

# RESULTADOS PRELIMINARES DEL PRIMER ESTUDIO PALEOSISMOLÓGICO A LO LARGO DE LA FALLA DE BUCARAMANGA, COLOMBIA

(Preliminary results of the first paleoseismologic study along the Bucaramanga fault, Colombia)

Hans Diederix\*, Catalina Hernández M.\*, Eliana Torres J.\*, Jairo Alonso Osorio\*\*, Paola Botero\*\*\*

\*Ingeominas, Bogotá, Colombia, [hdiederix@ingeominas.gov.co](mailto:hdiederix@ingeominas.gov.co)  
 \*\*Universidad de Buenos Aires, Argentina, [josorionaranjo@gmail.com](mailto:josorionaranjo@gmail.com)  
 \*\*\*Universidad Nacional Autónoma de México, [pbotero@gmail.com](mailto:pbotero@gmail.com)

(Recibido el 14 de julio de 2009 y aceptado el 03 de septiembre de 2009)

**Resumen:**

La Falla de Bucaramanga es la de mayor expresión fisiográfica en Colombia; se extiende desde Aguachica, en el norte, hacia Bucaramanga, en el Sur, y exhibe indicios morfotectónicos que atestiguan un alto grado de actividad durante el Cuaternario. Un reciente levantamiento neotectónico detallado en el corredor de la falla permitió identificar sitios con potencial paleosismológico. El sitio seleccionado está en una cantera de calizas a 4,5 kilómetros al norte de Bucaramanga, en el flanco norte del río Surata. Corresponde a una cuenca colgada de origen tectónico a 250 m al oeste de la traza principal, rellena por cuñas coluviales y una secuencia reciente de horizontes lacustre finos con material orgánico. Se realizó un levantamiento detallado a escala 1:10 y se tomaron diecisiete muestras que cubren el paquete de sedimentos orgánicos. Se interpreta como una cuenca tectónica o "sagpond" controlada por la falla principal, donde cada horizonte sedimentario registra el hundimiento co-sísmico; es decir, la evidencia estratigráfica de sismos prehistóricos. Los resultados de C14 oscilan entre 8300-930 años-BP, y su interpretación preliminar apunta a la ocurrencia de 8 sismos holocenos con intervalos de recurrencia de aproximadamente 1000 años y magnitudes entre 7,0-7,4 Ms.

**Abstract:**

The Bucaramanga Fault is the fault in Colombia with the strongest physiographic expression. It extends from Aguachica in the north southward to Bucaramanga and beyond. Abundant morphotectonic indices testify to a high degree of activity during the Quaternary. A recent detailed regional study along the main fault corridor has identified several promising locations with potential for paleoseismologic trench studies. The site actually selected was situated in a limestone quarry at 4,5 km north of Bucaramanga town on the north bank of the Surata river. It concerns a small tectonic basin in a hanging valley situated 250 m to the west of the main Bucaramanga Fault and is filled with a series of colluvial wedges and fine grained lacustrine deposits with abundant organic material. Detailed logging of the outcrop face at a scale of 1:10 was carried out and seventeen samples were taken from the organic rich levels for radiocarbon dating. Basin evolution is controlled by movement of the principal fault trace in which each sedimentary level is a registration of co-seismic subsidence and represents the stratigraphic evidence of pre-historic earthquakes. The result of radiocarbon dating show ages that range from 8300-930 y/BP and a preliminary interpretation suggests the occurrence of 8 holocene seismic events during the last 8300 years and magnitudes in the order of 6,5-7,0 Ms.

**Palabras clave:** Falla de Bucaramanga, neotectónica, paleosismología, sagpond, estratigrafía sísmica, amenaza sísmica.

