

RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS SISMOLÓGICOS DE GRAN VISIÓN REALIZADOS EN LAS FALLAS VALLECITOS-CALABAZAS, EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA

Cecilio J. **Rebollar*** y Antonio **Uribe Carbajal****

*Centro de Investigaciones Científicas y de Educación superior de Ensenada, B. C. **Comisión Federal de Electricidad.

RESUMEN

Analizamos la micro-sismicidad ($1.4 \leq M_l \leq 3.4$) registrada con una red portátil de cinco estaciones instaladas a lo largo del Sistema de Fallas Vallecitos-Calabazas (SFVC), así como también la actividad de SFVC registrada en la estación permanente CBX durante el periodo de 1982 a 1986. Encontramos un promedio de 7.3 eventos distribuidos sobre una distancia que varía entre 8 y 53 km ($1.0 \leq S-P \leq 7.0$ segundos) de la estación CBX. Aparentemente la sismicidad no es estacionaria con el tiempo. El valor de b (parámetro que da información sobre el estado de los esfuerzos en una región en estudio) calculado fue 1.41, el cual es grande comparado con el valor de b de 0.92 de un sector de la Falla de San Miguel. Esta diferencia en los valores de b sugiere un ambiente de esfuerzos tectónicos más grande en la Falla de San Miguel que SFVC. En otras palabras, los esfuerzos de SFVC están distribuidos en una gran volumen y no se encuentran concentrados en una falla en particular. Calculamos la razón de deslizamiento sísmico promedio usando un intervalo de tiempo de dos años de actividad sísmica registrada en la estación CBX (308 eventos), y para una muestra de sismos registrados en SFVC desde 1934 a 1980.

Se encontró una razón de deslizamiento sísmico de 0.30 mm/año para la primera muestra y 0.028 mm/año para la segunda o aproximadamente un milímetro cada 30 años. Sin embargo, estos valores pueden tener un error de un orden de magnitud. Estas dos estimaciones son muy similares y sugieren que la energía de deformación acumulada en esta área, está siendo liberada en una serie de micro-sismos.

ABSTRACT

We analyzed the seismicity ($1.4 \leq M_l \leq 3.4$) recorded by a network of five portable stations deployed along the Vallecitos-Calabazas fault system (VCFS) during 1983, as well as the activity from VCFS recorded at the permanent seismic station CBX from 1982 to 1986.

We found an average of 7.3 event per month distributed over the distance range from 8 to 53 km ($1.0 \leq S-P \leq 7.0$ seconds). There is an apparent non-stationarity of seismicity as indicated by a plot of cumulative number of events versus time. The b-value is found to be 1.41 which is high compared to that of 0.92 for the adjacent similar (strike-slip) San Miguel Fault. This difference in b-values suggests a higher stress environment along the San Miguel Fault than in the VCFS. In other words, the stresses in VCFS are widespread in a large volume and not concentrated in a particular shear plane. We calculated the rate of seismic slip for two years time period of local events recorded at station CBX (308 events), and from a time

sample of earthquake spanning from 1934 to 1980. We found a rate of seismic slip of 0.030 mm/year for the first sample and 0.028 mm/year for the second sample or approximately one millimeter every 30 years

These two estimates are very similar and suggest that the strain energy accumulated in this area is released in a series of small earthquakes.

INTRODUCCIÓN

El propósito de este estudio es registrar la micro-sismicidad en el extremo noroeste de las fallas Vallecitos-Calabazas con un arreglo de estaciones portátiles que fueron instaladas en 1982 y 1983. También comparamos la actividad sísmica registrada en la estación permanente CBX con la estudiada por Rebolgar y Reichie (1977) en el sector de la Falla de San Miguel que produjo un sismo en el año de 1956.

Es importante entender la actividad sísmica asociada con el sistema de fallas Vallecitos-Calabazas (SFVC) debido a su proximidad con las ciudades de Tijuana y San Diego. Este sistema de fallas está al noroeste de la Falla de San Miguel y termina abruptamente, aproximadamente 33 km al sureste de Tijuana. En el área de San Diego, las fallas de Rose Canyon y la Nación son los principales rasgos tectónicos (Figura 1).

Simons (1977) encontró que la sismicidad en esta área está en la Plataforma continental y en el escarpe de Coronado. Sin embargo, hay algunos eventos asociados a estas fallas. Ha sido sugerida la conexión entre la Falla Rose Canyon y Vallecitos, sin embargo, hasta la fecha no se ha encontrado evidencia de esta hipótesis. Gastil y otro (1977), por ejemplo, muestran el lineamiento de Tijuana el cual posiblemente une estas fallas. Nuestro propósito fue detectar, si existe sismicidad

asociada a este lineamiento.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

La Figura 1, muestra la localización de las estaciones sísmicas usadas en este estudio. Las estaciones portátiles CAL, ABE Y PAL registraron simultáneamente en formato analógico y digital. La estación LLA registró en analógico y MIN en digital. Todas estas estaciones fueron instaladas por periodos cortos de tiempo durante 1982 y 1983. La estación CBX es parte de la red de Baja California (RESNOR) y registra simultáneamente en formato analógico y digital. Todas las estaciones fueron de dos componentes.

Durante este periodo de investigación, sólo tres eventos fueron registrados simultáneamente en las estaciones digitales LLA, CAL Y CBX. Las diferencias en S-P de estos eventos varían entre 2.6 y 4.8 segundos (Figura 2). Estos eventos fueron localizados en el Valle de Guadalupe (Figura 1). Durante este mismo periodo de observación, las estaciones analógicas registraron cinco micro-sismos con diferencias en S-P entre 2.1 y 3.7 segundos. La magnitud de estos eventos (tres) calculada usando la duración de la señal, varia entre 1.6 y 1.9. Ninguno de estos eventos fue registrado en tres o más estaciones.

Círculos de distancia epicentral se calcularon usando diferencias S-P e indican que la localización más probable de estos eventos es al sureste de la falla de Vallecitos (Figura 1). Debido a que no fue posible registrar micro-sismos durante periodos cortos de registro, concentramos nuestro análisis en la sismicidad registrada en un periodo de cuatro años (1983-1986) en la estación CBX.

