

# El posible escenario de un sismo de magnitud $\geq 6,5$ para la ciudad de Villavicencio (Colombia)

O possível cenário de um terremoto de magnitude  $\geq 6,5$  para a cidade de Villavicencio (Colômbia)

The Possible Scenario of an Earthquake with a Magnitude  $\geq 6,5$  in Villavicencio (Colombia)

**Germán Chicangana\***

Corporación Universitaria del Meta, Colombia

**Carlos Alberto Vargas-Jiménez\*\***

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

**Alexander Caneva\*\*\***

Universidad Antonio Nariño, Colombia

## Resumen

Para la ciudad de Villavicencio (Colombia), desde el estudio de microzonificación sísmica, la amenaza sísmica ha sido definida como alta. En este trabajo se muestran aspectos morfotectónicos y sísmológicos que lo corroboran y se exponen las posibles consecuencias que tendría para la ciudad la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, ya que su vulnerabilidad se incrementa por las fallencias en su infraestructura, por la falta de planes gubernamentales frente a este tipo de contingencia, tanto en prevención como en atención, y porque su población no está preparada para este tipo de amenaza natural.

**Palabras clave:** amenaza sísmica, Colombia, desarrollo sostenible, escenario posdesastre, gestión de riesgo, Villavicencio.

## Resumo

Para a cidade de Villavicencio (Colômbia), a partir do estudo de microzonificação sísmica, a ameaça sísmica foi definida como alta. Neste trabalho mostram-se aspectos morfotectônicos e sísmológicos que corroboram e expõem as possíveis consequências que teriam para a cidade a ocorrência de um terremoto de grande magnitude, já que sua vulnerabilidade aumenta pelas deficiências em sua infraestrutura, pela falta de planos governamentais contra este tipo de contingência, tanto em prevenção quanto em atenção, e porque sua população não está preparada para este tipo de ameaça natural.

**Palavras-chave:** ameaça sísmica, Colômbia, desenvolvimento sustentável, cenário pós-desastre, gestão de risco, Villavicencio.

## Abstract

According to a seismic microzone study, Villavicencio, Colombia has been defined as a city facing high seismic hazard. The study presents seismological and morphotectonic aspects that corroborate that finding and discusses the possible consequences of an earthquake of great magnitude, since the city's vulnerability increases due to deficient infrastructure and the lack of government plans with respect to both prevention and assistance to a population that is not prepared for this type of natural disaster.

**Keywords:** seismic hazard, Colombia, sustainable development, post-disaster scenario, risk management, Villavicencio.

RECIBIDO: 30 DE JUNIO DEL 2011. ACEPTADO: 24 DE SEPTIEMBRE DEL 2012.

Artículo de investigación sobre la posibilidad de un sismo en la ciudad de Villavicencio, Colombia.

\* Dirección postal: Centro de Investigaciones de Ingenierías y Arquitectura "Rogelio Salmona", Vicerrectoría de Investigaciones, Corporación Universitaria del Meta, cra. 33 n.º 34-06, piso 7, Campus San Fernando, Villavicencio, Colombia.  
Correo electrónico: german.chicangana@unimeta.edu.co; gechicanganam@unal.edu.co

\*\* Dirección postal: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, edificio Manuel Ancizar 224, Departamento de Geociencias, cra. 30 n.º 45-03. A. A. 14490.  
Correo electrónico: cavargasj@unal.edu.co

\*\*\* Dirección postal: Dirección Nacional de Investigaciones, Universidad Antonio Nariño, cra. 38 n.º 58 A-37.  
Correo electrónico: investigador.geofisica@uan.edu.co

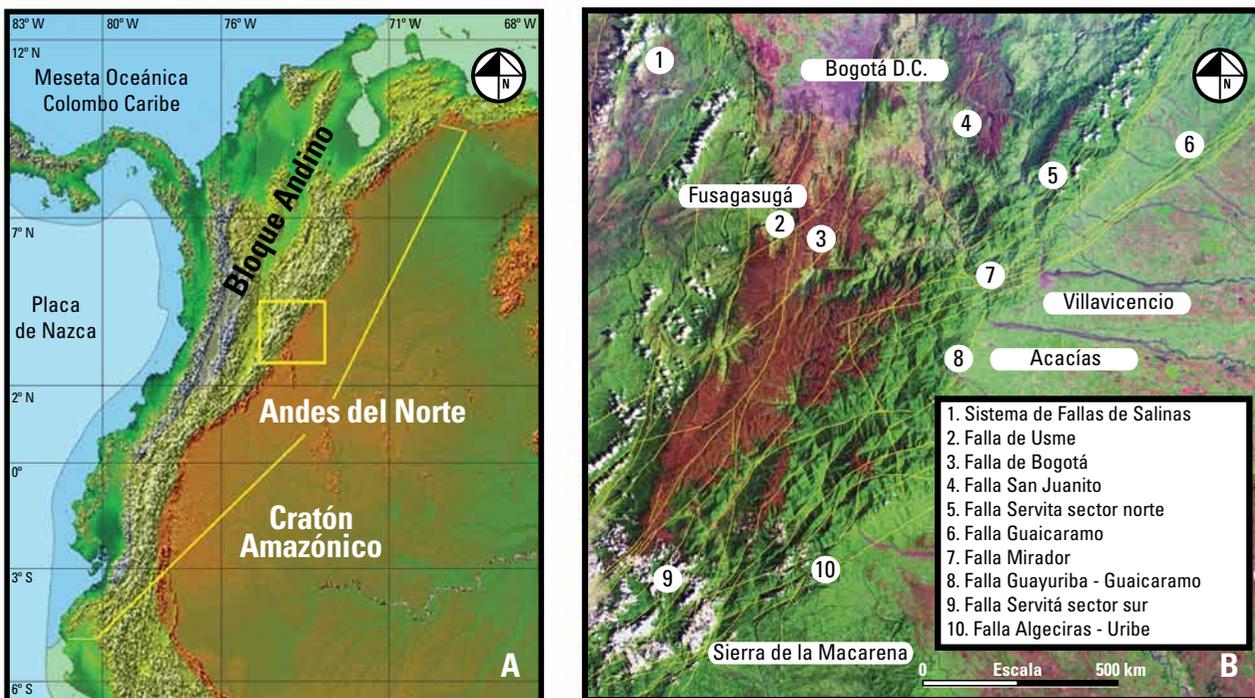
## Introducción

La ciudad de Villavicencio está ubicada en el centro de Colombia (figura 1a); tiene más de 450.000 habitantes, de acuerdo con la proyección sobre su crecimiento poblacional que para el 2012 ha estimado el Departamento Administrativo Nacional de Estadística —en adelante, DANE— (2005). La ciudad es el principal centro administrativo y económico de la Orinoquía colombiana. Su amenaza sísmica se debe a que se encuentra asentada en donde cruzan las fallas del Sistema de Fallas del Borde Llanero (AIS-Ingeominas 1996), técnicamente denominado por Paris et ál. (2000) como el Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la cordillera Oriental —en adelante, SFFFCO—. Este sistema de fallas es reconocido como uno de los más importantes de los Andes del norte (figura 1b), ya que su marco tectónico, conforme con una valoración previa de sus aspectos neotectónicos, pone en evidencia su movilidad en lapsos de tiempo muy recientes, en términos geológicos, en comparación con otros marcos tectónicos activos del territorio

colombiano o de los Andes. Robertson (1989; 2005) ha puesto especial cuidado en las evidencias de tectónica activa de estas fallas; por lo tanto, en este documento se muestran aspectos relacionados con la tectónica activa que señalan la alta vulnerabilidad de la ciudad a un sismo de grandes dimensiones, con consecuencias mayores a las de otras ciudades de Colombia que han sufrido terremotos en época reciente: Popayán en 1983 y Armenia en 1999.

En este trabajo se exponen, además, los aspectos geotécnicos del suelo en el que se ha desarrollado la ciudad, un análisis de los registros sísmológicos instrumentales que existen para la región, y los aspectos socioeconómicos y gubernamentales que también contribuyen a incrementar la vulnerabilidad de la ciudad a un sismo. Con los resultados de este análisis se hace la descripción de un posible escenario postsísmico consecuencia de un sismo de magnitud  $M^1 \geq 6,5$ .

- 1  $M$  = magnitud de momento;  $M_s$  = magnitud de superficie, y  $M_L$  = magnitud local



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

Datos: imagen tipo Landsat TM-5 1990 (GeoCover-NASA 2012).

*Nota:* a) ubicación regional del centro de Colombia en los Andes del norte, b) imagen que muestra en detalle esta región, con la ubicación de la ciudad de Villavicencio y de las principales fallas potencialmente activas que contribuyen a la amenaza sísmica, de acuerdo con Chicangana et ál. (2007).

Se debe tener en cuenta que se estima 6,5 como magnitud mínima, pues es posible que por las dimensiones de las fallas que se presentan en esta región —en términos de tamaño, tipo y significado que tiene el SFFFCO en el contexto geotectónico del noroeste de Suramérica— y por lo encontrado en estudios precedentes —tanto desde sus características geotectónicas como sismológicas, en comparación con otros escenarios andinos— la magnitud esperada podría ser mayor.

Con respecto al marco geotectónico de esta región, hay que tener en cuenta que el territorio continental colombiano está conformado, de oeste a este, por tres placas diferentes, que en orden son: la placa Caribe, el Bloque Andino y el Cratón Amazónico o placa suramericana (figura 1a). La sismicidad en Colombia se debe al empuje que ejerce la placa de Nazca en las placas continentales al subducirse debajo del continente. Como el SFFFCO es un límite de placas entre el Bloque Andino y la placa suramericana, la movilidad resultante del empuje de estas placas se incrementa, generando una alta sismicidad en esta región. Teniendo en cuenta esta situación, el Servicio Geológico Colombiano —en los ajustes que está haciendo a la microzonificación sismogeotécnica de las ciudades colombianas, y conforme con la norma sismorresistente vigente, correspondiente al año 2010 (NSR-10)— ha estimado para Villavicencio una magnitud mínima de 7,0. Aun así, con una magnitud mínima de 6,5, el ejercicio sobre el escenario que plantea este artículo es real y no subestimado; aunque podría serlo, teniendo presentes las consideraciones geotectónicas y sismológicas que enseguida se expondrán aquí.

