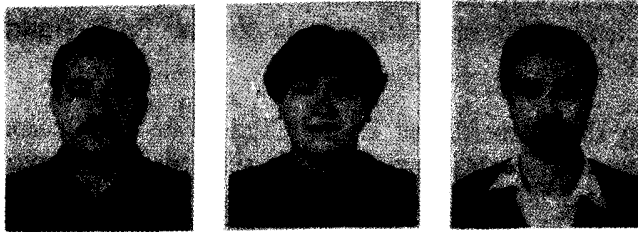


## INTENSIDADES Y DEMANDAS DE DUCTILIDAD DE SISMOS RECIENTES EN LA CIUDAD DE MEXICO



Alonso Gómez-Bernal\*, Hugón Juárez\* y Jesús Iglesias\*

### RESUMEN

Con el objeto de estudiar la distribución de intensidades de los sismos de febrero de 1988 y abril de 1989 en la Ciudad de México, con parámetros representativos de su capacidad destructiva, en este trabajo se presentan los mapas de valores principales máximos de la intensidad de Arias para ambos eventos, así como tres mapas de demandas máximas de ductilidad del sismo de 1989, para diferentes intervalos de periodos. Esta información reafirma la existencia de zonas de alta sismicidad dentro de la zona del lago, asociadas a la interacción de las irregularidades topográficas y geotécnicas de la ciudad; asimismo, pone en evidencia la necesidad de actualizar la zonificación sísmica vigente, en particular al reconocer la alta sismicidad de la zona del lago que se extiende entre Xochimilco y Tláhuac.

### INTRODUCCION

Como consecuencia de la escasa información instrumental registrada en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, se realizó un amplio estudio de los edificios dañados que permitió definir la distribución de las intensidades con base en la determinación de los requerimientos de resistencia (Iglesias *et al.*, 1987). En dicho trabajo se propuso una nueva zonificación sísmica que fue parcialmente aceptada por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF87, (DDF, 1987), en la cual se incluyen dos nuevas zonas de alta sismicidad dentro de la zona del lago y parte de la de transición, asociadas a la amplificación de las intensidades por la interacción entre las irregularidades topográficas y geotécnicas de la ciudad (mapa 1).

---

\* Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, México 02200, D.F.

La nueva red de acelerógrafos instalada en la ciudad después de 1985, por la Fundación ICA (FICA) y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra (CIRES), junto con la del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II), ha permitido complementar los resultados obtenidos del estudio de los daños con los derivados del análisis de los acelerogramas registrados (Iglesias, 1989).

A la fecha, se han registrado con suficiente detalle los sismos del 8 de febrero de 1988 ( $M_s=5.8$ ) y del 25 de abril de 1989 ( $M_s=6.9$ ), que han sido los de mayor magnitud desde la creación de la red; el número de estaciones con registro para cada sismo fue de 50 y de 65 respectivamente y corresponden a 70 diferentes sitios de la ciudad. En la figura 1 se muestra la ubicación de los epicentros.

Con objeto de estudiar la distribución de intensidades en la Ciudad de México, a través de parámetros que reflejen el potencial destructivo de los sismos con mayor fidelidad que la aceleración máxima del terreno, en este trabajo se recurre a analizar los sismos antes mencionados, mediante el cálculo de la Intensidad de Arias y de las demandas de ductilidad sobre edificios típicos de la ciudad.

## MAPAS DE INTENSIDADES DE ARIAS

La Intensidad de Arias (Arias, 1969) representa la suma de las energías disipadas, por unidad de peso, de todas las estructuras de una población con frecuencias uniformemente distribuidas, como consecuencia del movimiento inducido por un sismo. El modelo estructural considerado es el de un sistema lineal de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, SUGL. Para evaluar la intensidad de Arias en la dirección  $xx$  se debe utilizar la expresión:

$$I_{xx} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a_x^2(t) dt$$

donde:

- $a_x(t)$  - aceleración del terreno en el tiempo  $t$ , en la dirección  $x$
- $t_0$  - duración total del acelerograma
- $g$  - aceleración de la gravedad

Si además se cuenta con la historia de aceleraciones simultáneas de las dos componentes ortogonales horizontales, es posible encontrar las intensidades cruzadas  $I_{xy}=I_{yx}$ :

$$I_{xy} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a_x(t) a_y(t) dt$$

Con estos valores se puede construir el tensor de intensidades de Arias, a partir del

cual es posible obtener las intensidades principales y su dirección para un sitio específico.

En el mapa 2 se han dibujado las intensidades principales máximas, en cm/seg, de las 65 estaciones que registraron el temblor del 25 de abril de 1989; es interesante observar que sus direcciones son generalmente similares en estaciones cercanas, y que en conjunto definen las direcciones principales del movimiento del terreno. Así, en la parte central de la ciudad, las direcciones de las estaciones que se encuentran al sur del centro histórico (Zócalo) hacen evidente la interacción entre el Cerro de la Estrella, el centro histórico y la zona de transición, en dirección noroeste-sureste, lo que da lugar a la máxima intensidad calculada: 52 cm/seg, en la colonia Buenos Aires. Es notable que alrededor del centro histórico la dirección de las intensidades principales máximas se vuelve tangencial al mismo. Las direcciones de las estaciones ubicadas entre el Cerro de la Estrella y el pedregal de Coyoacán (CU) indican también la existencia de interacción entre estas irregularidades topográficas, aunque asociadas a una baja intensidad. Finalmente, en la zona del lago entre Xochimilco y Tláhuac, aunque existen pocas estaciones, se alcanzaron valores importantes de las intensidades, hasta de 44 cm/seg, asociados a direcciones que sugieren nuevamente la interacción lateral entre los bordes montañosos de esta parte de la ciudad.

En el mapa 3 se muestran las intensidades principales máximas en las 55 estaciones de la red que registraron el temblor del 8 de febrero de 1988, en este caso se tienen menos registros, sobre todo en la parte sur (Xochimilco-Tláhuac). Aunque se sigue observando la interacción entre el Cerro de la Estrella, el centro histórico y la zona de transición, con una intensidad máxima de 0.58 cm/seg, la dirección de algunas estaciones ubicadas entre Chapultepec y el centro histórico indica también la existencia de interacción directa entre estos dos puntos, asociada a intensidades de hasta 0.34 cm/seg. En este sismo se aprecia con gran claridad la interacción entre el Cerro de la Estrella y el pedregal de Coyoacán (CU), con una intensidad máxima de 0.46 cm/seg. Es importante señalar en este caso la aparición de intensidades importantes al norte de la ciudad: 0.33 cm/seg en Lindavista y 0.35 cm/seg en Azcapotzalco, sobre todo en el último punto, que corresponde a la zona de transición.

