EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS Y ESTRATIGRÁFICAS DE COMPRESIÓN HOLOCENA EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

MYRIAM C. LÓPEZ (1)
FRANCK A. AUDEMARD (2)
ANDRES VELÁSQUEZ (3)

(1, 3) Corporación OSSO. Observatorio Sismológico del SurOccidente OSSO. Cali. Tels: 2-6821078, 2-3397222. e-mail: mylopez@osso.org.co, ave@osso.org.co
(2) Fundación Venezolana para la Investigación Sismológica, Funvisis. Apartado postal 76.880, Caracas 1010, Venezuela. e-mail: faudemard@funvisis.org.ve

Palabras Clave: compresión activa, escarpes de flexura, Holoceno, fallas ciegas, pliegues activos.

RESUMEN
La cinemática de fallas identificada en afloramientos del piedemonte occidental de la Cordillera Central permite sustentar que el Cuaternario se está plegando por la propagación de fallas inversas. Por otra parte, las colinas bajas del piedemonte donde se han cartografiado anticlinales afectando las unidades del Grupo Valle, son una fuente primaria de información que sustenta las evidencias geomorfológicas de plegamiento activo en el Cuaternario del valle del Cauca.

INTRODUCCIÓN
Sobre el valle del río Cauca, tradicionalmente conocido como El Graben Interandino Cauca Patía (Acosta, 1978) o el Foso Cauca-Patía (Stutzer, 1934) no se conocen estudios detallados que permitan definir el estilo estructural del Cuaternario. Aunque Barlow (1981) postuló un escenario similar a la cuenca Ridge en California (senso Crowell, 1982), sus apreciaciones se basaron en la extrapolación de las estructuras que interpretó en la cuenca del Chocó.

El trabajo que se presenta a continuación forma parte de la tesis de maestría del primer autor de este trabajo y de los estudios llevados a cabo en el marco de un proyecto de investigación formulado ante Colciencias por el Observatorio Sismológico de la Universidad del Valle en cooperación con la Corporación OSSO y la Universidad EAFIT (Meyer, 2000).

METODOLOGÍA
La información obtenida en el terreno mediante el estudio geológico de afloramientos se comparó con aquella obtenida a partir de sensores remotos como imágenes estereoscopias de radar (SRTM Data), fotografías aéreas e imágenes Landsat. Los datos estructurales fueron tratados mediante el programa TectonicsFP y los modelos DEM fueron realizados mediante los programas Surfer 8® y 3DEM®.

LOCALIZACIÓN Y GEOMORFOLOGÍA
La zona de estudio se localiza en el Valle del Cauca aproximadamente a la latitud 4º20´ N y 3º40` N, donde se asientan las poblaciones de Andalucía, Bugalagrande, Galicia, Tulúa y Buga (fig.1).

Esta zona corresponde a un sector del piedemonte occidental de la Cordillera Central donde existe un máximo ensanchamiento de la cordillera denominado la Saliente de Buga (López et