La Figura 3, es un ejemplo de la actividad registrada en formato digi

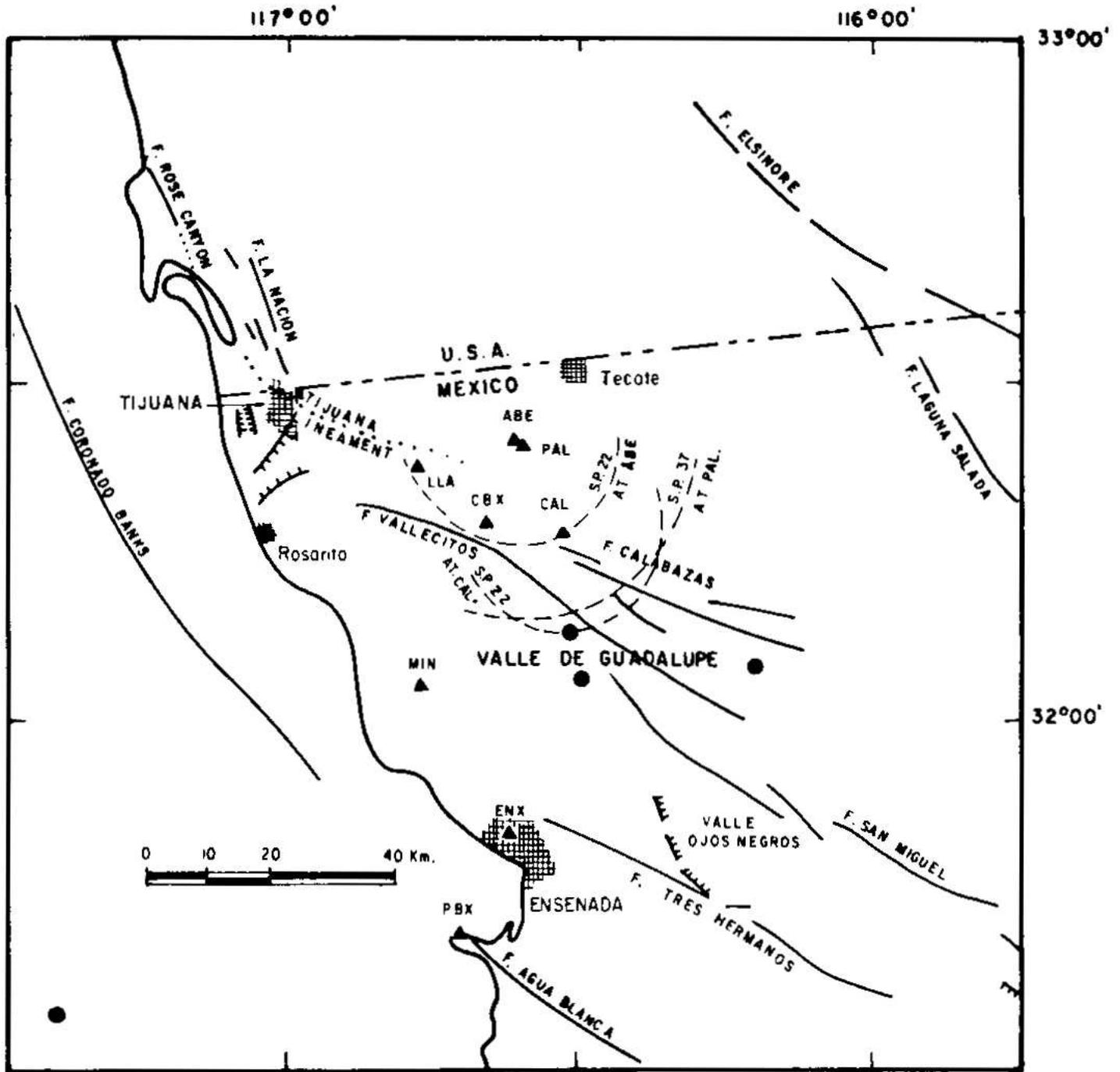


FIGURA 1.- Mapa que muestra el área de estudio con los principales rasgos tectónicos de Gastil y otros (1974). Las estaciones CBX, ENX y PBX pertenecen al sistema RESNOR.

