

## Neotectonic activity and paleoseismological analysis in Eastern of Antioquia, in the vicinity of Medellin city - Colombia

Albeiro de Jesús Rendón-Rivera <sup>a</sup>, John Jairo Gallego-Montoya <sup>b</sup>, Jenny Paola Jaramillo-Rendón <sup>c</sup>, Adrián González-Patiño <sup>d</sup>, José Humberto Caballero-Acosta <sup>e</sup>, Claudia Patricia Lalinde-Pulido <sup>f</sup> & Luis Alberto Arias-López <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Grupo GEA, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, [arendonr@unal.edu.co](mailto:arendonr@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Universidad Nacional de Colombia-Medellin, [jjgallegm@unal.edu.co](mailto:jjgallegm@unal.edu.co)

<sup>c</sup> Universidad Nacional de Colombia-Medellin, [jjjarami@unal.edu.co](mailto:jjjarami@unal.edu.co)

<sup>d</sup> Universidad Nacional de Colombia-Medellin, [agonzalp@unal.edu.co](mailto:agonzalp@unal.edu.co)

<sup>e</sup> Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellin, [jhcaball@unal.edu.co](mailto:jhcaball@unal.edu.co)

<sup>f</sup> Sociedad Colombiana de Geología, [plalinde@hotmail.com](mailto:plalinde@hotmail.com)

<sup>g</sup> Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia-Medellin, [aarias@unalmed.edu.co](mailto:aarias@unalmed.edu.co)

Received: December 12<sup>th</sup>, 2012. Received in revised form: February 5<sup>th</sup>, 2014. Accepted: January 15<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

The aim of this investigation was the paleoseismological characterization of eastern Antioquia, using trenches analysis and detailed study of indicators of neotectonic activity, some of which had been reported in previous seismic hazard assessment studies of the Aburra Valley.

Through techniques of neotectonic, paleoseismology and also age correlation of Quaternary deposits obtained by several authors, it was found at Alcaravanes site (Marinilla Town), evidences of three seismic events with magnitudes Mw 6.4, 6.6 and 6.5 which displaced recent deposits with maximum ages of 440,000, 37,000 and 8,000 years respectively. Likewise, two prehistoric earthquakes, both with magnitude Mw 6.5 were recognized at the Hamburgo site (Guarne Town), dated between 880,000 and 37,000 years respectively, which proves the existence and activity of La Mosca fault. Finally, the Manantiales site (Rionegro Town) revealed a couple of seismic events with magnitude Mw 6.7 and 6.6 that displaced alluvial terraces in Rio Negro basin with a maximum age of onset of neotectonic deformation of 880,000 years.

Latest neotectonic findings change the perspective of seismic hazard in Medellin city and surroundings. Prehistoric earthquakes have occurred in the last million years and created small surface rupture and faulting not related with active mountain fronts. Furthermore, the evidence shows obliterated active faults and efficiency of erosion factors in modeling relief and alluvial fill in the basins of Rionegro Erosion Surface.

**Keywords:** Eastern Antioquia, Paleoseismology, Neotectonic, Seismic Hazard, Volcanic Ash

## Actividad neotectónica y análisis paleosismológico en el oriente cercano a la ciudad de Medellín – Colombia

### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal la caracterización paleosismológica de varios sitios en el Oriente Antioqueño, a partir del levantamiento de trincheras y análisis detallado de indicios de actividad neotectónica, algunos de los cuales habían sido reportados en los estudios previos de la microzonificación sísmica del Valle de Aburrá.

Mediante técnicas de neotectónica, paleosismología y correlación de dataciones en depósitos Cuaternarios obtenidas por diferentes autores en la región, se encontraron en el sitio Alcaravanes (Municipio de Marinilla), evidencias de tres eventos sísmicos con magnitudes Mw 6,4, 6,6 y 6,2 que afectaron depósitos recientes con edades máximas de 440.000, 37.000 y 8.000 años respectivamente, para una estimación muy preliminar de un periodo de retorno variable entre 313.000 y 29.000 años. Igualmente, en el punto Hamburgo (Municipio de Guarne) se interpretan dos eventos sísmicos, ambos con magnitud Mw 6,5 con edades de 880.00 y 37.000 años respectivamente, los cuales validan la existencia y actividad de la Falla La Mosca. Por último, en el sitio Manantiales (Municipio de Rionegro), se interpretó la ocurrencia de dos eventos sísmicos con magnitudes Mw 6,7 y 6,6 que afectaron únicamente las terrazas aluviales medias del río Negro, mostrando que las deformaciones neotectónicas en la región tienen una edad máxima de 880.000 años.

Las evidencias neotectónicas halladas cambian la perspectiva de la amenaza sísmica para la ciudad de Medellín y sus alrededores, mostrando la ocurrencia de sismos desde hace menos de un millón de años, con evidencias de ruptura superficial poco preservadas y fallamientos no relacionados con frentes de montaña activos. Se concluye además, la existencia de fallas obliteradas con actividad tectónica reciente

la eficiencia de los procesos erosivos en el modelado del relieve y el relleno por materiales aluviales de las principales cuencas en la superficie de erosión de Rionegro.

*Palabras claves:* Oriente Antioqueño, Paleosismología, Neotectónica, Amenaza Sísmica, Cenizas Volcánicas.

## 1. Introducción

El objetivo general de la presente investigación es realizar la caracterización paleosismológica de indicios de actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín, algunos hallados durante este proyecto y otros reportados en estudios previos (Grupo de Sismología de Medellín 2002, Lalinde 2004 y Consorcio Microzonificación 2006). Particularmente, la zona de estudio cubre un área de 1.100 km<sup>2</sup>, dentro de la jurisdicción de los municipios de El Retiro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Rionegro, Marinilla, El Santuario, Guarne, San Vicente, El Peñol, Envigado y Medellín en el departamento de Antioquia.

Esta investigación forma parte del macro proyecto de búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín que se desarrolló en varias etapas. Se estableció un nuevo marco geomorfológico, geológico y estructural; base para la evaluación paleosismológica de los indicios de actividad tectónica reciente, la cual cambia la perspectiva de la amenaza sísmica de la región. Fue financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, además contó con la colaboración directa del Capítulo Antioquia de la Sociedad Colombiana de Geología.

Geológicamente, la zona de estudio está compuesta por rocas metamórficas del Complejo El Retiro (INGEOMINAS, 2005), las cuales se hallan agrupadas hacia el sur y el occidente, así también como remanentes erosivos a manera de cerros aislados en el centro del área de investigación. Así mismo, predominan las rocas ígneas del Batolito Antioqueño, las cuales presentan un espeso perfil de meteorización cercano a 100 m y una red de drenaje rectangular y concordante, que indica un patrón de diaclasamiento homogéneo, sin mostrar alguna dirección preferencial ligada a un sistema de fallas regionales. Sin embargo, la característica principal del Oriente Cercano son los bien distribuidos de los depósitos recientes, destacándose las cenizas volcánicas con edades entre 8.000 y 37.000 años (Toro 1999 en García, 2007), depósitos coluviales o de escorrentía (Línea de Piedra) y aluviales asociados con la dinámica fluvial de la región. Dentro de estos depósitos, se destacan nueve niveles de terrazas aluviales en la superficie de erosión de Rionegro de hasta 90 m altura, las cuales tienen edades que varían entre 700.000 años y 2,4 Ma, correlacionables con algunos niveles propuestos por Page y James (1981). Además, existen terrazas aluviales bajas en las superficies de erosión de Peñol-Guatapé, San Ignacio y Santa Elena y extensos depósitos de vertiente en la base de los escarpes regionales que separan los altiplanos escalonados que componen la zona de estudio.

El marco estructural indica que las principales direcciones de lineamientos dentro de la zona de estudio tienen sentido N-S, coincidiendo con las trazas de las Fallas Rodas, La Honda y La Acuarela, las cuales han sido consideradas por algunos autores como parte del Sistema de Fallas de Romeral (Rendón, 2003; INGEOMINAS 2005), seguidos por lineamientos NEE de origen distensivo paralelos a la dirección del Valle de Aburrá y lineamientos en dirección NNW producto de la preservación en el relieve de los apófisis de rocas metamórficas. También se resalta la presencia del Sistema de Fallas de Belmira, con una fuerte expresión en fallas locales y lineamientos en sentido N30°W. Finalmente, se dividieron los lineamientos en cinco clases y se clasifican como erosivos, estructurales, geomorfológicos, gravitacionales distensivos y litológicos. En la Fig. 1, se presenta la ubicación de los once (11) indicios de actividad neotectónica más relevantes y el marco geomorfológico-estructural denominado por González (2010), Rendón y otros (2011a) y Gallego (2015).

En la subregión del Oriente Antioqueño se han registrado 407 sismos desde 1993 hasta enero de 2015, los cuales tienen magnitud variable entre 0,6 y 4,5 en la escala de Richter y profundidades entre 0 y 400 km, siendo más comunes los sismos superficiales con profundidades menores a 40 km. Los movimientos telúricos, se localizan principalmente en los municipios del Suroriente Antioqueño, asociados a fallas del Sistema Palestina con magnitudes entre 2 y 3. Los sismos en los municipios de Granada y Guatapé, se relacionan con las fallas Miraflones y Calderas con magnitudes promedio de 2, muchos de los cuales coinciden con zonas de alta inestabilidad y procesos de remoción. En los municipios de Santo Domingo, Concepción y Alejandría, existen eventos sísmicos de baja magnitud ligados a las fallas Cisneros y Nare. En el Oriente Cercano existen registros de eventos sísmicos con magnitud entre 2 y 3, asociados a la falla La Honda y probablemente a la Falla La Mosca (Gallego, 2015), entre Rionegro, San Vicente y Guarne y algunos sismos en los límites entre el Carmen de Viboral con la Unión y Cocorná (Fig. 2).