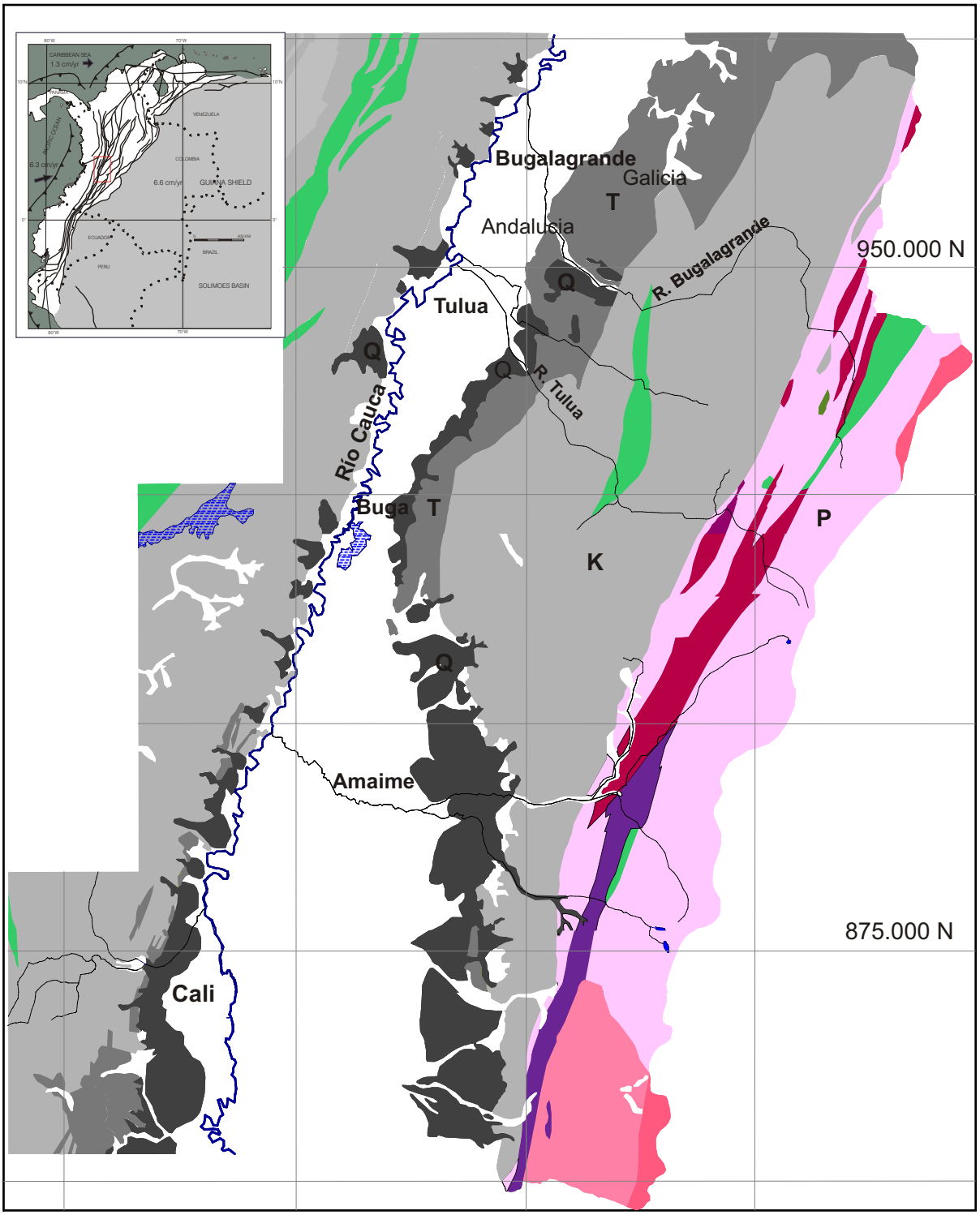

Figura 1. Mapa de localización y geológico (tomado de Nivia, 2001). En negro resaltan los abanicos del piedemonte (Q), en gris las unidades del Terciario, Grupo Valle (T), y en colores unidades del Cretácico, Formación Amaime, y unidades mas antiguas (P). Coordenadas planas (m).

al., 2004a, b), que coincide a su vez con el máximo estrechamiento de la planicie del río Cauca. En esta saliente se diferencian cuatro unidades geomorfológicas: El Frente Montañoso Principal, una Peniplanicie Elevada, las Colinas Bajas y la Llanura Aluvial Actual del río Cauca (fig.1).

En el Frente Montañoso Principal aflora la Formación Amaime. El tope de la Peniplanicie Elevada está conformado por cenizas volcánicas del Pleistoceno-Holoceno (Toro y Marín, 1994), posiblemente del volcán Machín (Mendez, 2001). Ocasionalmente está conformado por una cubierta Cuaternaria delgada que suprayace en discordancia la secuencia sedimentaria del Neógeno, del Grupo Valle (senso Nivia, 2001). Las Colinas Bajas están conformadas por la Formación La Paila, suprayacida en discordancia por depósitos Cuaternarios y la Llanura Aluvial Actual del río Cauca está formada por depósitos recientes.

GEOLOGÍA

Las unidades geológicas que afloran en superficie de mas antigua a mas vieja son:

El Grupo Amaime (McCourt et al., 1985) constituido fundamentalmente por basaltos y diabasas de edad Cretácica cubierta en discordancia por sedimentos Terciarios la mayor parte de origen continental.

