

3. El catálogo sísmico instrumental.

3.1 Antecedentes

Uno de los puntos fundamentales para el análisis estadístico de la sismicidad de una región, es contar con una base de datos (catálogo de sismos ocurridos en dicha región) tan homogénea y completa como sea posible, de manera que se puedan efectuar determinaciones de riesgo confiables. Sin embargo, hay varios problemas que afectan la homogeneidad en un catálogo. En esta sección se discuten algunos de estos problemas y se describe la metodología empleada para recabar la información y para evaluar el estado de homogeneidad del catálogo resultante.

Existen organismos internacionales encargados de recabar y reportar las ocurrencias de sismos en el mundo. Los reportes producidos por organismos tales como el International Seismological Center, con base en Londres, y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U S G S.) que reporta desde Golden, Colorado, incluyen sismos que han sido registrados desde principios de este siglo. Sin embargo, el que se utilice una sola fuente de información en la elaboración de un catálogo no garantiza la uniformidad de los datos aportados.

Lo anterior se debe principalmente a que pueden haber existido cambios con el tiempo, tanto en los aparatos registradores como en técnicas de registro y evaluación de parámetros sísmicos los cuales afectan los datos de las observaciones reportadas a los mencionados organismos. Esto se aúna a que las determinaciones hipocentrales (de focos sísmicos) realizadas a distancias telesísmicas (de un país a otro) no proporcionan localizaciones y magnitudes tan precisas como se requiere en un estudio a detalle.

Los catálogos de sismicidad compilados durante el presente proyecto corresponden a aquellos sismos que han ocurrido en la República Mexicana, para los cuales se cuenta con registro instrumental y datos hipocentrales. Las magnitudes mínimas han sido seleccionadas de manera que se incluyan, hasta donde es posible, todos los sismos que pueden haber causado daños de importancia.

3.2 Recopilación y selección de información.

Para tratar de circunvenir los problemas arriba mencionados, el catálogo de sismicidad han sido compilado procurando incorporar la información más confiable en cuanto a

localización, tiempo de origen y magnitud. Para lograr ésto se ha recurrido a diferentes fuentes, listando en el catálogo los parámetros que se consideran de mayor precisión.

3.2.1 Procedimiento de recopilación.

En la elaboración del catálogo, se siguieron los siguientes pasos:

1) Se consultaron los catálogos de las agencias internacionales I.S.C. y P.D.E. (del U.S.G.S.), los cuales listan, como se dijo, los sismos ocurridos en el mundo, y se extrajeron los eventos ocurridos en el territorio de México, de forma que se obtuviera una primera base de datos.

2) Los resultados de los rastreos, se cotejaron, para contar con solamente un reporte por cada sismo. Esto se hizo ya que en muchas ocasiones un evento no se encuentra en un catálogo pero sí en el otro.

3) Para el caso de eventos con información duplicada (reportada por ambas agencias) se le dió preferencia a la información proveniente del catálogo I.S.C.. En varias ocasiones la información de los eventos duplicados concordó, pero éste no fué el caso más general. La identificación de eventos duplicados no-idénticos se hizo considerando una ventana de 5 minutos en tiempo, de 100 km en radio y para magnitudes cercanas en 0.5 unidades, teniendo cuidado de evitar la inclusión de réplicas en este algoritmo. Cada duplicado eliminado se verificó posteriormente. Se le da preferencia al catálogo I.S.C. debido a que éste se elabora con un mayor número de reportes de estaciones mundiales, pues se cuenta con más tiempo de la fecha cuando se efectúa el reporte a la publicación del catálogo. El catálogo del U.S.G.S (conocido como Preliminary Determination of Epicenters ó PDE) se utiliza, generalmente, para análisis al corto plazo.

4) Se añadió la información del catálogo del Servicio Sismológico Nacional, para eventos no listados anteriormente.

5) El catálogo preliminar, fué entonces depurado consultando las fuentes de información en las que se encuentran los resultados de estudios de detalle de eventos particulares, con localizaciones y magnitudes mas precisas, a los que se dió la mayor prioridad. Para ésto se utilizaron las referencias que se encuentran en la lista incluida en el presente reporte, así como en los datos mismos.

3.3 Contenido del catálogo.

Para cada evento se enlista la siguiente información (por campo).

- Año-Mes-Día
- Hora de Origen (Tiempo Universal Coordinado, i.e. Greenwich)
- Minuto
- Segundo (hasta centésimas cuando es posible)

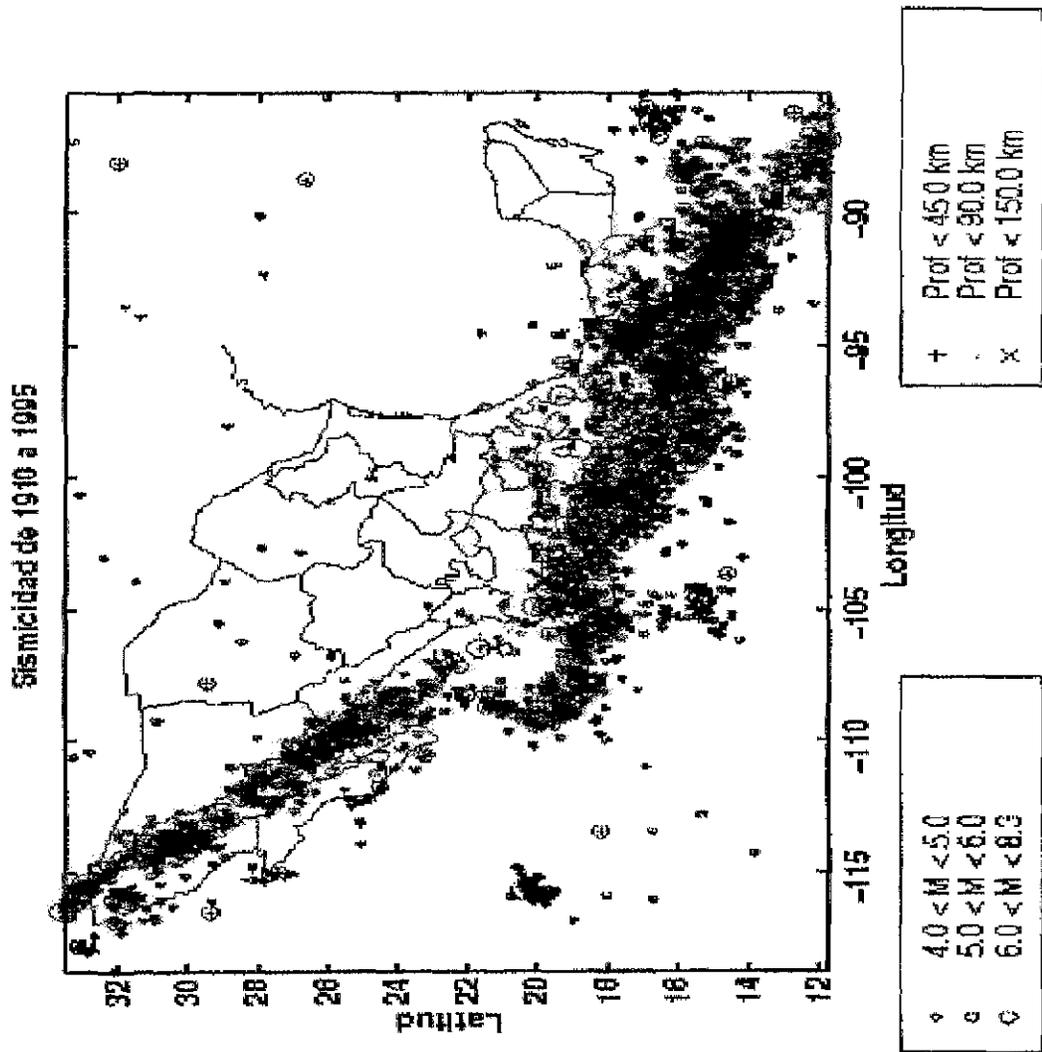


Figura 3.1. Sismicidad en base al catálogo compilado en este trabajo. Se muestran los epicentros de los eventos registrados entre 1900 y 1994.