Si se comparan entre sí los mapas 2 y 3, se observa que algunas estaciones muestran direcciones principales semejantes en ambos casos, mientras que otras presentan discrepancias notables. Esto puede atribuirse a que en algunos sitios es importante la diferencia en el azimut de los epicentros correspondientes (figura 1), mientras que en otros dominan las características locales. Al comparar los mapas 2 y 3 con la actual zonificación sísmica del Distrito Federal (mapa 1), se aprecia que la mayoría de los puntos con intensidades importantes quedan comprendidos dentro de las zonas de alta sismicidad, con excepción de las estaciones al sureste del centro histórico, y de la extensa zona del lago comprendida entre Xochimilco y Tláhuac.

## ESPECTROS DE DUCTILIDAD

Los parámetros basados en conceptos lineales, como la intensidad de Arias, son insuficientes para describir con exactitud la capacidad destructiva de un sismo, puesto que la mayoría de las estructuras se comportan inelásticamente durante eventos intensos,

sobre todo durante sismos de gran duración como los que se registraron en la Ciudad de México en 1985. Por esta razón, se consideró conveniente complementar los resultados obtenidos mediante el cálculo de las demandas máximas de ductilidad derivadas del análisis dinámico no-lineal de la respuesta de sistemas de un grado de libertad (SUGL).

Se entiende como ductilidad requerida  $\mu$ , al cociente del valor absoluto del desplazamiento máximo  $\delta_{\text{máx}}$  de un SUGL bajo la sollicitación de un sismo, entre su desplazamiento de fluencia  $\delta_y$ :

$$\mu = \frac{|\delta_{\text{máx}}|}{\delta_y}$$

De esta manera, si se trabaja con varios SUGL de diferentes periodos y características elastoplásticas, con un porcentaje específico del amortiguamiento crítico  $\beta$ , es posible obtener, para cierto intervalo de periodos, una gráfica que represente el espectro de ductilidad requerida de un acelerograma. Si se adopta a la ductilidad requerida máxima como un índice del potencial destructivo local, se pueden entonces utilizar los espectros de ductilidad para estimar la intensidad sísmica de una manera más precisa.

Para cada periodo, el nivel de fluencia de los osciladores se consideró como el cortante basal obtenido del espectro de diseño especificado en el RCDF76 (DDF, 1976), utilizando un factor de ductilidad  $Q$  de 4, multiplicado por un factor de sobrerresistencia,  $FS_r$ , de 2, lo que conduce finalmente a valores máximos del coeficiente de cortante basal de  $k=0.12$ ,  $k=0.10$  y  $k=0.08$  para las zonas del lago, transición y lomas del RCDF76 respectivamente. Se decidió utilizar el RCDF76, por considerar que este reglamento guió la construcción de buena parte de las edificaciones existentes en la Ciudad de México. El valor de 2 para la sobrerresistencia se eligió constante para todos los periodos, pues se trata de un valor promedio estimado a partir de los resultados de un estudio estadístico realizado por Iglesias *et al.*, 1987, en edificios de concreto de mediana altura (5 a 12 niveles) construidos en la Ciudad de México antes de 1985.

La intensidad de las aceleraciones de los sismos en estudio no es suficiente para producir deformaciones inelásticas significativas, por lo que se hace necesario escalar los acelerogramas, de tal manera que se obtengan excitaciones equivalentes a las producidas por un temblor de magnitud similar al de 1985; para esto, se decidió utilizar como parámetro de comparación a la intensidad de Arias. En la tabla 1 se presentan las intensidades de Arias de las estaciones que registraron tanto el sismo del 19 de septiembre de 1985, como el del 25 de abril de 1989. Al relacionar las intensidades principales máximas de ambos temblores se deduce que, para contar con acelerogramas con la misma cantidad de energía, es necesario escalar los de 1989 con un factor,  $f$ , de 2.80 en la estación Tláhuac-Bombas (TLHB), 2.72 en la estación Ciudad Universitaria (CU01), 2.70 en Central de Abastos Oficinas (CDAO), 2.64 en Viveros (VIV) y 4.23 en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Estos factores de escala se obtienen de la raíz cuadrada del cociente de las intensidades máximas correspondientes a sismos diferentes en una misma estación.

Tabla 1. Comparación de intensidades de los sismos del 19 de septiembre de 1985 y del 25 de abril de 1989.

Estación	19-09-1985			25-04-1989			f escala
	I N-S	I E-O	I Máx	I N-S	I E-O	I Máx	
TLHB	146.77	108.61	147.24	15.69	18.81	18.83	2.80
CU01	6.85	7.38	8.29	0.93	0.64	1.12	2.72
CDAO	120.64	107.03	132.37	15.50	16.66	18.15	2.70
VIV	11.20	10.61	12.90	1.67	1.27	1.85	2.64
SCT	131.23	244.30	284.60	11.59	12.98	15.90	4.23

A excepción de la estación SCT, se obtienen valores del factor de escala  $f$  entre 2.64 y 2.80, es posible que en SCT se tenga un valor mayor debido a que esta estación no registró una intensidad importante en 1989 ( $I_{\text{Máx}}=16$  cm/seg), a diferencia de lo acontecido en 1985, en estas condiciones, se creyó adecuado escalar los acelerogramas de 1989 2.75 veces. Como ejemplo, en la figura 3 se presentan las demandas de ductilidad obtenidas de los registros de 1985 y 1989 escalados, para la estación CDAO, en ella se puede observar que, en general, las gráficas de las componentes del sismo de 1985 tienen formas y amplitudes similares a las de 1989 escaladas.