La Formación La Paila está constituida fundamentalmente por conglomerados polimícticos y areniscas tobáceas de colores grises a rojizos, correlacionables con la Formación Cartago (Schwinn, 1969) definida en la Carretera Cartago – Alcalá. La parte superior de la Formación La Paila se correlaciona directamente con la Formación Buga definida al este de Buga, a lo largo del río Guadalajara (Schwinn, 1969). Nelson (1957) dividió la formación La Paila en una unidad inferior constituida por 200 m de tobas dacíticas seguidas por una secuencia clástica, esencialmente conglomerática. El espesor de esta última unidad varía de 400 a 600 m. Se le atribuye una edad miocena (Van der Hammen, 1958), aunque McCourt (1984) sugiere que esta unidad puede ser más antigua, probablemente del Oligoceno y correlacionable, al menos en parte, con el Grupo Cauca y la Formación Amagá. Las rocas sedimentarias de la Formación La Paila presentan plegamientos estrechos debidos a la tectónica post miocena en el área (De Armas y McCourt, 1984).

La Formación Zarzal (Nivia, 2001) está constituida por depósitos lacustres compuestos por diatomitas laminadas y arcillolitas. Esta formación se ha encontrado interdigitada con los depósitos del Abanico del Quindío (Cardona y Ortíz, 1994) lo que sugiere una contemporaneidad, por lo menos parcial, entre ambas formaciones.

LOCALIDADES ESTUDIADAS

Las evidencias de tectónica reciente en superficie están expresadas en las unidades de la Formación Zarzal, La Paila y todo el conjunto de depósitos cuaternarios.

A continuación se presentan las formas del terreno y estructuras documentadas en dos localidades: Río Bugalagrande y Tulúa.

Río Bugalagrande

Evidencias geomorfológicas: En la localidad Río Bugalagrande, la Formación La Paila es afectada por compresión manifestada por plegamiento. Cerca de Andalucía en la terminación oeste de la Peniplanice Elevada (López et al., 2004a), sobre el flanco Este de un anticlinal cartografiado por De Armas y McCourt (1984), se hallan depósitos cuaternarios basculados hacia el Este (fig.2). Estos depósitos se han visto en discordancia sobre las unidades del Terciario.

El basculamiento de los depósitos cuaternarios coincide con un levantamiento que se hace más evidente hacia la zona de Colinas Bajas (contraescarpes B y C en fig.2). Adicionalmente en el límite con el frente montañoso principal, cerca de la población de Galicia es posible seguir un contraescarpe de dirección NNE en una longitud aproximada de 3 km (A en fig.2).

El crecimiento activo de pliegues que afecta el Grupo Valle se expresa en una serie de terrazas erosivas, que se desprenden del corazón de un anticlinal en la margen izquierda del río Bugalagrande (fig.2). Estas estructuras pertenecen al conjunto de geoformas descritas en López et al. (2004b):

Una suave flexura de los depósitos suprayacentes del Cuaternario sobre los flancos de la estructura.
Pequeñas cuencas piggy-back recientes desarrolladas atrás de algunos de los anticlinales.
Grupos de terrazas erosivas que se conservan en el corazón de los anticlinales, generadas por la acción de los ríos que tienen suficiente energía para cortar los ejes anticlinales.
Disección progresiva aguas abajo de algunos de los anticlinales dejando terrazas elevadas cada vez más empinadas que se truncan hacia el anticlinal que está aguas arriba.
Suave abombamiento de la superficie, en algunos casos con cresta evidente hacia uno de los flancos.
Incisión profunda de los ríos principales dejando terrazas colgadas mientras que los drenajes secundarios se alteran. Cuando el río corta alrededor de un cierre periclinal se forman terrazas no pareadas. El número de terrazas siempre es mayor en el lado interno del anticlinal.

Evidencias en el registro estratigráfico. En varios sitios, la Formación La Paila emerge a manera de altos estructurales. En el sector norte del río Bugalagrande, sobre la carretera que conduce a Galicia, datos tomados del registro estratigráfico permiten explicar el estilo estructural y las geoformas descritas en este trabajo:

Fallas de tendencia general NS/W que afectan la Formación La Paila muestran una componente principal de rumbo (fig.3).