**Key words:** Bucaramanga Fault, neotectonics, paleoseismology, sagpond, seismic stratigraphy, seismic hazard.

## 1. INTRODUCCIÓN

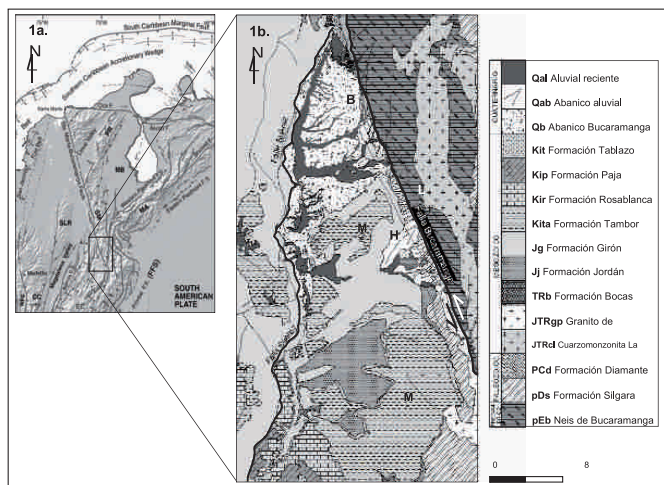
El presente trabajo corresponde al primer estudio paleosismológico adelantado sobre la Falla de Bucaramanga y fue la culminación de un levantamiento neotectónico sobre el tramo sur de la falla, realizado durante los años 2007 y 2008, por el Grupo de Investigación Neotectónica de INGEOMINAS.

La Falla de Bucaramanga es el segmento sur del sistema de fallas de Santa Marta-Bucaramanga, que se extiende desde el Mar Caribe, en el Norte, hasta el pueblo de Ricaurte, en el Sur, cubriendo una distancia de 550 km (Paris *et al.*, 2000). Dicho sistema está compuesto de tres segmentos principales en arreglo escalonado derecho. El segmento norte, conocido como la Falla de Santa Marta propiamente dicha, define el borde occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta y parece estar constituido de una serie de rampas laterales asociadas con fallas de cabalgamiento en el Macizo de Santa Marta. El segmento central cruza una llanura aluvial cuaternaria muy extensa de los valles de los ríos Magdalena y César, donde se oculta por una amplia distancia, para luego continuar

hacia el sur, en donde es conocida como la Falla Boloazul (Ingeominas, 2008). El segmento sur, la Falla de Bucaramanga propiamente dicha, traslapa hacia el oeste a la Falla Boloazul, por cerca de 90 km, entre el municipio de Aguachica, al norte, y la localidad de Altigracia, al sur, para continuar en esa dirección, vía a Bucaramanga, hasta el pueblo de Ricaurte. Dicho traslape ha generado lo que es conocido como el Dúplex de Ocaña (Ingeominas, 2008) (ver figura. 1).

Se trata de un sistema de falla transcurrente lateral izquierdo con una componente vertical importante que ha causado el levantamiento del Macizo de Santander, con un movimiento horizontal acumulativo estimado por varios autores entre 30 y 224 kilómetros, estimativos, que no están basados en documentación suficientemente sustentada y que además carecen de un marco temporal (Boinet *et al.*, 1989, Ujueta, 2003).

El presente trabajo describe el sitio con mejor potencial paleosismológico, ubicado en la cantera de calizas de Cementos Cemex, a 4,5 km al norte de la ciudad de Bucaramanga, en la que uno de los frentes de explotación



**Figura 1.** Marco tectónico regional. a) Mapa neotectónico de Colombia, modificado de Taboada *et al* 2000. MB Bloque Maracaibo, PR Serranía de Perijá, SM Macizo de Santander, MA Andes de Mérida, EC Cordillera Oriental, CC Cordillera Central, FFS Sistema de fallas frontales. b) Detalle de la geología de la zona, donde la Falla de Bucaramanga separa las hundidas mesetas de Ruitoque (MR) y los Santos (MS) de las elevadas rocas ígneo-metamórficas del Macizo de Santander. B Ciudad de Bucaramanga, L Bloque levantado, H Bloque hundido.

reciente intersectó una pequeña cuenca colgada (*sagpond*) con sedimentos lacustres y ricos en materia orgánica, exhibiendo un corte perfecto para adelantar un levantamiento paleosismológico en el que se apliquen los métodos que se practican en trincheras. Este estudio mostró una secuencia de sedimentos orgánicos y una serie de cuñas coluviales, que fueron interpretadas como cósmicas, sedimentos de los cuales se tomaron diecisiete muestras para dataciones de radiocarbono, dando como resultados edades del Holoceno.

