

EFFECTOS DE SITIO EN LA CIUDAD DE OAXACA. RESULTADOS CON REGISTROS DE TEMBLORES Y MEDICIONES DE MICROTREMORES

Javier Lermo Samaniego y Francisco Chávez-García
Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Se presentan resultados de una campaña de monitoreo sísmico en la ciudad de Oaxaca, realizada con objeto de caracterizar la respuesta dinámica del terreno con fines de microzonificación. Una red temporal de sismógrafos digitales instalada durante los meses de julio y agosto de 1991 en la zona urbana de la ciudad de Oaxaca permitió registrar 32 sismos en al menos dos estaciones. Los datos obtenidos fueron analizados utilizando la técnica de cocientes espectrales, lo que permitió caracterizar 20 sitios sobre los depósitos sedimentarios de la ciudad en términos de amplificación relativa a un sitio en roca y de período dominante. La información anterior fué completada con mediciones de microtremores. Estos datos fueron analizados utilizando dos técnicas diferentes: cocientes espectrales y la técnica de Nakamura. Nuestros resultados indican que la segunda es más estable y proporciona estimaciones de período dominante muy similares a las obtenidas con sismogramas. Los resultados permitieron definir curvas de isoperíodos en la zona urbana de Oaxaca, valores de amplificación relativa en algunos sitios y el mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Oaxaca. Estos resultados servirán para mejorar la zonificación definida en el reglamento de construcciones de la ciudad de Oaxaca y ayudarán a establecer recomendaciones para el diseño de futuras obras de ingeniería.

ABSTRACT

An experiment of weak motion recording was conducted in the city of Oaxaca. The purpose was to characterize the dynamic response of the ground in order to be able to propose a seismic microzonation for this important city. During July and August, 1991, a temporal, digital, seismograph network recorded 32 events with at least two stations. This data was analyzed using standard spectral ratio technique, allowing to characterize dominant period and amplification relative to firm ground motion at 20 sites on sedimentary deposits. Additional data came from measurements of microtremors, analyzed using two different techniques: spectral ratios and Nakamura. The results indicate that the latter technique is more stable and gives estimates of dominant period very similar to those obtained from weak motion data. The results allowed to draw isoperiod curves in Oaxaca urban zone and provided estimates of amplification relative to firm ground at some sites. On the ground of these results, we propose a microzonation map for the city of Oaxaca. This map is an improvement on the current microzonation map of Oaxaca Building Code and will be of help to establish recommendations for the design of large future facilities.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Oaxaca se encuentra en una zona de alta sismicidad (Barrera, 1931). El desarrollo urbano que ha experimentado recientemente, así como los progresos en ingeniería sísmica requieren proponer un nuevo reglamento de construcciones para esta ciudad. En este estudio, y para fines de evaluar el comportamiento dinámico de la ciudad, hemos utilizado el análisis espectral de registros de temblores pequeños y de microtemblores. En efecto, dado que Oaxaca es una zona de alta sismicidad, es posible obtener registros de temblores pequeños en un lapso corto. Sin embargo, el ruido de fondo en la ciudad limita el número de sitios en los que pueden obtenerse registros durante un cierto período con una red temporal. Es por ello que elegimos utilizar adicionalmente registros de vibración ambiental. Podemos separar los registros de microtemblores en dos grupos distintos: aquellos obtenidos en sitios para los cuales se dispone de registro de temblores pequeños y aquellos obtenidos en otros puntos de la zona urbana de Oaxaca. El primer grupo permitió no solamente evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos con microtemblores al compararlos con los obtenidos usando sismogramas, sino también permitió comparar entre sí diferentes formas de interpretar las mediciones (en particular las técnicas de cocientes espectrales y el método de Nakamura, los cuales se discuten más adelante). El segundo grupo de mediciones de vibración ambiental permitió obtener una mejor cobertura instrumental de la zona urbana de Oaxaca.

REGISTRO Y ANÁLISIS DE SISMOS PEQUEÑOS

Adquisición de datos

La adquisición de datos se realizó utilizando 7 sismómetros Lennartz con tres componentes de 1 seg de período natural acoplados a registradores digitales PRS-4 EDA Instruments. Este sistema utiliza un algoritmo de disparo y almacena la información en una memoria de estado sólido que tiene capacidad de 2 megabytes. La información se recupera mediante una computadora portátil. El control del tiempo se realiza usando un reloj externo de alta precisión marca Nanometrics. La respuesta del sistema es plana para velocidades entre 1 y 30 Hz.