Grietas rellenas con paleosuelos del Holoceno, estarían relacionadas con fallas normales producto del momento flector, ubicadas hacia la charnela de los anticlinales.

Interpretación. La presencia de los contraescarpes en el borde de las Colinas Bajas y las evidencias de fallas de flexura en la *localidad de Tulúa*, sugieren que estos contraescarpes son

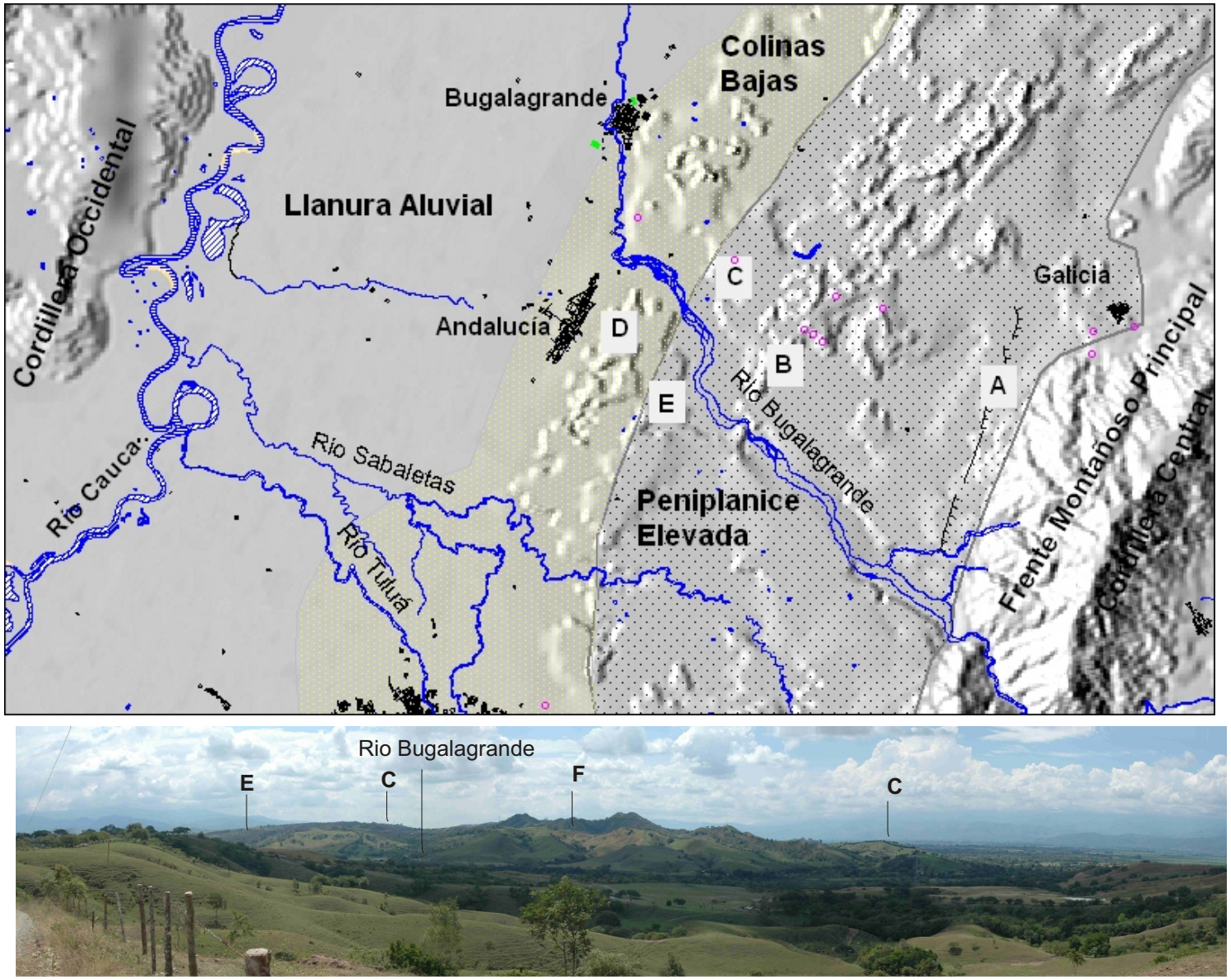

Figura 2. Vista desde el Norte del río Bugalagrande. *Localidad Río Bugalagrande*. A, B y C: Contraescarpes. D: Anticlinal de Andalucía, E: Basculamiento de depósitos Cuaternarios, F: Terrazas erosivas.