### Evidencias neotectónicas de las fallas del SFFFCO cercanas a Villavicencio

El término ‘neotectónico’ define la deformación cortical que ha ocurrido en el lapso comprendido entre finales del Plioceno superior y el presente (Diederix 2001); es decir, corresponde a la deformación de la corteza que se desarrolló en los últimos 2,5 millones de años. De otro modo, por ‘neotectónico’ se entienden los indicios de movilidad tectónica, que, si bien sus huellas están algo borradas por el paso del tiempo, la mayoría de los autores coinciden en que se refiere a rasgos de la actividad tectónica cuyo último episodio ocurrió entre un tiempo mínimo de miles y uno máxi-

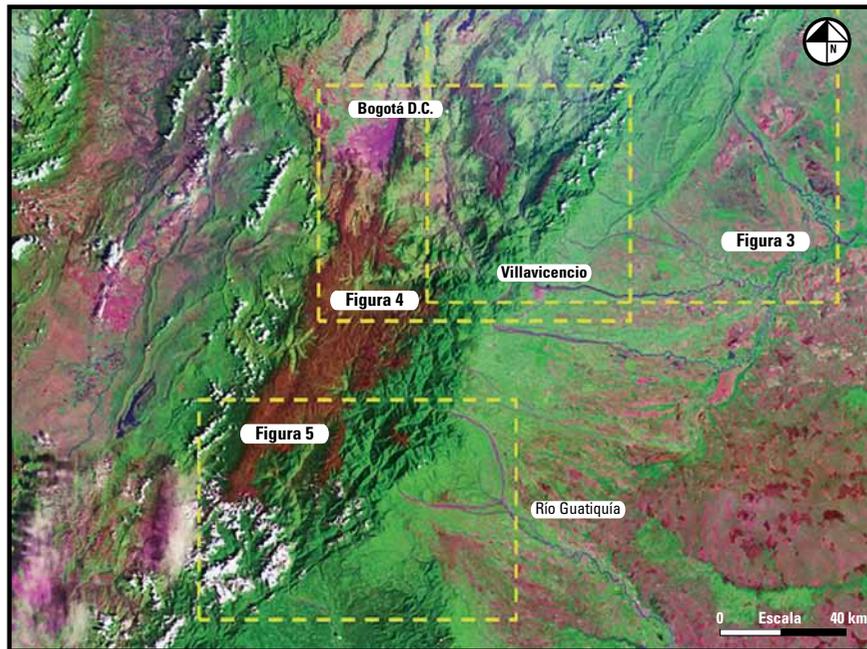
mo de un par de millones de años antes del presente (Cuaternario), pero que aún está activo en la actualidad. En síntesis, ‘neotectónico’ abarca la movilidad tectónica que deriva del régimen de esfuerzos que dio origen a las fallas activas o a la reactivación de fallas más antiguas, y que hoy o están activas o son susceptibles de moverse en un futuro próximo (Martínez Díaz 1998).

La actividad neotectónica de un lugar se evidencia en su paisaje por los rasgos relacionados con la actividad de fallas próximas o incluidas dentro de este. De la misma manera, la *tectónica activa* considera las estructuras o fallas que en miles de años se han movido y que podrían eventualmente generar un sismo en el futuro; es decir, lo mismo que la neotectónica.

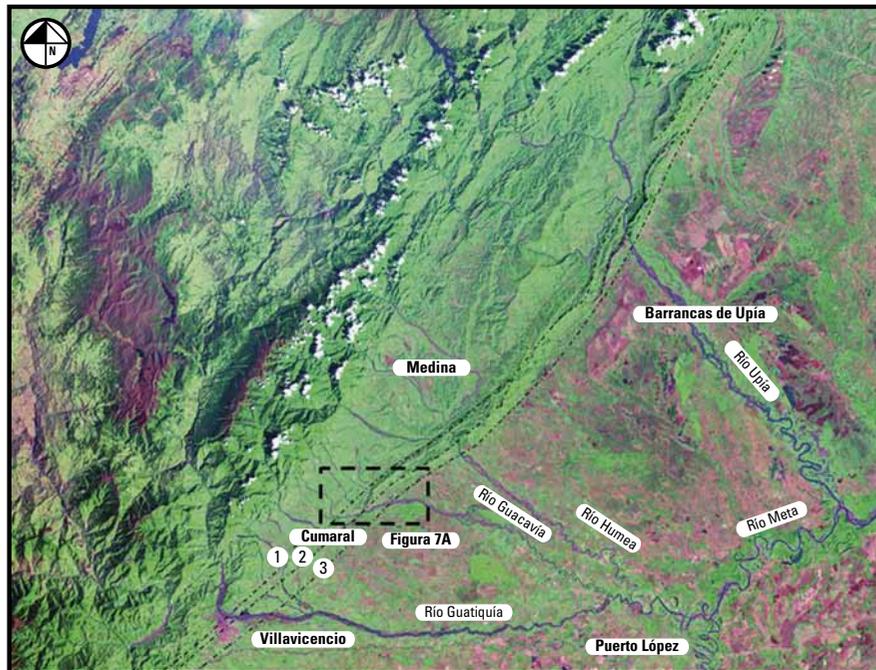
En la región de estudio son claros los rasgos neotectónicos de las principales fallas del SFFFCO, y para su análisis se consideraron las fallas pertenecientes a este sistema que estuvieran próximas a Villavicencio y que manifestaran evidencias de neotectónica (figuras 2, 3, 4 y 5). La liberación de esfuerzos en las fallas de cabalgamiento que conforman el SFFFCO (Chicangana et ál. 2007) es bastante similar —desde el punto de vista sismológico— al definido en Argentina para la falla La Laja, en la precordillera Oriental (figuras 6 y 7). Esta última fue la responsable del terremoto de  $M_s = 7,4$  que afectó a la ciudad de San Juan en enero de 1944, produciendo en ella efectos catastróficos (Perucca y Paredes 2003; Meigs et ál. 2006).

La gran dimensión de las fallas pertenecientes al SFFFCO, la relativa proximidad del basamento en esta región, las evidencias neotectónicas y de la actividad morfotectónica identificadas en campo, junto con el análisis morfotectónico apoyado por sensores remotos y fotogeología (Chicangana et ál. 2007; París et ál. 2000; Robertson 1989, 2005; Vergara 1996) permiten estimar que estos planos de falla son muy activos y propensos a producir sismos de gran magnitud ( $M \geq 6,5$ ), como se presentó en el caso argentino.

El frente de deformación que da origen a la serranía de Las Palomas, al noreste de Villavicencio, está definido por el plano de la falla Guaicaramo (véase figura 3), que ha servido como punto de apoyo para deformar toda la corteza hacia el oeste de esta estructura, dando lugar al levantamiento de todas las unidades geológicas que constituyen el subsuelo del sector. Esta falla tiene una longitud aproximada de 130 km y pertenece al segmento sur (París et ál. 2000).



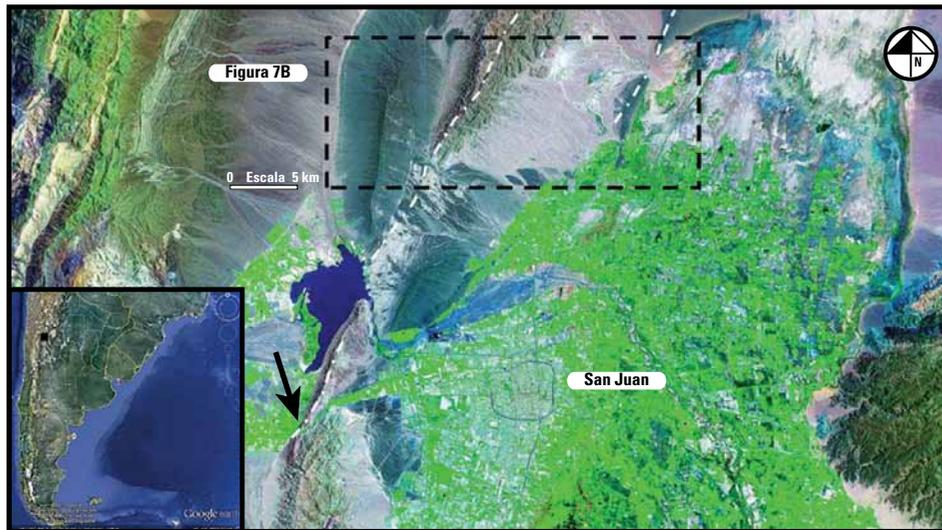
**Figura 2.** Imagen que muestra las áreas que abarcan las figuras 3, 4 y 5. Datos: imagen tipo Landsat TM-5 1990 (GeoCover-NASA 2012).



**Figura 3.** Rasgos morfo-tectónicos relacionados con los lineamientos de las fallas 1) Cumaral, 2) Guaicaramo y 3) San Pedro. Datos: imagen Landsat TM-5 1990 (GeoCover-NASA 2012).

*Nota:* los rasgos morfo-tectónicos y neotectónicos ponen en evidencia la tectónica activa de estas fallas que definen el frente orogénico denominado *serranía de las Palomas*, cuyo extremo sur se ubica en el municipio de Cumaral, a 25 km al norte de Villavicencio. La alteración del curso de los ríos evidencia la presencia de las fallas entre el sur de Villavicencio y Cumaral.

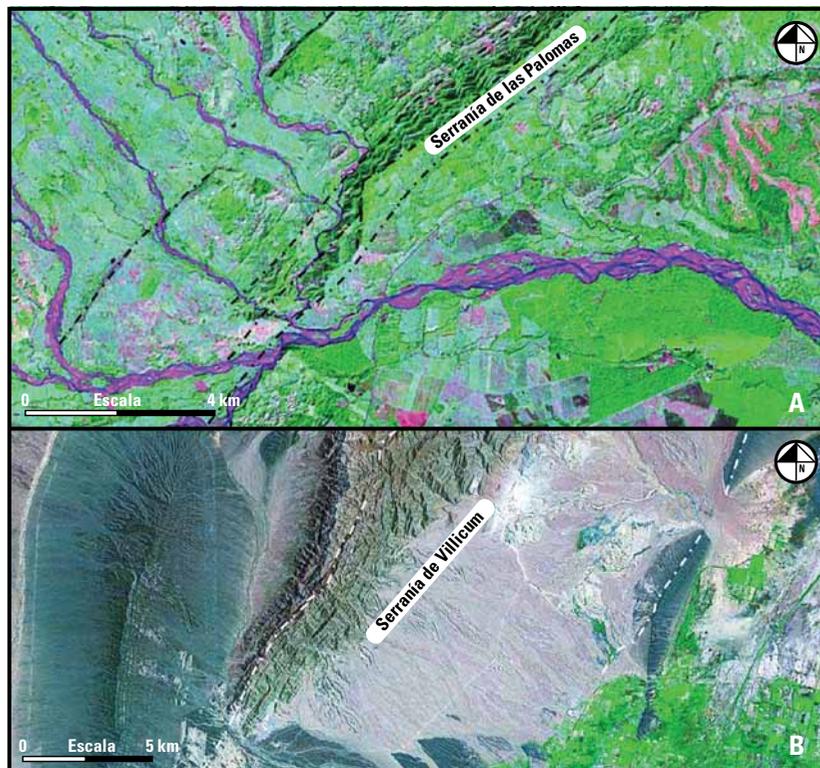




**Figura 6.** Ciudad de San Juan (Argentina) con la serranía de Villicum, al norte de esta.

Datos: imagen Landsat-7 ETM+ (GeoCover-NASA 2012).

