

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA EN LA REGIÓN FRONTERIZA DE AMBAS CALIFORNIAS

J. Frez C.¹ y V.M. Frías-Camacho²

¹Depto. de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

²Depto. de Geología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE
km. 107 Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada B.C., 22860, México.

RESUMEN

Este artículo complementa uno anterior (Frez y Frías-Camacho, 1998) que presenta mapas de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias a partir de la información obtenida del Catálogo del Sur de California (SCC) y del Catálogo del Noroeste de México (CNOM), más el resultado de una recopilación tomada de la literatura. Esta información se usa para representar, como superficie tridimensional, la distribución acumulada de la energía radiada en ondas sísmicas asociada a dicha sismicidad. El paso de discretización es de un minuto de grado en latitud y longitud y la energía sumada para cada punto es luego suavizada utilizando como función de peso una distribución gaussiana radialmente simétrica con una desviación estándar que permite una resolución mayor o menor de la suavización. Debido a la relación logarítmica entre energía y magnitud, la distribución de la energía asociada a todos los sismos que aparecen en el SCC indica sólo la energía acumulada que equivale a un sismo de magnitud mayor que alrededor de 6.0. Otras figuras muestran la energía radiada por la actividad microsísmica para varias ventanas de magnitud y tiempo. De esta manera, el concepto de "nivel de sismicidad" aparece cuantificado además de ser intuible. Se discuten las ventajas y desventajas de este tipo de representación.

INTRODUCCIÓN

La energía sísmica es un parámetro importante que se calcula generalmente de otros operacionalmente más simples como la magnitud y el momento sísmico. El lector puede beneficiarse con el artículo de Båth (1981) que resume las investigaciones relacionadas con definición, escalas y determinación de magnitud, además de temas relacionados, hasta fines de la década del 70. Para desarrollos posteriores puede consultarse, entre otros, el texto de Lay y Wallace (1995). La interpretación física de varias relaciones empíricas que relacionan a parámetros focales (magnitud, momento sísmico, energía y dimensiones de fallas) está expuesta en Kanamori y Anderson (1975).

Generalmente se supone que la relación entre la magnitud (M) y la energía que irradia la fuente en forma de ondas sísmicas (E_s) es del tipo

$$\log E_s = \beta M + \alpha \quad (1)$$

También se supone que M_s (magnitud a partir de datos de ondas superficiales) y M_L (magnitud local, es decir, la escala utilizada en el SCC y CNOM) son complementarias y equivalentes en cierto rango. La relación entre magnitud y E_s más ampliamente usada es la de Gutenberg y Richter (1956a)

$$\log E_s = 1.5 M_s + 11.8 \quad (2)$$

Para la magnitud local M_L los resultados de Gutenberg y Richter (1956b) y de Kanamori *et al.* (1993) producen un valor del coeficiente α más cercano a 2.0. Específicamente, Kanamori *et al.* (1993) obtienen

$$\log E_s = 1.96 M_L + 9.05 \quad (3)$$

En ambos casos, la energía resultante se calcula en ergs y los logaritmos tienen base 10. El término α es de menor importancia para nuestros propósitos ya que representa un factor de escala que podemos obviar si nuestro interés se centra en valores relativos de las energías. De acuerdo con los parámetros dados, una diferencia de una unidad de magnitud se traslada a una razón entre las energías correspondientes de $10^{1.5}$ o $10^{2.0}$ (32 o 100, respectivamente); para dos unidades de magnitud, resultan factores de 1000 o 10000, respectivamente. De este modo, la variable "energía" (irradiada a través de ondas sísmicas), además de tener un significado intuitivo importante, permite separar rangos de sismicidad. Por otro lado, es obvio también que el cálculo de E_s usando las ecuaciones (2) o (3) es aproximado y contiene un error importante que proviene tanto del error en la estimación de la magnitud (v. gr., ± 0.2) como de los coeficientes de dichas ecuaciones.

En un trabajo previo (Frez y Frías-Camacho, 1998), presentamos mapas anuales y acumulados de la sismicidad en la región fronteriza de ambas Californias (30.5°N - 32.5°N; 114.0°W - 118.5°W). En el presente artículo, utilizamos la variable E_s acumulada para representar gráficamente distintos niveles de sismicidad de la región de estudio (Figura 1) a partir de la misma información procesada en el anterior artículo. Esta representación no es comúnmente utilizada en la literatura, es atractiva por el significado físico de E_s y cuantifica las concentraciones de sismicidad en los mapas correspondientes cuando el número de los sismos representados es demasiado alto y, por lo tanto, el peso relativo de esas concentraciones no se puede inferir de los mapas de sismicidad. Su limitación se debe a que, debido a la relación logarítmica (3) entre M_L y E_s ,

