

## **1 INTRODUCCIÓN**

Antes de 1970 en países industrializados tales como Rusia y Estados Unidos la única fuente de información de terremotos antiguos era el registro histórico. Durante las últimas tres décadas se ha avanzado en el conocimiento de los terremotos con la aplicación de conceptos de geología clásica en esta área de investigación, logrando trascender el período de registro histórico e instrumental. Esta reciente disciplina se denomina paleosismicidad.

Sin embargo la aplicación de la paleosismicidad ha sido limitada, sobre todo porque el concepto de “intervalo de recurrencia” y/o “período de retorno” está mal entendido vulgarmente. Es común escuchar que después de un terremoto “grande” no vuelve a ocurrir otro, o que una falla geológica que produce terremotos de cierta magnitud, no puede producir otros por encima o por debajo de esa magnitud. Esto es desafortunado porque se incide negativamente en las políticas que apoyan la investigación sobre la prevención de desastres.

La determinación de fuentes sismogénicas de terremotos históricos comúnmente se ha hecho con base en los efectos reportados por los pobladores de una región en la época de ocurrencia del evento. Esto conduce a errores de localización sobre todo de terremotos ocurridos en regiones poco habitadas; por otro lado, la interpretación de la intensidad puede estar sobrevalorada o subvalorada dependiendo de la sensibilidad o subjetividad de los cronistas de la época y de la variabilidad de efectos que se presentan según el tipo de construcción, el tipo de suelo y el nivel freático en el momento del terremoto. Muchos sismos históricos han sido relocalizados en la medida en que los investigadores acopian mejor información sobre los parámetros de la fuente. La mayoría de estas relocalizaciones se ha hecho para sismos que, para la época de ocurrencia, fueron registrados por sismógrafos ubicados en países que contaban con la tecnología instrumental.

En Colombia los estudios de paleosismicidad se dificultan sobre todo porque el clima tropical lluvioso borra rápidamente de la superficie del terreno todo rastro de actividad sísmica. Por otro lado los sismos que han ocurrido recientemente en áreas muy pobladas (Popayán, 1983; Armenia, 1999) no han generado ruptura superficial.

Los estudios buscan relaciones entre los parámetros identificados instrumentalmente, mecanismos de plano focal y magnitudes, con los parámetros de fallas cartografiadas en superficie. El sismo de Popayán de 1983, se asignó a la Falla Rosas–Julumito y para el sismo de Armenia, aún existen discrepancias en los parámetros de la fuente.

Aunque en países como China se medían sismos desde el año 132 de nuestra era con sismómetros primitivos (inventados por Zhang Hen), en Colombia el registro histórico apenas se remonta a la época de la Colonia. En el viejo mundo siguen quedando por fuera de análisis detallados aquellos sismos ocurridos antes de la invención de la escritura (3000 años AC) y del sismógrafo de rodillo de papel (1875 por el Italiano Cecchi). Esta ausencia de información

es determinante en la previsión sísmica, pues el ciclo de grandes terremotos comprende decenas de miles de años (Allen, 1975).

La paleosismicidad es la ruta obligada para complementar la ventana de observación de terremotos, y por tanto para contribuir a un mejor entendimiento de la amenaza sísmica de una región (Reiter, 1995; Serva y Slemmons, 1995). Los sismos de magnitudes mayores de 6 usualmente dejan rasgos en la superficie del terreno, sean cosísmicos o postsísmicos. Aplicando conceptos de la geología clásica y de la geocronología se ubican los terremotos en el registro estratigráfico y geomorfológico dentro de una ventana de tiempo determinada. Estos estudios aportan los parámetros de la fuente como son: geometría del plano de falla, dirección de movimiento de la falla, cantidad de deslizamiento durante un pulso (magnitud), velocidad del movimiento y período de retorno o frecuencia con que la falla se mueve.

Existen tres problemas fundamentales en la interpretación del registro de paleoterremotos. El primero tiene que ver con el principio de convergencia geomórfica o equifinalidad (Chorley et al., 1984; Schumm, 1991), pues rasgos geomorfológicos similares son generados por fenómenos diferentes, no solamente tectónicos. El segundo problema planteado es lograr identificar la relación de los modelos de deformación de fallamiento cosísmico y crecimiento de pliegues con la estructura cortical superficial y la sismicidad de la corteza media e inferior (Allen, 1975); El tercer problema es el de los patrones de recurrencia espacial y temporal de grandes terremotos y su significado en una falla activa y/o dormida (Allen, 1975). Adicionalmente, las propiedades mecánicas de las unidades litológicas son factores determinantes en la expresión superficial de las deformaciones generadas por los esfuerzos que interactúan en la corteza terrestre, éstas controlan la geometría del plano de ruptura y el movimiento de la falla. Varios estudios de deformaciones cosísmicas como los realizados en la falla de California, en Asnam en Algeria, Chichi en Taiwan, etc., han mostrado que grandes terremotos superficiales generan variedad de modificaciones en el paisaje que responden a la orientación de los esfuerzos principales y a las propiedades mecánicas de las unidades litológicas afectadas.

