

# Implicaciones sismotectónicas de las soluciones del mecanismo focal de algunos terremotos de la región central de Colombia

ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO\*<sup>1,2</sup>  
CLARA INÉS RIVERA PÉREZ<sup>1,3</sup>  
AUGUSTO ANTONIO GÓMEZ CAPERA<sup>1,3</sup>

## RESUMEN

Se han analizado las soluciones del mecanismo focal de veinte terremotos ocurridos a diferentes profundidades y ambientes tectónicos para establecer el marco sismotectónico de la región central del territorio colombiano. Los sismos intermedios ocurridos en la parte occidental de la región, en su mayoría responden a fuerza de tracción y corresponden a la subducción del material litosférico de la placa oceánica bajo la placa continental, mientras que los eventos superficiales que tienen lugar en el continente en su mayoría son de tipo compresivo y están relacionados con la actividad de las diferentes fallas que atraviesan la región. Esta actividad es derivada de la colisión de la placa Nazca con el Bloque Andino. En el sistema de fallas del borde llanero se nota la continuación de los esfuerzos tectónicos desde la base de la corteza hasta la superficie terrestre. En general, el régimen geodinámico de la esquina noroccidental del continente suramericano está gobernado por la interacción de tres grandes placas, que a su vez causan la deformación y el desplazamiento del Bloque Andino en dirección NNE.

PALABRAS CLAVE: MECANISMO FOCAL, SISMOTECTÓNICA, TECTÓNICA DE PLACAS

## ABSTRACT

Focal mechanism solutions of twenty recent earthquakes occurred at different depths and tectonic environment have been analysed to establish the seismotectonic framework of the central region of Colombian territory. The intermediate earthquakes in the western part of the region, in the majority respond to traction force and correspond to the subduction phenomenon of the oceanic lithospheric material beneath continental plate. While the superficial events occurred at the continent crustal in the majority being of compressional type are related with the activity of different faults that cross the region. This activity is derived from the collision of the Nazca plate with the Andean Block. On the East Andean frontal fault system is noted a continuation of the tectonic stresses at the interior of the crustal to the earth's surface. In general, the geodynamic regimen of the northwestern corner of the South American continent is governed by the collision of three major tectonic plates, that cause the deformation and displacement of the Andean Block in NNE direction.

KEY WORDS: FOCAL MECHANISM, SEISMOTECTONICS, PLATE TECTONICS

## INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente las soluciones de los mecanismos focales de los terremotos han sido una de las principales herramientas para el análisis sismotectónico de regiones continentales y zonas oceánicas, como lo muestran trabajos realizados en diferentes regiones del mundo (Sykes, 1967; Isaacks *et al.*, 1968; Molnar and Sykes, 1969; Nowroozi, 1972; Udías *et al.*, 1976; y muchos otros) y para el estudio del tipo de desplazamiento y movimiento relativo entre los bordes de los límites de diferentes placas y fallas tectónicas (Tandon and Srivastava, 1975; Philip y Cisternas, 1985; Udías and Buforn, 1985; Aztatzi and Kanamori, 1988; Adamek *et al.*, 1988; Salcedo *et al.*, 1995; Buforn and Udías, 1991, y otros).

La técnica de obtención del mecanismo focal de los terremotos ha evolucionado considerablemente. La más común a nivel mundial ha sido la utilización de la polaridad del primer impulso de las ondas P. Cuando el número de lecturas de polaridades de las ondas P no son suficientes para obtener una solución confiable, generalmente para algunos sismos moderados, se usa la técnica de inversión de ondas. Actualmente, con ayuda del desarrollo de las técnicas computacionales, el estudio del mecanismo de los terremotos y la aplicación de los resultados de sus investigaciones son mejor utilizadas tanto en tectónica regional como para el conocimiento de las estructuras locales. El uso de estos métodos, los cuales definen los parámetros del mecanismo focal de los terremotos, muestran una enorme concordancia de sus resultados con los obtenidos por observaciones geológicas y geofísicas.

Para el territorio colombiano en particular, algunos autores han realizado importantes trabajos sobre interpretación del mecanismo focal de terremotos, que ayudan a la comprensión del marco sismotectónico de una de las regiones tectónicas más complejas de la Tierra, la esquina noroccidental del continente suramericano. Entre los principales trabajos aplicados al territorio colombiano se pueden enumerar los realizados por Mendiguren, 1973; Bune *et al.* 1975; Jordan, 1975; Herd *et al.*, 1981; Pennington, 1981; Pennington

1 Ingeominas, Subdirección de Geofísica, A. A. 4865, Santafé de Bogotá, D.C. - Colombia.

2 Actualmente Depto. de Geografía, Universidad del Valle, Cali (Valle) - Colombia.

3 Depto. de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. - Colombia.

\* Corresponding author. Tel.: +57 (2) 321-2189; Fax: +57 (2) 333-4909.  
e-mail: elsalced@mafalda.univalle.edu.co

*et al.*, 1981; Kellogg and Bonini, 1982; Mendoza and Dewey, 1984; Lomnitz and Hashizmine, 1985; Page, 1986; Adamek *et al.*, 1988; Rivera, 1989; Salcedo, 1992; Salcedo *et al.*, 1995.

El presente trabajo hace parte de los resultados del proyecto "Sismotectónica del territorio colombiano" llevado a cabo en Ingeominas (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química) durante el año 1995. Aquí se usan los datos de las soluciones del mecanismo focal de una población de terremotos para el análisis del marco sismotectónico de la región central de Colombia. Los datos utilizados en este estudio fueron, en buena parte, obtenidos durante el desarrollo del proyecto, y también tomados de otras fuentes como se muestra más adelante. Aquí no se analizarán las particularidades de la sismicidad de la región, puesto que esto se hizo en un artículo previo realizado también por los autores del presente trabajo (Salcedo *et al.*, 1997).

### UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

La región de estudio escogida está enmarcada entre las coordenadas 2,5° - 6,5° latitud Norte y 72,0° - 76,0° longitud Oeste en el territorio colombiano, encerrando los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Caldas, Quindío, Risaralda y Meta; además, cubre el sur de los departamentos de Antioquia y Santander, la parte occidental del Casanare y el norte de Huila (figura 1). Esta región, que sin duda corresponde a la zona más poblada y donde más frecuentemente ocurren los sismos en el país, se escogió con el objeto de evaluar el ambiente sismotectónico de la parte central del territorio colombiano, y encontrar la relación entre la sismicidad y las principales estructuras tectónicas allí presentes. La figura 1 también muestra los principales sismos ocurridos en la región.