Del 15 de julio al 30 de agosto de 1991, se instalaron estas estaciones en la zona urbana de Oaxaca.

En la figura 1 se muestra la distribución de las estaciones. Con objeto de cubrir el mayor número de sitios posible, se desplazaron seis de las estaciones mientras se dejaba fija VHO, la estación de referencia. Se cubrieron un total de 20 sitios aparte de la estación de referencia. VHO está localizada en el Cerro del Fortín, sobre rocas metamórficas. Las estaciones restantes se situaron en las diferentes zonas del valle, dando preferencia a la zona colonial de la ciudad y a la región al Sur de la misma, sobre los aluviones cuaternarios.

EVENTOS REGISTRADOS

La red temporal permitió registrar 32 sismos con al menos dos estaciones. Este número de eventos no refleja una baja actividad sísmica sino un nivel de ruido elevado durante el día. La mayoría de estos temblores fueron registrados durante la madrugada, momento en el que el nivel de ruido ambiental es mínimo, lo que permite obtener registros de muy buena calidad. La figura 2 muestra un ejemplo de los sismogramas obtenidos en la componente NS de las estaciones. Corresponde a un evento de la zona de subducción, a aproximadamente 200 km al Sur de la ciudad de Oaxaca. Los efectos locales afectan tanto la amplitud del movimiento (que es mínima en VHO y aumenta en los otros sitios) así como el contenido espectral de las señales (frecuencia dominante más elevada en VHO, relativamente a las otras estaciones).

La distribución de epicentros obtenida se muestra en la figura 3. Durante el período de observación, las magnitudes estuvieron comprendidas entre 2.3 y 5.2 (Magnitud de coda). Podemos observar que la actividad sísmica está presente en todo el estado. Cabe resaltar que el sismo de mayor magnitud (5.2, con réplicas de magnitudes 4.7, 4.2, 4.0 y 2.5) se localizó al Noreste del estado, cerca del poblado de Chimaltepec, y fue sentido en la ciudad de Oaxaca. Este evento subraya la necesidad de considerar no solamente los eventos situados en la costa (zona de subducción) sino también la sismicidad de fondo e intraplaca en la evaluación del riesgo sísmico.

Espectros de amplitud y razones espectrales

Con objeto de evaluar la amplificación relativa entre los diversos sitios para los cuales disponemos de registros y la estación de referencia (VHO) hemos