En los últimos años, varios autores han reportado indicios de actividad neotectónica en los alrededores del Oriente Cercano, tales como: Woodward Clyde Consultants (1979), Álvarez y otros (1984), Bustamante y Velásquez (1984), Page (1986), Grupo de Sismología de Medellín (2002); Rendón (2003), Lalinde (2004), Consorcio Microzonificación (2006), Rendón y otros (2011a). Por su parte, el mapa oficial de Amenaza Sísmica de Colombia considera esta zona como de amenaza sísmica intermedia, evaluación basada en intervalos muy cortos de información instrumental (20 años), histórica (500 años) y casi ninguna a nivel de neotectónica, lo que introduce un gran nivel de incertidumbre en esta estimación.

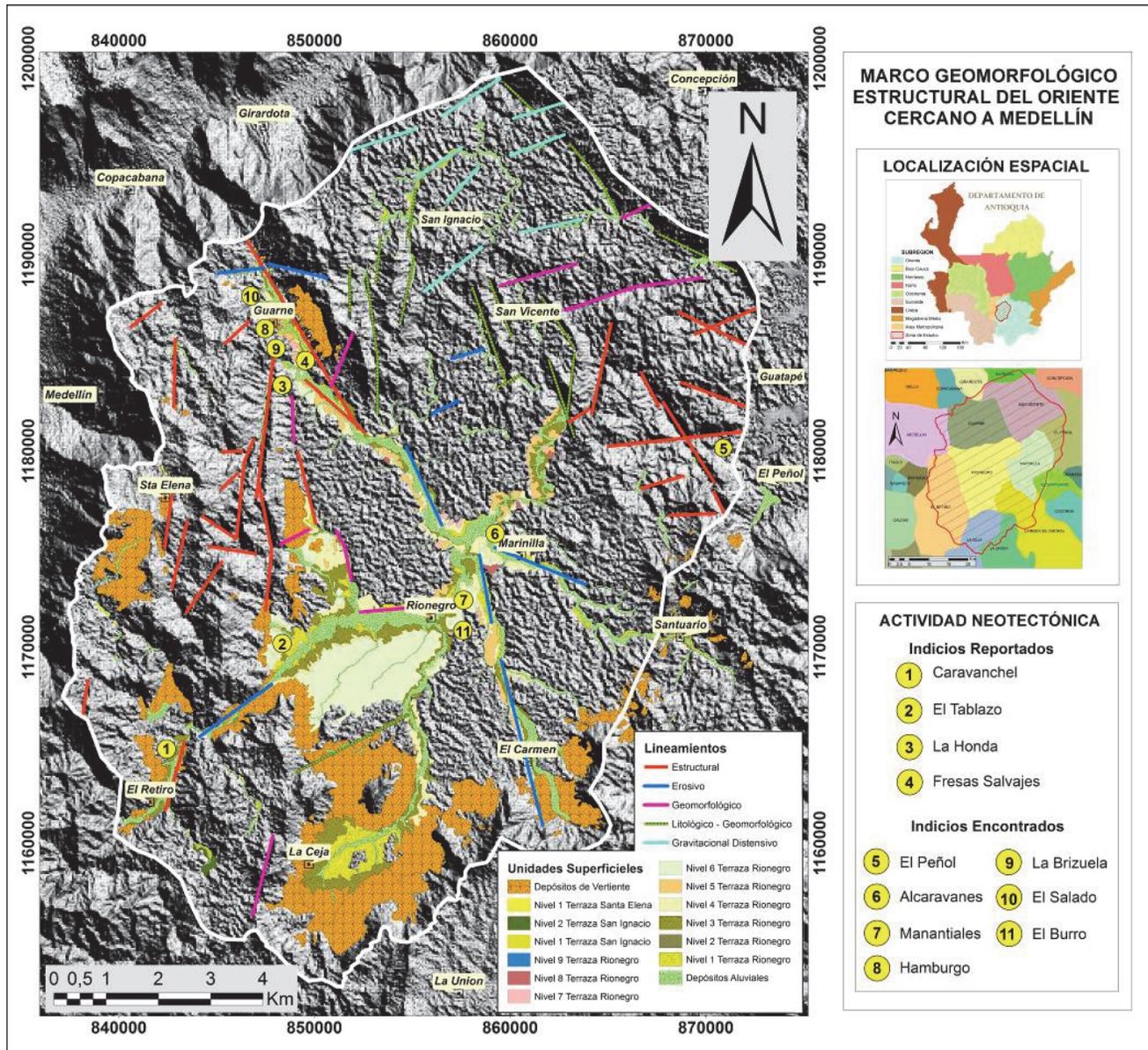


Figura 1. Marco geomorfológico-estructural y ubicación de los indicios de actividad neotectónica. Fuente: Elaboración propia.

En esta investigación acogemos la hipótesis según la cual en el contexto sismotectónico andino, se considera que las estructuras con antecedentes sísmicos durante el Cuaternario (2,58 Ma), son las que concentran mayores posibilidades de generar movimientos sísmicos futuros (Grupo de Trabajo en Neotectónica – GTN, 2009). Por lo tanto, una falla se considerará potencialmente activa cuando ha tenido movimientos en el Cuaternario y se reconocen entre otras cosas, por presentar rupturas superficiales y sismos fuertes asociados, depósitos recientes desplazados y rasgos morfoestructurales a lo largo de toda la falla. Igualmente, para la zona de estudio consideramos dentro de este grupo, las fallas activas cubiertas por depósitos recientes que enmascaran sus rasgos en superficie.

## 2. Metodología

Para el análisis neotectónico y paleosismológico se empleó la metodología que varios autores a nivel internacional han propuesto para este tipo de estudios, entre ellos Michetti y otros (2005), Audemard (2005), Mc Calpin (2008), entre otros. La metodología empleada en la investigación incorpora algunos elementos esenciales planteados por los autores anteriores acorde a las particularidades geológicas de la zona y a la disponibilidad de información existente y recursos, según se muestra en la Fig. 3.

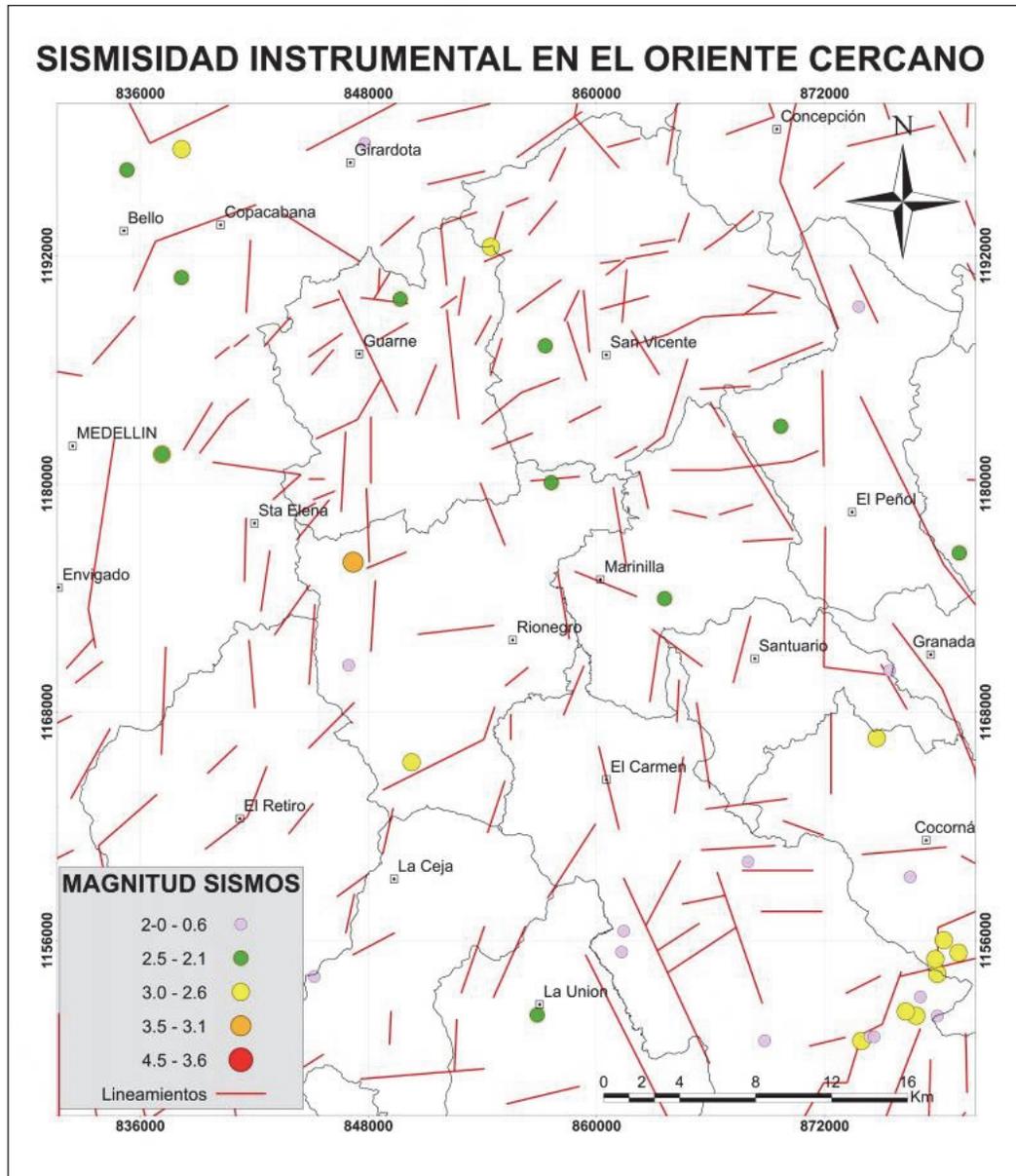


Figura 2. Sismicidad instrumental superpuesta con lineamientos en el Oriente Cercano  
Fuente: Catalogo Sísmico 1993 - Enero de 2015 (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

La metodología comprendió varias etapas, comenzando por una revisión bibliográfica, centrada en tres temáticas importantes: información general sobre las técnicas paleosismológicas, estudios sobre la geología regional y local, que proporcionó el marco geológico de referencia y finalmente, los trabajos que reportaban los sitios con indicios de actividad neotectónica en la región. El producto fundamental de esta etapa fue la elaboración de un mapa síntesis de toda la información secundaria recopilada y donde se pudo observar los puntos de interés neotectónico y su respectivo contexto geológico.