En las figuras 4 y 5 se presentan los espectros de ductilidad de las estaciones: E35 (Tláhuac, FICA), E56 (colonia Roma, CIRES), E49 (colonia Buenos Aires, FICA), E80 (Cuernavaca, CIRES), E29 (Sector Popular, FICA) y E10 (Iztacalco, CIRES), que corresponden a los sitios con las mayores demandas de ductilidad y los mayores valores de la intensidad de Arias para el sismo de 1989, en ellas se pueden observar demandas de ductilidad muy grandes para periodos cortos, lo cual se debe al  $FS_r$  constante, que no refleja fielmente la sobrerresistencia de las estructuras con este tipo de periodos. Osteraas y Krawinkler, 1989, elaboraron una gráfica de sobrerresistencia  $FS_r$  contra periodo para marcos típicos de acero construídos en la Ciudad de México, la cual se muestra en la figura 2 junto con el valor de  $FS_r=2$  considerado en este estudio; en ella se observa que para periodos cortos la sobrerresistencia es bastante grande, pero para periodos mayores a 1.5 segundos se vuelve prácticamente constante e igual a 2. En este trabajo se decidió usar  $FS_r=2$  y limitar el alcance a estructuras con periodos mayores a 1.50 seg.

Debido a la baja intensidad del sismo de 1988, no fue posible en este caso efectuar un escalamiento razonable a fin de obtener espectros de ductilidad.

#### MAPAS DE DEMANDAS MAXIMAS DE DUCTILIDAD

Con la información obtenida de los espectros de ductilidad fue posible construir mapas de las demandas máximas durante el sismo de 1989, para determinados intervalos de periodos. En los mapas 4, 5 y 6 se han dibujado curvas de ductilidades máximas para tres intervalos: 1.5 a 1.8 seg (mapa 4); 1.9 a 2.1 seg (mapa 5) y 2.2 a 2.5 seg (mapa 6), en estos mapas se aprecia bastante coincidencia con la distribución y orientación de las

intensidades máximas del mapa 2, asimismo, se puede observar que las mayores demandas de ductilidad para este sismo se ubican nuevamente entre el Cerro de la Estrella, la zona de transición y el centro histórico, así como en la extensa zona del lago entre Xochimilco y Tláhuac.

En la zona de transición sólo hubo demanda de ductilidad ( $\mu > 1$ ) en la estación E37 en la colonia Xotepingo, que está ubicada dentro de la zona de alta sismicidad sur del mapa 1, en contraste con varias estaciones de la zona de lomas, en donde se obtuvieron demandas de ductilidad entre 1 y 2, lo que sugiere que el nivel de seguridad del RCDF76 en la zona de lomas es inferior al de la zona de transición.

La estación E27 (Granjas), que se ubica en zona de transición en el área de Azcapotzalco, y la estación E17 (Lindavista), en la zona del lago, tuvieron la misma intensidad de Arias de 9 cm/seg, sin embargo, mientras que en la primera no hubo demanda de ductilidad, en la segunda la demanda fue mayor que 2, lo que pone de relieve la limitación de los modelos lineales, como la intensidad de Arias, para estimar la capacidad destructiva de un sismo.

Al comparar los mapas 4, 5 y 6 con la actual zonificación sísmica del Distrito Federal (mapa 1), se aprecia que las zonas de alta sismicidad no cubren una cierta porción de las zonas de altas demandas de ductilidad ( $\mu > 4$ ) al sureste del centro histórico, y ni siquiera consideran la extensa zona del lago comprendida entre Xochimilco y Tláhuac, en donde las demandas de ductilidad resultan ser muy altas.

## CONCLUSIONES

El estudio de las intensidades de los sismos recientes en la Ciudad de México, a partir del cálculo de las intensidades de Arias y de la determinación de las demandas máximas de ductilidad, reafirma la existencia de una gran amplificación de las intensidades en la zona del lago, en subzonas bien definidas, como lo muestran los mapas de ductilidad y de intensidades de Arias presentados en este trabajo. Estas subzonas aparecen asociadas a la interacción entre las irregularidades topográficas y geotécnicas de la ciudad, y parecen ser sensibles al azimut de los epicentros.

El cálculo de las demandas de ductilidad permite estimar la capacidad destructiva de los sismos con mayor precisión que los modelos lineales como la intensidad de Arias, con la ventaja de usar parámetros íntimamente ligados al diseño estructural. Esta diferencia es importante, sobre todo cuando se comparan zonas geotécnicas distintas.

Los resultados obtenidos coinciden, en general, con las observaciones hechas a partir de los daños causados por los sismos de 1957, 1979 y 1985, así como con la distribución de aceleraciones máximas del terreno de 1988 y 1989 (Iglesias, 1991). En particular, los mapas de demandas de ductilidad hacen evidente la necesidad de actualizar la zonificación sísmica de la ciudad, sobre todo en cuanto a la zona del lago que se extiende entre Xochimilco y Tláhuac, en donde tanto las intensidades de Arias como las demandas de ductilidad resultan muy grandes.

Es necesario realizar estudios similares a éste con las intensidades de sismos futuros, pues esto permitirá definir, cada vez con mayor precisión, la sismicidad de la Ciudad de México. Para tal fin, es necesario incrementar el número de estaciones de la red de acelerógrafos, principalmente en aquellas zonas donde su densidad es escasa y se han observado amplificaciones importantes en la intensidad sísmica, como es el caso en la parte sur de la zona del lago.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Fundación ICA A.C. y a los Ingenieros Javier Lermo y Leonardo Alcántara, del Instituto de Ingeniería, el haber proporcionado la información acelerográfica utilizada en este trabajo. Asimismo, se reconoce la colaboración de los estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la UAM Azcapotzalco, Sergio Uribe, Marco Antonio Espinoza y Arturo Burela, en el procesamiento de la información y en la elaboración de los mapas.

## REFERENCIAS

- Arias, A. 1969. A measure of earthquake intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants. R. Hansen editor, MIT Press, Cambridge Mass.
- DDF (Departamento del Distrito Federal) 1976. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Diario Oficial de la Federación.
- DDF (Departamento del Distrito Federal) 1987. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Diario Oficial de la Federación.
- Iglesias, J. et al. 1987, Mapa de intensidades del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México.
- Iglesias, J. 1989. Sismicidad de la Ciudad de México. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro.
- Osteraas, J. and Krawinkler, H. 1989. Behavior of steel buildings, The Mexico earthquake of September 19, 1985. Earthquake Spectra 5 (1): 51-88.