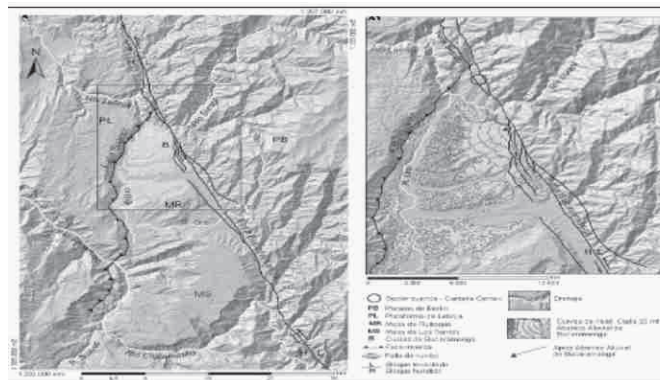
## 2. ENTORNO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO

La Falla de Bucaramanga, en la zona de estudio, al norte y sur de la ciudad del mismo nombre, determina el frente montañoso que marca el límite occidental del Macizo de Santander con la franja hundida de La Mesa de los Santos, La Mesa de Ruitoque y el Abanico de Bucaramanga. Esta franja deprimida está limitada por la Falla de Bucaramanga, al oriente, y la Falla de Suárez, al occidente, que a la vez da lugar a un notable escarpe que define el límite oriental de la Plataforma de Lebrija. Estas dos fallas, que convergen con un ángulo de aproximadamente  $35^\circ$  a 6-8 km al norte de la ciudad, han fragmentado y levantado diferencialmente una planicie de erosión (penillanura) de edad mio-plioceno (Julivert, 1959), remanentes de la cual se encuentran preservados sobre el Macizo de Santander, en el Páramo de Berlín, la Mesa de los Santos, la Mesa de Ruitoque y la Plataforma de Lebrija (Ver figuras 1 y 2).

La Falla de Bucaramanga tiene una expresión fisiográfica muy fuerte y bien notable en imágenes satelitales, modelos digitales del terreno y fotografías aéreas, que sugieren un alto grado de actividad cuaternaria. Además,

existe evidencia abundante de actividad cuaternaria y holocena, que permite deducir un desplazamiento lateral izquierdo con componente vertical, así, los índices geomorfológicos más importantes que lo confirman son la posición, desplazada hacia el norte, del original drenaje alimentador del abanico, el Río Suratá, y el más alto grado de disección del sector sur del abanico (ver figura 2).

En el sector de Bucaramanga existe gran cantidad de índices geomorfológicos, como evidencia de la actividad y el sentido de movimiento de la falla, que incluyen lagunas (*sagponds*) y lomos de falla, lomos de obturación, silletas, cambios de pendiente, facetas triangulares, drenajes desplazados y desviados, interfluvios desplazados, trincheras de falla y, particularmente, abundantes lomos en gancho, que constituyen buenos indicadores del sentido de lateral izquierdo de la falla. La preservación de una cantidad tan grande de indicios geomorfológicos en el ambiente morfoclimático húmedo tropical, característico de la zona, es argumento en favor de un alto grado de actividad cuaternaria de la falla.



**Figura 2.** a) Contexto geomorfológico regional en la zona de convergencia de las fallas Suárez y Bucaramanga. b) Detalle de la ubicación del sitio de estudio y su relación con las fallas principales y el Abanico de Bucaramanga. Nótese la distancia entre el ápice del abanico y el río Suratá, y también la superficie plana no disectada del abanico sobre la que está construida la ciudad.

Cabe notar que el Sistema de Fallas de Santa Marta-Bucaramanga constituye el borde occidental del Bloque Triangular de Maracaibo, que está expulsado hacia el NNE, con respecto a la placa continental de Suramérica (Ver figura 1) (Laubscher, 1987; Freymueller *et al.*, 1993; Taboada *et al.*, 2000; Trenkamp *et al.*, 2002; Audemard y Audemard, 2002; Cediél *et al.*, 2003). La esquina sur de este bloque está formada por la convergencia de las fallas de Bucaramanga y Boconó en el Macizo de Santander. La Falla de Boconó ha sido objeto de numerosos estudios paleosismológicos que establecen una tasa de desplazamiento de entre 3 y 14 mm/año (Audemard, 2003b), cuya expresión fisiográfica en imágenes satelitales, DTM, y fotografías aéreas, es muy similar a la de la Falla de Bucaramanga, lo que sugiere un mismo nivel de actividad para ambas fallas (Ver figura 1).

### 3. SITIO DEL ESTUDIO PALEOSISMOLÓGICO

De los sitios potenciales para abrir una trinchera paleosismológica, el más obvio fue una excavación en un frente de explotación en la cantera de calizas paleozoicas de la Formación Diamante, explotada por la compañía Cemex y situada a 4,5 km al norte de la ciudad, en la orilla norte del río Suratá. Este afloramiento está situado a 250 m al oeste de la traza principal de la Falla de Bucaramanga y a una distancia de 100 m de una falla satelital, al oeste, que pone en contacto las calizas con gravas cuaternarias de la terraza del río Suratá.