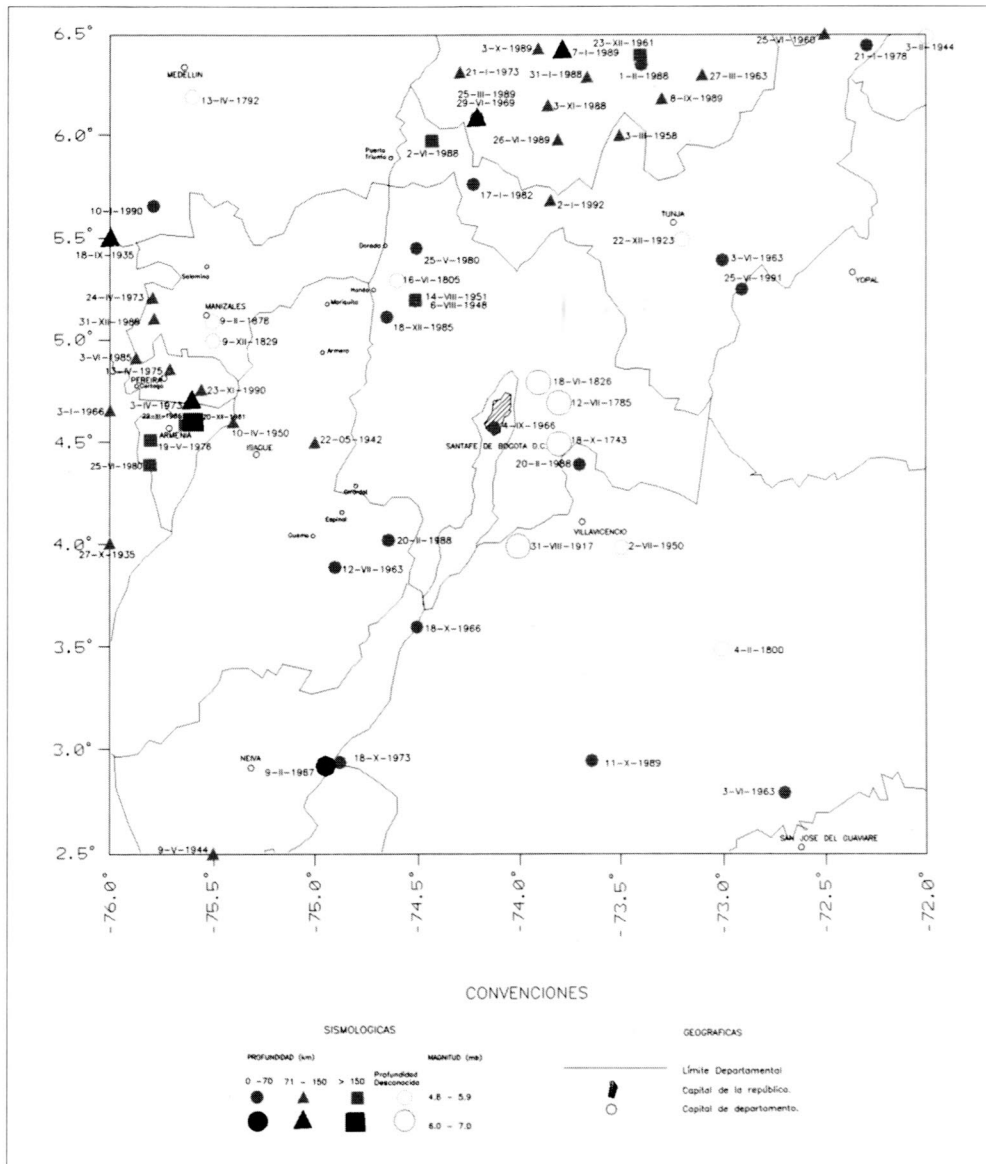


Figura 1. Localización de la región de estudio; además se muestran los principales sismos ocurridos.

## DATOS UTILIZADOS Y PROCESAMIENTO

Para las soluciones del mecanismo focal de los terremotos se ha utilizado la polaridad de la primera llegada de las ondas P, como se publica en los boletines del Centro Sismológico Internacional (ISC). Los puntos convencionales tomados representan las estaciones, que son definidas en cada caso por el ángulo entre la vertical y la tangente al rayo sísmico en el foco y por el azimut de la estación con respecto al epicentro; los ángulos de incidencia en el foco fueron leídos de las curvas tiempo-distancia de Jeffreys y Bullen. Éstos fueron gratificados sobre una proyección de igual área del hemisferio focal inferior en la red de Wulff. A partir de la distribución espacial de los signos del primer impulso en cada estación, fueron determinados los dos planos nodales, que representan los posibles planos de fallas. Convencionalmente estos planos son descritos por tres ángulos:  $\varphi^\circ$  - azimut, medido desde el norte;  $\delta^\circ$  - buzamiento, medido desde la horizontal y  $\lambda^\circ$  - ángulo de deslizamiento, medido entre la horizontal sobre el plano de falla y el vector deslizamiento. La ambigüedad que presenta la solución por el método de las primeras llegadas de las ondas P fue removida en algunos casos por medio de datos geológicos, y en otros por la distribución de las réplicas en los casos en que éstas se conocieron. Además, fueron definidos los ejes de los esfuerzos principales de compresión y tensión.

Las soluciones obtenidas en este trabajo se lograron utilizando métodos manuales o mediante el programa SPHERE (Köhler, 1991). El criterio de selección de los datos utilizados fue básicamente escoger aquellos sismos con magnitud  $m_b \geq 4.8$  dentro del período 1960-1992, con por lo menos 15 lecturas de polaridad de llegada del primer arribo de las ondas P. Así, se obtuvieron soluciones del mecanismo de trece terremotos; también se utilizaron para el estudio otras siete soluciones

tomadas de otras fuentes (Pennington, 1981; Salcedo, 1992 y Bulletin ISC), que se ajustaban a nuestros criterios de selección. En total se utilizaron los resultados de veinte terremotos (tabla 1).

La figura 2 muestra la localización de los terremotos y las soluciones del mecanismo focal analizadas; la base tectónica (fallas geológicas) fue tomada de París y Romero (1993). Los resultados numéricos están dados en la tabla 2.