- Latitud (hasta centésimas de grado cuando es posible)
- Longitud (idem)
- Profundidad (km), cuando no se cuenta con una estimación cuantitativa sino cualitativa, entonces se identifican a los eventos someros con una "S"
- Magnitud m_b (basada en ondas de cuerpo)
- Magnitud M_s (ondas superficiales)
- Fuente de información
- Otros datos cuando se tienen (p ej Intensidad máxima, efectos, etc.)

3.4 Discusión de la información contenida en los catálogos

Varios de los parámetros listados no requieren de mayor explicación, éste es el caso del tiempo de origen y de la localización epicentral (Latitud y Longitud). Sin embargo, cabe señalar algunos puntos importantes en cuanto a las magnitudes, profundidad y fuente de información.

Magnitudes Con respecto a la magnitud, se procuró incluir la información más precisa, como se ha dicho, de forma que dichas magnitudes no produjeran una variación importante. Los catálogos incluyen las magnitudes m_b y M_s , las cuales están determinadas con base en ondas de diferente período.

En general, es deseable emplear la magnitud M_s (o, mejor aún, la magnitud M_w para el caso de eventos muy recientes) la cual no tiene problemas de saturación hasta magnitudes del orden de 8.2 aproximadamente, siempre que ésta exista, cuando no sea así, se deberá utilizar la magnitud m_b mediante una conversión adecuada. En el caso de los eventos que no listan ninguna magnitud esto se debe a que no hay datos precisos para determinarla, sin embargo, los eventos incluidos en el catálogo se consideran de magnitud mayor a 4.0 debido al número de estaciones que los registraron a nivel mundial.

Profundidades En el caso de la profundidad, en muchas de las determinaciones hipocentrales es necesario fijar éste parámetro, pues no se cuenta con los datos suficientes para establecerla con precisión. Esto ocurre para aquellos eventos que listan una profundidad de 33 km, a los que se asigna un valor nominal para sismos de subducción, práctica común en dichas determinaciones, por lo tanto se debe tener precaución al estimar este parámetro con base en los datos listados.

Fuentes de información. En varios de los estudios referidos se listan datos sobre los mismos eventos, a los que se ha continuado refinando conforme se cuenta con mayor información, ya sea en cuanto al número de registros, la calidad de las lecturas, o a un análisis de modelado. Se les ha dado preferencia, como es de suponer, a los estudios más recientes. Algunos de éstos estudios, son análisis de datos provenientes de otros catálogos por lo que su empleo cubre la información presente en éstos. Los catálogos referidos en dichos análisis son:

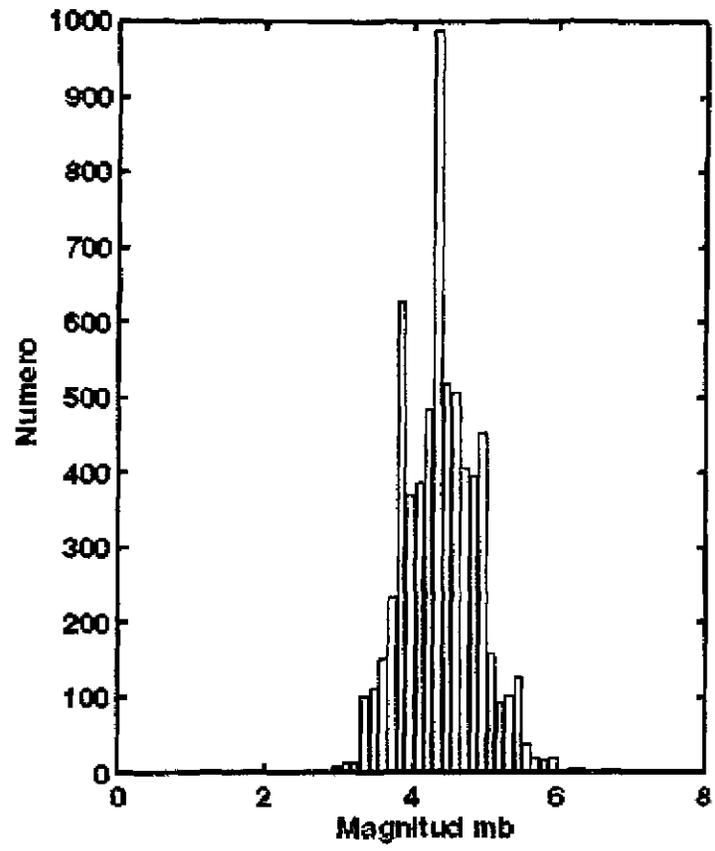


Figura 3.2a. Histogramas de número de eventos contra magnitud mb.

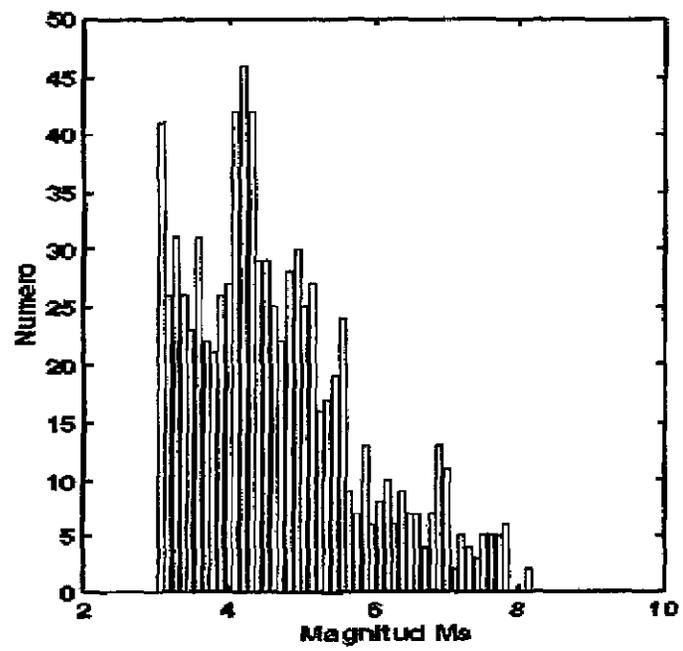


Figura 3 2b. Histograma de número de eventos contra magnitud Ms.

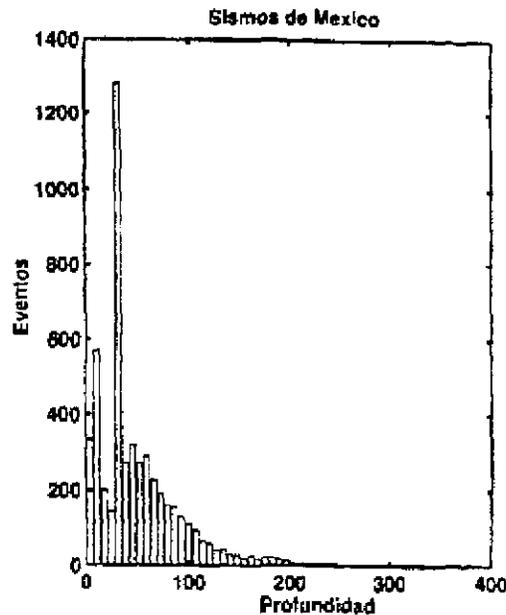


Figura 3.2c. Histograma de número de eventos contra profundidad.

- Gutenberg-Richter (Gutenberg, B y Richter, C.F., *Seismicity of the Earth and associated phenomena*, 2nd. ed., Princeton University Press, Princeton, N.J., 1954;
- Figueroa (Figueroa , J., Reporte No. 272, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1970),
- Duda, (Duda, S.J , *Secular seismic energy release in the circum-Pacific belt*, *Tectonophysics* 2, 409-452, 1965;
- Miyamura (Miyamura, S., *Provisional magnitudes of middle American earthquakes not listed in the magnitude catalogue of Gutenberg-Richter*, *Bulletin of the Intl Institute Seism Earthquake Engineering* 14, 41-46, 1976;
- Abe, (Abe, K., *Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980*, *Phys. of the Earth and Planetary Interiors* 27, 72-92, 1981.