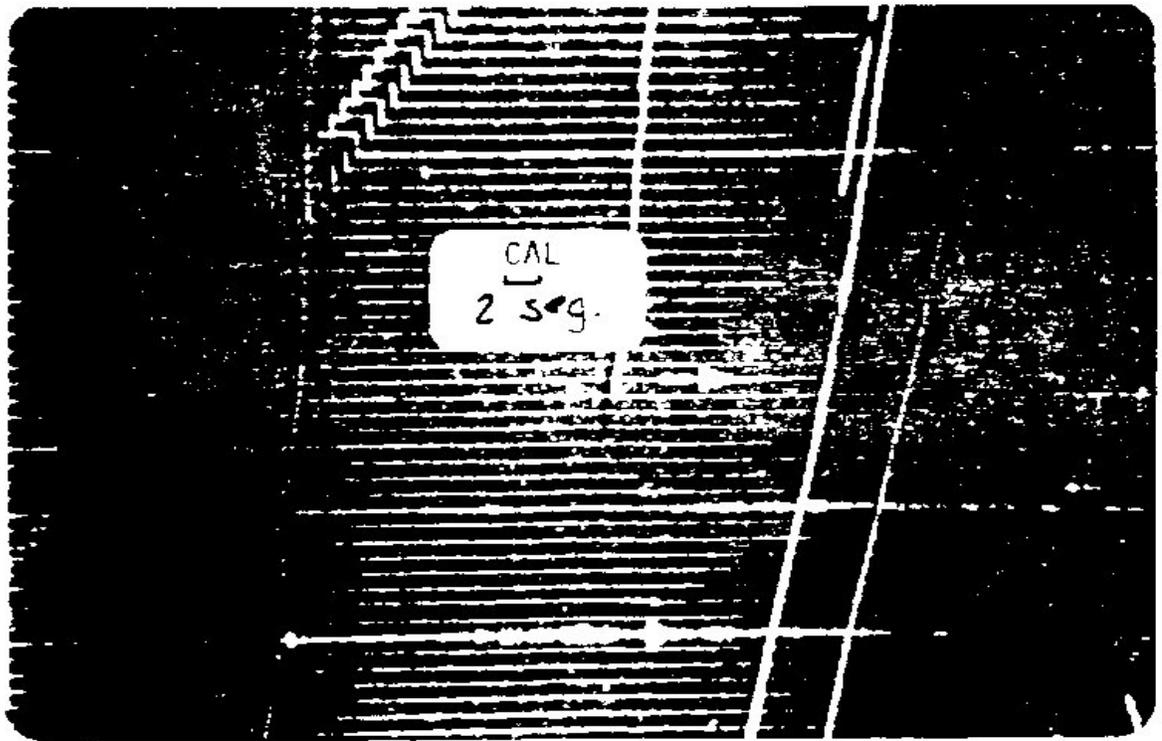
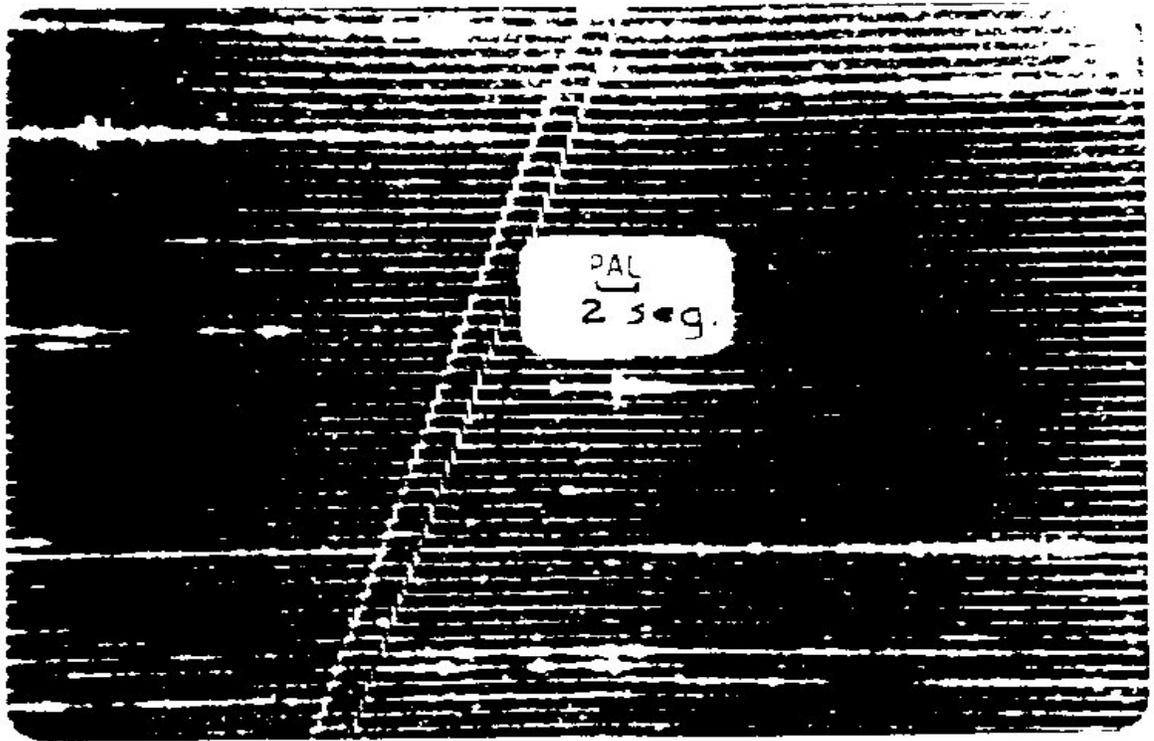


FIGURA 2.- Micro-sismos registrados en las estaciones analógicas.