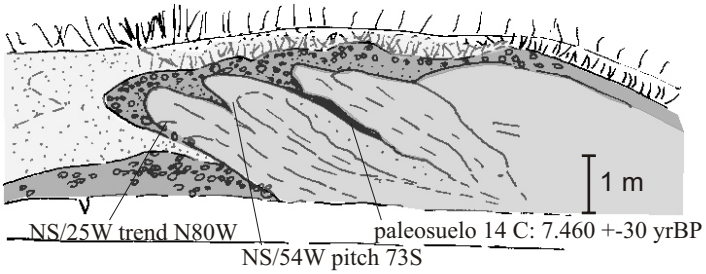

Figura 3. En la fotografía superior una Falla NS con componente principal de rumbo afectando unidades de la Formación La Paila en el sitio B en fig.2. La Fotografia y esquema inferiores muestran la Falla NS inversa que corta la terraza del rio Morales en el sitio B en fig.4. En este lugar se dataron paleosuelos por 14C que proporcionaron edades en el Holoceno.

manifestaciones de la emergencia de fallas de bajo ángulo o fallas ciegas que emergen aprovechando los planos de estratificación. Las características de estos escarpes, también denominados escarpes de flexura en López et al. (2004a), son similares a las descritas por (Audemard, 1999) para referirse a la *Flexura Andina* o escarpe tectónico del borde oriental de la Cordillera Oriental, en el piedemonte con los Llanos de Colombia y Venezuela.

La posición del contraescarpe A en el pie del Frente Montañoso Principal junto con el basculamiento de depósitos cuaternarios, sugieren que el eje de rotación se localiza al inicio de la Peniplanicie Elevada en el este.

El hecho de que fallas NS con componente de rumbo no se propaguen dentro de los depósitos cuaternarios, podría ser un indicador de una fase de deformación previa a la que originó el basculamiento de los cuaternarios. Por el contrario las estructuras de tendencia general NS que afectan el Cuaternario muestran una componente principal inversa, aspecto que es evidente en las localidades de Tulúa y Sonso.

Tulúa

Evidencias geomorfológicas. Este sector, prolífico en deformaciones recientes, permitió documentar rasgos geomorfológicos útiles para la identificación y caracterización de fallas ciegas. Las geoformas desarrolladas en este sector inducen comportamientos particulares en la red de drenaje tal como se explican más profusamente en López et al. (2004a; 2004b). Patrones similares de drenaje han sido descritos por Audemard (2003) en los llanos de Venezuela y propuestos por este mismo autor como indicadores de propagación de fallas en el subsuelo (fallas ciegas).

Entre las geoformas identificadas en esta localidad resaltan:

> Colinas Bajas del piedemonte. Estas geoformas presentan un eje alargado de dirección NS. En la fig.4 se ubica una de esas colinas que fue seccionada por obras de la vía principal que entra a la ciudad de Tulúa. Otra colina se encuentra en la margen sur del río Tulúa.
>
> Terrazas NW. Corresponden a abombamientos suaves del terreno con un eje alargado en dirección NW, observados principalmente entre Tulúa y Amaime. Estas geoformas son delineadas por la red de drenaje, como en Tulúa, donde la terraza del río Morales es cortada en su terminación oeste por fallamiento de dirección NS (fig.4).
>
> Terrazas NS. A escala mas local, existe una serie de terrazas con eje largo NS en la margen derecha del río Tulúa (fig.4). Estas terrazas están limitadas o seccionadas en el norte y sur por lineamientos de dirección ENE.

Evidencias en el registro estratigráfico. Las geoformas descritas anteriormente tienen manifestaciones que son reconocibles en cortes del terreno al noreste de Tulúa. En estas secciones fue posible deducir la cinemática de las fallas que afectan las unidades del Grupo Valle y el Cuaternario que le suprayace en discordancia.

