

RIESGO SÍSMICO EN MÉXICO: LECCIONES APRENDIDAS DEL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985.

Mario Ordaz Schroeder.

Jefe del Área de Riesgos Geológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Investigador, Instituto de Ingeniería (UNAM). MÉJICO.

RESUMEN

Como consecuencia del terremoto del 19 de septiembre de 1985 ($M_S=8.1$), que provocó cuantiosas pérdidas a la vida y la propiedad de los habitantes de la ciudad de México, se hizo necesaria una profunda reevaluación de los aspectos más relevantes para el diseño antisísmico de las construcciones y la prevención de desastres ocasionados por temblores en México. Se iniciaron en 1985 diversos proyectos de investigación encaminados a dilucidar las causas de la catástrofe y a proponer acciones para mitigar las consecuencias de eventos similares en el futuro.

En el presente artículo se da un panorama general sobre los siguientes tópicos. (1) el peligro sísmico a que se encuentra sometida la República Mexicana; (2) la naturaleza del terremoto de 1985, con énfasis en los movimientos del terreno registrados en la ciudad de México, y las causas de su gran destructividad; (3) los daños ocasionados, (4) algunos de los proyectos de investigación de trascendencia que se han emprendido desde 1985 y la manera en que sus resultados han sido, o serán, llevados a la práctica. Finalmente se hacen comentarios sobre los aspectos en que, a juicio del autor, son necesarios esfuerzos adicionales para un mejor entendimiento de los fenómenos en juego y una más adecuada política de prevención de desastres sísmicos

ANTECEDENTES

En la figura 1 se muestra un mapa de México en que se señalan los principales accidentes tectónicos que originan temblores destructivos en este país. Destacan, tanto por su tamaño como por su

frecuencia de ocurrencia, los que se originan en el contacto entre las placas de Cocos y Norteamérica y en la frontera entre esta última y la pequeña placa de Rivera, frente a las costas del Pacífico mexicano. En estas fronteras de placa tienen lugar procesos de subducción, en virtud de los cuales las placas oceánicas más ligeras, Rivera y Cocos, se sumergen bajo la más pesada placa continental. Estos movimientos son los responsables de la gran mayoría de los temblores que han provocado desastres en México. En particular, los eventos de 1907, 1911, 1941, 1957, 1979 y 1985 han producido cuantiosas pérdidas en la ciudad de México, localizada a más de 250 km de las áreas en que se han producido tales terremotos. El temblor de mayor magnitud que ha tenido lugar en este siglo es el llamado temblor de Jalisco ($M=8.2$) de junio de 1932.

Aunque los temblores de subducción, con epicentros cercanos a la costa del Pacífico, son con mucho los que mayores daños han ocasionado, la República Mexicana esta sometida a la acción de temblores de diferentes orígenes. Se producen temblores de importancia también en el interior del continente como resultado de la ruptura de la placa de Cocos subducida (ver figura 2), a profundidades de entre 60 y 100 km. Estos eventos, asociados a fallamiento normal, han causado gran destrucción por lo menos en 1931 (Oaxaca), 1973 (Orizaba, Jalapa, Ciudad Serdán) y 1980 (Huajuapán de León); de hecho, la mayor aceleración máxima del terreno registrada en algún sitio firme de la ciudad de México (64 cm./s^2) fue producida por este último temblor.

Existen fallas superficiales de transformación que han ocasionado pérdidas por sismo en el noroeste del país, estas fallas obedecen a la misma tectónica que ha generado el sistema de fallas de