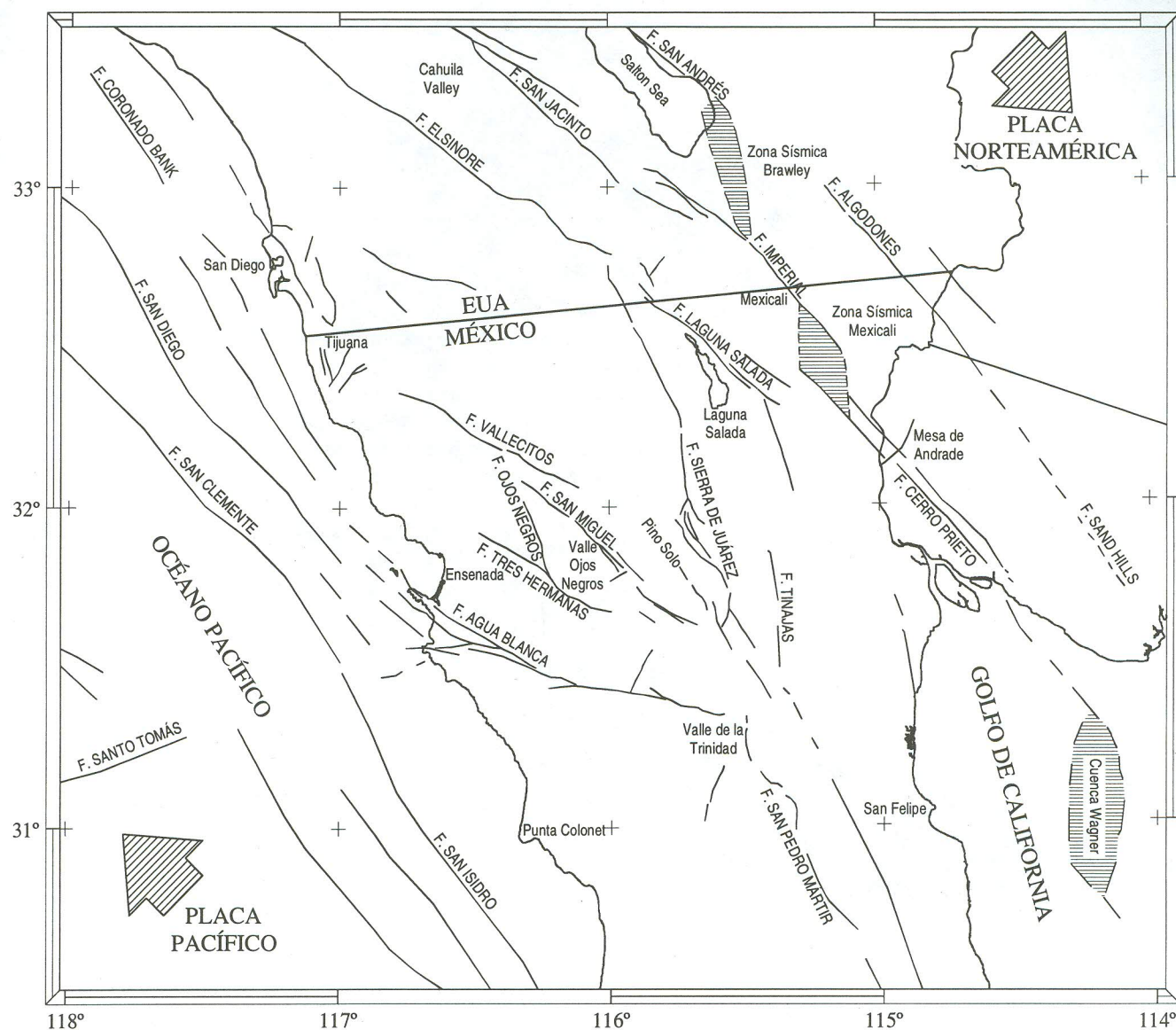


Figura 1. Marco tectónico del área de estudio (corregida de Frez y Frías-Camacho, 1998).

las diferencias en E_s que se pueden resolver visualmente de las superficies tridimensionales no sobrepasan un factor de mil ergs. Para consultas sobre el marco tectónico y sismotectónico regional, véase Suárez-Vidal *et al.* (1991) y Frez y González (1991), respectivamente, en resúmenes que cubren hasta alrededor de 1987. Los nombres geográficos y características tectónicas mencionadas en el texto aparecen en la Figura 1 y fueron también referidos en Frez y Frías-Camacho (1998).

METODOLOGÍA

El método utilizado consiste en sumar las energías sísmicas, obtenidas de las magnitudes según la ecuación (1) con $\alpha = 0$ y para cada punto de una cuadrícula con un paso de un minuto de grado de longitud y latitud. Las coordenadas de los epicentros son redondeados al minuto más cercano de cada coordenada.

Ya que nuestro propósito es mostrar la energía total irradiada, no hemos eliminado las réplicas de los sismos principales. La matriz obtenida se sujeta enseguida a un proceso de suavización, que es necesario si se toma en cuenta el error de la localización epicentral y que las fuentes sísmicas no son puntuales sino discretas. La proyección horizontal del área de falla cubre desde unas decenas de metros a unas pocas decenas de kilómetros para los sismos que incluimos en las siguientes figuras. La suavización que hemos elegido es un promedio ponderado cuyos pesos resultan de una distribución gaussiana centrada en el epicentro de cada sismo y con una desviación estándar que determina la resolución de la suavización. Los epicentros calculados contienen errores del orden de 3' a 5' en los mejores casos, y pueden llegar a 7' o 10' en los peores. El uso de valores de la desviación estándar entre 3' y 7' ofrece características numéricas deseables, es decir, ni las superficies resultantes suavizan demasiado la distribución de energía haciendo perder

Las características de los dos catálogos que forman la mayor parte de la información procesada, además de detalles y nombres relacionados con la distribución de la sismicidad en la región de interés pueden consultarse en Frez y Frías-Camacho (1998).

MAPAS DE ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA

La Figura 2 muestra la energía acumulada, en las unidades relativas a definirse más abajo, de toda la sismicidad de la región ocurrida entre 1905 y 1998. Para ello, se tomó el catálogo SCC para $M_L \geq 2.3$ y se complementó o corrigió con el catálogo de sismos con $M \geq 5.0$ (Figura 3 de Frez y Frías-Camacho, 1998). Este catálogo es, a su vez, una puesta al día del utilizado en Frez y González (1991) que contiene diversas correcciones y agregados tomados de la literatura por ejemplo, el trabajo de Anderson y Bodin (1987) resume la actividad sísmica del Valle Mexicali-Imperial; Leeds (1979) presenta redeterminaciones de sismos importantes, en particular de los que ocurrieron en la Falla San Miguel en 1954 y 1956; otras revisiones de parámetros de focos sísmicos (incluyendo magnitud) o compilaciones son las de Doser y Kanamori (1986), Hutton y Boore (1987), Doser (1990), Ellsworth (1990), Hutton y Jones (1993), Knopoff *et al.* (1996), entre otras. No fue incluido en el cálculo el sismo de 1903, cuyo epicentro ha sido ubicado aproximadamente en 32.5°N y 115.5°W (ver por ejemplo Abe y Noguchi, 1983), que tiene magnitudes asignadas entre 7.0 y 7.5 y que aparece en la Figura 2 de Frez y Frías-Camacho (1998) pues, Anderson y Bodin (1987) indican que su localización es demasiado incierta, aunque probablemente ocurrió al oeste de la Falla Cerro Prieto y cerca de la cabeza del Golfo.