Lo anterior muestra la importancia de los estudios de paleoterremotos en el campo de la previsión sísmica, por eso en países como Colombia, es obligado realizar estudios de geología aplicada al estudio de los terremotos ocurridos antes del registro histórico e instrumental. El objetivo central de este trabajo de grado fue identificar y presentar los rasgos superficiales de deformación tectónica existentes en una porción del Occidente Colombiano y contribuir a su interpretación utilizando herramientas de la geología clásica y la geocronología.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Investigar las características de deformación superficial generadas por terremotos que en tiempos prehistóricos han afectado el Valle del Cauca y regiones aledañas. Aporte para análisis comparativos y/o de correlación con el campo de esfuerzos reflejado por la sismicidad reciente.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Documentar y evaluar las expresiones geomorfológicas y estratigráficas indicadoras de deformación tectónica reciente, hasta ahora no considerados en los estudios regionales.
- Contribuir a la geocronología relativa del Cuaternario.
- Identificar, caracterizar y datar marcadores geocronológicos (tefras, paleosuelos, horizontes con sismitas) afectados por tectónica.
- Definir la secuencia temporal de eventos sísmicos revelados en los depósitos y superficies afectadas.
- Evaluar el comportamiento geométrico y estructural de las fallas identificadas.
- Avanzar en el entendimiento de la tectónica actual del Occidente de Colombia.

## **1.3 LOCALIZACIÓN**

La región de estudio se encuentra en la esquina noroccidental de Sur América, en el occidente Colombiano, entre las Cordilleras Occidental y Central. En esta área fueron estudiados seis sectores que se ubican en el valle geográfico del río Cauca, zonas de piedemonte, alrededor de la latitud 4°N y longitud 76°W (Figura 1).

Con mayor detalle se estudiaron tres sectores en el piedemonte occidental de la Cordillera Central sobre la saliente de la Cordillera Central: el primero al este de Bugalagrande, el segundo al este de Tuluá y el tercero al sur de Buga. En cuarto lugar se analizó un sector al este de Amaime. En el piedemonte oriental de la Cordillera Occidental se analizaron tres sectores: el primero localizado en el occidente de Cali y el segundo al oriente de San Marcos. Por último se reinterpretó una trinchera realizada por Woodward-Clyde Consultants (1983) en una cuenca intramontana en la Cordillera Occidental al sur de Loboguerrero y un sitio en el norte del valle entre Cartago-Ansermanuevo reportado por Pardo-Trujillo et al. (1994).