El mapa síntesis fue complementado con el marco estructural, geológico y geomorfológico establecido dentro del macroproyecto y posteriormente se realizaron varias

salidas de campo con los integrantes del grupo de investigación en Geología Ambiental GEA de la Universidad Nacional, para reconocer la zona de estudio y visitar los puntos que habían sido reportados como de interés neotectónico. Igualmente gracias a este reconocimiento y al marco establecido, se logró identificar nuevos puntos con indicios de tectónica activa.

Una vez seleccionados los puntos a caracterizar paleosismológicamente, se procedió a realizar el análisis de cada uno de ellos. Se utilizó la metodología de levantamiento de trincheras para los diferentes taludes, los cuales corresponden a afloramientos antrópicos en carreteras, infraestructura urbanística e industrial.



Figura 3. Esquema metodológico seguido por la investigación.  
Fuente: Elaboración propia.

En cada uno de los sitios estudiados se describieron los principales rasgos geomorfológicos y los diferentes elementos estructurales, así también como las características sedimentológicas de los materiales del perfil. Primeramente, se realizó la limpieza del sitio, para diferenciar con claridad los diferentes elementos geológicos de interés; luego se instaló una malla en la pared del talud de 1 m x 1 m formando una cuadrícula ortogonal. Posteriormente, con la ayuda de papeles de colores se marcaron los diferentes contactos entre estratos, horizontes, fracturas y fallas, para por último, sobre un papel milimetrado realizar un dibujo a escala del perfil geológico del talud.

Una vez levantada toda la información del sitio en campo, se procedió a la interpretación paleosismológica, para lo cual se consideraron diferentes alternativas. En el estudio paleosismológico se llevó a cabo el análisis e interpretación del origen geológico de cada punto, además, la identificación del número de eventos sísmicos, junto con la edad y recurrencia de estos, a partir de la correlación de las dataciones de los materiales desplazados, realizadas por diferentes autores en la región.

Por último, se determinó si el origen geológico de los puntos corresponde o no a tectónica reciente, a manera de reinterpretar lo que se ha considerado hasta el momento para los puntos ya reportados y plantear una interpretación para

los nuevos encontrados. Independiente del origen geológico de los puntos evaluados, estos se ubicaron en el mapa estructural regional para el establecimiento del marco neotectónico del Oriente Cercano a la ciudad de Medellín.

### 3. Resultados

Dentro de esta investigación se analizaron más de 15 puntos con indicios de actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín, sin embargo, se hizo un especial énfasis en once (11) sitios con relevantes rasgos (Fig. 1), de los cuales cinco (5) no presentan datos contundentes de actividad tectónica reciente y seis (6) muestran claras evidencias de ruptura superficial en depósitos Cuaternarios. En esta publicación se presenta la evaluación detallada de (3) tres evidencias que permitieron la obtención de conclusiones importantes para la paleosismología de la región.

#### 3.1. Caravanchel

Se localiza en un corte de carretera a 1.2 km del Mall de Caravanchel en el municipio de El Retiro (Fig. 1). En el talud son claras varias familias de diaclasamiento y Lalinde (2004) considera que la estructura N85°E es un indicio de actividad

neotectónica, ya que estas fracturas afectan todo el perfil de suelo. No obstante, realizando un análisis más riguroso, se concluyó que las diaclasas no son un argumento suficiente a la hora de evaluar el potencial neotectónico, ya que no se observaron desplazamientos en los diferentes estratos y horizontes, ni tampoco evidencias de sismitas o efectos de licuación que indiquen la ocurrencia de un movimiento tectónico. Sin embargo, se destacan los rasgos morfotectónicos y anomalías en los perfiles de las cuencas de las quebradas Espíritu Santo, La Martha y Las Palmas, así como el emplazamiento en una cuenca *pull apart* de las Sedimentitas de la Fe.

### 3.2. El Tablazo

Se halla en la margen derecha del puente sobre la quebrada Estoraque en el municipio de Rionegro (Fig. 1). Este sitio fue reportado por el Grupo de Sismología de Medellín (2002), en donde se identificó el diaclasamiento de las cenizas volcánicas y un desplazamiento en un estrato de una terraza aluviotorrencial como producto de un sismo de Mw 6,1 e intensidad VII en la escala INQUA (2007). Durante esta investigación no fue posible reconocer el desplazamiento reportado en los materiales recientes, sin embargo, se identificaron diaclasas verticales con espaciamientos de hasta 6 cm. Igualmente, se destacan los rasgos morfotectónicos de la Falla La Honda que cruza la zona y la existencia de un sismo instrumental a 1,4 km al occidente del indicio de magnitud en la escala de Richter cercano a 2.

### 3.3. La Honda

Se encuentra localizado en la margen izquierda de la carretera de la vereda La Hondita del Municipio de Guarne (Fig. 1). Lalinde (2004) y Consorcio Microzonificación (2006) consideraron para este punto un desplazamiento de un paleosuelo de 0,75 m producto de un sismo generado por la Falla La Honda hace 1.160 años. En el levantamiento realizado para esta investigación, se logró confirmar la no asociación de este punto con actividad neotectónica, ya que la discontinuidad en el horizonte orgánico fue producto de la remoción antrópica de suelo para la construcción de un acceso a la vivienda adyacente, que posteriormente fue cerrada con un lleno de material orgánico, desechos plásticos y cerámicos. No obstante, de acuerdo al mapa de estructuras de la región de estudio (González 2010), este punto se encuentra cercano a lineamientos tipo estructurales relacionados con la traza principal de la Falla La Honda.

### 3.4 Fresas Salvajes

Corresponde a un corte hecho para la construcción de la autopista Medellín-Bogotá, al frente del estadero Fresas Salvajes en el municipio de Guarne (Fig. 1). Este sitio fue reportado por el Grupo de Sismología de Medellín (2002), quienes mencionan un paleosuelo desplazado por un sismo con una intensidad de VI en la escala INQUA (2007). Este desplazamiento no se observó en los reconocimientos de campo de esta investigación, por lo que se considera prematuro asignar a las diaclasas encontradas un origen

neotectónico, puesto que no se descarta otras posibilidades como procesos de desecación, desconfinamiento o carga proporcionada por la plataforma de cemento que esta sobre el talud (Jaramillo 2011).

### 3.5. El Peñol

Se encuentra ubicado en las afueras del municipio de El Peñol, a 1 km de la vía principal que conduce a Marinilla (Fig. 1). Allí se observó en el saprolito ígneo, un desplazamiento de 0,4 m debido a una falla local con dirección N58°W/69°SW, la cual se relaciona con dos lineamientos estructurales cercanos con direcciones NW y NE en la intersección entre las quebradas El Pozo y La Honda en sus desembocaduras al río Negro. Sin embargo, se concluyó que este sitio no presenta evidencias claras que se puedan asociar a actividad tectónica reciente, ya que la fractura encontrada en el talud estudiado no tiene continuidad en superficie y no afecta las capas superficiales de cenizas volcánicas y los horizontes orgánicos.

### 3.6. Alcaravanes

Este punto se halla en un corte de la carretera que conduce del municipio de Marinilla hasta el sitio recreativo Alcaravanes (Fig. 1). El talud presenta como basamento, el perfil de meteorización del Batolito Antioqueño, el cual tiene una textura limo-arenosa y en el que se aprecian estructuras heredadas. Luego se encuentra la línea de piedra de origen coluvial, compuesta por cantos subredondeados de cuarzo, nódulos de hierro y fragmentos de cuarcitas. Posteriormente, se encuentra el horizonte gley, compuesto por fragmentos líticos, cuarzos y feldespatos. Por último, se hallan dos capas de cenizas volcánicas, un paleosuelo y el suelo orgánico más superficial (Fig. 4).

Se realizaron varios levantamientos paleosismológicos en ambos taludes de la vía y en una trinchera de 5 m de largo por 3 m de profundidad ubicada de manera perpendicular a la dirección de la falla, en el costado occidental de la vía. En estos levantamientos se identificaron evidencias de actividad neotectónica, fallamiento de horizontes recientes y mezcla de materiales asociados a la formación de cuñas coluviales de diferentes texturas.

En los cortes levantados mediante la metodología de trincheras (Fig. 5), se identificó una falla con dirección N85°E/60°NW, con evidencia de ruptura en la superficie y afectación de paleosuelos. Además, se evidenciaron diaclasas con frecuencia de 6 en 1 m, junto con desplazamientos de la línea de piedra, el horizonte gley y las capas de cenizas volcánicas.

González (2010) identificó hacia el norte de la cabecera urbana de Marinilla un lineamiento con tendencia EW, de 5 km de longitud y definido por la quebrada La Bolsa, que podría correlacionarse como la traza de la falla generadora de los sismos que afectan las unidades geológicas superficiales en Alcaravanes. En la Fig. 6 se presenta la interpretación paleosismológica en el corte oriental de Alcaravanes que sugiere que el indicio es una evidencia clara de tectónica activa.