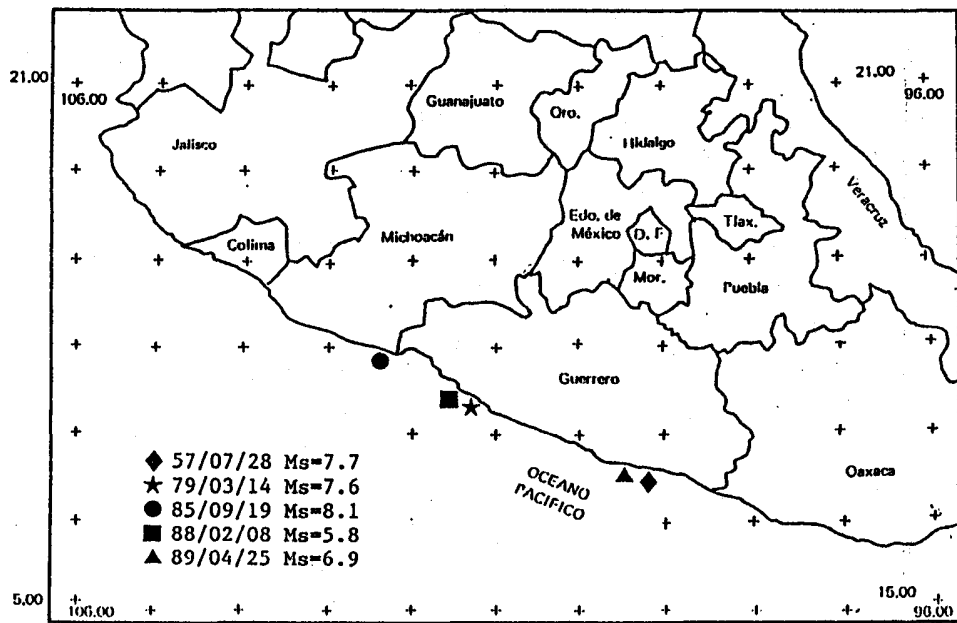


Figura 1. Magnitudes y epicentros de los sismos estudiados.

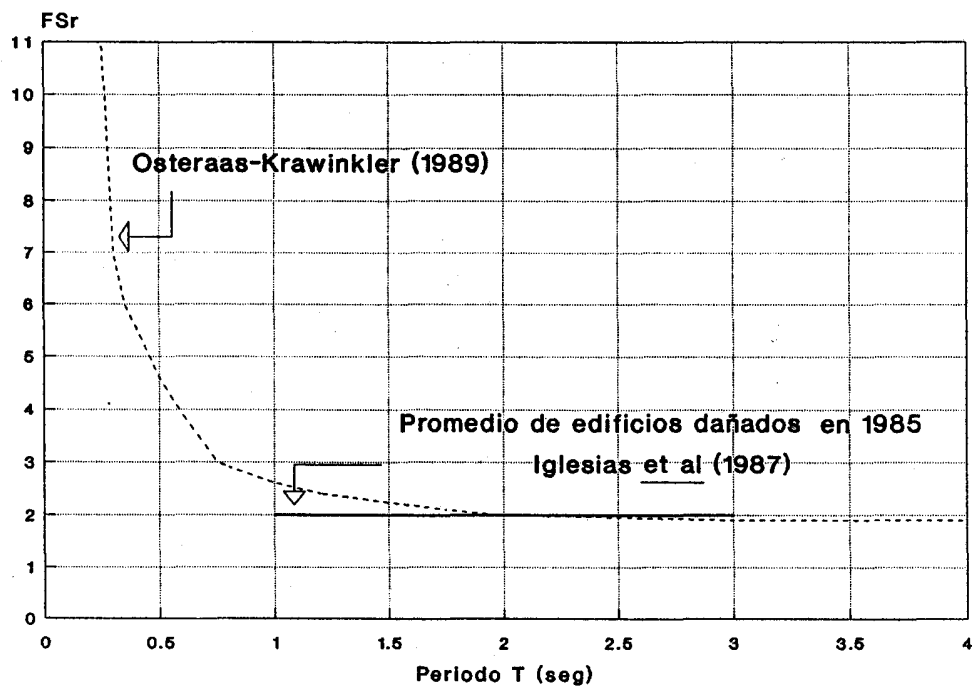


Figura 2. Factores de sobrerresistencia FSr.



SISMOS: 19,9,85 Y 25,4,89  
RDF76, Fsr=2, B=5%

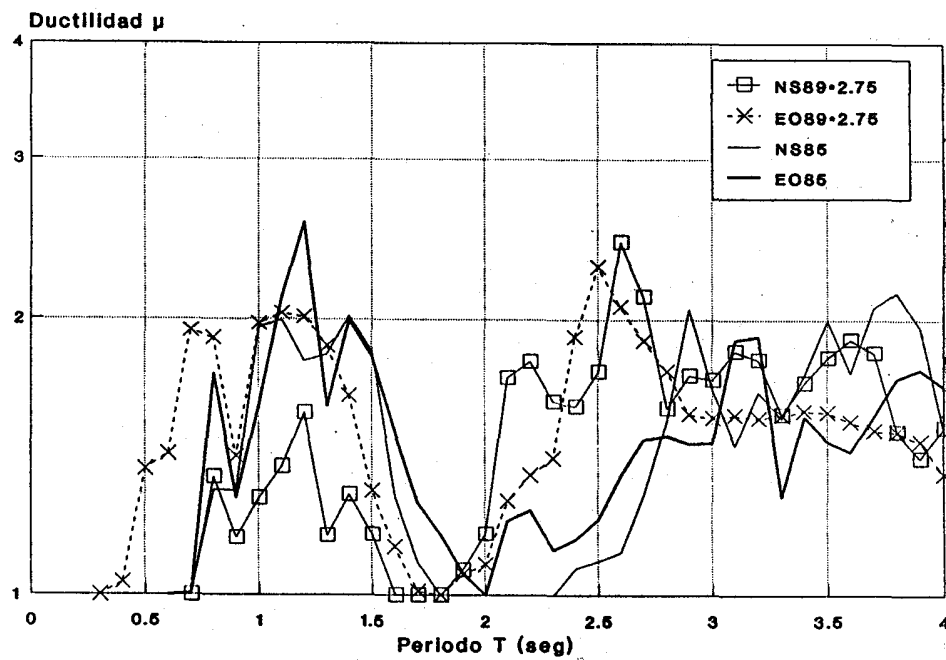


Figura 3. Espectros de ductilidad en la estación CDAO.