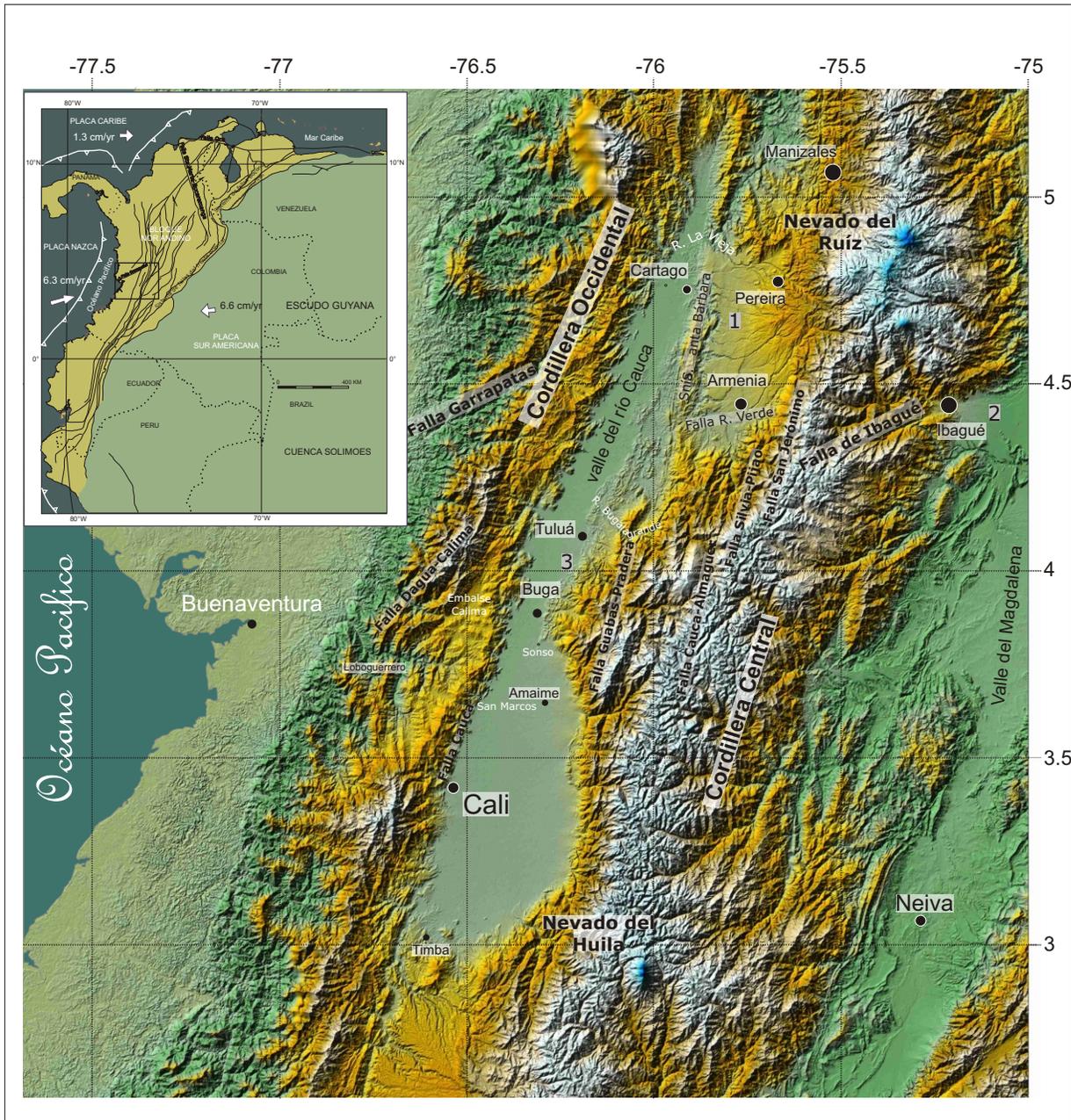


Figura 1. Localización de la región de estudio. Arriba izquierda mapa geotectónico de Colombia y medidas geodésicas de desplazamiento senso Trenkamp et al. (2002). 1: Abanico del Quindío; 2: Abanico de Ibagué; 3: Abanico de Tuluá. El modelo digital del terreno se realizó a partir de datos del STRM utilizando los programas 3dem y Surfer.

## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 NEOTECTÓNICA Y GEOLOGÍA DEL CUATERNARIO**

El primer estudio que consideró la deformación tectónica reciente en el Suroccidente Colombiano fue el de Woodward-Clyde Consultants realizado en el año 1983 en una época en que se analizaba la factibilidad para la construcción de hidroeléctricas en esta zona del País. Estos autores analizaron varios sectores en el piedemonte occidental de la Cordillera Central así como en la Cordillera Occidental. Con el propósito de determinar el grado de amenaza sísmica excavaron dos trincheras al oriente de Amaime. Los resultados de este estudio mostraron que existen rasgos de actividad tectónica reciente compresiva, como paleosuelos deformados y evidencias de ruptura en un segmento denominado “Potrerillos” ; a este segmento le asignaron velocidades entre 0.1 y 1.0 mm/año. Así, este estudio proporcionó evidencias de fallas inversas activas con vergencia oeste en el flanco occidental de la Cordillera Central. Adicionalmente, cerca al eje de la Cordillera Occidental, en una trinchera excavada en el sector de Loboguerrero estos autores identifican un segmento de la falla Dagua-Calima con evidencias claras de movimiento transcurrente; a este segmento le asignaron una velocidad entre 0.01 y 0.03 mm/año. Este estudio no consideró ningún segmento activo a la latitud de Cali, debido a la ausencia de rasgos de fallamiento en los depósitos cuaternarios estudiados por los autores.