El sitio de interés es una pequeña cuenca colgada, interpretada como una cuenca tectónica (*sagpond*), situada en una depresión erosionada sobre la terraza cuaternaria más alta del río Suratá. Un remanente de esta terraza forma el borde occidental de la cuenca y muestra sedimentación de tipo "foreset" (Ver figura 3), mientras que su borde oriental está formado por un pequeño lomo de calizas de la Formación Diamante. Gran parte de la cuenca ha sido removida por la maquinaria y, previamente, por la erosión de una quebrada que también ha sido intervenida por las operaciones mineras. El vacío erosivo que forma la cuenca fue rellenado inicialmente sobre su base por depósitos de gravas y, posteriormente, en repetidas ocasiones, por cuñas coluviales y detríticas en su margen oriental.

En el centro de la cuenca, y parcialmente coetánea con la deposición de las cuñas, hay una secuencia de depósitos arcillosos con alto contenido de material orgánico, indicando condiciones de humedal o laguna.

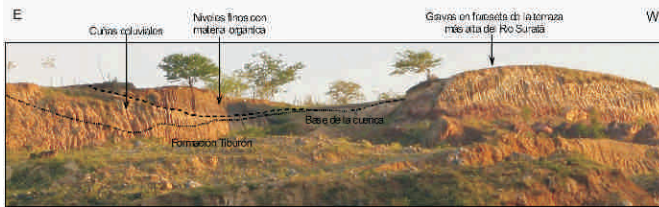


Figura 3. Panorámica general del frente de explotación minera donde queda expuesta la cuenca y su relleno sedimentario, vista hacia el sur.

### 4. LEVANTAMIENTO Y MUESTREO

Se adelantó el levantamiento paleosismológico de la pared expuesta en el frente minero, conforme a la práctica común de estudios paleosismológicos en trinchera. La pared, de 8 m de altura, expone rocas de basamento en la parte inferior, cubriendo un 50%, y sólo en la parte superior afloran depósitos cuaternarios que constituyen el verdadero interés de este levantamiento. De esta manera, sobre la porción superior se escogió la parte que cubría la zona de mayor información y, en consecuencia, la más relevante, obteniendo una superficie vertical de 12 m de ancho por 4 m de alto, sobre la que se realizó una retícula,

formando cuadrángulos de 1 m<sup>2</sup>, que luego fueron mapeados en detalle a escala 1:10 (Ver figura 4). Simultáneamente, se adelantó un levantamiento microtopográfico del área inmediatamente alrededor de la cuenca, con la ayuda de una Estación Total.

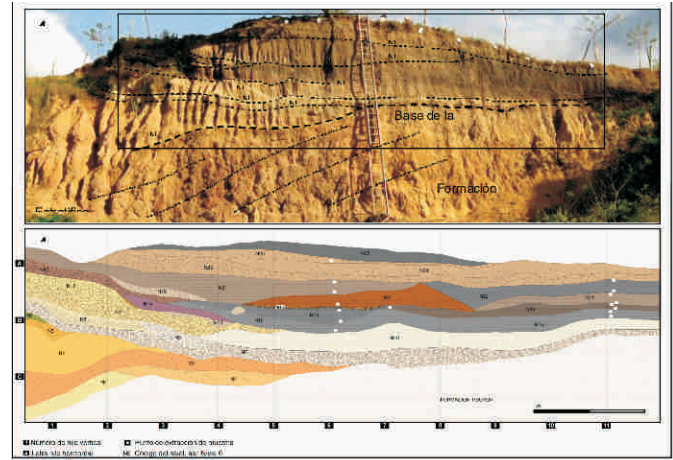


Figura 4. Frente del levantamiento paleosismológico. a) Detalle del frente de explotación levantado. Área mapeada. b) Mapeo detallado (trench log) a escala 1:10