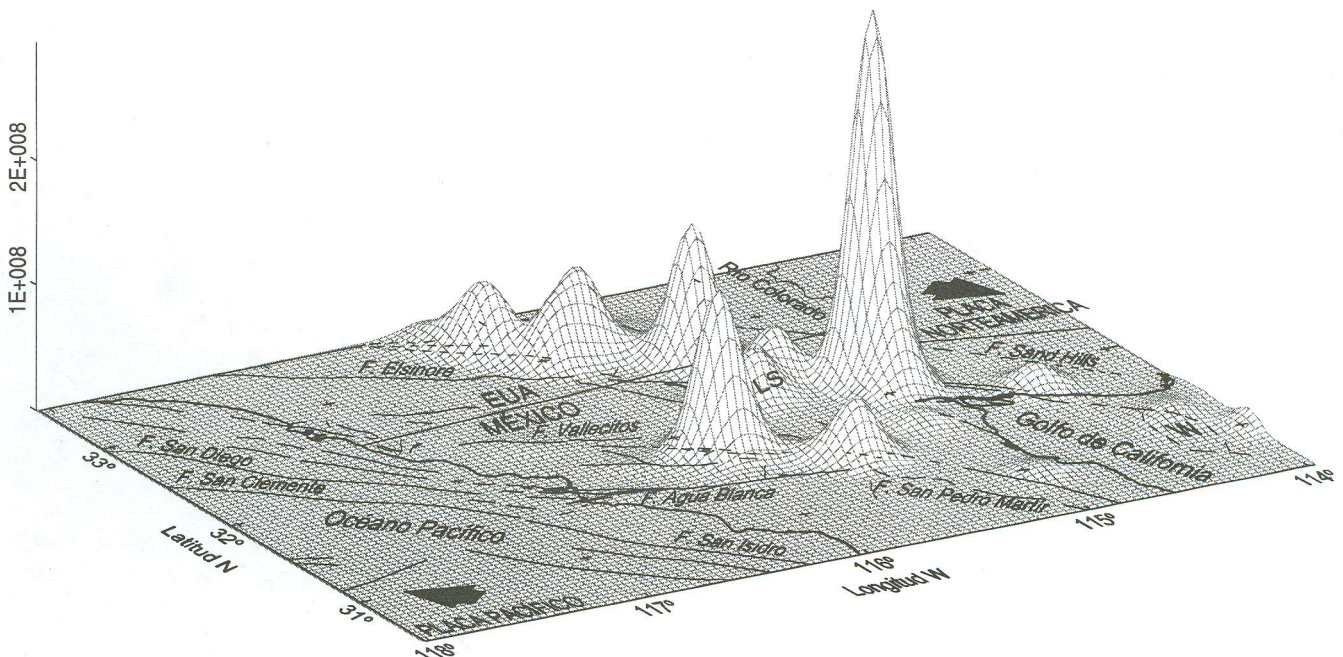


Figura 2. Energía sísmica acumulada entre 1905 y 1998 y que incluye todos los sismos del Catálogo del Sur de California además de resultados de una recopilación bibliográfica. La región es la misma que la ilustrada en la Figura 1. Todos los mapas presentados calculan la energía en pasos discretos de 1° de grado. Las líneas punteadas aquí y en las figuras restantes indican proyección en la superficie plana de la Tierra. El punto de mira tiene una inclinación ($\hat{i}$) de 20° desde la superficie de la Tierra y un acimut ($\hat{a}$) de 330° desde el eje de longitud (positivo a la derecha) y utilizando la regla de la mano derecha. La desviación estándar (σ) utilizada en la suavización es 5°. W: Cuenca Wagner; LS: Laguna Salada.