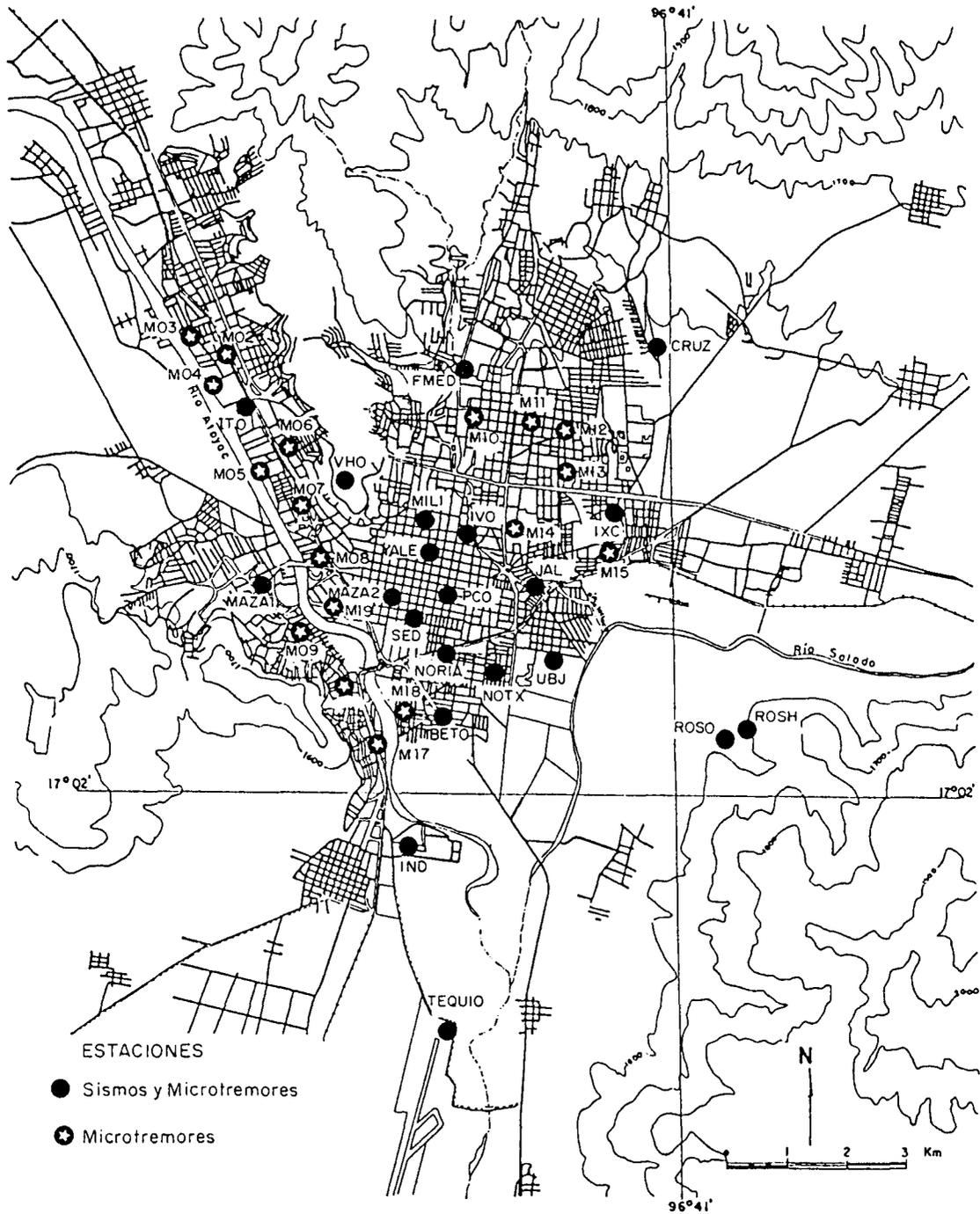


Fig 1. Distribución de las estaciones de la red temporal de sismógrafos utilizadas para la evaluación de la amplificación relativa. Se muestran también los puntos en los cuales se obtuvieron registros de microtremores.

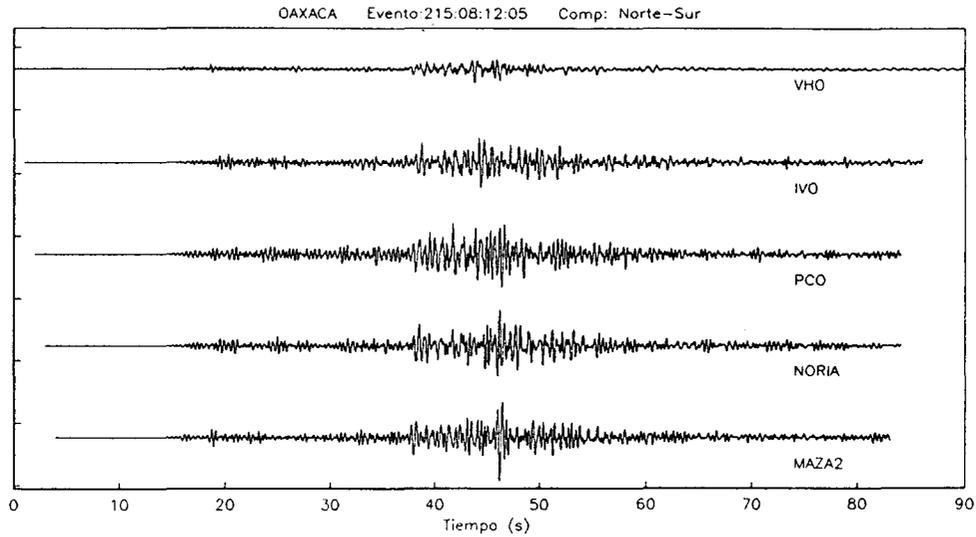


Fig 2. Componentes NS registradas por la red local. Evento ($M_c=5.1$) de la zona de subducción, aproximadamente a 200 km al sur de la ciudad de Oaxaca.