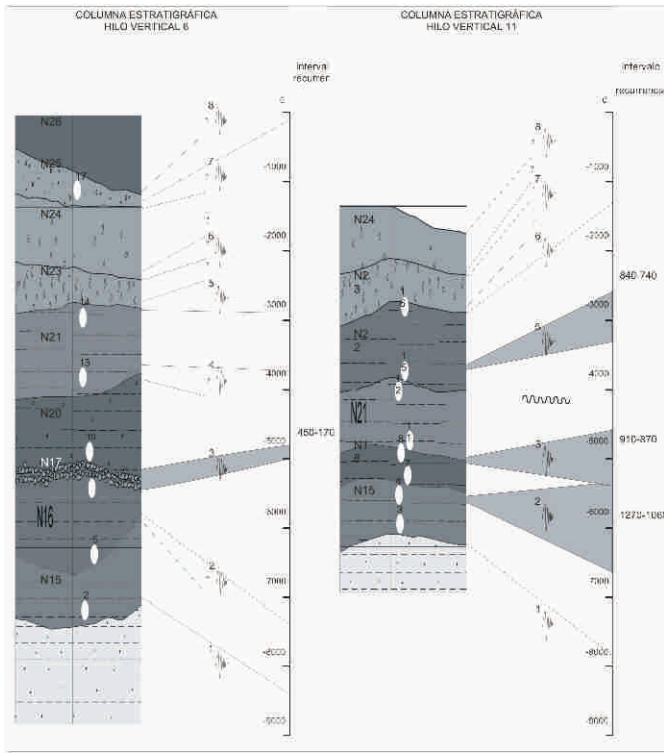
En siete niveles de arcillas orgánicas, que constituyen la parte superior del relleno de la cuenca, se tomaron diecisiete muestras, base y techo de cada nivel, para ser datadas con el método de radiocarbono C<sup>14</sup> por tecnología AMS, cuyos resultados se muestran en la tabla 1, junto con los calibrados para un intervalo de 2σ; es decir, fechas corregidas por dendrocronología, en las que el presente se refiere al año 1950. La figura 5 presenta el registro de ocho paleosismos con edades promedio y margen de variación para el período comprendido entre 8300 años BP y 930 años BP, indicando un intervalo de recurrencia de aprox. 1000 años.

### 5. ESTRATIGRAFÍA DEL RELLENO SEDIMENTARIO DE LA CUENCA

La base de la cuenca está constituida por sedimentos de la Formación Tiburón, que a su vez descansa discordantemente sobre la Formación Diamante; base sobre la que se depositaron los primeros tres niveles de materiales detríticos, como fase inicial del relleno de la cuenca.

Estos niveles, en forma de cuñas coluviales constituidas únicamente por fragmentos de la Formación Tiburón, se acumularon en la parte oriental profunda de la cuenca, con una dirección de transporte del SW al NE (Ver figura 4). Los siguientes tres niveles acuñados consisten en conglomerados clasto-soportados masivos, mal seleccionados y muy angulares, de tamaños grava y guijo, compuestos por granitos, gabros, chert, lodolitas silíceas y cuarzo lechoso, todo embebido en una matriz de arcilla rojiza. La composición de los clastos sugiere una





**Figura 5.** Columnas estratigráficas levantadas a lo largo de los hilos verticales 6 y 11, se indican los eventos paleosísmicos con su posición estratigráfica, edad e intervalos de recurrencia, registrados por los sedimentos que rellenan la cuenca tectónica. Paleosismo, muestra.

**Tabla 1.** Resultados de laboratorio y edades calibradas de 14C para las muestras de sedimentos orgánicos: aguas ácidas.

No de Muestra	Edad de Radiocarbono Medida (BP)	Edad de Radiocarbono Convencional (BP)	Edades Corregidas (cal. años BP) intervalo 2σ y probabilidad
1 N12 tope	6600±50	6750±50	7680-7560 (95%); 7530-7520 (95%)
2 N15 base	7400±50	7460±50	8380-8180 (95%)
3 N15 base	7020±50	7080±50	7990-7830 (95%)
4 N15 tope	5810±60	5870±60	6840-6820 (95%); 6800-6540 (95%)
5 N16 base	6430±50	6490±50	7480-7310 (95%)
6 N16 tope	4430±40	4510±40	5310-5040 (95%); 5000-4980 (95%);
7 N18 base	4780±40	4840±40	5640-5580 (95%); 5530- 5480 (95%)
8 N18 tope	4680±40	4740±40	5590-5440 (95%); 5410-5320 (95%)
9 N18-7D	4540±40	4610±40	5460-5380 (95%); 5330-5290 (95%)
10 N20 base	4030±40	4150±40	4830-4530 (95%)
11 N21 base	3910±40	4000±40	4560-4550 (95%); 4540- 4410 (95%)
12 N21 tope	2530±40	2680±40	2860-2740 (95%)
13 N21 base	3190±40	3350±40	3690-3470 (95%)
14 N21 tope	2490±40	2690±40	2860-2750 (95%)
15 N22 base	1850±40	2040±40	2120-1900 (95%)
16 N22 tope	1060±40	1250±40	1280-1070 (95%)
17 N25-6D	920±40	1100±40	1070-930 (95%)