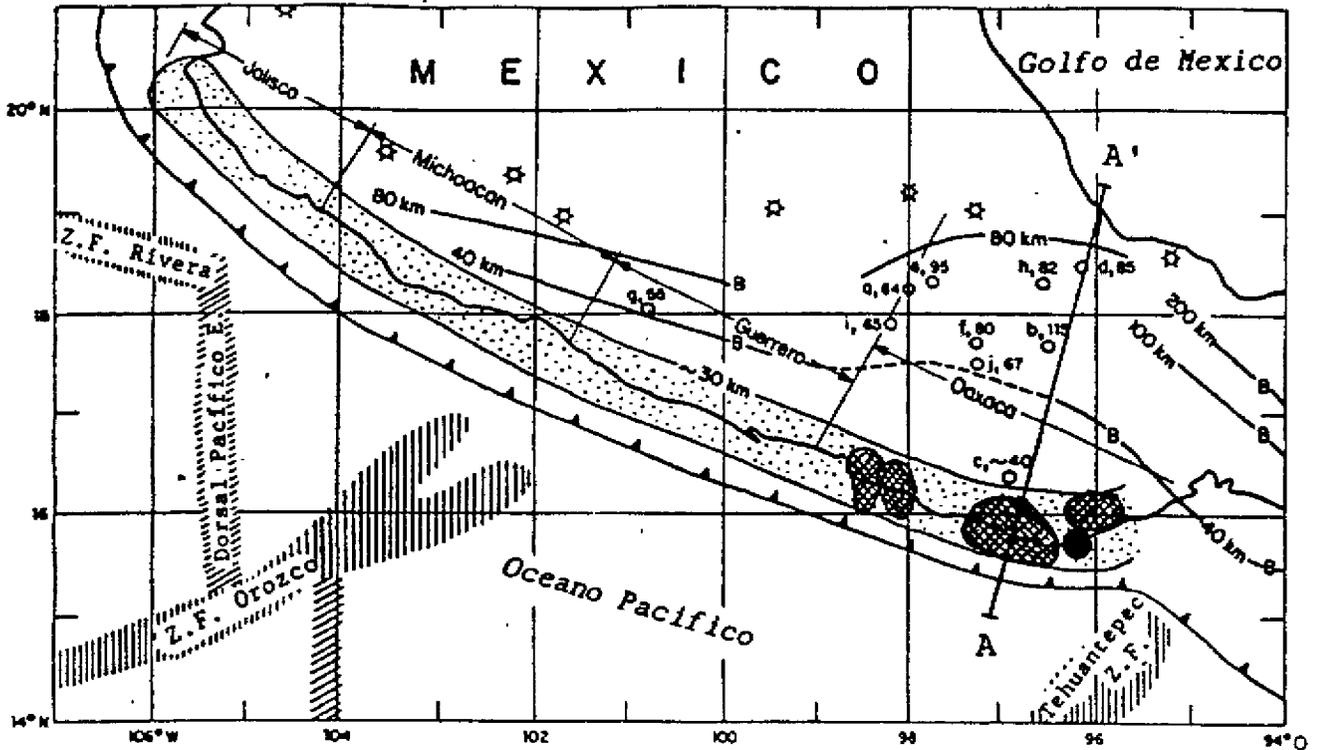


Figura 1. Mapa tectónico de México. La banda sombreada de 80 km de ancho cerca de la costa señala la región en que las placas de Cocos y Norteamérica están fuertemente acopladas. Las áreas de ruptura de los grandes temblores de subducción están contenidas en esta banda. Se muestran, achuradas, las áreas de réplicas de temblores de subducción recientes. Los círculos abiertos indican epicentros de fallas normales en la placa subducida; los números junto a los círculos indican la profundidad del foco. Se muestran también las curvas de nivel de la zona de Benioff; nótese que la pendiente de ésta zona es menor en la región de Oaxaca que en otras partes. La sección A-A' se muestra en la figura 2.