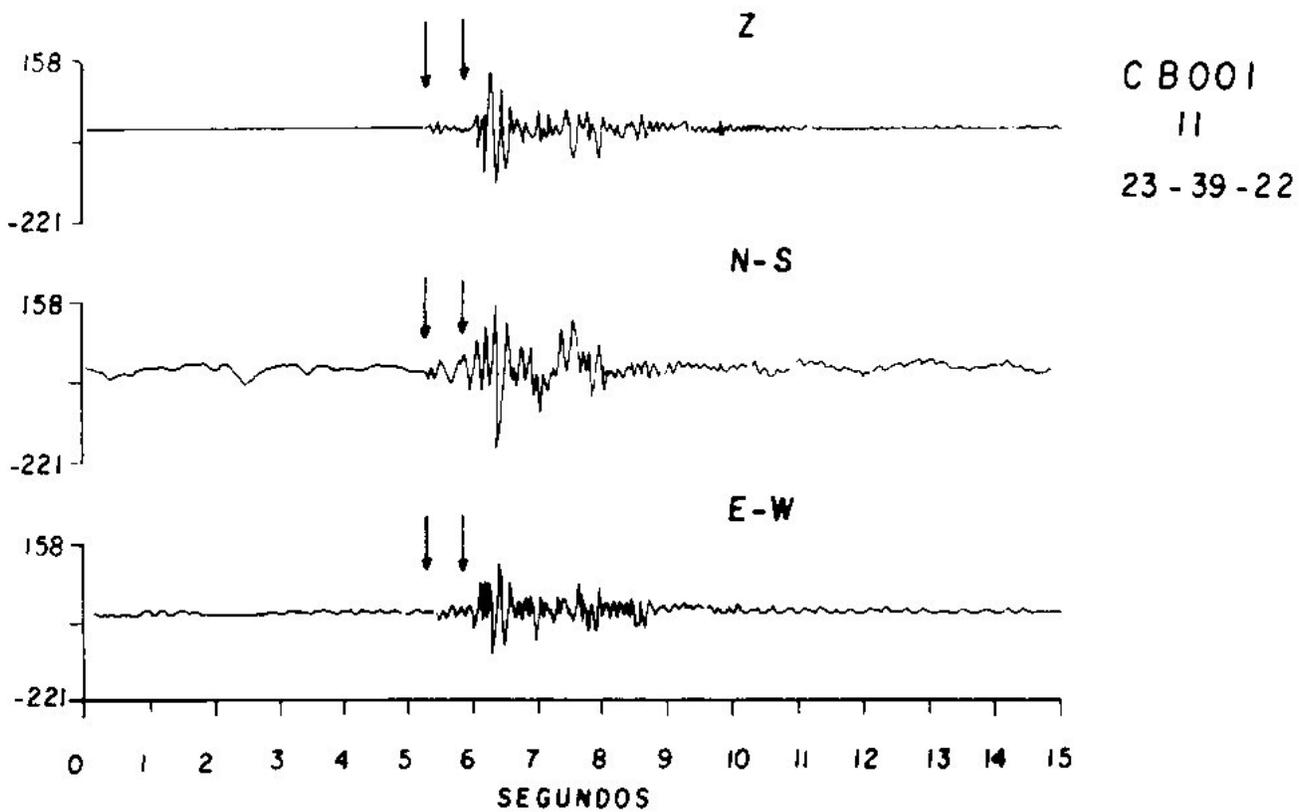
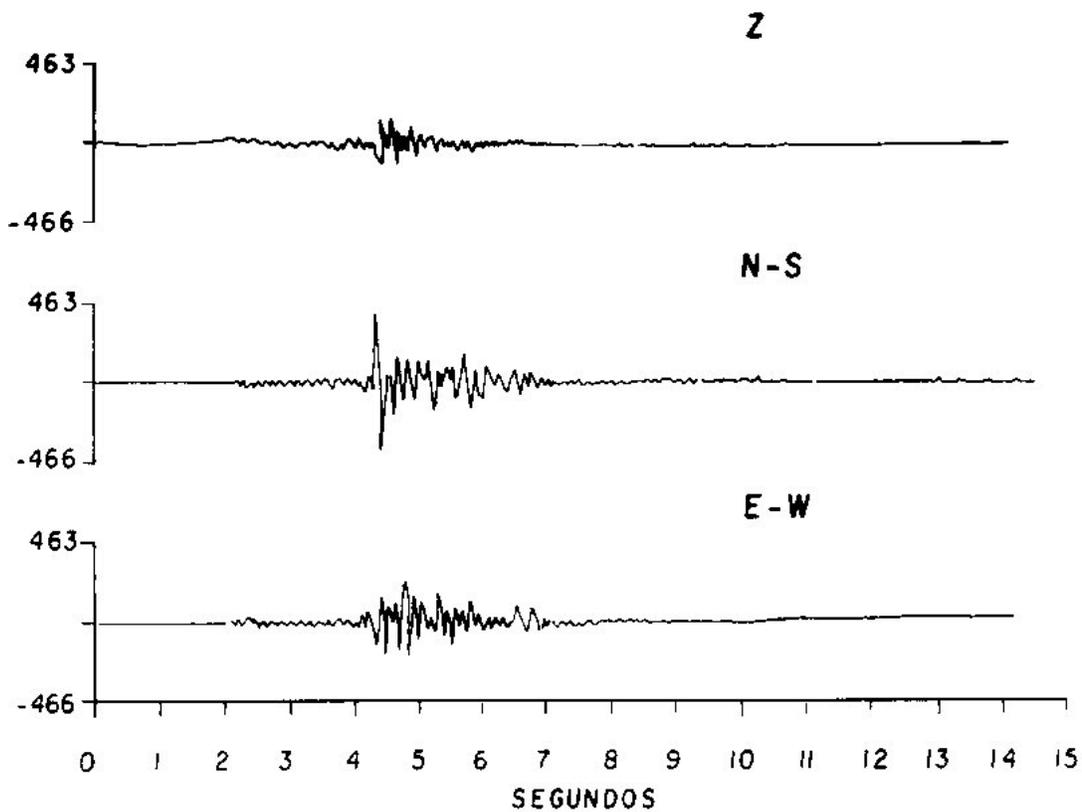


FIGURA 3.- Dos micro-sismos registrados en la estación permanente CBX.

tal en la estación CBX.

La Figura 4, muestra la gráfica espacio-tiempo-magnitud de los eventos registrados en formato analógico de la estación CBX desde 1983 a 1986. Por un periodo de 7 meses, CBX registró solamente en formato digital. En esta figura, estamos graficando sólo eventos con diferencias S-P hasta de 7 segundos, que son equivalentes a distancias epicentrales hasta de 53 km que es aproximadamente la distancia entre la estación CBX y El Valle de Ojos Negros donde termina la Falla de Vallecitos. Toda esta actividad se encuentra asociada al SFVC y no está concentrada en un lugar en particular, de otra forma, veríamos una concentración de eventos en el eje de las diferencias S-P de la Figura 4, indicando un incremento en los esfuerzos de alguna región.

La sismicidad se incrementa del noroeste (aproximadamente 8 km de CBX) hacia el sureste de la falla (53 km de CBX). La magnitud de estos eventos varía entre 1.5 y 3.5. Graficamos el número acumulativo de eventos contra tiempo, a fin de saber si la sismicidad es estacionaria en tiempo (Figura 5). Esta gráfica tiene algunos saltos que posiblemente corresponden a pequeños brotes de sismicidad. Si comparamos esta actividad con los resultados obtenidos en la Falla de San Miguel, podemos concluir que la sismicidad en el SFVC no es estacionaria con el tiempo.

De la gráfica de frecuencia de eventos contra magnitud para dos años de actividad, se calculó un valor de b de 1.41 ± 0.04 (Figura 6). Es importante hacer notar que este valor es 35% más grande que el calculado por un sector de la Falla de San Miguel (0.92). Esta diferencia podría indicar una concentración de esfuerzos más grande en la Falla de San Miguel que en el SFVC.

La Falla de San Miguel ha generado sismos relativamente grandes durante este siglo, los sismos de 1954 ($M_L=6.0$ y 6.3) y 1956 ($M_L=6.8, 6.1, 6.3$ y 6.4) Leeds (1979), Short & Roberts (1958). Lo anterior esta de acuerdo con los valores de b relativamente grandes de la Falla de San Miguel.