Los datos están reportados como RCYBP (radiocarbon years before present, "present" = AD 1950). La Edad de Radiocarbono Convencional representa la Edad de Radiocarbono Medida corregida por fraccionamiento isotópico, que se calcula usando el delta de 13C. La Edad de Radiocarbono Convencional no está calibrada al calendario, los resultados calibrados al calendario se calculan desde la Edad de Radiocarbono Convencional y están denominados como "Edades Corregidas"; estas edades calibradas a partir de correcciones dendrocronológicas, se expresan en cal. yr BP y están ajustadas a los 5 años más cercanos y fijadas al año 1950 (definido como presente). N12 tope: nivel 12, tope.

fuente más alejada, situada en el Macizo de Santander, al lado oriental de la Falla de Bucaramanga. Suprayaciendo estos niveles de cuñas coluviales-detríticas está un nivel de gravas de la misma composición que cubre todo el ancho de la cuenca y descansa discordantemente sobre rocas del basamento de la Formación Tiburón. (Ver figura 4). Sobre esta unidad conglomerática, en la parte central y occidental de la cuenca, inicia una secuencia de sedimentos finos con abundante material orgánico que les da un color gris oscuro a negro (Ver figura 4). En la base de esta secuencia se presenta un nivel de arcilla blanca con lentes arenosos y carencia de material orgánico, que corresponde a un depósito subaéreo. Hacia la parte oriental de la cuenca, este nivel interdigita con cuñas detríticas provenientes del complejo ígneo-metamórfico del Macizo (Ver figura 4). La secuencia de sedimentos finos suprayacente consiste en ocho niveles de material fino y arcilloso, con alto contenido de material orgánico y de color gris oscuro a negro, que cubren todo el ancho de la cuenca y que, con toda probabilidad, han sido depositados en condiciones de humedal o laguna, con abundante vegetación acuática o semi-acuática.

Finalmente, sobre toda la secuencia, se encuentran tres niveles de arcillas orgánicas de color café con contenido de clastos angulares.

## 6. RECONSTRUCCIÓN EVOLUTIVA DE LA CUENCA

Se ha observado que la base de la cuenca generada por la Formación Tiburón tiene una inclinación hacia el oriente, con buzamiento de los estratos en la misma dirección, probablemente causada por un basculamiento tectónico. Este hecho creó una depresión en la esquina nororiental del afloramiento, rellena por una serie de cuñas coluviales provenientes de la Formación Tiburón, que representan la primera fase de sedimentación de la cuenca, mientras que las cuñas superiores contienen rocas ígneo-metamórficas del Macizo de Santander, del lado oriental de la Falla de Bucaramanga, indicando un cambio de régimen con aporte del otro lado de la cuenca. El centro de la cuenca está dominado por la presencia de sedimentos finos orgánicos, que representan una próxima fase de desarrollo durante la cual dominaron condiciones tranquilas, desprovistas de aporte de material grueso, y con predominio de depósitos finos arcillosos en un ambiente de humedal, lo que resultó en la producción de abundante material vegetal contenido en una secuencia de niveles oscuros hasta negros.

En un intento de reconstruir la paleogeografía y el desarrollo de la cuenca y sus sedimentos, es pertinente inventariar un número de características morfotectónicas del terreno que puedan dar claves sobre la evolución de la cuenca y su entorno, incluyendo los siguientes rasgos:



a) La base de la cuenca está formada por la Formación Tiburón, cuyo material sólo ha sido encontrado en las cuñas más antiguas y con aparente dirección de transporte del SW al NE.

b) Las cuñas detríticas, encima de los depósitos de cuñas de la primera fase de sedimentación, consisten enteramente de material ígneo-metamórfico originado en el Macizo de Santander, que aflora al este de la Falla de Bucaramanga, indicando un cambio en la dirección de transporte SW-NE a NE-SW.

