siete lugares potenciales para la ejecución de la trinchera (FIGURA 11). En la TABLA 1 se presentan sitios que podrían funcionar para la apertura de la trinchera, se enumeran las ventajas y desventajas, y se hacen las recomendaciones previas a la excavación de la trinchera, que ayudarán a descartar o elegir con más certeza el sitio.

Al concluir la campaña de campo se concluye que aunque la Falla Ibagué tiene un número tan extraordinario de evidencias morfotectónicas, el análisis *in situ* proporciona pocos sitios idóneos para trinchera. Esto se debe en gran parte a la presencia dominante en todo el abanico de materiales muy gruesos, producto de los flujos volcánico-clásticos depositados en eventos catastróficos. Este grosor de material dificulta el estudio paleosismológico, reduciendo la visibilidad de los disturbios co-sísmicos en los sedimentos y reduce la posibilidad de encontrar materiales datables, además de constituir un problema para la excavación misma.

Finalmente, se tomó la decisión de realizar la trinchera de exploración paleosismológica en el sitio denominado Los Gomos, el cual se caracteriza por presentar una colección de lomos y un lago de falla activo que representa el mejor sitio de preservación de una columna continua de sedimentación con materiales orgánicos. Evidentemente el lago no ha sufrido intervención antrópica ni erosión natural y además, al parecer cubrió un área mayor previamente, es decir que la extensión del cuerpo de agua se ha disminuido naturalmente; esta condición favorece la

TABLA 1. Resumen de los sitios potenciales para la ejecución de una trinchera paleosísmica en la Falla Ibagué.

SELECCIÓN DE SITIO DE TRINCHERA PALEOSÍSMICA EN LA FALLA IBAGUÉ, ENTRE IBAGUÉ Y PIEDRAS						
Prioridad de excavación	Nombre de la trinchera	Localización	Propiedad	Ventajas del sitio	Desventajas del sitio	Recomendaciones pretrinchera
2?	La Ceibita Este	Al norte de la casa principal de la hacienda La Ceibita	- Privado, hacienda La Ceibita. - Campo de arroz activo	- Trinchera de falla estrecha a lo largo de la cizalla <i>Riedel</i> . - Sedimentos lacustres orgánicos finos.	- Trinchera muy superficial, en prueba de barreno los depósitos gruesos del abanico parecen estar muy superficiales. - Tabla de agua superficial.*	- Excavación de un pequeño apique (1,5x1,5x1,5 m ³) que indique el espesor y contenido orgánico de los depósitos de lago.
2? (Complementaria)	Chucuní	Al oeste del caserío Chucuní, en el tope de un lomo elongado E-W	- Privado. - Colina utilizada para pastoreo.	- Trinchera de falla estrecha a lo largo de la cizalla <i>Riedel</i> , rellena con sedimentos generados por la erosión de lomos de presión adyacentes.	- Los depósitos del Abanico de Ibagué podrían estar muy superficiales.	- Excavación de una corta (menor de 12 metros de longitud) y superficial zanja podría ayudar en la decisión final.