DETERMINACION DEL DESLIZAMIENTO PROMEDIO EN SFVC

De acuerdo a Brune (1968), el deslizamiento promedio de un periodo de tiempo está dado por:

$$u = (1/t \bullet S) \bullet M_0$$

donde $\bullet M_0$ es la suma de todos los momentos sísmicos en el área sismogénica, \bullet es la rigidez elástica (supuesta como $3.3 \cdot 10^{11}$ dinas/cm) t es el tiempo de observación (usualmente en años) y S es el área sismogénica. En la determinación del deslizamiento promedio SFVC, suponemos una zona sísmica en la cual el deslizamiento está distribuido uniformemente en toda la falla. Obviamente, en nuestro caso, esto no es completamente cierto, ya que hay más actividad sísmica al sureste de SFVC Rebollar y Reichie (1987) encontraron que la actividad sísmica en esta región se encuentra entre 5 y 15 km de profundidad, consecuentemente, suponemos que la zona sismogénica tiene un ancho de 10 km y una longitud de 58 km.

A fin de calcular el momento sísmico acumulativo, consideramos la actividad sísmica registrada en CBX durante 1984 y 1985. Ésta incluye toda la actividad registrada en CBX con S-P hasta 7 segundos (Figura 3) y los eventos registrados por RESNOR (Figura 7). Los momentos sísmicos de los eventos con magnitudes entre 1 y 3 fueron calculados con la relación $\log M_0 = 1.5 M_L + 16.9$ (Rebollar, 1985). De esta forma calculamos los eventos sísmicos de 308 eventos con magnitudes en el rango de 1.6 a 3.4.

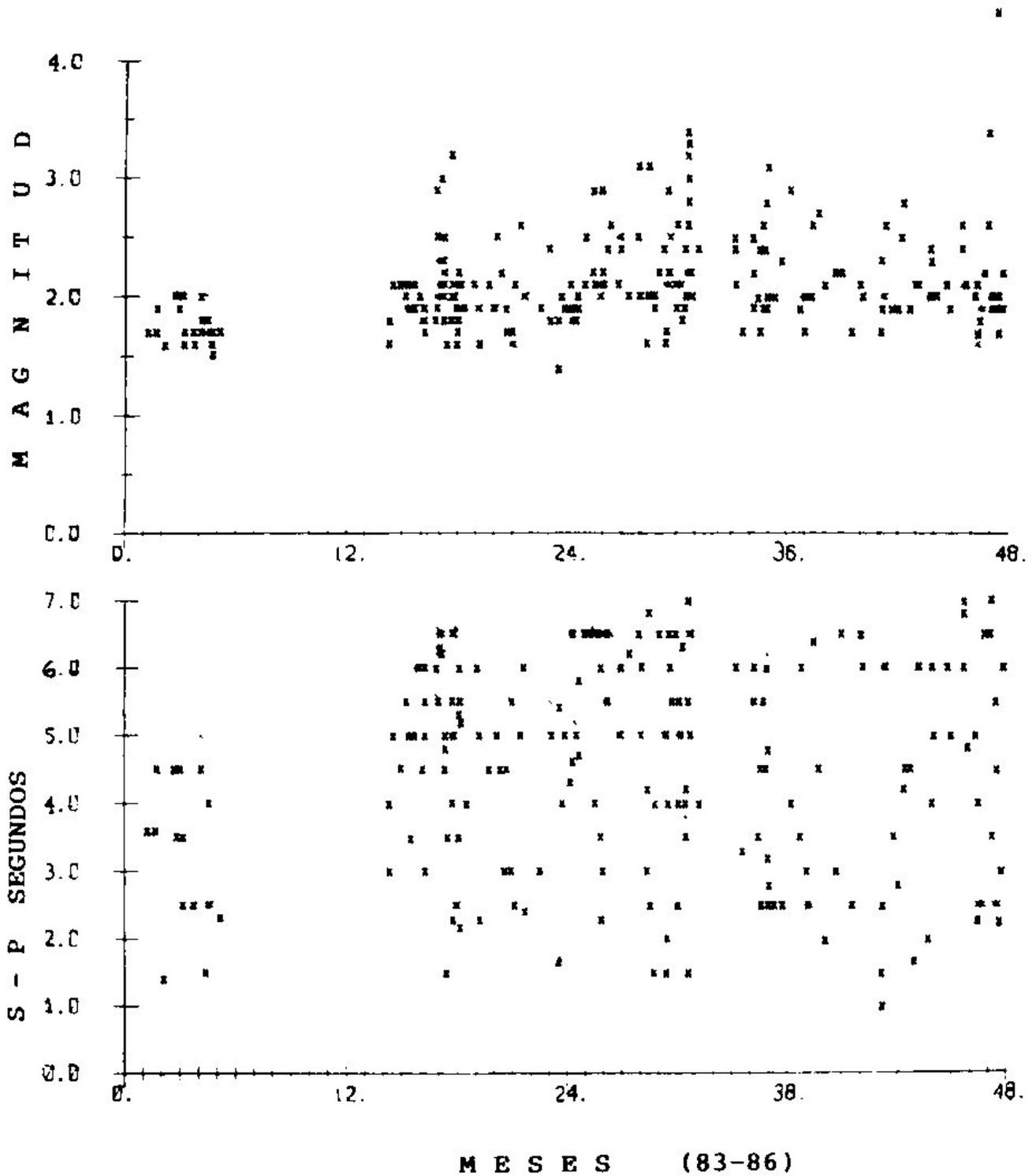


Figura 4.- Gráfica espacio-tiempo-magnitud de la actividad registrada en la estación CBX.