El catálogo abarca el período 1900 a 1994 y comprende 6350 eventos, cuyos epicentros se muestran en la fig 3.1. Las figuras 3.2a y 3.2b son histogramas que muestran el número de eventos en el catálogo con magnitudes m_b y M_s respectivamente. La figura 3.2c es un histograma que permite observar la distribución de profundidades de los sismos incluidos en el catálogo. A manera de ejemplo, la tabla 2 del apéndice lista a los sismos que han causado mayor daño en este siglo en México, principalmente con base en los daños reportados para la Cd. de México.

3.5 Evaluación de la homogeneidad y completitud del catálogo instrumental

Es un hecho que la información contenida en un catálogo sísmico es un fiel reflejo de la historia de registro de una red o institución encargada del registro y reporte de los sismos ocurridos en una país o región. Sin embargo, el nivel de afectación ocasionado por los cambios en la operación instrumental o en la determinación y registro de los datos es un tema que no ha sido abordado en gran parte de los estudios que utilizan estos datos. Un factor de suma importancia es la homogeneidad con que se efectúa el mencionado reporte al paso del tiempo. Esto se debe a que, como es de suponerse, no es posible que las condiciones de operación tanto de las redes de observación como de las agencias que reportan sismicidad se mantengan estables con el transcurso del tiempo ya que es de esperar que la instrumentación y las técnicas de monitoreo cambien y se vayan mejorando al paso de los años. Sin embargo, esto no es siempre el caso.

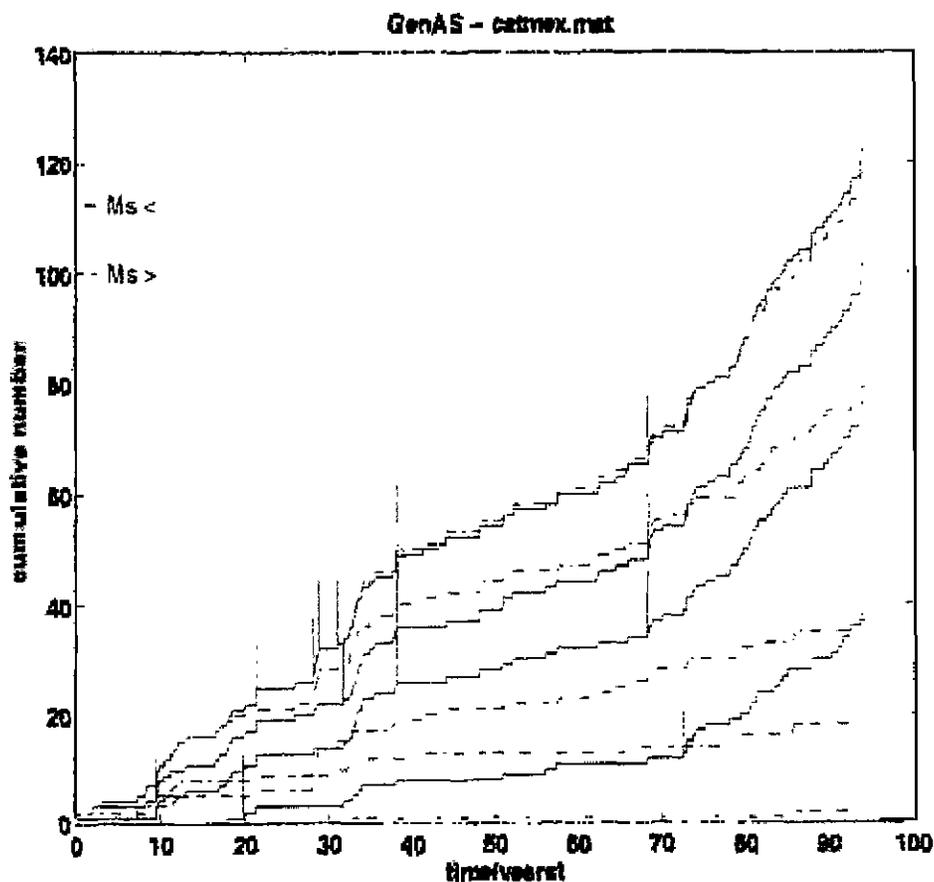


Figura 3.3 Gráfica de número acumulado de eventos con magnitud mayor a una magnitud base contra tiempo, indicando los cambios más significativos en la tendencia de acuerdo al algoritmo Genas.

Por ejemplo, Habermann (1982), empleando datos de catálogos sísmicos internacionales, encontró que los datos de sismicidad para la década de los 70 están menos completos que los datos de la década de los 60. Esto se debe a que en los 60 se dió un gran impulso a redes de monitoreo de carácter regional mientras que durante los años 70 se cerraron arreglos de estaciones que habían sido instalados algunos años atrás en Norteamérica, como los conocidos por las siglas VELA. Lo anterior ocasionó que el nivel de detección aumentara, o sea que no fuera posible detectar a sismos de magnitud pequeña como se hacía con anterioridad, sobre todo en el continente americano y en algunas regiones del Pacífico Sur.

Las variaciones de sismicidad debidas a cambios en operación de una red son difíciles de distinguir de las variaciones de carácter natural que en ocasiones se ha visto llegan a preceder a macrosismos (p.ej., Mogi, 1969; Wesson y Nicholson, 1988; Keilis-Borok et al., 1988, Varnes, 1989; Sykes y Jaumé, 1990). Algunas variaciones en sismicidad consideradas artificiales han sido reportadas en la literatura como causadas por diferentes factores entre los que se encuentran: a) un cambio en la agencia que opera el catálogo (Habermann y Wyss, 1984), b) empleo de nuevos métodos computacionales (Wyss y Habermann, 1988); c) introducción de nuevos equipos de registro y/o detección (Wyss, 1991); d) reducción o ampliación de las redes sismográficas (Habermann, 1982; Wyss, 1991), e) cambios en la definición de magnitud empleada (Perez y Scholz, 1984) Para el caso de las evaluaciones de riesgo sísmico, es necesario saber si las magnitudes reportadas no han sufrido cambios durante el período que abarca el catálogo y de ser así, de qué manera. Por ejemplo, un cambio que incrementara en 0.3 unidades a las magnitudes reportadas posteriormente a cierta fecha, puede ocasionar que se duplique el número de sismos con magnitud mayor o igual a la magnitud de afectación por unidad de tiempo (a la que llamaremos tasa de sismicidad), si se mantienen ciertas condiciones (como por ejemplo que el llamado "valor b " o tasa de excedencia no cambie).

3.5.1 Períodos de reporte homogéneo.

Cuando nos enfrentamos al problema de evaluar variaciones de sismicidad, y a fin de utilizar la suposición de que el proceso corresponde a una distribución al azar, es necesario contar, antes que nada, con una estimación de la tasa de sismicidad umbral. Para esto es necesario remover del catálogo todos aquellos eventos que no se consideren independientes. Una vez hecho esto, la estimación de sismicidad promedio se efectúa para aquellos intervalos en que las condiciones de operación de una red de instrumentos no hayan cambiado de manera significativa. De esta forma tenemos otro problema a resolver, que es el de determinar los períodos en los que se puede considerar que el reporte de sismos se desarrolló de manera homogénea. La fig. 3.3 muestra la sismicidad acumulativa (número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a una magnitud dada) con respecto al tiempo, únicamente se muestran eventos con magnitud M_S asignada y diferentes curvas corresponden a diferentes cortes en magnitud. Además se muestran dos tipos de curvas, unas para magnitudes menores a la magnitud de corte y otras para magnitudes mayores a la magnitud de corte

Los periodos en los cuales el reporte ha permanecido sin variación se pueden identificar como aquellos en los que la pendiente de la curva (i.e. la tasa de sismicidad) se mantiene constante. No es posible esperar que las variaciones se deban a causas naturales en este caso, ya que se considera una región muy amplia que involucra diferentes regímenes tectónicos. Tampoco es posible considerar que un cambio en las condiciones de esfuerzo llegara a alterar a todas y cada una de estas regiones al mismo tiempo. Variaciones importantes en la pendiente, por lo tanto, serán indicativas de que ha habido algún cambio en la operación de la red y/o compilación de los datos.

