



establecido por *Guzman et al (1997)* debe ser tenido en cuenta en el futuro, para la evaluación de la amenaza sísmica y la incidencia que tiene el campo cercano para esta región.

Un factor importante en el presente estudio es la confiabilidad de los hipocentros que se dispone, son 903 réplicas bien localizadas y discriminadas así: cinco de calidad A, 386 de calidad B y 511 de calidad C. Este hecho da cuenta de una buena distribución espacio-temporal en el período Febrero - Diciembre de 1999 para los análisis que se realizaron. En general, las zonas de réplicas se han usado para definir la zona de ruptura para eventos importantes (*Deschamps et al., 1982; Cisterna et al., 1982; Boyd et al., 1988*). Para este estudio relacionado con el sismo del 25 de Enero de 1999 en Armenia (Colombia), es un reciente caso, cuya longitud de ruptura fue obtenida a partir del análisis de ondas telesísmicas de cuerpo. Las ondas P son de corta duración y el momento sísmico se obtuvo con la modelación de los primeros 40-s del tren de ondas P y los primeros 50-s del tren de ondas SH, que permitieron calcular un momento sísmico total de $2.1 \cdot 10^{25}$ dina-cm, coincidente con el momento sísmico de $2.01 \cdot 10^{25}$ dina-cm reportados por Harvard- CMT.

El área de ruptura estimada por la distribución de las réplicas es de 124 km^2 , correspondiendo a un plano de ruptura de $10.6 \times 11.7 \text{ km}$. Este resultado es concordante con las estimaciones que predice el estudio de *Somerville et al (1999)*.

Con las diferentes localizaciones del evento principal, incluida la relocalización con JHD. Se encontró que la mejor ubicación respecto a la zona de réplicas, se obtuvo con la reportada por el OSSO (Observatorio Sismológico del Suroccidente colombiano), que coincidía con el comienzo del área de ruptura al sureste de la ciudad de Armenia. De acuerdo con la inversión de forma de onda y con la distribución de réplicas, la ruptura se inició en el sureste ($4.38\text{N}, 75.69\text{W}$) y se propagó hacia el Noroeste con un azimuth de $356^\circ \pm 10^\circ$, que corresponde al patron geomorfológico del sistema de fallas Silvia-Pijao, asociable específicamente con la falla Córdoba. De acuerdo con *Paris (1997)*, dicha falla sugiere indicios neotectónicos notorios y esta influenciando depósitos Holocénicos con un buzamiento NNE/ 60°E (*Guzman, 1997*). Según los patrones de fallas identificados, el rompimiento se asocia a una falla normal con componente lateral izquierda, que indica un cabeceo del bloque este hacia el norte, con buzamiento NNW/ 67.3° E y con un azimuth de $356^\circ \pm 10^\circ$. Se estimó de acuerdo al momento sísmico una dislocación $\Delta_u = 48.4 \text{ cm}$; este desplazamiento moderado no permitió evidenciar en campo rupturas superficiales (*Ingeominas, 1999*), más bien, promovió grandes deslizamientos cosísmicos.

Respecto al buzamiento deducido a partir de la inversión de forma de onda, 67.3° hacia el este, coincide en términos generales con las observaciones NNE- 60° E a partir del reconocimiento neotectónica del área (*Guzman, 1997*). Cabe mencionar que la distribución de réplicas muestra un enjambre de sismo localizados al suroeste de la ciudad de Armenia, alrededor del segmento falla Armenia-37, indicando que este segmento ha tenido actividad producto del cambio del campo de esfuerzos de la zona. Como se pudo observar en la figura 7, la sismicidad superficial de 0-5 km compromete a este segmento de falla, al igual, un pequeño enjambre asociado al trazo del segmento Pijao-33(2), también de sismicidad superficial y de magnitudes $M \leq 3.5$. Se puede interpretar este marco como una redistribución de esfuerzos producidos por el evento principal, que generó rupturas en zonas aledañas y justamente en el extremo norte de la falla Córdoba.

A partir de mecanismos de primeros arribos de onda P, sólo se pudo obtener con claridad la tendencia a fallas de tipo normal con desplazamiento lateral izquierdo, pero, la confiabilidad de estos mecanismos es baja. Los mecanismos obtenidos por inversión de forma de onda: Näbelek, CMT y MT; nos indican claramente el tipo de ruptura que se produjo y se mencionó anteriormente.

