

# TECTONICA ACTIVA Y SISMICIDAD EN LA SABANA DE BOGOTÁ (COLOMBIA – SUR AMERICA)

Julio Fierro-Morales\*<sup>a</sup>, Jennifer Angel-Amaya\*<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Geólogo MSc. Geotecnia [Juliofierro.morales@gmail.com](mailto:Juliofierro.morales@gmail.com), <sup>b</sup> Geóloga [Jangelmaya@gmail.com](mailto:Jangelmaya@gmail.com)

\*Grupo TERRA Carrera 19A No 82-14 oficina 202 Bogotá D.C. Colombia-Sur América

## RESUMEN

En la Sabana de Bogotá existe una tendencia NNE-SSW en la orientación de las estructuras regionales generadas por la acción del sistema compresivo andino (WNW-ESE), aunque para el sur de Bogotá, las grandes zonas de daño o de rocas cizalladas se disponen predominantemente a lo largo del sistema de cizalla sinistral NW. La investigación que se presenta incluye la interpretación morfotectónica de sensores remotos, el análisis estructural de fracturas y zonas de falla, la reconstrucción de campos de esfuerzo tectónico y el análisis de sismos históricos y recientes que han sido documentados para zonas cercanas a la Sabana de Bogotá. De acuerdo al análisis de la sismicidad instrumentada (1921-2008) y la sismicidad histórica (1644-1921) -de la cual se tiene información de daños en asentamientos antiguos- grandes zonas de falla N-S y NW-SE, son las mayores estructuras que controlan la actividad sísmica en la Sabana de Bogotá y región oriental. El sismo reciente (24 de mayo de 2008) Mw = 5,9, generó una zona de propagación de ondas en dirección N293W/87SW sinistral, según el plano de ruptura posible del mecanismo focal, a lo largo de la zona de cizalla NW del Sur de Bogotá. Adicionalmente, rasgos meso estructurales indican desplazamiento normal a lo largo de las mayores fallas NW, por lo tanto el sistema NW-SE está caracterizado por desplazamiento oblicuo sinistral y normal. Los campos de esfuerzo reconstruidos de la orientación de las fallas y las fracturas de cizalla muestran los tipos de tensores de esfuerzo asociados con el desarrollo estructural de la Sabana de Bogotá: (1) Tensión NNW-SSE (sigma 3) y (2) Contracción ENE-WSW (sigma 1). La comparación entre los datos obtenidos y modelos análogos de sistemas estructurales formados bajo las variables asumidas, indican que los rasgos observados y los campos de esfuerzo inferidos para la Sabana de Bogotá, son propios de ambientes de extensión oblicua.

**Palabras clave:** Sabana de Bogotá; Zonas de cizalla; Campos de esfuerzo; Sismos; Morfotectónica.

## INTRODUCCIÓN

La Sabana de Bogotá es una cuenca intra-montana de 4500 km<sup>2</sup> ubicada a 2600 msnm en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos (Fig. 1). Esta cuenca se formó de manera contemporánea con el ascenso andino hacia el inicio del Mioceno (23,7 Ma) y llegó a su altura actual hacia finales del Plioceno (3,5 Ma). Las rocas que conforman sus bordes y el sustrato es una secuencia cretácica – paleógena y los depósitos de relleno son neógenos (menos de 3,5 Ma), con predominio de secuencias aluviales en la base y lacustres hacia el tope sedimentados en una laguna que inició su desecación hace aproximadamente 30.000 años (Van der Hammen, 1995). El espesor de estas secuencias puede sobrepasar 500 metros hacia el centro de la cuenca. La deformación tectónica ha sido interpretada en función de la orogenia andina, con estructuras principales orientadas NNE-SSW.

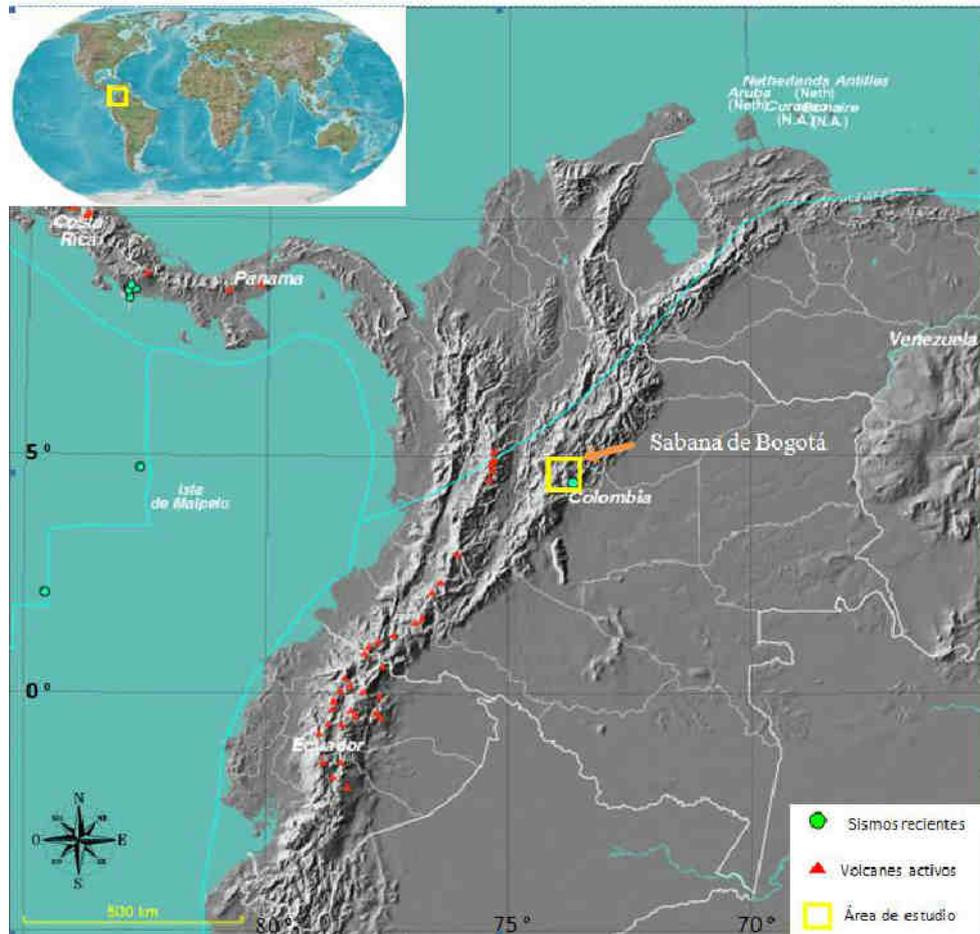


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Con la ubicación del sismo reciente (Quetame 24 mayo de 2008 Mw= 5,9) Imagen modificada de Generic Mapping Tools Copyright ©1991 - 2008.

<http://jules.unavco.org/Voyager/Earth>

La tectónica de la Sabana de Bogotá ha sido definida como de estilo estructural compresivo, donde son típicos los anticlinales estrechos y los sinclinales amplios, con una tendencia de dirección NNE-SSW, generalmente limitados por fallas de cabalgamiento definidas por la falta de registro estratigráfico. Sin embargo, las inversiones de los dos flancos de la totalidad de las estructuras regionales, separadas generalmente por valles cordilleranos; las zonas con rotación en la dirección de dichas estructuras y grandes áreas con deformación tectónica intensa, que muestran rasgos cinemáticos con una predominancia casi total correspondiente a fallas transversales de desplazamiento lateral izquierdo, especialmente en el sur de la Sabana de Bogotá.

La existencia de un sistema transversal a la cordillera ha sido propuesto por Hubach, 1929; Royo y Gómez, 1946; Dehandschutter 1980; Gómez, 1991; Ujueta, 1988 y 2001; y Velandia & De Bermoudes, 2002 y esbozadas como estructuras potencialmente sismogénicas por Mojica, 2007.

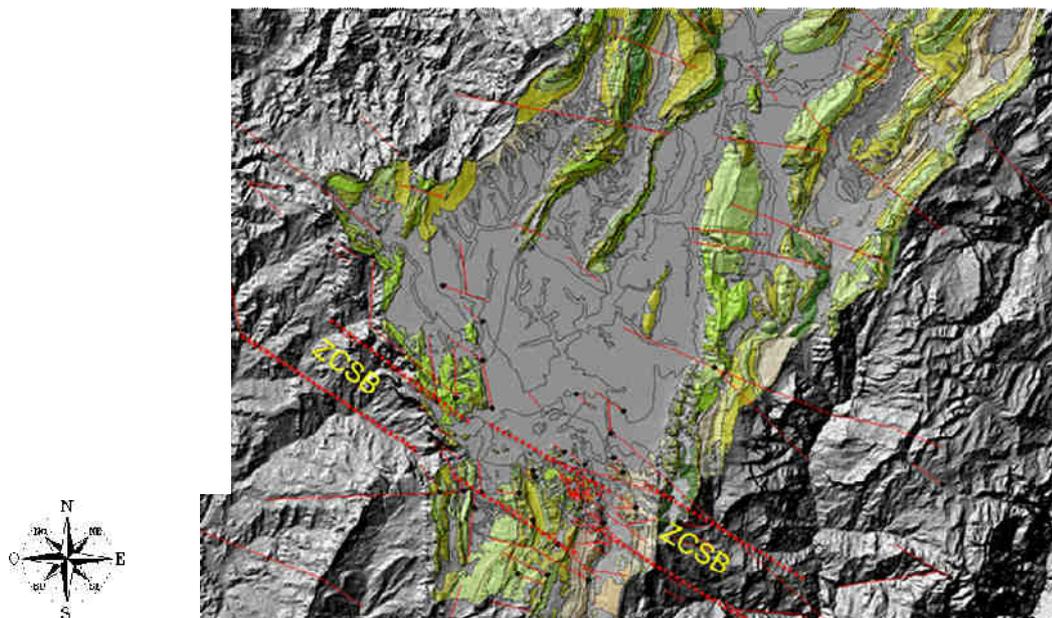


Figura 2. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá sobrepuesto al modelo digital de terreno de la zona. (Modificados de Ingeominas, 2005). ZCSB: Zona de cizalla del sur de Bogotá.

### **SISTEMA ESTRUCTURAL Y ZONAS DE CIZALLA**

Para los autores, el sistema de deformación transtensivo NW (Fig. 2), que se superpone a la orogenia compresiva de tipo Andino, se hizo evidente en los estudios de cartografía detallada (escala 1:1000 o más detallados); llevados a cabo en el marco de diferentes estudios de geología para ingeniería y los datos tomados hicieron patente el predominio de planos de falla estriados con dirección WNW-ESE. Se emplearon diferentes herramientas de la geología para la realización de esta investigación como son las observaciones e interpretaciones a partir de imágenes satelitales, modelos digitales de terreno y fotografías aéreas; la compilación y reinterpretación de informes y mapas geológicos detallados preexistentes y la revisión de la sismicidad histórica e instrumentada.

La investigación propone un estilo estructural heredado, transversal a la tendencia NNE-SSW típica de la orogenia andina; con una orientación WNW-ESE, oblicuo con predominio de rumbo sinistral normal (Fig. 3), muy probablemente relacionado con una tectónica antigua, que sigue actuando en la zona -que ha sido definida preliminarmente con dirección E-W y NW-SE; de carácter lateral izquierdo (Fierro-Morales & Casallas, en preparación) a partir de mediciones de rasgos cinemáticos en la zona de Mitú, en la Amazonia Colombiana.

### **TECTÓNICA ACTIVA Y SISMICIDAD HISTÓRICA-INSTRUMENTADA**

El sistema estructural propuesto, la posibilidad de que las fallas transversales sean activas y que la deformación tectónica de la Sabana de Bogotá en los últimos 2,5 Ma esté relacionada en mayor proporción con la existencia de fallas de rumbo de carácter sinistral transtensivo, tiene implicación en la amenaza sísmica sobre cerca de 10 millones de personas en más de 10 centros urbanos, entre ellos la capital colombiana. Dicha amenaza puede estar relacionada no solamente con la tectónica activa del Borde Llanero originada en el sistema compresivo de la Orogenia Andina como fuente sismogeneradora intermedia, sino también con las zonas de cizalla generadas en un sistema de deformación transtensivo heredado WNW-ESE, como fuente local.

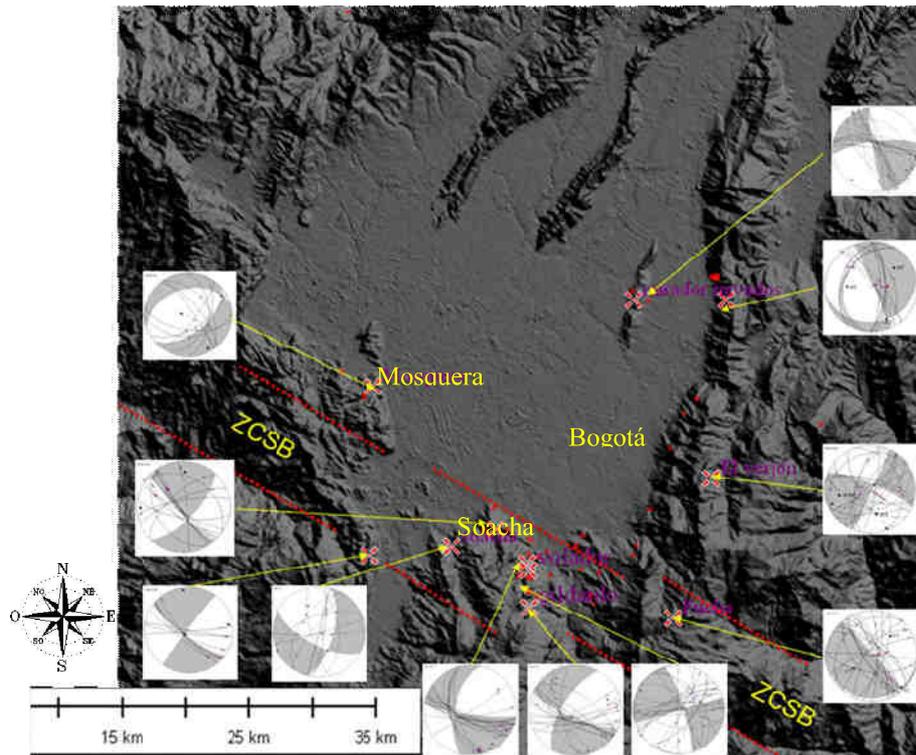


Figura 3. Sistema estructural del Sur de Bogotá con diagramas tectónicos cinemáticos en 11 puntos de la Sabana de Bogotá N=476 datos de fallas con indicadores de movimiento. Nótese el predominio de fallas de rumbo sinestrales en la ZCSB. Interpretación general con un eje de tensión NNW-SSE ( $\sigma_3$  diedro sombreado) y de contracción ENE-WSW ( $\sigma_1$  diedro blanco).

El análisis de macro-sismicidad histórica (Fig. 4) a partir de la reinterpretación de estudios sismológicos y de la interpretación propia a partir de fuentes primarias históricas e instrumentales ha incidido en la postulación de tectónica activa en la Sabana de Bogotá, ya que los efectos por fallas de campo cercano han sido representativos.

Para el sismo registrado en 1644, se recogieron por visitantes de las autoridades virreinales testimonios sobre fenómenos observados en la posible zona epicentral, situada entre las poblaciones de Tunjuelo, Usme y Chipaque, que incluyen afectación de macizo rocoso, licuación de suelos y caídas de rocas. Señala también un gran deslizamiento producido por el sismo en la zona del Salto de Tequendama, el cual causó el represamiento del río Bogotá durante varios días (Espinosa, 1994). Los puntos conforman una zona elongada en dirección NW-SE, coincidente con la ZCSB (Fig. 3).

Con base en la revisión de noticias de los diarios editados en Bogotá (El Espectador y El Tiempo), el sismo de 1917, generó daños preferencialmente al suroriente de Bogotá (sector de Cáqueza) y afectación de zonas montañosas al sur, en la zona del Páramo de Sumapaz. Algunos estudios sugieren una zona de daños con intensidad de VIII a lo largo de una zona con dirección NW-SE coincidente con la provocada por el sismo de 1644 (Espinosa, 2003).

En el sismo de 1966 ocurrió un sismo con zona de daño muy localizada al sur de la ciudad, coincidente con la zona de cizalla NW-SE del Sur de Bogotá. Esta posibilidad de fuente local se propone con base en las mediciones geológicas y en la distribución de los campos de esfuerzo de un sistema estructural transtensivo (Diarios El Espectador y El Tiempo).

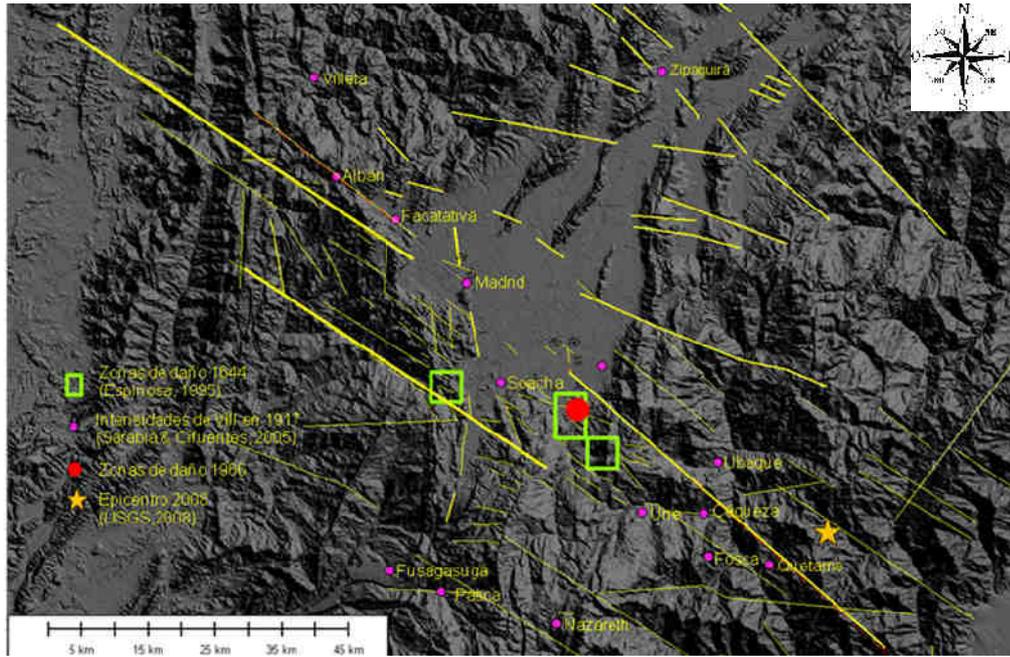


Figura 4. Principales lineamientos transversales (en líneas amarillas) y efectos de los sismos de 1644 (cuadros verdes), 1917 (puntos magenta con sitios de intensidad VIII), 1966 (círculo rojo) y 2008 (estrella naranja).

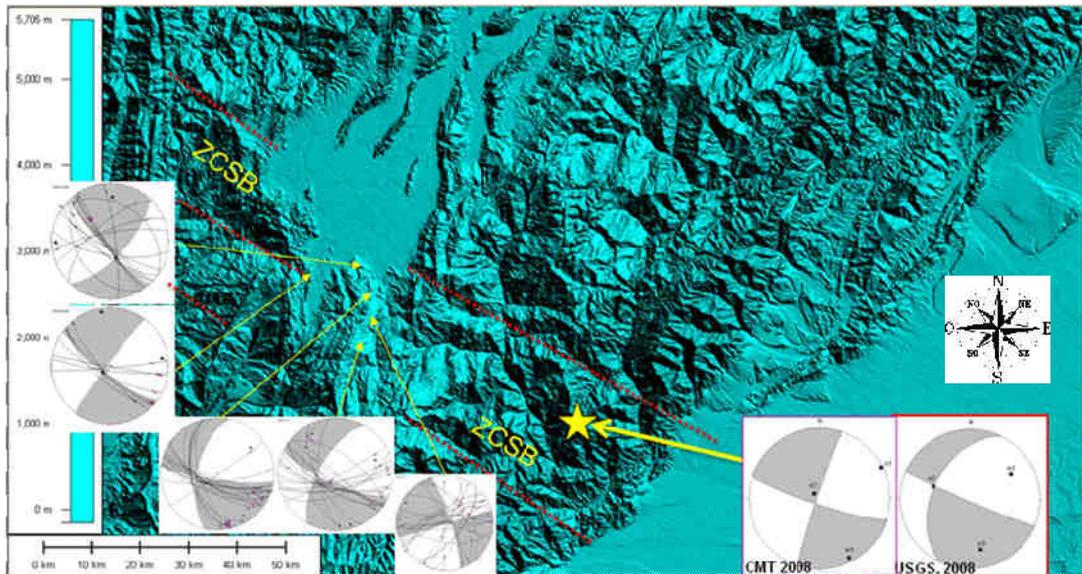


Figura 5. Comparación de soluciones cinemáticas tectónicas elaboradas a partir de mediciones de planos de falla con indicadores de movimiento ubicados en la ZCSB con la solución teórica de mecanismos focales generada por la USGS (2008) cuyo epicentro  $M_w=5,9$  (estrella amarilla) se localiza en la zona de cizalla NW-SE propuesta, en cercanías de la localidad de Quetame.

Recientemente se registró un sismo que generó sacudidas del terreno y deslizamientos, que afectaron estructuras vulnerables como casas sin reforzamiento y vías con inestabilidad latente previa, en más de 6 poblaciones (Bogotá, Quetame, Choachí, Ubaque, Fómeque, Mosquera, Guayabetal en el Departamento de Cundinamarca y El Calvario en el Departamento del Meta). El sismo ocurrió el 24 de mayo de 2008 a las 14:20 hora local, con magnitud  $M_w= 5,9$  (Escala de Richter), profundidad 4,8 Km y epicentro a 8,6 Km al noreste del Municipio de Quetame (4,39 N y 73,81 W), donde

edificaciones urbanas y rurales fueron destruidas y a 50 Km al sureste de Bogotá. El mismo día se registraron sismos precursores ( $M_w = 2,8; 4,1$  y  $2,5$ ) y 65 réplicas después del sismo principal. (Ingeominas, 2008). La localización de estos epicentros presenta amplia dispersión, la cual no permite establecer claramente la tendencia de ruptura; sin embargo, el mecanismo focal desarrollado por la USGS (2008), indica dos planos de ruptura posibles en un sistema de fallas de rumbo N26E/45NW dextral y N67W/87SW sinistral. En el marco del sistema estructural transtensivo propuesto para la Sabana de Bogotá, el segundo plano de ruptura NW propició la propagación de las ondas sísmicas, generando afectación en este sentido desde el sector de Quetame en el epicentro hasta el municipio de Mosquera, atravesando el Sur de Bogotá a lo largo de la zona de cizalla NW del Sur de Bogotá.

## REFERENCIAS CITADAS

- Dehandschutter, J. 1980. Lineaments in the Northern Andes. Mus. Roy. Afr. Centr. Tervuren, Belg. Dépt. Géol. Min. Rapp. Ann. 1979. p. 129-142.
- Diarios El Tiempo y El Espectador, 1917; 1966. Noticias de Sismos en Bogotá.
- Espinosa, A. 1994. Contribuciones al catálogo colombiano de sismicidad histórica. II. El terremoto de Tunjuelo (1644, Marzo 16) y sus efectos geotécnicos en la zona epicentral. Revista Ingeominas Bogotá No. 4, p. 83-90.
- Espinosa, A. 2003. Historia sísmica de Colombia 1550 – 1830. (En CD). Publicación de Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad del Quindío, Armenia.
- Fierro-Morales, J., & Casallas, W. Tectónica del Complejo Migmatítico de Mitú: Indicios de desplazamientos recientes. En preparación.
- Gómez, H. 1991. La Paleomegacizalla transversal de Colombia base de un nuevo esquema geotectónico. Revista CIAF Bogotá 12(1), p. 49-61.
- Hubach, E. 1929. Abasto de agua para la Hacienda La Picota. Informe No 181 Ingeominas. Bogotá- Colombia.
- Ingeominas, 2005. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá. Escala 1: 100.000. Bogotá-Colombia.
- Ingeominas, 2008. El sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008: Aspectos sismológicos. Informe especial. Bogotá-Colombia.
- Mojica, J., Arévalo, O. J., & Ibáñez-Mejía, M. 2007. Fallas plioceno - cuaternarias ocultas bajo los sedimentos de la zona urbana de Bogotá: importancia para la evaluación de la amenaza sísmica potencial. Memorias XI Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga-Colombia.
- Royo & Gómez, J. 1946. Los manantiales termales de Las Pléyades. Municipio de Suba (Cundinamarca). Informe No 509A Ingeominas Bogotá- Colombia.
- Ujueta, G. 1988. Lineamientos de dirección noroeste – sureste en la Cordillera Oriental de Colombia (sector Girardot – Cúcuta) y en los Andes Venezolanos. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Trabajo para promoción a Profesor Titular. p. 166.
- Ujueta, G. 2001. Lineamientos de dirección NO-SE y SSO a NE-SO en el centro occidente Colombiano y en el Ecuador. Geología Colombiana, Bogotá. No. 28, p. 1-27.
- USGS, & Global CMT Project Moment Tensor Solution. 2008. Latest earthquakes: Colombia 24 May. [http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic\\_skb\\_n\\_hrv.html](http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_skb_n_hrv.html).
- Van Der Hammen, T. & Hooghiemstra, H. 1995. Crono-estratigrafía y correlación del Plioceno y Cuaternario de Colombia. En: Plioceno y Cuaternario del Altiplano de Bogotá y alrededores. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Análisis Geográficos 24, p. 51-67.
- Velandia, F., & De Bermoudes, O. 2002. Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Boletín de Geología 24 (39): 37-48.