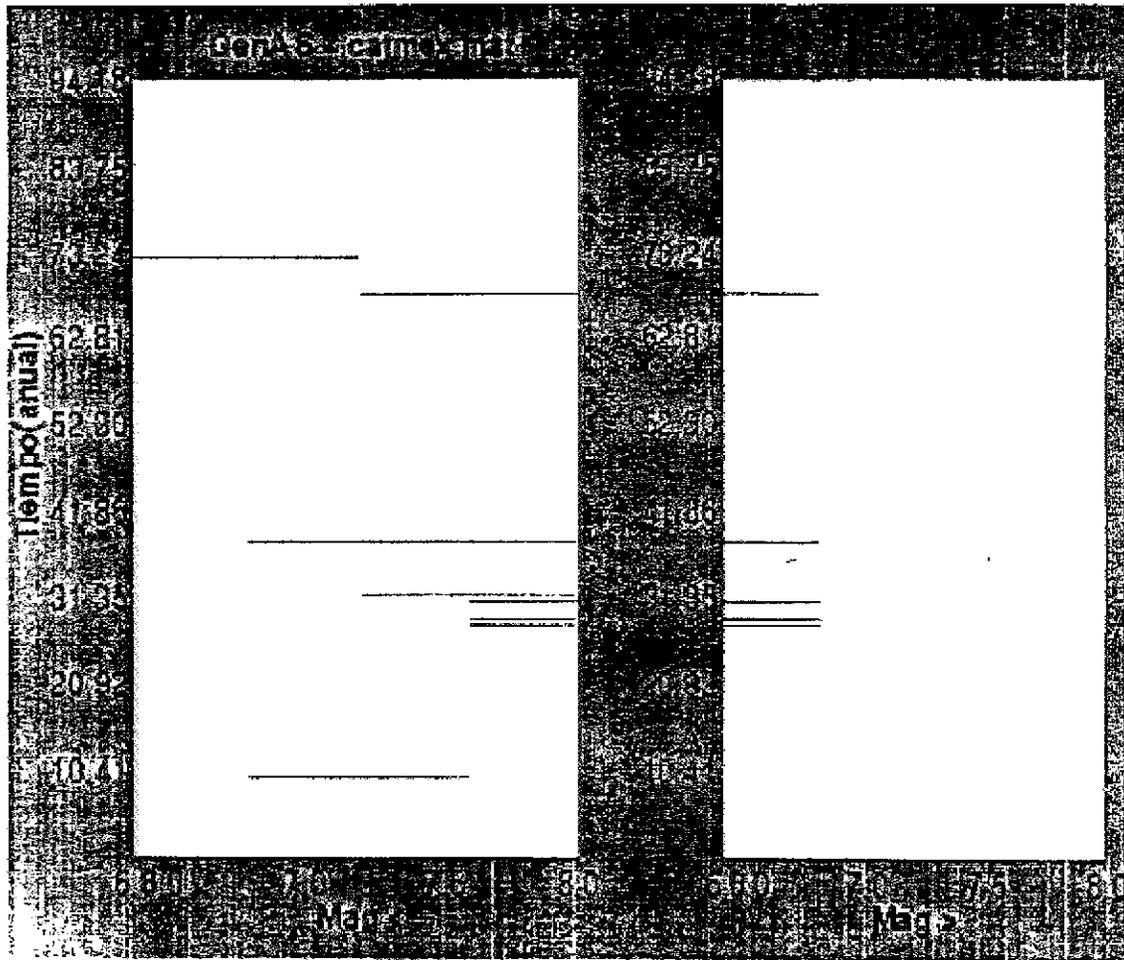


Figura 3.4 Gráfica de tiempo contra magnitud de corte y valor significativo Z . En esta gráfica, las barras horizontales indican un cambio significativo que ha ocurrido en el tiempo t y que afecta una banda de magnitud correspondiente a la longitud de la barra. La gráfica de izquierda muestra cambios en las bandas de magnitud menores que las magnitudes indicadas. La gráfica de la derecha es para bandas de magnitud mayores que las magnitudes indicadas.

Para poder identificar en forma sistemática los tiempos en los que ocurren cambios significativos en la tasa de sismicidad promedio, Habermann (1983) propuso un algoritmo al que llamó GENAS (General AS). Dicho algoritmo utiliza la prueba de valor z para la significancia estadística entre dos medias. En nuestro caso, se consideran las medias aritméticas en la tasa de sismicidad calculada para dos intervalos de tiempo dados. La mencionada prueba se basa en la hipótesis de que si tenemos dos muestras con medias aritméticas M_1 y M_2 , de tamaño N_1 y N_2 , y desviaciones estándar s_1 y s_2 , obtenidas de poblaciones con medias iguales, entonces la diferencia $M_1 - M_2$ es una variable aleatoria con distribución normal, media 0 y desviación estándar dada por

$$S = \sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}} \quad 3.1$$

Dado lo anterior, podemos calcular un valor z (e.g. Meyer, 1975):

$$z = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}} \quad 3.2$$

el cual nos ayuda a identificar si la diferencia entre dos medias existe dentro de un intervalo de confianza predeterminado. Por ejemplo, valores z mayores a 2.575 indican que la diferencia entre las dos muestras existe con una confianza superior al 99%. Otros valores corresponden a diferentes porcentajes de confianza. El algoritmo GENAS funciona comparando las medias aritméticas (en las tasas de sismicidad) antes y después de un tiempo dado, el cual se va incrementando hasta abarcar la totalidad del periodo que cubren los datos del catálogo (i.e. la ventana del intervalo anterior a comparar crece mientras que la ventana posterior decrece conforme se incrementa el tiempo). El análisis se realiza iterativamente, empleando cada tiempo de ocurrencia de un cambio significativo identificado como límite de un nuevo intervalo a estudiar. De la misma forma el análisis se repite (fig. 3.3) para diferentes cortes en magnitud y para frecuencias acumulativas hacia arriba (es decir, magnitudes \geq) y hacia abajo (magnitudes \leq). Mayores detalles sobre el funcionamiento del algoritmo se encuentran en Habermann (1983)

Las barras verticales en la fig. 3.3 identifican cambios significativos en la media de acuerdo al algoritmo. La fig. 3.4 muestra los resultados en forma de gráfica tiempo vs. magnitud y valores Z significativos. En este tipo de desplegado, las barras horizontales indican la banda de magnitud afectada por el cambio así como el tiempo al que ocurre

En cuanto a la completitud del catálogo, se estimó que se presentan diferentes magnitudes mínimas de completitud, para diferentes periodos de registro, los cuales están en concordancia con lo mencionado en párrafos anteriores. Por lo tanto se puede concluir que, en términos generales, para el periodo 1900-1994 el catálogo es completo para eventos con magnitud $M_s \geq 7.0$. En el periodo 1938-1994 el catálogo es completo cuando menos para eventos con $M_s \geq 6.5$. Para el periodo 1964-1994, la magnitud mínima de

registro completo es $M_s \geq 4.3$. Es importante mencionar que aunado a los problemas ya mencionados, existen diferencias en la magnitud mínima de reporte para diferentes regiones del país, sin embargo, para aquellas regiones en las que existen diferencias se observa que la magnitud mínima disminuye, por lo que las estimaciones dadas anteriormente siguen siendo válidas. Dichas variaciones fueron tomadas en cuenta por los cálculos de los parámetros de peligro sísmico.

3.5.2 Resultados

Se encontró que los tiempos en los cuales ocurren los cambios más significativos en el catálogo instrumental son los siguientes: 1938, 1967 y 1973. A continuación se discuten posibles causas detrás de estos cambios

1938.

La variación en sismicidad observada a partir de este tiempo puede estar relacionada a un error sistemático en las magnitudes calculadas. Este efecto ha sido discutido por Abe (1981), Linekaemper (1984) y Anderson y otros (1989) y se piensa puede deberse a una diferencia de 0.18 unidades entre las magnitudes calculadas por Gutenberg y Richter y las magnitudes reportadas actualmente.

1967.

El cambio en el número de eventos con magnitudes menores o iguales a 6.5 parece estar relacionado a un cambio en el reporte de eventos por parte de las agencias internacionales. La fecha es cercana al inicio del reporte de magnitudes M_s .

1973.