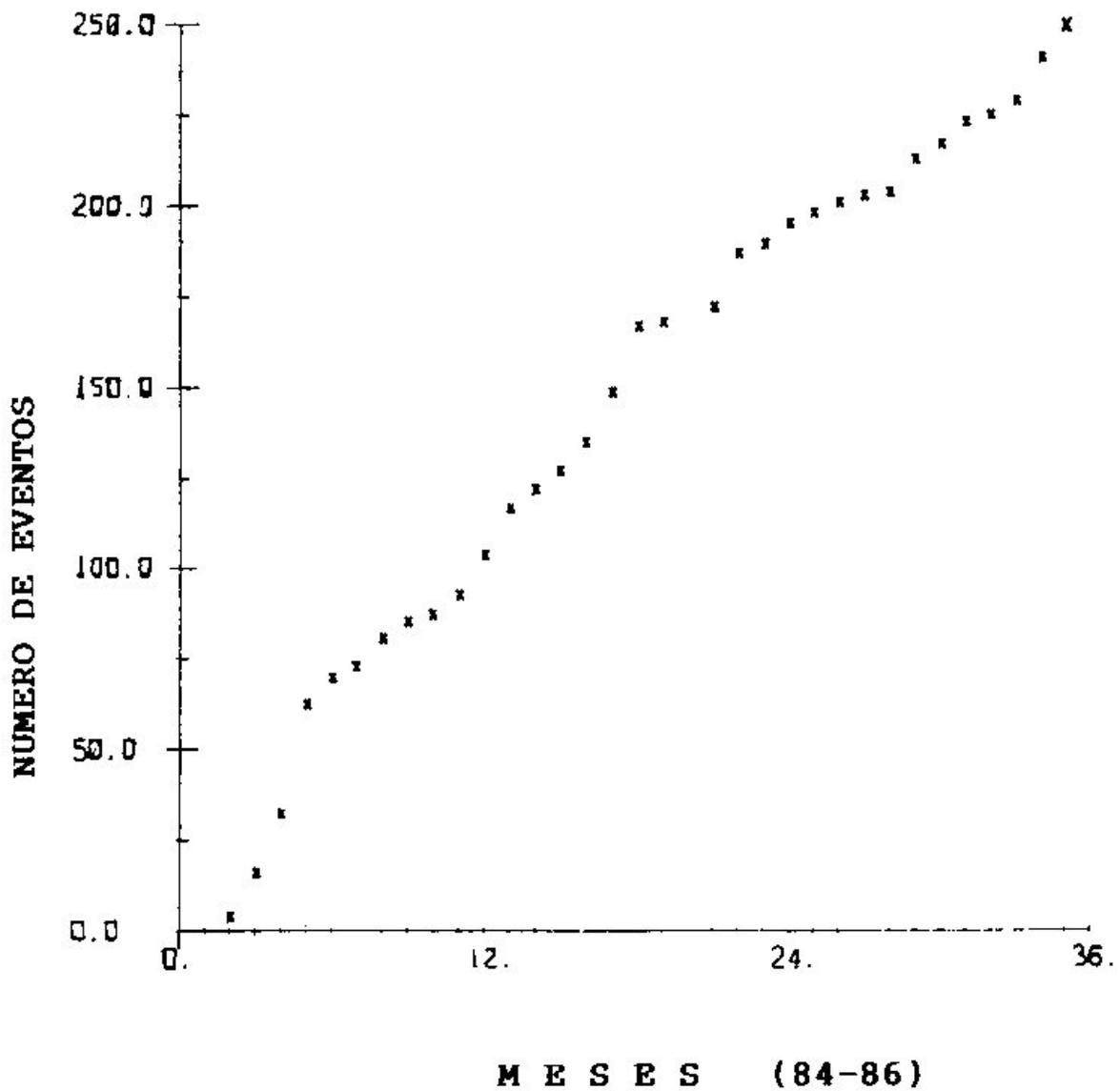


FIGURA 5.- Número acumulativo de eventos contra tiempo. En esta gráfica se puede ver que la sismicidad no es estacionaria con el tiempo.