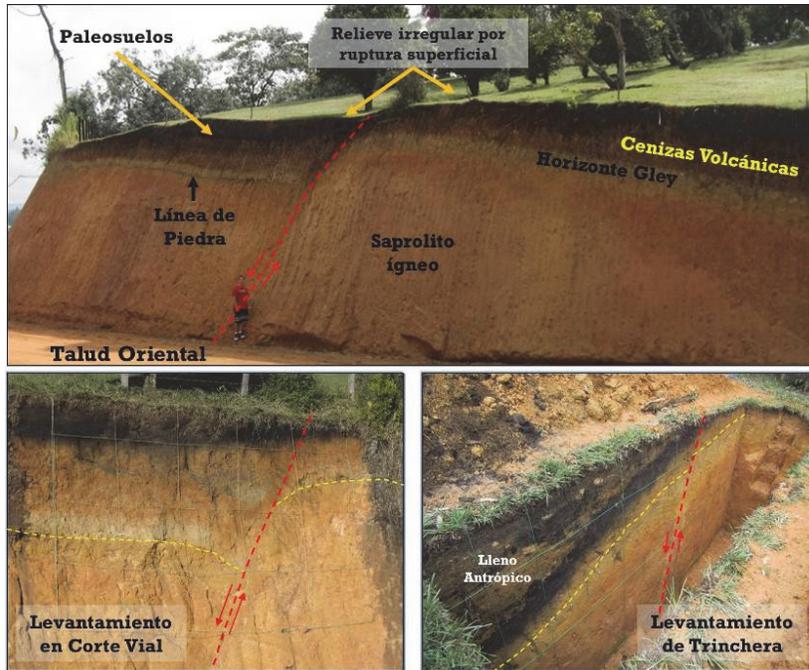


Figura 4. Levantamientos paleosismológicos y desplazamientos Cuaternarios en Alcaravanes.  
Fuente: Elaboración propia.

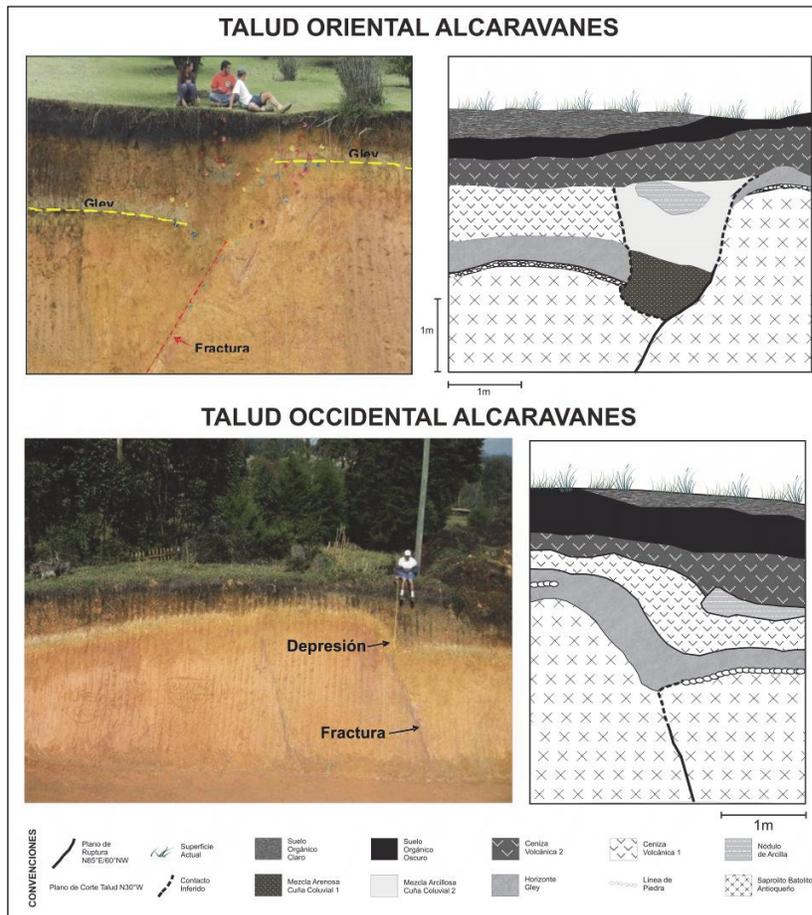


Figura 5. Aspectos generales y levantamiento de los dos taludes de la evidencia Alcaravanes.  
Fuente: Elaboración propia.

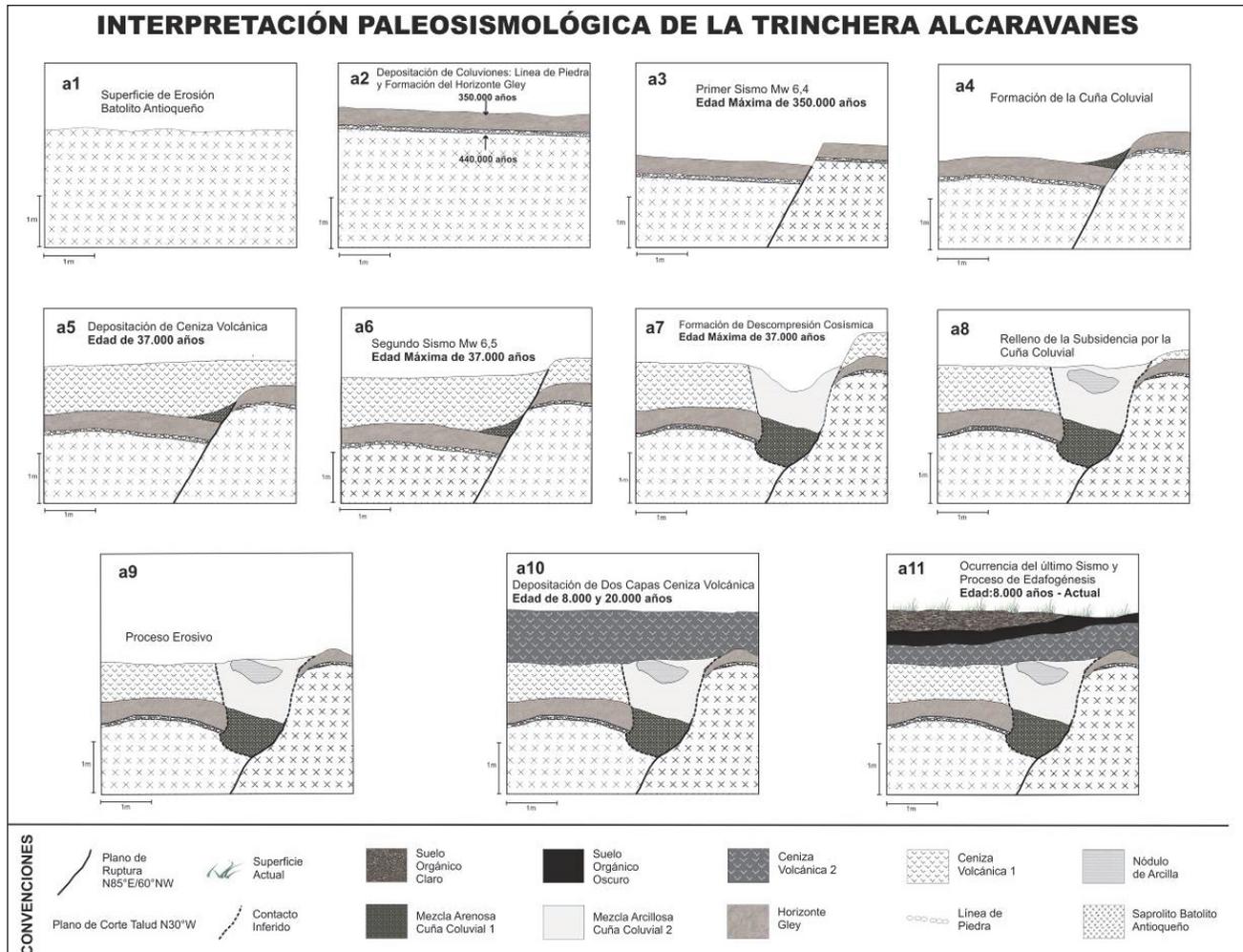


Figura 6. Interpretación Paleosismológica de la trinchera Alcaravanes Talud Oriental.  
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con datos de las edades de la línea de piedra y el horizonte Gley (Toro, 1999; en García, 2007) y las cenizas volcánicas (Toro y Hermelín 1990; en García, 2007), se interpreta la ocurrencia de tres sismos mediante la fórmula de cálculo de magnitudes propuesta por Wells y Coppersmith (1994): el primero con una edad máxima de 350.000 años y una magnitud Mw de 6,4, un segundo sismo con una edad máxima de 37.000 años y magnitudes variables Mw según la interpretación entre 6,5 y 6,6 y un último sismo con evidencia actual de ruptura superficial con magnitud Mw 6,2 y una edad variable entre 8.000 y 1.160 años, según los datos de las edades de la última capa de cenizas volcánicas y los paleosuelos en la región.

La formación del evento tiene sus inicios en la superficie de erosión del Batolito Antioqueño, expuesta a procesos de meteorización y erosión. Durante el periodo comprendido entre 350.000 y 440.00 años se depositaron sobre un relieve colinado preexistente la línea de piedra y el horizonte gley, bajo condiciones climáticas secas, húmedas y con intensa erosión laminar. Ocurre un primer sismo que provocó un desplazamiento de 0,42 m, dado por una falla normal con una edad máxima de 350.000 años y mínima de 37.000 años,

deducidas a partir de la perturbación de los horizontes de la línea de piedra y el gley y la no afectación en las capas de ceniza volcánicas, que se depositaron posterior al evento sísmico obliterando la zona de ruptura. Luego se forma la cuña coluvial arenosa con materiales provenientes del saprolito ígneo, la línea de piedra y el horizonte gley.