2?	Los Gomos	Hacienda Los Gomos entre Chucuní y la hacienda Los Alcalá	- Privado	- Cuña oeste de un lago de falla activo que podría asegurar la presencia de materiales finos, estratificados y datables.	- Mejor lugar estaría dentro del bosque, por lo que se requeriría gran deforestación en terreno privado. - Cuerpo de agua de 0,5 m de profundidad.*	
1?	Alcalá	Hacienda Alcalá	- Privado	- Cuña este del mismo lago de falla activo que podría asegurar la presencia de materiales finos, estratificados y datables. - los depósitos lacustres podrían estar interestratificados con depósitos generados por erosión de lomos de presión adyacentes.	- Cuerpo de agua de 0,5 m de profundidad.*	- Excelente lugar si se pudiera mantener seco, se podría evaluar las posibilidades de drenar el lago. - Podría ser visitada en época de verano para ver si el lago se seca, como lo aseguran los habitantes del lugar.
3	Modelía	Al este del Salado, en las inmediaciones del Barrio Modelía	Comunidad	- Sin perturbación - Sedimentos finos - Lago de falla seco - Sitio muy accesible - Seguro (dentro de un barrio)	- Longitud de la trinchera muy larga (aproximadamente 120m), por lo ancho del lago. - Tabla de agua superficial.* - Permiso de la comunidad.	- Un pequeño apique (1,5x1,5x1,5 m ³) que indique el espesor y contenido orgánico de los depósitos lacustres.
1 (complementario)	La Trinchera San Isidro	Al oeste de la hacienda San Isidro	- Privado, hacienda San Isidro - utilizado para criadero de toros de casta	- La trinchera ya está excavada y corresponde a una antigua acequia. - El afloramiento expuesto es muy largo - Claramente fallado, excelente para estación microtectónica - Contraste de sedimentos desde muy finos a muy gruesos - Sedimentos más jóvenes pueden estar interrumpidos y son potencialmente datables (¹⁴ C)	- el afloramiento tiene abundante vegetación - Materiales poco datables, excepto para los del tope.	- Limpieza del afloramiento completo o al menos 50 metros a partir de la zona de falla reportada.
1	La Ceibita Oeste	Oeste de la casa principal de la hacienda La Ceibita	- Privado, hacienda La Ceibita - Campo activo de cultivo de arroz	- Plano de falla identificado en dos acequias paralelas a la carretera, que cortan el escarpe de falla en forma de S. - Cuña coluvial observada - Materiales datables	- Trinchera superficial, ya que el depósito del abanico está a menos de 1,5 m de profundidad. - Determinación de pocos, últimos terremotos. - Tabla de agua superficial.*	