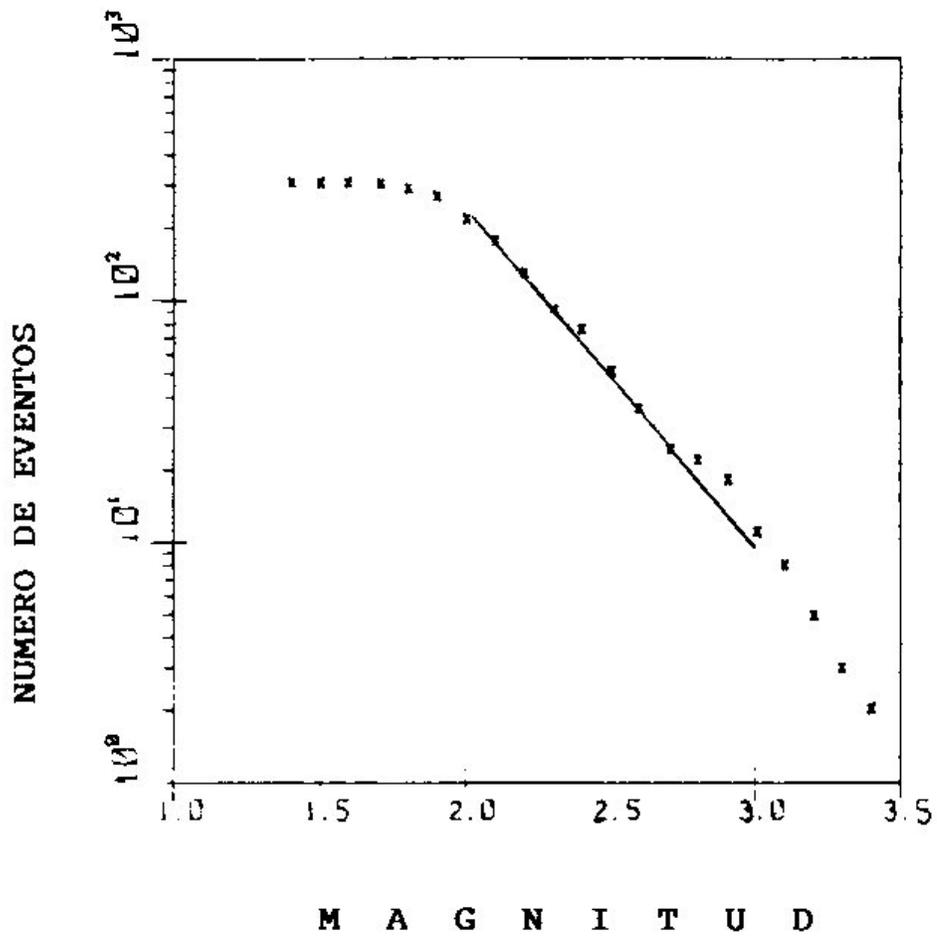
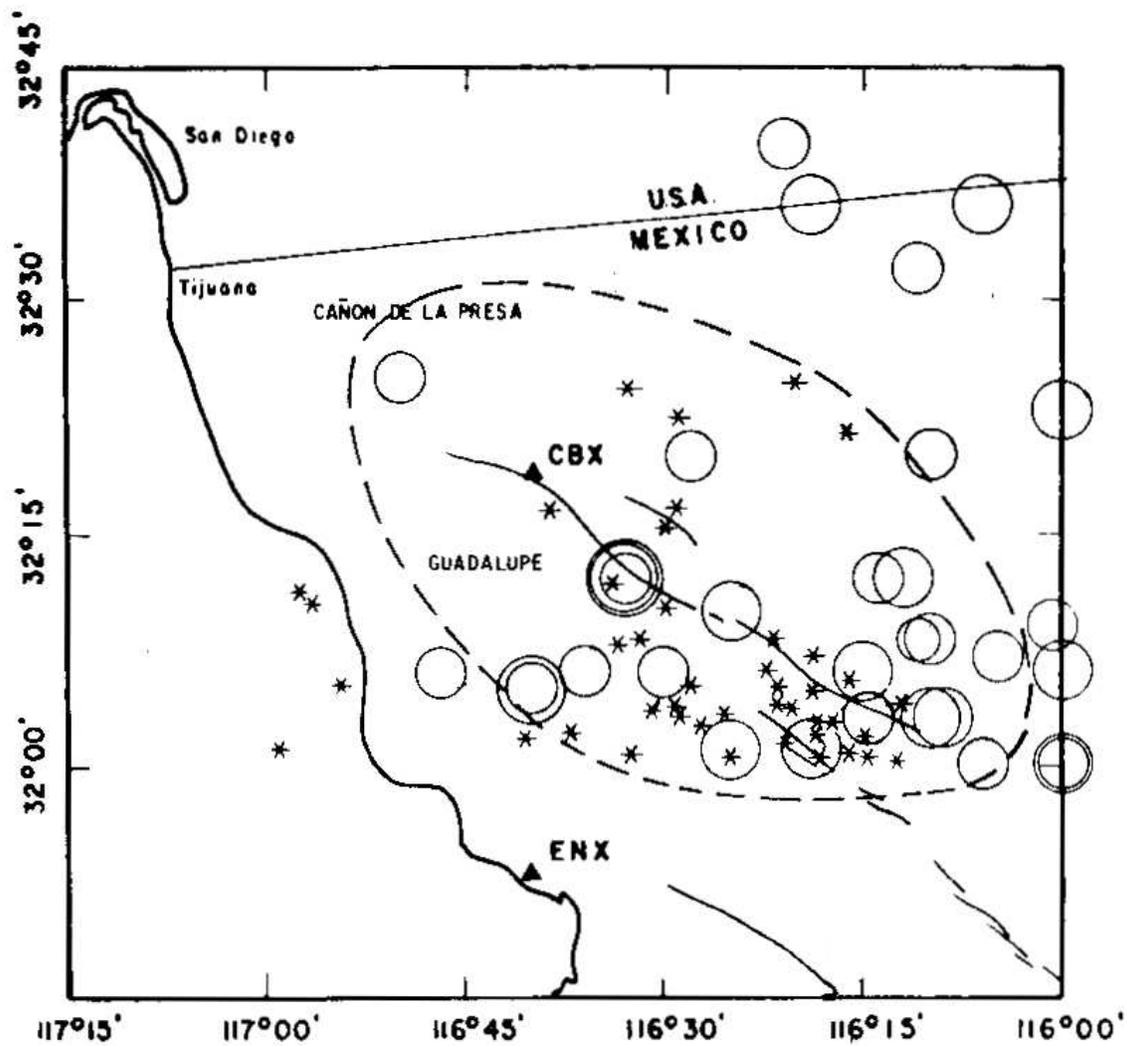


FIGURA 6.- Gráfica frecuencia-magnitud de la actividad registrada en el SFVC durante 1984 y 1985.



M A G N I T U D

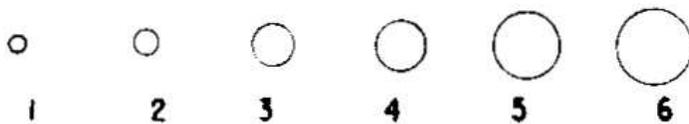


FIGURA 7.- Mapa del SFVC. En círculos los sismos registrados en el área de 1934 a 1980. Las estrellas son los eventos localizados por RESNOR, principalmente en el rango de 1.6 a 3.4 que son los asociados al -- SPVC.

El deslizamiento sísmico promedio fue de 0.030 mm/año o, aproximadamente, un milímetro cada treinta años. Para revisar este número, calculamos el deslizamiento sísmico promedio usando esta vez los sismos registrados en SFVC desde 1934 a 1980 (Tabla 1). Este conjunto de eventos incluye el de Guadalupe de 1949 y el del Cañón de la Presa que ocurrió en 1978 en las cercanías de Tijuana de magnitud 4.1. Calculamos los momentos sísmicos de 32 eventos con magnitudes entre 3.3 y 5.7 con la relación: $\log M_0 = 1.71 M_L + 14.5$ (Vidal, 1978). El deslizamiento sísmico promedio calculado fue de 0.028 mm/año. Dentro de los límites de error, estos deslizamientos son muy similares, sin embargo, debemos señalar que estos valores pueden tener un error de un orden de magnitud.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al analizar la sismicidad en SFVC, encontramos que ésta decrece del sureste al noroeste y termina abruptamente 33 km al sur de Tijuana. Debido al poco éxito alcanzado con una red sismológica portátil, la estación CBX fue de fundamental importancia para estudiar la microsismicidad en esta área. Encontramos, aunque escasa, existe microsismicidad a 8 km de CBX. Sin embargo, estos eventos no son generados continuamente en algún lugar en particular de SFVC.