Después se deposita entre 37.000 y 30.000 años la capa de ceniza inferior, la cual cubre la topografía preexistente y en ese mismo tiempo sucede el segundo sismo con magnitud Mw 6,6. Este segundo evento provocó un desplazamiento de 0,6 m y la formación de una fractura cosísmica de descompresión, provocando un descenso y mezcla de varios horizontes. Como producto de la inestabilidad en el escarpe de falla, se presentó un colapso del material del bloque levantado, produciendo una nueva cuña coluvial formada por cenizas retrabajadas arcillosas que rellenan de manera irregular la concavidad generada.

Entre las etapas a10 y a11 del levantamiento del talud oriental (Fig. 6), es clara la perturbación de los últimos horizontes de ceniza y los paleosuelos, sin embargo la interpretación de los desplazamientos asociados al tercer sismo se hizo compleja, debido a la apertura y al relleno cosísmico que provocó la escasa

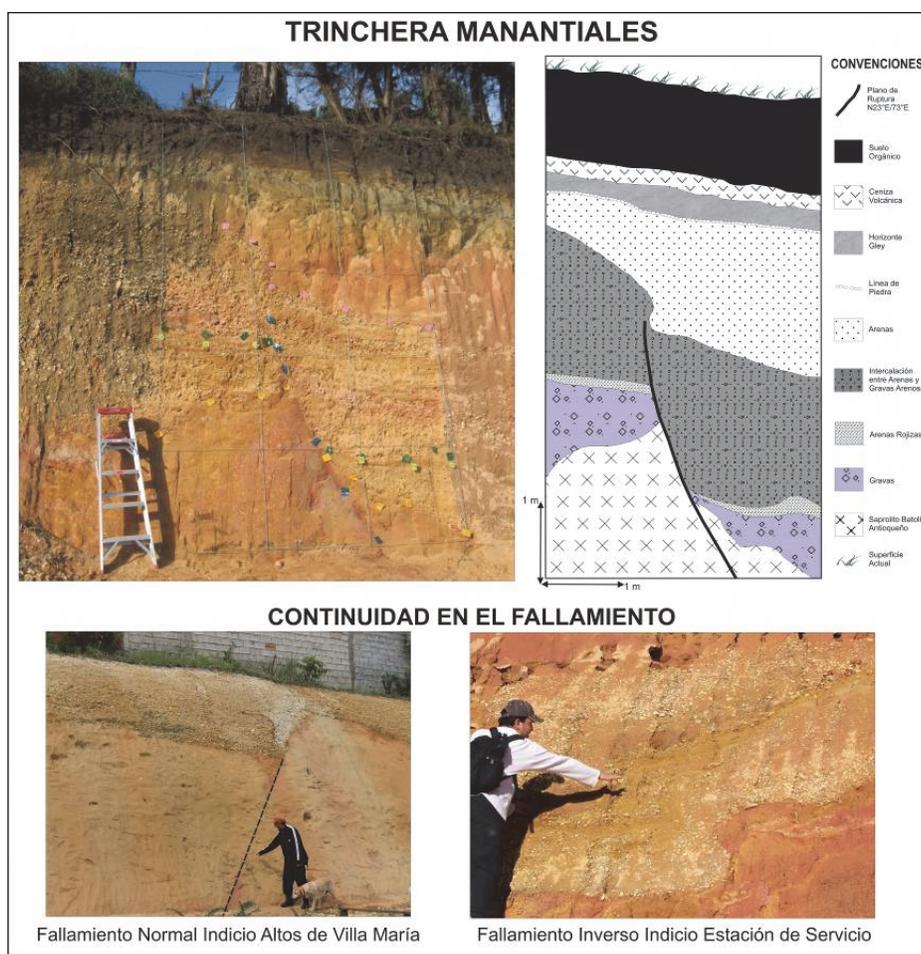


Figura 7. Levantamiento del indicio Manantiales y continuidad lateral del fallamiento en la zona.  
Fuente: Elaboración propia.

correlación de las deformaciones acumuladas. Es por ello, que basados en la interpretación del talud occidental (Fig. 5), se identificó el desplazamiento máximo acumulado del segundo y tercer sismo de 0,87 m, mostrando un fallamiento de la capa de cenizas inferiores de 0,67 m, para un cálculo de un sismo con magnitud  $M_w$  6,6 (Wells y Coppersmith 1994), siendo similar al encontrado en el talud oriental. El tercer sismo provocó una ruptura de 0,2 m en la última capa de ceniza volcánica y los horizontes de suelo, para un sismo calculado por relaciones empíricas de magnitud  $M_w$  6,2 (Wells y Coppersmith 1994).

El último sismo tiene una relevante incertidumbre en la edad de ocurrencia, la cual varía entre 8.000 años, que es la edad mínima de depositación de las cenizas en el Oriente Antioqueño y 1.160 años que es la edad del paleosuelo datado en el indicio La Honda y que por su ubicación se puede correlacionar con los paleosuelos encontrados en Alcaravanes. Igualmente, se considera que en este lapso de tiempo interfirieron procesos de edafogénesis y acción antrópica superficial relacionada con labrado del suelo para agricultura que aumentan el grado de incertidumbre.

### 3.7. Manantiales

Este punto se halla en el municipio de Rionegro, en un corte de la urbanización Manantiales de una terraza aluvial a 25 m de altura respecto al nivel base del río Negro (Fig. 1). De base a techo, se encuentra en primer lugar el saprolito limo-arenoso del Batolito Antioqueño, seguido por una secuencia intercalada de gravas y arenas de múltiples espesores que en conjunto suman alrededor de 3,5 m. Después, de manera concordante se halla un estrato de arenas finas con un espesor cercano a 1,5 m y luego se encuentran fragmentos gruesos de tamaño grava de hasta 5 cm de diámetro pertenecientes a la línea de piedra. Los horizontes superiores están conformados por el horizonte gley de 20 cm de espesor, la capa de cenizas volcánicas de coloración rojiza y 1 m de suelo orgánico con alto contenido de raíces y bioturbación (Fig. 7).

En el afloramiento analizado se identificó una falla normal con sentido  $N23^\circ E/73^\circ E$  que desplaza algunos estratos de la terraza aluvial, sin presentar continuidad y ruptura en superficie, esta falla fue enmascarada por la depositación de la línea de piedra y los horizontes de cenizas volcánicas. Así mismo, fue posible observar clastos de cuarzo tamaño grava dentro del plano de ruptura, orientados en sentido de la dirección de la falla.

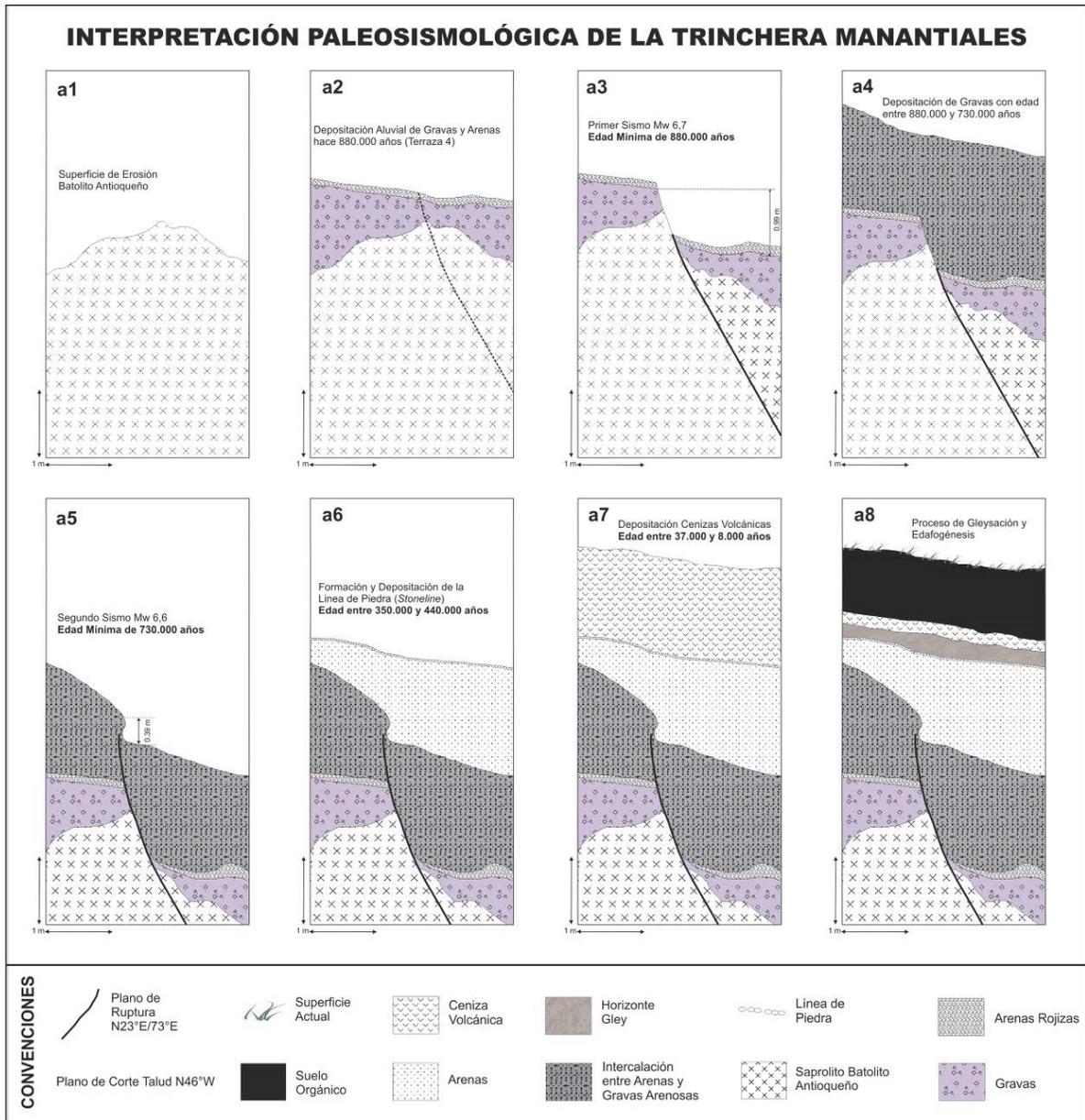


Figura 8. Interpretación Paleosismológica de la trinchera Manantiales.  
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una inspección general en la zona, no se observó algún rasgo morfotectónico que indicara la presencia de actividad tectónica reciente, puesto que la terraza no está basculada y no existen lineamientos regionales que se puedan asociar al fallamiento. No obstante, gracias al reconocimiento de campo se logró evidenciar el mismo nivel de terraza fallado al norte y sur del punto Manantiales (Fig. 8), para tener entonces la traza de una falla obliterada cubierta por depósitos aluviales y cenizas volcánicas, de aproximadamente 550 m lineales.