Un resumen de los trabajos sobre fallas activas en la región de estudio se encuentra en la compilación presentada por Paris et al. (2000) para el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) dentro del Mapa de Fallas Activas de Colombia. Con excepción del estudio de Woodward-Clyde Consultants (1983), en esta compilación no hay estimaciones en el registro estratigráfico, tampoco dataciones de horizontes guía, paleosuelos, o superficies. Los datos de velocidades son estimaciones relativas con base en rasgos geomorfológicos.

Por otro lado, el trabajo sobre tefraestratigrafía realizado por Toro y Marín (1994) en el flanco occidental de la Cordillera Central aporta un marco de referencia para la conformación de la columna estratigráfica del Cuaternario en la región del Valle del Cauca. A la latitud de Bugalagrande analizan y reportan cenizas de caída del holoceno provenientes de la cadena volcánica Ruíz-Tolima. Esta información es fundamental para la geocronología de las unidades afectadas por eventos tectónicos recientes. Adicionalmente en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, se han identificado capas de cenizas intercaladas en una secuencia aluvial que conforma el abanico fósil de Cali (López y Vokler, 2000). Estas cenizas han sido datadas en el Cuaternario por Gloria Elena Toro (López et al., 2005).

Durante los trabajos realizados en el marco del proyecto a Colciencias, López et al. (2002) proporcionan las primeras evidencias de fallas de cabalgamiento NS de vergencia este con actividad en el Holoceno. Estas fallas de vergencia este serían antitéticas de un cinturón de cabalgamiento plegado y fallado que sobrecorre el valle del río Cauca. Posteriormente López et al. (2003b; 2003a) reportan que este sistema compresivo, activo en el Holoceno,

conformado por fallas NS inversas de vergencia oeste y por retrocabalgamientos está cinemática y mecánicamente conectado con el sistema transcurrente ENE que atravieza la Cordillera Central a la latitud de Tuluá y concuerda con una zona de transición marcada por medidas geodésicas de desplazamiento en Trenkamp et al. (2002). Adicionalmente en el registro estratigráfico de las unidades del Cuaternario documentan depositación sintectónica relacionada con la emergencia de estas fallas y sugieren la posible existencia de una zona triangular en profundidad. López et al. (2004b; 2004a) reportan que la zona de compresión holocena documentada en el flanco occidental de la Cordillera Central a la latitud de Tuluá se encuentra en un relevo compresivo izquierdo del sistema de fallas ENE tipo Cucuana y/o paralelo a la Falla de Ibagué, el cual a su vez segmenta el sistema NS. Continuando los estudios de deformación tectónica reciente en el Valle del Cauca y siguiendo los trabajos de la Malla Vial del Departamento López y Moreno-Sanchez (2005) reportan que la Cantera El Vínculo es uno de los mejores lugares de Colombia donde en una pequeña área de afloramiento se evidencia la acción directa de la tectónica y sedimentación. Documentan varios rasgos de deformación relacionados con el crecimiento activo del Anticlinal de Sonso que conforma la terminación sur de la “Saliente de Buga”, principal rasgo morfológico del avance progresivo del frente de cabalgamiento.

Así, en este trabajo de grado se estructuran los resultados parciales del trabajo realizado por la autora dentro del proyecto “Investigaciones Paleosísmicas en la Región del Valle del Cauca” COLCIENCIAS (Código N°1106-05-11117-CT: 60-2000) y durante su vinculación con la Corporación OSSO.

## **2.2 SISMICIDAD**

### **2.2.1 Registro Instrumental**

La observación instrumental de sismos en la región de estudio se inició en 1987, con el Observatorio Sismológico del Sur Occidente (OSSO), en el marco del programa GERSCO, en convenio entre los gobiernos de Colombia y Suiza (Meyer et al., 1988). A partir de la instalación de esta red se aumentó la certeza en la identificación de las características geométricas de las fuentes sismogénicas (Meyer, 1990).

En la Figura 2 se resalta la sismicidad superficial del piedemonte occidental de la Cordillera Central (Meyer et al., 2004). Con base en los cúmulos de actividad Meyer et al. (2004) dividen este sistema en dos segmentos de dirección NE paralelos