Los datos de las primeras llegadas para las soluciones encontradas por este estudio son dibujadas en la figura 3, donde aparecen representadas las compresiones, dilataciones y los ejes de los esfuerzos principales, compresivo P y extensivo T.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los mecanismos focales de los veinte terremotos analizados son mostrados en la figura 2, junto con las principales fallas geológicas de la región. El número al lado de cada evento corresponde a la numeración usada en las tablas 1 y 2, donde aparecen por orden cronológico. De aquí se puede ver que en la parte occidental, entre las coordenadas  $4.0^\circ\text{N}$  y  $6.0^\circ\text{N}$ , se agrupa una serie de terremotos (números 1, 5, 6, 8, 9, 11, 14, 15, 17 y 18) de profundidad intermedia entre 60 y 170 kilómetros aproximadamente. Entre ellos encontramos eventos de tipo extensivo, en ellos se nota un plano de falla orientado de NW a SE y buzando con un alto ángulo, bien sea al noreste o hacia el suroeste. El desplazamiento sobre este plano en cada evento es dextralateral, excepto en el terremoto del 29 de marzo de 1986 (No. 14), en el cual el desplazamiento en el plano de falla es lateral izquierdo. Estos sismos ocurren en la placa oceánica de Nazca, que se subduce bajo el continente suramericano. La dirección del desplazamiento en los planos de falla concuerda con

el sentido del vector que muestra la dirección en la cual se introduce la placa de Nazca. El desplazamiento dextralateral en el plano de falla de estos eventos es generado por esfuerzos de orientación NS, variando su dirección desde NWN hasta NEN.

FECHA			TIEMPO			COORDENADAS DEL FOCO			
Día	Mes	Año	Hora	Min.	Seg.	$\varphi^\circ\text{N}$	$\lambda^\circ\text{W}$	Prof. (km.)	mb
03	01	1966	18	16	5.1	4.65	76.00	98	5.1
04	09	1966	22	14	50.0	4.57	74.12	9	5.0
18	10	1966	18	43	37.6	3.60	74.50	42	5.0
09	02	1967	15	24	47.9	2.92	74.94	60	6.3
03	04	1973	13	54	1.0	4.70	75.60	158	6.1
24	04	1973	18	42	32.0	5.20	75.80	117	5.3
18	10	1973	9	18	34.8	2.94	74.88	61	5.1
13	04	1975	1	53	30.3	4.85	75.71	139	5.1
19	05	1976	16	54	33.0	4.50	75.80	166	5.8
21	01	1978	8	19	29.3	6.43	72.31	27	5.1
25	06	1980	12	4	56.9	4.40	75.80	162	5.7
17	01	1982	14	52	14.0	5.76	74.21	42	5.3
18	12	1985	22	36	29.3	5.11	74.65	44	5.0
29	03	1986	9	48	55.6	4.59	75.63	163	5.0
31	12	1988	20	58	31.3	5.10	75.78	118	4.9
11	10	1989	14	42	9.7	2.95	73.64	35	4.8
10	01	1990	2	57	50.7	5.65	75.79	62	5.0
23	11	1990	22	35	34.0	4.75	75.55	136	5.6
25	06	1991	23	6	58.0	5.22	72.91	15	5.0
02	01	1992	19	41	46.4	5.67	73.84	146	5.7

TABLA 1. TERREMOTOS USADOS PARA EL ESTUDIO DE MECANISMOS FOCALES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL TERRITORIO COLOMBIANO, CON MAGNITUD  $m_b \geq 4.8$  PARA EL PERÍODO 1960 Y 1992.