La variación observada alrededor de esta fecha puede estar relacionada a la operación de nuevas estaciones en México. Se puede apreciar que dicha variación afecta básicamente a los eventos pequeños. La fecha coincide con el inicio de la operación de la red SISMEX del Instituto de Ingeniería, UNAM, así como cambios operativos en el Servicio Simológico Nacional

3.6 Regionalización Sismotectónica.

Basándose en los datos de los catálogos instrumental e histórico, el territorio de México se subdividió, de manera global, en unidades sismotectónicas con el propósito de posteriormente definir dentro de éstas zonas sismogénicas para ser utilizadas en las estimaciones de riesgo

A continuación, se describen las características generales de las regiones, así como el criterio empleado en su definición.

3.6.1 Criterios de selección

El territorio de México se subdividió en 19 regiones principales considerando:

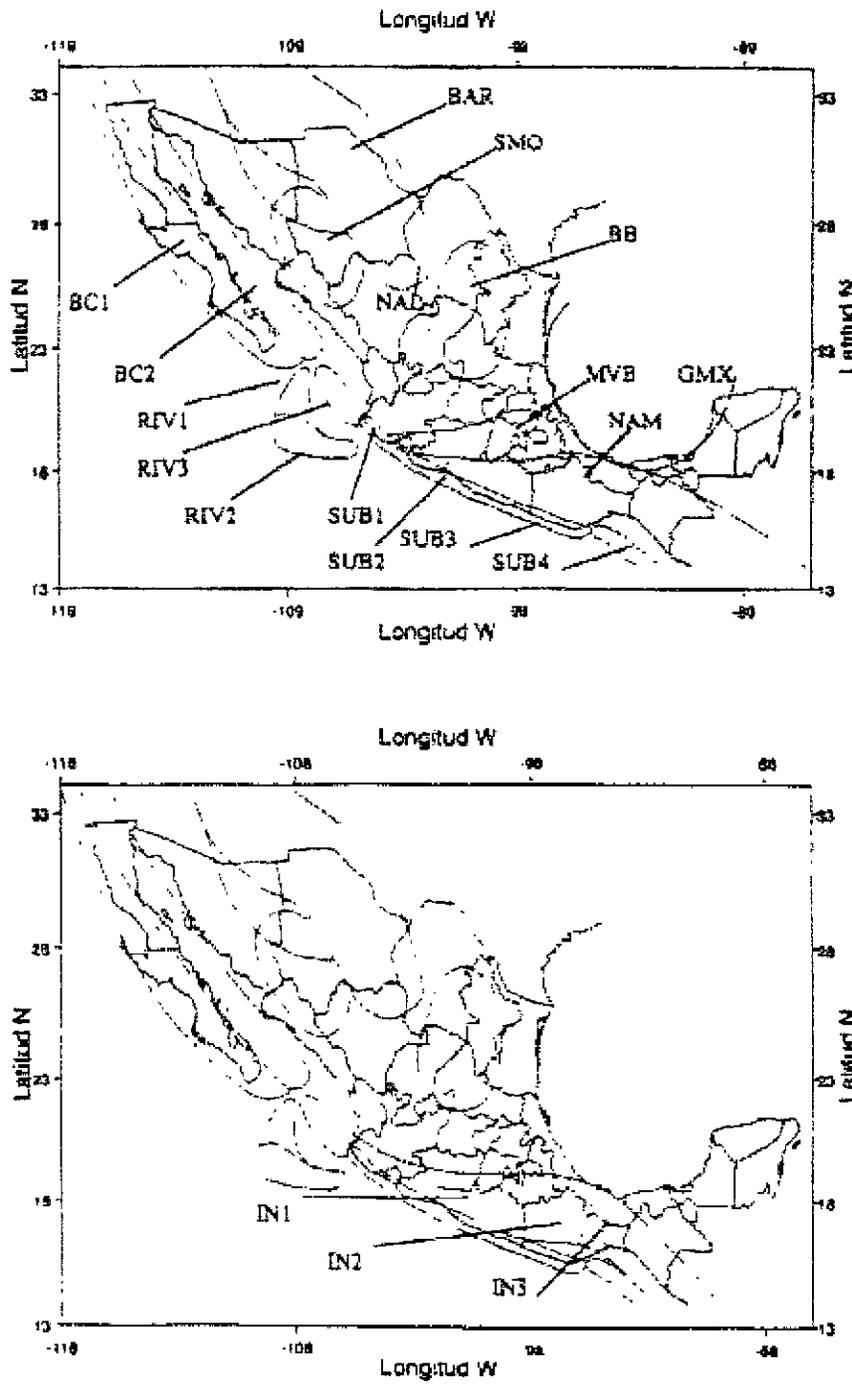


Fig 3.5. Zonas sismotectónicas de México de acuerdo a la regionalización propuesta en este trabajo.

- a) La localización hipocentral de eventos de características similares.
- b) Las características tectónicas comunes de la zona.
- c) Los mecanismos focales y/o patrones de fallamiento.
- d) Las características principales de la liberación de energía de los sismos dentro de cada región.
- e) La historia sísmica de cada región
- f) Un criterio adicional fué el de reducir a un mínimo el número de regiones primarias, de las cuales se pudiese partir para posibles subdivisiones futuras más refinadas.

Para aquellas regiones que contienen una alta densidad de estaciones de registro sísmico, y por lo tanto constituyen un registro más detallado de la historia sísmica instrumentada, se propone un subdivisión de acuerdo a las características de la energía liberada por los grandes eventos, así como del contenido de frecuencia de las señales sísmicas. Conforme se obtengan más y mejores datos, será posible subdividir aún más cada región incorporando mayores detalles.

Los mecanismos focales y las características de fallamiento se seleccionaron basados en diferentes datos incluyendo mecanismos compuestos (usando réplicas principalmente), microsismicidad (para determinar lineamientos) y actividad de enjambres. Los eventos históricos se consideraron para delimitar las regiones, especialmente en los casos en los que la actividad normal es demasiado baja, así como para aquellas regiones que no incluyen sismos grandes durante el período de registro instrumentado. Una selección cuidadosa permitió generar un regionalización del país de primer orden sin introducir sesgos ocasionados por las variaciones en cobertura sismográfica tanto en tiempo como en espacio

3.6.2 Regiones sismotectónicas de México.

Las regiones (fig. 3.5) en las que se ha dividido al país son:

1. Región SUB1.

Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción (profundidad < 40 km). Zona de transición de la convergencia entre placas Rivera y Norteamericana (NOAM) a la convergencia Cocos-NOAM.

2. Región SUB2

Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción Convergencia Cocos - NOAM

3. Región SUB3

Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM, zona de transición.

4. Región SUB4.

Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción Convergencia Cocos - Caribe.

5. Región IN1.

Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ($40 \text{ km} < h < 120 \text{ km}$). Relacionados a la interface Cocos-NOAM.

6. Región IN2.

Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia Relacionados a la zona de transición.

7. Región IN3

Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia. Relacionados a la interface Cocos-Caribe.

8. Región MVB.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros ($h < 40 \text{ km}$), dentro de la provincia tectónica del Eje Volcánico Mexicano (Mexican Volcanic Belt).

9 Región NAM.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros

10. Región BC1.

Zona de eventos intraplaca (Pacífico), profundidad $< 20 \text{ km}$, Península de Baja California.

11 Región BC2.

Zona de eventos interplaca (Pacífico-NOAM), profundidad $< 20 \text{ km}$, Península de Baja California.

12 Región SMO.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincia Sierra Madre Occidental.

13. Región BAR.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincias de Cuencas y Sierras - Fisura del Río Bravo (Basin and Range-Río Grande Rift).

14. Región BB.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin).

15 Región RIV1

Zona de eventos interplaca someros de fallamiento normal principalmente, interface Pacífico-Rivera

16. Región RIV2.

Zona de eventos interplaca someros de fallamiento de rumbo principalmente, interface Pacífico-Rivera.

17. Región RIV3.

Zona de eventos interplaca de subducción someros. Interface Rivera-NOAM.

18. Región GMX.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros. Región del Golfo de México.

19. Región NAL.

Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros de baja magnitud-baja periodicidad.