Lo anterior está bien ilustrado en la gráfica espacio-tiempo (Figura 3) También encontramos que la sismicidad no es estacionaria con el tiempo, tal vez, indicando que existe un estado heterogéneo de esfuerzos en esta área. Esto significa que los esfuerzos están concentrados en un gran volumen y no en un segmento de falla en particular.

Al calcular el deslizamiento sísmico promedio en SFVC para un periodo de

dos años de actividad registrada en la estación CBX, encontramos un deslizamiento sísmico de 0.030 mm/año ó aproximadamente un milímetro cada treinta años. Usando una muestra de sismos en la región por un periodo más largo (1934-1980) encontramos un valor de 0.028 mm/año, que dentro de los errores, es básicamente el mismo valor.

Pensamos, que en esta muestra de 46 años, al no incluir algunos eventos de magnitudes menores de cuatro, no afectaría mucho nuestros resultados. Sin embargo, estos valores dependen fuertemente del área sismogénica supuesta. Por ejemplo, si suponemos un área de un ancho de 5 km y una longitud de 58 km (que es equivalente a una falla de 10 km de ancho por 29 km de largo) el deslizamiento promedio se incrementa a 2 mm/año.

Darby y otros (1984), realizaron mediciones geodésicas sobre la Falla Vallecitos en el periodo de 1974 a 1982 sin encontrar evidencias de algún movimiento. Ellos atribuyen estos resultados a errores sistemáticos a el diseño de la red. Estos valores, muy similares del deslizamiento promedio, sugieren que la energía elástica acumulada en esta área está siendo liberada en una serie de sismos pequeños.

El sismo más grande que ha ocurrido durante este siglo en SFVC es el sismo de Guadalupe de 1949 (Agnew y otros, 1979). La magnitud M_s de este evento es de 5.6. Usando la relación $\log S = 1.02 M_s - 4.1$ (Kanamori y Anderson, 1975), entre M_s y el área de la falla S , podemos obtener una estimación del deslizamiento sísmico generado por este evento. El valor calculado fue de 0.24 mm distribuido en una área de 50.3 kilómetros cuadrados. Este deslizamiento sísmico puede ser acumulado en un periodo de nueve años, suponiendo un deslizamiento sísmico promedio constante de 0.03 mm/año.

Consecuentemente, es interesante se-

YEAR	LAT.	LONG.	LMAG
1934	32.083	116.666	4.0
1934	32.083	116.666	5.0
1935	32.333	116.466	4.0
1937	32.100	116.500	4.0
1938	32.083	116.666	4.0
1945	32.050	116.150	4.4
1946	32.600	116.316	4.8
1949	32.200	116.550	5.7
1949	32.200	116.550	5.1
1949	32.200	116.550	4.0
1949	32.200	116.550	4.0
1949	32.200	116.550	4.2
1950	32.166	116.416	4.5
1950	32.100	116.600	4.0
1951	32.116	116.083	4.2
1954	32.000	116.000	4.8
1957	32.200	116.200	4.4
1958	32.050	116.166	4.5
1959	32.000	116.100	4.3
1960	32.100	116.000	4.5
1961	32.016	116.316	4.2
1961	32.016	116.416	4.6
1963	32.000	116.000	4.2
1963	32.016	116.300	4.0
1966	32.100	116.250	4.5
1967	32.150	116.016	4.0
1967	32.133	116.183	3.3
1968	32.100	116.783	4.2
1977	32.133	116.167	4.2
1978	32.417	116.833	4.1
1979	32.200	116.233	4.0
1980	32.050	116.250	4.4

TABLA 1.- Sismos registrados en el SFVC desde 1934 a 1980.

ñalar que si ocurre un periodo sin actividad sísmica en SFVC, esto podría indicar el acumulamiento de energía en la región, la cual, eventualmente, podría ser liberada por medio de un sismo relativamente grande.

REFERENCIAS

- Agnew, D.C., M. Legg and C. Strand., (1979). "Earthquake History in San Diego, in Earthquake and other Perils of the San Diego Region". P.L. Abbot and W. J. Elliot, Editors, San Diego Association of Engineering Geologist San Diego, California, 123-138.
- Brune, J. N. (1968) "Seismic Moment Seismicity, and Rate of Slip Along Major Fault Zones". Journal of Geophysical Research, 73, pp. 777-784.
- Darvy, D., J. González and P. Lesage (1984). "Geodetic studies in Baja California, Mexico and the evolution of short-range-data from 1974 to 1982". Journal Geophysical Research, 89, pp. 2478-2490.
- Gastil, G., P. Richards and C. Edwin (1974). Reconnaissance geologic map of the state of Baja California, Mexico, Geological Society of America, Memoir, 140.
- Gastil, R., G., R. Kies and D. J. Melius (1979). "Active and -- potentially active faults: San Diego country and northernmost Baja California, in Earthquake and other Perils of the San Diego Region", P.L. Abbot and W. J. Elliot, San Diego Association of Engineering - Geologist, San Diego, California 47 -60.
- Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975). "Theoretical basis of some empirical relations in seismology". Bulletin of the Seismological Society of Amer. 65, pp. 1073-1095.
- Leeds, A (1979). The locations of the 1954 northern Baja California earthquakes. Master's Thesis, University of California, San Diego, California.
- Rebollar, C. J. and M. Reichie (1987). "Analysis of the Seismicity detected in 1982 -1984 the northern peninsular ranges of Baja California", Bulletin of the Seismological Society of America, 77, pp. 173-183.
- Rebollar, C. J. (1985). "Source parameters of the Encenada Bay earthquake swarm, Baja California, Mexico". Canadian Journal
- Shor, G. O. and E. Roberts (1985). "San Miguel Baja California Norte. earthquake of February 1956: Field report". Bulletin of Seismological Society of America, 48 pp, 101-116.
- Vidal, J. A., (1987) "Magnitud local y Parámetros de fuentes para Sismos de la Zona de Fallas de San Miguel -Vallecitos". Master's thesis, CICESE.