Hacia el sur del punto Manantiales, a 150 m, se encuentra el indicio Altos de Villa María, donde se observa un fallamiento normal con la misma dirección NNE; del mismo modo, 350 m al norte de Manantiales, se encuentra el indicio Estación de Servicio, donde se evidenció un fallamiento complejo compuesto

por desplazamientos inversos y plegamientos de los materiales aluviales de la terraza cuatro cartografiada por Gallego (2015) y con una edad entre 730.000 y 830.000 años, con base en las correlaciones de las edades de las terrazas aluviales datadas por paleomagnetismo por Page y James (1981).

El indicio Manantiales es una evidencia clara de actividad neotectónica, en donde se sugiere la ocurrencia de mínimo dos sismos hace menos de un millón de años. Según la interpretación paleosismológica, se sugiere en un inicio la existencia de la superficie de erosión bastante irregular del Batolito Antioqueño, ubicada a nivel del río Negro, el cual en el pasado tenía un comportamiento energético de un río trezado según lo evidencian los materiales transportados. Luego se dio la depositación de materiales aluviales compuestos por un paquete de gravas y una capa delgada de

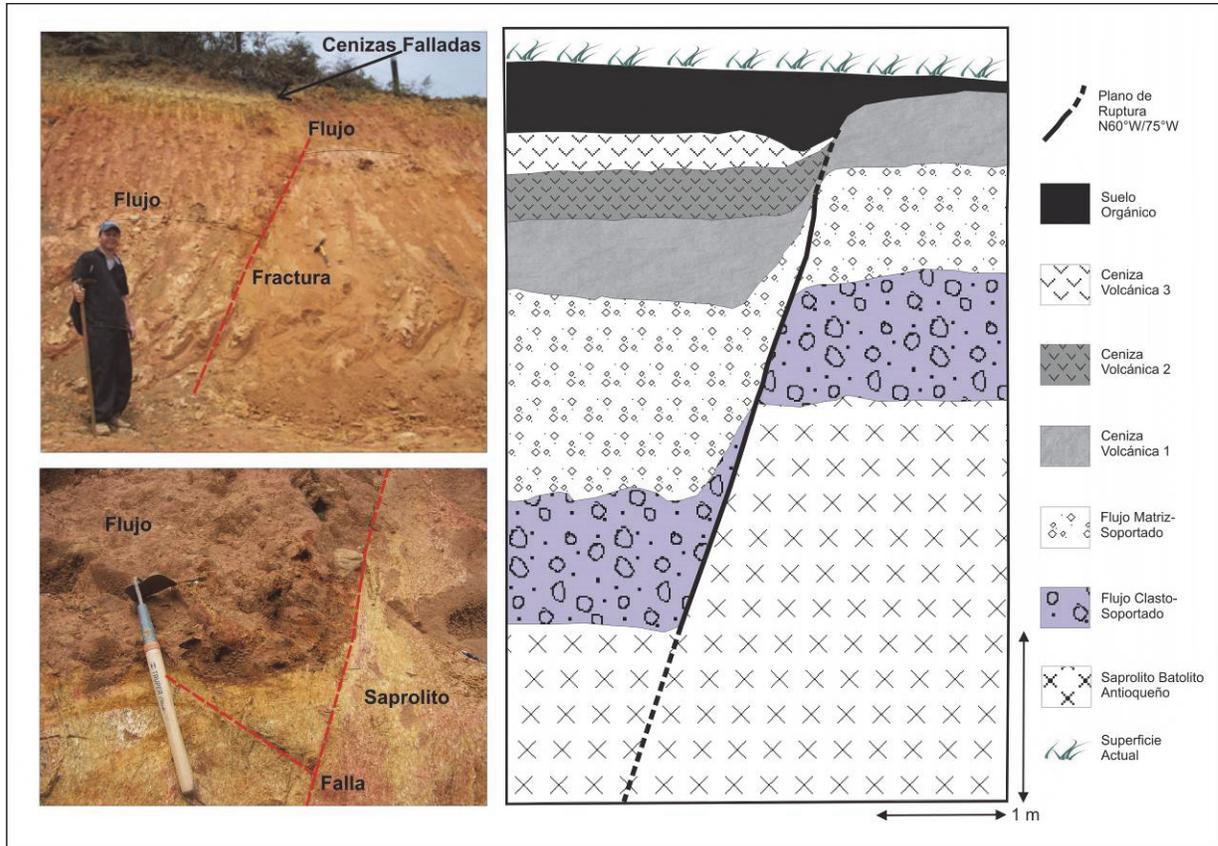


Figura 9. Levantamiento del indicio Hamburgo y fallamiento entre el saprolito ígneo y el flujo.  
Fuente: Elaboración propia.

arenas rojizas hace 880.000 años, siendo esta la edad máxima del nivel de terraza 4 de la cuenca del río Negro; en esta misma época ocurre el desplazamiento de los materiales existentes en aproximadamente 1 m, provocado por el primer sismo de magnitud 6,7 (Wells y Coppersmith 1994). Esta magnitud empírica es la de mayor valor interpretado para toda la región del Oriente Cercano.

Después del primer evento sísmico, se depositó el estrato de arenas y gravas intercaladas con una edad de 730.000 años correlacionable con el inicio de la formación de la terraza 3 (Page y James, 1981) y seguidamente se generó el segundo evento sísmico de magnitud 6,6 (Wells y Coppersmith 1994), que resulta de un desplazamiento de 0,39 m y el basculamiento de los estratos de los materiales en aproximadamente 11°, formando cuñas de arrastre de un movimiento tectónico normal. Después, se depositó la capa de arenas finas y la línea de piedra entre 350.000 y 440.000 (Toro, 1999 en García, 2007) que sellaron el escarpe generado por el sismo. En último término, se produjo el proceso de inversión de relieve y se depositaron de manera concordante las capas de cenizas volcánicas y se generó por edafogénesis el espeso horizonte orgánico (Fig. 8).

### 3.8. Hamburgo

En la zona urbana del municipio de Guarne en la vertiente derecha de la quebrada La Mosca y en la margen derecha de

la Autopista Medellín – Bogotá, se encuentra el Parque Industrial Hamburgo (Fig. 1); allí se identificó un indicio de actividad neotectónica en una secuencia de depósitos de vertiente y tres capas diferenciadas de cenizas volcánicas de 0,94 m de espesor, que yacen sobre el saprolito del Batolito Antioqueño de textura areno-limosa y con presencia de diaclasas heredadas. Los estratos que componen los depósitos de vertiente tienen 1,43 m de espesor y están dados por un flujo de lodos y escombros clasto-soportado, con bloques angulosos a subredondeados de hasta 20 cm de diámetro de cuarzos y fragmentos de anfibolitas provenientes de la parte alta del Escarpe San Nicolás. El segundo flujo se caracteriza por tener una disminución en el tamaño de los bloques con un diámetro máximo de 5 cm, siendo estos en su mayoría fragmentos angulosos de anfibolita, granodiorita y cuarcitas embebidas en una matriz arcillosa de tonalidad rojiza (Fig. 9).

En este perfil de suelo se identificó una falla normal con componente de rumbo dextral de dirección en el saprolito ígneo de N30°W/78°W y en los depósitos de vertiente poco compactos de N60°W/75°W, difiriendo esta última, probablemente por el comportamiento reológico del suelo en superficie en la experimentación de los momentos sísmicos.

La primera dirección coincide con la falla La Mosca que cruza por la base del escarpe geomorfo-tectónico San Nicolás que separa en este sector los altiplanos de Santa Elena y Rionegro y que tiene continuidad con el Sistema de Fallas de

Belmira descrito por Rendón (2003). Esta falla muestra una clara ruptura desde el saprolito ígneo hasta la capa inferior de las cenizas volcánicas, no obstante, posiblemente también ha desplazado el suelo orgánico, el cual aunque se encuentra erosionado e incompleto en el talud de análisis, presentan agrietamientos cosísmicos, dados por fracturas paralelas 5 en 1 m con dirección similar a la falla principal.

Morfotectónicamente, Gallego (2015), evidenció varios rasgos que corroboran la existencia de la falla Mosca, destacándose las silletas alineadas desde la vereda El Salado hasta la vereda La Honda, además de anomalías en el perfil longitudinal de la quebrada La Brizuela, mostrando la captura parcial del drenaje por la falla y la existencia de varios nick points en la quebrada de hasta 3 m de altura, especialmente en parte baja antes de su desembocadura; igualmente, la singularidad de la morfología de un sistema de colinas alineadas equidistantes en la margen izquierda de la quebrada La Mosca, en la cabecera de Guarne y los cambios drásticos en la dirección de dicho afluente. Asimismo,

González (2010), mapeó un lineamiento estructural que cruza este sector que probablemente coincide con la traza principal de la falla.

Resumidamente, existen evidencias bastante relevantes que sugieren la actividad neotectónica del inicio Hamburgo, para el cual se han interpretado paleosismológicamente (Fig. 10), la ocurrencia de mínimo dos paleoterremotos con edades de 880 y 37 mil años respectivamente.