3.6.3 Características de las regiones.

REGIONES SUB1, SUB2 y SUB3.

Estas regiones comprenden la zona de mayor acoplamiento entre placas en subducción. Para definir la anchura de estas regiones se consideraron las dimensiones máximas, normales al eje de la trinchera, de las áreas de réplicas de los mayores sismos de este tipo. También se tomaron en cuenta las localizaciones detalladas en estudios individuales de eventos grandes (p.ej. Zúñiga et al., 1993; UNAM Seismology Group, 1986; Singh et al., 1985b; Valdés et al., 1982; Singh et al., 1981; Reyes et al., 1979; etc).

REGION SUB1.

Esta zona comprende la subducción de la parte oriental de la placa Rivera por debajo de NOAM, incluyendo la mayor parte de la zona costera del estado de Jalisco y la costa occidental del estado de Colima. La periodicidad de los eventos que ocurren en esta región es menor que la de las demás regiones de subducción hacia el este. Esto se puede deber a la edad de la litósfera oceánica en esta región ya que es más joven que la de la placa de Cocos. Su potencial sísmico, sin embargo, es mayor que el del resto de la placa de Rivera al oeste.

Grandes eventos ocurren poco frecuentemente pero pueden alcanzar magnitudes hasta de 8.2. Durante este siglo encontramos 4 eventos con magnitud $M_s \geq 7.0$ (hasta 1994). Los eventos generalmente muestran fallamiento de cabalgadura.

En esta zona ocurrió el sismo del 3 de junio de 1932 (Eissler y McNally, 1984; Singh et al., 1985b) el cual es el más grande registrado en todo México con una magnitud de $M_s = 8.2$. Otros eventos de importancia son los ocurridos el 1 de enero de 1900 ($M_s = 7.4$) y el 30 de noviembre de 1934 ($M_s = 7.0$).

REGION SUB2.

Esta zona corresponde a la zona de mayor acoplamiento entre Cocos y NOAM y comprende las áreas costeras de los estados de Colima, Michoacán, Guerrero y el occidente de Oaxaca. Esta zona presenta la mas alta periodicidad de temblores de magnitud $M > 7.0$. La zona muestra un mayor deslizamiento acumulado con respecto al tiempo, comparado con los segmentos de subducción vecinos, ocasionado por la mencionada alta frecuencia de ocurrencia. Los sismos generalmente tienden a ocurrir en segmentos particulares (aproximadamente seis) los cuales pueden ser diferenciados por medio de las áreas de réplicas.

Durante este siglo han ocurrido 15 eventos con $M_s \geq 7.0$ en esta zona, los cuales han causado gran daño en varias ciudades aledañas. El último ejemplo de sismos destructores en la zona lo constituyen los sismos del 19 y 21 de septiembre de 1985 de magnitudes $M_s = 8.1$ y 7.6 respectivamente.

REGION SUB3.

Esta zona es una zona transicional entre las dos tendencias principales de la subducción de la placa de Cocos en el territorio de México. El lindero occidental está basado en un cambio brusco en sismicidad, las características generales de las fuentes sísmicas y en la diferencia en rasgos tectónicos que se presentan alrededor de los $99^\circ W$ de longitud. Su frontera oriental se definió en base a otro cambio en sismicidad así como por ser el sitio en donde la cordillera submarina de Tehuantepec intersecta a la trinchera.

Durante el período instrumentado, 13 eventos con $M_s \geq 7.0$ han ocurrido en esta zona. La máxima magnitud alcanzada por los sismos en la región es de 7.8, habiéndose determinado dicha magnitud para los terremotos del 17 de junio de 1928; 23 de agosto de 1965; y 29 de octubre de 1978. Estos sismos afectaron principalmente la Cd. de Oaxaca, el daño en la Cd. de México fué pequeño. Eventos importantes en el siglo XIX son los ocurridos el 11 de mayo de 1870 ($M_s = 7.9$) y el 2 de noviembre de 1894 ($M_s = 7.4$).

REGION SUB4

La frontera occidental de esta zona corresponde al lugar donde la subducción cambia de carácter ya que el ángulo de entrada varía de 15° en promedio, al oeste de este punto, a aproximadamente 35° en promedio hacia el este. También corresponde a un cambio en la placa suprayacente, de NOAM a Caribe. Actualmente se supone que el cambio ocurre de manera gradual (Ponce et al., 1991) y no abruptamente como anteriormente se había propuesto (Counil y Achache, 1987) La zona de Wadati-Benioff que corresponde a esta región, permanece aproximadamente continua hacia el sur hasta el norte de Costa Rica, en América Central. La zona SUB4 comprende la porción costera del occidente de Oaxaca y la totalidad de la de Chiapas.

Los más grandes eventos en esta zona dentro del período instrumentado, tuvieron lugar el 1o de enero de 1904 ($M_s = 7.7$) y el 13 de noviembre de 1972 ($M_s = 7.0$). Estos parecen ser los únicos eventos someros en la zona ocurridos durante este siglo. Existe, sin embargo, cierto grado de incertidumbre en la localización del evento del 23 de septiembre

parecen ser los únicos eventos someros en la zona ocurridos durante este siglo. Existe, sin embargo, cierto grado de incertidumbre en la localización del evento del 23 de septiembre de 1902, cuya magnitud alcanzó los 8.2 grados (Kanamori y Abe, 1979). Este sismo se considera como de profundidad intermedia pero se carece de información suficiente para poder establecer con precisión su localización hipocentral.

La llamada "Brecha de Tehuantepec" se localiza dentro de la zona SUB4, la cual se caracteriza por ausencia de sismos de magnitud $M_s \geq 7.0$. No se conoce si esta región tiene un período de recurrencia anormalmente grande o bien si es una porción de la zona de subducción de comportamiento asísmico. De cualquier forma, no se puede dejar de considerar la posibilidad de ocurrencia de un sismo grande.

REGION IN1

Esta zona comprende la sección profunda de la zona de subducción y corresponde a la extensión de las zonas SUB1 y SUB2. Los eventos que ocurren en esta zona muestran fundamentalmente mecanismos focales de falla normal, con sus ejes de máxima tensión en la dirección paralela al echado de la placa subducida (Dewey y Suárez, 1991). La magnitud de dichos eventos decrece con la distancia a partir de la trinchera. Los sismos se localizan dentro de las placas de Rivera y Cocos en el rango de profundidad entre los 40 y los 200 km. La mayoría de los eventos tienden a ocurrir alrededor de los 120 km de profundidad. La sismicidad en la zona IN1 es considerablemente menor que la de la zona IN2

En este siglo han ocurrido dos eventos con magnitud ≥ 7.0 localizados en la zona IN1, el 26 de julio de 1937 ($M_s = 7.2$) y el 6 de julio de 1964 ($M_s = 7.2$). En el rango $M_s \geq 6.0$ contamos solamente 15 eventos durante el período de registro. Históricamente, el sismo del 18 de junio de 1858 ($M_s = 7.5$) se considera un evento de profundidad intermedia, pero existe la posibilidad de que en realidad haya tenido una profundidad menor. Este evento es el segundo en orden de daños a la Ciudad de México durante el siglo XIX, y existe la posibilidad de que haya liberado aún más energía que el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Anderson et al., 1989)

REGION IN2

La transición entre las zonas IN1 e IN3 ha sido denominada zona IN2. Se caracteriza porque los eventos de profundidad entre 60 y 100 km ocurren a mayor distancia de la trinchera que en las zonas vecinas. Es también una zona con aparente carencia de sismos de profundidad intermedia a distancias entre 100 y 200 km de la trinchera. La zona corresponde a la extensión a profundidad de la región SUB3

Eventos importantes en la zona ocurrieron el 3 de febrero de 1911 ($M_s = 7.2$); el 10 de febrero de 1928 ($M_s = 7.7$); el 15 de enero de 1931 ($M_s = 8.0$); el 26 de julio de 1937 ($M_s = 7.2$); y el 6 de enero de 1948 ($M_s = 7.0$). Más recientemente, encontramos el sismo del 28 de agosto de 1973 ($M_s = 7.3$) de Córdoba-Orizaba (Veracruz), y el el Huajuapán de León, Oaxaca, del 10 de octubre de 1980 ($M_s = 7.0$). El gran terremoto de 1931 ha sido determinado como un evento de fallamiento normal el cual puede haber roto

incertidumbre en los períodos de recurrencia (generalmente tomados como del orden de 150 años), este tipo de eventos antepone un gran riesgo para los centros de población del centro de México.