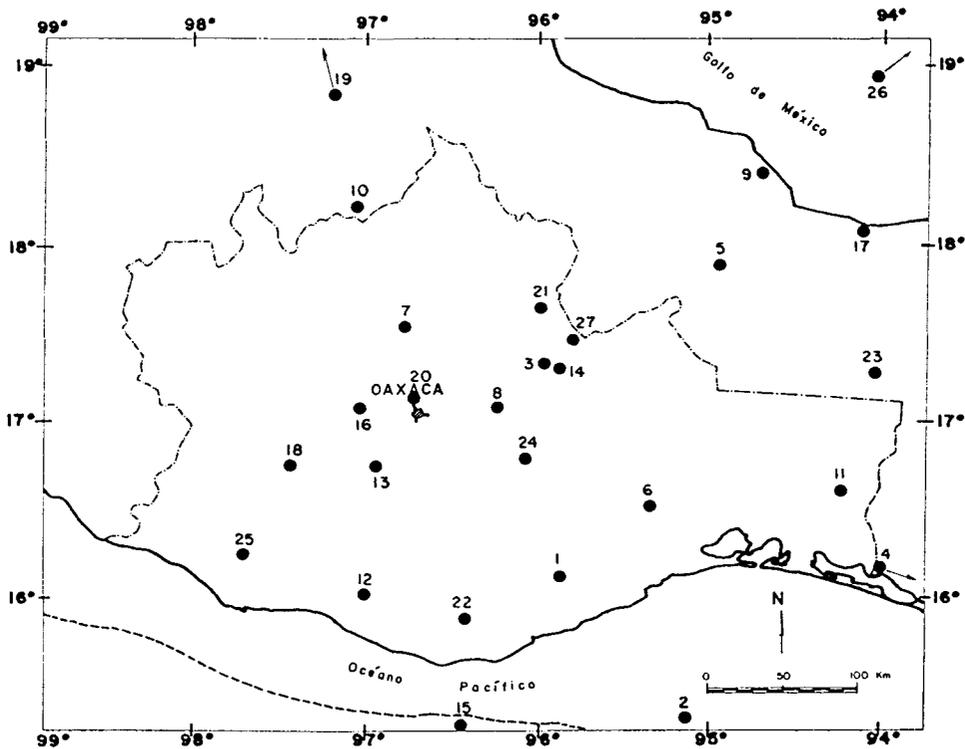


Fig 3. Localización de los epicentros de los sismos registrados con la red temporal de sismógrafos.

calculado cocientes espectrales. El procedimiento es estándar y consiste en escoger una ventana de señal común al sitio de interés y a la estación de referencia. El cociente espectral se define como la razón de los espectros de amplitud de Fourier entre las dos estaciones, suavizados con objeto de reducir la varianza del cociente. En este estudio utilizamos una ventana de 10 s centrada alrededor de la onda S, la parte más energética de la señal. Los espectros de amplitud fueron suavizados con una ventana cuadrada de 1/3 de octava de ancho. Un ejemplo del tipo de resultados que se obtienen se muestra en la figura 4. Las figuras 4a y 4b muestran los espectros de amplitud de Fourier suavizados para la componente EW de sismos registrados simultáneamente en VHO y en TEQUIO. La razón espectral entre ambas estaciones se muestra en la figura 4c. Se observa una buena concordancia entre las 4 curvas, correspondientes a 4 eventos, todas las cuales indican un pico de resonancia entre 1 y 2 Hz con amplitudes comprendidas entre 6 y 10. La causa más importante de la dispersión de los cocientes espectrales es la existencia en el subsuelo de irregularidades laterales en la estructura de los depósitos sedimentarios.

REGISTRO Y ANÁLISIS DE MICROTREMORES

Adquisición de datos y espectros de amplitud

El sistema de adquisición de datos que se utilizó para el registro de microtremores consiste de tres sensores marca Kinematics con período natural de 5 segundos. La grabación de las señales se efectúa en cinta magnética (cassette) con un registrador digital (Sprengnether tipo DR-100), tomando 100 muestras por segundo en cada componente y grabando cada muestra en 12 bits. La curva de magnificación del sistema para la velocidad del terreno es plana de 0.2 a 20 Hz (Lermo *et al.*, 1988a).