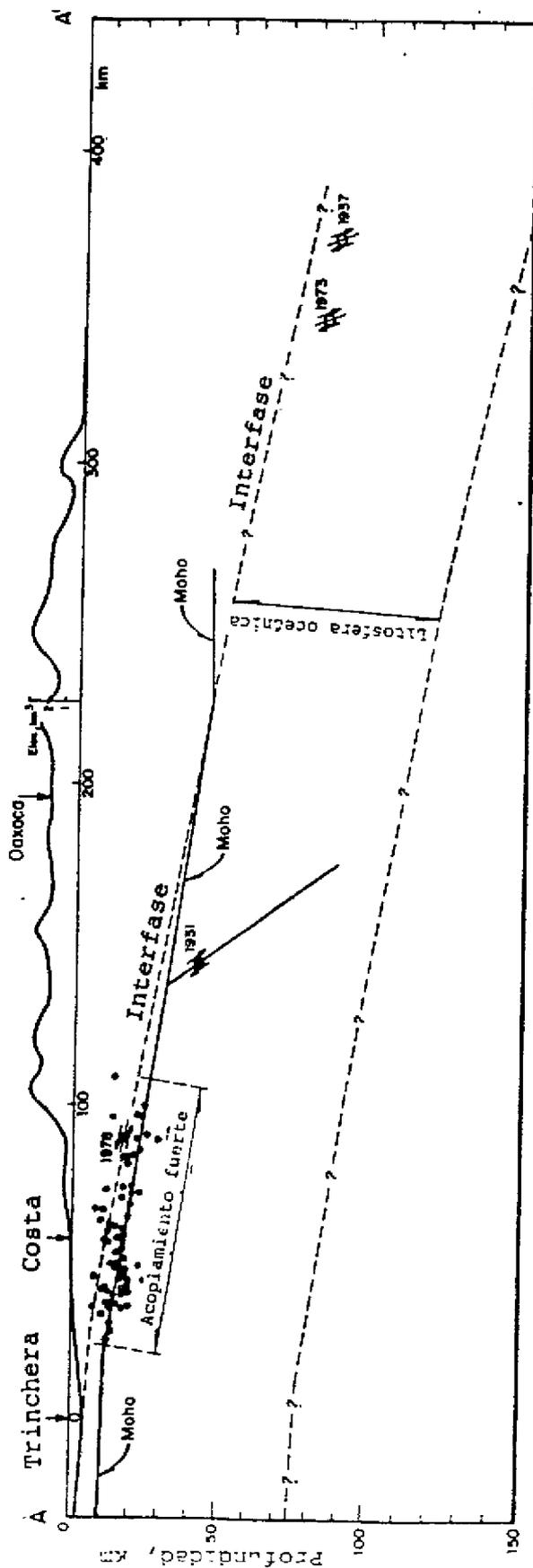


Figura 2. (Modificada de Singh, et al., 1985). Sección A-A' (ver figura 1). Se muestra la zona de fuerte acoplamiento entre las placas de Cocos y Norteamérica, inferida de las localizaciones de las réplicas del sismo del 29 de Noviembre de 1978 ($M_s=7.8$). Hacia el interior del continente, los temblores son de fallamiento normal y ocurren a profundidades mayores a 40 km.

San Andrés en California, EUA. Los eventos de 1976 y 1979 produjeron severos daños en esta región de México. El Eje Volcánico Mexicano (ver figura 1) está cruzado también por numerosas fallas superficiales capaces de provocar terremotos de consideración. Un ejemplo de ellos es el sismo de 1912 en las cercanías de Acambay, Estado de México ($M=7$) que provocó algunos daños en la ciudad de México y la devastación de Acambay. En 1920, en los alrededores de la ciudad de Jalapa, Veracruz, ocurrió un sismo con $M=6$, que derrumbó edificios en la zona y provocó una avalancha de lodo que sepultó varias poblaciones (Suárez, 1991). El estudio de la sismicidad histórica en México abarca más de 500 años desde 1455 (año 1 Pedernal según el calendario azteca) hasta el presente (Rojas et. al., 1987). Los registros históricos, sin incluir los del presente siglo, exceden de 3000. Existen datos de al menos 30 macrosismos (con intensidades estimadas superiores a VII en la escala Mercalli Modificada) que azotaron a la ciudad de México entre 1455 y 1912.

En la figura 3 se presenta la regionalización sísmica de México para fines de ingeniería (Comisión Federal de Electricidad, 1992). En este mapa se muestran las cuatro zonas sísmicas en que se ha dividido al país con fines de reglamentación de la construcción; el peligro mínimo se presenta en la zona A y el máximo en la D. En la figura 4 se presenta un mapa cuantitativo de peligro sísmico, expresado en términos de aceleraciones máximas del terreno asociadas a un periodo de retorno de 100 años. Estos mapas dan un panorama general de la distribución del peligro sísmico en México, por lo que respecta a sitios de terreno firme. Esto significa que los mapas no incluyen los efectos de amplificación local, o *efectos de sitio*, que se presentan, generalmente, asociados a la existencia de depósitos de suelo blando. Como se verá más adelante, estos efectos son decisivos para la correcta evaluación del peligro sísmico.

El primer gran temblor que afectó a una ciudad de México con edificios de estilo casi moderno fue el de 1941. Los daños ocasionados entonces propiciaron la elaboración del primer reglamento de construcciones mexicano que incluyó disposiciones de diseño sísmico. Este fue el primer código en el mundo en que se exigían mayores especificaciones de diseño para construcciones en terreno blando que para estructuras en terreno firme. El documento

incluía un mapa de la ciudad en que se distinguían ambos tipos de terreno, este mapa es la primera carta de microzonificación de observancia obligatoria (ver, por ejemplo, Iglesias et. al., 1989, para una descripción de la microzonificación actual de la ciudad de México). Los sismos que siguieron al de 1941 no produjeron mayores daños; esto inspiró confianza y no se vio la necesidad de actualizar las normas en mucho años. Pero cuando ocurrió el sismo de 1957 existían ya en la ciudad construcciones modernas, algunas de ellas estructuradas con losas encasetonadas diseñadas deficientemente, refuerzos transversales insuficientes, muchas estructuras con serias torsiones, escasez de muros en una dirección o con planta baja débil. Por otra parte, se habían poblado ya las zonas de mayor intensidad sísmica en la ciudad. De aquí se desprende la severidad de los daños ocasionados por ese temblor. Se elaboraron normas de emergencia que estuvieron en vigor desde 1957 hasta 1966, en que se publica oficialmente un nuevo reglamento. De nuevo, la ausencia de daños en los sismos que siguieron inspiró confianza. En 1976 se publica un nuevo código, en el que se avanza significativamente en los métodos generales de análisis y en la microzonificación de la ciudad en función del tipo de suelo. Se conserva, sin embargo, la idea de que no hay por qué diseñar para perturbaciones mucho más grandes que las producidas por el temblor del 28 de julio de 1957. Como consecuencia del temblor de septiembre de 1985 y de los grandes daños que causó, se emiten unas normas de emergencia, mucho más estrictas que el reglamento de 1976. Estas normas estuvieron en vigor hasta 1987, fecha en que se publica la versión del código que hasta la fecha rige la construcción en la ciudad de México. A este nos referiremos con mayor detalle más adelante.