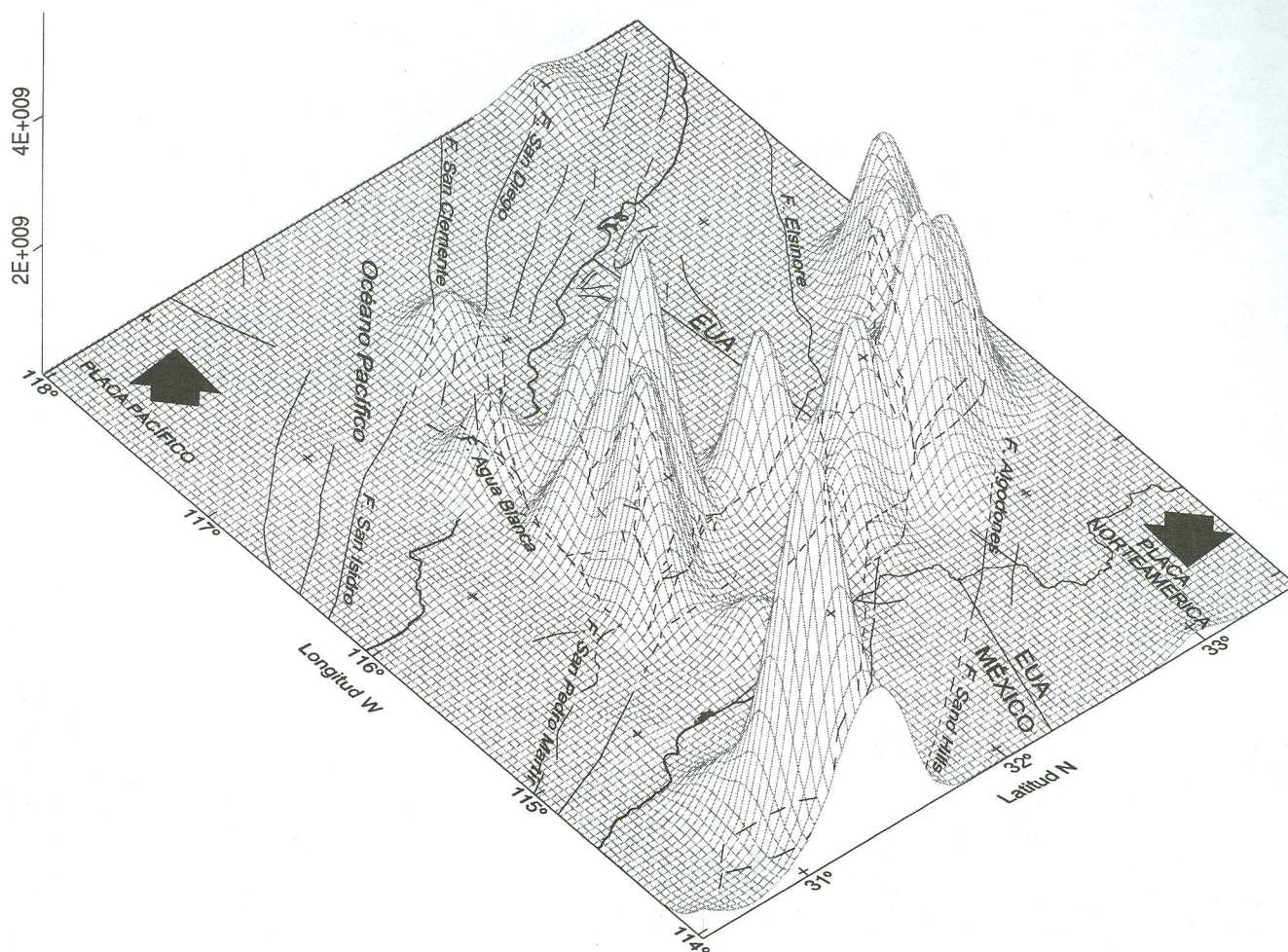


Figura 3. Energía sísmica acumulada entre 1905 y 1998 para $5.9 \geq M_L \geq 4.5$ utilizando el Catálogo del Sur de California además de una recopilación bibliográfica. La región es la misma que en la Figura 1. Se utilizaron los siguientes valores de parámetros: $\hat{\nu} = 45^\circ$, $\hat{\alpha} = 50^\circ$,

Al hacer esta figura hemos probado valores numéricos del coeficiente β de 1.5 y 1.96, según las ecuaciones (2) y (3). La mayor amplificación de escala que produce el valor 1.96 hace que las energías correspondientes a magnitudes cercanas a 6.0 desaparezcan en la representación gráfica. Como el propósito de esta figura es enfatizar la energía irradiada por sismos potencialmente destructivos, hemos preferido utilizar el coeficiente 1.5 para beneficio de una mejor delineación de las áreas correspondientes. El resto de las figuras de este trabajo están realizadas con el coeficiente 1.96. Esta consideración y el uso de $\alpha = 0$ define las unidades relativas de las figuras que muestran a E_s . El lector puede comparar las escalas verticales de la Figura 2 y de la figura siguiente, notando que el rango de magnitudes, de 6.0 a 7.1 que queremos enfatizar en la Figura 2, corresponde a uno de E_s relativas igual a $[1.0 \times 10^9 - 4.5 \times 10^{10}]$ y $[5.8 \times 10^{11} - 8.2 \times 10^{13}]$ con $\alpha = 0$ según las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

La distribución espacial de la suma de E_s mostrada en la Figura 2 señala que los sistemas de falla que más han irradiado energía sísmica son los de Cerro Prieto/Imperial/San Jacinto y San Miguel, siendo el sismo de Laguna Salada de 1934 el más

importante que se ubica entre ambos sistemas. El extremo sur del primer sistema está señalado por la energía disipada en la Cuenca Wagner y que resulta principalmente del enjambre de 1969, con alrededor de 36 sismos con $M \geq 5.0$. El sismo de mayor magnitud (7.1) registrado en este periodo ocurrió también en 1934 y su epicentro es ubicado cerca del epicentro del sismo Victoria de 1980 (Anderson y Bodin, 1987). Es evidente que la ciudad de Mexicali es la más propensa a sufrir los efectos de un sismo destructivo, si suponemos una "semiperiodicidad" en la ocurrencia de éstos. En los alrededores de Mexicali ocurrieron dos sismos destructivos en 1934 y uno en cada uno de los años siguientes: 1915, 1940, 1979, 1980 y 1987. A los sismos anteriores deben agregarse algunos de menor magnitud, incluyendo enjambres que han sido sentidos por la población.

La energía asociada a sismos con $5.9 \geq M_L \geq 4.5$ ocurridos entre 1906 y 1998 se ilustra en la Figura 3. La relativa abundancia de estos sismos con respecto a los de $M_L \geq 6.0$ hace que su distribución se acerque a la microsísmica. La Figura 3 señala la preponderancia de la actividad de la Cuenca Wagner en la distribución de energía y, además de la actividad de los dos sistemas de fallas principales, aparece la asociada al Borde

Continental, la que ocurre entre el extremo NW de la Falla Cerro Prieto y la de la parte central de la Falla San Miguel.