La distribución de sitios en los cuales se registraron microtremores se muestra en la figura 1. Dentro de las pruebas que se realizaron para asegurar la obtención de datos de buena calidad, podemos destacar la evaluación de la estabilidad de la vibración ambiental en la estación de referencia. En VHO se obtuvieron registros tanto durante el día como durante la noche. Los resultados indican que durante la noche el nivel de ruido am-

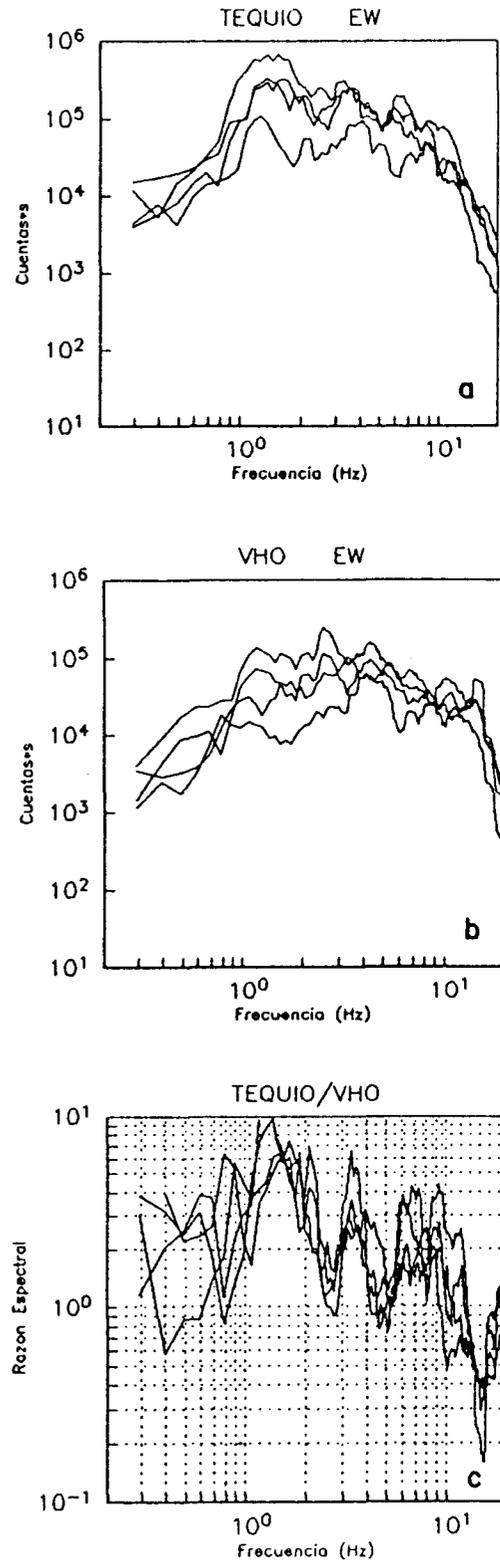


Fig 4

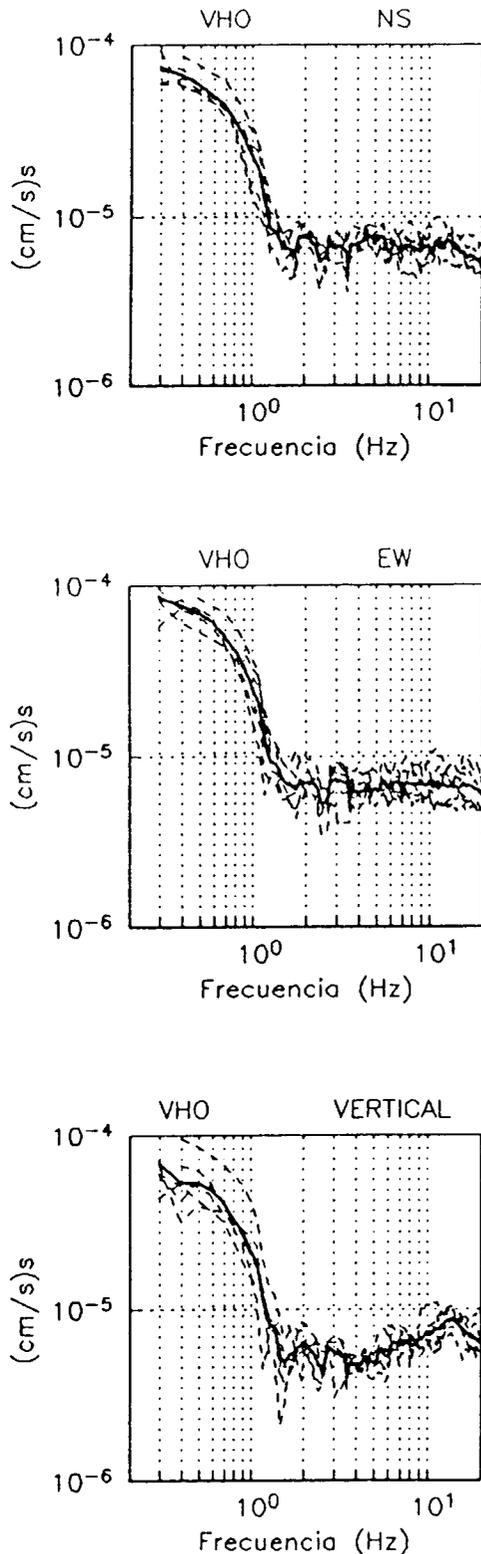


Fig 5

biental disminuye drásticamente. En cambio, se obtuvieron niveles de vibración muy estables a todo lo largo del día, observándose también una forma espectral constante. Es por ello que elegimos realizar las mediciones en todos los sitios durante el día. No consideramos necesario tampoco realizar registros simultáneos de microtremores en los sitios sedimentarios y en la estación de referencia, debido también a la gran estabilidad en la forma de los espectros obtenidos en VHO para una gran cantidad de ventanas de registro (figura 5).

En lo que concierne a los sitios en las zonas de depósitos sedimentarios, se procedió de la siguiente manera. En cada sitio se obtuvieron varios registros con una duración de un minuto cada uno y a intervalos de 15 minutos. Dentro de estos registros se seleccionaron varias ventanas (alrededor de 6 para cada estación) con una duración de 10 s, que se utilizaron como entrada para el cálculo de los espectros de amplitud. Los criterios de selección incluyen la determinación de un segmento de registro lo más estacionario posible, sin señales transitorias (p. ej., señales de corta duración debidas al tráfico en la inmediata vecindad al instrumento, paso de peatones, etc.).