EL TEMBLOR DE SEPTIEMBRE DE 1985

El temblor del 19 de septiembre de 1985 ($M_S=8.1$) tuvo su origen en el contacto entre las placas de Cocos y Norteamérica, frente a las costas del estado de Michoacán, cerca de la desembocadura del río Balsas (figura 1). La corteza de la tierra se fracturó en un área de aproximadamente 150×70 km a unos 16 km de profundidad. La intensidad en el área epicentral alcanzó IX en la esca

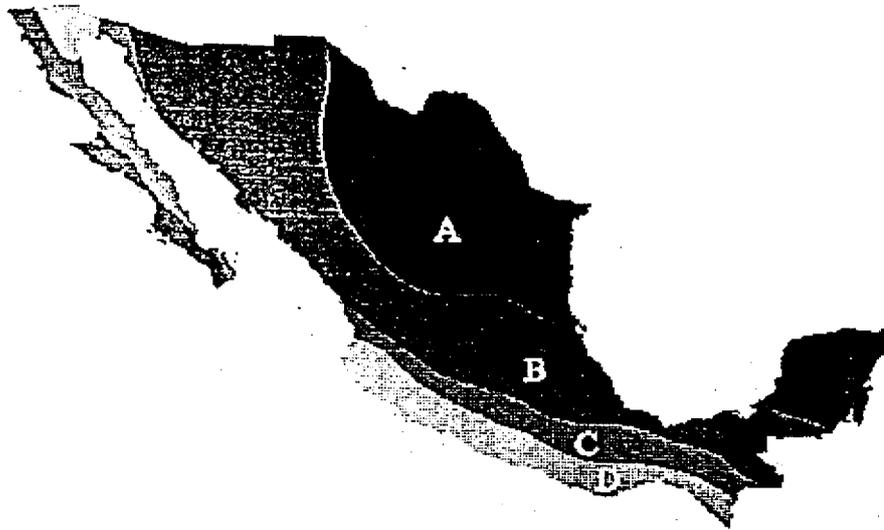


Figura 3. Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería

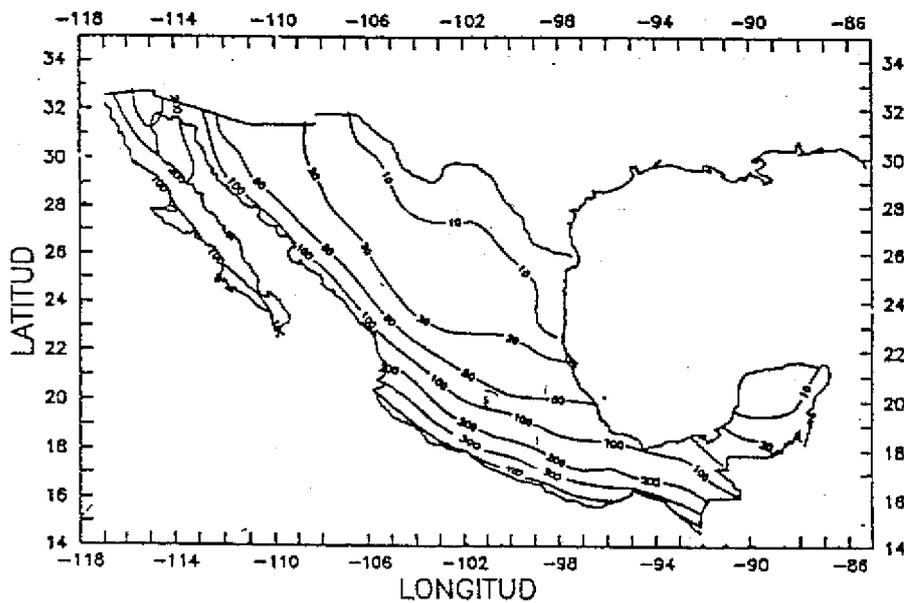


Figura 4. Mapa de aceleraciones máximas del terreno para un periodo de recurrencia de 100 años