*Nota:* se muestran las fallas Villicum (a la izquierda) y La Laja (a la derecha) (véase la figura 7 para mayor detalle). En el recuadro, el punto negro indica la ubicación de esta región en Argentina.



**Figura 7.** a) Imagen con los lineamientos de las fallas en el extremo sur de la serranía de las Palomas (véase figura 3) y b) Lineamientos de las fallas al norte de la ciudad de San Juan, en Argentina (véase figura 6).

Datos: imagen Landsat-7 TM+ (GeoCover-NASA 2012).

*Nota:* en ambos casos son claros los rasgos morfotectónicos que ponen en evidencia la tectónica activa de las fallas que definen un frente cabalgante. En el caso de la serranía de las Palomas, el frente cabalgante va en sentido SE, mientras que para el sector de la sierra de Villicum y sus vecindades, este va en sentido NW. El accionar del frente cabalgante de la sierra de Villicum, el cual está compuesto por las dos fallas, produjo el sismo de  $M_s = 7,4$  que devastó a la ciudad de San Juan en 1944 (Alvarado y Beck 2006; Meigs et ál. 2006).

La edad del desarrollo de esta deformación está dada en un lapso de tiempo que va desde centenares de miles hasta los dos millones de años, debido a que las gravas y los conglomerados relacionados con la formación Guayabo superior o Corneta (Plioceno-Pleistoceno) están deformados y presentan disconformidades con rocas de edad más reciente. Siguiendo este criterio, Parra (2008) se basó en la biozonación palinológica reconocida en estos sedimentos. Los indicadores morfotectónicos, como la asimetría de cuencas y la sinuosidad de un frente montañoso, evidencian un estado de movilidad tectónica. Esta última refleja el balance entre las fuerzas erosionales (que tienden a cortar la configuración del frente montañoso) y las fuerzas tectónicas (que tienden a producir un frente montañoso resistente), lo cual coincide con el trazo de la falla activa que lo configura (Keller y Pinter 1996). Igualmente, este último indicador define la relación entre la tasa de erosión y la movilidad tectónica, en la que esta movilidad hace (para este tipo de escenario) que los drenajes discurran de forma perpendicular u oblicua al rumbo del frente montañoso y converjan en un gran río longitudinal cerca del frente, en donde los productos detríticos (arenas y gravas) se concentran cerca a este por subsidencia del *foreland* o antepais (Burbank y Anderson 2001). Todo esto deja en claro que el paisaje desarrollado en esta región obedece al accionar de la tectónica activa. El río longitudinal al frente montañoso, particularmente, es el que forman en este caso los ríos Guatiquía y Meta en proximidad a Villavicencio; los ríos que cruzan este frente deformado para confluir con este río longitudinal son (de sur a norte): Upin, Guacavía, Humea y Upía (véase figura 3).

El contexto morfotectónico para la falla Guaicaramo, en cercanías a Villavicencio, no es nada diferente en comparación con el escenario argentino, en donde en 1944 se produjo el sismo de la provincia de San Juan (Argentina) (véase las figuras 3, 6 y 7). Para este último caso, el plano de falla se profundiza por pocos kilómetros, y su ángulo de buzamiento es bajo en profundidad y alto hacia la superficie, definiendo así un cabalgamiento (Alvarado y Beck 2006; Meigs et ál. 2006). El resultado de ello es que el frente de cabalgamiento (para el caso argentino) es tectónicamente activo debido a que los sedimentos que lo constituyen se encuentran deformados y cizallados y a que su edad es inferior al Plioceno (Meigs et ál. 2006; Perucca y Paredes 2003).

Para el caso colombiano, la situación es similar, aunque, al parecer, la estructura que gobierna el cabalgamiento a nivel general en esta región no es la falla

Guaicaramo sino la falla Servitá, de acuerdo con los modelos de retrodeformación de Mora (2007) y a lo verificado en esta investigación por medio del análisis fotogeológico con imágenes satelitales. De acuerdo con Mora (2007), el frente de cabalgamiento que da origen a la Serranía de Las Palomas solo se accionó para dar origen a esta en los últimos tres millones de años. Por consiguiente, la serranía misma es la evidencia neotectónica más clara de estas fallas en esta región.

La falla Servitá (véase figura 4), de acuerdo con Mora (2007) y con Mora et ál. (2010), es la estructura que gobierna el estilo de la deformación en esta región del piedemonte llanero colombiano. Su longitud aproximada es de 138 km (Paris et ál. 2000) y su estilo estructural es el de un buzamiento de alto ángulo cerca a la superficie y es listrica con bajo ángulo en su profundidad (Chicangana et ál. 2007). Parra (2008) indica que la tasa de propagación del orogeno en la cordillera Oriental durante el lapso Mioceno-presente, osciló entre 2 y 2,1 mm/año, y que el frente de deformación que controla la falla Servitá se desarrolló en menos de dos millones de años, teniendo presente para este último cálculo la edad de exhumación de las rocas de basamento, de acuerdo con Mora et ál. (2010).

Los rasgos que en la imagen satelital muestra la falla cerca a Villavicencio, en la figura 4, dejan en claro que esta estructura es tectónicamente activa, tal como inicialmente Page (1986) y París et ál. (2000) lo indicaron. En campo, a lo largo de su trazo son evidentes los escarpes de falla pronunciados, los deslizamientos alineados al trazo, los valles colgados, el control estructural de los cauces de los ríos que la cruzan y las terrazas y mesas con depósitos levantados y deformados de la edad del Pleistoceno.

La falla Algeciras-Urbe cruza de manera oblicua la cordillera Oriental desde el piedemonte llanero, al noreste en el departamento del Meta, hasta el valle alto del río Magdalena, al suroeste, en el departamento del Huila. Este corredor de fallas tiene una longitud aproximada de 160 km (Paris et ál. 2000), aunque Velandia et ál. (2005) indican que son 350 km. Los indicios de tectónica activa de esta falla están claramente expuestos por Velandia y Montes (2005) para un sector de la falla Algeciras, al sur de nuestro sector de análisis (véase figura 5), y, de igual manera, París et ál. (2000) establecen varios rasgos morfotectónicos que demuestran la actividad tectónica reciente de esta estructura. Desde el punto de vista geológico, la falla Algeciras pone en contacto el basamento mesoproterozoico del macizo de Garzón con

rocas paleógenas y del Cuaternario (Gómez et ál. 2007); se trata de un cabalgamiento en el que el basamento se exhibe al occidente y está controlado por la estructura. De acuerdo con la información geológica que indican Gómez et ál. (2007), el Cuaternario que se observa en el municipio de Lejanías, consiste de abanicos aluviales disectados por los actuales ríos, con edades que abarcan el lapso Pleistoceno inferior-superior. Al afectar la falla estos sedimentos, se evidencia una movilidad tectónica reciente para este sector, observándose escarpes de falla, valles colgados y drenajes controlados estructuralmente, junto con el levantamiento y basculamiento de terrazas aluviales. Estos rasgos de tectónica activa son observables sobre todo en las cuencas altas de los ríos Duda (municipio de Uribe), Guejar (municipio de Mesetas) y Guape (municipio de Lejanías). El cambio abrupto topográfico presentado entre la cordillera Oriental y el piedemonte está controlado en esta región por la falla (véase figura 5).

### Sismicidad de las fallas del SFFCO cercanas a Villavicencio

Aquí se ha realizado una revisión y ajuste de la sismicidad histórica de esta región a partir de la compilación de varios catálogos (figura 8). Igualmente se muestra la sismicidad instrumental que ha registrado la Red Sismológica Nacional de Colombia —en adelante, RSNC— (figura 9).

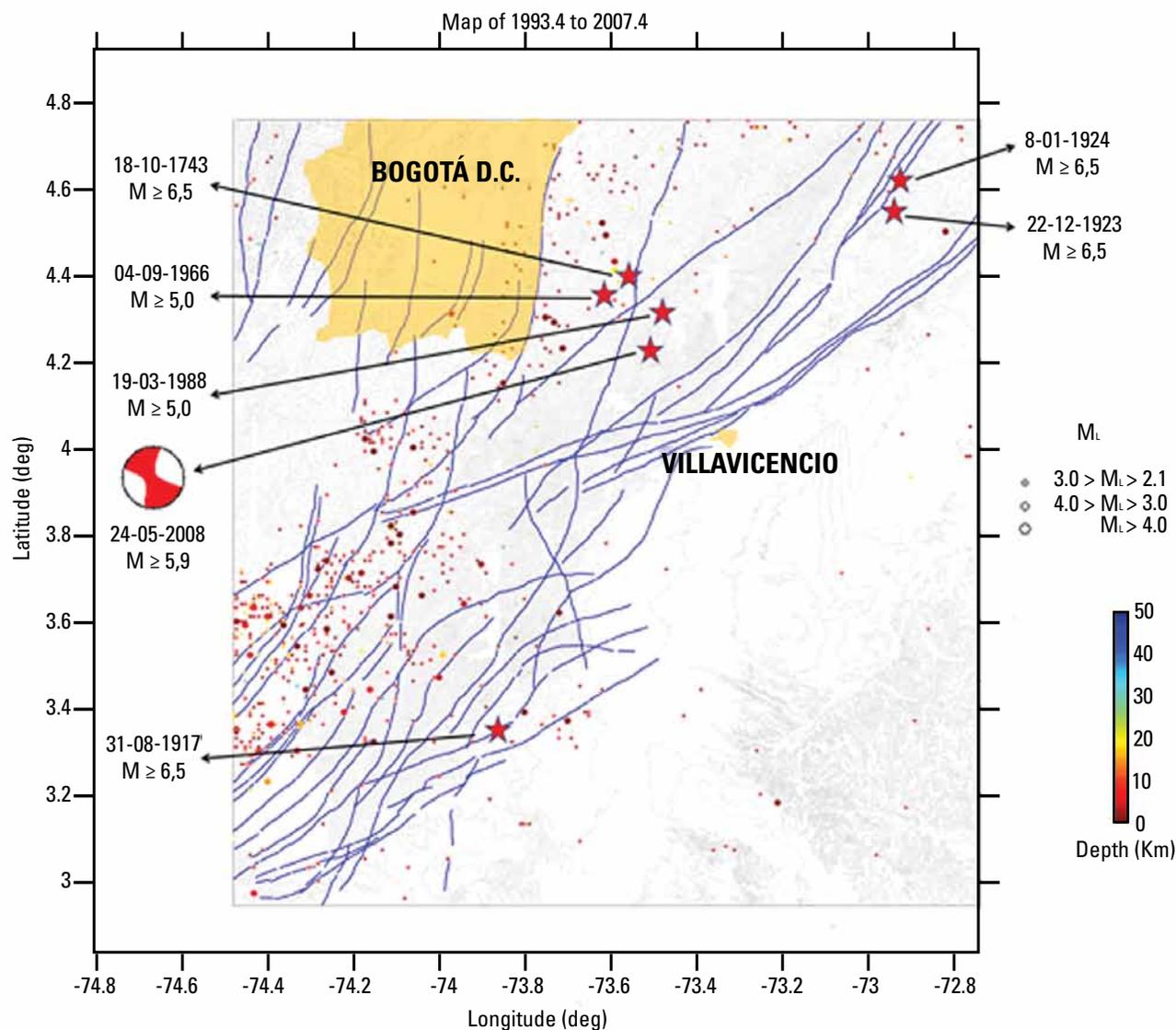
La sismicidad histórica está debidamente soportada por diversos autores, como Ramírez (1975) y Espinosa Baquero (2004), entre otros; pero en concreto para esta región se destaca el trabajo de Sarabia Gómez, Cifuentes Avendaño y Robertson (2010), que es muy puntual con el objetivo de este trabajo. Con respecto a la sismicidad instrumental del siglo XX, antes de la instalación y despliegue de la RSNC, se destaca la información compilada por CERESIS (2012) y el estudio con respecto a la falla Algeciras realizado por Dimate, Rivera y Cisternas (2005) sobre el sismo del 9 de febrero de 1967 (IRIS 2012).