Los espectros de amplitud se calcularon con el mismo algoritmo utilizado para los registros de temblores. Puesto que disponemos de varias ventanas para cada sitio, calculamos los promedios logarítmicos de los espectros obtenidos para cada ventana. Ello permitió disminuir la varianza en la estimación y aumentar consiguientemente la estabilidad del resultado (figura 6).

Comparación con resultados de sismos pequeños

Con este fin hemos evaluado la información de microtremores usando dos técnicas diferentes. En primer lugar, una vez que disponemos del espectro de amplitud promedio para cada sitio, calculamos el cociente espectral entre el sitio en sedimentos y la estación de referencia, y tomamos este cociente como una estimación de la función de transferencia empírica. La hipótesis que subyace a esta interpretación es que la excitación de microtremores es la misma en la estación sobre sedimentos y en la estación de referencia.

En segundo lugar, basándonos en resultados recientes (Nakamura, 1989; Lermo *et al*, 1988b;

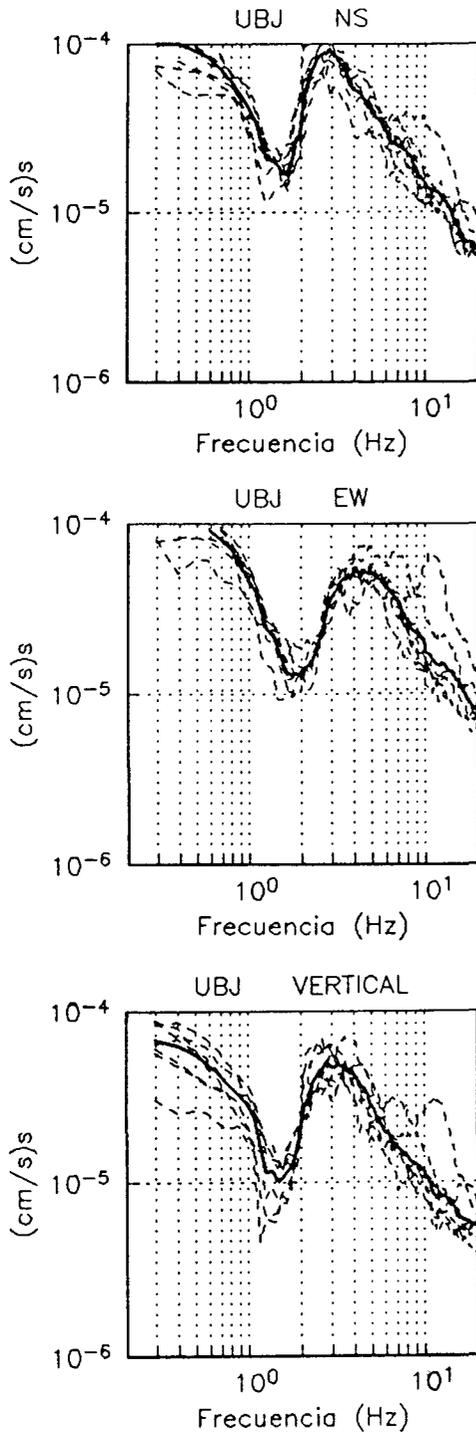


Fig 6. Espectros de amplitud de Fourier de los registros de microtremores obtenidos en la estación UBJ para las tres componentes de movimiento. Líneas discontinuas: espectros de una ventana de 10 s. Línea gruesa: promedio de las diferentes ventanas.