la de Mercalli Modificada. Para los sismólogos no fue sorprendente que ocurriera un gran terremoto en la zona donde tuvo lugar el de 1985. Se había instalado casi en su totalidad la Red Acelerográfica de Guerrero (RAG) a través de un proyecto conjunto entre el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de California en San Diego. Se había escogido su ubicación precisamente a partir de la desembocadura del Balsas y hasta los límites de los estados de Guerrero y Oaxaca. En esta zona existían varios tramos de quietud o *brechas sísmicas* (Nishenko y Singh, 1982), es decir, tramos de la corteza en que no se había generado un evento mayor en varios decenios. La oportunidad en la instalación de la RAG permitió la obtención, por primera vez en la historia, de registros acelerográficos en la zona epicentral de un gran temblor (ver, por ejemplo, Anderson *et. al.*, 1986). El temblor del 19 de septiembre fue seguido, 36 horas después, por una réplica de magnitud 7.6. A continuación se describen algunas características importantes de los efectos de estos terremotos.

Movimientos del terreno en la ciudad de México

El primer instrumento de registro de movimientos fuertes se instaló en la ciudad de México en 1959 y desde entonces se han registrado estos movimientos regularmente. En 1985 la Red Acelerográfica de la ciudad de México (RACM) estaba constituida por una decena de acelerógrafos, en su mayoría digitales, operados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la figura 5 se presentan acelerogramas registrados durante el temblor de 1985 en estaciones con diferentes tipos de terreno en la ciudad de México. Nótese la diferencia tanto en amplitud como en contenido de frecuencia entre los registros de terreno firme (CUIP, TACY) y de terreno compresible (SCT, CDAO, CDAF). La amplificación que experimentan las ondas sísmicas en el valle de México se debe, principalmente, a las siguientes causas:

a) La naturaleza del subsuelo en la zona de los antiguos lagos, formados de arcillas muy blandas, con velocidades de propagación de ondas de corte inferiores a 100 m/s en espesores de hasta decenas de metros. Este fenómeno ha sido estudiado y docu-

mentado desde hace más de 40 años (p. ej., Rosenblueth, 1953) y puede explicarse con razonable aproximación con modelos unidimensionales de propagación de ondas de corte en medios viscoelásticos estratificados.

b) La posible existencia de una estructura geológica más profunda, de alcance regional, que provoca que aún en los sitios firmes del valle se observen amplificaciones de hasta 10 veces en algunas frecuencias con respecto a lo que se esperaría en sitios libres de efectos locales a distancias epicentrales comparables. Aunque este fenómeno está bien documentado (Ordaz y Singh, 1992), su causa todavía se ignora.

c) Las heterogeneidades laterales en las características de los materiales que conforman el subsuelo, lo cual propicia la generación de ondas superficiales (Sánchez Sesma *et. al.*, 1988) que se superponen a la amplificación unidimensional mencionada en el inciso a)

Las aceleraciones del terreno que se presentaron en 1985 en sitios de terreno blando del DF son sumamente grandes (0.18g en SCT, aunque seguramente más en sitios en que no existía acelerógrafo), tomando en cuenta que el temblor que las provocó se originó a más de 300 km de distancia. Las fuerzas que estos movimientos produjeron en las construcciones excedieron apreciablemente a las de diseño que preveía el código en vigor. Nótese que estos acelerogramas están caracterizados por un gran número de ciclos de movimiento casi armónico; el periodo de estos ciclos está determinado en gran medida por el periodo predominante de vibrar de la columna de suelo bajo el sitio en cuestión. La duración de la excitación sísmica, y la consiguiente degradación de la resistencia de las construcciones, es un factor claramente decisivo en el comportamiento estructural; sin embargo, su influencia no está debidamente estudiada ni cuantificada, y sólo se considera en los reglamentos de construcción de manera indirecta en el mejor de los casos.

Aún dentro de la zona de terreno blando del valle de México las características de los movimientos del terreno varían considerablemente de un sitio a otro. En la figura 6 se presentan mapas que muestran la distribución de intensidad sísmica, expresada en términos de pseudoaceleraciones espec