En cuanto al registro instrumental de la RSNC, este solo muestra la sismicidad en un ámbito regional, ayudando a visualizar la sismicidad de las tres principales fallas exhibidas aquí. Salvo la ocurrencia del sismo de Quetame, el 24 de mayo del 2008, en un contexto local para Villavicencio, solo el sismo del 31 de agosto de 1917 es el único antecedente histórico importante que demuestra que la amenaza sísmica de la ciudad es alta. Con la incertidumbre que hay para esta región y para

Bogotá, la ocurrencia de un gran sismo en un futuro cercano, asociado principalmente a las fallas Servitá o Guaicaramo (por ser estas las más próximas a Villavicencio), es hasta la fecha poco probable, debido a la carencia de un registro previo de sismicidad instrumental local que para dichas fallas tenga una duración de más de dos décadas.

La ‘quiescencia’ o ‘período intersísmico’ es aquel que nos indica el tiempo requerido para la acumulación de esfuerzos en un sector de la corteza inestable, como por ejemplo, en una zona o segmento de falla. La ruptura de una asperidad que impide el desplazamiento de un plano de falla produce la liberación espontánea de los esfuerzos previamente acumulados por la obstrucción generada por la asperidad, y produce el sismo (Scholz 2001). El tamaño de la zona o segmento desplazado de manera espontánea está directamente relacionado con la magnitud del sismo; entre más grande sea el segmento, mayor será su magnitud (Brune 1970). Con la RSNC, hasta ahora solo se han conseguido verificar, desde un ámbito regional, sismos con focos cuya profundidad es menor a 50 km, asociados con las regiones de influencia de las fallas Algeciras-Uribe, Guaicaramo y Servitá. En estas zonas se presentan enjambres de sismos que se relacionan con estas estructuras, las cuales son las mayores de cada región (véase figura 9).

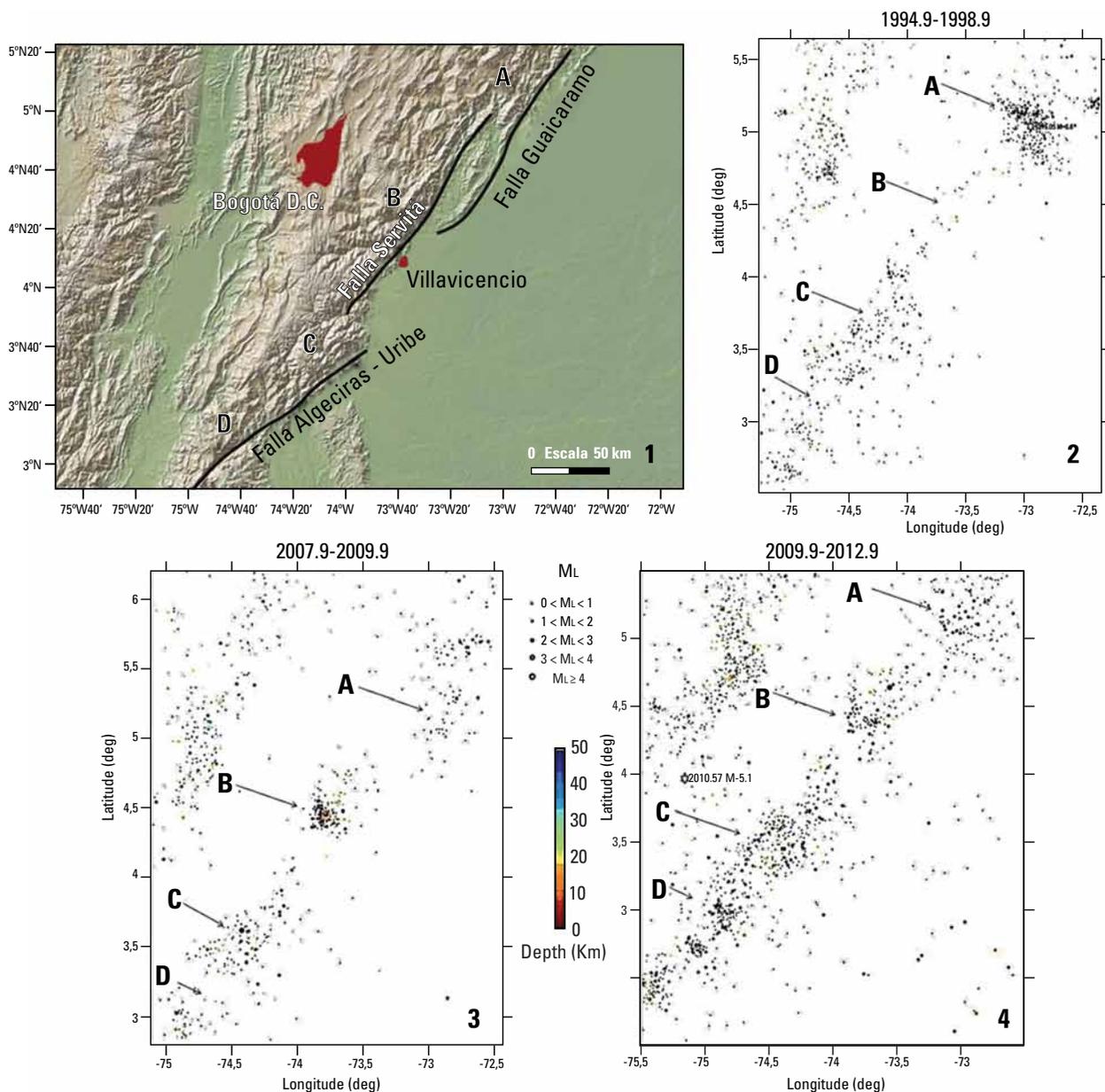
Para un lapso de tiempo inferior a 20 años, correspondiente al período 1993-2012, se ha constatado que la zona de influencia de la falla Algeciras-Uribe presenta una sismicidad alta, y la RSNC ha registrado durante este lapso varios sismos con  $M_L = 4,0$ . A esta región se le atribuyen los terremotos del 12 de julio de 1785 (Sarabia Gómez, Cifuentes Avendaño y Robertson 2010) y del 31 de agosto de 1917 (Chicangana et ál. 2011). La zona de influencia de la falla Servitá presenta, igualmente, una variación en función del tiempo con respecto a su sismicidad, y, durante este lapso de tiempo, en esta falla se presentó el sismo de Quetame con  $M = 5,9$ , de acuerdo con el reporte de la Red Mundial-NEIC. Esta región ha presentado varios sismos históricos, destacándose entre estos el sismo del 18 de octubre de 1743 (véase figura 8). Para la región que abarca la falla Guaicaramo se observa igualmente una variación en su sismicidad, y se destaca el sismo del 19 de enero de 1995 en Taurameña, departamento de Casanare, con  $M = 6,5$  (Dimate et ál. 2003), históricamente asociado con los sismos de 1923 y 1924, que afectaron a los municipios de Gachalá y Medina, en el departamento de Cundinamarca (Espinosa Baquero 2004).



**Figura 8.** Grandes sismos históricos (estrellas) y detalle del registro de la sismicidad instrumental de la RSNC para el lapso 1993-2007 en la región de Villavicencio y el piedemonte llanero del centro de Colombia (círculos).

Datos: Ingeominas 2012.

*Nota:* los epicentros de estos sismos históricos están soportados tanto en la información histórica recogida de archivos y diversas fuentes, como en el registro de la sismicidad instrumental de la Red Sismológica Mundial (CERESIS 2012) de los sismos correspondientes al siglo XX, previos al despliegue de la RSNC.