Ohmachi *et al.*, 1991; Lermo y Chávez-García, 1994a,b) obtuvimos una estimación de la función de transferencia local sin utilizar el registro en VHO. En efecto, Nakamura (1989) propone como hipótesis de base que los microtremores se deben principalmente a la excitación de ondas de Rayleigh y que el efecto de fuente puede estimarse con el cociente entre las componentes verticales del movimiento en la superficie y en la base de la estratificación. Si se hace la hipótesis adicional de que el cociente entre movimiento horizontal y vertical en la base de la estratificación es unitario, una estimación del efecto de sitio sobre la componente horizontal es el cociente espectral entre las componentes horizontales y la vertical en la superficie. Si se aceptan estas hipótesis, este procedimiento permite compensar, al menos parcialmente, el efecto de la fuente y soluciona uno de los mayores problemas de aplicación de microtremores (Finn, 1991). En efecto, la ausencia total de información acerca de la fuente que excita los microtremores ha sido señalada como uno de los mayores obstáculos a la interpretación de los registros (Aki, 1988). Los resultados de esta técnica, aplicada no solamente en la ciudad de Oaxaca y usando registros de vibración ambiental, sino en otros sitios y utilizando registros de temblores pequeños, son muy prometedores (Lermo y Chávez-García, 1993).

La figura 7 muestra la comparación de las funciones de transferencia empíricas obtenidas con registros de temblores con aquellas obtenidas usando microtremores y aplicando las dos técnicas mencionadas. La figura muestra la presencia de picos de resonancia bien definidos por los temblores. Estos son bien identificados por la técnica de Nakamura, con buena resolución, lo que permite obtener correctamente el período dominante. La técnica de cocientes espectrales concuerda claramente en la mayoría de los casos, aunque en algunos otros no se obtiene la resolución adecuada.

RESULTADOS

Mapa de isoperíodos y valores de amplificación relativa

La Tabla 1 muestra los valores de período dominante y amplificación relativa obtenida en todos los sitios para los cuales se dispone de mediciones. Los valores reportados corresponden a un promedio de los resultados obtenidos para todos los sismos registrados en cada estación instrumentada con