Una colina NS y la terraza NW del río Morales fueron cortadas por la construcción de la variante Tulúa. En ambos cortes se identificaron una serie de fallas imbricadas de vergencia

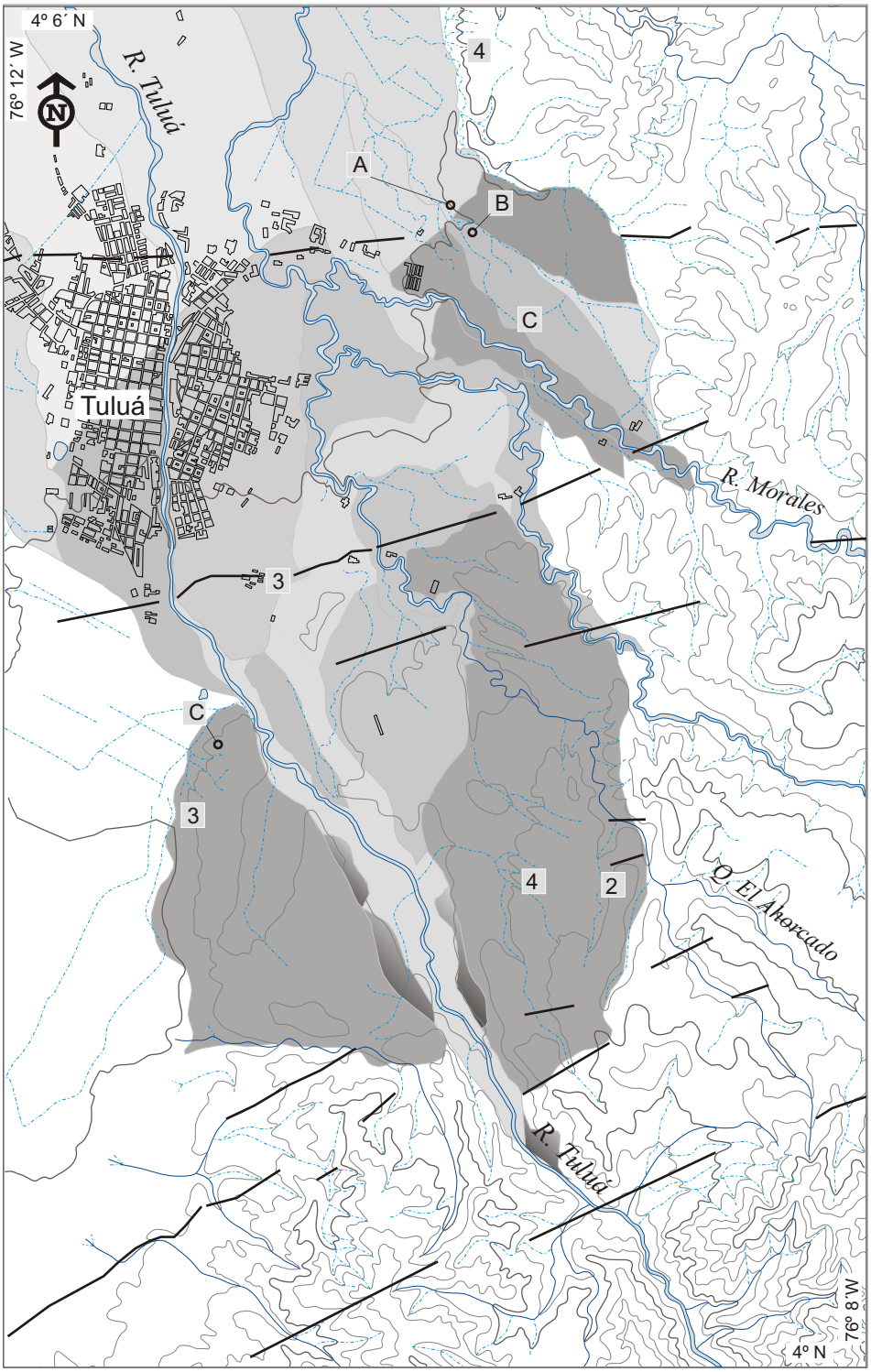

Figura 4. Localidad de Tulua. En tonos de gris la cubierta Cuaternaria, depositos del Abanio de Tulua y sus afluentes. En letras sitios con evidencias en el registro estratigráfico, en números arábigos sitios con evidencias geomorfológicas. Escarpes de presión: A) Oreja de Tulua, B) Variante Tulua, C)Sur río Tulua, 1) Terraza NW Río Morales, 2) terrazas NS, 3) Escarpes de presion, 4) contraescarpes.

al Este, que emergen a través de planos de estratificación de la Formación La Paila, donde la más oriental sobrecorrió paleosuelos holocenos y desplazó igualmente una unidad de conglomerados que suprayace en discordancia la Formación La Paila (fig.3).