La Figura 4 muestra la energía liberada por la actividad microsísmica entre 1975 y 1998 (catálogo SCC). El año inicial se escogió para lograr un catálogo relativamente homogéneo en cubrimiento y precisión para $3.5 \geq M_L \geq 2.3$. La preponderancia de la dirección NW-SE en los alineamientos marcados es clara, aunque también hay máximos en las zonas sísmicas de Mexicali y Brawley (efecto de réplicas y enjambres), en la zona de réplicas del sismo de Oceanside de 1986 y en la región de Pino Solo. Esta última región presenta sismos de $M_L \geq 5.0$ en 1978, 1985 y 1988. La Falla Elsinore tiene poca microsismicidad pero aparece claramente delineada. Además, están sugeridas algunas alineaciones en el Borde Continental, incluyendo la conexión de la continuación al NW del sistema San Miguel con la zona de réplicas del sismo de Oceanside. Para un sismo principal de sólo $M_L = 5.4$, esta última actividad ha producido una gran liberación de energía y ha persistido por varios años (Frez y Frías-Camacho, 1998).

Las Figura 5 utiliza el catálogo CNOM (1983-1998; $3.5 \geq M_L \geq 2.0$); el propósito de esta figura es aprovechar el buen cubrimiento de este catálogo en la parte sur de la región de

interés. La figura sugiere alineaciones en dirección NW-SE, muestra la preponderancia de la sismicidad asociada a la Zona Sísmica de Mexicali, a la región de Pino Solo y al vértice de contacto entre las fallas Sierra Juárez, San Miguel y la aparentemente inactiva Agua Blanca. En este mapa se distingue la actividad asociada a la Cuenca Wagner y a la extensión NW de las fallas transformes que delimitan la Cuenca Delfín.

El detalle de E_s para la actividad microsísmica ($3.5 \geq M_L \geq 2.3$; 1975-1998) del cuadrángulo $31.00^\circ\text{N} - 32.50^\circ\text{N}$ y $116.50^\circ\text{W} - 115.00^\circ\text{W}$ que se ilustra en la Figura 6 (catálogo SCC) tiene características de interés sismotectónico. El lector puede auxiliarse con las Figuras 5 y 7 de Frez y Frías-Camacho (1998) para ubicar mejor los alineamientos y cúmulos de sismicidad y utilizar la representación gráfica de la suma de E_s para discriminar la relativa importancia de alineamientos y cúmulos de sismicidad. El máximo de la distribución que se observa en el extremo derecho de la Figura 6 corresponde a la actividad de la Zona Sísmica Mexicali, junto con aquella que ha ocurrido inmediatamente afuera de su flanco occidental. El segundo máximo de importancia, un poco al NW del centro de la figura, se asocia a la región de Pino Solo. La Falla San Miguel no aparece como un alineamiento, al contrario de la forma como está indicada por la actividad macrosísmica en la Figura 2. Una