Inicialmente se tenía la superficie de erosión del saprolito de la roca ígnea, sobre la cual se depositó el flujo de lodos y escombros clasto-soportado con una edad variable entre 880.000 años y 2 Ma. Este flujo se encuentra en la parte baja de la vertiente y se depositó de manera subhorizontal, lo que indica que para esa época debió haber llegado hasta la llanura aluvial de la quebrada La Mosca, o sea hasta el nivel base de la terraza 5, la cual se encuentra a 60 m del sitio Hamburgo, mapeada por Gallego (2015) y correlacionable con la terraza de la Mina de Oro de Guarne caracterizada y datada por Page y James (1981).

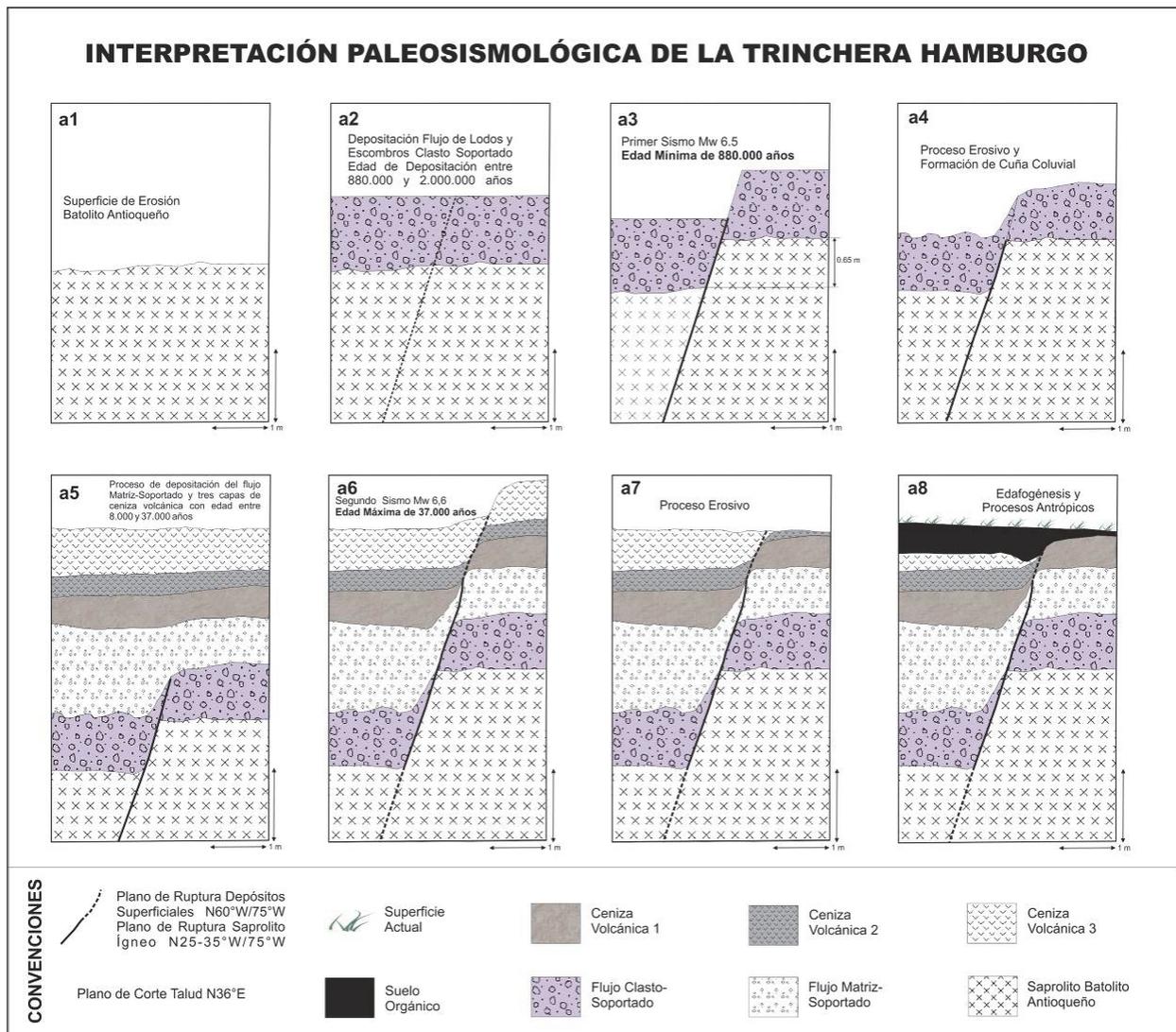


Figura 10. Interpretación Paleosismológica de la trinchera Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.

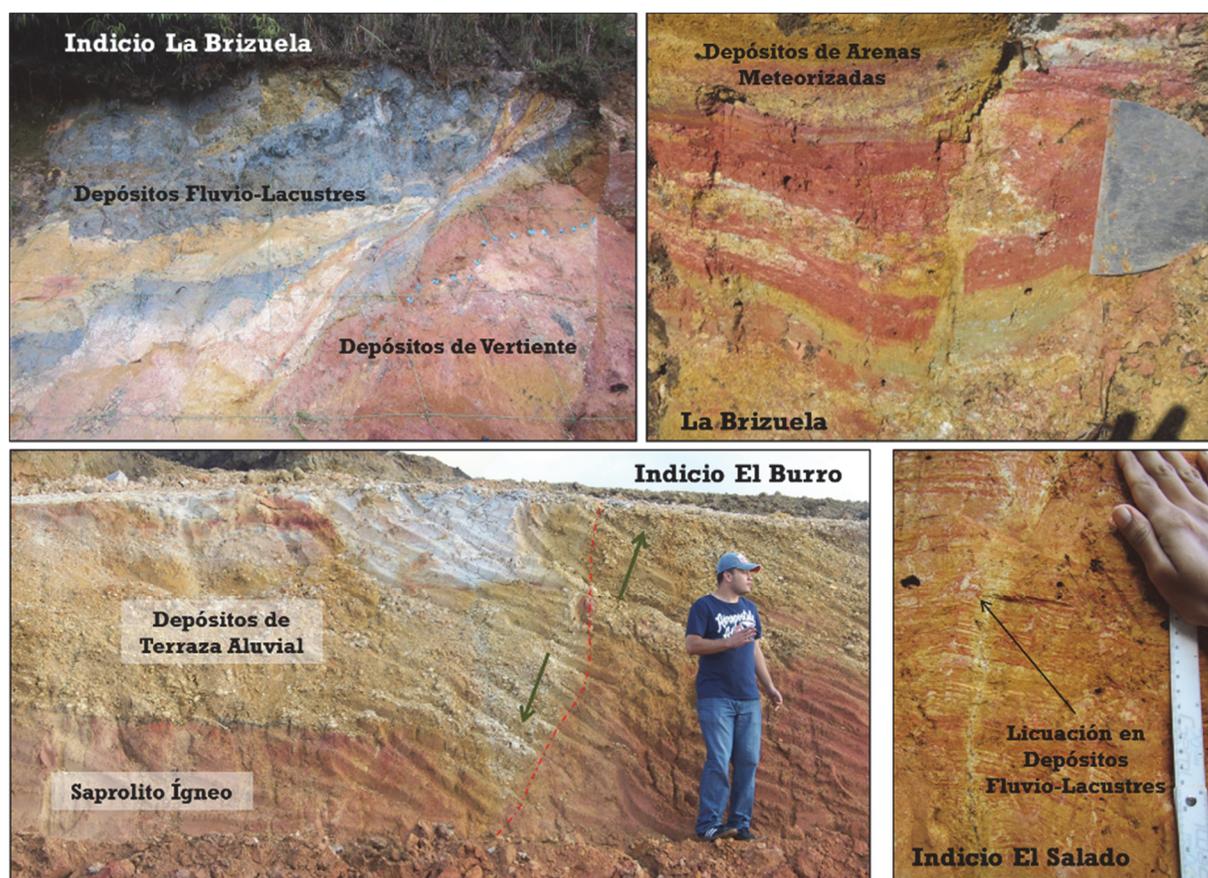


Figura 11. Otros indicios de actividad neotectónica de gran relevancia en el Oriente Cercano.  
Fuente: Elaboración propia.

La ocurrencia del primer sismo tiene una edad mínima de 880.000 años y provocó un desplazamiento de 0,65 m para una magnitud según Wells y Coppersmith (1994) de 6,54. Posteriormente se formó una cuña coluvial gracias a un proceso erosivo y seguidamente se depositó el flujo matriz-soportado sin ninguna anomalía, junto con los horizontes de ceniza volcánica entre 8.000 y 37.000 años. Después se reactivó la falla La Mosca para generar un segundo evento con una magnitud Mw 6,6 producto de un desplazamiento de 0,66 m en un salto normal, con una máxima edad de 37.000 años. Finalmente, se entra en un periodo erosivo que borra y enmascara el escarpe generado y comienza el proceso de edafogénesis.

### 3.9. Otras Evidencias

Existen otras evidencias de actividad neotectónica en el proceso de evaluación paleosismológica en los alrededores de la zona urbana de Guarne principalmente (Fig. 1). En esta área se destacan los indicios La Brizuela y El Salado, los cuales tienen correlación con la evidencia Hamburgo y en conjunto configuran las expresiones más relevantes de fallamiento Cuaternario de la falla La Mosca.

En el indicio La Brizuela se destaca el fallamiento de los depósitos de terraza aluvial superiores de la quebrada La Mosca, los cuales se componen de una secuencia fluvio-

lacustre y depósitos arenosos bien clasificados y meteorizados. Por su parte en el indicio El Salado se evidencia licuación cosísmica en una secuencia de limos y arenas laminadas. En la zona central del área de estudio, es relevante el indicio El Burro que muestra el fallamiento de depósitos de grava y arenas del nivel 6 de terrazas de la quebrada La Pereira, en cercanía de su desembocadura al río Negro. En la Fig. 11 se muestra los aspectos generales de estas evidencias.