**Figura 9.** Modelo de elevación digital y registro sísmico instrumental para varios lapsos de tiempo.

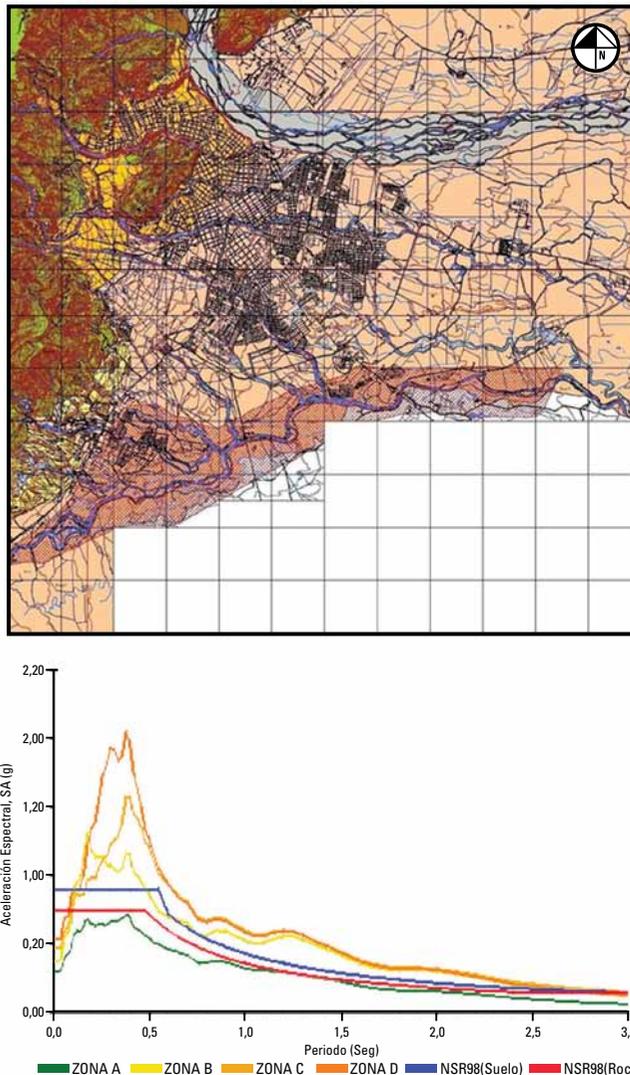
Datos: catálogo de la RSNIC para el lapso 1993-2012 (Ingeominas 2012).

*Nota:* 1) Modelo de elevación digital que muestra las fallas Algeciras-Uribe, Servitá y Guaicaramo. Las letras indican las cuatro regiones por donde se emplazan los segmentos mayores de falla para ilustrar la variación temporal de la sismicidad entre septiembre de 1994 y septiembre de 1998; 2) septiembre 2007-septiembre del 2009; 3) septiembre del 2009-enero del 2012; 4) observando estos lapsos de tiempo se destaca una coincidencia en la disposición de los enjambres sísmicos con la ubicación de las estructuras.

## Aspectos sismogeotécnicos y vulnerabilidad de la población por factores sociales y económicos

El subsuelo de la ciudad se ha conformado muy recientemente, en términos geológicos, y está constituido por sedimentos no consolidados que proceden del desarrollo de abanicos aluviales con edades que van desde el Pleistoceno medio al Pleistoceno superior e incluso al

Holoceno (Chicangana et ál. 2010). Dichos sedimentos conforman cerca del 70% del subsuelo del área urbana, constituidos de arcillas, arenas y gravas no consolidadas, con un alto porcentaje de saturación y espesores que superan los 100 m al oriente de la ciudad. Son susceptibles al fenómeno de la licuación de suelos, y por esta causa la aceleración sísmica esperada por la ocurrencia de un sismo de gran magnitud a nivel local fácilmente superaría las 2 g (Ojeda y Alvarado 2002).



### MAPA DE ZONIFICACIÓN SISMOGEOTÉCNICA DE VILLAVICENCIO

- Zona A (ZA) - Verde - Cerros.
- Zona B (ZB) - Amarillo - Piedemonte Aluvial.
- Zona C (ZC) - Rosado - Llanura.
- Zona D (ZD) - Anaranjado - Piedemonte Fluviotorrencial.
- Zona Potencialmente Licuable

### ZONAS SISMOGEOTÉCNICA SINDICATIVAS DEFINIDAS

**Zona A (ZA) - Cerros.** Esta zona corresponde al macizo rocoso localizado sobre el costado occidental del área de estudio, incluyendo el Cerro de Cristo Rey, conformada por intercalaciones de arcillolitas, areniscas y lodolitas. Se caracteriza por tener aceleraciones espectrales hasta de 0.7g aproximadamente, forma espectral y aceleraciones máximas muy similares a lo propuesto por la NSR98 para roca. (Z1)

**Zona B (ZB) - Piedemonte Aluvial.** Corresponde al depósito de suelo aluvial localizado en el piedemonte suroccidental de la ciudad, cuyo espesor oscila entre los 10 y 30 metros, presentando aceleraciones espectrales moderadamente altas hasta de 1.3g. (Z3)

**Zona C (ZC) - Llanura.** Corresponde a la zona donde está asentada la mayor parte de la población del área urbana conformada por los depósitos de suelos fluviotorrenciales localizados en sectores relativamente planos hacia el occidente de la ciudad y con espesores entre 20 y 60 metros. Igualmente la conforman los depósitos de suelos aluviales con espesores mayores a los 60 metros ubicados en el sector plano hacia el oriente de la ciudad. Se presentan aceleraciones espectrales considerablemente con valores hasta de 1.6g. (Z2B, Z2C, Z4B, Z4C, Z5A, Z5B)

**Zona D (ZD) - Piedemonte Fluviotorrencial.** Corresponde al depósito de suelo fluviotorrencial localizado en el piedemonte noroccidental de la ciudad y del Cerro Cristo Rey, con espesores entre 20 y 60 metros, el cual presenta las mayores aceleraciones espectrales del orden de 2.0g. (Z2A, Z4A).

Figura 10. Mapa de la zonificación sismogeotécnica indicativa de Villavicencio.

Fuente: Ojeda y Alvarado 2002.

Nota: en este mapa se muestran las zonas sismogeotécnicas indicativas definidas con su correspondiente valor de aceleración espectral máxima esperada.

En el sector correspondiente a la llanura, el suelo urbano está constituido por terrazas aluviales pertenecientes a la evolución de los actuales drenajes, como los ríos Guatiquía, Ocoa y los caños (como se denomina a nivel local a las quebradas), al igual que por meandros asociados principalmente a los caños y el río Ocoa. Los caños presentan longitudes de entre 2 km y más de 20 km. Por esta razón, este sector de la ciudad es susceptible de presentar inundaciones por el desborde de los cauces. Hacia el occidente de la ciudad, algunos barrios son vulnerables a los fenómenos de remoción de masa debido a que se asientan en la zona montañosa.

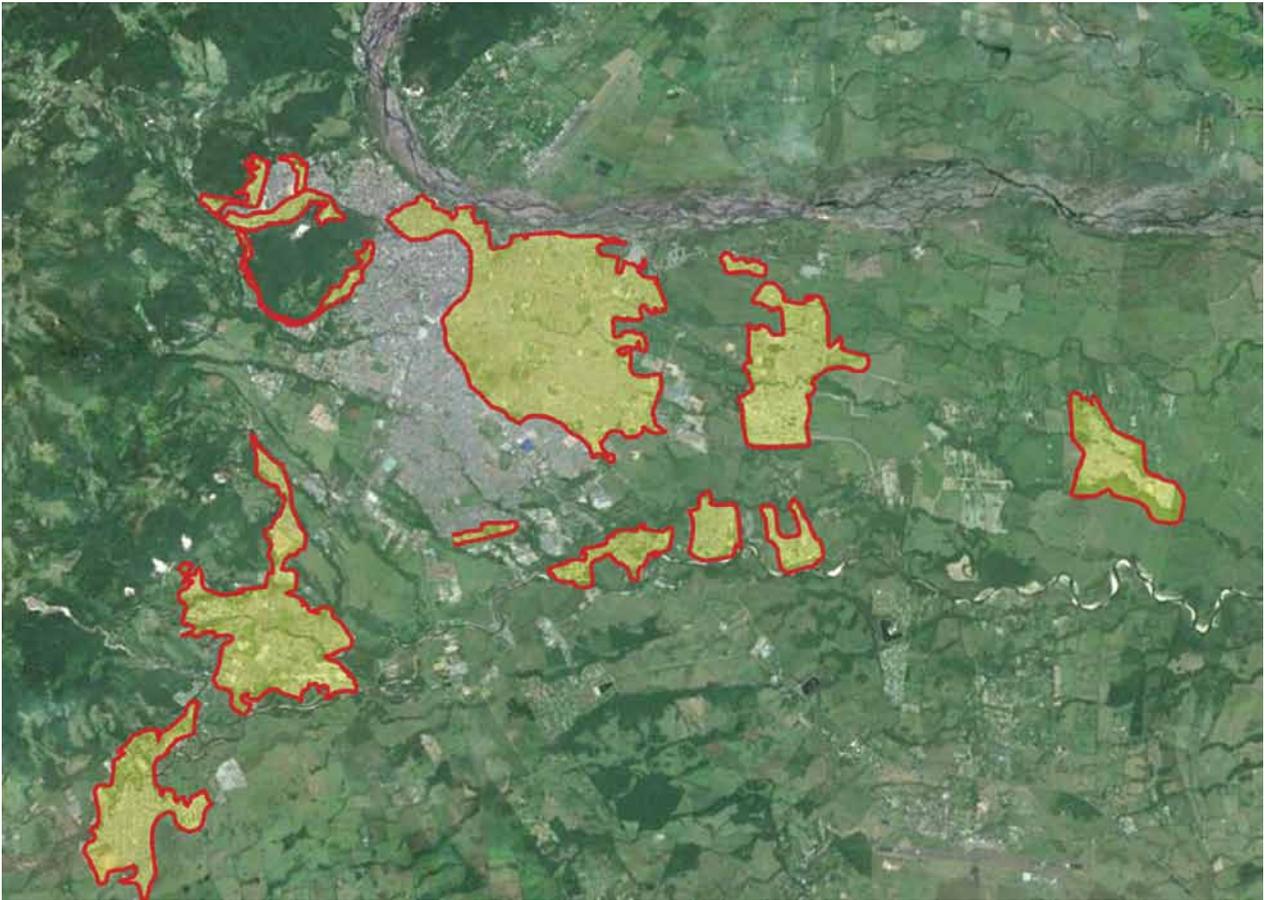
La zonificación sismogeotécnica indicativa realizada para la ciudad por parte de Ingeominas en 2000 (figura 10) determinó que Villavicencio se asienta en una zona de alto riesgo sísmico, y en comparación con ciudades que ya han sufrido terremotos —como Armenia y Popayán— su vulnerabilidad es mayor, debido a que, en términos de suelos, estos presentarían aceleraciones espectrales muy superiores a los de dichas ciudades. Igualmente se determinó que en el área urbana de Villavicencio, los periodos fundamentales se encuentran entre 0,20 y 0,75 segundos, estando acorde con los periodos de los registros de sismos tomados con una red portátil durante la estimación con perforaciones de los espesores del depósito fluvio-torrencial predominante en la ciudad (Ojeda y Alvarado 2002). La variación moderada en los periodos indica la relativa heterogeneidad y rigidez de los suelos de Villavicencio; sin embargo, tanto hoy como en los próximos 20 años, la tendencia de la ciudad es a urbanizarse hacia donde los suelos no están consolidados y presentan grandes espesores, es decir hacia el oriente del área urbana, en donde las aceleraciones y los periodos fundamentales son altos. Sumado a lo anterior, la población de la ciudad pasó de 384.000 habitantes en el 2005 a más de 450.000 en el 2011, de acuerdo con la proyección del DANE (2005), observándose que este crecimiento extiende (en el área urbana) las construcciones que no cumplen con la normatividad sobre sismorresistencia, debido a que las autoridades no la controlan, ni la hacen cumplir.