* El trabajo de campo se realizó en abril del 2003 después y durante varios días de lluvia, las cuales seguramente elevaron la tabla de agua.

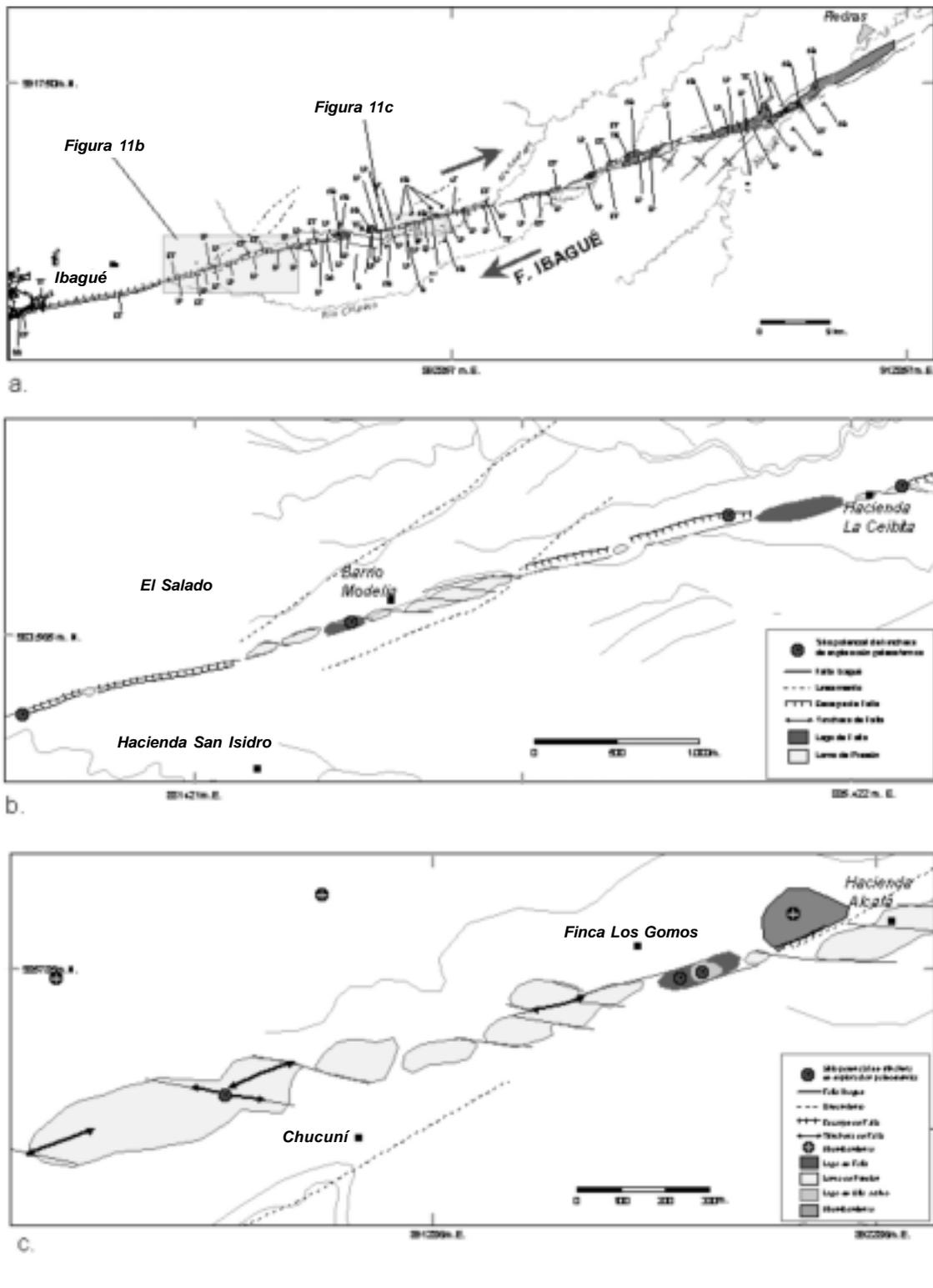


FIGURA 11. Rasgos morfotectónicos asociados con el trazo de la Falla Ibagué, las áreas sombreadas corresponden a las figuras 11b y 11c. b. Ubicación de los sitios potenciales de trinchera relacionados en la TABLA 1, de oeste a este, como: La trinchera San Isidro, Modelia, La Ceibita oeste y La Ceibita este. c. Ubicación de los sitios potenciales de trinchera relacionados en la TABLA 1, de oeste a este, como: Chucuní, Los Gomos y Alcalá.