### 4. Discusión y Conclusiones

Para nadie es un secreto, que el Oriente Antioqueño y el Valle de Aburrá han sido y seguirán siendo afectados por sismos de magnitudes importantes cercanas a 7,0 originados por sismofuentes externas como las del Viejo Caldas, Murindó, Nido de Bucaramanga, Zona de Benioff entre otras. Así lo atestiguan los daños ocurridos en varias poblaciones de la región en años anteriores.

Así mismo, los resultados de este proyecto de investigación muestran la necesidad de involucrar en las futuras evaluaciones de la amenaza sísmica del Valle de Aburrá la actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín, donde se establezca como ventana temporal de análisis el Cuaternario (2,58 Ma) y se caractericen las sismofuentes dentro de la zona estudiada,

segmentando las trazas de las fallas obliteradas con base en su respectiva caracterización paleosismológica.

Lo observado en campo y las interpretaciones desarrolladas en este proyecto de investigación, plantean la necesidad de dejar abierta la discusión en torno a la posible actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín, contrario a lo que se pensaba unos años atrás. Los resultados de este trabajo fueron discutidos con varios expertos internacionales que fueron invitados a la ciudad a impartir cursos sobre la temática y cuyo trabajo práctico se desarrolló en estos sitios. Ellos coinciden en la importancia que revisten estos hallazgos y la necesidad de implementar nuevas técnicas de análisis, con el fin de tener una base de datos más robusta y de esta forma, identificar nuevos indicios que concatenados a los estudiados sirvan de referencia en la evaluación de la amenaza sísmica de la región.

El Oriente Antioqueño cercano a la ciudad de Medellín tiene una particularidad geológico-geomorfológica importante para los estudios de neotectónica y paleosismología, relacionada con el hecho de que las fallas existentes no poseen expresiones morfotectónicas pronunciadas, que permitan con certeza mapear los segmentos de las fallas potencialmente activas. Sin embargo, en contraste con lo anterior, un importante número de cortes realizados en el terreno para la construcción de obras de ingeniería en la región, han mostrado rasgos neotectónicos en el registro geológico, lo que ha llevado a la formulación de la hipótesis sobre la existencia de fallas con actividad neotectónica cubiertas por depósitos recientes.

Esta particularidad geológico-geomorfológica cambia drásticamente la metodología convencional para este tipo de estudios, los cuales parten desde un análisis estructural regional, semiregional, detallado y finalmente la excavación y levantamiento geológico de trincheras como etapa final de todo el proceso de análisis. Al contrario de lo que ha venido ocurriendo en la metodología aplicada en la investigación del Oriente Antioqueño, donde se tienen escasas expresiones geomorfológicas de fallas activas a cambio de muchos sitios aparentemente aislados que muestran indicios de actividad neotectónica. Lo anterior plantea la tarea para las instituciones gubernamentales que tienen que ver con la gestión del riesgo en esta región del departamento de Antioquia, así como para las universidades, construir un banco de información paleosismológica de los nuevos hallazgos encontrados, para tener en el futuro mayor información para integrar con información procedente de otras disciplinas como sismología, dataciones de unidades geológicas superficiales, geodinámica, entre otras.

Es importante resaltar que los datos recopilados en los sitios Alcaravanes, Hamburgo y Manantiales y los preliminares de los sitios La Brizuela, El Salado y El Burro, complementados con información regional a nivel geomorfológico y estructural, proporcionaron evidencias de fallas afectando el registro geológico reciente, asociadas a actividad tectónica desde el Pleistoceno Superior, cuya interpretación nos conduce a la identificación de varios eventos sísmicos con magnitudes  $M_w$  entre 6,2 y 6,7 en la escala de Richter con edades que oscilan entre 880.000 y

8.000 años y periodos de retorno variables entre 300.000 y 20.000 años.

Finalmente, lo anterior plantea la necesidad de seguir profundizando en la investigación del tema, a través de la formulación de nuevos proyectos de investigación en otras regiones cercanas al Valle de Aburrá, donde se integren diferentes disciplinas como la geomorfología cuantitativa, dataciones, geodesia, sismología entre otras, que conduzcan en un futuro a la construcción de un modelo geodinámico regional, que aporte información concreta y valiosa para ser incorporada en la evaluación de la amenaza sísmica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y su entorno inmediato, fin último de la función social que deben tener este tipo de proyectos, para aportar una gestión del riesgo sísmico más acorde a las particularidades geológicas de la región.

#### Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a María Ortuño Candela, Héctor Perea Manera y Franck Audemard por su valiosa colaboración e importantes aportes en la discusión e interpretación de algunos de los indicios estudiados. Igualmente agradecemos a CORNARE y a la Sociedad Colombiana de Geología-Capítulo Antioquia.

#### Referencias Bibliográficas

- [1] Álvarez, C.H; Trujillo, R y Hermelín, M., Aspectos geomorfológicos y estructurales del norte del Valle de Aburrá. I Conferencia de Riesgos en el Valle de Aburrá, 1984.
- [2] Audemard, F.A. Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations and perspectives. *Tectonophysics*, 408, pp 29-61, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.034>
- [3] Bustamante, M. y Velásquez, A., Actividad tectónica cuaternaria y recomendaciones para la amenaza sísmica en el Valle de Aburrá. I Conferencia de Riesgos en el Valle de Aburrá. 1984.
- [4] Consorcio Microzonificación., Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 745 P, 2006.
- [5] Gallego, J.J., Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la ciudad de Medellín), Tesis de Grado (en edición), Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2015.
- [6] García, C., Datación por fotoluminiscencia de algunas formaciones del Llano de Ovejas Cordillera Central Antioquia. Tesis de Maestría en Ciencias de La Tierra, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2007.
- [7] González, A., Estudio de lineamientos como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica, en el oriente cercano a la ciudad de Medellín. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 87 P, 2010.
- [8] Grupo de Sismología de Medellín, Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones, 2002.
- [9] Grupo de Trabajo en Neotectónica – GTN, Atlas de deformaciones Cuaternaria de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería INGEOMINAS. Publicación Geológica Multinacional No. 7, Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas. Canadá. 311 P. 2009.
- [10] INQUA. Environmental Seismic Intensity Scale (ESI), Escala medio-ambiental de intensidad sísmica, basada en los efectos ambientales y geológicos de los terremotos. En: Michetti A., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpınar A., Mc Calpin J.,

- Mohammadioun B., Mörner N.A., Ota Y., Roghoin E. Editores: Guerrieri, L. & Vittori, E. Mem. Descr. Servizio Geológico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo. APAT, Roma, Italia, 74 P. 2007.
- [11] INGEOMINAS, Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Explicación del mapa geológico (escala 1:50.000). Medellín. 1415 P. 2005.
- [12] Jaramillo, J., Estudio paleosismológico de sitios reportados con indicios de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño. Trabajado de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 152 P, 2011.
- [13] Lalinde, C., Geología de campo en el área de la presa La Fe. Informe inédito presentado a HVM Ingenieros, para la evaluación de la amenaza sísmica para la Presa La Fe. Realizado para EEPP. 13 P. 2004.
- [14] Mc Calpin, J.P., Field techniques in paleoseismology – Terrestrial environments. En: Mc Calpin, J.P. (Ed). Paleoseismology. International Geophysics Series 95, Second Edition, ELSEVIER-BOOK AID-Sabre Foundation, pp 29-118, 2009.
- [15] Michetti, A.M., Audemard, F.A. and Shmuel, M., Future trends in paleoseismology: integrated study of seismic, landscape is the vital tool in seismic hazard analyses. Tectonophysics, 408, pp. 3-21, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.035>
- [16] Page, W.D., Seismic geology and seismicity of northwestern Colombia: Reporte para Integral Ltda, ISA y Woodward Clyde Consultants, 156 P. y anexos, 1986.
- [17] Page, W. y James, M., The antiquity of the erosion surfaces and late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: Implications to tectonics and erosion rates. Revista CIAF, 6. ( 1-3). pp. 421-454, 1981.
- [18] Rendón, A., Caballero, H., Arias, L., González, A., Arenas, J., Gallego, J., Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente. Boletín de Ciencias de La Tierra, 29, pp. 39-53, 2011.
- [19] Rendón, A., González, A., Gallego, J., Arenas, J., Pérez, M., Jaramillo, J., Caballero, H., Arias, L. Actividad neotectónica en el Oriente Cercano a la ciudad de Medellín-Colombia. Memorias XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología. Medellín, 116 P. 2011.
- [20] Rendón, D.A., Tectonic and sedimentary evolution or the upper Aburrá Valley, northern Colombian Andes. Master Thesis, Shimane University. Japan, pp. 1-60, 2003.
- [21] Servicio Geológico Colombiano. Red Sismológica de Colombia [en línea], [Consulta 15 de Enero de 2015]. Disponible en: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/consultas>
- [22] Wells, D. and Coppersmith, K., New Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84 (4), pp. 974-1002, 1994.
- [23] Woodward Clyde Consultants., Preliminary seismic hazard study, Cañafisto dam sites, Cauca river hydroelectric Project, Colombia. Reporte para Integral Ltda e ISA, 173 P, 1979.

**C.P. Lalinde-Pulido**, es Ingeniera Geóloga y MSc. Miembro de Sociedad Colombiana de Geología, Colombia.

**L.A. Arias-López**, es Ingeniero Geólogo y MSc, Profesor de la Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.

**A. de J. Rendón-Rivera**, es PhD, Profesor Asociado del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia y Director Grupo de Investigación en Geología Ambiental GEA de Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

**J.J Gallego-Montoya**, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

**J.P. Jaramillo-Rendón**, es Ingeniera Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.

**A. González-Patiño**, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

**J.H.Caballero-Acosta**, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, es MSc y profesor de la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia