

MAPAS ANUALES DE SISMICIDAD PARA LA REGIÓN FRONTERIZA DE AMBAS CALIFORNIAS

J. Frez C.¹ y V.M. Frías-Camacho²

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

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

RESUMEN

En nuestro trabajo de docencia e investigación, usamos rutinariamente mapas consecutivos, anuales o semestrales, de la microsismicidad de la región fronteriza de ambas Californias y que ha sido registrada por más de 20 años. Estos mapas anuales se presentan aquí con la intención de que sean útiles a quienes desean visualizar la sismicidad de una región tectónicamente importante. La información proviene del Catálogo del Sur de California (SCC) y del Catálogo del Noroeste de México (CNOM) e incluye la sismicidad entre las latitudes 30.5° S y 33.5° S y longitudes 114.0° W y 118.0° W, desde julio de 1973 (SCC) y enero de 1983 (CNOM), hasta abril de 1998.

Se hace una descripción de las redes regionales de estaciones sísmicas, de los catálogos correspondientes y de las características de la sismicidad que se cartografía. También, se enfatiza en las limitaciones de los catálogos originales y de la información que se ilustra y se agrega algunas conclusiones acerca del peligro y riesgo sísmico de las ciudades más importantes del norte de Baja California.

INTRODUCCIÓN

Los mapas de sismicidad para períodos consecutivos y relativamente cortos de tiempo compactan la información original e ilustran la distribución de la actividad sísmica en las coordenadas geográficas, profundidad, tiempo y magnitud. Estos mapas son una herramienta rutinaria para el científico de la Tierra y son de fácil factura, pues la información está actualmente disponible electrónicamente y su visualización es estándar gracias al uso de programas de computación. Debido a ello, los boletines que incluían mapas de sismicidad han tendido a desaparecer o a tener un formato reducido. En el CICESE mantenemos una actualización de mapas anuales y semestrales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias, tanto para sugerir problemas y soluciones en investigación y docencia, como para divulgación.

Para los propósitos de este artículo, la región fronteriza se define en forma relativamente arbitraria entre las latitudes 30.5° S y 33.5° S y las longitudes 114.0° W y 118.0° W. En esta región, se observa la actividad de parte del sistema transformante San Andrés-Golfo de California (Figura 1). Este sistema marca el límite entre las placas Pacífico y Norteamérica e incluye fallas de segundo orden que trasladan una parte menor del movimiento relativo entre las placas desde la Depresión del Salton hacia el Borde Continental en el Océano Pacífico. Las tres provincias geológicas más importantes de la región son: Borde Continental, Cordillera Peninsular y Depresión del Salton. El Borde Continental corresponde a la plataforma continental del Océano Pacífico y a un sector pequeño al este de la costa correspondiente. La Cordillera Peninsular está formada por las sierras que se levantan al oriente de la costa del Océano Pacífico hasta una

altura de 1500 a 1700 m sobre el nivel del mar. La Depresión del Salton se interpreta como una continuación estructural del Golfo de California en el continente y se sigue hasta el Mar Salton, en California; su altitud es cercana y aún menor que la del nivel del mar. El Valle Mexicali-Imperial se encuentra en el centro de la Depresión del Salton. Una revisión del conocimiento del marco tectónico regional se puede encontrar en Suárez *et al.* (1991).

En este trabajo agregamos comentarios y antecedentes que, esperamos, ayuden a valorar los mapas, principalmente en cuanto a la sismicidad del norte de Baja California. Se entrega información complementaria consistente en el marco tectónico y la sismicidad con magnitud (M) mayor que 5.0, pero no se pretende presentar una descripción exhaustiva de la sismicidad del área de estudio. Una revisión de este tipo hasta 1987 está incluida en Frez y González (1991), de tal forma que el presente artículo ayudará a poner al día la información ahí publicada.

CATÁLOGOS DE SISMICIDAD REGIONAL

Los datos que se grafican provienen de dos catálogos regionales de sismos: el Catálogo del Sur de California (SCC) y el Catálogo del Noroeste de México (CNOM). Éstos resultan, a su vez, de las correspondientes redes regionales, la Red Sismológica del Sur de California (SCSN), operada conjuntamente por el United States Geological Survey (USGS) y el California Technological Institute (CalTech), y la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM), operada por el CICESE. Las estaciones comprendidas en la región de estudio se muestran en la Figura 2. La Figura 1, además del marco

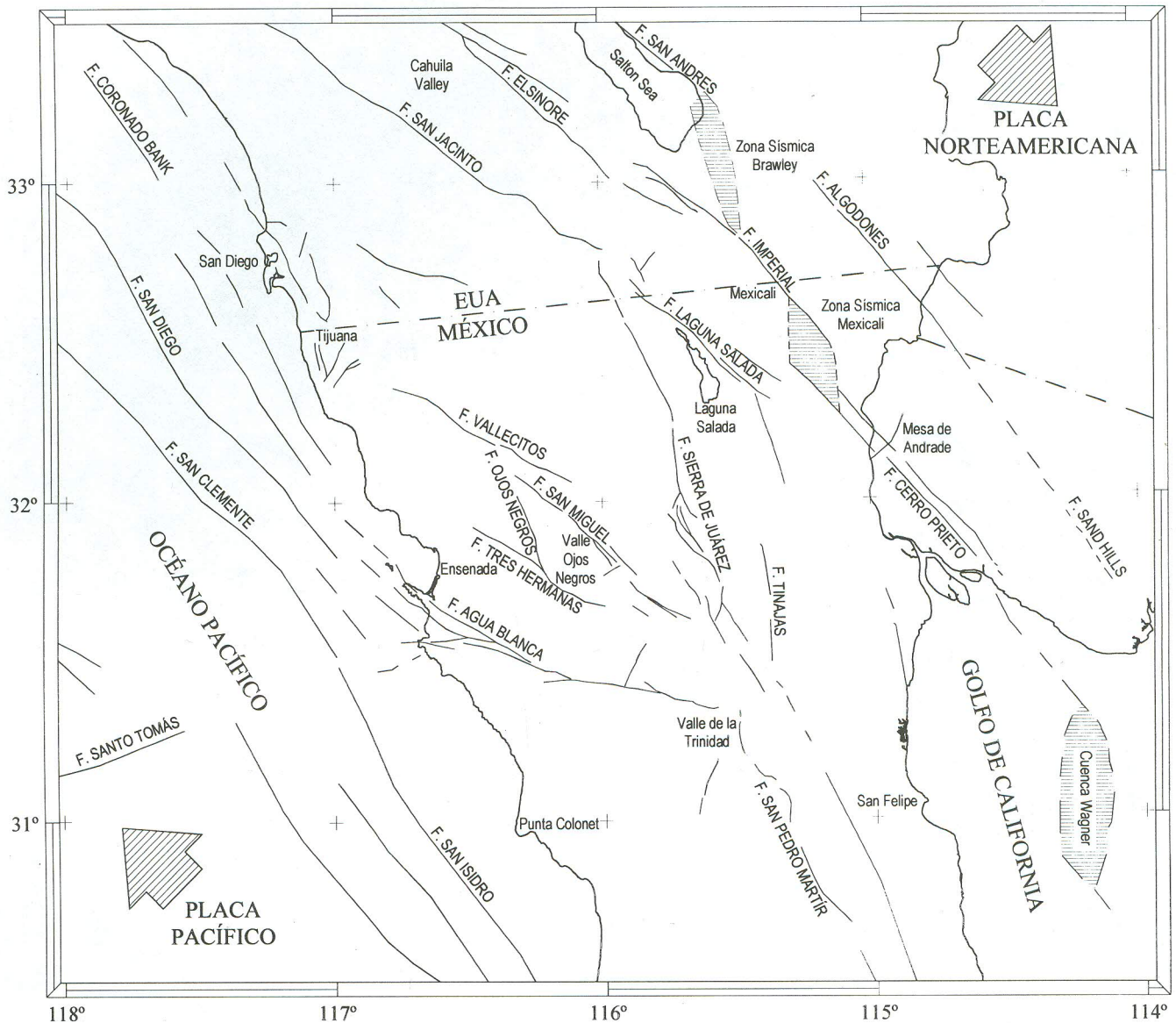


Figura 1. Marco tectónico y nombres geográficos mencionados en el texto; basada en Frez y González (1991). Para los nombres de las estaciones sismológicas de RESNOM, vea la Figura 2.

tectónico, muestra la localización de los nombres geográficos mencionados en este artículo.

El catálogo SCC contiene hipocentros que datan de 1932. La red SCSN ha tenido diversas ampliaciones siendo, la realizada en 1973, quizás, la más importante. El número de estaciones aumentó de 39 que tenía a comienzos de 1973, a 241 en 1986. Actualmente, la red procesa la información de alrededor de 400 estaciones. La mayor parte de estas estaciones graban sólo la componente vertical del movimiento sísmico. Referencias que describen el SCC y la SCSN son Nordquist (1964), Hileman *et al.* (1973), Hill *et al.* (1975), Johnson (1979), Hutton *et al.* (1985) y boletines de la red, como en Norris *et al.* (1986). En este artículo, nos concentraremos sólo en sismos con hipocentros determinados a partir del segundo semestre de 1973. La magnitud mínima a partir de la cual el catálogo es completo varía entre 2.1 y 2.5 en el sur de California.

El registro de sismos en el norte de Baja California se inició a partir de algunas de las estaciones de la Red del Golfo de California que operaron entre 1969 y 1978 (Lomnitz *et al.*, 1970; Brune *et al.*, 1976). Desde 1976, se instalaron estaciones para registrar eventos que ocurrían entre los extremos de las fallas Cerro Prieto e Imperial. La extensión de esta red constituyó RESNOM, que comenzó a operar en diciembre de 1978. Los mapas originados por la información del CNOM que aquí presentamos comienzan en 1982 debido a que los epicentros del catálogo cubren en forma demasiado parcial la región de estudio para los años anteriores. El punto crítico en el funcionamiento de RESNOM es la estación repetidora que se encuentra en San Pedro Mártir (estación SPX), que recibe la información que proviene de las estaciones ubicadas en la Depresión del Salton y la transmite al laboratorio central que se ubica en Ensenada. Las instalaciones de San Pedro Mártir se

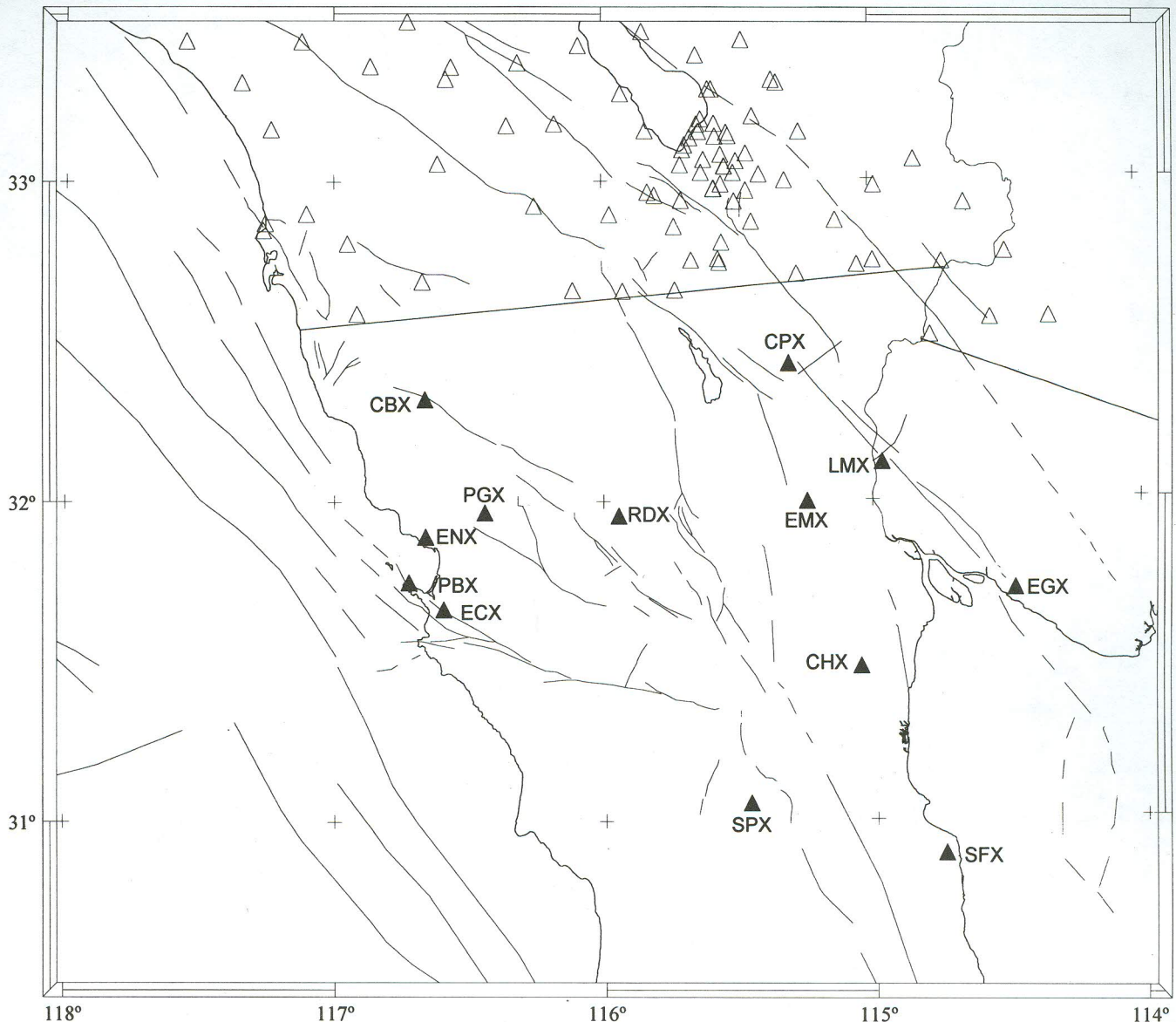


Figura 2. Estaciones sismológicas de la Red del Sur de California (SCSN) y de la Red Noroeste de México (RESNOM); la estación PPX de RESNOM, que está en Sonora, no alcanza a aparecer en el mapa. No todas las estaciones han funcionado al mismo tiempo.

han dañado varias veces por la ocurrencia de tormentas eléctricas por lo que, en varios intervalos de la historia de la Red, la información procesada consiste sólo de las estaciones localizadas en la costa y en la Cordillera Peninsular. En consecuencia, la homogeneidad del CNOM es variable, tanto temporal como espacialmente. La magnitud mínima para formar un subcatálogo homogéneo puede ser de 2.1 para sismos que ocurren en el centro de la red y de 2.5 en los extremos de la red durante un período tan largo como el de 1987 a 1992. Los epicentros determinados para lugares como Mesa de Andrade, al sur del Valle de Mexicali, pueden ser muy inexactos ya que no se pudo integrar la información de las estaciones ubicadas en la Depresión del Salton. La historia de RESNOM y una descripción de sus instalaciones puede encontrarse en Medina y Duarte (1979), Hinojosa (1988) e Hinojosa (1990). Sus boletines, que listan la sismicidad más importante e incluyen mapas de sismicidad, se

publican regularmente en GEOS. Ambas redes regionales tienen una fluida comunicación e intercambio de datos por vía electrónica, particularmente para los sismos que hayan sido sentidos por la población.

La magnitud umbral mínima para un subcatálogo homogéneo obtenido del SCC y para las regiones ubicadas cerca de la frontera internacional varía entre 2.1 y 2.5; este parámetro sube a 3.0 para latitudes cercanas a 30.0° S. Sin embargo, el número de sismos con $M_L > 3.0$ es relativamente pequeño. Dado ésto y la fuerte inhomogeneidad del CNOM, no es posible presentar mapas desde 1973 (SCC) o 1982 (CNOM) que sean completos desde una magnitud umbral mínima y que tengan a la vez el número suficiente de determinaciones epicentrales como para apreciar características de la actividad microsísmica. Como un compromiso entre ambos propósitos, hemos optado por mapas

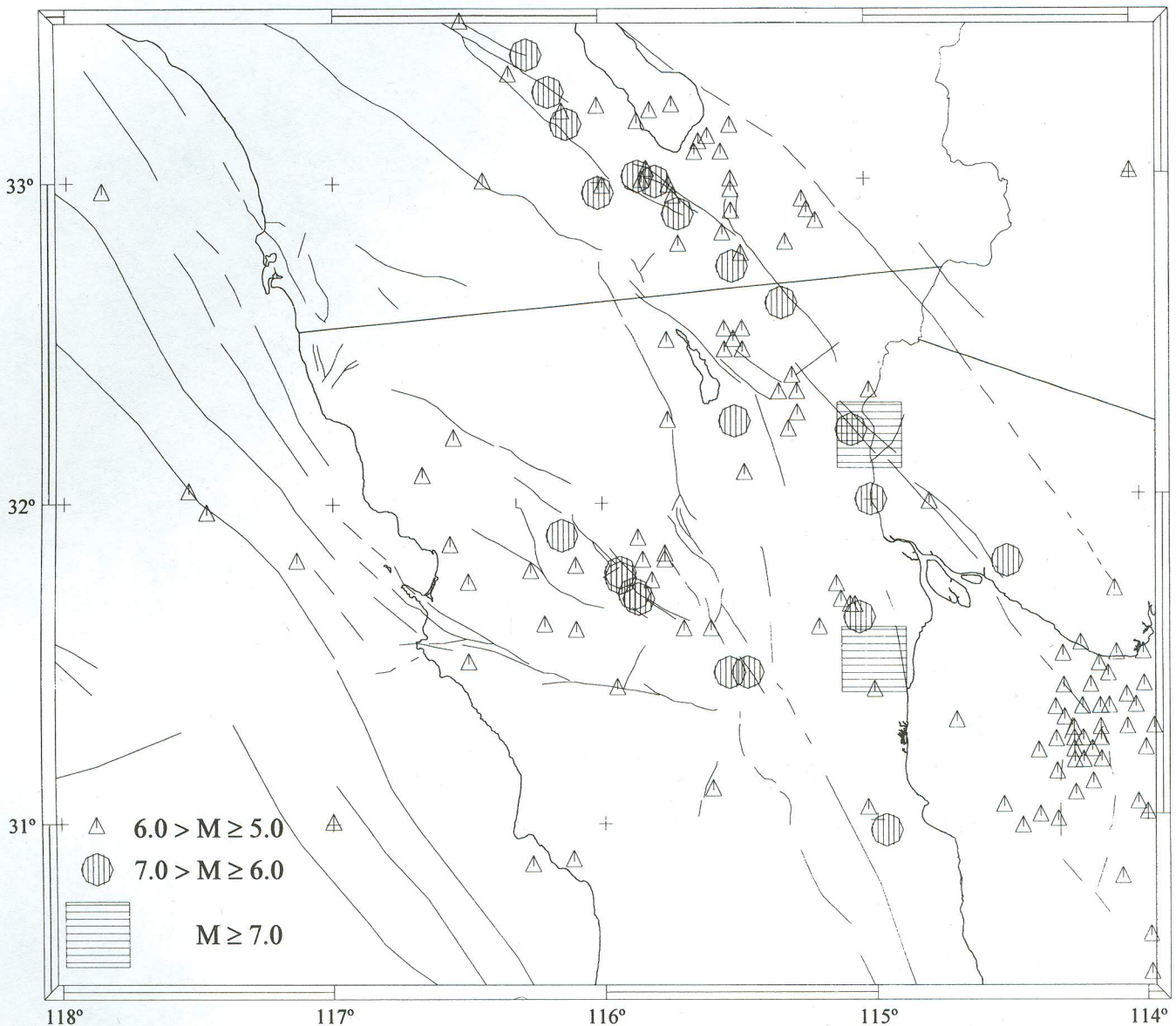


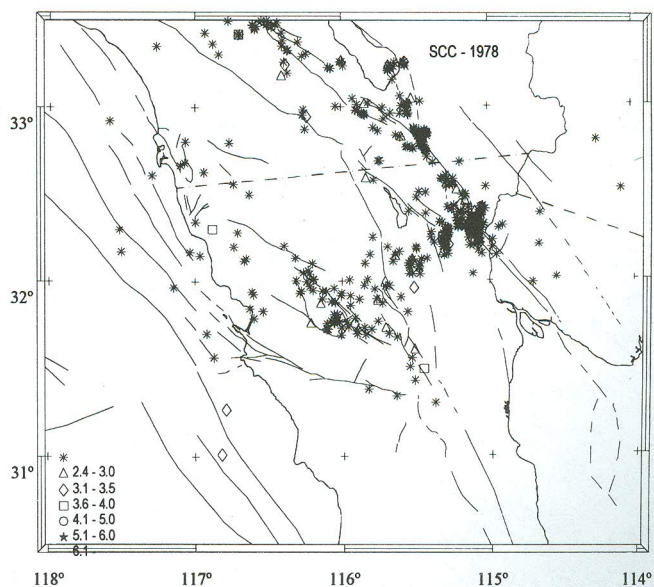
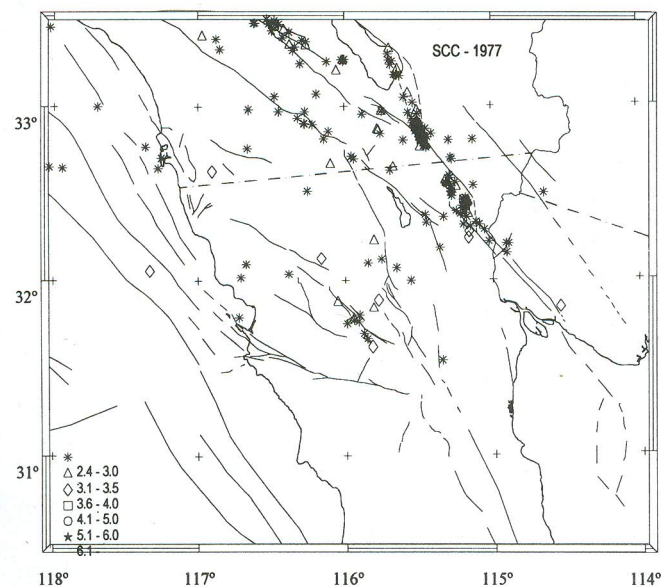
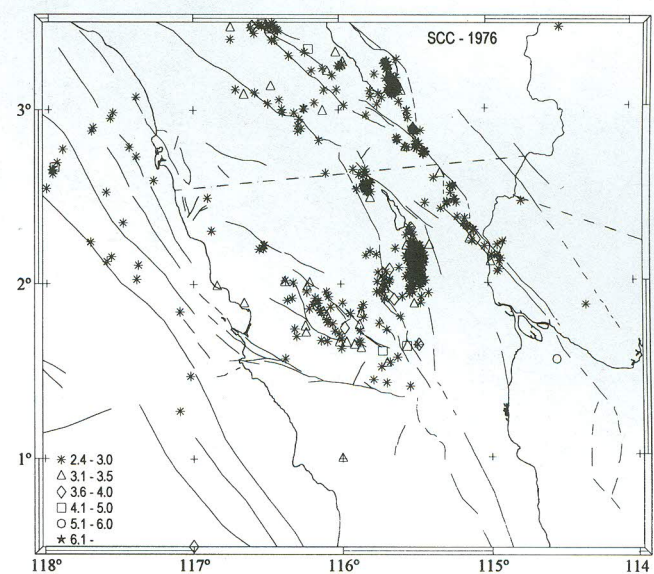
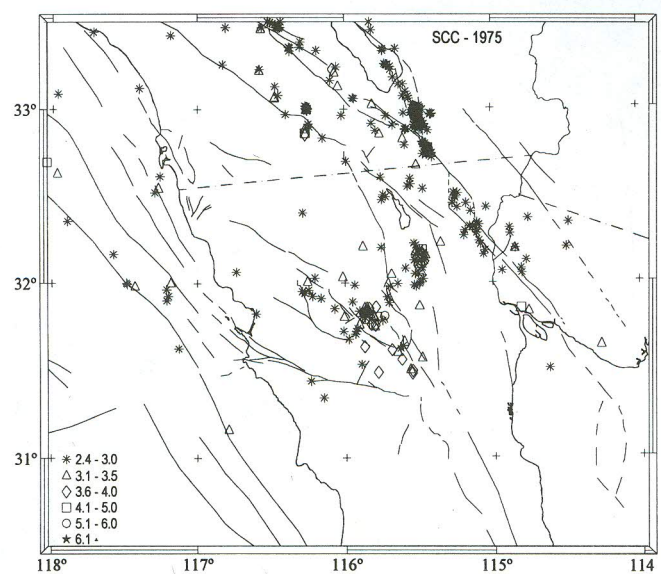
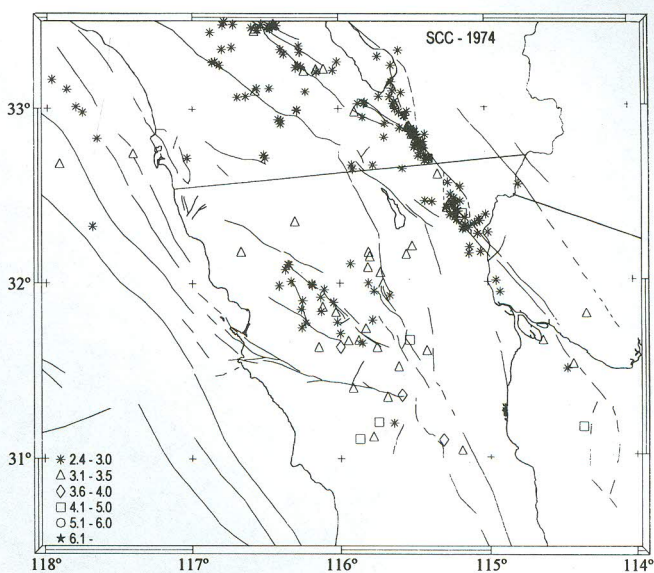
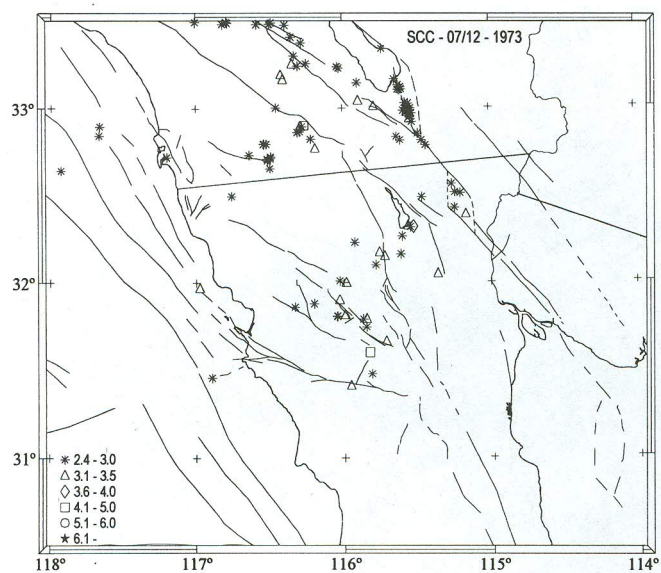
Figura 3. Sismos con $M \geq 5.0$ actualizados de una figura similar de Frez y González (1991) donde aparecen las referencias. No se incluyen réplicas; se incluyen sismos del mismo enjambre.

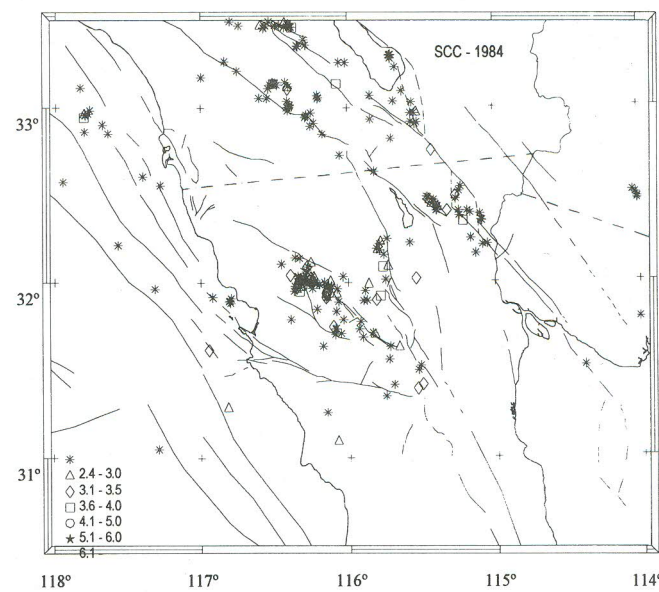
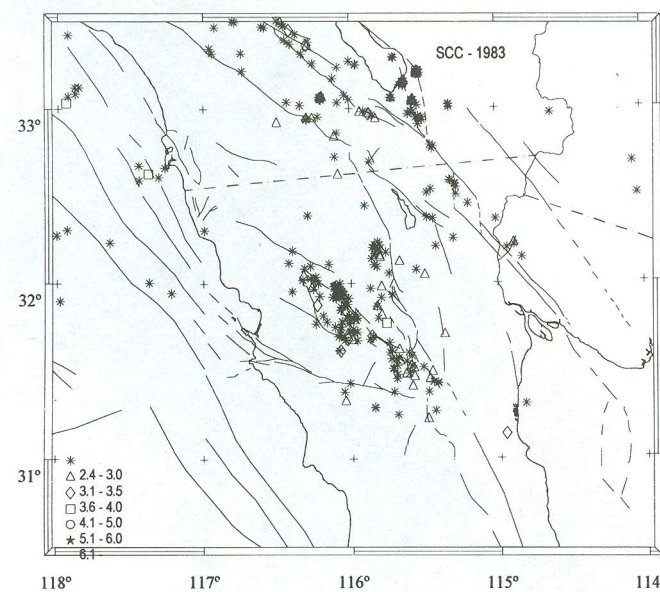
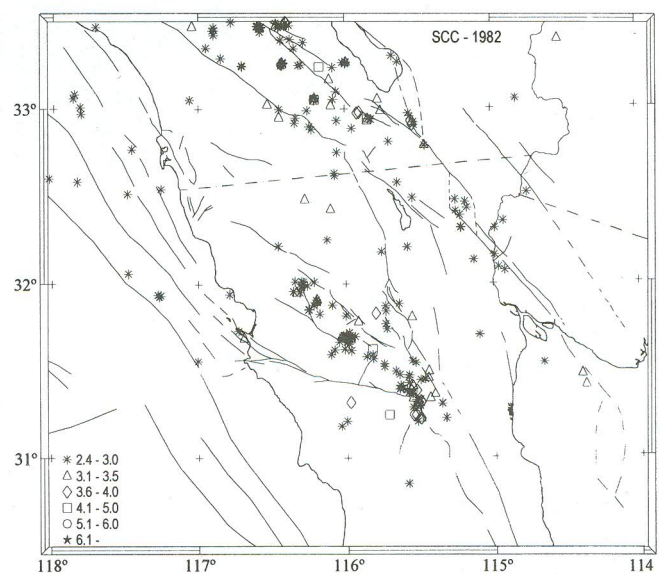
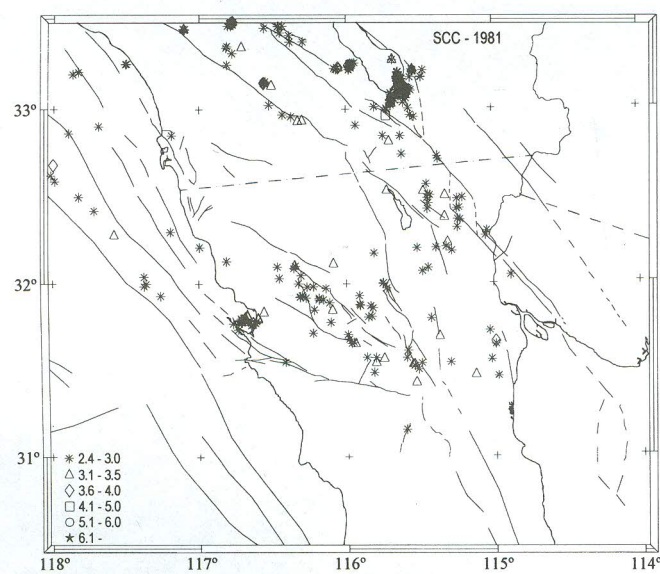
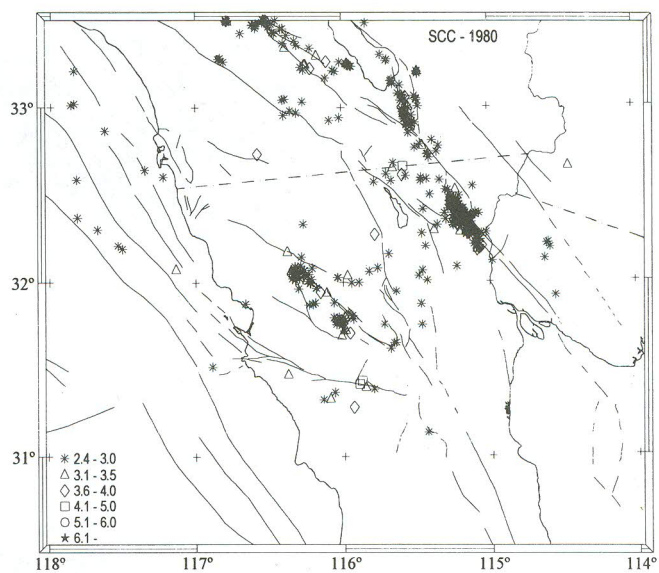
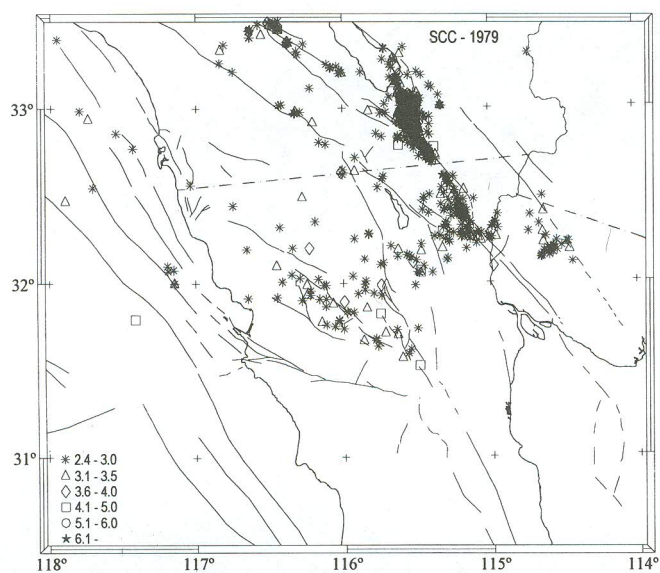
que incluyen los sismos de incluidos en el SCC y de todos los sismos cuyos hipocentros fueron determinados por RESNOM. El personal del USGS/CalTech clasifica parte de las determinaciones hipocentrales del norte de Baja California como "regionales", que son catalogados aparte. Los mapas corresponden a la suma de estas determinaciones con la de sismos considerados como "locales".

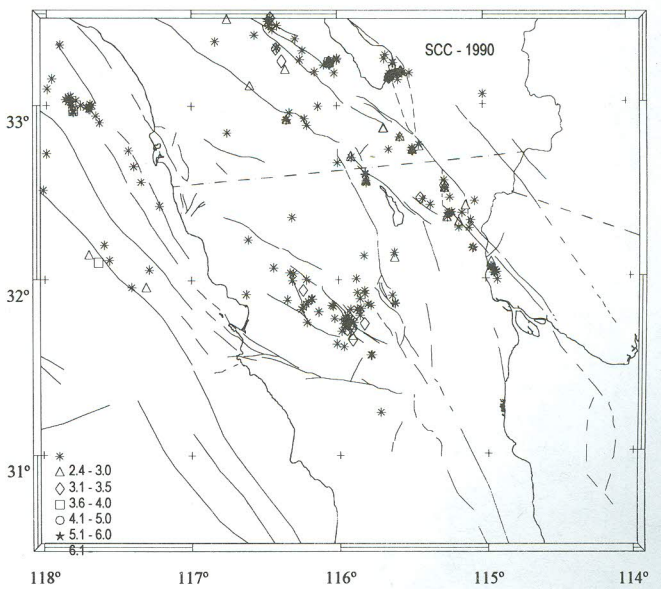
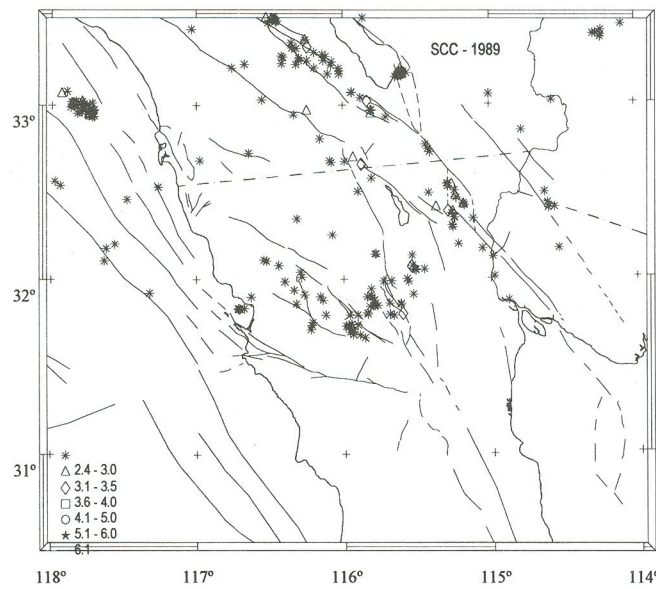
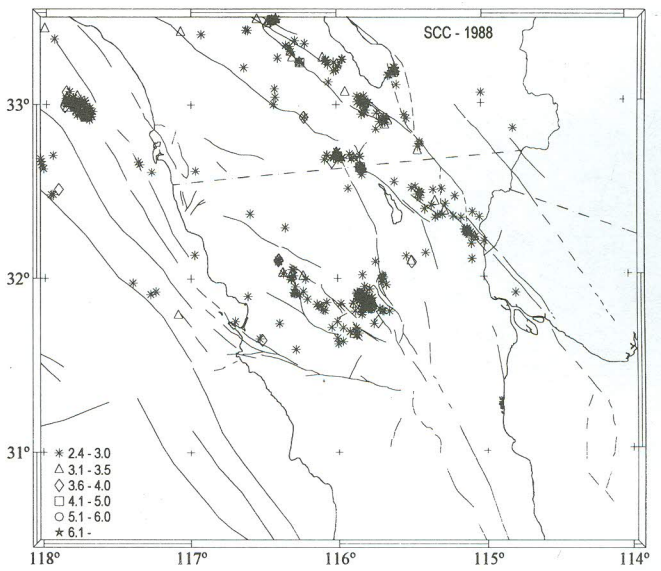
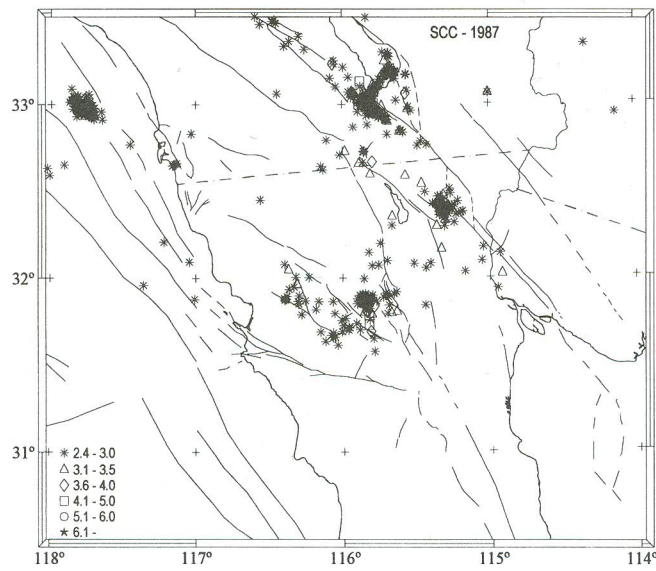
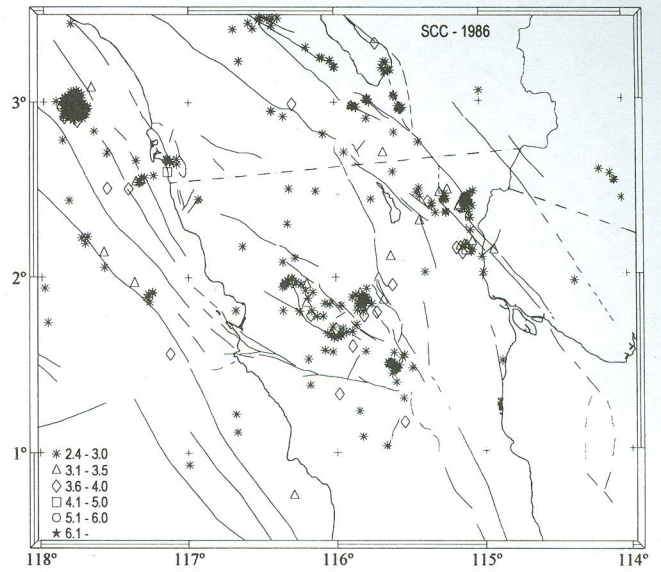
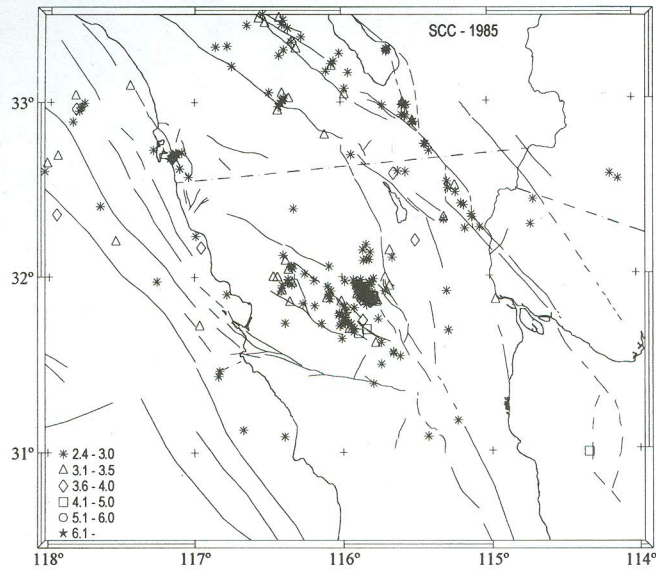
PRECISIÓN Y EXACTITUD DE LOS PARÁMETROS HIPOCENTRALES

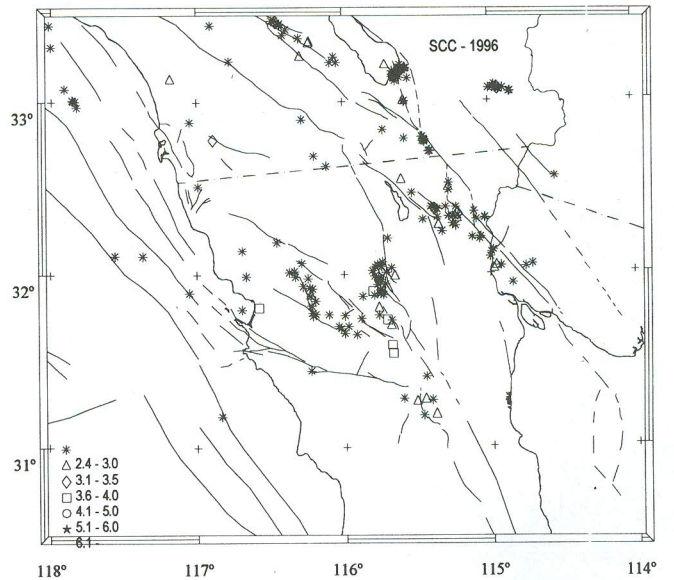
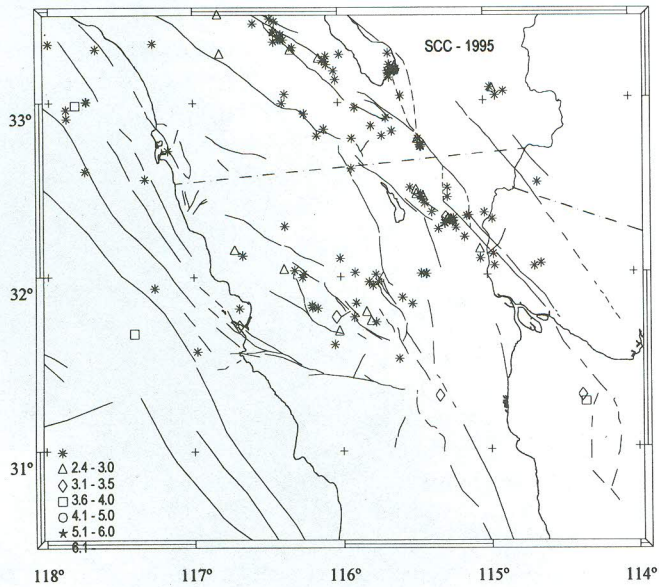
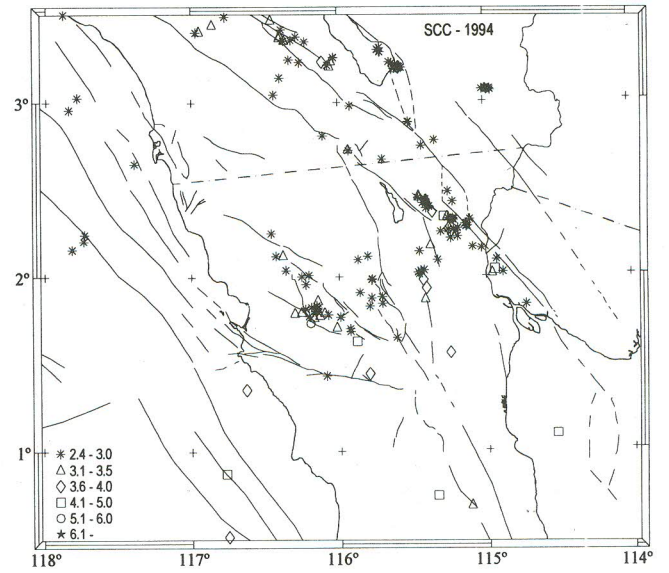
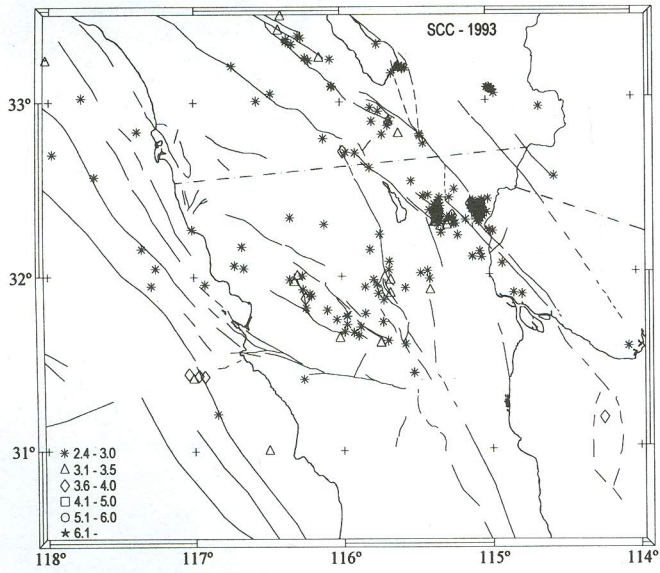
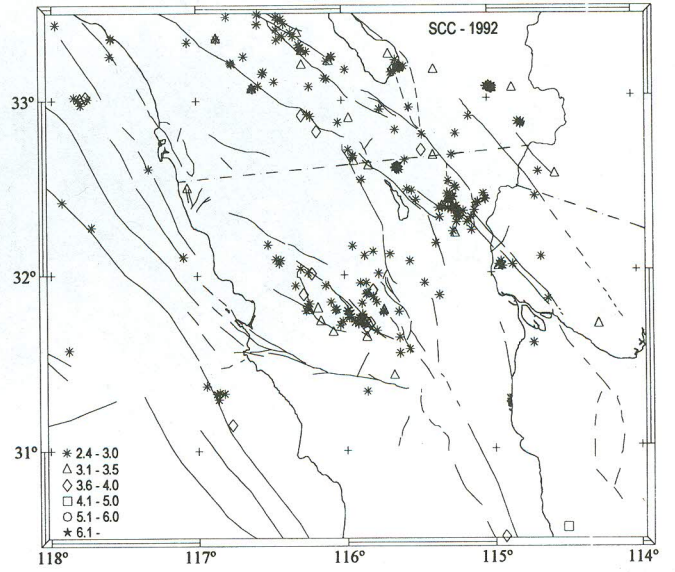
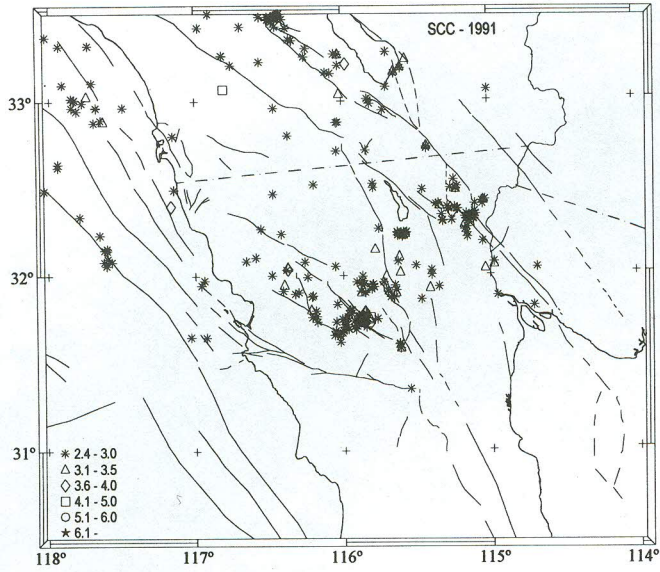
Los parámetros que aparecen en los catálogos son: tiempo origen (fecha, hora, minuto y segundo en que ocurrió el sismo), latitud y longitud del epicentro, profundidad del foco sísmico, magnitud y algunos otros que indican la precisión de la

determinación. Los cuatro primeros parámetros son las incógnitas para el problema numérico de la determinación hipocentral. Los datos para este problema son: a) las lecturas de los tiempos de arribo de las ondas P y S en las estaciones que tienen buenos registros del sismo, b) un modelo de la estructura sísmica de la región que, en trabajos de rutina, se supone unidimensional y c) las coordenadas espaciales (latitud y longitud) de las estaciones de la red sísmica. El sistema de ecuaciones que relacionan incógnitas y datos es no lineal. La mayor parte de los programas computacionales de uso rutinario que resuelven este problema numérico utilizan un método de linealización en donde la solución se busca por aproximaciones sucesivas desde el entorno de una solución inicial. Para redes regionales que cubren estructuras sísmicas muy variadas, como es el caso del norte de Baja California, se utiliza un modelo de corteza para cada provincia. En el caso de RESNOM, se tiene









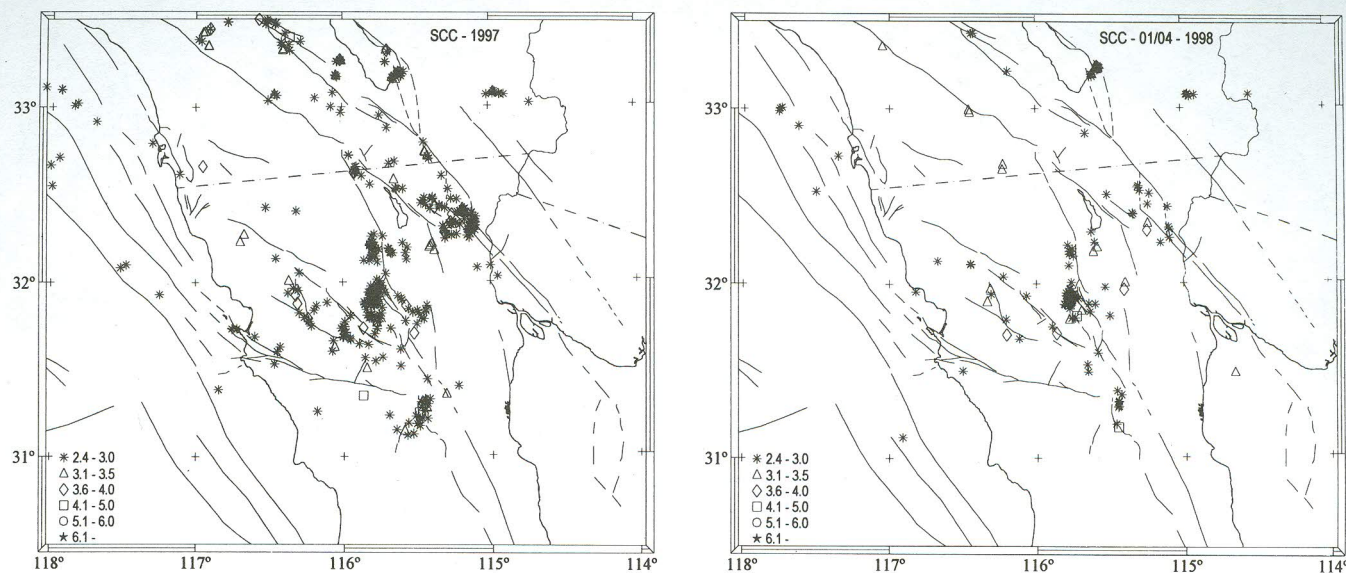


Figura 4. Sismicidad anual desde julio de 1973 hasta abril de 1998; tomada del Catálogo del Sur de California y para sismos con $M \geq 2.4$.

un modelo promedio para la Cordillera Peninsular y otro para el Valle Mexicali-Imperial. Al contrario de lo que pasaba hasta hace algunas décadas, hoy existe gran confianza en cuanto a las coordenadas de las estaciones y a la medición de los tiempos de los arribos que están bien definidos e identificados en los sismogramas. No obstante, es menester insistir en que todavía existen importantes fuentes de error en el cálculo de los parámetros hipocentrales. Aún suponiendo que la estructura sísmica sea aproximadamente unidimensional en la región de estudio, una buena determinación epicentral necesita que las estaciones que reportan tiempos de arribo rodeen homogéneamente al epicentro en un número que no puede ser menor que 4 y es deseable que sea mayor que 6. Tomemos un ejemplo en el que las estaciones se distribuyen sólo en 180° alrededor del epicentro, como cuando el epicentro está fuera de la red. En este caso, podemos dibujar una recta que pasa por el epicentro y que separa al área donde existen estaciones de aquella donde no las hay. Dada la falta de información que esto implica, las coordenadas epicentrales resultantes tendrán un gran error en la dirección perpendicular a dicha recta. La determinación correcta de la profundidad necesita tiempos de estaciones ubicadas a una distancia no mucho mayor que la profundidad del sismo. Esta condición no se cumple en el norte de Baja California, donde la profundidad de los focos sísmicos está típicamente entre los 5 y 15 km y la distancia entre las estaciones de RESNOM es mucho mayor que estos valores (Figura 2). Debido a esta indeterminación, los investigadores utilizan redes locales con espaciamiento entre estaciones menor a unos 10 km para investigar las profundidades de los sismos.

Como conclusión, se puede asegurar que las profundidades de los sismos determinadas por redes regionales son poco confiables; el procedimiento computacional asigna valores fijos de estas profundidades, cuando no hay información suficiente para determinarles, en 6 km (SCC) o 9 km (CNOM). Obviando una discusión más técnica, digamos que los errores de las

estimaciones epicentrales "buenas" en los catálogos son de unos dos a tres minutos, y que pueden subir a unos cinco a siete minutos si no existe una distribución adecuada de estaciones alrededor del epicentro. Los errores son más grandes a medida que disminuye la magnitud del temblor, ya que el número de estaciones que reportan tiempos disminuye y la precisión de la lectura de estos tiempos se deteriora.

Debemos distinguir entre errores sistemáticos y aleatorios. Los errores sistemáticos indican alguna desviación sistemática en algunos de los datos del problema de la determinación epicentral; estos grupos pueden ser amplificados por una mala distribución de las estaciones alrededor del epicentro. Por ejemplo, la inadecuación del modelo de estructura sísmica usado en los cálculos aumenta a medida que el epicentro se aleja de la red de estaciones. Esto es importante para interpretar los epicentros de sismos que ocurren en territorio mexicano y que han sido obtenidos del SCC. Errores sistemáticos de este tipo han sido reportados, por ejemplo, en Frez y González (1989), Frez y González (1991) y Wong *et al.* (1997). Se debe notar que errores sistemáticos significativos pueden estar acompañados por errores aleatorios pequeños, donde estos últimos se deben a lecturas muy exactas de los tiempos de llegada; lo anterior puede producir alineaciones espurias de epicentros.

El cálculo de magnitudes (una medida de la energía o intensidad del sismo) presenta también complicaciones. Los dos métodos más en boga utilizan la amplitud máxima y la duración del sismograma, ya que puede considerarse que la energía es aproximadamente proporcional al cuadrado de la amplitud y es función positiva de la duración. La calibración de las curvas que permiten pasar de estos datos al valor de la magnitud es complicada, ya que hay demasiados factores, además de la energía liberada en el foco sísmico, que determinan la amplitud del movimiento en el sismograma. Por otro lado, el

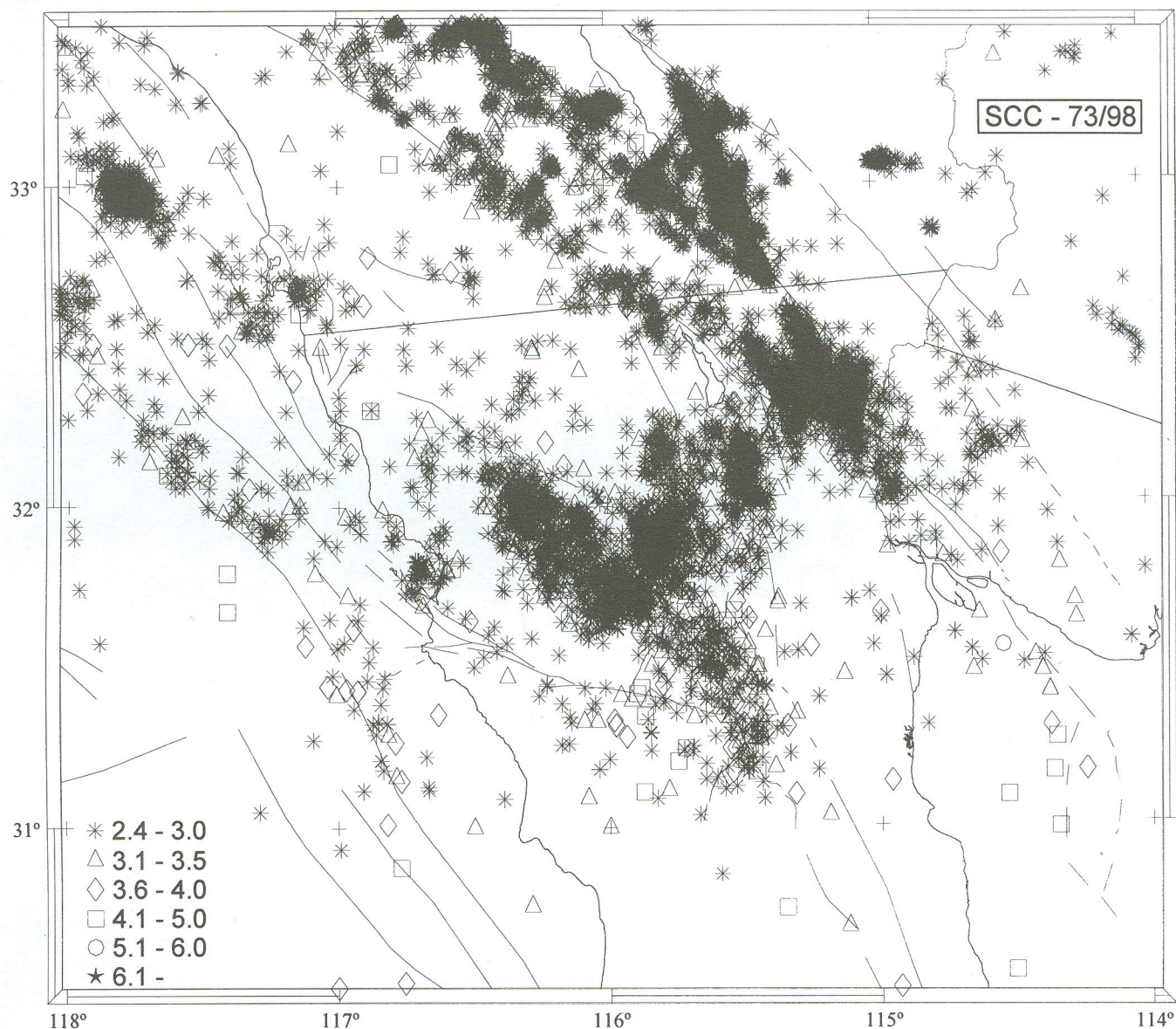


Figura 5. Sismicidad acumulada desde julio de 1973 hasta abril de 1998; tomada del Catálogo del Sur de California para $M \geq 2.4$.

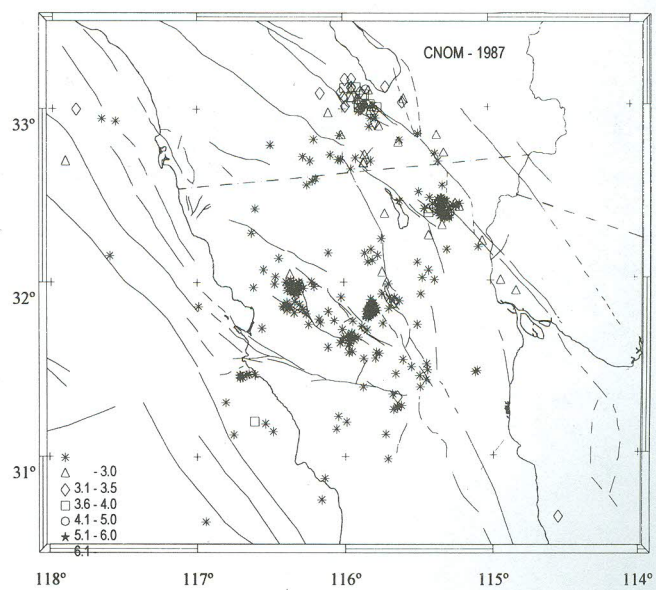
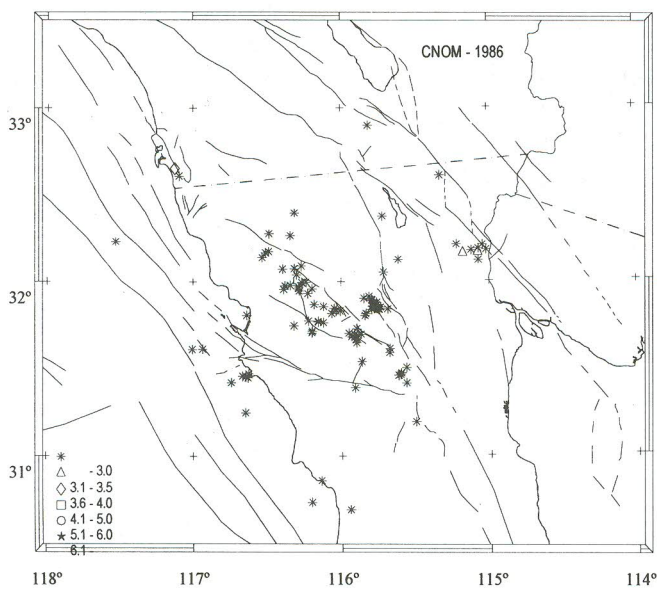
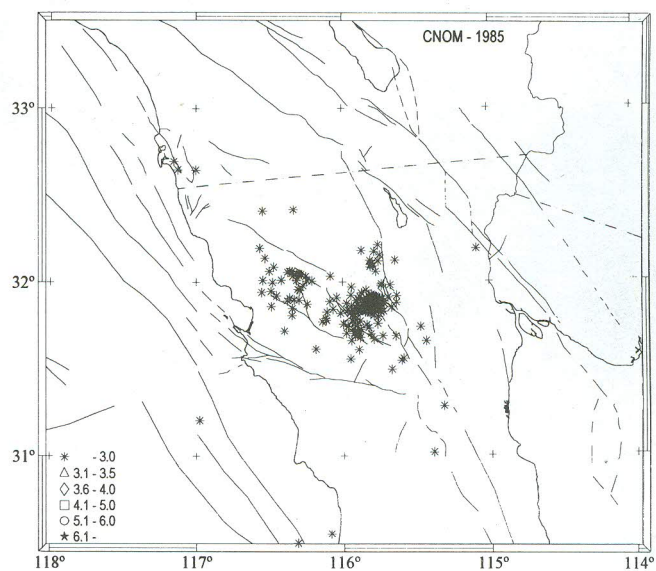
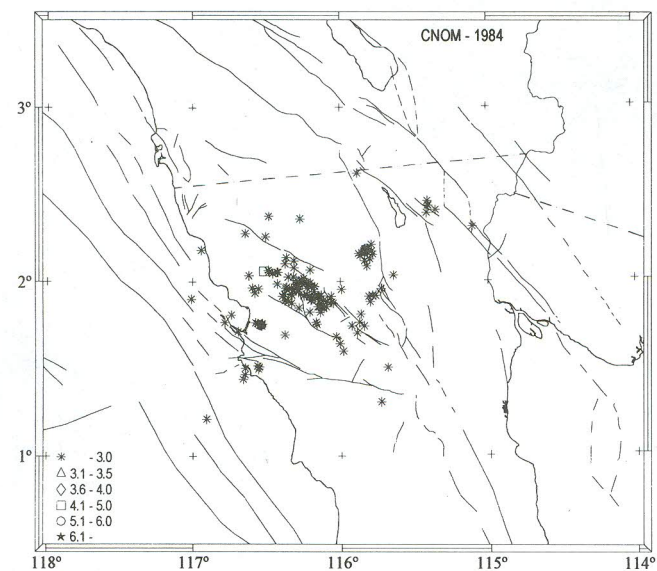
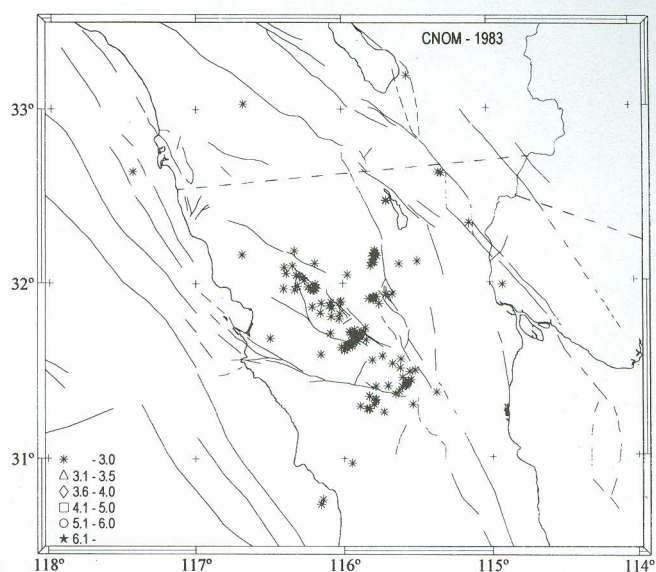
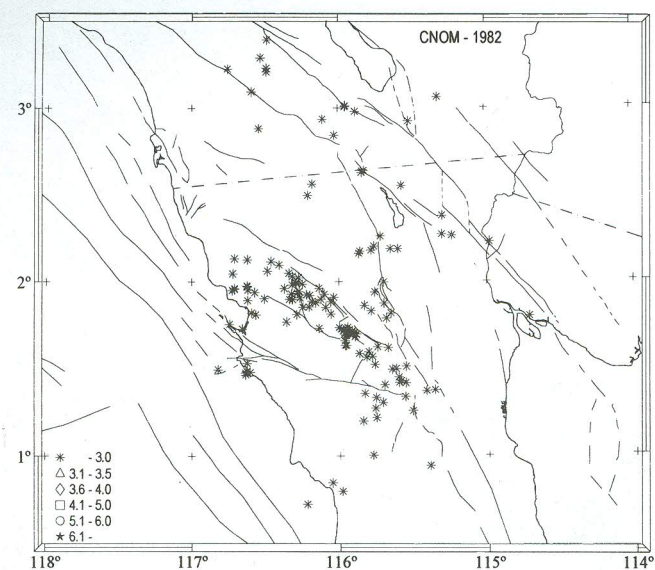
número de estaciones que reportan datos para calcular magnitudes es generalmente más pequeño que el que reporta tiempos. Para el caso de RESNOM, se utiliza la estación más estable instrumentalmente (Cerro Bola: CBX). Esta estación es representativa para los recorridos a lo largo de la Cordillera Peninsular. Para los sismos que ocurren en la Depresión del Salton, el uso de esta estación introduce una variabilidad menor que si se usaran estaciones de la Depresión del Salton. Otra complicación consiste en la calibración de las dos escalas de magnitudes (por amplitud y duración) y que sea consistente con los resultados de ambos catálogos. Lo que debe preocupar al usuario es que la metodología para calcular magnitudes ha cambiado en el tiempo. Para el caso de RESNOM, Vidal y Munguía (1998) analizan gran parte de este problema.

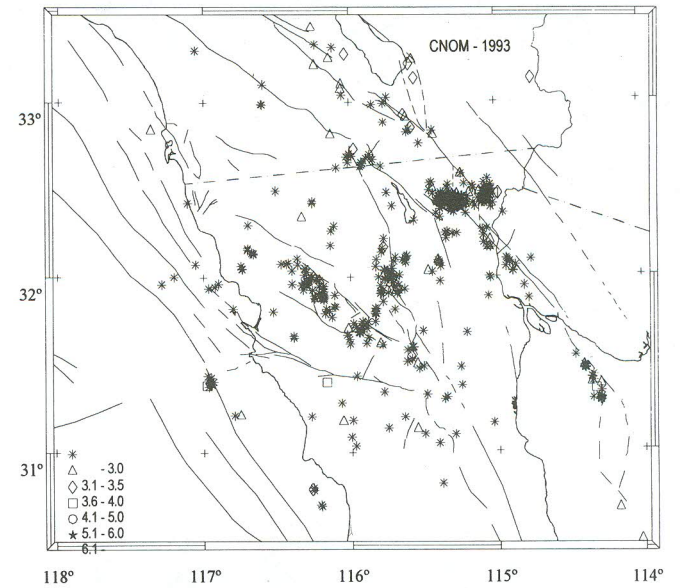
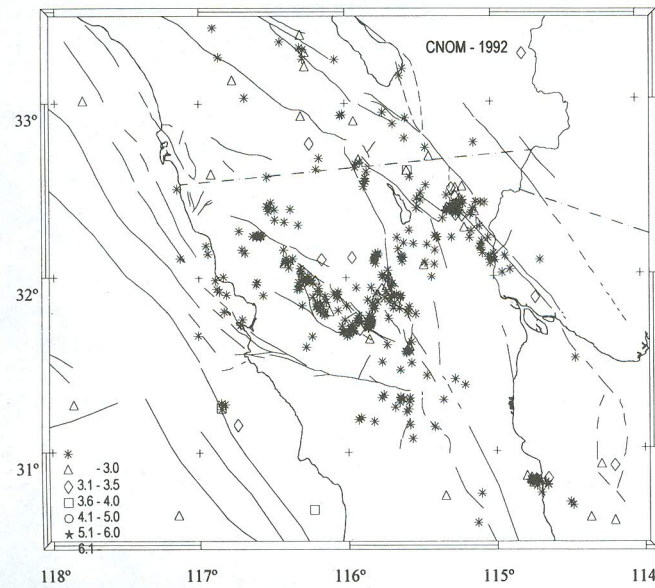
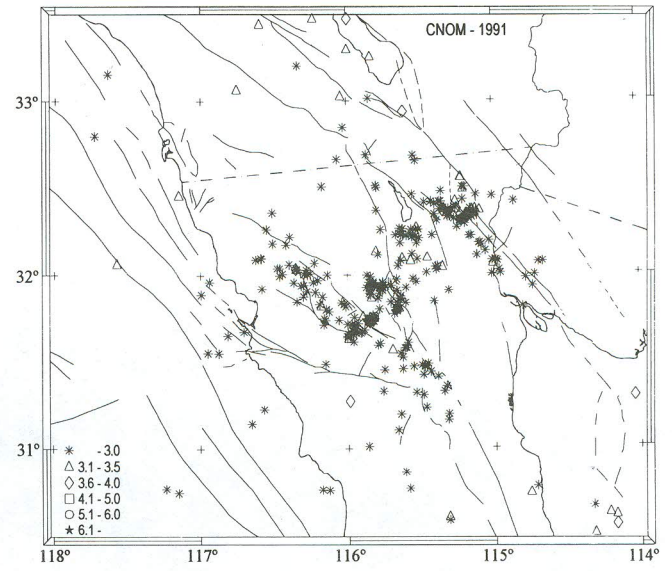
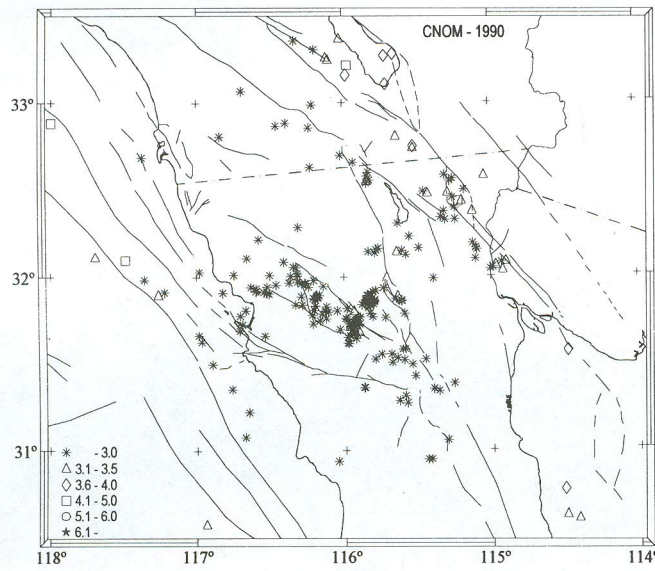
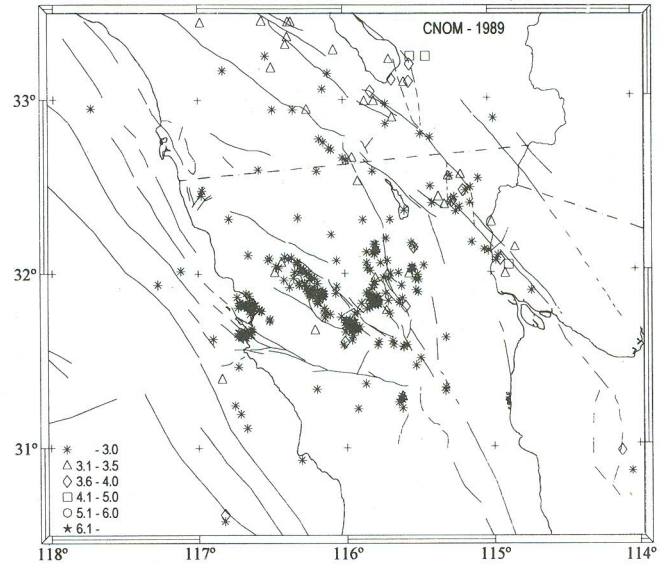
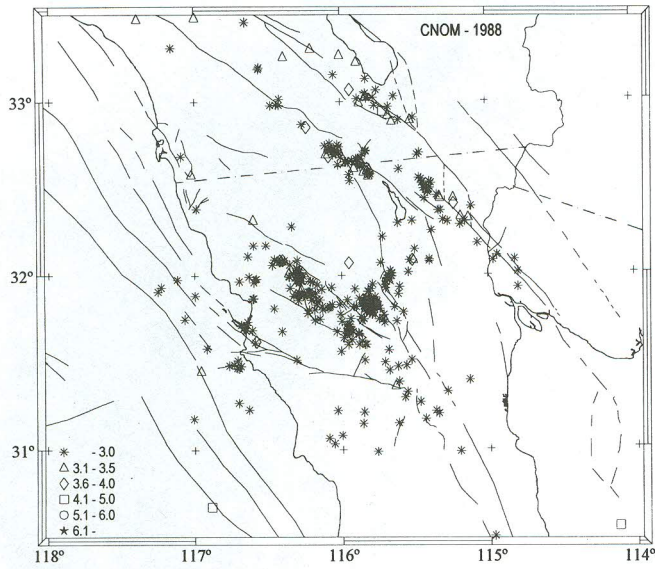
Como conclusión, casi nunca tenemos estimaciones confiables de la profundidad cuando ellas se obtienen de los catálogos regionales. Los errores en las coordenadas epicentrales

son difíciles de apreciar pero podemos considerarlos del orden de 3 a 5 minutos (o, equivalentemente, de 5 a 8 km) en promedio, mientras que los errores en las magnitudes son del orden de dos décimas de la unidad de magnitud. Los errores sistemáticos existen y su cuantificación es materia de investigación; en los mapas, se distinguen a veces por diferencias sistemáticas entre las determinaciones hechas por ambas redes, mientras que, en otros casos, se sospecha que producen alineaciones espúrias de epicentros.

UNA BREVE DESCRIPCIÓN DE LA SISMICIDAD CARTOGRAFIADA

Para propósitos de comparación entre la actividad micro y macrosísmica y por las implicaciones en estudios de riesgo y peligro sísmico, presentamos también un mapa con la sismicidad





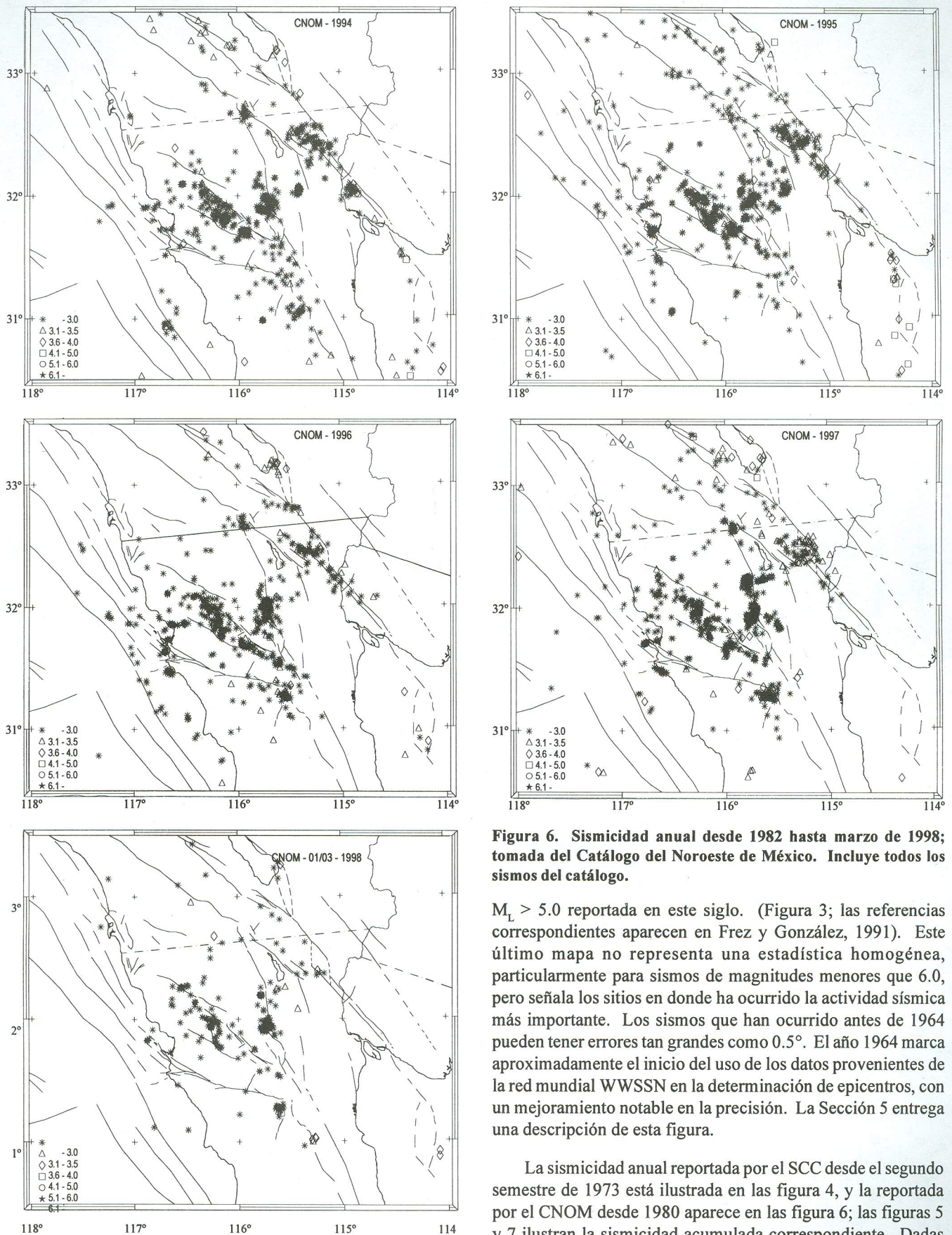


Figura 6. Sismicidad anual desde 1982 hasta marzo de 1998; tomada del Catálogo del Noroeste de México. Incluye todos los sismos del catálogo.

$M_L > 5.0$ reportada en este siglo. (Figura 3; las referencias correspondientes aparecen en Frez y González, 1991). Este último mapa no representa una estadística homogénea, particularmente para sismos de magnitudes menores que 6.0, pero señala los sitios en donde ha ocurrido la actividad sísmica más importante. Los sismos que han ocurrido antes de 1964 pueden tener errores tan grandes como 0.5° . El año 1964 marca aproximadamente el inicio del uso de los datos provenientes de la red mundial WWSSN en la determinación de epicentros, con un mejoramiento notable en la precisión. La Sección 5 entrega una descripción de esta figura.

La sismicidad anual reportada por el SCC desde el segundo semestre de 1973 está ilustrada en la figura 4, y la reportada por el CNOM desde 1980 aparece en la figura 6; las figuras 5 y 7 ilustran la sismicidad acumulada correspondiente. Dadas

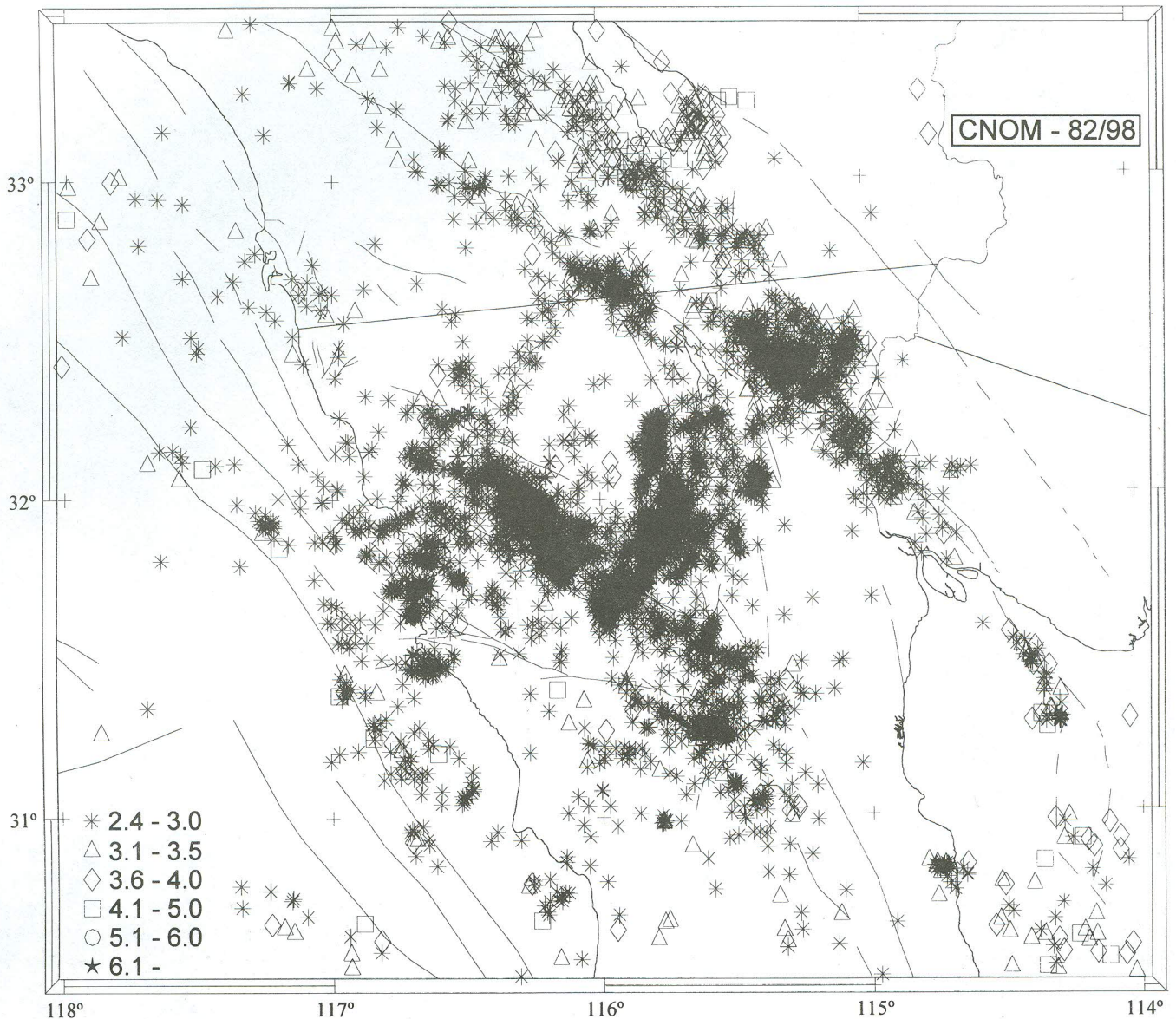


Figura 7. Sismicidad acumulada entre 1982 hasta marzo de 1998; tomada del Catálogo del Noroeste de México. Incluye todos los sismos del catálogo.

las limitaciones ya discutidas en cuanto a la sensibilidad de las redes, no es sorpresa encontrar que, para ambos catálogos, las magnitudes de los sismos aumenta en la periferia de la región de estudio (Figuras 5 y 7). Algunas características interesantes son las siguientes:

a) La mayor parte de la actividad sísmica reportada está asociada a sistemas de fallas, tanto a aquellas que marcan el límite entre placas (C. Prieto, Imperial, Brawley y San Andrés), como a las que cruzan o limitan la Cordillera Peninsular (San Miguel, Sierra Juárez, Elsinore/Laguna Salada y San Jacinto). Una menor actividad se aprecia asociada a las fallas del Borde Continental. Se observa, además, que la sismicidad asociada a algunos sistemas de fallas no ocurre necesariamente sobre las trazas cartografiadas de las fallas individuales. La mayor parte de la actividad se aglomera espacial y temporalmente

definiendo poco a poco distribuciones principalmente lineales o lenticulares.

b) Los casos más evidentes de fallas con poca sismicidad registrada son la de Agua Blanca, donde no se presenta microsismicidad significativa en su sector central, y la de Vallecitos.

c) Se puede apreciar que hay epicentros que no están asociados a sistemas cartografiados de fallas. Un ejemplo es la sismicidad pequeña que se localiza entre los sistemas de fallas Elsinore y San Miguel y la costa; dada la posición de sus epicentros con respecto a las estaciones de la SCSN, no creemos que ellos tengan un error grande; esta actividad "intra-bloque" no ha sido estudiada. En otro tipo de ejemplos, los mapas indican sismicidad con epicentros que tienden a

conectar diversos sistemas de fallas en diversas provincias geológicas. Parte de esta actividad es esporádica (generalmente dura semanas o pocos meses). Un ejemplo de agrupamiento de sismos (cúmulos) que se encuentra entre las fallas Cerro Prieto y Sierra Juárez, es el nido sísmico con distribución NS notable en los mapas de los años 1975 y 1976. Distribuciones epicentrales de menor tamaño sin asociación aparente a fallas cartografiadas se encuentran también entre las fallas Sierra Juárez y San Miguel, en donde la región de Pino Solo tuvo una actividad fuerte en 1975, 1985 y 1988, asociada a sismos con magnitud poco mayor que 5.0. Un ejemplo de actividad difusa que conecta provincias geológicas es la que parte de la confluencia de las fallas Sierra Juárez, San Miguel, San Pedro Mártir y Laguna Salada y que se dirige hacia la costa del Pacífico. Otro ejemplo es la distribución que une el extremo norte de la Falla San Miguel y la costa, al norte de Ensenada. Los ejemplos indicados son más fácilmente observados en los mapas de sismicidad acumulada (Figura 5 y 7).

d) Otras áreas donde se observan epicentros entre fallas cartografiadas son la Zona Sísmica de Mexicali, entre los extremos de las fallas Cerro Prieto e Imperial; la Zona Sísmica Brawley, entre la falla Imperial y la Brawley (o San Andrés); el Valle Ojos Negros entre las fallas San Miguel y Tres Hermanas, y el Valle Trinidad, ubicado al sur del extremo SE de la Falla Agua Blanca. La sismicidad asociada al Valle Ojos Negros parece extenderse hacia el NW, más allá de la traza de la Falla Ojos Negros (Figuras 5 y 7).

e) Se pueden hacer varias conjeturas (hipótesis de trabajo) con respecto a huecos de actividad que unen distribuciones de sismicidad bien establecidas. Una hipótesis bastante arriesgada es la siguiente: El sistema de fallas de San Miguel tiene una clara dirección NW-SE que se alinea hacia el NW con el sitio del temblor de Oceanside de 1986 y sus réplicas (SCC: 1985, 1986 hasta 1991); las réplicas de los años 1987 y 1988 se distribuyen preferentemente con acimut NW-SE. Si este alineamiento de epicentros fuera real pasaría por las ciudades de Tijuana y San Diego.

f) Existen cúmulos en las junturas de fallas, sistemas de fallas o alineamiento de sismicidad. Un ejemplo importante se localiza en la Bahía de Ensenada (González y Suárez, 1984). Existe también microsismicidad relativamente alta en los contactos entre las fallas San Miguel y Vallecitos, entre las fallas Elsinore y Laguna Salada y entre los segmentos de la Falla Sierra Juárez.

g) La distribución de epicentros en el tiempo también forma agrupamientos o secuencias. La distribución de sismos en el tiempo puede formar secuencias del tipo "premonitores-sismo principal-réplicas" o de "enjambre sísmico". En el segundo caso, no hay un temblor principal muy separado en magnitud de la réplica más grande, mientras que en el primer tipo de secuencia la diferencia entre las magnitudes del temblor principal y de la réplica es un poco más grande que una unidad de magnitud. Los sismos de $M_L > 6.0$ (Figura 3) que aparecen en los mapas de microsismicidad son los de 1979 (Valle

Imperial), 1980 (Victoria) y 1987 (Superstition Hill); todos generaron zonas de réplicas bien definidas. Lo mismo sucede con algunos sismos cuya magnitud varía entre 5.0 y 5.9. El sismo de Oceanside ($M_L=5.4$; en el Borde Continental, 33°N) de 1986 (Hauksson y Jones, 1988) produjo una secuencia desproporcionadamente larga de "réplicas" (ver mapas desde 1985 a 1991) que no se compadece con la magnitud del sismo principal. La ocurrencia de enjambres es generalizada en la región, y la mayor parte de ellos tiene duraciones que varían desde unas pocas horas hasta unos pocos meses. Una excepción curiosa la constituye el enjambre que aparece en el extremo SE del Mar Salton que ha estado activo continuamente desde 1986. Un caso no tan extremo pero también muy persistente, es el cúmulo que está ubicado en la Falla Sierra Juárez, al sur de la latitud 32°S y que aparece activo en los mapas de 1996, 1997 y 1998.

h) La sismicidad ilustrada en los mapas contiene una crisis sísmica de importancia y varias menores. La importante, que ocurrió en el Valle Mexicali-Imperial entre 1973 y 1981, se inició con numerosos enjambres, culminó con los temblores del Valle Imperial y de Victoria, y terminó con el sismo de Westmoreland (note las réplicas al SE del Mar Salton) en abril de 1981. Los mapas señalan un incremento paralelo de la actividad en la conexión entre la Depresión del Salton y la Cordillera Peninsular, y en la Cordillera Peninsular misma, lo que se puede apreciar particularmente en los años 1976 y 1980. Algo semejante sucede en 1987, cuando ocurrió el temblor de Superstition Hill (la ortogonalidad de la distribución epicentral de sus réplicas, en el extremo SE del Mar Salton, es notable), el temblor $M_L=5.4$ que ocurrió en el flanco occidente del Valle Mexicali y, paralelamente, actividad en la Cordillera Peninsular. La sismicidad reportada para el año 1997 (la mayor parte de ella corresponde al segundo semestre) se incrementa también en todas las áreas señaladas. Por otro lado, durante los años 1983, 1984 y 1985 hubo actividad fuerte en la Cordillera Peninsular y muy débil en la Depresión del Salton. En 1993 (SCC), sucede lo contrario.

i) La actividad en el Borde Continental indica alineaciones a través de una distribución difusa de epicentros que puede deberse a la inhomogeneidad en los catálogos y a poca precisión de sus coordenadas geográficas. La bahía de Ensenada tiene actividad esporádica en forma de enjambres. Dos alineaciones NW-SE parecen llegar a las ciudades de San Diego y Ensenada. La alineación que llega a la bahía de Ensenada cambia de dirección y continúa por el mar hacia el sur, paralelamente a la costa. Una actividad difusa, posiblemente debida a errores en las coordenadas epicentrales, parece conectar la actividad que existe en el vértice común de las fallas San Miguel, Sierra Juárez, San Pedro Mártir y Agua Blanca, con la costa, a la latitud aproximada de 31°S (Punta Colonet), donde también han ocurrido enjambres.

j) La mayor parte de la Falla San Miguel tiene fuerte actividad, exceptuando su extremo SE. Esta poca actividad se puede correlacionar con el sector de la falla que rompió con el temblor ($M_L=6.6$) de 1956 (Shor y Roberts, 1958). La Falla

- Vallecitos no tiene actividad significativa, excepto en la parte en que se conecta con la de San Miguel (1984, 1986) o en el sector donde una prolongación de la Falla San Miguel la tocaría (1984, mapas de sismicidad acumulada). La Falla Tres Hermanas tampoco tiene gran actividad, excepto en su rama (Falla Ojos Negros) que tiene un acimut casi NS (v. gr., 1996). Gran parte de la sismicidad asociada al sistema San Miguel se encuentra en el Valle Ojos Negros y en la juntura San Miguel/Vallecitos/Ojos Negros (1984, 1987, 1988, 1990, 1996).
- k) El sistema Elsinore/Laguna Salada muestra su actividad más alta en la juntura entre ellas y la Falla Sierra Juárez (1976, 1987, 1988; mapas CNOM: 1994, 1995 y 1996).
- l) El sistema de fallas Sierra Juárez es particularmente activo en su segmento central con dos cúmulos localizados en los extremos de este segmento. El más persistente es el más meridional (1997).
- m) El vértice donde confluyen las fallas San Miguel, Sierra Juárez, Agua Blanca y San Pedro Mártir tiene gran actividad (mapas de sismicidad acumulada); dado el carácter difuso de la distribución epicentral, es difícil asignar únicamente esta actividad a unidades estructurales. Hacia el sur, la falla San Pedro Mártir parece tener microsismicidad asociada; ya mencionamos que la Figura 7 indica una conexión de dicho vértice con la costa del Pacífico, en Punta Colonet.
- n) En el Valle Mexicali-Imperial, la mayor parte de la actividad microsísmica se encuentra en las zonas sísmicas y alrededores. El flanco occidental del Valle es mucho más activo que el oriental; su actividad forma alineaciones que conectan o se confunden con los sistemas de fallas de la Cordillera Peninsular. La Cuenca Wagner, en el alto del Golfo, puede considerarse semejante a las zonas sísmicas Mexicali y Brawley en cuanto a que conecta fallas transformes y contiene una alta actividad sísmica, compuesta principalmente por enjambres (Figura 3 y CNOM; 1993 a 1996). Posteriormente a la crisis entre 1973 y 1981, la Depresión del Salton tuvo varios años con poca actividad (1981 a 1986). Desde 1987 (temblor de Superstition Hill y otro, al oeste de la estación CPX), el número de sismos aumentó. Parte de esta sismicidad indica una extensión de la actividad asociada a la Falla Cerro Prieto hacia el NW y una conexión entre la actividad del Valle Imperial con la del sistema de fallas San Jacinto. La Depresión del Salton es la región que ha tenido más sismos con $M_L > 6.0$ (Figura 3). Además de los ya nombrados, tenemos los sismos de El Golfo (1966), El Centro (1940) y, el mayor de todos ($M=7.1$), que ocurrió en 1934 cerca del epicentro del sismo Victoria de 1980. El sismo de 1934 produjo desplazamientos documentados en la superficie a lo largo de toda la Falla Cerro Prieto (Biehler *et al.*, 1964). Los temblores con $M_L > 6.0$ tienen sus epicentros en los extremos de las zonas sísmicas. La Falla Cerro Prieto tiene muy poca microsismicidad reportada después de 1981 y algo semejante sucede con la Falla Imperial. El extremo meridional de la Falla San Andrés parece activo en 1975 y está señalado por las réplicas del temblor del Valle Imperial de 1979. Posteriormente, un enjambre que aparece persistentemente desde 1986 parece indicar el extremo SE de esta falla.
- o) El alto del Golfo de California tiene sismicidad esporádica de la cual es ejemplo la que ocurre entre los años 1990 y 1995 (CNOM). Parte de esta sismicidad define el extremo SE de la Falla Cerro Prieto al llegar a la Cuenca Wagner. Los extremos norte y sur de la Cuenca parecen también haber estado activos en estos años. La actividad registrada más al sur tiene por lo menos dos explicaciones compatibles: o representa una extensión de la actividad de la Cuenca Wagner, lo que está sugerido por las curvas batimétricas, o representa una extensión de la sismicidad que se distribuye en dirección NW-SE en la Cordillera Peninsular y que se puede prolongar hasta el Golfo por un vacío de actividad que terminará con el cúmulo que se aprecia en la costa del sur de San Felipe (CNOM, 1992, Figura 7).
- p) El sistema de fallas San Jacinto tiene una actividad significativamente más alta que la del sistema Elsinore y muestra una compleja conexión con el sistema Imperial/San Andrés/Brawley.
- q) La sismicidad asociada al sistema de fallas Agua Blanca define tres segmentos en éste. El extremo NW, donde existen varias ramificaciones que cubren la península Punta Banda, es activo (1985, 1988, 1989, 1995, 1996). También parece ser activo el segmento SE que es el límite norte del Valle Trinidad (1983, 1996). El segmento central no muestra actividad significativa (mapas de sismicidad acumulada).
- r) Ficticio o no, el rasgo que más llama la atención en los mapas globales (Figura 5 y 7) es la aproximada perpendicularidad entre algunas alineaciones de epicentros. Globalmente, la Figura 7 indica, por ejemplo, que la sismicidad asociada a la Falla San Miguel, extendida hasta tocar la Falla Vallecitos, parece conectarse con la costa del Pacífico, al norte de la bahía de Ensenada, y a la intersección de las fallas Elsinore y Laguna Salada por líneas, o cintas, de sismicidad. La sismicidad, compuesta por muchos cúmulos generalmente en dirección NS, que va desde la Zona Sísmica Mexicali hasta la parte central de la Falla San Miguel, parece distribuirse perpendicularmente a la serie de sismos asociados a la Falla San Miguel. Finalmente, la difusa sismicidad que parte del vértice donde están extremos de la Falla San Miguel, Sierra Juárez, Agua Blanca y San Pedro Mártir y llega a la costa del Pacífico cerca de Punta Colonet también tiene dirección perpendicular con respecto a la falla San Miguel. Pasando de la escala regional a la local, están las ya mencionadas, perpendicularidades relacionadas con las réplicas de los temblores de Westmoreland (1981) y Superstition Hill (1987). Además, también existe perpendicularidad entre la distribución de réplicas de sismos que ocurren entre las fallas Sierra Juárez y San Miguel; en este caso, las longitudes de las alineaciones son de aproximadamente 15 km (Frez, González, en preparación).