CONCLUSIONES

- 1.- La rápida instalación de una red sismológica provisional y un detallado mapa de las fallas de la región, permitieron la determinación del área de ruptura asociado con el Sismo del 25 de Enero de 1999 en Armenia, Colombia.
- 2.- Se obtuvieron 903 réplicas de buena localización en el período febrero – Diciembre de 1999, la mayoría con profundidades en un rango de $9.0 \leq H \leq 20.0$. Mediante esta información se pudo asociar La falla Córdoba ($\delta = 67.3^\circ$) al sismo principal, con una longitud de ruptura alrededor de 10.6 km.





- 3.- La variación del parámetro b de la ecuación de Richter, en el sector de la falla Armenia, nos indica la actividad de dicha falla, asociable a una redistribución de esfuerzos producidos por el evento principal.
- 4.- La distribución de las réplicas y la inversión de forma de onda del evento principal, permitió establecer un área de ruptura de 124 km^2 , en un rectángulo de $10.6 \times 11.7 \text{ km}$, que corresponde a la falla Córdoba [segmento Pijao-33, *Guzman (1997)*], con una dislocación estimada $\Delta_u = 48.4 \text{ cm}$.
- 5.- El mecanismo obtenido por inversión del tensor de momento, corresponde a una falla normal con desplazamiento lateral izquierdo, con una azimuth $\phi = 356^\circ \pm 10^\circ$, un buzamiento $\delta = 67.3^\circ$, un vector de deslizamiento con un ángulo $\lambda = -33.8^\circ$ y un momento sísmico $M_0 = 2.1 * 10^{25} \text{ dina} - \text{cm}$ que corresponde a un $M_w = 6.2$.
- 6.- La relación $\frac{E_s}{M_0}$ para sismos locales superficiales se encontró en el intervalo $4.44 * 10^{-5}$ a $4.5 * 10^{-4}$ con un promedio de $1.39 * 10^{-4}$. Esto sugiere que la relación de Gutenberg y Richter para energía en la cual está implícita $\frac{E_s}{M_0} = 5 * 10^{-5}$, es válida para sismos en la región.
- 7.- Para sismos locales superficiales, con magnitudes $M_L \leq 3.5$ se hallaron momentos sísmicos que difieren con tres métodos a saber: con el espectro radiado de fuente, el método de Brune y mediante el análisis espectral de la onda SH. Esto quizás se deba a la corrección por atenuación, ya que está sujeto a incertidumbres en las altas frecuencias, pues la mayor contribución de la energía se espera viene alrededor de la frecuencia de esquina y está es incierta para eventos pequeños.

BIBLIOGRAFIA

- Aki, K., Richards, P.G.,(1980). QUANTITATIVE SEISMOLOGY. Theory and Methods. *W.H. Freeman and company, San Fran-cisco*.
- Archuleta, R.J; E. Cranswick; C. Mueller; P. Spudich, (1982). Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California earthquake sequence. *Journal of Geo-physical Research Vol 87, 4595-4607*.
- Boore, D.M; J. Boatwright, (1984). Average body-wave radiation coefficient. *Bulletin Seismological. Soc. Amer. 74, 1615-1621*.
- Boyd, T.M.; J.L. Nabelek, (1988). Rupture process of the Andreanof Islands earthquake of May 7, 1986. *Bulletin of Seismological Soc. Ame. 78, No 5, 1653-1673*.
- Brune, J.N,(1970).Tectonic Stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res. 75, 4997-5009*.
- Cisternas, A.; J. Dorel; R. Gaulon, (1982). Models of the complex source of the el Asnam earthquake. *Bulletin Seismological Soc. Ame. 72, No 6, 2245-2266*.
- DeMets C., R.G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of currents plate motions. *Geophysical research Letters, 21, 2191-2194*.
- Dewey, J.W.,(1971). Seismicity studies with the method of join hypocenter determination: *Ph.D thesis, University California, Berkeley*.
- Dziewonski, A. M. And F. Gilbert,(1974). Temporal variation of the seismic moment and the evidence of precursive compression for two deep earthquakes. *Nature, 247, 185-188*.