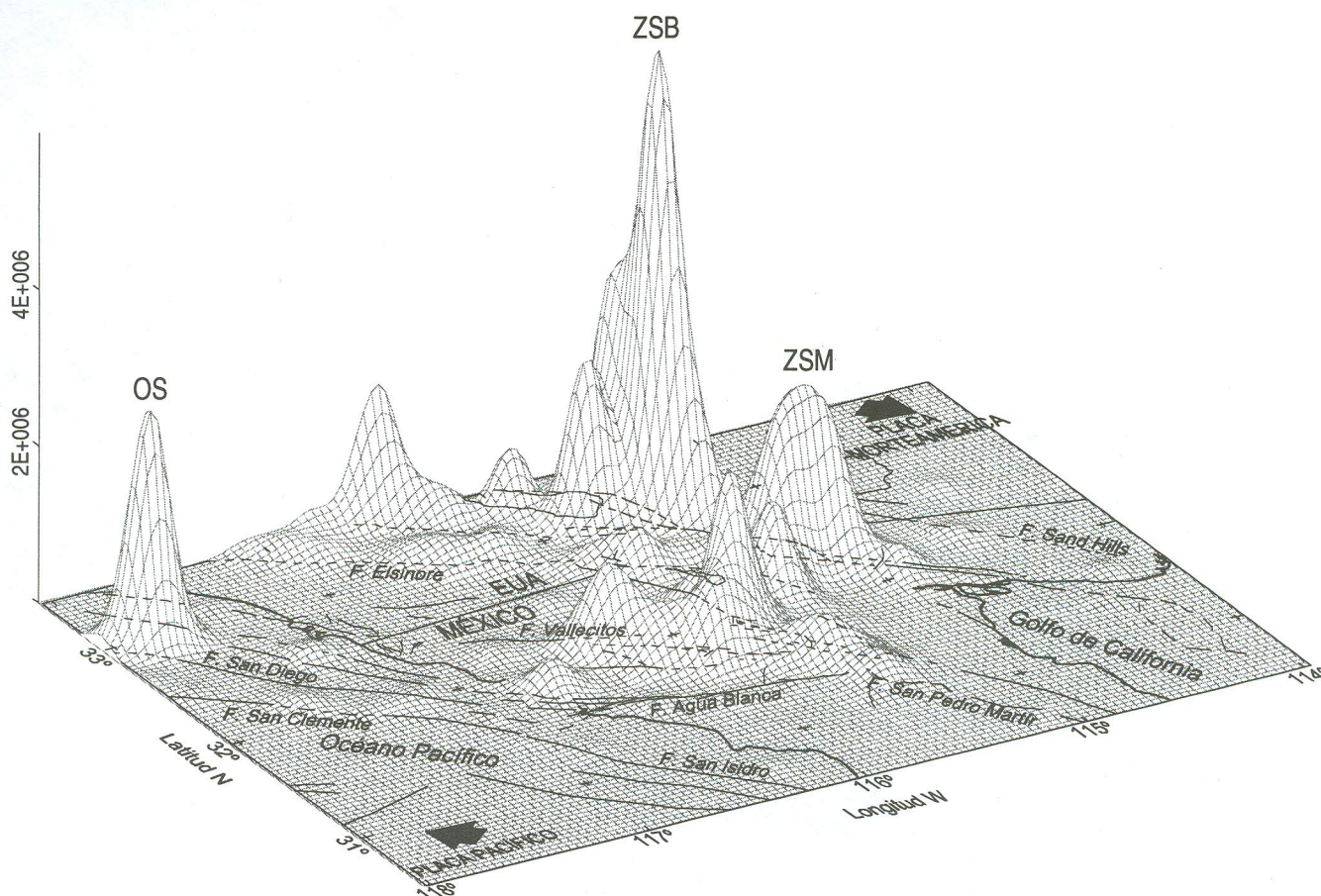


Figura 4. Energía sísmica acumulada entre 1975 y 1998 para $3.5 \geq M_L \geq 2.3$ utilizando el Catálogo del Sur de California. Los parámetros son: $\hat{i} = 25^\circ$, $\hat{a} = 330^\circ$, $\sigma = 4'$. OS: Oceanside; SZB: Zona Sísmica Brawley; ZSM: Zona Sísmica Mexicali.

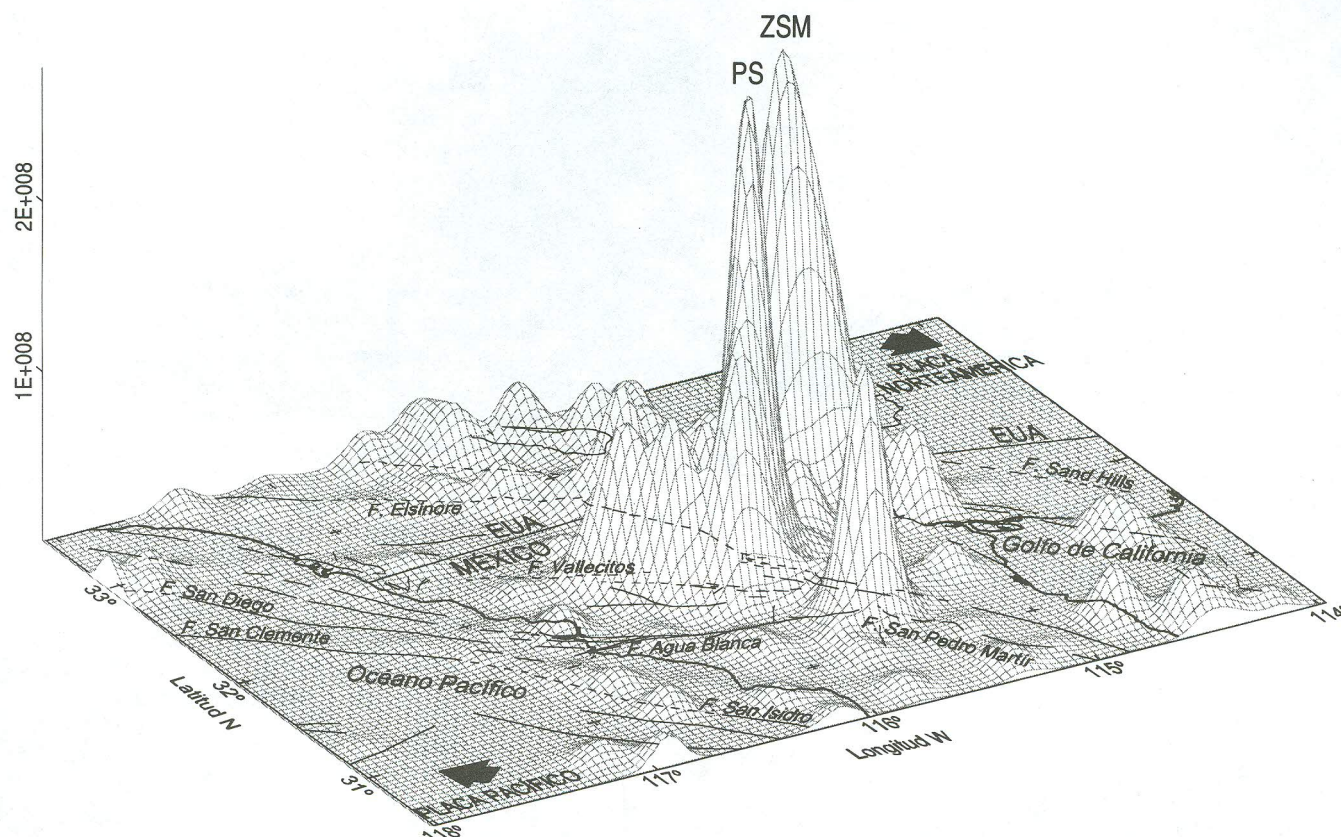


Figura 5. Energía sísmica acumulada entre 1983 y 1998 para $3.5 \geq M_L \geq 2.0$ del Catálogo del Noroeste de México. Se utilizaron los siguientes valores de parámetros: $\hat{i} = 25^\circ$, $\hat{a} = 330^\circ$, $\sigma = 4'$. ZSM: Zona Sísmica Mexicali; PS: Pino Solo.

alta concentración de energía que aparece al NW corresponde al vértice formado por las fallas Ojos Negros y San Miguel, la que continúa a un menor nivel hacia el SE, dentro del Valle Ojos Negros. Aún notables son las siguientes concentraciones: una que parece continuarse desde la de Pino Solo hasta sobrepasar la Falla San Miguel; otra que se ubica en el vértice formado por las fallas San Miguel y Sierra Juárez; otra, más al sur, en el extremo norte de la Falla San Pedro Mártir; otros dos cúmulos se ubican en la parte central de la Falla Sierra Juárez y al sur de Laguna Salada. La figura sugiere la presencia de una sismicidad de conexión entre los dos sistemas de fallas principales de la región, uniendo la actividad del extremo NW de la Falla Cerro Prieto con la parte central de la Falla San Miguel. La fuerte actividad del sector de Pino Solo que aparece en forma de un alineamiento NW-SE en 1985 (Frez y Frías-Camacho, 1998) no tiene una clara asociación con alguna falla cartografiada.

