

## ¿Fallamiento activo en la Cordillera Oriental al suroeste de Bogotá, Colombia?

*Is there active faulting in the Eastern Cordillera southwest of Bogotá, Colombia?*

Angela Olaya<sup>1</sup>, Cristina Dimaté<sup>2</sup>, & Kim Robertson<sup>3</sup>

<sup>1</sup>angela@enovaresources.com, Depto. de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

<sup>2</sup>mcdimatec@unal.edu.co, Depto. de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

<sup>3</sup>grobertsonk@unal.edu.co, Depto. de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

---

Olaya Angela, Dimaté Cristina & Robertson Kim, (2010): ¿Fallamiento activo en la Cordillera Oriental al suroeste de Bogotá, Colombia?. [Is there active faulting in the Eastern Cordillera southwest of Bogotá, Colombia?]. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 35, pp. 58-73. Bogotá, Colombia.

---

**Artículo de Investigación Científica** Manuscrito recibido: 10 de junio de 2010; aceptado: 4 de octubre de 2010.

### RESUMEN

En la zona axial de la Cordillera Oriental, al suroeste de Bogotá, se encuentran varios lineamientos asociados con actividad neotectónica según algunos autores. Entre estos se destaca el conocido como Falla la Cajita, localizada sobre el flanco occidental del Macizo de Sumapaz que ha sido señalada como falla activa con sismo histórico asociado y, por lo tanto, de gran importancia para la amenaza sísmica de Bogotá. En contraste, los registros de sismicidad de la Red Sismológica Nacional muestran muy escasa actividad sísmica en el área del lineamiento.

Mediante un estudio geomorfológico a partir de fotografías aéreas, observaciones de campo y revisión de los registros de actividad sísmica histórica e instrumental en el área, se analizaron los indicios morfotectónicos y sismológicos del Lineamiento la Cajita con el fin de caracterizar su actividad reciente. La fotointerpretación geomorfológica destaca una deformación notoria -localizada sólo en el sector de la Laguna la Cajita y la Laguna Cajones- y la ausencia de evidencias morfotectónicas en el tramo norte de la Laguna del Alar. La interpretación de las observaciones geomorfológicas apoya la hipótesis de un sistema masivo de deslizamiento con componente rotacional en el sector la Cajita - Cajones. Este proceso de remoción en masa estaría favorecido por la fuerte pendiente del terreno, los cambios litológicos y la presencia de una zona de alta precipitación que ha generado aportes masivos hacia el cono torrencial de Pasca – Fusagasugá durante el Cuaternario. El análisis de los datos sismológicos sugiere que los eventos más significativos en la zona del Páramo de Sumapaz están asociados con focos localizados más al sureste de la capital y no con el Lineamiento de la Cajita. De acuerdo con este análisis, se concluye que los indicios de deformación en algunos sectores del Lineamiento de la Cajita no corresponden a una actividad neotectónica relacionada con un falla activa sino con un sistema masivo de deslizamientos.

**Palabras clave:** Geomorfología, Morfotectónica, Neotectónica, Sismología, Falla la Cajita, Bogotá, Colombia.

## ABSTRACT

Along the axes of the Eastern Cordillera, southwest of Bogotá, Colombia, several tectonic lineaments with neotectonic activity, according to some authors, have been reported. Among these lineaments, the La Cajita fault, located along the western flank of the Sumapaz Massif, has been identified as an active fault system with historic seismic activity associated and thus of great importance for the seismic risk of the city of Bogotá. By contrast, seismicity of the region recorded by the National Seismic Network suggests little activity in the area of La Cajitas Lineament.

To reevaluate the neotectonic potential of this fault, the geomorphic expression of the lineament was reinterpreted using aerial photography in combination with detailed field observations. At the same time, seismic activity was reviewed in detail to determine historical activity along this geological system. Photointerpretation highlights a system of linear fractures in the southern sector of La Cajita – Cajones and the absence of similar morphotectonic structures in the northern sector of Alar. Morphotectonic interpretation based on geomorphology and the absence of structural evidence suggest a massive landslide with a rotational component hypothesis in La Cajita – Cajones sector. This process of mass wasting is provoked by steep slopes, weak bedrock and a zone of high precipitation that has produced the Pasca-Fusagasugá torrential cone during the Quaternary. Seismologic data analysis indicates that major seismic events at the Páramo de Sumapaz sector have epicentres to the southeast of Bogotá and do not correlate well with La Cajita Lineament. According to this analysis, evidence of recent deformation along La Cajita Lineament does not correspond to neotectonic activity associated with an active fault zone but rather with a massive landslide system.

**Key words:** Geomorphology, Morphotectonics, Neotectonics, Seismology, La Cajita Fault, Bogotá, Colombia.

## Introducción

En la zona axial de la Cordillera Oriental al suroeste de la ciudad de Bogotá, (Fig. 1) se ha cartografiado la Falla de la Cajita (Acosta & Hernández, 2000); esta falla se ha señalado como una falla activa y se le ha asignado una magnitud máxima probable (MMP) de 6.4; además se ha sugerido que un sismo histórico está asociado al movimiento de esta falla (Vergara *et al.*, 1996; Mendivelso *et al.*, 2007). Debido a la cercanía del trazo de la falla a la ciudad, a importantes obras de infraestructura aledañas y con el fin de avanzar hacia la cuantificación de su movimiento reciente, se ha considerado importante profundizar en los aspectos que se han sugerido como indicativos de actividad reciente, específicamente en las observaciones neotectónicas y sismológicas.

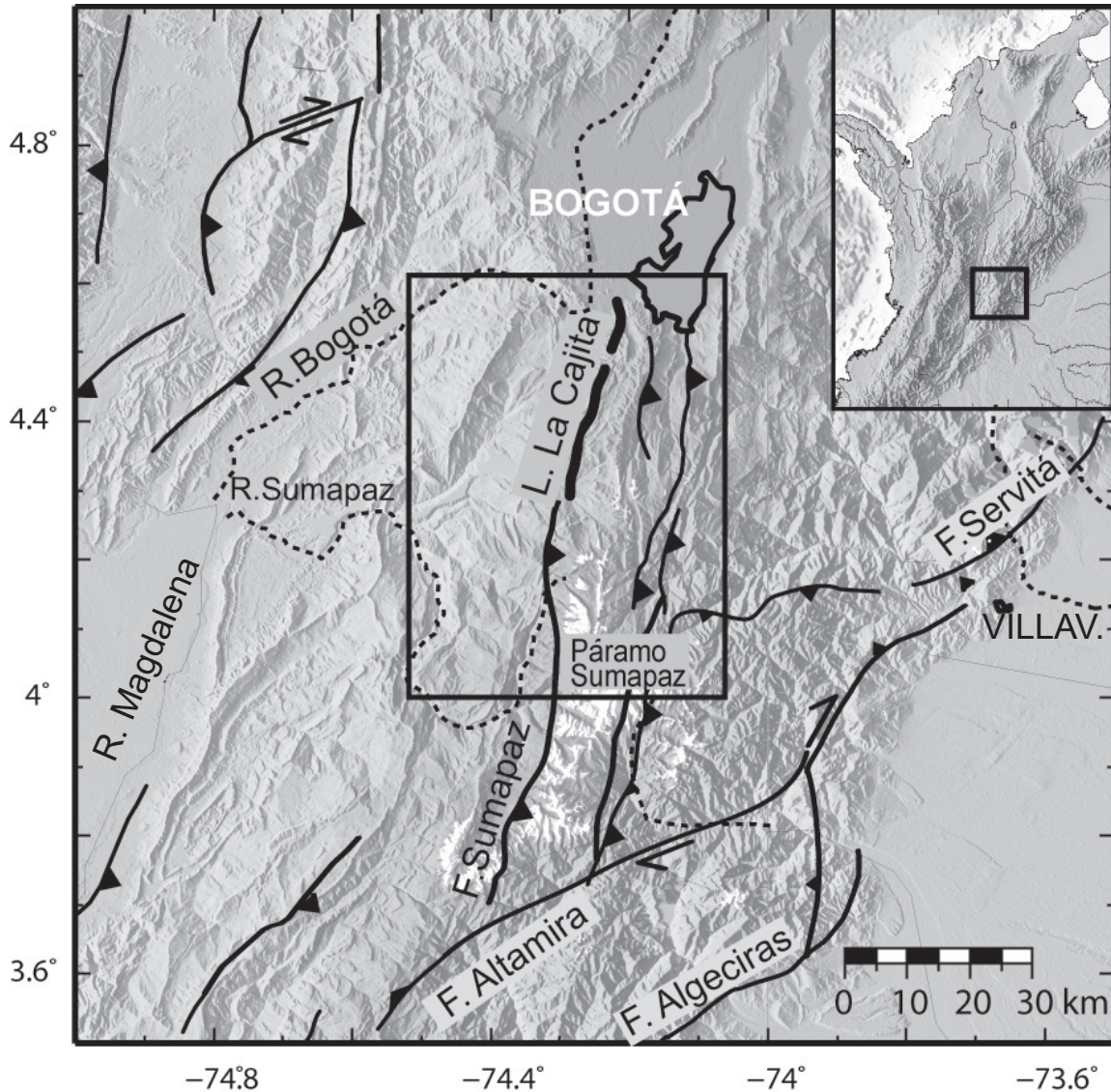
Los aspectos neotectónicos se estudian a partir del análisis geomorfológico de fotografías aéreas y de la interpretación de las observaciones de campo en la zona que corresponde al trazo de la Falla de la Cajita (Fig. 3). En este trabajo se denomina Lineamiento de la Cajita. El análisis se centra en 1) la revisión de los indicios morfotectónicos de afectación de los depósitos cuaternarios, en especial las morrenas glaciales y los

depósitos fluvio-glaciales y 2) de los indicios tectónicos en rocas más antiguas que podrían estar afectadas por el lineamiento. Paralelamente se analiza la actividad sísmica, histórica e instrumental, que se ha reportado al sur de la ciudad de Bogotá, con el fin de aclarar la posible relación con la actividad del Lineamiento de la Cajita.