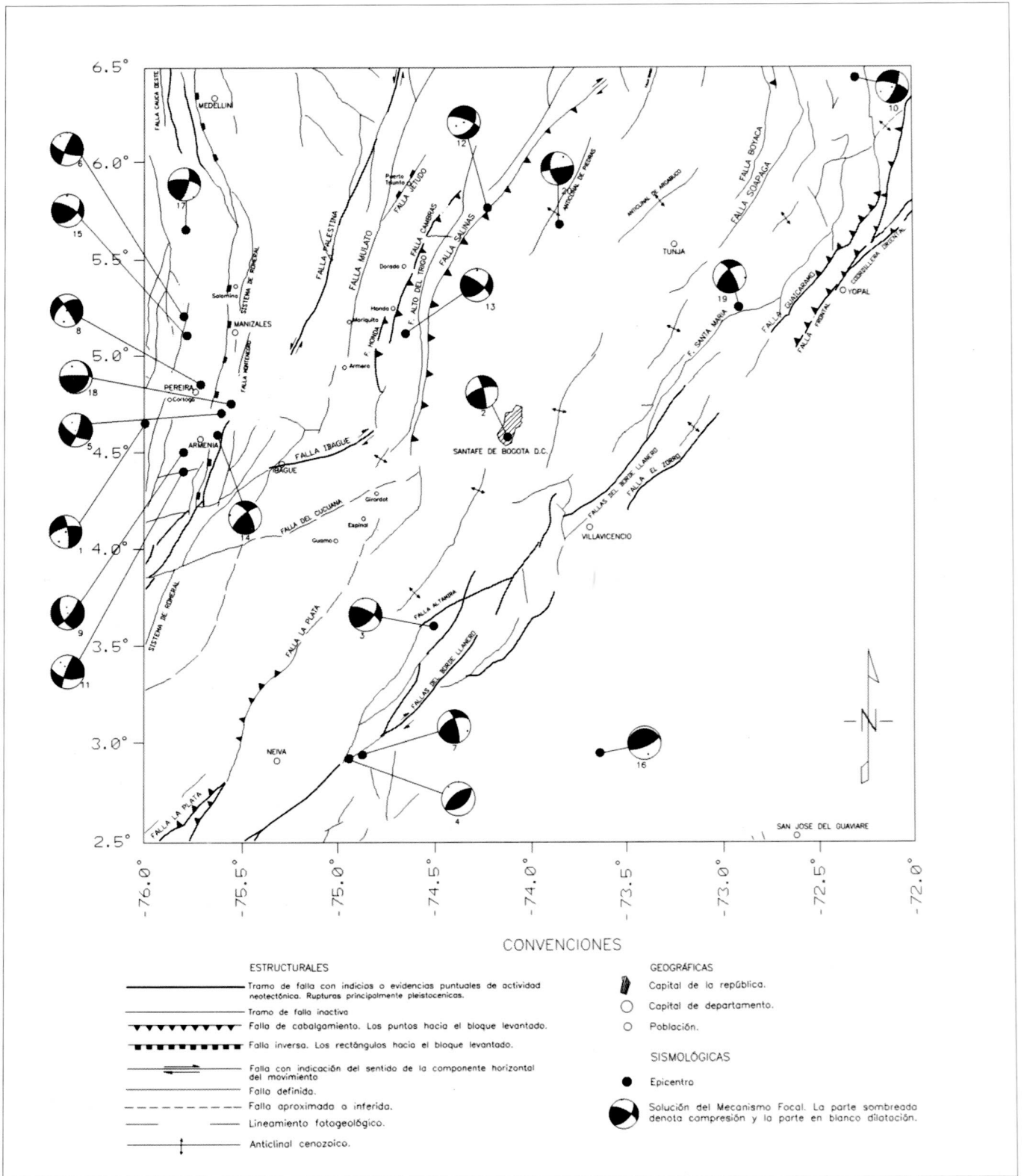


Figura 2. Principales sistemas de fallas en el área de estudio (adaptada de París y Romero, 1993) junto con los diagramas del mecanismo focal de los terremotos. Los círculos representan los epicentros. Los diagramas representan el hemisferio inferior de esfera focal con cuadrantes sombreados para las compresiones y blancos para las dilataciones.

TABLA 2. SOLUCIONES DEL MECANISMO FOCAL DE LOS TERREMOTOS DE LA REGIÓN CENTRAL DE COLOMBIA.

No.	FECHA			EJES P, T		PLANOS DE FALLA			TIPO DE FALLA	REFERENCIAS
	Día	Mes	Año	$\Phi_p$	$\Theta_p$	$\phi$	$\delta$	$\lambda$		
1	03	01	1966	P: 215 T: 122	25 7	A: 351 B: 256	78 67	-157 -13	Normal	1
2	04	09	1966	P: 117 T: 210	6 21	A: 252 B: 345	70 80	169 20	Inversa	1
3	18	10	1966	P: 352 T: 256	7 41	A: 43 B: 297	57 68	27 144	Inversa	1
4	09	02	1967	P: 142 T: 142	7 83	A: 232 B: 52	39 51	90 90	Inversa	2
5	03	04	1973	P: 339 T: 63	35 7	A: 21 B: 122	72 60	-32 -160	Normal	2
6	24	04	1973	P: 335 T: 68	8 20	A: 23 B: 110	82 68	21 172	Casi puramente de deslizamiento con componente inversa	3
7	18	10	1973	P: 109 T: 210	15 37	A: 243 B: 344	53 76	163 39	Rumbo deslizante con componente inversa	1
8	13	04	1995	P: 195 T: 93	29 21	A: 232 B: 325	54 85	-6 -143	Normal	1
9	19	05	1976	P: 352 T: 110	50 17	A: 40 B: 156	74 44	-130 -30	Normal	3
10	21	01	1978	P: 246 T: 155	27 2	A: 23 B: 287	73 70	-159 -18	Normal	1
11	25	06	1980	P: 301 T: 69	20 34	A: 200 B: 102	80 50	40 167	Inversa	2
12	17	01	1982	P: 243 T: 352	47 17	A: 41 B: 291	44 72	-153 -49	Normal	1
13	18	12	1985	P: 2 T: 260	14 37	A: 48 B: 306	53 76	18 142	Inversa	1
14	29	03	1986	P: 280 T: 186	6 29	A: 230 B: 327	74 65	154 18	Inversa	1
15	31	12	1988	P: 357 T: 253	14 45	A: 46 B: 298	48 71	27 135	Inversa	1
16	11	10	1989	P: 162 T: 327	28 62	A: 67 B: 268	73 18	83 110	Inversa	1
17	10	01	1990	P: 145 T: 237	3 30	A: 15 B: 277	72 67	24 160	Inversa	1
18	23	11	1990	P: 341 T: 204	34 47	A: 16 B: 270	24 83	17 113	Inversa	4
19	25	06	1991	P: 96 T: 191	7 34	A: 228 B: 328	62 72	159 30	Inversa	1
20	02	01	1992	P: 29 T: 131	24 24	A: 170 B: 260	55 90	180 35	Rumbo deslizante con componente inversa	4

## Referencias:

- 1- Soluciones obtenidas en este estudio
- 2- Salcedo (1992)
- 3- Pennington (1981)
- 4- Boletines del ISC