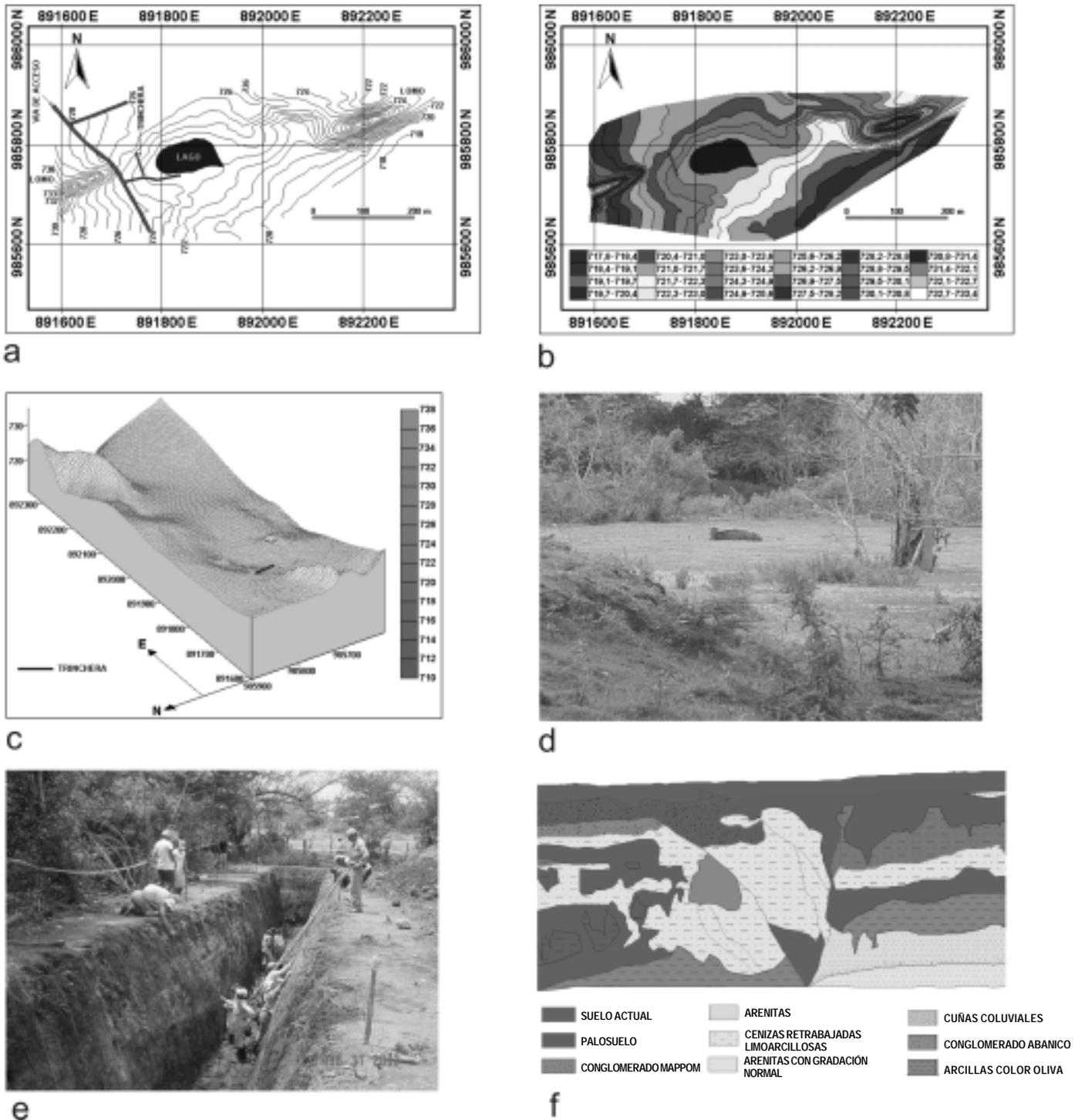


FIGURA 12. a. Mapa topográfico del terreno donde se construyó la trinchera de exploración paleosísmica de la Falla Ibagué, finca Los Gomos. b. Mapa ipsométrico del terreno donde se excavó la trinchera. c. Modelo digital de terreno de la trinchera y sus alrededores visto desde el noroeste (las figuras a, b y c son tomadas de Ordóñez & Mora, 2003). d. vista desde el norte del lago de falla activo. e. Trinchera de exploración paleosísmica vista desde el norte. f. Detalle del registro de la pared este donde se observa la estructura de la Falla Ibagué y la secuencia de deposición del lago de falla afectado.

ubicación de la trinchera ya que facilita la intersección de los sedimentos lagunares sin mayor peligro de encontrar el nivel freático. La formación del lago se estuvo controlada por un salto de relevo dextral de la falla. En campo se observa una línea de arboles que marca el sitio donde la fotointerpretación había proyectado un lineamiento de falla.