## Marco Geológico

### Geomorfología

La zona de estudio localizada en el Páramo de Sumapaz, en la zona axial de la Cordillera Oriental colombiana al sur de Bogotá, presenta una topografía escarpada, separada por valles profundos con una morfología glacial de circos y morrenas de origen reciente. El drenaje muestra dos direcciones predominantes, una hacia el río Bogotá a través del Valle de Usme en sentido sur–norte, y la otra en sentido este–oeste a través de los afluentes del río Sumapaz en el sector de Pasca. El Lineamiento de la Cajita ha sido localizado próximo a esta divisoria de aguas con una dirección norte-sur y en proximidades de la laguna de la Cajita (Figs. 1 y 2).



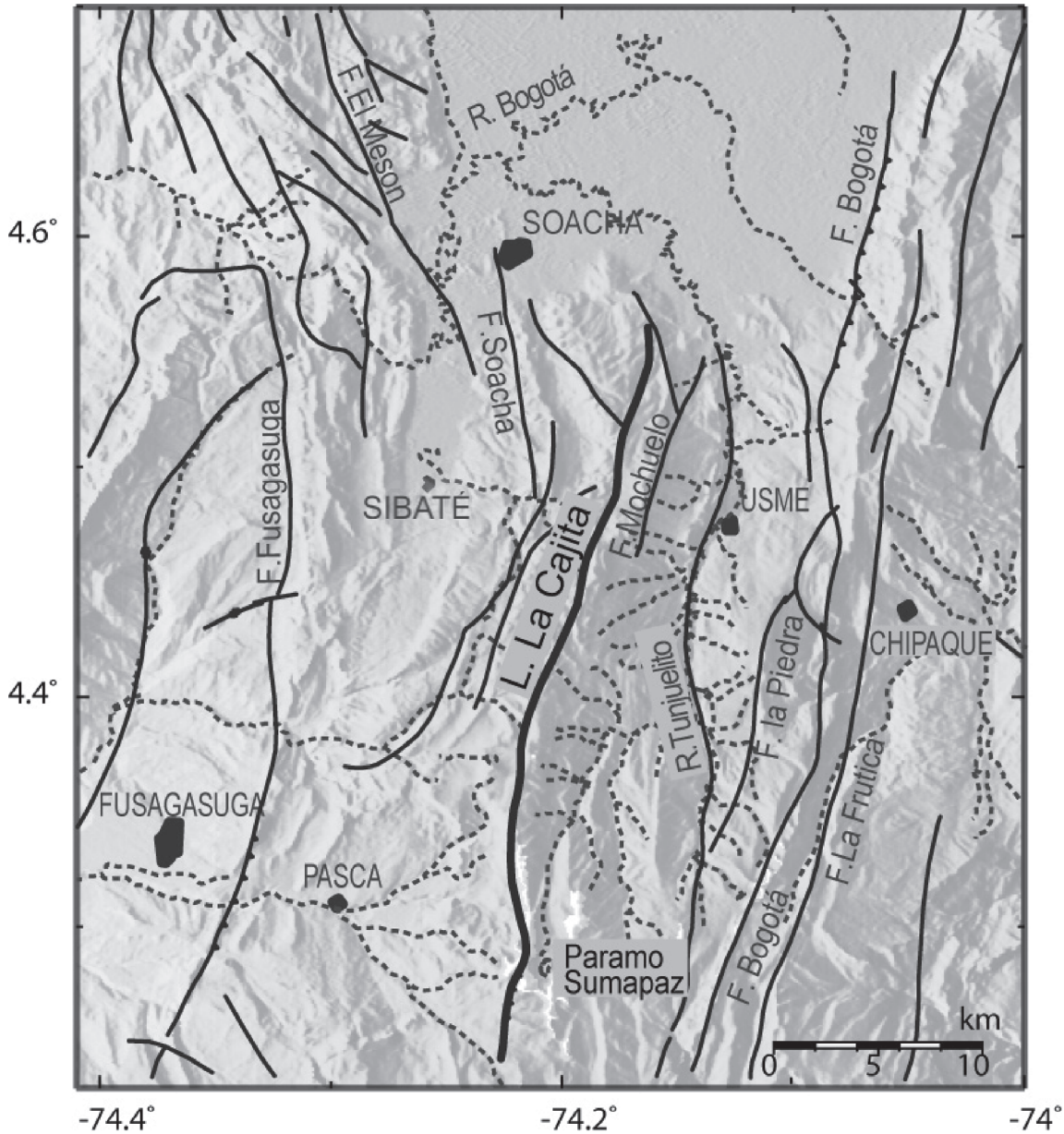
**Figura 1.** Localización y geomorfología de la zona del Lineamiento de la Cajita. Nótese la distancia entre el lineamiento y Bogotá. Estructuras principales modificadas de Dimaté (2003). Relieve resaltado como el gradiente del DEM de la STRM de 3 segundos de arco de resolución (USGS, en línea).

*Figure 1. Location and geomorphology of the La Cajita Lineament zone. Notice the short distance between the lineament and Bogotá. Main structures modified from Dimaté (2003). Shaded gradient relief from USGS 3'' arc resolution STRM DEM (online).*

### Geología

La cartografía geológica del área se muestra en la Fig. 3. Al occidente del área de estudio, en el Sinclinal de Fusagasugá, afloran rocas de finales del Cretácico (Formación Guaduas, KPg en la Fig. 3) y terciarias (Formación Arenitas de Fusagasugá). Al oriente se encuentran rocas de edad Cretácico correspondientes a las formaciones Une, Chipaque, Guadalupe y Guaduas y del terciario como Bogotá, Regadera, Usme y

Tilatá (Kiu, Ksch, Ksg, KPg, Pgbo, Pgr, Pgu y NgQt, respectivamente). El área de estudio está constituida principalmente por depósitos cuaternarios de morrenas y depósitos de origen fluvio-glacial. El abanico-terrace de Fusagasugá (Qta en la Fig. 3) es un depósito cuaternario de gran magnitud, que se desarrolla al occidente del área de estudio. Este abanico-terrace corresponde a un relleno fluvio-torrencial con mantos de gran espesor de cantos y grava subredondeados a subangulares. El sector



**Figura 2.** Morfología de la zona del Lineamiento de la Cajita. Lineamientos tomados del mapa neotectónico del estudio de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá (INGEOMINAS & Uniandes 1997).

*Figure 2. Morphology of the La Cajita Lineament zone. Lineaments modified from the Neotectonic Map of the Seismic Microzonation Study for Santafé de Bogotá (INGEOMINAS & Uniandes, 1997).*

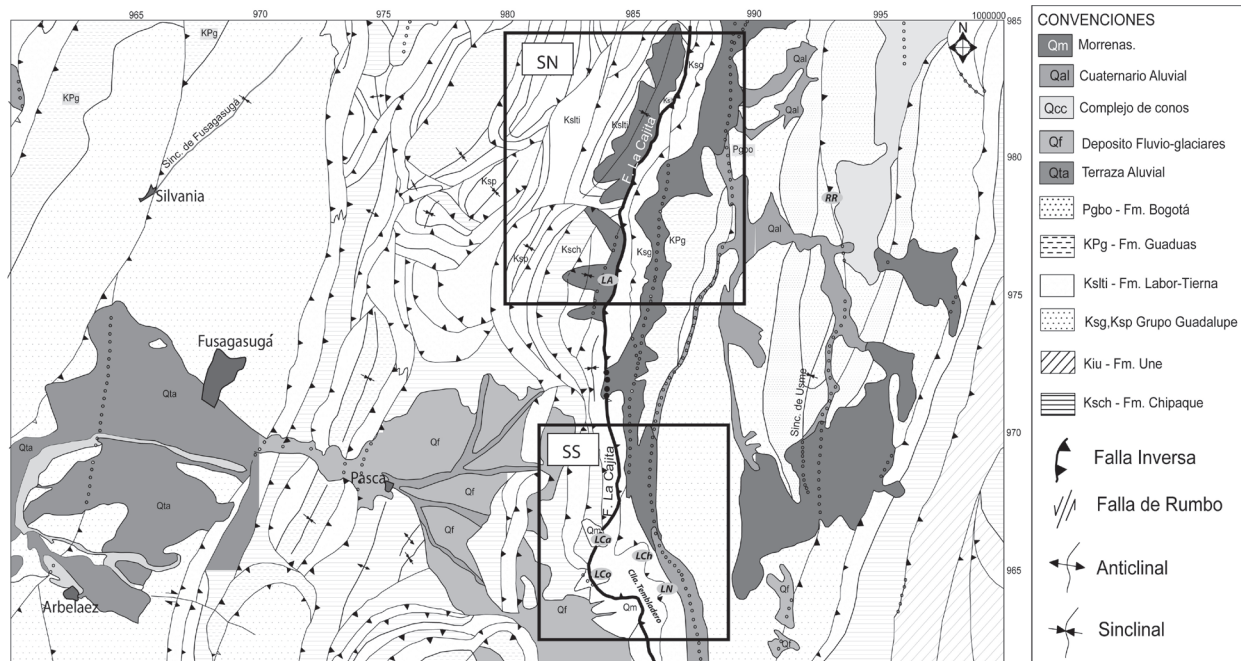
de la Laguna de la Cajita se ha sugerido como el área de aporte de este gran depósito (Villota, 1980), desde donde fluyen los ríos Batán y Cuja; por este último debe haber fluido el mayor volumen de sedimentos que dio cuerpo al gran abanico. La disposición de los depósitos cuaternarios (Qf y Qta en la Fig. 3) apoya esta idea y permite reconocer una fuerte tendencia del material a deslizarse, favorecida por el drenaje, la alta pendiente y el alto grado de fracturamiento.

### Geología Estructural

En la Fig. 3 se observa una serie de lineamientos constituidos por fallas de tipo inverso que presentan una dirección predominante en sentido N10°E, entre las cuales se destaca la Falla de la Cajita. Acosta & Hernández (2000) cartografiaron la Falla de la Cajita (nombrada como Falla Cajitas) como una estructura que bordea la Cuchilla Tembladero al suroccidente de la Represa de la Regadera, con dirección aproximada norte-sur, buzando al oriente

y con una leve componente dextral. Según Mendivelso (1987) el área de la Laguna de la Cajita ha sido afectada por fallas y fracturas resultantes de la combinación de esfuerzos de carácter tectónico-gravitacional de desgarre, y algunas de ellas posiblemente se han reactivado en el Cuaternario ya que cortan los depósitos morrénicos produciendo escarpes que no están relacionados con la estratificación de las areniscas. Según este autor, muchos

de los deslizamientos que se encuentran en el sector están concentrados a lo largo de zonas de fractura o están asociados a las márgenes de los ríos principales. Estos ríos actualmente se encuentran en una etapa muy activa de entalle vertical y socavación lateral que desestabiliza las laderas rápidamente, ocasionando erosión remontante (Mendivelso 1987).



**Figura 3.** Mapa geológico simplificado de la zona del Lineamiento de la Cajita. Modificado de la Plancha 246, escala 1:100.000 de Acosta & Ulloa (1996). Los rectángulos indican el Sector norte (SN) y Sector sur (SS) para la fotointerpretación. LA=Laguna del Alar, RR=Represa de La Regadera, LCa=Laguna de la Cajita, LCo=Laguna Cajones, LCh=Laguna Chisacá.

*Figure 3.* Simplified geological map of the la Cajita Lineament zone. Modified from Acosta & Ulloa's (1996) quadrangle 246, 1:100.000 scale. Rectangles show the North Sector (SN) and South Sector (SS) for photointerpretation. LA=Alar Lake, RR=La Regadera Reservoir, LCa= la Cajita Lake, LCo= Cajones Lake, LCh= Chisacá Lake.

### Actividad neotectónica

La Falla de la Cajita ha sido reportada en la literatura como una falla activa marcada por un cambio abrupto en la pendiente del terreno (Acosta & Hernández, 2000). Sobre este lineamiento se presentan morrenas desplazadas, ubicadas al occidente de las lagunas la Cajita y Cajones en el Páramo de Sumapaz. Adicionalmente se observan pequeñas lagunas, depresiones alineadas y

escarpes que afectan las rocas duras del Cretácico. Acosta & Hernández (2000) proponen que la Cajita es una falla activa a partir de observaciones de dislocación de los depósitos cuaternarios y de los rasgos morfotectónicos asociados al lineamiento incluyendo escarpes, trincheras, silletas, lagunas de falla y deslizamientos.

Los principales aspectos de la actividad neotectónica asociada a la Falla de la Cajita se han resumido en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá (EMSB) (INGEOMINAS & Uniandes, 1997) así: 35 km de longitud total de falla, 5 km de longitud con rasgos neotectónicos fuertes, 5 km de longitud con rasgos neotectónicos débiles, falla inversa con tasa de actividad intermedia y magnitud máxima probable de 6.4.

### Fotointerpretación y trabajo de campo

El análisis del grado de la actividad neotectónica de una falla geológica depende principalmente de las evidencias de deformación tectónica de los depósitos cuaternarios, es decir, de la deformación de los materiales geológicos más recientes. Existen muchas fallas geológicas en la zona andina colombiana, resultado de las fuerzas tectónicas durante la orogenia andina. Las fallas activas comúnmente corresponden a la reactivación de los sistemas tectónicos formados durante esta orogenia a finales del terciario y deben necesariamente afectar la secuencia cretácico-terciaria asociada a la Cordillera Oriental. Sin embargo, sólo la deformación en forma de fallamiento, plegamiento o basculamiento de los depósitos superficiales del Cuaternario permite confirmar la actividad tectónica en épocas recientes. Esta actividad reciente se define como neotectónica (Keller & Rockwell, 1984).

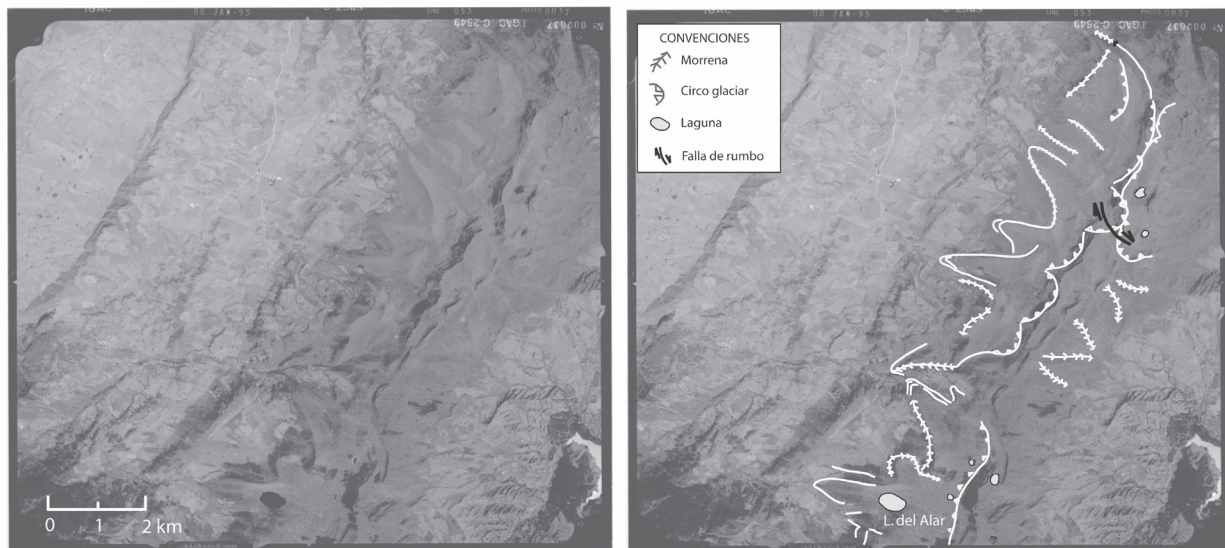
El Cuaternario que se encuentra en la zona del Lineamiento de la Cajita está constituido por depósitos glaciales de morrenas distribuidos en dos sectores: en el sector norte (SN en la Fig. 3) en cercanías a la Laguna del Alar y en el sector sur (S en la Fig. 3) donde se encuentra la Laguna Cajitas.

La zona de la Laguna del Alar (sector norte, SN) presenta una morfología glacial típica, con circos bien desarrollados, laguna glacial y morrenas frontales potentes (figs. 3 y 4). La dirección predominante del drenaje varía entre N15°E y E-W. Además de los depósitos de morrenas se observan en las fotos rocas más duras,

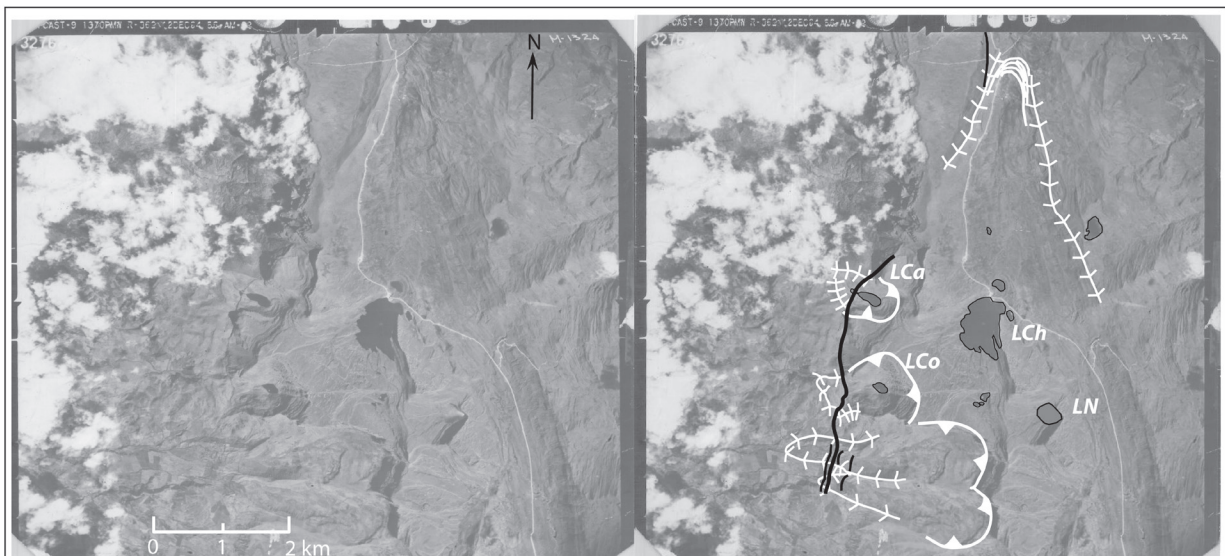
correspondientes al Grupo Guadalupe y rocas arcillosas de la Formación Guaduas (Fig. 3). También se observa una falla de rumbo con dirección N20°W que desplaza una parte de la secuencia de la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe. Los depósitos glaciales abarcan una franja a lo largo de toda la fotografía en dirección N15°E, y corresponden a siete circos principales con sus respectivas morrenas y dirección del flujo en sentido E-W. En este sector no se observan rasgos neotectónicos en la morfología glacial o los sistemas de morrenas ni tampoco trazos que puedan asociarse a la Falla de la Cajita señalada en la Fig. 3. La distribución espacial de la morfología glacial, y en especial el alineamiento de las lagunas glaciales, corresponde a las condiciones favorables para el desarrollo glacial sobre las contrapendientes del Grupo Guadalupe.

En la zona de la Laguna de la Cajita (sector sur, SS), figuras 3 y 5, se pueden discriminar, además de las morrenas cuaternarias, tres paquetes litológicos diferentes que corresponden de este a oeste a la Formación Guaduas, al Grupo Guadalupe y a la Formación Chipaque. Esta secuencia aparece con buzamientos de 20 a 30° hacia el este coincidiendo con el flanco occidental del Sinclinal de Usme, una estructura sinclinal normal. Hacia el flanco occidental de esta estructura se observa un escarpe muy pronunciado y una morfología glacial clásica de circos y morrenas, en especial en las lagunas de la Cajita y Cajones, donde se han reportado indicios neotectónicos.

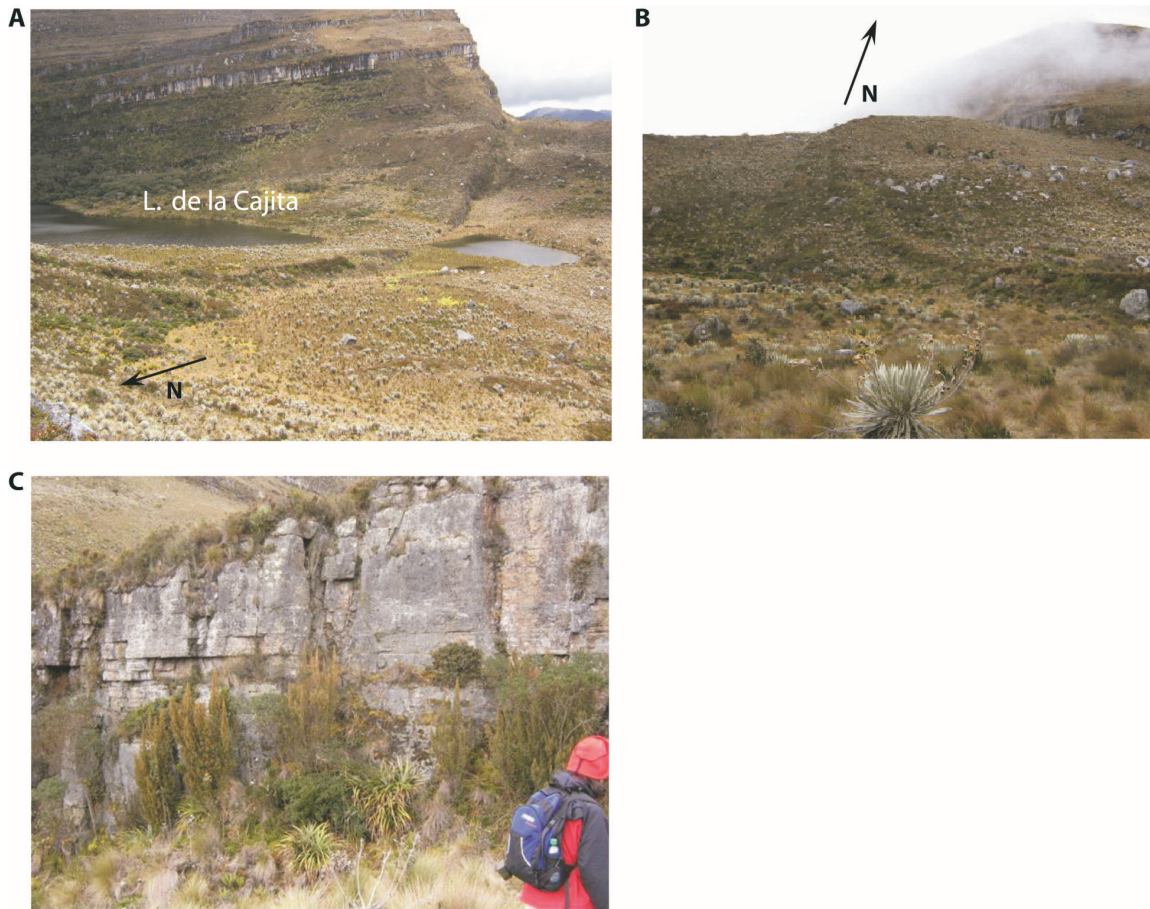
En el sector sur se destacan tres circos glaciales con sus respectivas morrenas que muestran dos direcciones del flujo glacial, uno E-W que forma los circos de la Laguna de la Cajita y de la Laguna Cajones, y otro más grande (por el tamaño del circo y de las morrenas) con dirección del flujo glacial S-N, que forma el circo de la Laguna Chisacá, siguiendo el rumbo de la estructura y el drenaje de Chisacá. El material morrénico del flanco occidental del filo de Chisacá está poco conservado debido a la pérdida constante hacia la Cuenca del Río Cuja y el abanico fluvio-torrencial de Fusagasugá.



**Figura 4.** Fotointerpretación de la foto 037 del vuelo C-2549 del sector norte (SN) de la Laguna del Alar. Nótense los circos glaciares bien desarrollados y las morrenas que indican un movimiento hacia el oeste.  
*Figure 4. Photointerpretation in the Alar Lakes's sector (North Sector, SN), C-2549 flight, 037 air photo. Notice the well-developed glacial cirques and the moraines indicating westward motion.*



**Figura 5.** Fotointerpretación de la foto 32768 del vuelo M-1324 del sector sur (SS) de la Laguna de la Cajita. Nótense dos eventos de glaciación con dos direcciones predominantes del flujo: E-W, coincidente con la del sector norte, y S-N, correspondiente a un evento anterior. El Lineamiento de la Cajita afecta las morrenas con dirección de flujo E-W. Rótulos semejantes a los de la Fig. 3.  
*Figure 5. Photointerpretation in the La Cajita Lakes's sector (South Sector, SS), M-1324 flight, 32768 air photo. Notice two glacial events with different flow directions: E-W, coincident with the North Sector flow direction, and S-N corresponding to a previous event. La Cajita Lineament affects the E-W flow moraines. Labels as in Fig. 3.*



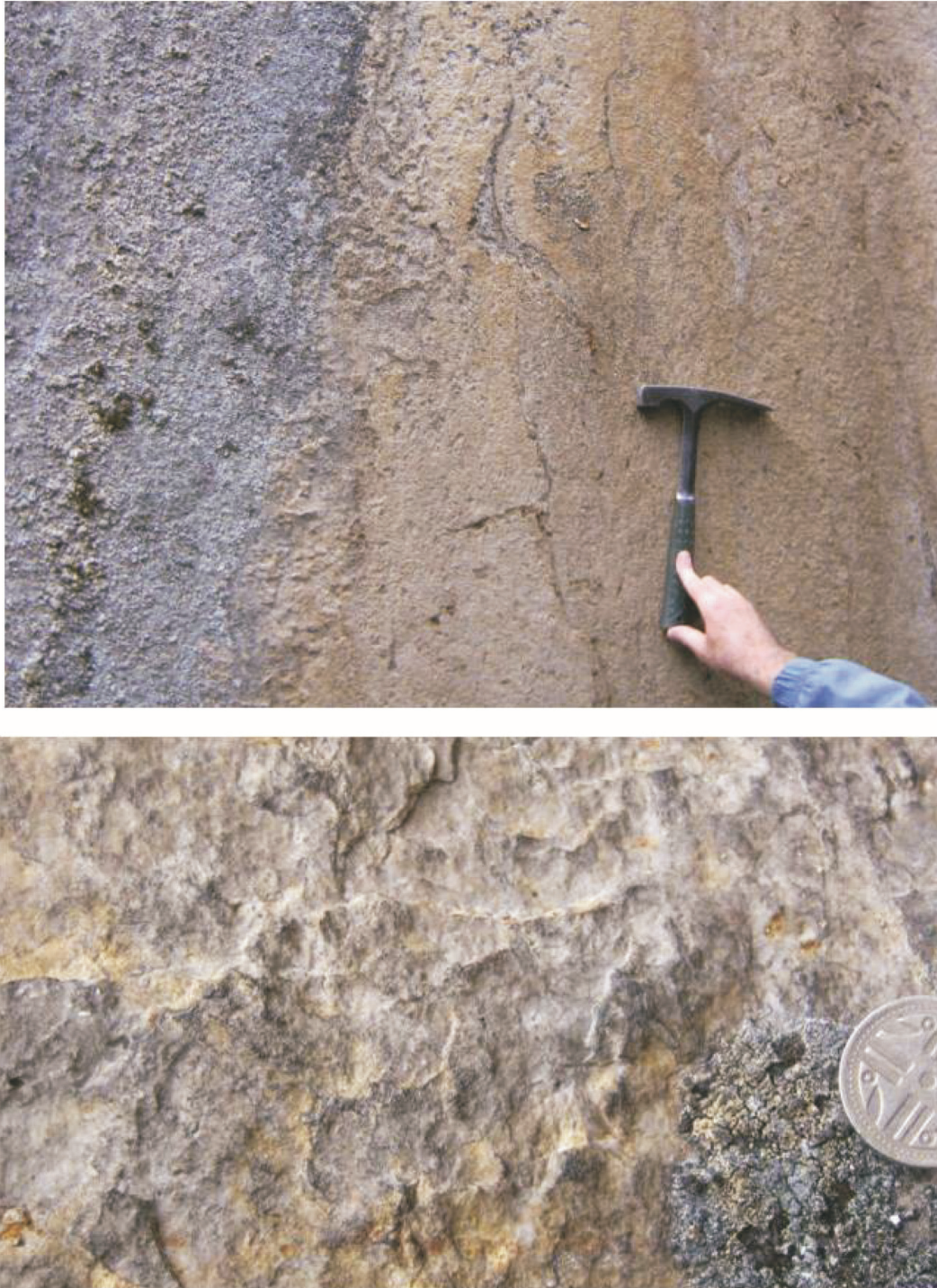
**Figura 6.** Escarpe del Lineamiento de la Cajita en el sector sur (SS). A Vista lateral del escarpe (lineamiento) hacia el sur; nótese el desplazamiento de unos pocos centímetros en la orilla de la Laguna en el centro del circo, y de 6 a 8 metros en las morrenas. B Vista hacia el norte de la Laguna de la Cajita. C Detalle del escarpe al sur de la laguna de la Cajita.  
*Figure 6. la Cajita Lineament scarp on the South Sector (SS). A Lateral view of the scarp viewing south. Note the few-centimeters displacement near the border of the lake at the cirque center, contrasting with 6-8 meters displacement at the moraines. B Northward view of the La Cajita Lake. C Scarp detail southward of the La Cajita Lake.*

En las fotografías se observa un lineamiento con dirección aproximada N-S, en forma de grieta que sigue el frente del escarpe topográfico. Este lineamiento divide la Laguna de la Cajita en una laguna principal y una secundaria (Fig. 5 y Fig. 6A). El origen glacial de la laguna principal se evidencia por su localización en una zona deprimida entre el circo glacial y depósitos de morenas laterales y frontales. El lineamiento afecta también las morrenas asociadas al circo de la Laguna de la Cajita, que se encuentran desplazadas con hundimiento aparente hacia el occidente. Al sur de la Laguna Cajones, el Lineamiento de la Cajita está acompañado por una serie de lineamientos y pequeños escarpes subparalelos perdiendo progresivamente su expresión.

Observaciones de campo confirman el desplazamiento de las morrenas y la dirección de hundimiento en el sector

del Lineamiento de la Cajita observados en las fotografías aéreas. En campo se aprecia también una depresión lineal que genera pantanos y lagunas secundarias en el bloque hundido (Fig. 6A). La inclinación del plano de hundimiento observado en las rocas cretácicas sugiere una estructura vertical a ligeramente inclinada hacia el occidente, concordante con el escarpe topográfico de las rocas cretácicas. A lo largo del lineamiento se observa un escarpe con desplazamiento desigual que varía desde pocos centímetros hasta 7-8 m en distancia (Figs. 6A y B). El escarpe presenta una pared irregular sin espejo de falla y una ausencia total de estrías en las cuarzo-arenitas de la Formación Guadalupe sobre una distancia de varios centenares de metros (Figs. 6C y 7).





**Figura 7.** Detalle de la superficie del escarpe (lineamiento) al sur de la Laguna de la Cajita, sin espejo de falla y ausencia total de estrias.

*Figure 7. Scarp detail southward of the La Cajita Lake. No slickensides or striations observed.*

## Interpretación

La fotointerpretación y las observaciones de campo permiten trazar el Lineamiento de la Cajita únicamente en el sector de las lagunas de la Cajita y Cajones. El lineamiento es reconocible por una depresión lineal de niveles variables que sigue el frente del escarpe topográfico y afecta las morrenas asociadas al circo de la Laguna de la Cajita. Las morrenas se encuentran desplazadas con hundimiento hacia el occidente, en el sentido de la pendiente regional. Localmente se observa un escarpe secundario paralelo al principal, que genera una depresión a lo largo de la cual se forman localmente pantanos y lagunas secundarias en el bloque hundido.

Los afloramientos en el supuesto escarpe de falla también se destacan por la ausencia de estrías. Tratándose de una cuarzo-arenisca sana del Grupo Guadalupe, condición óptima para la conservación de estrías en un ambiente compresivo (Fig. 7), se esperaría la presencia de estrías en la zona de ruptura. Por su carácter reciente (posglacial), los procesos de meteorización tampoco habrán tenido tiempo de desarrollarse, por lo cual un espejo de falla debería conservarse en gran parte. Por otro lado, la morfología irregular de la ruptura subparalela al escarpe topográfico y a la zona de deslizamiento de Pasca, apoya una interpretación asociada con fenómenos de remoción en masa muy grandes hacia el occidente.

Las observaciones geomorfológicas anteriores se interpretan entonces como un sistema masivo de deslizamientos con componente rotacional hacia el occidente en el sector de las lagunas la Cajita y Cajones (SS), originado principalmente por procesos gravitatorios favorecidos por la fuerte pendiente a nivel local y regional hacia Pasca, por los cambios litológicos y por la alta precipitación en la zona. Éste sistema ha generado aportes masivos hacia el cono torrencial de Pasca-Fusagasugá durante el Cuaternario, proceso reportado por Villota (1980). La presencia de la laguna secundaria en el bloque hundido contiguo a la Laguna de la Cajita también es consistente con esta hipótesis con la componente rotacional del deslizamiento basculada hacia el oriente, generando una trampa para el agua.

Esta interpretación de las fracturas superficiales como un sistema de deslizamientos masivos es acorde con

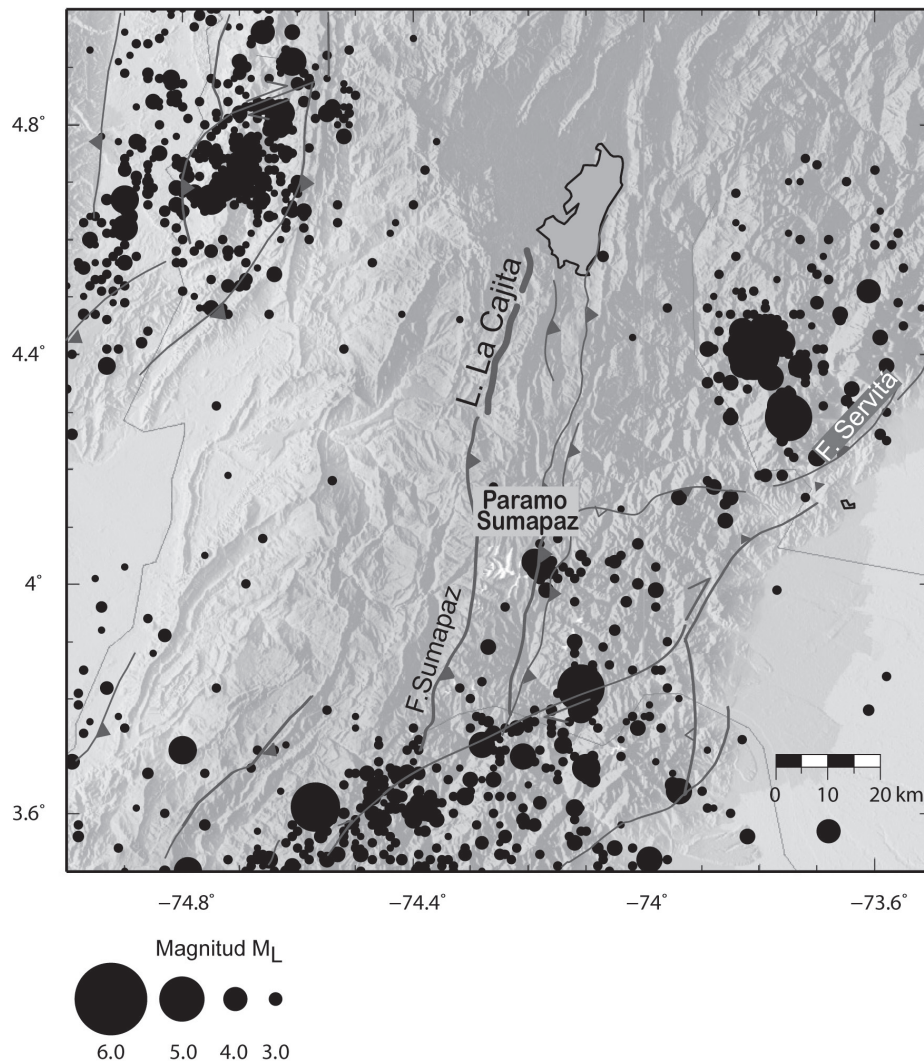
los estudios regionales de Villota (1980) y Mendivelso (1987), que señalan a ésta zona como fuente de grandes aportes torrenciales y procesos activos de remoción en masa y difiere de la de Acosta & Hernández (2000) y Vergara *et al.* (1996), que proponen que el lineamiento se relaciona con una falla activa inversa con componente dextral. Un movimiento tal generaría un escarpe regular con espejo y estrías de falla muy marcados; a diferencia del escarpe observado que es irregular, carece de estrías y se transforma en una serie de lineamientos y pequeños escarpes subparalelos, perdiendo progresivamente su expresión.

En contraste con el sector sur del trazo del lineamiento, el sector norte correspondiente a la Laguna del Alar, con más de 10 km de trazo cartografiado, se caracteriza por la ausencia de evidencias de deformación. Este tramo con una morfología glacial y fluvial totalmente intactas, sin declive pronunciado, permite suponer que el trazo de la Falla de la Cajita cartografiado en la Plancha 246 (Fig. 3) corresponde más bien a una falla inferida, delineada siguiendo el rumbo de los estratos.

Otra posible interpretación de las observaciones geomorfológicas es que el Lineamiento de la Cajita sea la expresión de una falla activa con desplazamiento en profundidad con ruptura secundaria en superficie; en tal caso la expresión geomorfológica se relacionaría de todas maneras con un movimiento en masa. El análisis de los datos sismológicos que se presenta a continuación es una manera de examinar esta hipótesis.

## Actividad Sísmica en el Sector del Páramo de Sumapaz

En el periodo reciente (desde la instalación de la Red Sismológica Nacional en 1993), la actividad sísmica registrada en el sector del Páramo de Sumapaz en la zona del Lineamiento de la Cajita es prácticamente nula (Fig. 8), mientras que en los periodos anteriores del catálogo sismológico colombiano aparecen registrados eventos en este sector que han causado daños al sur u oriente de Bogotá. Algunos autores (e.g. Vergara *et al.* 1996; Mendivelso *et al.* 2007) han sugerido por la localización de los daños ocasionados, que estos eventos podrían asociarse a actividad en la Falla de la Cajita. El análisis de los estudios de sismos históricos de la región refuta esta hipótesis como se muestra a continuación.



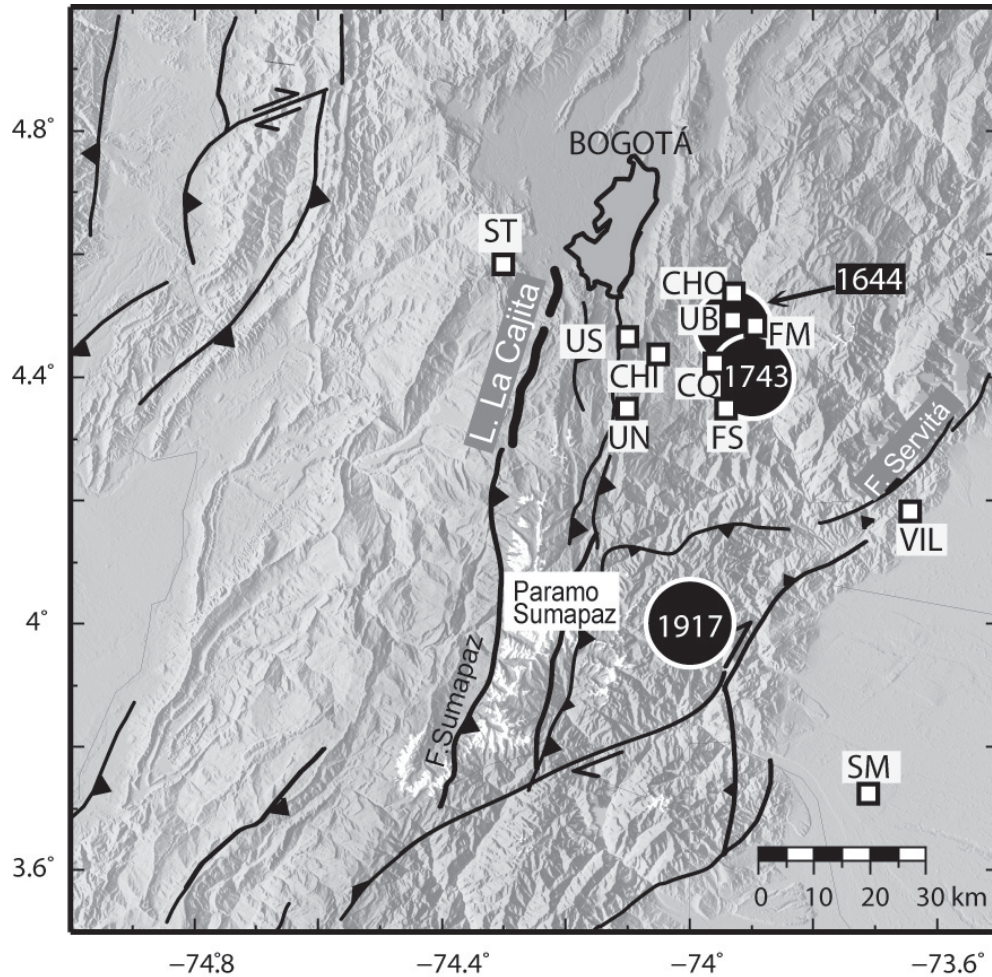
**Figura 8.** Sismicidad reciente (1993 a 2010), registrada por la Red Sismológica Nacional (INGEOMINAS) en el sector del Páramo de Sumapaz. Las magnitudes son  $M_L$ . Se han dibujado los sismos con RMS > 1.5 s y errores en latitud y longitud menores que 20 km en su solución. Nótese que en el sector del Lineamiento de la Cajita sólo aparece un evento de magnitud ~2.0.

*Figure 8. Recent seismicity, 1993 a 2010, recorded by the National Seismic Network (INGEOMINAS) at the Páramo de Sumapaz sector.  $M_L$  magnitudes. Earthquake plotted solutions with RMS > 1.5 sec. and latitude and longitude errors less than 20 km. Notice the only one event at the La Cajita Lineament (magnitude ~2.0).*

### Sismicidad histórica e instrumental temprana (antes de 1920)

El catálogo de sismos de Colombia registra antes de 1926 (Fig. 9), tres sismos con efectos significativos en la región del sur de Bogotá y a distancias moderadas de ella, en 1644 (Espinosa 2003), 1743 y 1917 (CERESIS 1985). Estos eventos se analizan a continuación.

**Sismo de marzo 16 de 1644:** Documentos históricos encontrados por Espinosa (1994, 2003), describen daños severos en la iglesia y viviendas del pueblo de Tunjuelo, licuación en las vegas del río Tunjuelo (Fig. 2), deslizamientos y caída de rocas “hacia los boquerones de Ubaque y Chipaque” y un deslizamiento “abajo del Salto de Tequendama”, ocasionados por el sismo. Los efectos descritos en Ubaque y Chipaque sugieren para este evento un epicentro localizado al sureste de Bogotá.



**Figura 9.** Sismos significativos alrededor del Páramo de Sumapaz (1644, 1743, 1917). Epicentros macrosísmicos para los eventos de 1644 y 1743 e instrumental para el de 1917. Se señala la localización de los sitios con mayores efectos asociados a estos eventos: UB=Ubaque, CHI=Chipaque, ST=Salto de Tequendama, FM=Fómeque, CQ=Cáqueza, CHO=Choachí, FS=Fosca, US=Usme, UN=Une, VIL=Villavicencio, SM=San Martín.

*Figure 9.* Significant earthquakes (1644, 1743, 1917), in the Páramo de Sumapaz region. Epicenters of the 1644 and 1743 determined from intensity data. 1917 earthquake epicenter is instrumental. Largest intensity sites associated with these events also shown: UB=Ubaque, CHI=Chipaque, ST=Salto de Tequendama, FM=Fómeque, CQ=Cáqueza, CHO=Choachí, FS=Fosca, US=Usme, UN=Une, VIL=Villavicencio, SM=San Martín.

**Sismo de octubre 18 de 1743.** Este sismo afectó principalmente el área de Fómeque, Cáqueza, Choachí, Fosca y Ubaque, además causó daños menores en Chipaque, Usme y Une y deslizamientos en Bogotá (e.g. Ramírez, 1975; Álvarez, 1987; Espinosa, 2003; Sarabia & Cifuentes, 2007). Los efectos asociados a este evento son contundentes en señalar un epicentro al sureste de Bogotá.

**Sismo de agosto 31 de 1917.** El epicentro instrumental de este sismo de magnitud  $M_s=6.9$  (Pérez & Scholz, 1984) fue localizado al este del Páramo de Sumapaz en  $4^\circ\text{N}$  y  $74^\circ\text{W}$  (Gutenberg & Richter, 1949), al SSE de

Bogotá. Este epicentro puede tener algunas decenas de km de incertidumbre, asociada a la limitada distribución de las estaciones sismológicas globales y a la ausencia de estaciones sismológicas en el país para la época. Los daños más significativos se ubican en una extensa región que abarca los actuales departamentos de Meta, Cundinamarca, Tolima y Boyacá. Las intensidades más altas (IX) evaluadas en Villavicencio y San Martín, los deslizamientos ubicados en el flanco oriental de la Cordillera Oriental a la latitud aproximada de  $4^\circ\text{N}$  y la distribución de intensidades menores sugieren también un epicentro al SSE de Bogotá (Cifuentes *et al.*, 2005, Sarabia *et al.*, 2010).

## Sismicidad en el periodo instrumental moderno (1964 en adelante)

En este periodo el sismo más relevante con epicentro cercano a la zona de este estudio, es el de septiembre 4 de 1966 que causó daños significativos en el sur de Bogotá. El Boletín del International Seismological Centre (ISC, 2010) registra tres localizaciones para este evento, al sur y al este de Bogotá (a, b, y c en la Fig. 10) y magnitudes  $M_b$  de 5.0 y 5.2. Tratándose de un evento de magnitud moderada localizado con estaciones a grandes distancias del epicentro, la incertidumbre en la localización puede ser de algunas decenas de kilómetros. En declaraciones de prensa J. E. Ramírez, director del Instituto Geofísico de los Andes (IGA) en la época, indicó que el epicentro se localizaba a decenas de kilómetros de Bogotá.

Las intensidades (en la escala de Mercalli) registradas en el Catálogo de Terremotos para América del Sur (CERESIS, 1985) para este evento son: IV para Cáqueza y V para Chipaque, Usme, y Bosa. Evaluaciones no publicadas del IGA (1966) indican IV en Villavicencio y Girardot, y VII en Soacha y en los barrios Santa Librada y Barranquillita de Usme. Los valores VII corresponden a daños puntuales posiblemente relacionados con efectos de sitio y no representan el valor local. En Bogotá se presentaron agrietamientos severos en pocas casas en barrios del sur y daños leves en el centro de la ciudad. No se reportan daños severos al norte de la ciudad ni en las poblaciones al norte de ella (Cifuentes *et al.*, 2007) y tratándose de un evento relativamente reciente, cercano a Bogotá, con un buen cubrimiento de prensa y estudiado por el IGA en su momento, la falta de reportes se interpreta como ausencia de daños.

Con el fin de precisar la localización epicentral, se ha aplicado el “método de la hipérbola”, a partir de las lecturas de tiempo de arribo de ondas P. Según este método, la diferencia de tiempos de arribo de ondas P a dos estaciones permite trazar una hipérbola que representa el conjunto de puntos que cumplen con la condición de que la diferencia de tiempos a dos estaciones dadas es constante (Milne, 1886; Lahr, 2006). El epicentro se localiza en algún punto sobre la hipérbola. Los tiempos de arribo se obtuvieron de lecturas directas sobre los sismogramas de las estaciones BOG (Bogotá) y FUQ

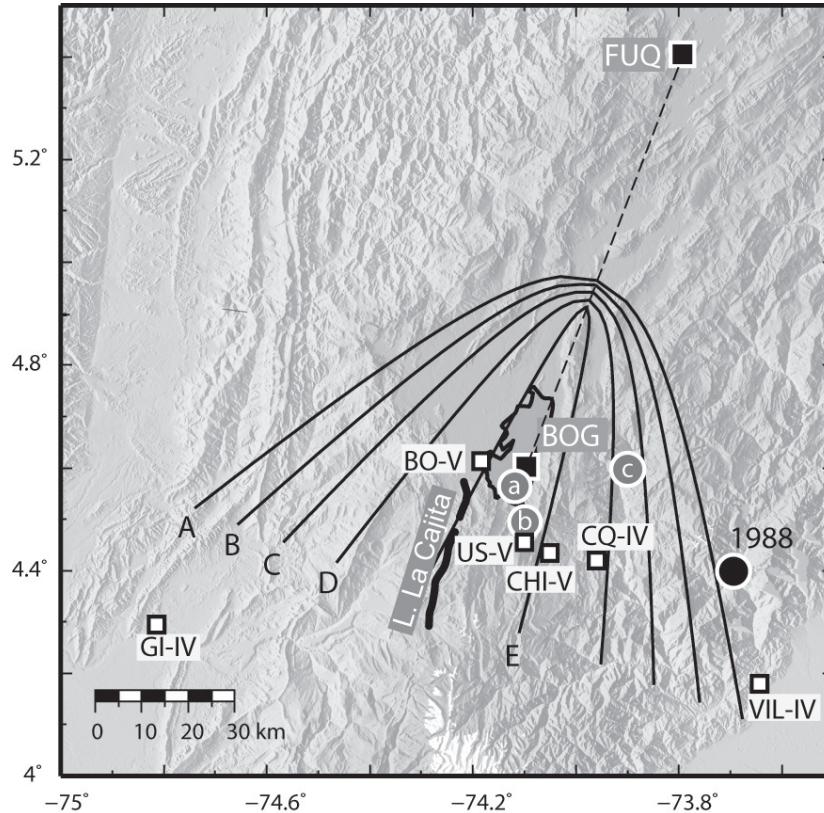
(Fúquene) de la red del IGA. Por su cercanía al epicentro los registros están saturados y no es posible leer el arribo de la onda S. El primer arribo es a BOG y la diferencia entre los arribos a las dos estaciones, TPFuq - TPBog, es 16 s. En la Fig.10 se muestra un conjunto de hipérbolas de posibles localizaciones del epicentro, para varios valores de velocidad de las ondas P. Las intensidades de Cáqueza y Chipaque, al este del Lineamiento de la Cajita, favorecen la rama derecha de las hipérbolas como posible ubicación del epicentro. En esta zona se ubica también el epicentro del sismo del 20 de febrero de 1988 (Fig.10), con igual diferencia de tiempo TPFuq - TPBog (16 s.). Este evento más reciente que causó daños en el Calvario, está mejor localizado con los datos de las estaciones globales que el de 1966.