Interpretación: Las colinas que conforman el piedemonte occidental de la Cordillera Central han sido interpretadas como *escarpes de presión* (senso Philip et al., 1992), pero en este caso formados por fallas inversas de dirección NS, que se propagan hacia el oeste y sus antitéticas de vergencia al este. La combinación de estas estructuras dan como resultado formas que también se conocen como estructuras en pop-up (véase López et al., 2004a). Estos escarpes en conjunto conformarían un escarpe de flexura.

Debido a la posición particular de las terrazas NS en el área de Tuluá, ubicadas entre dos lineamientos ENE, se infiere que ellas representan el crecimiento de fallas antitéticas originadas en una estructura ENE más profunda. Es importante anotar que Las terrazas están limitadas por escarpes de flexura y retrocabalgamientos (López et al., 2004a).

Los abombamientos NW se atribuyen a la expresión de una rampa lateral de una falla de vergencia al oeste que emerge plegando la superficie del terreno. La inmersión de estos abombamientos señalaría la posición de las fallas de dirección NS.

CONCLUSIONES

Los depósitos deformados de la pila del Terciario, subyacentes a los del Cuaternario, tienen una historia tectónica previa que influye sobre la cobertera. Algunas fallas han continuado su actividad y están afectando los depósitos recientes. Una de esas primeras manifestaciones es el plegamiento que se genera cerca de la emergencia de esas fallas. Aquí se sugiere que estos pliegues pueden ser utilizados como indicadores de fallas ocultas dentro de un estilo tectónico de piel gruesa, enraizado bajo el flanco occidental de la Cordillera Central.

Los rasgos de tectónica activa sustentados en este sector también pueden observarse a escala regional. Cerca a la horquilla del río La Vieja (conocido como el codo de la Vieja, abanico del Quindío) directamente relacionada con la Serranía de Santa Barbara, varios afloramientos donde aflora la Formación Zarzal muestran las evidencias estructurales (Moreno-Sanchez et al., 1994) que sustentan el estilo estructural activo.

El basculamiento y abombamiento del terreno, contraescarpes, escarpes de flexura y terrazas, revelan la actividad de pliegues parcial o totalmente cubiertos generados por el crecimiento de fallas inversas que cortan sedimentos cada vez mas viejos hacia el orógeno y sedimentos cada vez más jóvenes hacia el valle aluvial del río Cauca

La deformación dúctil de la cubierta cuaternaria a escala más regional, entre las latitudes de Amaime – Bugalagrande y Cartago (López et al., 2003), combinada con deformación frágil a escala local, son pruebas de la actividad reciente de un sistema de fallas principal de vergencia al Oeste, que forman parte de un cinturón de cabalgamiento plegado que está activo o en reactivación y que genera la Saliente de Buga.

El estilo estructural identificado en el piedemonte occidental de la Cordillera Central entre las latitudes de Bugalagrande y Amaime es similar a aquel del piedemonte oriental de la Cordillera Oriental, ya sustentado en múltiples trabajos con sísmica de reflexión petrolera del borde llanero.

AGRADECIMIENTOS
Los resultados presentados en este artículo forman parte de un estudio mas ambicioso denominado "Hacia un modelo de la sismicidad del Sur-Occidente Colombiano: investigaciones paleosísmicas en la región del Valle del Cauca" parcialmente financiado por COLCIENCIAS (Código 1106-05-10117), con quien estamos muy agradecidos. Estas investigaciones se llevaron a cabo en el marco de una tesis de Maestría en la Universidad EAFIT, el apoyo brindado por esta institución es muy apreciado. Sin el Director de la Corporación OSSO, el Prof. Hansjürgen Meyer este subproyecto no se habría llevado a cabo.