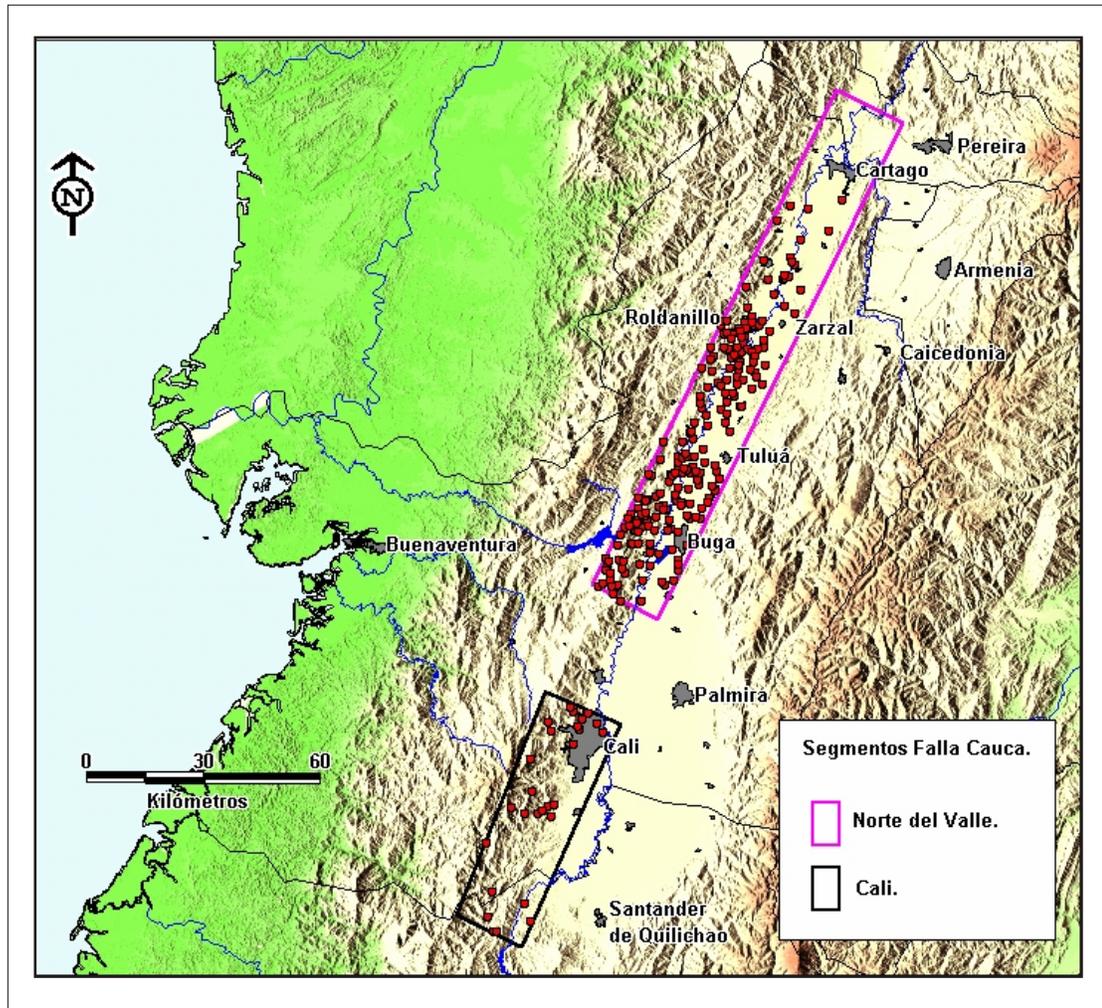


Figura 2. La sismicidad superficial (cuadros pequeños rojos) registrada por la Red Sismológica del SurOccidente en el piedemonte de las cordilleras, delimita dos segmentos del sistema de fallas del Cauca. El segmento Cauca-Cali y el segmento Cauca-Norte del Valle. Los nidos de sismicidad al norte de Cali son generados en canteras (Tomada de Meyer et al., 2004).

a las cordilleras, el segmento Cauca–Cali, con baja sismicidad entre las latitudes de Salvajina (2° 45'N) y el norte de Cali (3° 25'), y el segmento Cauca–Norte del Valle, más activo entre las latitudes de Yotoco (3° 40'N) y Cartago (4° 50'N).

Mejía y Meyer (2004) encuentran que las zonas de mayor actividad sísmica superficial en el Suroccidente de Colombia coinciden con la intersección de lineamientos NS y sistemas transversales ENE y WNW y proponen que a la latitud de Buenaventura, la existencia de una falla WNW podría ser la prolongación de la falla Cucuana.