Particularmente en Villavicencio, las comunidades asentadas en zonas de riesgo están afectadas por fenómenos naturales derivados de la actividad tectónica y la alta pluviosidad presente en la región (IDEAM 2005). Además de la alta amenaza sísmica, en Villavicencio se presentan los fenómenos de remoción de masa e inundaciones producidas por los desbordos de los cauces de los ríos y caños. Las autoridades de Villavicencio, por lo

general, siempre han realizado como labor la atención, más no la prevención, de estos desastres naturales, algo que puede verse como una costumbre en Colombia y Latinoamérica. El término ‘vulnerabilidad’ se define como las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de las amenazas. Según el trabajo de Turkstra (1998), la evolución urbana reciente de Villavicencio muestra que para 1994 el 25% de la población de la ciudad se encontraba en un nivel socioeconómico entre bajo y muy bajo. Para el 2005 el DANE mostró que el 17,77% de la población de la ciudad se encontraba con necesidades básicas insatisfechas y el 25,7% de los hogares presentaban déficit convencional de vivienda; de acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos, en octubre del 2011, con un total de 442.000 habitantes proyectados para ese año (DANE 2005), el 51,2% de la población (226.304 habitantes) pertenecía a los estratos socioeconómicos 1 y 2, de los cuales el 20,6% era de estrato 1 (CENAC 2012) (figura 11).

De acuerdo al trabajo de Chicangana et ál. (2010), desde el 2009 este estrato se incrementó en 2,1%, aumentando obviamente los índices que señalan las necesidades básicas insatisfechas y el déficit convencional de vivienda, alcanzando la tasa de desempleo el 13,7% de la población en el 2011. El sector gubernamental junto con el Comité Local de Atención de Desastres (CLOPAD) poco han hecho por realizar campañas para reducir el efecto de los eventos naturales en los sectores de la población más vulnerables, ello debido a que no se han considerado soluciones concretas y efectivas, como por ejemplo, la reubicación de dichas comunidades en zonas de bajo riesgo o la toma de medidas que consigan mitigar los efectos de un terremoto en la ciudad.

La población más vulnerable de la ciudad a los fenómenos de remoción o inundaciones inició su ocupación desde la década de 1960, cuando se presentó la invasión de predios baldíos sin dueño o pertenecientes al sector gubernamental. En dicha época, se trataba de población de bajos recursos desplazada por la violencia política desde otras partes del país. Luego, para la década de 1980, se dio inicio a otra oleada migratoria debido al desplazamiento forzado por el conflicto armado y el narcotráfico (Turkstra 1998). Esta última oleada migratoria aún continúa, y es la que ha incrementado a la población de más bajos recursos en la ciudad. Solo desde el 2005 hasta hoy, la ciudad ha incrementado su crecimiento urbano en el 16%,



**Figura 11.** Ubicación de los barrios en Villavicencio cuya estratificación social pertenece a los estratos 1 y 2.

Datos: Google Earth 2012.

*Nota:* obsérvese la ubicación de estos barrios con los parámetros sismogeotécnicos de los suelos que ocupan (figura 10). La baja calidad de sus viviendas, sumada a las características de los suelos, indica que los resultados de la ocurrencia de un sismo serían desastrosos.

caracterizándose Villavicencio como una de las ciudades colombianas “promedio” con respecto a la cantidad de población más vulnerable. Se debe tener en cuenta que la vulnerabilidad a un sismo es mucho mayor en aquella población que presenta un déficit convencional de vivienda o una vivienda en pésimas condiciones (en términos de construcción) y que además tiene más de una necesidad básica insatisfecha.

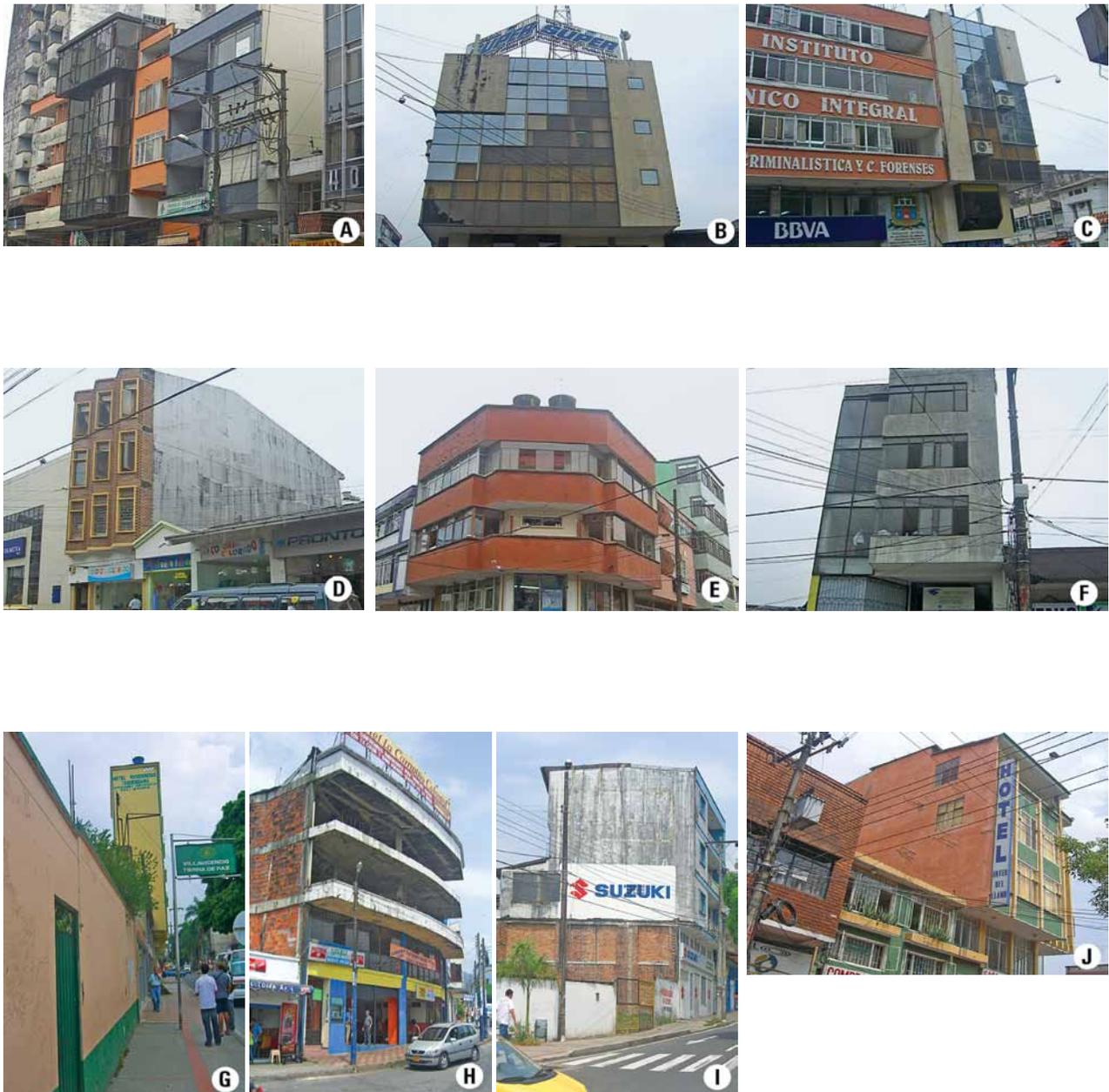
Otro aspecto considerado aquí es la informalidad, la cual, según el DANE (2012a), para el lapso diciembre del 2011-febrero del 2012, en Villavicencio fue del 61,4% entre la población ocupada de la ciudad (197.000 habitantes). Asociando este aspecto con los desastres naturales, entre mayor sea la informalidad de una ciudad, mayor será la dificultad que esta presentará, en términos de recuperación económica, luego de ocurrido un desastre natural, pues la población informal representa aquella cantidad de población que no aporta a la economía del Estado, siendo este quien en últimas asume el costo de

la recuperación de la ciudad a causa del desastre. En otras palabras, al darse un desastre natural se da un subsecuente desastre económico. Al respecto, Wilches-Chaux (1993) menciona el término vulnerabilidad económica, que, al ser asociado con la vulnerabilidad natural, podría significar que la población con bajos ingresos es la más vulnerable al desastre o sismo, y que junto con la población informal representan el vacío económico para el Estado en términos de recuperación.

Sumado a ello, la negligencia y mal uso de los recursos públicos por parte del sector gubernamental, debidos a la corrupción administrativa (Auditoría General de la República 2011; *El Tiempo* 2006), o en su defecto, a la no contemplación de políticas que incentiven la prevención de desastres y mitigación de efectos derivados de la amenaza sísmica en los planes de desarrollo y el plan de ordenamiento territorial —en adelante, POT—, ocasionan un aumento en la vulnerabilidad de la población frente a un eventual sismo.

En Villavicencio, los diversos episodios de ingobernabilidad y de corrupción administrativa de la ciudad durante la última década (Alcaldía de Villavicencio 2012; *El tiempo* 2006; Fierro Patino 2007), además de su desorganizado crecimiento urbano en este mismo tiempo han permitido la proliferación de muchas cons-

trucciones, con fines comerciales o residenciales, que en muchos casos no cumplen con las normas mínimas de sismorresistencia; lo que, junto con la baja calidad de las viviendas en los sectores más vulnerables de la población, aumentaría la penalidad del sismo en el área urbana (figura 12).



**Figura 12.** Fotografías que muestran algunos ejemplos de las malas condiciones estructurales y de sismorresistencia de algunos de los edificios de la ciudad.

Datos: Chicangana et ál. 2010.

*Nota:* edificios comerciales y de oficinas ubicados en el centro de la ciudad que son construcciones de alto riesgo por presentar efecto de colindancia (a y c), fachadas en voladizo sin reforzamiento estructural (b, c, e, f, h, j) y la no aplicación de las normas de sismorresistencia (d, e, f, g, h, i y j). Con estos ejemplos es claro que la vulnerabilidad a un sismo se incrementa de manera dramática para la ciudad de Villavicencio.