c) El descabezamiento del drenaje que alimentaba la cuenca con cuñas detríticas pudo haber sido la causa de la generación de un ambiente tranquilo y propicio para la acumulación de materia orgánica.

d) La cuenca se ubica a sólo 250 m de la traza principal de la Falla de Bucaramanga y a sólo 100 m de una falla satelital que cruza la cantera por el oeste y es paralela a la primera.

e) El desplazamiento de la Falla de Bucaramanga, lateral izquierdo con componente vertical bien registrado en la morfotectónica, ha generado modificaciones en los canales de drenaje, obturación y captura, erosión regresiva y migración lateral de fuentes de materiales. Todos estos fenómenos han transformado la topografía del entorno de la cuenca y, a la vez, han quedado registrados en la estratigrafía del relleno sedimentario.

f) Se han notado cambios en el carácter de los sedimentos de la cuenca que, a su vez, reflejan cambios en las condiciones de sedimentación y aportes de materiales.

## 7. INTERPRETACIÓN

La secuencia y las características de los sedimentos que rellenan la cuenca con su serie de cuñas detríticas y niveles de arcillas orgánicas sugieren condiciones de sedimentación sintectónica y un régimen de sedimentación episódica. Esta periodicidad se interpreta como un proceso de hundimiento co-sísmico; es decir, cada nivel es el resultado de un período de relleno que sucede a un evento de hundimiento provocado por un sismo, de tal manera que el tope de cada nivel representa el "horizonte evento" (*event horizon*) que formó la superficie en el momento que ocurrió un sismo (Pantosti *et al.*, 1993). Esta interpretación implica el registro de veintitrés sismos en la columna estratigráfica de la cuenca. Los espesores de cada nivel son un indicio de la magnitud del movimiento vertical en superficie, aunque no necesariamente representan el total de la componente vertical.

Existen tres cambios importantes en el carácter de la sedimentación. La fase inicial produjo cuñas

coluvies/detríticas con materiales originados en la roca base de la cuenca y transportados hacia la parte más profunda de la misma en dirección NE. En la siguiente fase predominan las cuñas detríticas compuestas por fragmentos gruesos angulares que se interpretan como conos de deyección depositados por flujos canalizados y muestran una fuente de materiales en el Macizo de Santander, al otro lado de la Falla de Bucaramanga. Durante la última fase, este aporte de materiales gruesos del Macizo acabó por el descabezamiento del drenaje alimentador, ubicado inmediatamente al noreste de la cuenca, dando paso al dominio de condiciones tranquilas, húmedas, que generaron acumulación de arcillas orgánicas. Se considera que estos cambios son el resultado de la modificación de la morfología del terreno causada por los movimientos co-sísmicos de la falla.

## 8. IMPLICACIONES PARA LA AMENAZA SÍSMICA

De los sedimentos acumulados en la cuenca, se tomó un total de diecisiete muestras, todas directamente por debajo y por encima de los "horizontes evento", que fueron datadas para C14 con tecnología AMS, en los laboratorios Beta Analytics, en Miami, USA. Los resultados arrojaron edades del Holoceno entre 8300 años BP y 930 años BP y son la evidencia de ocho sismos en este lapso de tiempo, con intervalos de recurrencia, variando entre 400 años y 1300 años, con un promedio de 1000 años.

Asumiendo una oblicuidad del movimiento de la Falla de Bucaramanga de 15° con la horizontal y tomando como 20 cm el espesor promedio de los 7 niveles co-sísmicos datados, se convierte en una tasa de movimiento horizontal de 0,83 mm/año. El mismo ejercicio para una oblicuidad de 10° y 5° resultará en una tasa de movimiento de 1,26 mm/año y 2,56 mm/año, respectivamente.

Para hacer estimativos de la magnitud de los paleosismos, se depende -en primer lugar- de la magnitud del desplazamiento en superficie. Se ha asumido que este efecto topográfico, en el caso particular, tiene su expresión en el espesor de los niveles que, como se argumentó anteriormente, están directamente relacionados con la magnitud del hundimiento co-sísmico; sin embargo, se desconoce si la magnitud del hundimiento representa verdaderamente el total de la componente vertical del desplazamiento oblicuo de la falla. Otro factor que influye en estos estimativos es la longitud del segmento de la falla, que se puede romper como resultado de un sismo; el tramo de la Falla de Bucaramanga en la zona de estudio no da suficientes pistas para establecer los límites del segmento sísmico. No obstante, se considera razonable asumir que un sismo capaz de generar efectos superficiales equivalentes a

desplazamientos en superficie, deducidos de los espesores de los niveles encontrados en la cuenca, deben haber tenido una magnitud mínima del orden de 6,5 Ms. Se sugiere entonces que una magnitud entre 6,5 y 7,0 Ms es una posibilidad realista.