La continuidad en el registro de sismos con la red del OSSO ha permitido definir que la actividad sísmica superficial en la región de Cali es baja. Los sismos superficiales (0-33 km) de magnitudes mayores de 2.5 (Figura 2) escasamente superan la decena. La relación Gutenberg-Richter sugiere que la magnitud máxima esperable en la región de Cali para sismos superficiales es de 3.2 (Md) (Meyer et al., 2004). Sin embargo el 14 de Mayo de 1999, se registró un sismo (Md=3.7) en el corregimiento La Buitrera, mostrando que un segmento de la falla de Cali es activo. Este sismo con una magnitud superior a la esperable, sugiere que la ventana de observación es insuficiente comparada con el período de recurrencia de sismos grandes y moderados. Esto refuerza la importancia de obtener un mayor registro de paleosismos, el cual se logra aplicando técnicas geológicas y geocronológicas a las fallas de la región.

### **2.2.2 Registro macrosísmico – Efectos sismogeológicos**

El registro macrosísmico se refiere al reporte de los efectos causados por un movimiento sísmico. Este registro se ha centrado en los efectos en el hombre o en sus actividades económicas, lo cual es evidente en las escalas macrosísmicas existentes (Mercalli-Cancani-Sieberg: MCS-1930; Modified Mercalli: MM-931; Medvedev Sponheuer Karnik: MSK-964; European Macroseismic Scale: EMS-98). Por otro lado no se ha prestado mucha atención a los efectos en el terreno, ni siquiera en el registro macrosísmico reciente, aunque la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 incluye un anexo para su evaluación y en el 2003 la comisión de la escala macrosísmica INQUA (Michetti et al., 2003) hace una unificación de efectos sismogeológicos, entre otros aspectos, para aportar a la identificación de la fuente sismogénica.

El registro histórico de terremotos en la región se remonta a la época de la colonia, y es por eso que la mayoría de los reportes de sismos con efectos severos provienen de los mayores y más antiguos centros de población, como son: Cartago, Buga, Cali y Popayán (unos 150 km al sur de Cali) (Ramírez, 1975; Rosales, 2001; A. Espinosa, 2003). Pero el aporte de la macrosísmica a la neotectónica de la región es aún muy restringido sobre todo porque la localización de sismos a partir del registro histórico está sometido a varias fuentes de error. Un ejemplo son los sismos reportados por fuentes hemerográficas que en la mayoría de los casos no reportan eventos de intensidades bajas (Meyer, 1983); por otro lado, la distorsión de las crónicas existentes en documentos antiguos hace que se dupliquen sismos o que se interpreten como tal otros fenómenos naturales (A. Espinosa, 2003).

Hasta ahora ninguno de los sismos con daños reportados en Cali o en las poblaciones vecinas, son atribuibles a una fuente cortical cercana. Varios de los sismos sentidos y con daños en Cali son atribuidos a fuentes sismogénicas profundas, como la zona de subducción, con efectos notables al norte del Valle del Cauca (Meyer, 1990; Rosales, 2001). Durante algún tiempo se pensó que la fuente del sismo de 1925, el cual causó múltiples daños en Cali y en poblaciones vecinas, se encontraba al norte de Cali (Meyer, 1990). Recientemente este sismo fue relocalizado, usando datos instrumentales, en zona de subducción también al norte de Cali (Mendoza et al., 2004).

Al parecer un gran sismo, denominado El Terremoto de Buga de 1776 (Arboleda, 1956; Armando Espinosa, 1996), tiene su fuente sismogénica en la región de estudio al oriente de Buga. A pesar de que Espinosa (2003) le asigna una intensidad de VIII en Buga, la ausencia de reportes de efectos geológicos hace dudosa la definición de esta región epicentral, que además presenta unidades litológicas susceptibles a la licuación. Intensidades menores de VII MCS son suficientes para generar licuación y agrietamientos del terreno (ver por ej. Galli y Ferreli, 1995; Michetti et al., 2003; Michetti et al., 2005). Sismos que recientemente han afectado la región indujeron efectos en el terreno como licuación y deslizamientos, ejemplo el sismo de Armenia de enero de 1999 para el cual López et al. (2001) encuentran correlación con intensidades superiores a VIII según la EMS-98 y Pizarro, noviembre de 2004, para el cual Rosales et al. (2005) también reportan intensidades superiores.

Los colapsos de socavones de minería del carbón y los hundimientos en la superficie del terreno generados por el sismo de la Buitrera (Meyer et al., 2004), mostraron que inclusive sismos de pequeña magnitud pero superficiales pueden causar efectos dañinos en la población que habita las laderas de Cali. Un porcentaje importante de esta población construye sin normas técnicas de construcción sectores intensamente intervenidos por la minería del carbón (López et al., 1997).