DISCUSIÓN

Los mapas epicentrales de sismicidad tienen el defecto de que en ellos es difícil comparar cuantitativamente el nivel de sismicidad cuando se concentran muchos sismos en áreas relativamente pequeñas, ya sea en cúmulos o en alineamientos. Un propósito de este trabajo es hacer esta comparación mediante

la variable "energía sísmica acumulada", que se calcula en cada punto de una malla horizontal homogénea. Este procedimiento no se encuentra comúnmente en la literatura a pesar de sus ventajas. El amplio rango de valores numéricos de E_s que resulta al calcular 10^{M_L} permite explorar las características de diversos niveles de sismicidad aunque ello tropieza con la dificultad de contar con estadísticas completas de la ocurrencia de sismos, incluyendo de microsismicidad. En el caso de nuestra región de estudio, la información de la sismicidad instrumental, histórica y de estudios paleosísmicos (ver por ejemplo Hirabashi *et al.*, 1996) es muy limitada para sismos moderados o de mayor magnitud. Por otro lado, la existencia de sismicidad muy esporádica hace dudar que contemos con una distribución representativa de la microsismicidad regional. Un ejemplo lo constituye la actividad que ocurrió al sur de Laguna Salada entre fines de 1975 y comienzos de 1976 en un sitio carente de actividad significativa en los 25 años muestreados con precisión por el SCC. Aún con estas limitaciones, es posible investigar si hay un quiebre en la autosimilaridad de la distribución de hipocentros utilizando técnicas gráficas (como la utilizada en este artículo) y analíticas. Menos ambicioso pero aún importante es determinar el historial de la microsismicidad utilizando la distribución en la superficie de la tierra de la suma de E_s .

El momento sísmico M_0 es una variable que se utiliza también para medir el "tamaño" de un temblor a partir de un