Componente Norte-Sur  
RDF76; Fsr=2.0; B=5%

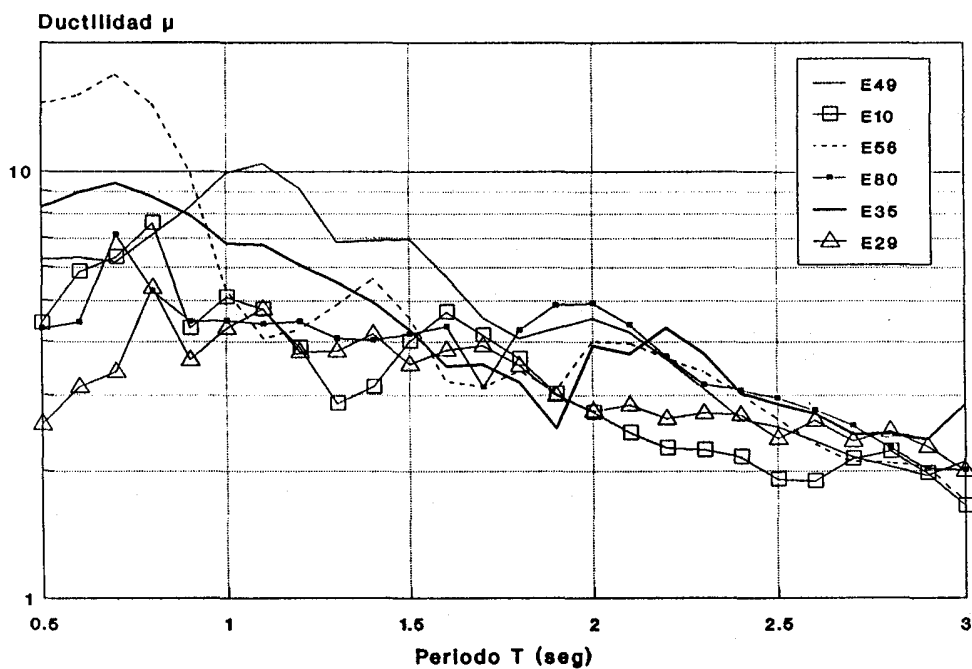


Figura 4. Espectros de ductilidad en seis estaciones, obtenidos al escalar los acelerogramas del sismo del 25 de abril de 1989.