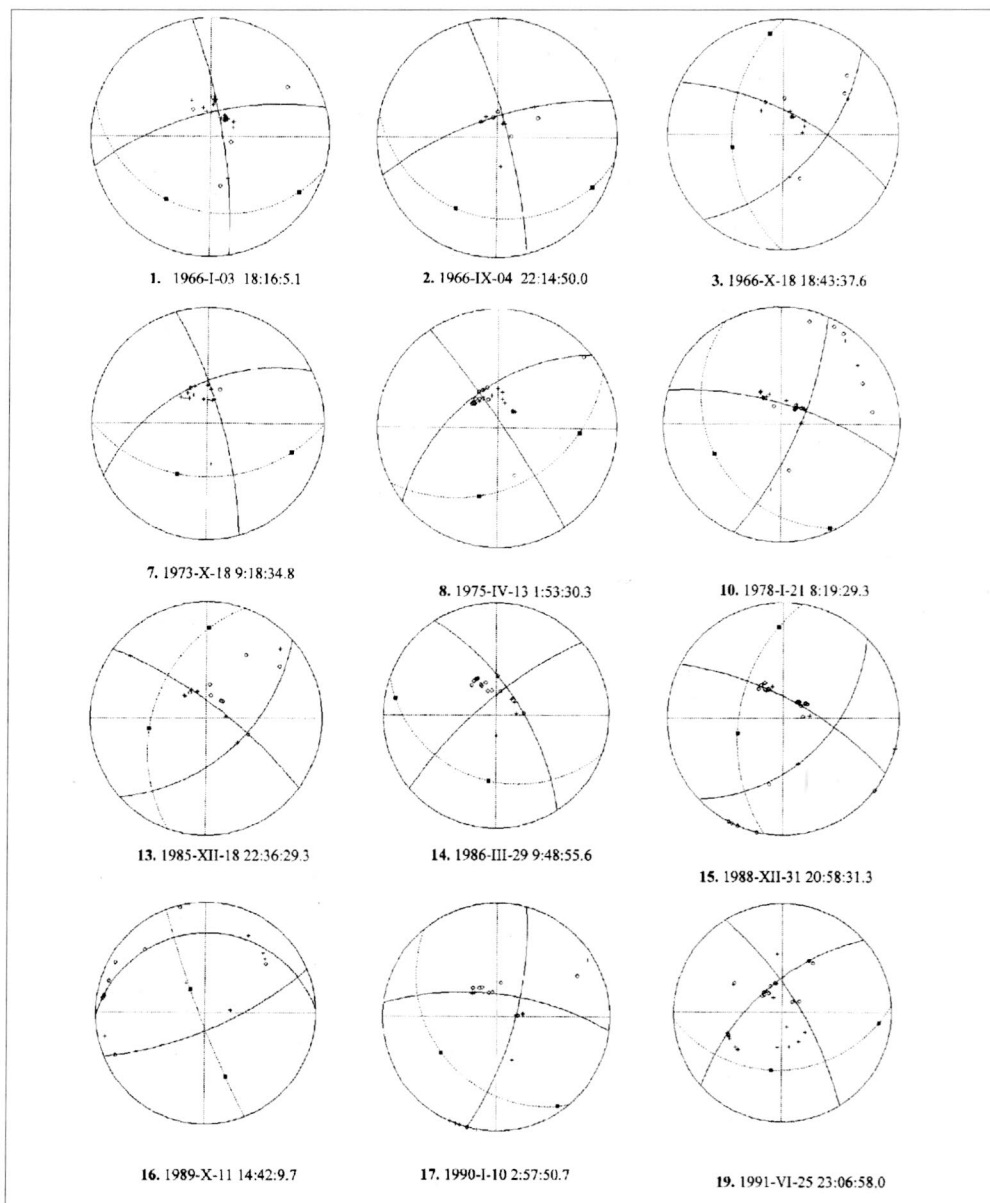


Figura 3. Soluciones del mecanismo focal de los terremotos encontradas por este estudio, representadas por compresiones + y dilataciones o, sobre una proyección de área igual del hemisferio inferior de la esfera focal. P y T denotan los ejes de presión y tensión, respectivamente, y la línea punteada que los contiene representa el plano ecuatorial. El número que se antepone a la fecha de cada evento corresponde a la numeración adoptada en las tablas 1 y 2.

Es sabido que en la zona de transición del continente al océano del territorio colombiano ocurre la interacción de grandes elementos litosféricos, y en correspondencia con la teoría de la tectónica de placas, es evidente que ocurre la deformación y la penetración de la placa oceánica fría en el manto de la Tierra. Aquí el hipocentro de los terremotos refleja la posición de la zona de Wadatti-Benioff. La fría y frágil placa de Nazca, como resultado del acercamiento con el continente suramericano, continúa sumergiéndose bajo el material mucho más caliente del manto, formando con la masa rocosa continental un fuerte contacto entre los bloques que constituyen la litosfera de las dos placas, oceánica y continental, y a la vez entre los bloques internos de cada una de ellas mismas (figura 4).

La fuerza de contacto entre los bloques de cada una de las placas en cuestión aparece por la presencia de la fuerte presión lateral de

calentamiento que se genera con la penetración de la placa oceánica. La existencia de estas grandes fuerzas genera a su vez fuertes rupturas dentro de la placa, las cuales son las causantes de los complejos y simultáneos movimientos que según Lobkovskyi (1988) ocurren en los focos superficiales de terremotos que suceden en los bordes sismoactivos de zonas oceánicas.

Como se observa en la figura 2 y la tabla 1, los terremotos del 9 de marzo de 1967 (No. 4) y del 18 de octubre de 1973 (No. 7) con profundidad de 60 y 61 kilómetros respectivamente, ocurrieron en condiciones de esfuerzos compresivos en dirección NW-SE. Ambos eventos representan falla de tipo inverso y, aunque notándose una alta componente de rumbo en el 7, tienen el plano preferencial de ruptura orientado transversalmente en dirección suroeste-noreste, representando un desplazamiento lateral derecho, el cual concuerda estrechamente



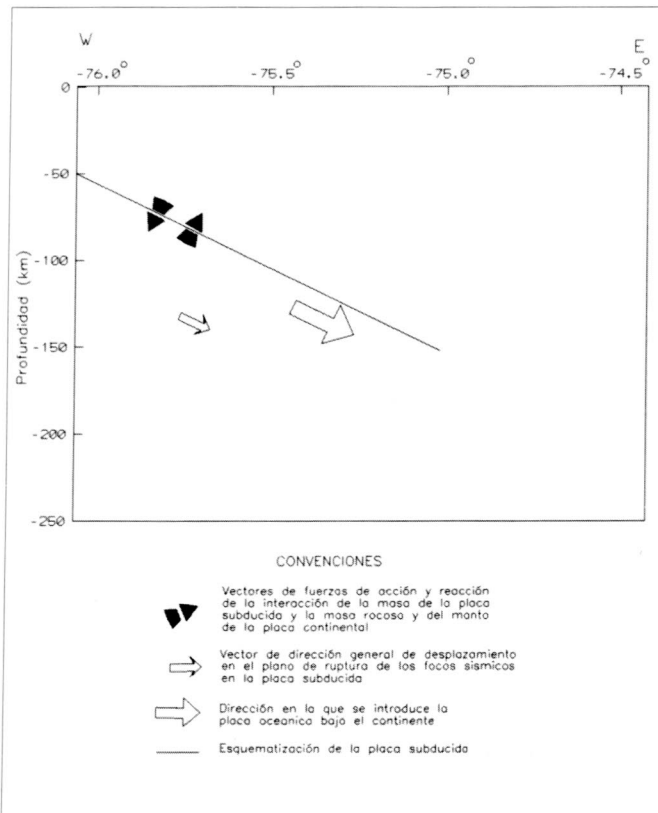


Figura 4. Esquema de los vectores geodinámicos en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo el continente suramericano en el territorio colombiano entre las latitudes (4.0 - 6.0)N.