REGION IN3

Esta región corresponde a la extensión a profundidad de la zona SUB4. Comprende sismos, principalmente del tipo de fallamiento normal, de profundidad intermedia que ocurren, como en el caso de las zonas IN1 e IN2, dentro de la placa en subducción. Debido al mayor ángulo de entrada de la placa, los eventos ocurren más cercanos a la trinchera. La densidad de sismicidad umbral es mucho mayor que en la vecina zona IN2, y su distribución es más homogénea. La zona comprende la transición de la subducción de Cocos por debajo de NOAM, a subducción bajo la placa de Caribe.

Durante este siglo, 5 sismos con $M_s \geq 7.0$ han tenido lugar en la zona. El sismo más reciente ocurrió el 29 de abril de 1970 ($M_s = 7.1$). Como ya se mencionó, el evento del 23 de septiembre de 1902 ($M_s = 8.2$) se considera como de profundidad intermedia pero con alto grado de incertidumbre.

REGION MVB

Esta zona comprende los eventos que ocurren en la parte somera de la placa continental, asociados principalmente a esfuerzos tensionales. Estos mismos esfuerzos están relacionados con la ubicación de la Faja o Cinturón Volcánico Mexicano (Mexican Volcanic Belt). Existen, sin embargo, algunos sismos localizados muy próximos a los eventos de falla normal (régimen de tensión), que muestran fallamiento inverso. Estos diferentes tipos de fallamiento pueden deberse a un balance entre los esfuerzos inducidos por la gravedad en las altas topografías del cinturón y los transmitidos por la interacción de las placas (Dewey y Suárez, 1991). Las profundidades de los sismos en esta zona son generalmente menores a los 20 km. Este tipo de eventos han sido muy destructivos debido a su proximidad a la Cd de México y a su poca profundidad.

Los sismos ocurridos el 19 de noviembre de 1912 ($M_s = 7.2$), el 3 de enero de 1920 ($M_s = 6.4$); y el 29 de junio de 1935 ($M_s = 6.9$) son los mayores en este siglo. Entre los sismos ocurridos el siglo pasado, el evento del 11 de febrero de 1875, ubicado cercano a la Cd de Guadalajara, es uno de los que requieren especial atención. A este evento se le ha estimado una magnitud de 7.1, y debido tanto a su proximidad a la Cd de Guadalajara como a su poca profundidad, el riesgo relacionado a otro evento similar debe considerarse con cuidado.

REGION NAM.

Esta región comprende la actividad somera (profundidad menor a 40 km) que tiene lugar en la placa continental al sur de la Faja Volcánica Mexicana. A pesar de que el nivel de actividad para magnitudes $m_b \geq 4.5$ (rango para el que el catálogo se considera completo desde 1964) se encuentra uniformemente distribuido a través de gran parte de la zona, existe una mayor tasa de sismicidad en la zona del Istmo de Tehuantepec. La mayoría de los eventos son de fallamiento normal.

En el período instrumental se han registrado siete sismos de $M_s \geq 7.0$. El más grande ocurrió el 14 de diciembre de 1935 con una magnitud estimada de $M_s \geq 7.2$. Ya que todos estos sismos tuvieron lugar antes de 1950, la estimación de sus profundidades es cuestionable y existe la posibilidad de que se trate de eventos pertenecientes a la zona de profundidad intermedia.

REGION BC1.

Esta zona comprende la actividad asociada a los eventos someros intraplaca en el área de Baja California. Estos eventos muestran un modo de fallamiento variable. Los eventos más grandes no alcanzan magnitud mayores a los 6.0 grados. Sin embargo son susceptibles de causar daño a algunas poblaciones de la península.

REGION BC2.

Esta región comprende la actividad relacionada principalmente con la interface entre las placas Pacífico y NOAM. Los eventos de esta zona muestran mecanismos de falla de rumbo y normal, dependiendo de su situación y proximidad ya sea a centros de acreción o fallas transformadas. La parte norte de esta zona corresponde a un sistema de fallas que se ramifica hacia el norte en dos secciones principales, uno de los cuales es el sistema de la Falla de San Andrés en California.

A pesar de que los mecanismos que originan los sismos en esta zona son similares a los de los eventos que ocurren al norte en California, existe una diferencia notable en términos de nivel de aceleración del terreno. Los mapas de isosistas para eventos de magnitud similar muestra que los sismos en el norte de Baja California generan mayores aceleraciones que sus contrapartes en el Valle Imperial. Por ejemplo, las isosistas para el evento del El Alamo en 1956 ($M_s = 6.8$) muestran un área para la intensidad VI aproximadamente 30 veces mayor que el área de igual intensidad para el temblor del Valle Imperial de 1979. Esto se traduce en aceleraciones producidas por el sismo de El Alamo que son al menos dos veces mayores que las del evento del Valle Imperial a distancias similares (Castro, 1983).

REGION SMO.

Esta zona es una región de baja actividad, posiblemente relacionada al régimen de esfuerzo controlado por el balance entre los esfuerzos gravitacionales en la Sierra Madre Occidental y aquellos esfuerzos inducidos por la cercana interacción de las placas. También puede tener relación a la extensión de la provincia tectónica de la Fisura del Río Bravo (Río Grande Rift). Los eventos que ocurren en esta zona no han sido completamente estudiados en detalle y no se cuenta con mecanismos focales debido a la poca magnitud de los sismos. Todos los eventos conocidos en la región tienen magnitudes menores a 5.0.

REGION BAR.

Esta zona delimita a los temblores que tienen lugar en la posible continuación de las provincias de la Fisura del Río Bravo y de Cuencas y Sierras (Basin and Range). Los

eventos se caracterizan por su poca profundidad, baja magnitud y escasa frecuencia de ocurrencia. Los estudios de campo señalan la presencia de fallas de mecanismo normal y de rumbo, principalmente debido a esfuerzos tensionales horizontales (Natali y Sbar, 1982). Esto está en concordancia con observaciones de elongación en pozos las cuales indican una dirección este-oeste para los mínimos esfuerzos principales (Suter, 1987).

Esta región es importante ya que es aquí donde se localizó el sismo de Bavispe, Sonora que tuvo lugar el 3 de mayo de 1887. La magnitud de este evento ha sido estimada en 7.5 (Natali y Sbar, 1987). Los mapas de isosistas indican que afectó los estados de Sonora y Chihuahua de manera considerable. Si un evento similar ocurre en nuestros días, lo cual no es posible descartar, podría haber serias consecuencias para las ciudades de Chihuahua, Cd. Juárez, Hermosillo y El Paso. Este evento es uno de los mayores sismos intraplaca que se han registrado en cualquier lugar de Norteamérica. Aún cuando el período de recurrencia de este sismo se considera órdenes de magnitud mayor que los de los demás eventos en México, es necesario tomar en cuenta que existen otras fallas en el área en condiciones semejantes y de potencial desconocido.

La mayor magnitud registrada en este siglo para los eventos de la zona es 6.4. Sólo dos eventos con $M_s \geq 6.0$ caen dentro de los linderos de esta región de acuerdo al catálogo instrumental.

REGION BB.

La provincia que prevalece en el Noreste de México es la conocida como Cuenca de Burgos (Suter, 1987). Esta región comprende a los eventos de baja magnitud que ocurren en los estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. No se cuenta con información detallada de mecanismos focales pero las elongaciones de los pozos en la zona muestran al eje de esfuerzos principales mínimos en la dirección NW-SE (Suter, 1987). Existe una ligera tendencia de alineamiento para los epicentros catalogados en la dirección norte-sur. Las magnitudes de los eventos son menores a los 5.0 grados.

REGION RIV1

Esta zona delimita a los sismos que ocurren en la Dorsal del Pacífico Este como parte de la interface entre las placas Pacífico y Rivera. Su mecanismo es principalmente de falla normal.