Aunque en el análisis inicial este sitio se catalogó con prioridad 2 por la presencia de bosque (TABLA 1), la observación detallada de campo permitió darle más peso a los argumentos geológicos y se reevaluaron las desventajas de su ubicación, ya que si bien el nivel freático podría ser alto, las condiciones climáticas secas disminuían el riesgo de afectación a la trinchera y, además, los habitantes de la zona aportaron criterios para reconsiderar el costo ambiental por la deforestación ya que la trinchera se localizaría hacia el borde del bosque y se trata de una vegetación arbustiva de rápido crecimiento. También, hubo coincidencia con la voluntad del propietario de la finca Los Gomos para hacer una readecuación en esta parte del terreno para su aprovechamiento agropecuario.

El sitio de trinchera corresponde a la zona oeste de dicho lago de falla a media distancia al próximo lomo de falla (FIGURA 12). Esta localización trata de minimizar tanto la presencia de material grueso derivado del lomo cercano como el riesgo de encontrar un nivel freático elevado. Se programó una trinchera de unas dimensiones de 50 m de largo, 3,5 de ancho y entre 3 y 5 m de profundidad; estas dimensiones garantizaron la visualización de la traza principal de la falla y de la secuencia de sedimentos completa incluido el abanico subyacente. La selección cuidadosa del sitio se tradujo en la apertura de una trinchera de exploración paleosismológica exitosa, cuyo estudio permitió caracterizar y determinar el potencial sismogénico de la Falla Ibagué, identificando alrededor de 10 eventos sísmicos.

Como parte de la verificación del campo y con el fin de lograr una ubicación exacta de la traza de falla en el sitio seleccionado para la trinchera, se realizó un detallado levantamiento topográfico (microtopografía), para lo cual se usó un teodolito tipo distanciómetro electrónico (EDM: *electronic distance measuring*) comúnmente conocido como “estación total” (*total station*). Esto facilita producir un mapa topográfico muy detallado con curvas de nivel estrechamente espaciadas que realza la morfología del terreno y a su vez permite una más precisa ubicación de la(s) falla(s), un mejor análisis de la morfotectónica local, el grado y el control tectónico del drenaje. Este análisis brinda mejores posibilidades para una interpretación cinemática y paleosismológica. En el caso del sitio de

trinchera en la Falla Ibagué, denominado Los Gomos se adelantó tal levantamiento por parte de Ordoñez & Mora (2003) (FIGURA 12 a y b).

DISCUSIÓN

La evaluación de la amenaza sísmica en países como Colombia tiene limitaciones por lo reciente de la instalación y la validación de la sismicidad instrumental y, además, por la escasez o la falta de documentos que permitan estudios detallados y completos de sismicidad histórica. Esto significa que la ventana de observación de los fenómenos sísmicos se debe ampliar con base en los estudios de paleosismología, geomorfología y geología que involucren, además del Reciente, el Pleistoceno y el Neógeno, especialmente si se tiene en cuenta que los grandes terremotos usualmente tienen un período de retorno superior a la historia escrita.

Los resultados de los estudios de paleosismología han sido utilizados para reevaluar la amenaza sísmica en zonas tectónicamente complejas y activas como Los Andes del Norte, sin embargo, en Colombia estos estudios apenas comienzan a considerarse. La experiencia de otros países ha demostrado que el éxito de un estudio paleosismológico depende de la ubicación del sitio de trinchera. De ahí la importancia de que el análisis geológico y geomorfológico de la falla se haga previamente a la excavación de una trinchera mediante un levantamiento neotectónico detallado.

En el caso de la Falla Ibagué se demostró que la metodología aplicada en este estudio fue la adecuada para conseguir un excelente sitio de trinchera, donde con éxito pudo ser caracterizado el potencial sismogénico de la Falla Ibagué (FIGURA 10f). Cada paso del estudio conllevó a una fase siguiente más consolidada: la interpretación de imágenes de satélite para el análisis del comportamiento regional de la falla, el uso de fotografías aéreas y su aplicación para identificar los rasgos morfológicos en los depósitos cuaternarios y su mapeo detallado, la posterior observación de estos rasgos en campo, así como las mediciones de microtectónica en sitios identificados y su procesamiento con el apoyo de *software*. Cada una de estas fases y su integración permitió caracterizar la cinemática de la falla y entender su comportamiento reflejado en los trazos cartografiados (*Riedels* sintéticos y antitéticos, pliegues, lomos de presión y lagos de falla); y con base en ello, tener varias opciones para ubicar el sitio de trinchera cuya localización definitiva se hizo tras la evaluación detallada de campo.