con la dirección del sistema de fallas del borde llanero. Por su profundidad, estos eventos pueden considerarse como corticales, puesto que la corteza bajo la cordillera Oriental tiene aproximadamente un espesor de 66 kilómetros (Goberna, 1981; Coral-Gómez, 1987). El sismo del 18 de octubre de 1966 (No. 3), ocurrido al nororiente respecto a los dos anteriores, tiene su plano preferencial orientado de SW a NE con desplazamiento lateral izquierdo a lo largo de él; el esfuerzo de compresión está orientado horizontalmente. El terremoto del 25 de junio de 1991 (No. 19) ocurre superficialmente, bajo condiciones de esfuerzos compresivos verticales, que generan un desplazamiento lateral derecho en los planos de falla; la orientación del plano de ruptura coincide con la orientación de la falla Santa María más próxima a él. Más al nororiente, después que la cordillera Oriental y el sistema de fallas del borde llanero cambian de rumbo, se localiza el terremoto del 21 de enero de 1978 (No. 10), el cual ocurrió superficialmente y bajo condiciones de esfuerzos compresivos orientados en dirección SWW-NEE. El plano preferido es el que está en la dirección SWS-NEN. En estos eventos (3, 4, 7, 10 y 19) la dirección del plano preferido de ruptura es aquel paralelo al sistema de fallas del borde llanero.

El terremoto del 18 de diciembre de 1985 (No. 13), ocurre bajo esfuerzos compresivos que tienen una orientación NS, entre las fallas Alto del Trigo y de Combras; el plano nodal del mecanismo obtenido está orientado en la misma dirección que tienen estas fallas, es decir, SW-NE, representando una falla con desplazamiento lateral izquierdo y componente inverso.

Por último, el terremoto del 17 de enero de 1982 (No. 12) es de tipo distensivo. El esfuerzo principal es subhorizontal orientado de WSW-ENE, mientras que el plano nodal preferido está orientado SSW-NNE. Este plano y el desplazamiento que en él se indica coinciden estrechamente con el rumbo y desplazamiento de la falla Salinas, que recorre la zona de estudio desde el centro de ésta, dirigiéndose hacia el norte casi hasta la latitud de 5.5° Norte, donde cambia de rumbo en la dirección NNE. El terremoto No. 20, ocurrido el 2 de enero de 1992, tuvo lugar en una profundidad intermedia de 144 kilómetros. En este caso el mecanismo tiene un plano casi horizontal E-W. El eje de compresión buza hacia el NE.

## IMPLICACIONES SISMOTECTÓNICAS EN LA REGIÓN

El patrón o esquema sismotectónico, que resume la sismicidad y las observaciones de mecanismos focales de terremotos para esta región, es mostrado en la figura 5. Como puede observarse, la mayor parte de la sismicidad está localizada en el sector occidental, en un área que abarca los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, parte de Tolima y Valle del Cauca. En esta zona los sismos son característicos a una profundidad intermedia, y están relacionados a la zona de subducción. El régimen de esfuerzos predominante es extensivo y es gobernado por la tracción de la placa subductada, como es habitual para sismos de profundidad intermedia en este tipo de zonas. Este esfuerzo y el movimiento de la placa están bien documentados por datos sismológicos (Jordan, 1975; Pennington, 1981; Adamek *et al.*, 1988 y otros) y geodésicos por G.P.S. (Freymueller *et al.*, 1993; Kellogg and Vega, 1995; Mora and Kellogg, 1995; Mora, 1995). La dirección del movimiento en los planos de fallas determinados, en la mayoría de los terremotos de profundidad intermedia en este sector, coincide con la dirección del vector de penetración de la placa oceánica bajo el continente. Las flechas grandes rellenas en la figura 5 muestran la dirección de los ejes de esfuerzos de presión y tensión inferidos de las direcciones de éstos en cada mecanismo focal, los cuales varían más comúnmente de NW a W. En este lugar, la subducción alcanza una profundidad aproximada de 180 kilómetros, inferida de la actividad sísmica intermedia.

Se observa un cordón sísmico que se extiende desde el norte del departamento del Huila, por el piedemonte de la cordillera Oriental, sobre la zona que corresponde al sistema de fallas del borde llanero, que a su vez representa la zona de contacto del Bloque Andino y la placa suramericana en el territorio colombiano (Pennington, 1981). La solución obtenida para cuatro eventos (4, 7, 10 y 19) ocurridos a lo largo de la zona de separación de estos dos grandes bloques es bastante consistente con la dirección del plano de falla en cada uno de los tramos del sistema de falla, el cual experimenta cambios de dirección a diferentes latitudes.

En los dos sectores identificados en el sistema de falla del borde llanero, de acuerdo con el cambio de dirección que experimenta, se nota la predominancia del desplazamiento lateral derecho, siendo de mayor magnitud en el sector sur (Salcedo *et al.*, 1995). Las soluciones de los mecanismos focales de los terremotos de esta zona de falla muestran una reorientación de los esfuerzos compresivos en la corteza a lo largo del borde oriental de la cordillera Oriental (figura 5). Una reorientación similar de esfuerzos en la superficie terrestre a lo largo de esta zona, también ha sido notada por Mojica (1985), mediante observaciones geológicas. En la figura 5 las flechas rellenas más pequeñas muestran la dirección del eje de esfuerzo de presión a lo largo de la zona.