REGION RIV2.

Esta región corresponde a la frontera sur de la placa de Rivera. Debido a que es un régimen de falla transformada, los mecanismos de los sismos son principalmente de falla de rumbo.

Durante este siglo han ocurrido 9 eventos con $M_s \geq 6.0$ en la región. El evento más grande tuvo lugar el 29 de septiembre de 1950 con una magnitud $M_s = 7.0$.

REGION RIV3.

Esta región comprende la escasa y difusa actividad de la sección occidental de la interface Rivera-NOAM. No se ha determinado aún la razón por la cual existe una drástica variación en sismicidad al compararse con la zona de la trinchera hacia el este (zona SUB1)

Se tiene registrado un evento en esta región en el rango $M_s \geq 6.0$ Ocurrió el 4 de diciembre de 1948 con una magnitud $M_s = 6.9$.

REGION GMX

Esta región comprende a los sismos que ocurren en el Golfo de México y áreas circunvecinas. La sismicidad es escasa pero sin embargo es importante en el sentido de que los eventos son de especial riesgo tanto para las comunidades de la costa como para estructuras del tipo de las plataformas marinas de explotación petrolera.

Un evento que vale la pena mencionar debido a la localización que se ubica cercana a los sitios actuales de plataformas es el del 26 de agosto de 1959 ($m_b = 6.4$)

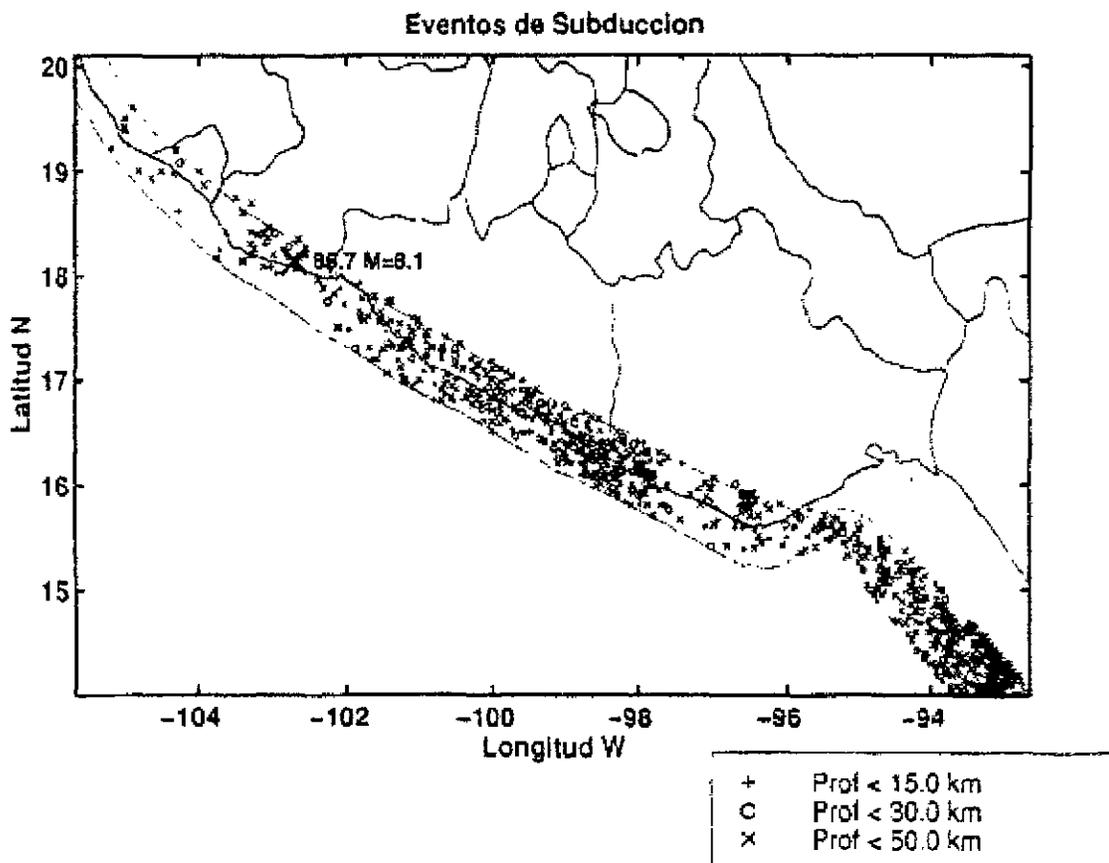


Fig 4. 1a. Temblores de subduccion

REGIONAL.

Finalmente, el resto de las zonas activas de México, con bajo potencial de daños, han sido agrupadas en la zona NAL. Esta es una región donde ocurren eventos de magnitudes menores al nivel de detección nacional ($m_b \leq 4.5$), localizables sólo por redes de cobertura local.

3.6.4 Discusión.

La regionalización propuesta es de ningún modo única, sin embargo proporciona una división coherente y sistematizada que incorpora la mayor parte de los conocimientos sobre características generales de los sismos en diferentes partes del país además de que considera el potencial destructivo de los eventos más importantes que han ocurrido en el pasado

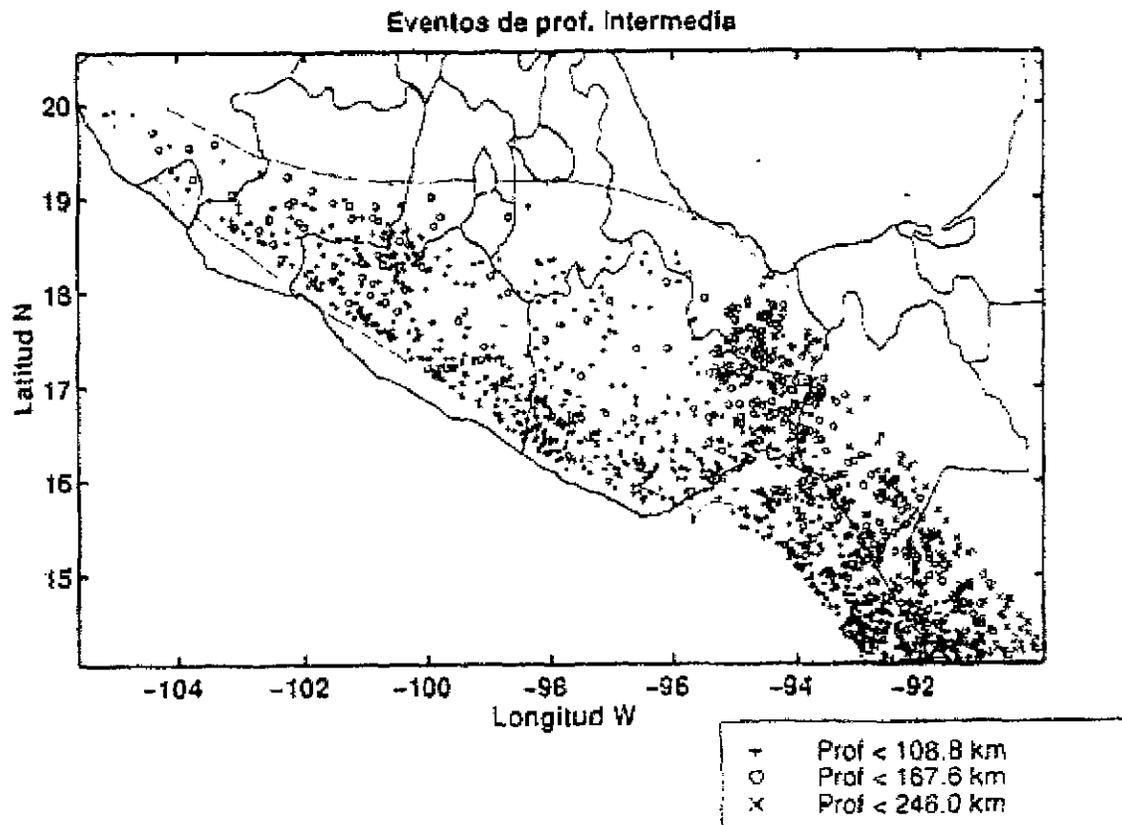


Figura 4.1b. Temblores de profundidad intermedia