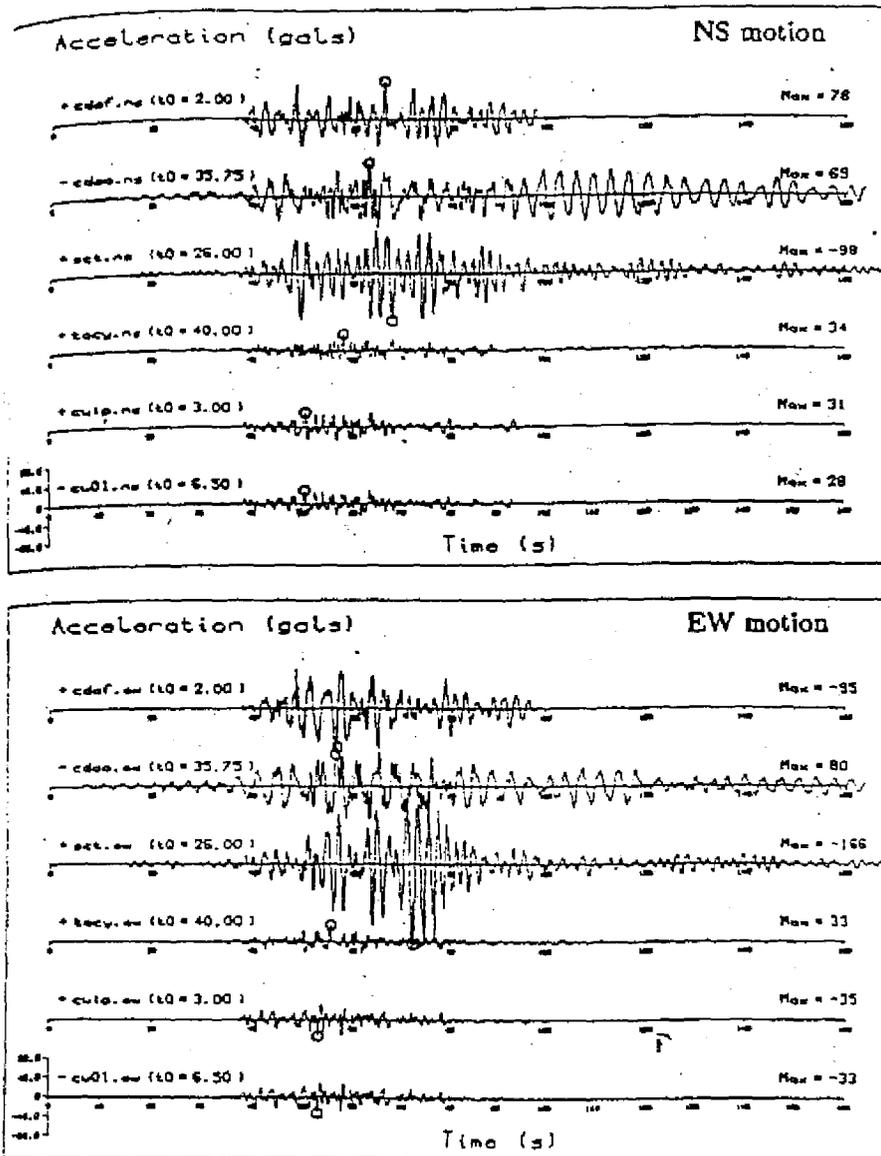


Figura 5. Componentes horizontales de aceleración registradas en las estaciones CU01, CUIP y TACY (en la zona de lomas), y SCT, CDAO y CDAF (en la zona del lago), para el temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985.