CONCLUSIONES

- La Falla Ibagué es una falla transcurrente (*strike-slip*) y actúa también como una rampa lateral, que desplaza un bloque cortical de la Cordillera Central en sentido oeste este y desplaza en sentido lateral derecho las principales estructuras entre las márgenes occidental y oriental de la Cordillera Central.
- La continuidad de la Falla Ibagué desde el valle del río Cauca y a través de la Cordillera Central se interpreta en la imagen Landsat como una serie de segmentos rectos con saltos laterales a la izquierda hasta definir el trazo regional más oriental de mayor longitud.
- En el trayecto de la falla a lo largo del Abanico de Ibagué se observan numerosos y variados rasgos morfotectónicos característicos de fallamiento transcurrente dextral; en esta zona la geometría de la falla se caracteriza principalmente por presentar un arreglo de *Riedels* dextrales en *echelón* con saltos a la izquierda. Este modelo de deformación explica el gran número de lomos de falla que son tan característicos de la Falla Ibagué en el sector donde atraviesa el abanico.
- La inversión de los datos de las estrías de falla arrojaron un tensor de esfuerzos local, con esfuerzos (σ_1) horizontal de dirección $311^\circ/18^\circ \pm 15^\circ$, (σ_2) vertical y un factor de forma $R=0,62$, lo que indica un régimen de esfuerzos de tipo transcurrente.
- El sitio escogido para la apertura de trinchera fue el lago de falla ubicado en la finca Los Gomos, el cual ofrecía todas las garantías morfológicas y logísticas para el éxito del estudio.
- La selección cuidadosa del sitio de trinchera se tradujo en la apertura de una trinchera de exploración paleosísmológica exitosa, cuyo estudio permitirá caracterizar y determinar el potencial sismogénico de la Falla Ibagué.

REFERENCIAS

- Acosta, J. (2002). Structure, tectonics and 3D models of the western foothills of the eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Ingeominas, Bogotá, Publicación Especial N° 25.
- Angelier, J., Mechler, P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également

utilisable en tectonique et enséismologie: la methode des diédres droits. – *Bull. Soc. Géol. France*, Paris, Vol. VII, 19, pp. 1309-1318.

Arcila, M., Muñoz, A., De Vicente, G. (2002). Análisis sismotectónico de la convergencia Caribe, Nazca y Suramérica. Primer simposio colombiano de sismología. Ingeominas, Bogotá.

Audemard, F. A., (1993). Néotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (système de failles d'Oca-Ancón). *Thèse Doctorat Université Montpellier II. Inédito*, 369 p.

Audemard, F. A., (1998). Evolution Géodynamique de la Façade Nord Sud-américaine: Nouveaux apports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Vénézuéla. *XIV Caribbean Geological Conference, Port of Spain, Trinidad, 1995*. Vol. 2, pp. 327-340.

Audemard, F. A., (2003). Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quaternary International* 101-102C, pp. 43-65.

Audemard, F. A., (2004). Paleoseismology in Venezuela: objectives, methods, applications, limitations and perspectives. *Tectonophysics (in press)*.

Audemard, F. E., Audemard, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, Vol. 345(1-4), pp. 299-327.

Audemard, F. A., Singer, A. (1996). Active Fault Recognition in Northwestern Venezuela and its Seismogenic Characterization: Neotectonic and Paleoseismic approach. In: Enghdal, E.R., Castano, J. & Berrocal, J. (eds.), Proceedings of the 1994 Regional Seismological Assembly in South America. *Geofísica Internacional; México*, Vol. 35(3), pp. 245-255.