REFERENCIAS

Acosta, C. E. A., 1978, El Graben Interandino Colombo-Ecuatoriano: Boletín de Geología UIS, v. 26, p. 63-199.

Audemard, F. A., 1999, Morpho-structural expression of active thrust fault systems in the humid tropical foothills of Colombia and Venezuela: Z. Geomorph. N. F, v. 118, p. 227-244.

Audemard, F. E., 2003, Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Merida Andes, Venezuela: Quaternary International, v. 101-102, p. 43-65.

Barlow, C. A., 1981, Radar geology and tectonic implications of the Chocó Basin, Colombia, South America: Z. Geomorph. N. F, v. Suppl. Bd. 118, p. 227-244.

Cardona, F. J., and Ortíz, M., 1994, Aspectos estratigráficos de las unidades del intervalo Plioceno-Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta de definición para la Formación Pereira: Universidad de Caldas.

Crowell, J. C., 1982, The Violin Breccia, Ridge Basin, southern California, *in* Crowell, J. C., and Link, M. H., eds., Geologic history of the ridge basin, southern California, Pacific Sec. S.E.P.M.: Los Angeles, p. 89-98.

De Armas, M., and McCourt, W. J., 1984, Mapa Geológico Preliminar. Plancha 261 - Tuluá: Ingeominas, scale 1:100.000.

López, M. C., Velásquez, A., Toro, G., Audemard, F. A., Meyer, H., and Hermelín, M., 2003, Evidence of Holocene Compression in the Valle del Cauca, along the western foothills of the Central Cordillera of Colombia, *in* The XVI INQUA Congress. Shaping the earth. A Quaternary perspective. Perspectives in paleoseismology siglo XXI, Reno, Nevada.

López, M. C., Audemard, F. A., and Velásquez, A., 2004a, Compresión Holocena en el Valle del Cauca, Colombia, *in* I Seminario Latinoamericano de Sismología, II Congreso Colombiano de Sismología, Armenia.

-, 2004b, Paleoseismic evidence of Holocene compression at Tulua in the valle del Cauca, along the west foothills of the Central Cordillera of Colombia: Geological Society of America, v. En revisión.

McCourt, W. J., 1984, The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, v. Series 84, p. 8-49.

McCourt, W. J., Millward, P., and Espinosa, A., 1985, Mapa Geológico preliminar, Plancha 280-Palmira. Escala 1:100.000: Ingeominas.

Mendez, R., comunicación personal, 2001, Procedencia de las cenizas volcánicas reportadas en Tuluá y Bugalagrande.

Meyer, H., 2000, Formulación del proyecto a Colciencias: Hacia un modelo de la sismicidad en el Sur Occidente Colombiano: Investigaciones Paleosísmicas en la Región del Valle del Cauca. Observatorio Sismológico del Sur Occidente, OSSO.

Moreno-Sanchez, M., Pardo-Trujillo, A., and Gomez-Cruz, A. d. J., 1994, Evidencias de actividad neotectónica en la carretera Cartago-Ansermanuevo (Valle del Cauca, Colombia), *in* III Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Armenia, Colombia, p. 181-191.

Nelson, H. W., 1957, Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the section between Ibagué and Cali: Leidse Geologische Mededlingen, v. 22, no. 1-76.

Nivia, A., 2001, Mapa Geológico del Departamento del Valle: Ingeominas.

Philip, H., Rogozhin, E., Cisternas, A., Bousquet, J. C., Borisov, B., and Karakhanian, A., 1992, The American earthquake of 1988 december 7; faulting and folding, neotectonics, and paleoseismicity: Geophy. J. Int, v. 110, p. 141-158.

Schwinn, W. L., 1969, Guidebook to the Geology of the Cali Area, Valle del Cauca, Colombia: Colombian Society of Petroleum Geological and Geophysicists.

Stutzer, O., 1934, Contribución a la geología del Foso Cauca-Patía: Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, v. 2, p. 69-140.

Toro, G., and Marín, W., 1994, Tefraestratigrafía del Valle y Sur del Quindío. Informe de Campo: Universidad Eafit – Ingeominas.

Van der Hammen, T., 1958, Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiense continentales y tectonogénesis de los Andes Colombianos: Boletín Geológico, Servicio Geológico Nacional, v. 6, no. 1-3, p. 67-128.