Componente Este-Oeste  
RDF76; Fer-2.0; 8-5 %

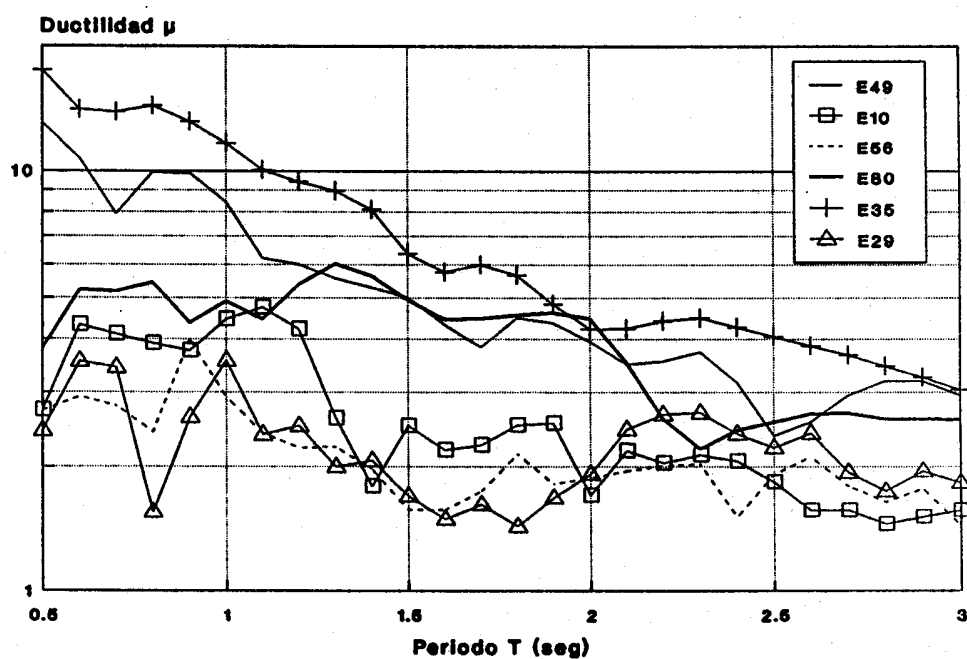
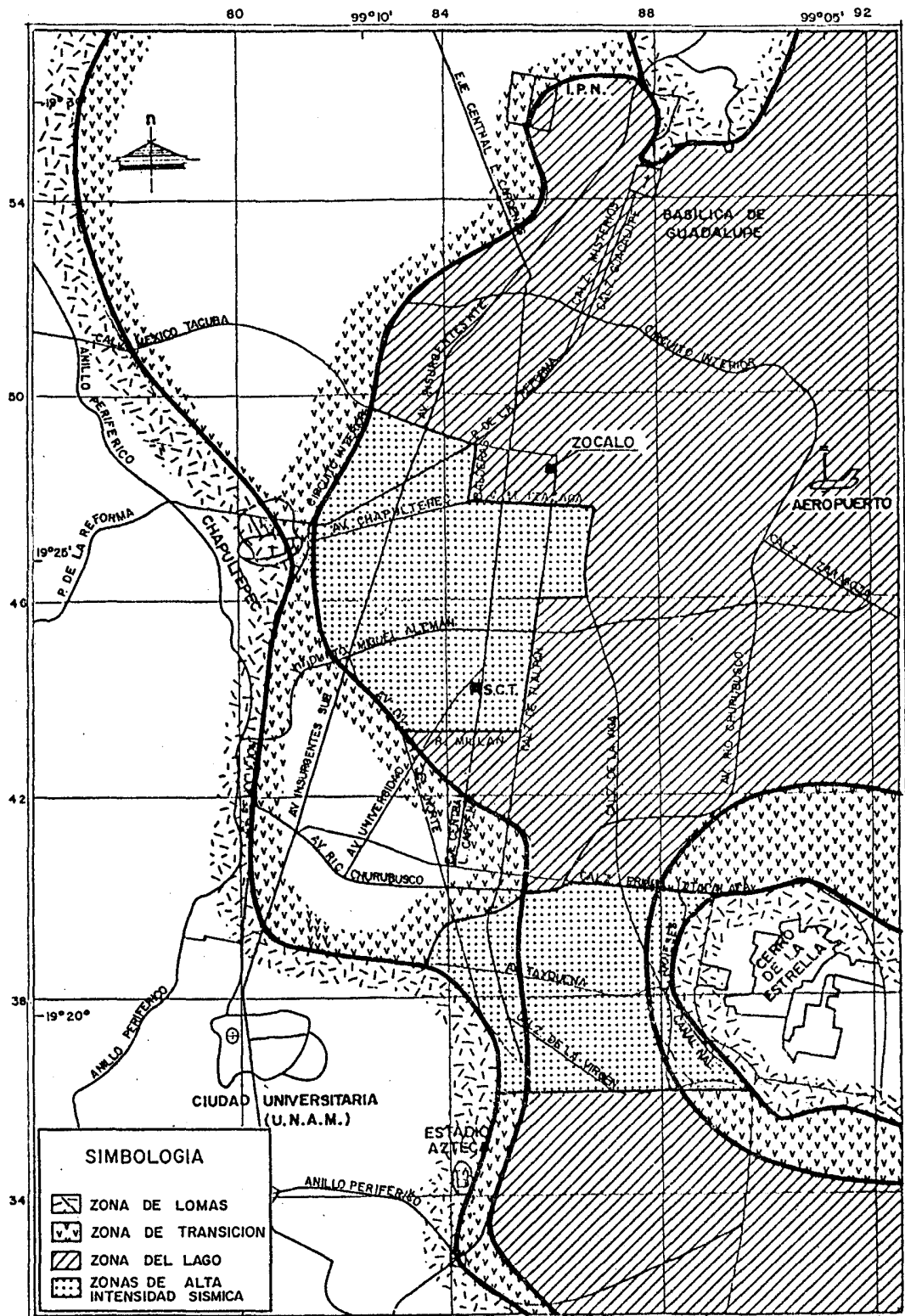
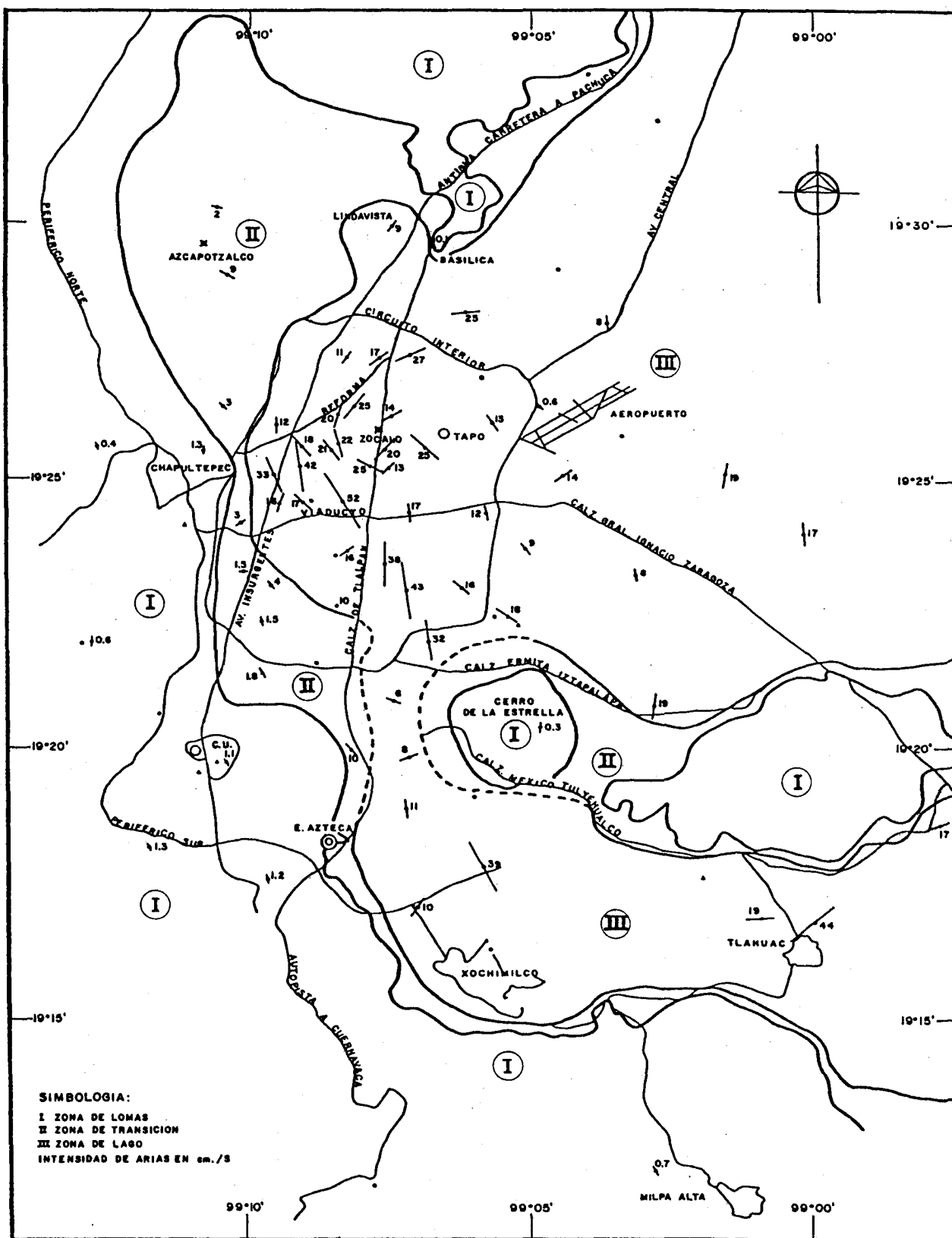