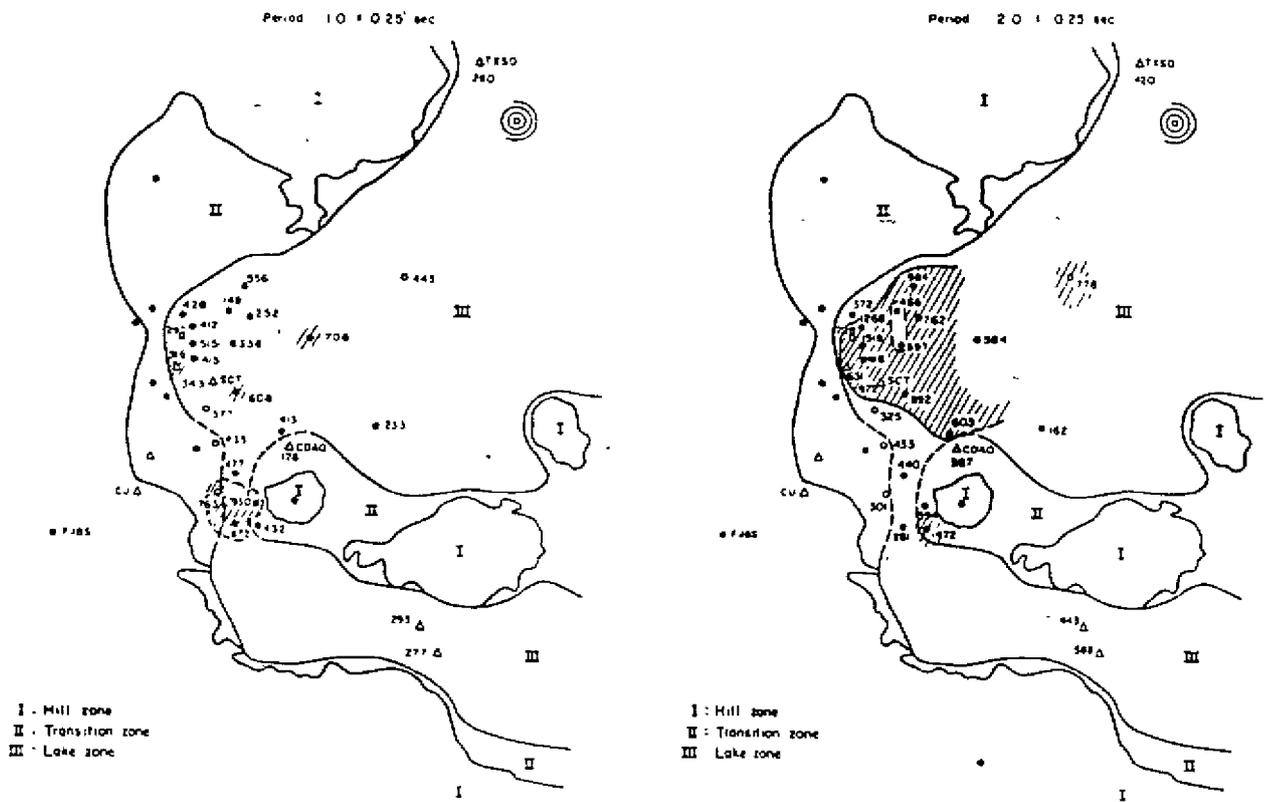


Figura 6. Mapas de valores estimados de S_a (gals) para 1 y 2 segundos en la Ciudad de México. Las zonas achuradas corresponden a valores de pseudoaceleraciones $S_a > 600$ gals.

trales para 5% del amortiguamiento crítico, inferidas por Ordaz et. al. (1988) para el temblor de Michoacán. Puede observarse ahí cómo las zonas geográficas de máxima intensidad cambian de posición dependiendo del periodo de vibrar que se considere. Así, una estructura con, digamos, 2 seg. de periodo natural estará en una situación muy desventajosa si se localiza en un sitio en que la intensidad sísmica a este periodo sea grande. Esto ilustra el hecho de que para que acontezcan daños es necesaria la combinación de movimientos del terreno intensos y construcciones que sean susceptibles a las particularidades del movimiento en ese sitio. En otras palabras, los efectos de amplificación local, o efectos de sitio, cambian drásticamente los niveles de riesgo que enfrentan las estructuras. En el caso de la zona de lago de la ciudad de México, y en vista de la peculiar naturaleza de su subsuelo, el factor preponderante en la determinación de efectos de sitio es el periodo predominante de vibrar del suelo local. Esto fue reconocido desde hace varias décadas, y los espectros de diseño así lo han reflejado. Sin embargo, después de 1985 se han realizado estudios detallados para determinar la distribución del periodo predominante en el valle de México. En la figura 7 se presenta un mapa con contornos de igual periodo de sitio (Reinoso y Lermo, 1991); para la realización de este mapa se tomó en cuenta información proveniente de sondeos geotécnicos, mediciones de microtemblores y registros de movimiento fuerte obtenidos con la RACM, cuyo estado actual se describirá más adelante. La determinación de estos periodos, y en general de las características del suelo que gobiernan la amplificación local, son parte del proceso de microzonificación sísmica, cuyo objetivo es diferenciar zonas geográficas de una región dependiendo del nivel de peligro sísmico a que estén expuestas. La microzonificación es de vital importancia en la ciudad de México, y por esta razón se han hecho avances sustanciales en este sentido.

Daños en construcciones

El terremoto del 19 de septiembre de 1985 ocurrió a las 7.19 hora local. Provocó la pérdida de 5700 vidas humanas (cifra oficial, aunque estimaciones más realistas llegan a 10000) y daños en cerca de 2500 construcciones, incluyendo el colapso de unos 200 edificios de cierta importancia. La

totalidad de los edificios con daño moderado o grave se localizaban en la zona blanda del DF. En lo que sigue se describen brevemente los principales tipos de daño observado.

1) Falla frágil en columnas. La falla de muchos edificios de concreto reforzado se debió a la imposibilidad de sus columnas para sostener las grandes demandas de ductilidad impuestas por el elevado número de repeticiones de carga; esto causó un deterioro en resistencia mayor al que típicamente se presenta en estructuras sometidas a temblores de más corta duración. Contribuyó a la vulnerabilidad de este tipo de estructuras la escasez de refuerzo transversal.