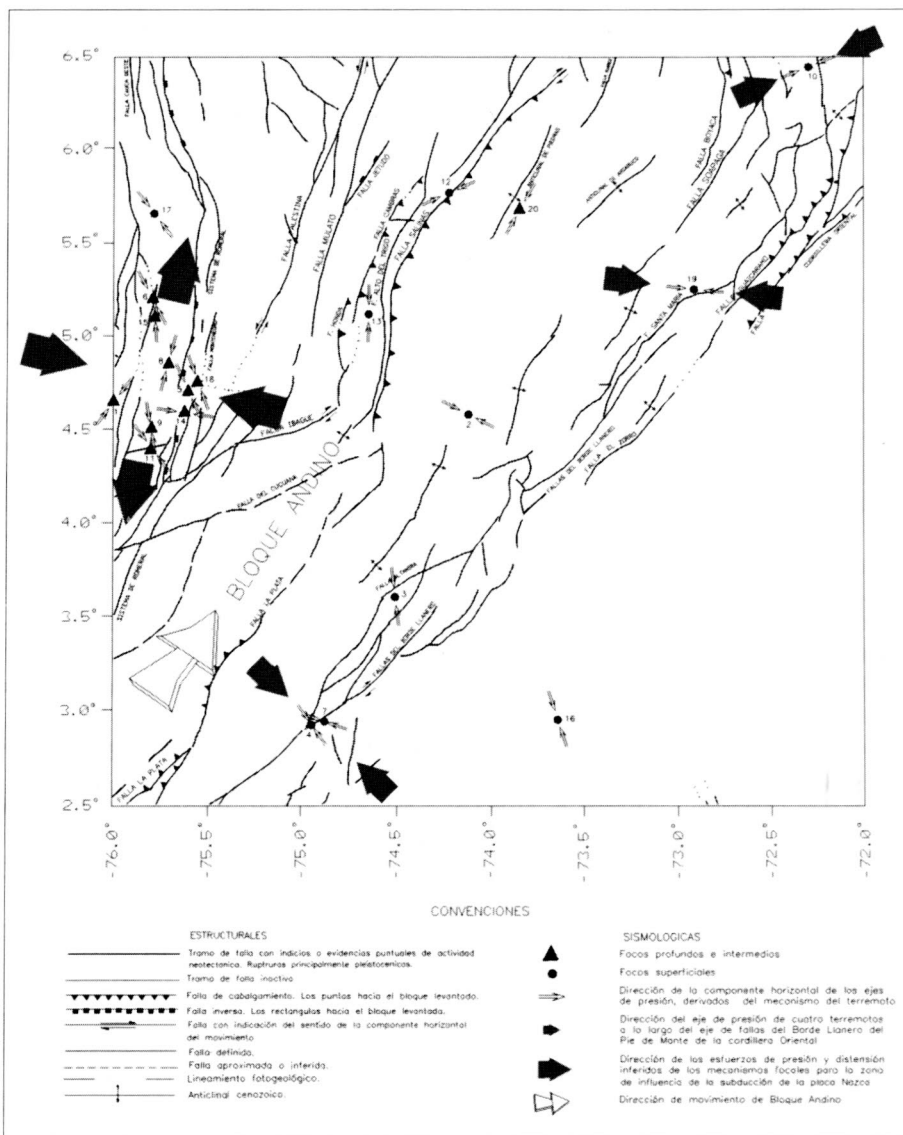


Figura 5. Marco sismotectónico de la región central del territorio colombiano. Las fechas pequeñas indican la dirección de los ejes de presión en el foco, derivados del mecanismo de los terremotos. Los círculos muestran los focos. Las fechas más grandes representan la dirección promedio del eje de presión y tensión en la zona.

coordenadas (2.5° - 6.5°N) y (72° - 76°W), se pueden deducir las siguientes conclusiones:

En el sector occidental se observa una concentración de terremotos de profundidad intermedia, entre 60 y 170 kilómetros dentro de la placa oceánica subductada; muchos de ellos responden a la fuerza de tracción típica de estas zonas, mostrando que la dirección del movimiento en el plano de falla coincide con la dirección de penetración de la placa oceánica bajo el continente. Además, los esfuerzos derivados de estos focos dan evidencias de las fuerzas de acción y reacción que ocurren entre la placa subductada y la masa rocosa del bloque continental.

El patrón general de esfuerzos en la región, dentro del continente, deducido del mecanismo focal de los terremotos evaluados, es de compresiones horizontales, los que a su vez se derivan de la interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramericana. Como producto de la gran compresión regional se generan grandes deformaciones asociadas a zonas de fallas y el desplazamiento del Bloque Andino en dirección NNE.

A pesar de que los datos de los mecanis-

Otros eventos, como 12 y 13, están representando la gran compresión regional producida por la deformación de grandes bloques litosféricos. Esta compresión ha sido la causa de la generación de los sistemas de falla generalmente de tipo inverso en el territorio colombiano, mientras que la ocurrencia del evento 20 a profundidad intermedia y su condición de esfuerzos puede interpretarse como un estado causado por el material litosférico que es empujado por debajo de la corteza desde el SW. Este mecanismo focal está soportado por el desplazamiento del Bloque Andino que es movido en dirección NE como resultado de las colisiones recientes o acreciones tectónicas entre la Fosa de Carnegie y el continente suramericano. La flecha grande no rellena en la figura 5 muestra la dirección del movimiento del Bloque Andino respecto a la placa suramericana.

### CONCLUSIONES

Del estudio de las características de la sismicidad en concordancia con la estructura tectónica que se refleja en el territorio colombiano entre las