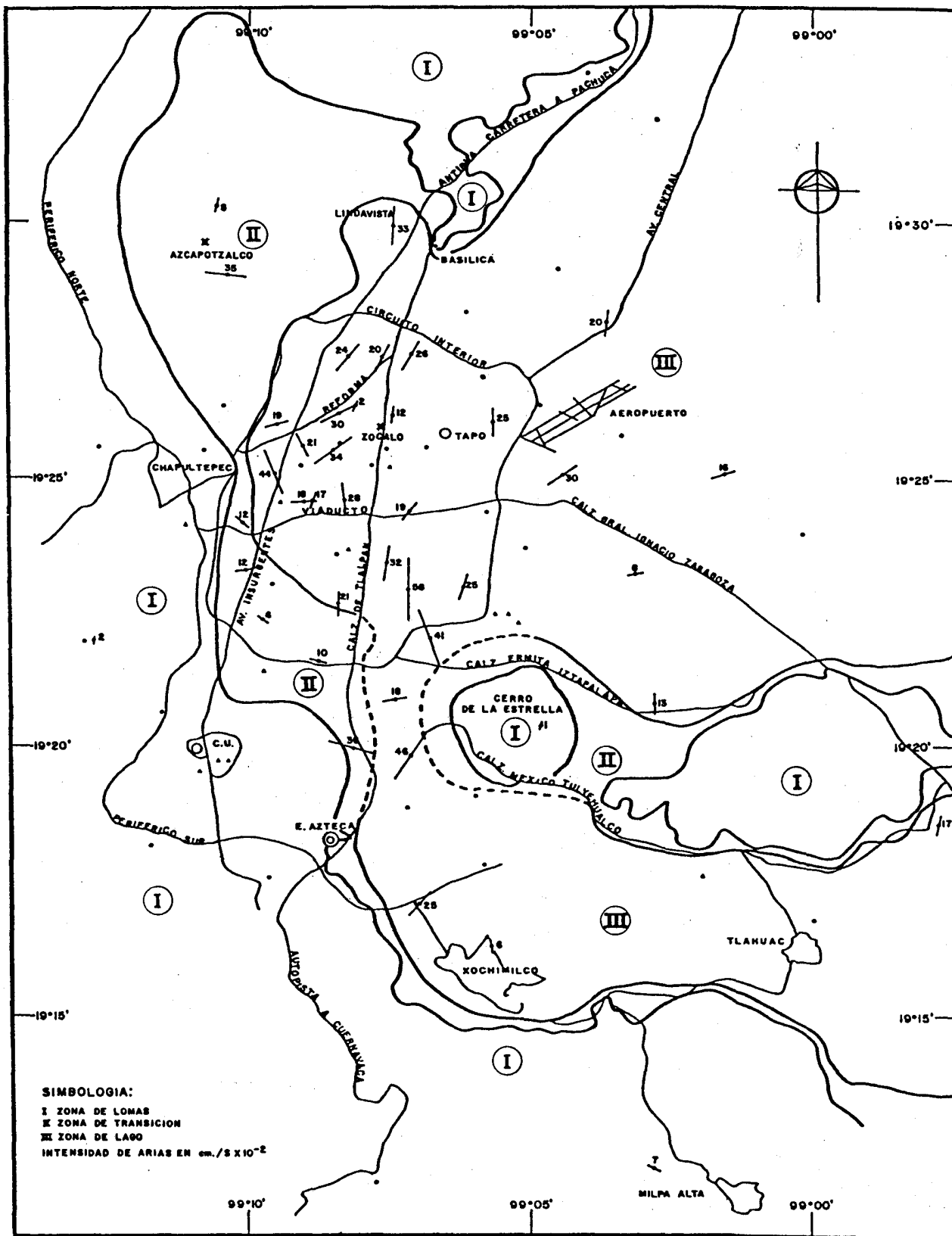
Figura 5. Espectros de ductilidad en seis estaciones, obtenidos al escalar los acelerogramas del sismo del 25 de abril de 1989.



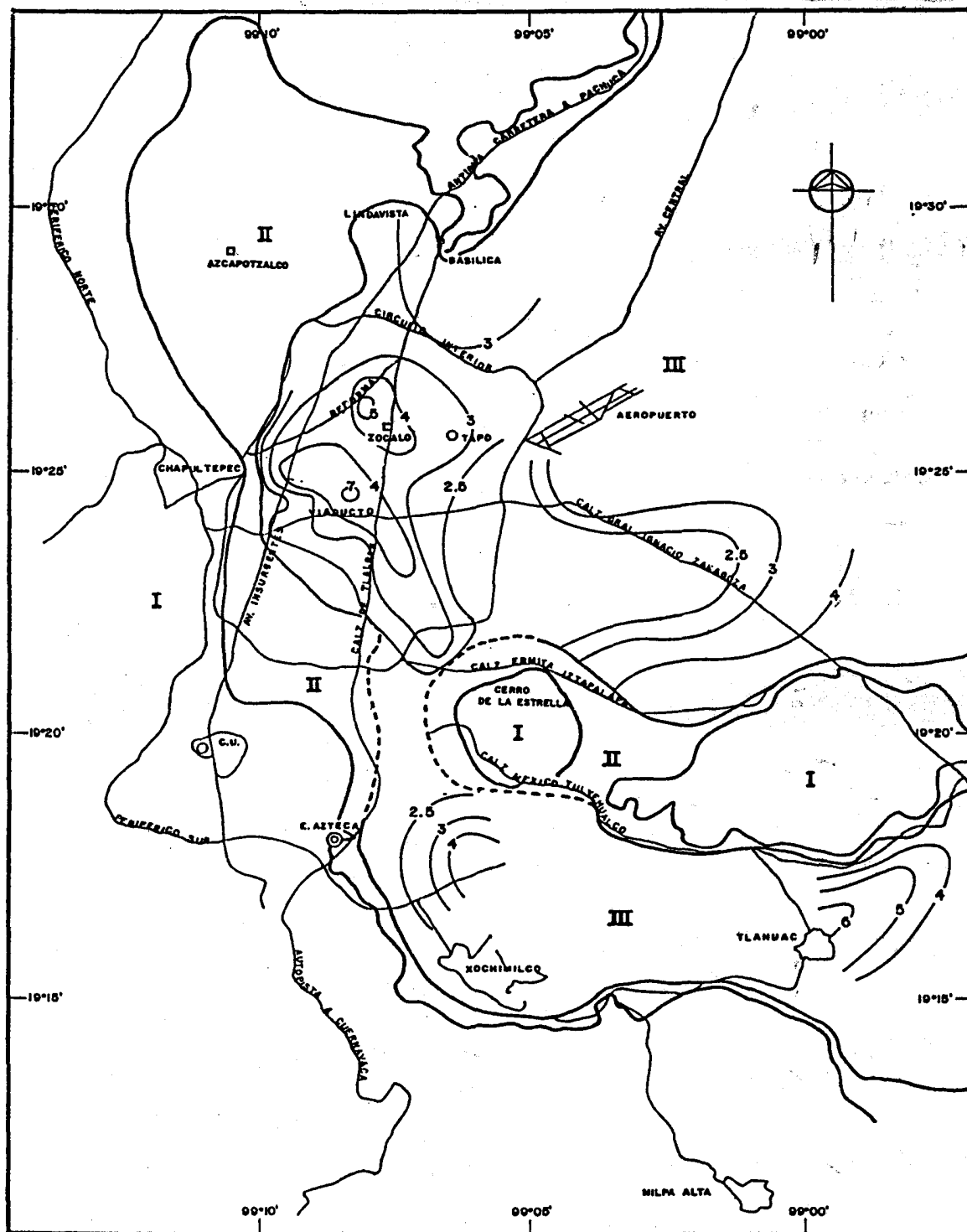
Mapa 1. Zonificación sísmica de la Ciudad de México.