Audemard, F. A., Singer, A. (1994). Parámetros sismotectónicos para fines de evaluación de la amenaza sísmica en el noroccidente de Venezuela. *VII Congreso Venezolano de Geofísica*, pp. 51-56.

Diederix, H., Gómez, H., Khobzi, J., Singer, A. (1987). Indicios neotectónicos de la Falla de Ibagué en el sector Ibagué-Piedras, departamento del Tolima, Colombia. *Revista CIAF*, Bogotá, Vol. 11 (1-3), pp. 242-252.

- Funvisis. (1997). Evaluación preliminar del sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1997, Estado de Sucre, Venezuela.
- Harding, T. P. (1974). Petroleum traps associated with wrench faults. *AAPG Bull.* Vol. 58-7, pp. 1290-1304.
- Ingeominas. (1997). Atlas Geológico digital de Colombia (versión 1). Escala 1:500.000.
- Lobo-Guerrero, A. (1974). Notas sobre la Falla de Ibagué, Ingeominas, Ibagué (informe interno).
- Marquínez, G. (2001). Modelamiento del abanico de Ibagué con métodos geofísicos, implicaciones hidrogeológicas y estructurales, Departamento de Tolima, Colombia. Memorias VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales.
- McCalpin, J.P. (1996). *Paleosismology*, Academic Press, 497 p.
- McClay, K., Bonara, M. (2001). Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG bulletin*, Vol. 85, N°2, pp 233-260.
- Michel, A. J. (1987). Determination of stress from slip data: Faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89.
- Mosquera, D., Núñez, A., Vesga, J. (1982). Mapa geológico preliminar de la plancha 244-Ibagué. Ingeominas, 1:100.000, Bogotá.
- Murcia, A., Vergara, H. (1987). Riesgos geológicos potenciales en la ciudad de Ibagué, departamento del Tolima, Colombia. *Revista CIAF*, Bogotá, Vol. 11 (1-3), pp. 330-345.
- Ordóñez, M., Mora, H. (2003). Levantamiento topográfico de trinchera construida sobre la Falla Geológica de Ibagué, Departamento del Tolima, Colombia. Informe interno, Ingeominas, Centro Operativo regional Manizales.
- Pérez, H. (1979). Algunos conceptos sobre la Falla de Ibagué. Ingeominas, Ibagué, Carta técnica 87, p. 10.
- Philip, H., Rogozhin, E., Cisternas, A., Bousquet, J. C., Borisov, B., Karakhanian, A. (1992). The Armenian earthquake of 1988, Dec. 7: faulting and folding, neotectonics and paleoseismicity. *Geophys. J. Int.* 110, pp. 141-158.
- Price, N. J., Cosgrove, J. W. (1990). *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press. Londres, 153 p.
- Raasveldt, H., Carvajal, J. (1956). Mapa geológico de la plancha L-9, Girardot. *Inst. Geol. Nal.* 1:200.000, Bogotá.
- Reches, Z. (1996). Simulation of earthquake distribution in time and space along a heterogeneous 2D fault, EOS, Fall Meeting.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zbl. Miner. Geol. Palaeont.*, B354.
- Tchalenko, J. S. (1968). The evolution of kink bands and the development of compression textures in sheared clays. *Tectonophysics*, Vol. 6, pp.159-74.
- Toro-Ramírez, A., Osorio, J. (Esta publicación). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de Los andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Ingeominas, Bogotá.
- Vergara, H. (1989). Actividad neotectónica de la Falla de Ibagué, Colombia, memorias V Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Tomo I, pp.147-167.
- Wilcox, R.E., Harding, T.P., Seely, D.R. (1973). Basic wrench tectonics. *AAPG Bull.* Vol. 57-1, pp. 74 – 96.

Trabajo recibido: julio 16 de 2004

Trabajo aceptado: septiembre 6 de 2004