mos focales de los terremotos a lo largo del sistema de fallas del borde llanero no son muy abundantes y dejan grandes sectores al descubierto, es interesante notar, en esta etapa, que en su recorrido dentro de la corteza se presenta una reorientación de esfuerzos compresivos. En este sentido es importante aumentar la estadística de los datos para poder tener una mejor representación de este fenómeno. Sin embargo, esto está de acuerdo con otros datos geológicos que son representativos para la parte más superficial de la corteza.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se elaboró dentro del proyecto "Sismotectónica del territorio colombiano", identificado con el código P92F01, en el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química de Colombia (Ingeominas), a cuya directiva expresamos nuestro más sincero agradecimiento por el apoyo institucional brindado al hacer posible esta investigación y su respectiva publicación.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMEK, S., FROHLICH, C. & PENNINGTON, W. D. 1988: Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: Constraints on microplate tectonics of the Panama region. *J. Geophys. Res.*, Vol. 93 (B3): 2053-2075.
- AZTIS, L., LAY, T. & KANAMORI, H. 1988: Large intermediate depth earthquakes and the subduction process. *Phys. Earth planet. Inter.* 53: 80-166.
- BUFORN, E. & UDIAS, A. 1991: Focal mechanism of earthquakes in the Gulf of Cadiz, South Spain and Alboran Sea. *Publicación I.G.N. Serie Monografía No. 8*: 29-40.
- Bulletin of the International Seismological Center (ISC). Edinburgh Scotland, 1960-1990.
- BUNE, V. I., BALAKINA, L. M. & PAVLOVA, G. I. 1975: Sismicidad de Sur América. En: *Tectónica, sismicidad y geodinámica del Sector suroriental del Océano Pacífico (investigaciones geodinámicas)*. No.1: 82-99. (En ruso).
- CORAL GÓMEZ, C. 1987: Los terremotos en Colombia y características de su origen profundo. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 199 pp.
- FREYMUELLER, J. T., KELLOGG, J. N. & VEGA, V. 1993: Plate motion in the North Andean Region. *J. Geophys. Res.*, 98: 21853-21863.
- GOBERNA, J. R. (ed.). 1981: Investigaciones geofísicas sobre las estructuras oceano-continentales del Occidente colombiano. En: *Proyectos Cooperativos Internacionales, Nariño II (1976), III (1978)*. Bogotá, 137 pp.
- HERD, D. G., YOUND, L., MEYER, H., ARANGO, J. L., PERSON, W. J., & MENDOZA, C. 1981: The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 december 1979. *Science.*, Vol 211 (4481): 441-445.
- ISAACKS, B., OLIVER, J. & SYKES, L. R. 1968: Seismology and new global tectonics. *J. Geophys. Res.*, 73: 5855-5899.
- JORDAN, T. H. 1975: The present day motion of the Caribbean plate. *J. Geophys. Res.*, Vol 80 (32): 4433-4439.
- KELLOGG, J. N. & BONINI, W. E. 1982: Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. *Tectonics*, 1: 251-276.
- KELLOGG, J. N. & VEGA, V. 1995: Tectonic Development of Panama, Costa Rica, and Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System Geodetic Studies and Gravity. In: *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Special Paper. Mann P., ed., 295: 75-90.
- KÖHLER, W. 1991: SPHERE, program for numerical search for optimal fault plane solution of a given set of event. Postdam, Alemania.
- LOBKOVSKIY L., Y. 1988: Geodinámica de la zona de spreading, subducción y la tectónica de placas. *Nauka*, 252 pp. (en ruso).
- LOMNITZ, C. & HASHIMINE, M. 1985: The Popayan, Colombia, earthquake of 31 march 1983. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 75 (5): 1315-1326.
- MENDIGUREN, J. 1973: Identification of free oscillation spectral peaks for 1970, July 31, Colombian deep shock using the excitation criterion. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.*, 33: 281-321.
- MENDOZA, C. & DEWEY, J. W. 1984: Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958 and 1979: Implications for barrier models of earthquake rupture. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 74 (2): 577-593.
- MOJICA, J. 1985: Estilolitos horizontales en sedimentos del Cretácico de la cordillera Oriental y su significado tectónico. *Rev. Geol. Colombiana*, No. 14: 7-25.
- MOLNAR, P. & SYKES, L. R. 1969: Tectonics of the Caribbean and middle America regions from focal mechanism and seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 80: 1639-1684.
- MORA, H. 1995: Central and South America GPS Geodesy: Relative plate motions determined from 1991 and 1994 measurements in Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panama and Venezuela. M.Sc. Thesis, University of South Carolina.
- MORA, H. & KELLOGG, J. N. 1995: Tectonics of Northwestern South America, CASA GPS Measurements. American Geophysical Union. Abstract form.
- NOWROOZI, A. A. 1972: Focal mechanism of earthquakes in Persia, Turkey, west Pakistan and Afganistan and plate tectonics of the Middle East. *Bull. Seism. Soc. Am.* 62: 823-850.
- PAGE, W. D. 1986: *Geología Sísmica y Sismicidad del noroeste de Colombia*. ISA, Integral, Woodward-Clyde Consultantes, 281 pp.
- PARÍS, G. & ROMERO, J. 1993: Mapa de fallas activas de Colombia. *Bol. Geol.*, Vol. 34 (2 - 3), Ingeominas, 5-25.
- PENNINGTON, W. D. 1981: Subduction of the Eastern Panama Basin and the Seismotectonics of northwestern South America. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86 (B11): 10753-10770.
- PENNINGTON, W. D., MOONEY, W. D., HISSENHOVEN, R., MEYER, H., RAMÍREZ, J. E., & MEYER, R. 1981: Resultados de un estudio de reconocimiento de microsismos en Bucaramanga, Colombia. En: *Investigaciones geofísicas sobre estructuras oceano-continentales del Occidente colombiano*. Instituto Geofísico, Universidad Javeriana, Bogotá, 49-62.
- PHILIP, H. & CISTERNAS, A. 1985: El terremoto de El Asnam del 10 de octubre de 1980. En: *Mecanismo de los terremotos y tectónica*. A. Udiás, D. Muñoz, E. Buforn, editores, 176-196.
- RIVERA, A. 1989: Inversion du Tenseur des contraintes et des mécanismes au foyer à partir des données de polarité pour une population de séismes. Application à l'Etude du foyer de sismicité intermédiaire de Bucaramanga (Colombie). These de Doctorat. Université Louis-Pasteur de Strasburg. 266 pp.
- SALCEDO, E. 1992: Sismicidad y peligro sísmico de Colombia. Tesis de Ph. D. Universidad Estatal de Moscú "M. V. Lomonosov", Moscú-Rusia, 268 pp.
- SALCEDO, E., RIVERA, C. I. & GÓMEZ, A. 1997: Análisis de la frecuencia de terremotos en la región central de Colombia mediante parámetros del régimen sísmico. *Rev. Academia Colomb. Ciencias*. Vol. XXI (79): 57-72.
- SALCEDO, E., GÓMEZ CAPERA, A. & RIVERA PÉREZ, C. 1995: Deformación y desplazamiento de bloques corticales en la zona de falla del borde llanero colombiano (mediante datos sobre mecanismos focales de terremotos). *Mem. Seminario de Sismotectónica del borde llanero colombiano*. Noviembre 9 y 10 de 1995, Bogotá, 66-81.
- SYKES, L. R. 1967: Mechanism of earthquakes and nature of faulting on mid-oceanic ridge. *J. Geophys. Res.*, Vol. 72: 2131-2153.
- TANDON, A. N. & SRIVASTAVA, H. N. 1975: Focal mechanisms of some recent Himalayan earthquakes and regional tectonics. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 65 (4): 963-969.
- UDIAS, A. & BUFORN, E. 1985: Mecanismo focal de los terremotos y sismotectónica del área Ibero-Mogrebí. En: *Mecanismo de los terremotos y tectónica*. A. Udiás, D. Muñoz, E. Buforn, editores: 217-224.
- UDIAS, A., LÓPEZ, ARROYO & MEZCUA, J. 1976: Seismotectonics of the Azores-Alborán region, *Tectonophysics* 31: 259-289.