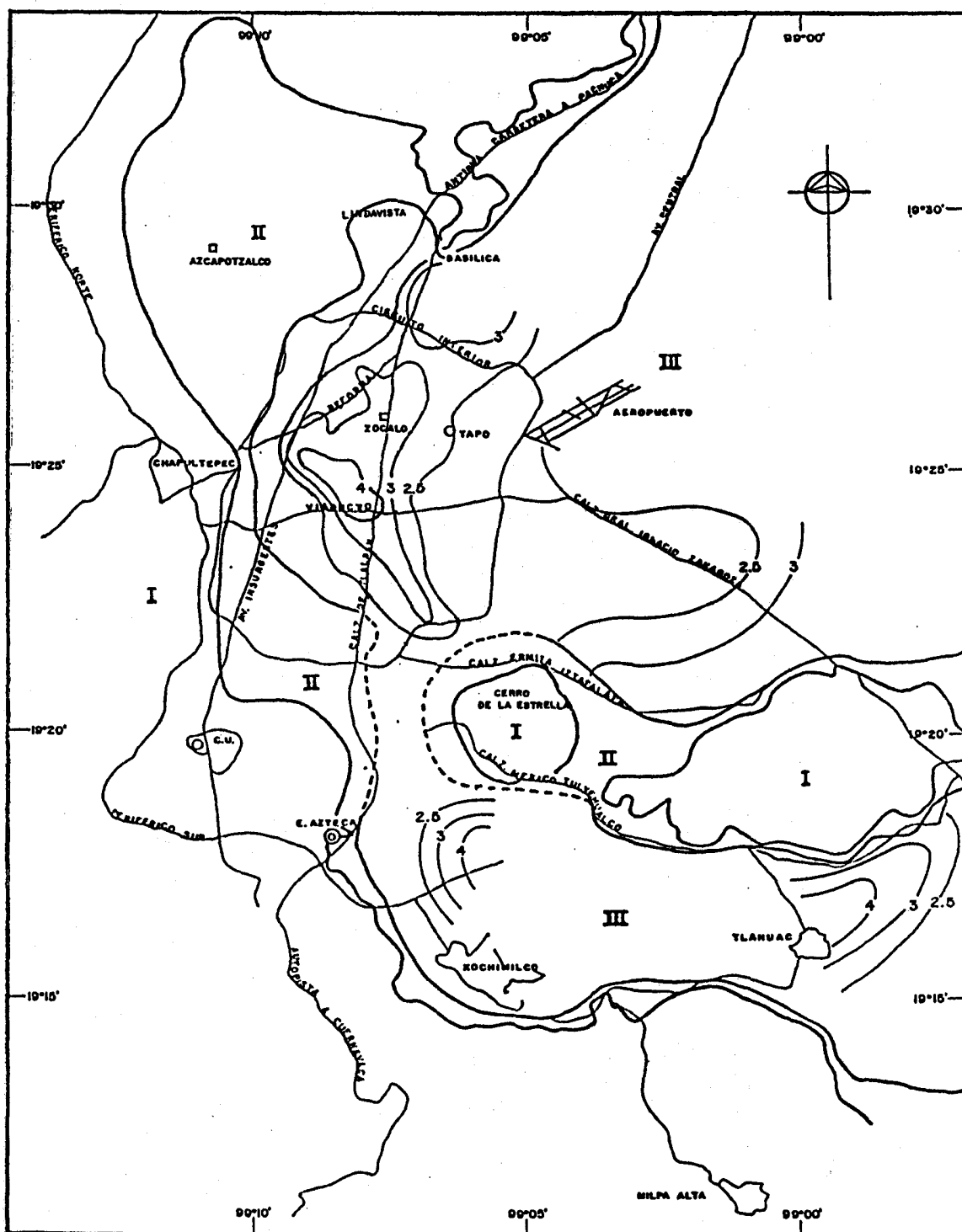
Mapa 2. Intensidades de Arias del sismo del 25 de abril de 1989 en la Ciudad de México.



Mapa 3. Intensidades de Arias del sismo del 8 de febrero de 1988 en la Ciudad de México.



Mapa 4. Curvas de ductilidad máxima para SUGL's con periodos entre 1.5 segundos y 1.8 segundos.



Mapa 5. Curvas de ductilidad máxima para SUGL's con periodos entre 1.9 segundos y 2.1 segundos.