En síntesis, el análisis de la actividad sísmica reciente como de la actividad histórica en la zona del Páramo de Sumapaz no sugiere una localización de epicentros hacia el suroeste de Bogotá y descarta al Lineamiento de la Cajita como posible fuente de estos eventos.

## Conclusiones

En cercanías a la Laguna del Alar no se observan rasgos neotectónicos en la morfología glacial o en los sistemas de morrenas, que muestren evidencia de actividad reciente en la estructura cartografiada como Falla de la Cajita. Tampoco el trazo cartografiado tiene una expresión en campo. En esta zona la alineación de las lagunas es aproximada y coincide con las condiciones favorables para el desarrollo glacial sobre las contrapendientes del Grupo Guadalupe (Ksg en la Fig. 3). Probablemente el trazo de la Falla de la Cajita en esta zona corresponde a una falla inferida, trazada siguiendo el rumbo de los estratos.

En la zona correspondiente a las Lagunas Cajitas y Cajones se observa un lineamiento principal que sigue el frente del escarpe topográfico y que afecta las morrenas asociadas al circo de la Laguna Cajitas. Localmente se presenta un escarpe secundario al que se asocian pantanos y lagunas secundarias en el bloque hundido. El lineamiento principal de Cajitas se transforma en una serie de lineamientos y pequeños escarpes subparalelos al sur de la Laguna Cajones y pierde progresivamente su expresión. La interpretación de las observaciones geomorfológicas respalda la hipótesis de que el lineamiento corresponde a un bloque hundido



**Figura 10.** Epicentro del sismo de 1966. Los círculos grises indican las localizaciones instrumentales tomadas del ISC Bulletin (a, ISC; b, ENGDHAL; c, USGS). Las hipérbolas representan las posibles localizaciones del epicentro según la diferencia de tiempos de arribo de la onda P a las estaciones FUQ y BOG para distintos modelos de velocidad media (A-E, desde 5.5 a 6.3 km/s en intervalos de 0.2 km/s). El círculo negro muestra el epicentro del sismo del 20 de febrero de 1988.

*Figure 10. Epicenter of the 1966 earthquake. Gray circles indicate instrumental locations from the ISC Bulletin (a, ISC; b, ENGDHAL; c, USGS). Hyperbolae represent possible locations of the epicenter. Locations are controlled by the P wave arrival time difference to stations FUQ and BOG. Each hyperbola corresponds to a velocity model (A-E, ranging 5.5 to 6.3 km/s in 0.2 km/s intervals). The black circle indicates the 20th February, 1988, earthquake epicenter.*

relacionado con un sistema masivo de deslizamientos con componente rotacional, favorecido por la pendiente del terreno y la fragilidad del material.

El análisis de los datos sismológicos sugiere que los eventos significativos con epicentro al SSE de Bogotá no están asociados con el Lineamiento de la Cajita. En particular, el sismo del 31 de Agosto de 1917 está asociado a un epicentro más al oriente de este lineamiento. El epicentro del sismo de 1966 es aún incierto y es necesaria una revisión adicional de la distribución de intensidades, de los sismogramas locales y de la localización con datos globales.

En síntesis, los indicios de actividad neotectónica asociados al Lineamiento de la Cajita no indican fallamiento activo.

## Agradecimientos

Se agradece al Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS por el apoyo logístico durante la realización de este proyecto, especialmente a Mónica Arcila, por su colaboración en la adquisición de información y en el desarrollo del trabajo de campo, a Jaime Romero por las discusiones sobre la interpretación geomorfológica, y a los profesionales del Área de Recursos del Subsuelo por su acogida; a Alma Nohora Miranda, directora del Archivo Histórico de la Pontificia Universidad Javeriana, por su colaboración en el suministro de la información histórica; al personal del Instituto Geofísico de los Andes por permitir el acceso a los sismogramas necesarios para realizar este estudio y a G. Chicangana y un revisor anónimo que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

## Referencias

- ABE, K. (1981): Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 – 1980. *Phys. Earth Planet. Int.*, 27, p. 72-92.
- ACOSTA, J. & HERNÁNDEZ, O. (2000): Análisis neotectónico de un área ubicada al oriente del Municipio de Pasca, Departamento de Cundinamarca. *Geología Colombiana*, No. 25, p. 241-249, Bogotá.
- ACOSTA, J. & ULLOA, C. (1996): Plancha 246 Fusagasugá escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.
- ACOSTA, J. & ULLOA, C. (2001): Memoria explicativa Geología de la Plancha 246 Fusagasugá escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá, 76 p.
- ÁLVAREZ, A. (1987): Contribución al conocimiento de la sismicidad histórica en Colombia. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Bogotá.
- CERESIS (1985): Catálogo de Terremotos para América del Sur. Eds. Askew, B. & Algermissen, T. 4: 269.
- CIFUENTES, H., DIMATÉ, C. & SARABIA, M. (2007): Estudio macrosísmico del sismo del 4 de septiembre de 1966. SICAT (Sistema de Información para el Inventario, Catalogación, Valoración y Administración de Información Técnico-Científica), Ingeominas. En línea, 71 p.
- CIFUENTES, H., SARABIA, M., ROBERTSON, K. & DIMATÉ, C. (2005): Parámetros macrosísmicos del sismo de 1917 en Colombia. – II Congreso Latinoamericano de Sismología, p 66.
- DIMATÉ, C. (2003): Sismotectonique des cordillères Centrale et Orientale colombiennes. Tesis de Doctorado, Universidad Louis Pasteur, Estrasburgo. 278 p.
- ESPINOSA, A. (1994): El terremoto de Tunjuelo (1644, Marzo 16) y sus efectos geotécnicos en la zona epicentral. *Revista INGEOMINAS*, 4, p. 83-90.
- ESPINOSA, A. (2003): Historia Sísmica de Colombia 1550-1830. FEDES, Uniquindío, Armenia. Ed.
- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. CD-ROM.
- GUTENBERG, B. & RICHTER, C. (1949): Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton, 295 p.
- IGA (1996): Evaluación de intensidades del sismo de 1966, no publicadas. Archivo histórico de la Pontificia Universidad Javeriana, Fondo Jesús Emilio Ramírez.
- INGEOMINAS & UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. (1997): Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Publicación Especial de INGEOMINAS, Bogotá. 124 p.
- INGEOMINAS-RSNC, Calendario de eventos, <http://seisan.ingeominas.gov.co/RSNC>
- ISC (2010): International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.
- KELLER, E. & ROCKWELL, T. (1984): Tectonic geomorphology, Quaternary chronology and paleoseismicity. In: *Developments and Applications in Geomorphology*, Costa & Fleischer (Eds.) p. 203-239.
- LAHR, J. (2006): Earthquake location using P phases and hyperbolae. *Seismology and volcanic Workshop*. Costa Rica.
- MENDIVELSO, D. (1987): Geomorfología aplicada a la identificación y zonificación de riesgos naturales utilizando datos de sensores remotos en El Páramo de Sumapaz. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands. 164 p.
- MENDIVELSO, D., NAVAS, O., PADILLA, J. & VELÁZQUEZ, E. (2007): Bogotá. El entorno natural de 17 ciudades de Colombia. Hermelín, M. Ed. Fondo editorial Universidad EAFIT, 342 p.
- MILNE, J. (1886): Earthquakes and other Earth movements. The International Scientific Series D. Appleton & Co. New York. 388 p.

PÉREZ, O. & SCHOLZ, C. (1984): Heterogeneities of the instrumental seismicity catalog (1904-1980) for strong shallow earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 2, 669 – 686.

RAMÍREZ, J. (1975): Historia de los Terremotos en Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, segunda edición, 250 p., Bogotá.

SARABIA, M. & CIFUENTES, H. (2007): Estudio macrosísmico del sismo del 18 de octubre de 1743, Fómeque (Cundinamarca). SICAT (Sistema de Información para el Inventario, Catalogación, Valoración y Administración de Información Técnico-Científica), Ingeominas. En línea, 92 p.

SARABIA, M., CIFUENTES, H. & ROBERTSON, K. (2010): Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y en 1917 en el centro de Colombia. *Cuadernos de Geografía*, 19, p. 153-162.

USGS, en línea. <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>

VERGARA, H., PARÍS, G.I., TABOADA, A., ROMERO, J. & CASTRO, E. (1996): Actividad neotectónica en las fuentes sismogénicas de la región central de Colombia. VII Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología, p. 517-528, INGEOMINAS, Santafé de Bogotá.

VILLOTA, H. (1980): Una metodología para el análisis fisiográfico en las zonas montañosas del trópico aplicada al levantamiento general de suelos del sector Pasca-Girardot, Cundinamarca, Colombia. Tesis M. Sc. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, Enschede, The Netherlands. 145 p.