En conclusión, la existencia de alineaciones perpendiculares de epicentros está establecida a escala local en varios casos y puede ser extrapolada a escala regional.

MAPA DE SISMOS CON $M \geq 5.0$

La sismicidad $M > 5.0$, entre 1903 y 1998 se ilustra en la Figura 3. Se han eliminado las réplicas de sismos. El catálogo es completo sólo para los últimos 50 años; Anderson y Bodin (1987) opinan que la información es completa desde 1906 para el Valle Mexicali-Imperial a partir de una magnitud mínima de 5.8. Existen referencias de fracturas superficiales para los siguientes sismos con $M > 6.0$: Cerro Prieto de 1934 (Biehler *et al.*, 1964), El Paso de 1940 (Sylvester, 1979), San Miguel de 1956 (Shor y Roberts, 1958) y del Valle Imperial de 1979 (Youd y Wiczorek, 1982, entre otros).

En caso de interpretarse los mapas de sismos en términos de energía liberada en el foco, se debe tomar en cuenta que la magnitud es proporcional al logaritmo de la energía. Aunque los factores de las relaciones empíricas varían para diversos autores, se puede decir que una diferencia en una unidad de magnitud local equivale a un factor de 50 a 100 en la razón de energías correspondientes. Con este criterio, el enjambre que ocurre en la Cuenca Wagner en 1969 equivale a un sismo de magnitud del orden de 6.0. Para el resto del mapa, los sismos con $6.0 > M \geq 5.0$ contribuyen poco a la energía disipada regionalmente entre 1903 y 1998.

De la comparación de la Figura 3 con los mapas que ilustran microsismicidad, concluimos que hay una correlación positiva entre ambos tipos de sismicidad para el Valle Mexicali-Imperial, para la conexión de éste con el sistema San Jacinto y para la Falla San Miguel. En el Valle, la posición de los sismos de 1934, 1940, 1979 y 1980 marca los límites de las zonas sísmicas que tienen alta concentración de microsismicidad. Para la Falla San Miguel, los epicentros de los sismos de 1954 y 1956 parecen marcar los límites entre los cuales hubo fractura superficial y donde hay ahora poca sismicidad.

Los sismos con $5.0 \leq M < 6.0$ que ocurrieron en el Borde Continental y la Costa del Pacífico en 1934, 1935, 1937, 1939 (2), 1951, 1954, 1975 (2, en Punta Colonet) y 1986 (Oceanside); la mayor parte de ellos - y los más antiguos- ocurren alrededor de Ensenada ($\pm 0.5^\circ$). Entre las fallas Sierra Juárez y San Miguel ocurren cuatro del mismo tipo entre 1975 y 1991. En el Valle Mexicali Imperial, gran parte de esta sismicidad corresponde a enjambres, particularmente a los ocurridos en las décadas de los 50's y 60's.

DISCUSIÓN Y APLICACIÓN ELEMENTAL A PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO

Dejamos al observador interesado el descubrimiento e interpretación de otras características que pueden estar indicados

o sugeridos en los mapas. Parte del propósito de este trabajo es encontrar particularidades y plantear hipótesis de trabajo que guíen la investigación futura. Debe tenerse presente que parte de lo dicho en la Sección 4 consiste en ofrecer un juicio relativamente general y, enseguida, destacar excepciones. Esto obedece al simple hecho de que el conocimiento sismotectónico es aún muy fenomenológico. La falta de comprensión acerca de la dinámica de la ocurrencia de los temblores hace, por ejemplo, que una definición básica como la de "réplica" no sea clara, ya que operacionalmente consiste en la adjudicación de ventanas empíricas en tiempo, espacio y magnitud a la actividad reportada, sin que se le pueda asociar un mecanismo físico y un criterio operacional a la vaga definición de "producido por el temblor principal". La escala de tiempo de observación es otra gran limitante debido a que los temblores ocurren en tiempo a escala geológica, mientras que la Sismología Instrumental cubre un tiempo demasiado corto.

Con estas limitaciones, sin embargo, es necesario tomar responsabilidades particularmente en lo que se refiere a prevenir el daño que producen los terremotos. La región del norte de Baja California tiene, como hemos visto, alta sismicidad, semejante a la del sur de California y Golfo de California. Sin duda que la ciudad de Mexicali, es la zona urbana que presenta el más grande potencial de pérdidas a causa de dos factores: uno corresponde al hecho de que en sus alrededores han ocurrido varios sismos destructivos (Figura 3) lo que, a su vez, se debe a que está prácticamente construida en un límite entre placas. En otras palabras, Mexicali está sujeto a recibir el efecto de temblores $M_L > 6.0$ cada pocas decenas de años. El segundo factor importante es que parte de la ciudad está asentada sobre una secuencia sedimentaria sin consolidar y rica en fluidos. Esta estructura amplifica grandemente la intensidad del movimiento sísmico. Un efecto semejante produjo destrucción en la Ciudad de México en 1985 por un terremoto localizado a una distancia relativamente lejana.

La ciudad de Tijuana no tiene asociada actividad microsísmica significativa en la cercanía de unas pocas decenas de kilómetros, sin embargo, el sistema San Miguel puede continuar hacia esta región. Aunque Tijuana está asentada en unidades sedimentarias relativamente delgadas (Delgado-Argote *et al.*, 1996), la presencia de cañones puede producir efectos de amplificación.

La ciudad de Ensenada, por otro lado, está asentada en suelo rocoso y relativamente alejada de las fallas que aparecen como potencialmente más peligrosas. En sus cercanías, han ocurrido varios temblores con $6.0 > M \geq 5.0$ (Figura 3). La posibilidad de que las dos últimas ciudades mencionadas reciban un maremoto a consecuencia de un sismo grande que ocurra en el Borde Continental es pequeña.

Desde un punto de vista más general, el lector debe entender que la ausencia o presencia de microsismicidad no necesariamente implica la ocurrencia futura de un temblor de gran magnitud. La ausencia de sismicidad en una falla o en la conexión entre dos fallas puede indicar que ya hubo un sismo

grande, tal como lo sugiere la poca sismicidad en el sector de la Falla San Miguel, donde se observó desplazamiento superficial asociado al temblor $M_L=6.6$ de 1956. Otro ejemplo notable lo ofrece la poca actividad en el Valle Mexicali después de la ocurrencia del temblor de Victoria de 1980. Por otro lado, los temblores del Valle Imperial de 1979 y de Victoria de 1980 fueron precedidos por una actividad alta que duró varios años; sin embargo, hubo actividad alta de enjambres en el Valle Mexicali-Imperial en los 60's que no fue seguida por ningún sismo de $M > 6.0$. La mayoría de los sismólogos piensa que una vacancia sísmica sobre una falla indica que ésta se romperá con un sismo grande, pero los cálculos de periodos de recurrencia de temblores destructivos están sujetos a muchas indeterminaciones, incluyendo la existencia de fallas no cartografiadas.

En resumen, existen muchas indeterminaciones en esta área del conocimiento sismológico. En todo caso, creemos que el alto peligro sísmico de la ciudad de Mexicali está bien fundamentado. Para las demás ciudades, incluyendo San Diego, California, no hay suficiente información y las normas de construcción más sanas deben, conservadoramente, corresponder con el hecho de vivir en una región de alta sismicidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del USGS, CalTech y SCEC (Southern California Earthquake Center), en sus laboratorios ubicados en Pasadena, California, por permitirnos en utilizar sus bases de datos, específicamente del Catálogo del Sur de California; L. Jones, J. Mori y K. Hafner han sido siempre atentos en atender nuestras solicitudes. Del mismo modo, agradecemos al personal de RESNOM del CICESE por su ayuda y colaboración, en particular, a F. Farfán, I. Méndez y L. Orozco. La compilación de estos mapas es una etapa en la preparación y realización de una investigación financiada por CONACYT (No. 25309-T). Los comentarios de J. Acosta, J. González, A. Martín, A. Nava, F. Suárez, A. Vidal y los revisores fueron de gran ayuda. R. Eaton ayudó a preparar el manuscrito.

REFERENCIAS

- 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.
- Biehler, S., R. L. Kovach y C. R. Allen, 1964, Geophysical framework of northern end of Gulf of California structural province, *en* T. H. Van Andel y G. G. Shor, eds., *Marine Geology of the Gulf of California: American Association Of Petroleum Geologists Memoir* 3, pp. 126-143.
- Brune, J. N., C. Lomnitz, C. Allen, F. Mooser, F. Lehner y A. Reyes, 1976, A permanent seismograph array around the Gulf of California: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 66, p. 969-978.
- Delgado-Argote, L. A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M. y Frías-Camacho, V. M., 1996, Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California, con base en rangos estructurales y la respuesta del terreno: *GEOS*, vol. 16, no.2, pp. 57-89.
- 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*, B. Simoneit y J. P. Dauphin, ed., pp. 261-283, Tulsa, Oklahoma, EEUU.
- González, J. J. y F. Suárez, 1984, Geological and seismic evidence of a new branch of the Agua Blanca fault: *Geophysical Research Letters*, v. 11, p. 42-45.
- Hauksson, E. y L. M. Jones, 1988, The July 1986 Oceanside ($M_L=5.3$) earthquake sequence in the Continental Borderland, southern California: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 78, p. 1885-1906.
- Hileman, J. A., C. R. Allen y J. M. Nordquist, 1973, Seismicity of the Southern California region. 1 January 1932 to 31 December 1972: *Seismological Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California*, 490 p.
- Hill, D. P., P. Mowinckel y L. G. Peake, 1975, Earthquakes, active faults, and geothermal areas in the Imperial Valley, California: *Science*, v. 88, pp. 1306-1308.
- Hinojosa, A., 1988, Sistema de captura y detección de eventos sísmicos para la red sísmológica de RESNOR, se basa en una computadora personal IBM-PC, Tesis de Maestría, CICESE, Ensenada, B. C., México, 119 p.
- Hinojosa, A., 1990, Procesado de archivos sísmicos RESNOR en estaciones de trabajo SUN, Reporte técnico interno, CIST9001, CICESE, Ensenada, B. C., México, 25 p.
- Johnson, C. E., 1979, CEDAR $\frac{3}{4}$ an approach to the computer automation of short-period local seismic networks; seismotectonics of the Imperial Valley of Southern California: Ph. D. dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California, 343 p.
- Lomnitz, C., F. Mooser, C. R. Allen, J. N. Brune y W. Thatcher, 1970, Seismicity and tectonics of the northern Gulf of California region, Mexico: preliminary results: *Geofísica Internacional*, v. 10, pp. 37-48.
- Medina, M. y C. Duarte, 1979, Red sísmológica de telemedición digital del campo geotérmico de Cerro Prieto, Mexicali: Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field proceedings, Comisión Federal de Electricidad, Mexicali, México, pp. 355-368.
- Nordquist, J. M., 1964, A catalogue of southern California earthquakes and associated electronic data processing programs: *Seismological Society of America Bulletin*, 54, pp. 1003-1011.
- Norris, R., C. Johnson, L. Jones y K. Hutton, 1986, The southern California Network Bulletin: *USGS Open-File Report* 86-96, 32 p.
- 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, B. Simoneit y J. P. Dauphin, ed., pp. 285-300, Tulsa, Oklahoma, EEUU.
- Sylvester, A. G., 1979, Earthquake damage in the Imperial Valley California, May 18, 1940, as reported by T. Clark: Seismological Society of America Bulletin, vol. 69, pp. 74-568.
- Vidal, A. y L. Munguía, 1998, The M_L scale in northern Baja California, México: Seismological Society of America Bulletin (sometida).
- Wong, V., J. Frez y F. Suárez, 1997, The Victoria México, earthquake of June 9, 1980: Geofísica Internacional, vol. 36-3, p. 139-159.