## Reflexión final: el posible escenario de riesgo

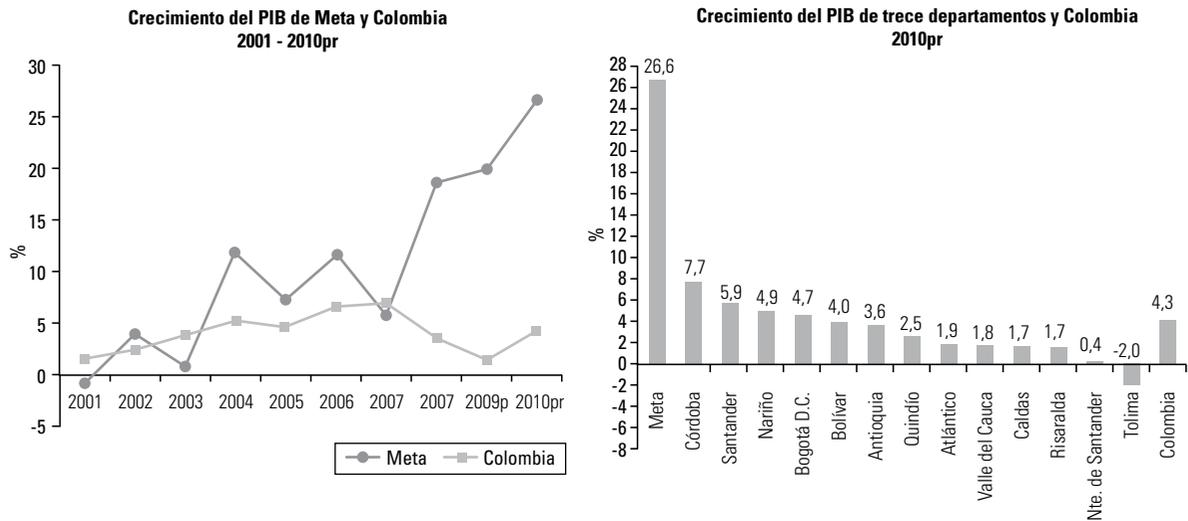
La alta tasa de crecimiento urbano de Villavicencio hace que si no se toman medidas correctivas en el corto plazo, su escenario posdesastre (derivado de la ocurrencia de un sismo con una magnitud mayor o igual a 6,5, cuyo foco tenga menos de 20 km de profundidad y cuyo epicentro se localice a menos de 20 km de la ciudad), tendrá efectos devastadores. El tamaño del desastre estimado aquí es resultado de la suma de elementos como: la naturaleza del subsuelo de la ciudad, la tectónica activa, la sismicidad, la población vulnerable por su localización, la pésima calidad de las construcciones y la falta de responsabilidad por parte de las autoridades frente al tema. Igualmente se plantea este posible escenario teniendo presentes los efectos de grandes sismos que han afectado a ciudades colombianas durante las últimas décadas: Popayán en 1983 y Armenia en 1999. El escenario planteado, sobretodo, hace énfasis en el último sismo (el de Armenia) desde el punto de vista socioeconómico y de la calidad de las construcciones que predominan en Villavicencio, considerando a los estratos socioeconómicos 1 y 2. Sin embargo, se ha demostrado que no solo los estratos socioeconómicos bajos, en general, sean los más vulnerables a un sismo, ya que si se enfatiza en el no cumplimiento de las normas de sismorresistencia de las construcciones de los estratos socioeconómicos medio y alto y de las construcciones comerciales, el desastre se incrementaría. El resultado del hipotético sismo produciría al menos 1.000 víctimas fatales en la ciudad y 1.500 en la región al momento de la ocurrencia del terremoto. Si no son rescatados oportunamente, posiblemente 2.000 víctimas más morirían entre las ruinas de los edificios colapsados durante las siguientes semanas o 10 días.

Debido a la destrucción de sus viviendas, al menos 50.000 personas resultarían heridas, y cerca de 300.000 personas serían damnificadas en Villavicencio y en la región vecina a la ciudad, como en los municipios de Acacías, Cumaral y Restrepo, principalmente. La ciudad se paralizaría, ya que se encontraría sin servicios públicos durante un lapso de tiempo que por lo menos superaría los tres meses, considerando el deficiente estado actual de su infraestructura en muchos aspectos técnicos. Las fugas de gas producirían incendios locales incrementando víctimas y pérdidas materiales. La carretera Bogotá-Villavicencio quedaría bloqueada por un sinnúmero de fenómenos de remoción de masa que obstruirían o

generarían desbancamientos de tramos de la vía, por lo que se retrasaría la oportuna atención externa, en este caso desde Bogotá y el centro del país. Este último factor incrementaría igualmente las pérdidas económicas y el número de víctimas. En esta investigación se estima que cerca del 70% del área urbana resultaría destruida, de acuerdo con la zonificación sismogeotécnica indicativa realizada por Ingeominas y con la cantidad de población con déficit convencional de vivienda, según el trabajo de Turkstra (1998) (quien mostró la vulnerabilidad de las construcciones de la ciudad a las amenazas naturales, y la calidad de los edificios en la década de 1990, que, en términos cuantitativos, después de cerca de dos décadas de haberse realizado el estudio, se mantienen).

Las pérdidas económicas resultantes del sismo serían superiores en más de tres veces a las pérdidas equivalentes que se presentaron con la ocurrencia del sismo de Armenia el 25 de enero de 1999. Igualmente se ha considerado aquí lo expuesto por el DANE (2012b) sobre la participación del departamento de Meta para el lapso 2009-2010 (figura 13) en el producto interno bruto —en adelante, PIB— nacional, pues, a partir de esto, el sismo paralizaría la producción agroindustrial y petrolera, particularmente debido al colapso de la infraestructura vial, ya que a nivel regional la emergencia con el cierre del corredor vial principal entre la Orinoquía y el resto del país (carretera Bogotá-Villavicencio) produciría pérdidas económicas y encarecería sustancialmente los productos, tanto para la región como para el país, por un lapso de tiempo no inferior a varios meses, mientras se recupera la carretera para el tráfico pesado.

Es posible que el potencial de generación económica que la ciudad llegue a tener en el momento del sismo consiga recuperarlo en el transcurso de un lustro a nivel de infraestructura urbana; pero, considerando que en la ciudad impera un estrato socioeconómico bajo en más de la mitad de su población y que presenta una mala planificación urbana junto con la falta de un POT coherente para el desarrollo de esta, el tiempo de recuperación podría ser superior a una década, teniendo presente que esta misma situación ya se ha observado (con una severidad un poco menor a la hipotéticamente expuesta aquí para Villavicencio) en otras ciudades de Colombia, como en Armenia y Popayán (en estos últimos casos persistieron los retrasos en la reconstrucción, y luego de haber pasado más de un década de ocurrido el sismo ambas áreas urbanas no se habían recuperado aún en su totalidad).



**Figura 13.** Cuadros que muestran el incremento del PIB del departamento del Meta proyectado para el 2010.

Datos: CENAC 2012, 2.

*Nota:* a la izquierda, el crecimiento del PIB del departamento de Meta comparado con el de Colombia, proyectado para el lapso 2001-2010. A la derecha, el crecimiento del PIB del departamento de Meta con respecto a otros departamentos y a Colombia, proyectado en el 2010.

Finalmente, hay que recordar la premisa de que la no inversión en la prevención de un sismo en una ciudad o región llega a ser más costosa a largo plazo que la inversión misma que se realice en el mismo lapso para mejorar la calidad de vida y el desarrollo sostenible de sus habitantes.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores Claudia Mojica Sánchez, de la Corporación Universitaria del Meta; a Tulio Hernández, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Regional Meta, y a las Fundaciones Kinkaju y Nueva Herencia de Villavicencio.

Este trabajo es el resultado de las investigaciones y las labores encaminadas a difundir el alcance de la amenaza sísmica en la ciudad de Villavicencio y el pie-

demonte llanero por parte del Grupo de Investigación Estudios sobre Riesgo Sísmico y Amenazas Naturales del Piedemonte Llanero, de la Corporación Universitaria del Meta (de Villavicencio), con el apoyo de investigadores del Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y del Grupo Geofísica, de la Dirección Nacional de Investigaciones de la Universidad Antonio Nariño de Bogotá. Para estos últimos, el trabajo fue adelantado en cofinanciación y con el apoyo parcial de Colciencias-Renata, en el marco del proyecto código 1233-487-25728, número de contrato 589-2009, entidades a las cuales los autores expresan su gratitud y reconocimiento.

Igualmente, se agradece especialmente a los dos revisores anónimos por sus sugerencias, con las cuales se mejoró y enriqueció el texto.

**Germán Chicangana**

Ingeniero de Minas de la Fundación Universitaria de Popayán (1996) y máster con énfasis en Geología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (2005). Es profesor-investigador de la Corporación Universitaria del Meta (Villavicencio) e investigador del Grupo Geofísica, del Departamento de Geociencias, de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Su labor investigativa abarca temas como amenaza sísmica, geodinámica, geotectónica y sismotectónica.

**Carlos Alberto Vargas-Jiménez**

Geólogo de la Universidad de Caldas (1994), máster en Ingeniería Sísmica (2000) y Ph. D. (2004) en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Catalunya (España). Es profesor asociado y líder del Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Su labor investigativa abarca temas en geología, geofísica aplicada, desarrollo de instrumentación geofísica y sismología.

**Alexander Caneva**

Físico (1992), máster en Física (1995) y Ph. D. en Física (2001) de la Universidad Estatal de Moscú (Rusia). Es profesor de la Pontificia Universidad Javeriana y de la Universidad Antonio Nariño de Bogotá. Es también investigador en Física y Sismología de la Dirección Nacional de Investigaciones (DNI) de la Universidad Antonio Nariño (Bogotá).