## 9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio paleosismológico es el primero que se ha emprendido sobre la Falla de Bucaramanga y el primero también en el nororiente colombiano, por lo que los resultados preliminares presentados aquí tienen una importante relevancia para los pronósticos de la amenaza sísmica en la región. Los estudios anteriores, basados principalmente en la identificación e interpretación de geoformas, marcadores e índices geomorfológicos, también corroboran la conclusión de que la Falla de Bucaramanga ha tenido alta actividad durante el Cuaternario tardío; es decir, que esta falla debe ser considerada como activa, y el registro de ocho paleosismos en un período de 8300 años del Holoceno puede ser tomado como evidencia contundente de eso.

Siendo esto un hecho, sin embargo el análisis se enfrenta a una serie de incertidumbres. Una limitante es que la cuenca (*sagpond*) está preservada sólo en parte; su verdadera extensión y geometría, al igual que su posición topográfica y su relación con los principales rasgos de la falla, no pueden ser establecidos con suficiente grado de certeza. También el hecho de que la cuenca no pueda ser relacionada con un control directo por fallamiento ha introducido incertidumbres.

La interpretación se basó en la premisa de la estratigrafía sísmica; es decir, que cada nivel de sedimentos es el efecto demorado (*delayed effect*) del hundimiento co-sísmico, y el espesor de cada nivel es el indicio de la magnitud del hundimiento y, por ende, de la magnitud del sismo. Sin embargo, no hay certeza absoluta de que el espesor de cada nivel represente el total del desplazamiento vertical en superficie, pero lo que sí se puede proyectar es que constituye un mínimo valor del desplazamiento co-sísmico y un mínimo valor de la magnitud del sismo.

## 10. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Compañía Cemex y al Dr. Héctor Mora, por su ayuda en la gestión de la analítica, en los laboratorios de Beta Analytics, Miami.

## 11. REFERENCIAS

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

- Audemard, F.E.; Audemard, F.A., (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* 345, p. 299-327.
- Boinet, T.; Bourgois, J.; Vargas, R.; Mendoza, H. (1989). La falla de Bucaramanga (Colombia): Su función durante la orogenia andina. *Revista Norandina*, Bogotá, v. 11, p. 3-10.
- Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir*, 79, p. 815-848.
- Freymüller, J.T.; Kellogg, J.N.; Vega, V., (1993). Plate motion in the North Andean region. *JGR* 98, p.21853-21863.
- Ingeominas (2008). Mapa Geológico de Colombia, Escala 1:1.000.000.
- Julivert, M. (1959). Geología de la vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, Universidad Industrial de Santander, No. 3, p.15-34.
- Laubscher, H.P. (1987). The kinematic puzzle of the neogene Northern Andes. In: *The history of mountain ranges*. Schaer, J.P., Rodgers, J. (Eds.), Princeton Univ. Press, N.J.
- Pantosti, D.; Schwartz, D.P.; Valensise, G. (1993). Paleoseismology along the 1980 surface rupture of the Irpina fault; implications for earthquake recurrence in the southern Apennines, Italy. *J. Geophys. Res.* 98, p. 15319-15341.
- Paris, G.; Machette, M.N.; Dart, R.L.; Haller, K.M. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Colombia and its Offshore Regions: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-018, 61 p., 1 plate (1:2.000.000 scale).
- Taboada, A.; Rivera, L.A.; Fuensalida, A.; Cisternas, A.; Philip, H.; Bijwaard, H.; Olaya, J.; Rivera, C. (2000). Geodynamics of the Northern Andes: subduction and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19 (5), p. 787-813.
- Trenkamp, R.; Kellogg, J.N.; Freymüller, J.T.; Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Jour. South Am. Earth Sci.*, 15, p. 157-171.
- Ujueta, G. (2003). La Falla de Santa Marta-Bucaramanga no es una sola falla; son dos fallas diferentes: la Falla de Santa Marta y la Falla de Bucaramanga. *Geología Colombiana*, No. 28, p.133-153.