- Escobedo, Z.D, (1997). El sismo del 9 de Octubre de 1995 en Colima: Un estudio telesísmico. *Tesis de Maestría- Instituto de Geofísica UNAM (México)*.
- Gallegos, M; M. Ordaz, (1999). Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuente y teoría de vibraciones aleatorias. *Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS, Bogotá*.
- Gallego, A.; Ospina, L.M., (2001). Estudio de la morfotectónica y sismicidad del área que contiene las réplicas del sismo del Quindío- Enero de 1999 a Enero de 2000. *Universidad de Caldas, Tesis de pregrado (en preparación)*.
- Gil, F. , Bohórquez, O., Monsalve, H. , Osorio, J.A., Ospina, L. M., Patiño, J. Acevedo,A., Sanz L.(1999) .Análisis De La Secuencia De Réplicas Del Sismo De Enero 25, 1999 Con Base En Una Red Sismológica Local (Enero 26 – Marzo 31, 1999). *I Seminario Internacional de Riesgo Sísmico, Armenia (Colombia) sep 16-19-1999*.
- Gutenberg, B. And C. Richter (1954). Seismicity of the earth and associated phenomena. *Princeton U. Press*.
- Gutenberg, B. And C. Richter (1956). Magnitude and energy of earthquakes, *Ann. Geofis. 9, 1-15*.
- Guzman, J., G. Franco, M. Ochoa, (1997). Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal- Evaluación Neotectónica. *Carder*.
- Ingeominas, (1993). Boletín trimestral Junio- Agosto de 1993, Bogotá.
- Ingeominas, (1999). Informe terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe técnico-científico. Vol II, Zonificación sismogeotécnica para la reconstrucción de Armenia. *Ingeominas, Universidad del Quindío*.
- Kanamori, H. (1977). The Energy release in great earthquakes, *J. Geophysics Res. 82,2981-2987*.
- Kennett, B.L.N.,(1983). Seismic wave Propagation in Stratified media. V *Cambridge University Press, Cambridge , p.342*.
- Kikuchi, M. And H. Kanamori, (1982). Inversions of complex body waves. *Bulletin Seismo-logical Society of America, 72, 491-506*
- Kikuchi, M., Y. Fukao, (1988). Seismic wave energy inferred from long-period body wave inversion. *Bulletin Seismological Soc. Amer. 78, 1707-1724*.
- Lee, W.H., Lahr, J.P., . HYPO71PC (1975). A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. *Geol.surv., open-file report. 75 –311 .*
- Monsalve, H (1998). Geometría de la subducción de la Placa Nazca en el Noroeste de Colombia: Implicaciones Tectónicas y Sísmicas. *Instituto de Geofísica-UNAM, Tesis de Maestría*.
- Mora H., J. Kellogg, (1994). Quaternary faults in Central and South America - CASA GPS measurements, *66th. Annual Meeting, Seismological Society of America, Eastern Section, Columbia, USA, 38, Abstract*.
- Nábelek, J. L., (1984). Determination of earthquake source parameter from inversion of body waves. *Thesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology*.
- Orowan, E. (1960). Mechanism of seismic faulting, *Geol. Soc. Am. Mem. 79, 24-43*.



París, G. (1997). Mapa Neotectónico Preliminar del Quindío – Rasgos Morfotectónicos. *Proyecto Fallas Potencialmente sismogénicas, Alcaldía de Armenia*.

Randall, G.E., C.J. Ammon, T.J Owens, (1995). Moment tensor estimation using regional seismograms from a Tibetan plateau portable network deployment. *Geophys. Research letter* 22, 1665-1668.

Singh, S.K, M. Ordaz, (1994). Seismic Energy in Mexican Subduction Zone Earthquakes, *Bulletin Seismological Society of America*, 84, 1533-1550.

Somerville, P., K. Irikura, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iawasaki, N. Smith, A. Kowada, (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters* 70, 1, 59-79.

Vargas, C.A, A. Ugalde, LL. Pujades, (1999). Atenuación de Ondas Coda en la Region Central de los Andes de Colombia :Eje Cafetero, *Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya*.

Vassiliou, M.S., H. Kanamori, (1982). The energy release in earthquakes. *Bulletin Seismological Soc. Amer.* 72, 371-387.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al patrocinio de la Universidad del Quindío Proyecto No 164 Comité Central de Investigaciones; además, al INGEOMINAS por la instalación de la red provisional y permitir el uso de los registros acelerográficos y sismogramas de las réplicas y por el apoyo con la instrumentación al Observatorio Sismológico del Quindío-OSQ. Se extienden los agradecimientos a IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center) y GEOSCOPE, por el suministro de los trazas tele sísmicas, igualmente a .P. WESSEL AND W. SMITH, por el suministro del programa GMT (Graphics Mapping Tools) para el procesamiento de los mapas.