2) Incertidumbres asociadas al comportamiento no lineal. La mayor parte de las lecciones aprendidas están relacionadas con las diferencias entre el comportamiento real de las estructuras después de amplias incursiones en el rango no lineal y el comportamiento predicho por los procedimientos convencionales de análisis. A esta categoría pertenecen los muchos casos de edificios asimétricos, cuyo colapso se debió muy probablemente a grandes desplazamientos debidos a torsión; esto, a pesar de las recomendaciones del código que tomaban en cuenta este fenómeno. También los edificios con planta baja flexible, en los que la presencia de resistencias mucho mayores en los pisos superiores hizo que la disipación de energía en el rango no lineal tuviera lugar sólo en las columnas del primer piso.

3) Golpeteo entre edificios adyacentes e interacción suelo-estructura. En más del 40% de los casos de colapso o daño severo, los edificios golpearon contra construcciones adyacentes. La rotación de la cimentación con seguridad acentuó este efecto y posiblemente fue responsable de los muchos casos de falla de los pisos superiores.

4) Sobrecarga en los edificios. Muchos casos de colapso o daño grave se asociaron a cargas verticales que excedían con mucho los valores de diseño. En general, las cargas vivas eran excesivas como consecuencia del cambio de uso de la edificación o resultado del almacenamiento de pesados archivos en áreas diseñadas para mobiliario convencional; esto ocurrió especialmente en edificios gubernamentales.

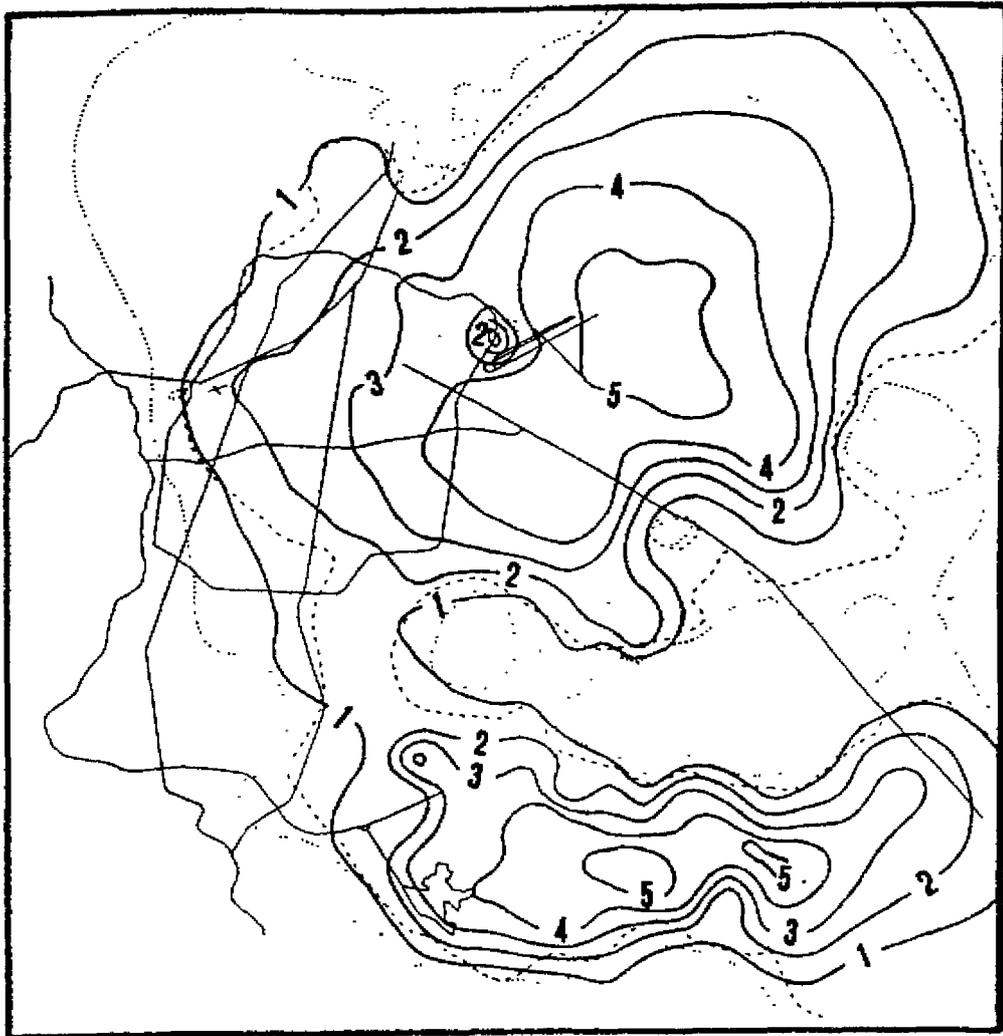


Figura 7. Mapa de isoperiodos medidos con microtemblores y con sismos. Se muestran también la zonificación geotécnica y las principales avenidas de la ciudad.