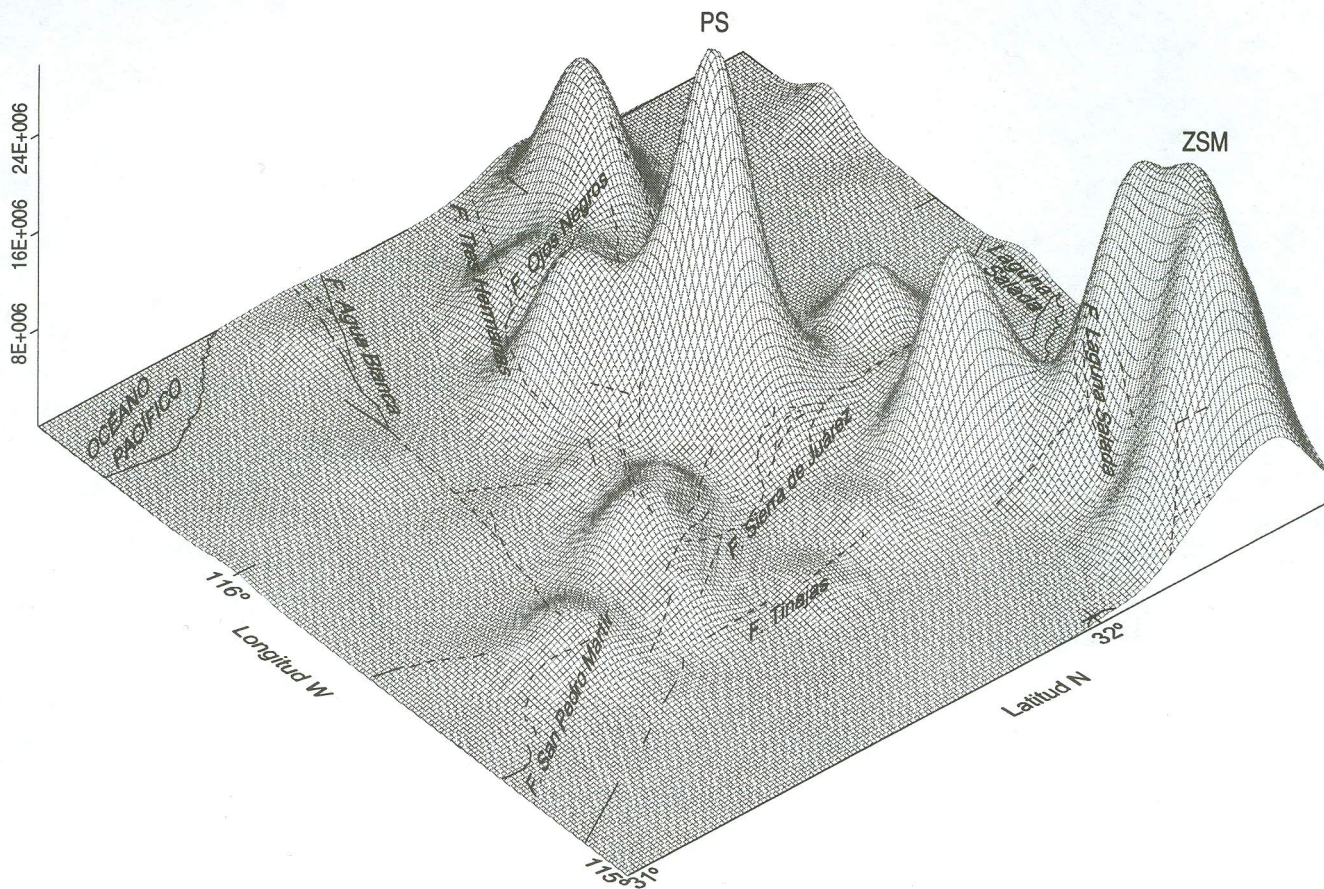


Figura 6. Detalle que resulta de una sección de la Figura 4. La región cubierta es la que tiene la más alta sismicidad en el norte de Baja California, junto con la del Valle Mexicali-Imperial. Se utilizaron los siguientes valores de parámetros: $\hat{\mathbf{i}} = 39^\circ$, $\hat{\mathbf{a}} = 50^\circ$, $\sigma = 3'$. ZSM: Zona Sísmica Mexicali; PS: Pino Solo.

modelo de la fuente sísmica. Sin embargo, la relación entre M_s y M_0 (Lay y Wallace, 1995)

$$\log M_\rho = 1.5 M_\varsigma + 16.1, \quad (4)$$

tiene la misma forma matemática que la ecuación (1) y, por lo tanto, la suma de M_0 y la de E_s son casi equivalentes como herramientas de análisis.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del USGS, CalTech y SCEC, en sus laboratorios ubicados en Pasadena, California, por permitirnos utilizar sus bases de datos, específicamente a L. Jones, J. Mori y K. Hafner. Del mismo modo, apreciamos la ayuda y el buen ánimo de F. Farfán, I. Méndez y L. Orozco para informarnos sobre el uso de los datos del CNOM. Este trabajo constituye una etapa de una investigación financiada por CONACYT (25309-T) y es también el resultado de una vieja insistencia de L. Delgado. Los comentarios de A. Nava, J. González y de los revisores fueron de gran ayuda. En la edición del manuscrito, cooperó entusiasta y pacientemente R. Eaton.

REFERENCIAS

- Abbe, K. y S. Noguchi, 1983, Revision of magnitudes of large shallow earthquakes, 1897-1912: Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 33, pp. 1-11.
- Anderson, J. G. y P. Bodin, 1987, Earthquake occurrence models and historical seismicity in the Mexicali-Imperial Valley: Seismological Society of America Bulletin, v. 77, p. 562-578.
- Báth, M., 1981, Earthquake magnitude - recent research and current trends: Earth-Science Review, vol. 17, pp. 315-398.
- Doser, D.I. and H. Kanamori, 1986, Depth of seismicity in the Imperial Valley region (1977-1983) and its relationship to heat flow, crustal structure, and the October 15, 1979, earthquake: Journal of Geophysical Research, vol. 91, pp. 675-688.
- Doser, D.I., 1990, Source characteristics of earthquakes along the southern San Jacinto and Imperial fault zones (1937 to 1954): Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 80, pp. 1099-1117.
- Ellsworth, E., 1990, Earthquake history, 1769-1989: en The San Andreas Fault System, California: U. S. Geological Survey Professional Paper 1515, editado por R. E. Wallace, pp. 153-187, Washington, EEUU.

- Frez, J. y J. J. González, 1991, Crustal structure and seismotectonic of northern Baja California: cap. 15 de American Association of Petroleum Geologists Memoir #47, The Gulf and Peninsular Province of the Californias, editado por B. Simoneit y J. P. Dauphin, pp. 261-283, Tulsa, Oklahoma, EEUU.
- Frez, J. y V.M. Frías-Camacho, 1998, Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias: GEOS, Vol. 18, No. 2, p. 112-130.
- Gutenberg, B. y C.F. Richter, 1956a, Magnitude and energy of earthquakes: Annali di Geofisica, vol. 9, pp. 1-15.
- Gutenberg, B. y C.F. Richter, 1956b, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 46, pp. 105-145.
- Hirabayashi, C.K., T.K. Rockwell, S.G. Wesnousky, M.W. Stirling y F. Suárez-Vidal, 1996, A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos Fault, Baja California, Mexico: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 86, pp. 1170-1183.
- Hutton, L.K. y D. M. Boore, 1987, The M_L scale in Southern California: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 77, pp. 2074-2094.
- Hutton, L.K. y L.M. Jones, 1993, Local magnitudes and apparent variations in seismicity rates in Southern California: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 83, pp. 313-329.
- Kanamori, H. y D.L. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 65, pp. 1073-1095.
- Kanamori, H., J. Mori, E. Haukson, T. Heaton, L.K. Hutton, and L. Jones, 1993, Determination of earthquake energy release and M_L using Terrascope: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 83, pp. 330-346.
- Knopoff, L., 1996, Increase long-range intermediate-magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California: Journal of Geophysical Research, Vol. 101, pp. 5779-5796.
- Lay, T. y T.C. Wallace, 1995, Modern Global Seismology, Academic Press, EEUU, 521 pp.
- Leeds, A.L., 1979, The relocations of $m_b 5.0$ northern Baja California earthquakes using S-P times: M. S. Thesis, University of California, San Diego, La Jolla, California, EUA, 101 pp.
- Shor, R. R. y E. Roberts, 1958, San Miguel Baja California Norte earthquakes of February 1956, a field report: Seismological Society of America Bulletin, vol. 48, pp. 101-116.
- Suárez-Vidal, F., R. Armijo, G. Morgan, P. Bodin y R. G. Gastil, 1991, Framework of recent and active faulting in Northern Baja California: Cap. 15 de American Association Of Petroleum Geologists Memoir #47, The Gulf and Peninsular Province of the Californias, editado por B. Simoneit y J. P. Dauphin, pp. 285-300, Tulsa, Oklahoma, EEUU.