## Referencias

- Alcaldía de Villavicencio. 2012. *Expediente municipal: suelo, espacio público; división territorial*. Unidad XI, Alcaldía de Villavicencio. <http://www.alcadiadevillavicencio.gov.co/ws/Documentos/ExpedienteMunicipal/Diagnostico-Sectorial-suelo.pdf> (consultado en mayo del 2012).
- Alvarado, Patricia y Susan L. Beck. 2006. Source Characterization of the San Juan (Argentina) Crustal Earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8). *Earth and Planetary Science Letters* 243 (3-4): 615-631. <http://www.geo.arizona.edu/web/Beck/pubs/Alvarado-BeckEPSL2006.pdf> (consultado en mayo del 2012).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)-Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). 1996. *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá: AIS Universidad de los Andes-Ingeominas.
- Auditoría General de la República. 2011. *Control al control de la contratación: riesgos, desaciertos y posibilidades*. Bogotá: Auditoría General de la República.
- Brune, James N. 1970. Tectonics Strain and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 75 (26): 4997-5009.
- Burbank, Douglas W. y Robert S. Anderson. 2001. *Tectonic Geomorphology*. Oxford: Blackwell Cience.
- Centro de Estudios de la Construcción y el Desarrollo Urbano y Regional (CENAC). 2012. *Boletín estadístico-contexto sectorial: Villavicencio (Meta)*. Bogotá: CENAC. [http://www.cenac.org.co/apc-aa-files/bfa6177b81c83455250e-861305d7a28f/documento-villavicencio\\_meta-abril-12.pdf](http://www.cenac.org.co/apc-aa-files/bfa6177b81c83455250e-861305d7a28f/documento-villavicencio_meta-abril-12.pdf) (consultado en mayo del 2012).
- Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). 2012. *Consulta al catálogo de hipocentros (1520-1991)*. Lima: CERESIS. [http://www.ceresis.org/portal/catal\\_hipo.php](http://www.ceresis.org/portal/catal_hipo.php) (consultado en mayo del 2012).
- Chicangana, Germán E., Carlos Alberto Vargas-Jiménez, Andreas Kammer, Tulio A. Hernández y Luis Hernán Ochoa-Gutiérrez. 2007. Caracterización sismotectónica regional preliminar de un sector del piedemonte llanero colombiano: corredor San Juan de Arama-Cumaral, Meta. *Boletín de Geología-VIS* 29 (1): 61-74.
- Chicangana, Germán E., Carlos Alberto Vargas-Jiménez, Alexander Caneva, Tulio A. Hernández, Claudia Mojica Sánchez, Johann Ardila Escobar y Alejandra Bernal Jiménez. 2010. La sociedad frente a la gestión del riesgo: caso sobre la amenaza sísmica en la ciudad de Villavicencio. *Boletín de Geología-VIS* 32 (1):125-141 <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/articulo/view/1577> (consultado en mayo del 2012).
- Chicangana, Germán E., Carlos Alberto Vargas-Jiménez, Andreas Kammer y Alexander Caneva. 2011. Determinación de las sismofuentes capaces de generar un sismo  $M \geq 6,5$  para las próximas décadas, en la región del piedemonte llanero contiguo a Villavicencio. *Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Geología*, Medellín, Colombia, 150-151.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2005. *Censo general 2005: nivel Nacional*. Bogotá: DANE. <http://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf> (consultado en mayo del 2012).
- DANE. 2012a. *Sociales: mercado laboral*. Bogotá: DANE. [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=61&Itemid=67](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=67) (consultado en mayo del 2012).
- DANE. 2012b. Cuentas departamentales-Base 2005: Resultados PIB departamental, 2009 y 2010. *Boletín de prensa*, 25 de mayo del 2012. [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/departamentales/B\\_2005/Resultados\\_2010.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/departamentales/B_2005/Resultados_2010.pdf) (consultado en mayo del 2012).
- Diederix, Hans. 2001. La geotectónica y la paleosismología para la evaluación del potencial sismogénico de las fallas activas en Colombia: necesidades y prioridades. *Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geología*, Manizales, Colombia. (CD-Room).
- Dimate, Cristina, Luis Rivera, Alfredo Taboada, Bertrand Delouis, Alonso Osorio, Eduardo Jimenez, Andrés Fuenzalida, Armando Cisternas e Isabel Gómez. 2003. The 19 January 1995 Tauramena (Colombia) Earthquake: Geometry and Stress Regime. *Tectonophysics* 363 (3-4): 159-180.
- Dimate, Cristina, Luis Rivera y Armando Cisternas. 2005. Re-visiting Large Historical Earthquakes in the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of Seismology* 9 (1): 1-22.
- Espinosa Baquero, Armando. 2004. *Historia sísmica de Colombia 1550-1830*. Armenia: Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.
- El Tiempo*. 2006. Cinco alcaldes encargados ha tenido Villavicencio en los últimos 478 días. 5 de octubre. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3272759> (consultado en mayo del 2012).
- Fierro Patino, Manuel Javier. 2007. *Factores que afectan la empresarialidad en el municipio de Villavicencio en el periodo comprendido entre los años 1994-2004*. Tesis de Magíster en Gestión del Desarrollo con énfasis en Desarrollo Local y Regional. Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Medellín. <http://empresasvillavo.files.wordpress.com/2008/02/estudioempresarialidad.pdf> (consultado en mayo del 2012).

- GeoCover-NASA. 2012. *Current Landsat circa 1990/2000 Coverage Available*. <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>
- Gómez, Jorge, Álvaro Nivia Guevara, Nohora Emma Montes Ramírez, D. M. Jiménez, J. Sepúlveda, T. Gaona, J. A. Osorio, H. Diederix, M. Mora y M. E. Velásquez, comps. 2007. *Atlas geológico de Colombia. Escala 1:500.000*. 26 planchas. Bogotá: Ingeominas. <http://www.ingeminas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia/Atlas-Geologico-de-Colombia.aspx> (consultado en septiembre del 2011).
- Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS). 2012. Seismograms of the 1967 Huila (Colombia) Earthquake. En *1967 Huila (Colombia) Earthquake Archive*. USA: IRIS, The University of Michigan. <http://www.iris.edu/seismo/quakes/1967huila/> (consultado en mayo del 2012).
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). 2012. *Red sísmológica nacional de Colombia*. Bogotá: Ingeominas. <http://seisan.ingeminas.gov.co/RSNC/> (consultado en marzo del 2012).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2005. *Atlas climático de Colombia*. Bogotá: IDEAM. <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/019711/019711.htm> (consultado en mayo del 2012).
- Keller, Edward A. y Nicholas Pinter. 1996. *Active Tectonics, Earthquakes: Uplift and Landscape*. 2<sup>ed</sup>. New York: Prentice Hall.
- Martínez Díaz, José J. 1998. *Neotectónica y tectónica activa del sector centro-occidental de la región de Murcia y sur de Almería (cordillera Bética, España)*. Tesis doctoral. Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, España. <http://eprints.ucm.es/tesis/19972000/x/4/x4009501.pdf> (consultado en marzo del 26/03/2012).
- Meigs, Andrew, William C. Krugh, Celia Schiffman, Jaime Vergés y Víctor A. Ramos. 2006. Refolding of Thin-Skinned Thrust Sheets by Active Basement-involved Thrust Faults in the Eastern Precordillera of Western Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (4): 589-603. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v61n4/v61n4a13.pdf> (consultado en mayo del 2012).
- Mora, Andrés. 2007. *Inversion Tectonics and Exhumation Processes in the Eastern Cordillera of Colombia*. Tesis doctoral en Naturwissenschaften. Wissenschaftsdisziplin Geologie eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Universität Potsdam, Postdam, Alemania.
- Mora, Andrés, Mauricio Parra, Manfred R. Strecker, Edward R. Sobel, Gerold Zeilinger, Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Silane Ferreira Da Silva y Mauricio Blanco. 2010. The Eastern Foothills of the Eastern Cordillera of Colombia: An Example of Multiple Factors Controlling Structural Styles and Active Tectonics. *Geological Society of America Bulletin* 122 (11/12): 1846-1864.
- Ojeda, J. y C. Alvarado. 2002. Zonificación sismogeotécnica indicativa de la ciudad de Villavicencio. En *Zonificación integral por amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio (Meta)*. Villavicencio: Ingeominas-Alcaldía de Villavicencio, Convenio interadministrativo 009/2000, vol. II.
- Page, William D. 1986. Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia. Medellín: Woodward-Clyde Consultants, ISA, Integral.
- Paris, Gabriel, Michael N. Machette, Richard L. Dart y Kathleen M. Haller. 2000. *Map and Database of Quaternary Faults and Folds of Colombia and its Offshore Regions*. Open-File Report 00-0284. <http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0284/ofr-00-0284.pdf> (consultado en junio del 2011).
- Parra, Mauricio. 2008. *Cenozoic Foreland-basin Evolution in the Northern Andes: Insights from Thermochronology and Basin Analysis in the Eastern Cordillera, Colombia*. Tesis doctoral en Naturwissenschaften. Wissenschaftsdisziplin Geologie, Institut für Geowissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Universität Potsdam, Alemania. [http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2009/2933/pdf/parra\\_diss.pdf](http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2009/2933/pdf/parra_diss.pdf) (consultado en junio del 2011).
- Perucca, Laura Patricia y Juan de Dios Paredes. 2003. Fallamiento cuaternario en la zona de La Laja y su relación con el terremoto de 1944, Departamento de Albardón, San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20 (1): 20-26.
- Procuraduría General de la Nación. 2009. 304-9: *Pliego de cargos en 4 departamentos y 3 municipios por mal manejo de regalías*. Bogotá: Procuraduría General de la Nación. [http://www.procuraduria.gov.co/html/noticias\\_2009/noticias\\_304.htm](http://www.procuraduria.gov.co/html/noticias_2009/noticias_304.htm) (consultado en mayo del 2012).
- Ramírez, Jesús Emilio. 1975. *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Robertson, Kim G. 1989. Actividad neotectónica del piedemonte de la cordillera Oriental. *Memorias del V Congreso Colombiano de Geología*, Bucaramanga, Colombia.
- Robertson, Kim. G. 2005. Morfotectónica y dataciones del fallamiento activo del piedemonte llanero, Colombia. *Memorias del X Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá, Colombia.
- Sarabia Gómez, Ana Milena, Hernán Guillermo Cifuentes Avendaño y Kim Robertson. 2010. Análisis histórico de

- los sismos ocurridos en 1785 y en 1917 en el centro de Colombia. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía* 19:153-162. Bogotá: Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia.
- Scholz, Christopher, H. 2001. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Turkstra, Jan. 1998. *Urban Development and Geographical Information: Spatial and Temporal Patterns of Urban Development and Land Values Using Integrated Geo-data, Villavicencio, Colombia*. Enschede, Netherlands: ITC Publication Series.
- Velandia P., Francisco A. y Nohora Montes. 2005. Actividad neotectónica del sistema de fallas de Algeciras en el departamento del Huila. *X Congreso Colombiano de Geología y IV Seminario sobre el cuaternario en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Velandia P., Francisco A., Jorge Acosta, Roberto Terraza y Henry Villegas. 2005. The Current Tectonic Motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. *Tectonophysics* 399 (1-4): 313-329.
- Vérgara, S, Heyley, 1996. Rasgos y actividad neotectónica de la falla de Algeciras. *Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología*, 491-500. Bogotá, Colombia.
- Wilches-Chaux, Gustavo. 1993. La vulnerabilidad global. En *Los desastres no son naturales*, comp. Andrew Maskrey, 11-44. Panamá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina: La Red. <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap2.htm> (consultado en mayo del 2012).