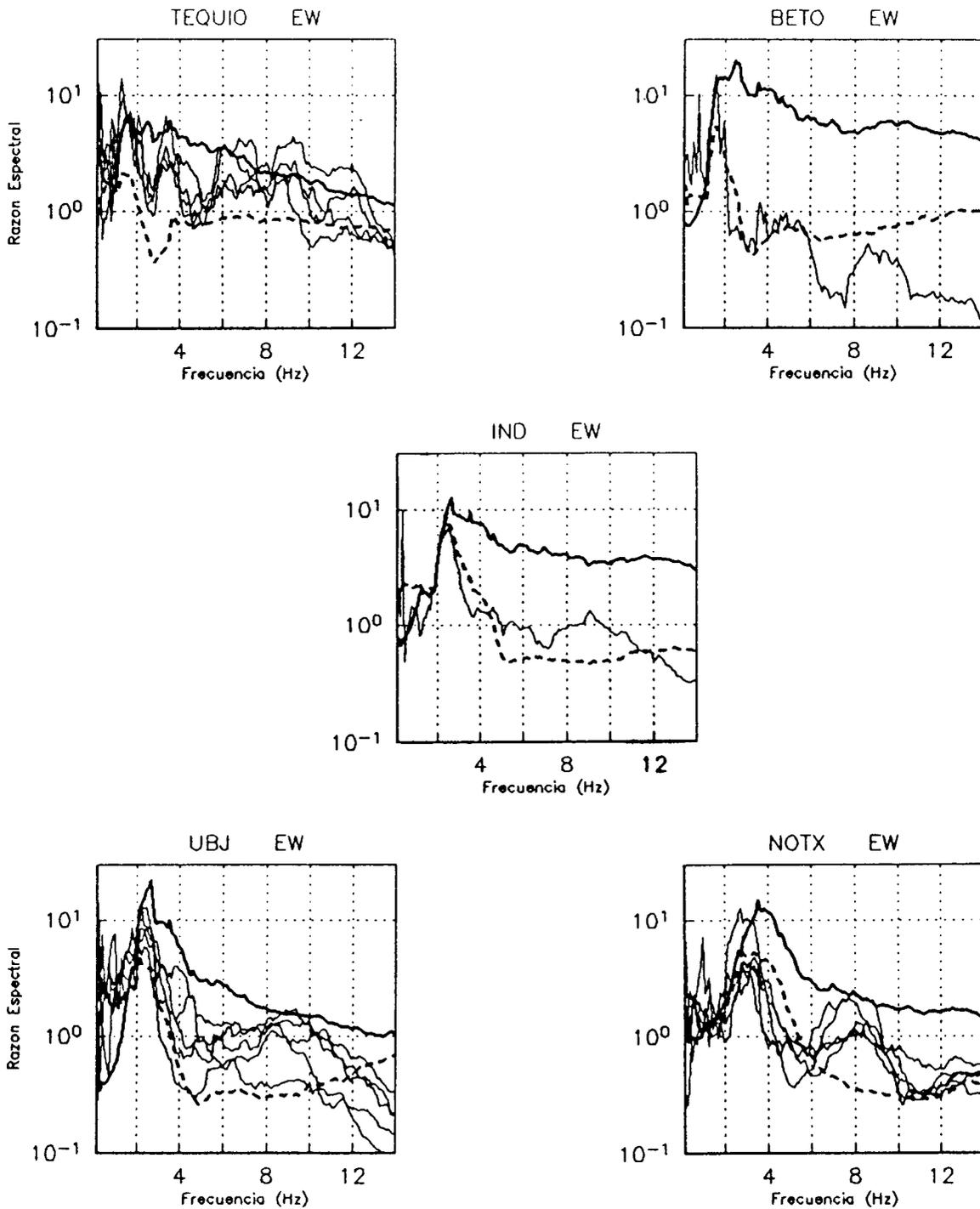


Fig 7. Cocientes espectrales para la componente EW de las estaciones TEQUIO, BETO, IND, UBJ y NOTX. La estación de referencia es VHO. Líneas delgadas: resultados obtenidos con datos de temblores. Línea gruesa continua: promedio de los resultados de la técnica de cocientes espectrales de microtremores. Línea gruesa discontinua: promedio de los resultados con la técnica de Nakamura con datos de microtremores.

Tabla 1. Amplificación relativa (A_r) con respecto a VHO medida para el período dominante (T_0)

ESTACION	EVENTO Nro. Fig.3	COMP. NS		COMP. EW		PROMEDIO	
		T_0 (s)	A_r	T_0 (s)	A_r	T_0 (s)	A_r
VHO ¹	1.....32						
TEQUIO	26,27,28, 29,31	0.8	25	0.8	9	0.8	17
BETO	31	0.8	11	0.7	15	0.8	13
IND	31	0.5	6	0.5	7	0.5	6
UBJ	6,7,9,10,11	0.5	19	0.5	10	0.5	15
NOTX	5,6,8,9,11,12,13	0.3	8	0.4	6	0.3	7
ITO	5,12	0.3	5	0.3	4	0.3	4
MAZA2	15,17	0.4	6	0.3	5	0.3	6
SED	5	0.5	5	0.6	8	0.5	7
PCO	15,17	0.3	6	0.4	8	0.3	7
NORIA	15,17	0.4	5	0.3	5	0.3	5
FMED	17	0.3	5	0.2	4	0.2	4
IVO	15,16,17,18,19	0.3	7	0.3	4	0.3	5
JAL	12,13,14	0.2	4	0.2	3	0.2	4
IXC	1,2,3,4,5	0.3	6	0.2	4	0.2	5
CRUZ	20,21,22,23,24,25	0.2	4	0.2	2	0.2	3
MAZA1	13,17,18	0.1	4	0.1	2	0.1	3
YALE	12,13	0.3	3	0.3	2	0.3	2
MILI	21,22,23,24	0.2	5	0.3	3	0.3	4
ROSO	30,31,32	0.3	4	0.2	4	0.2	4
ROSH	32	0.1	3	0.1	2	0.1	3
MO3		0.5	4	0.5	4	0.5	4
MO4		0.4	6	0.4	5	0.4	6
MO5		0.6	4	0.6	4	0.6	4
MO6		0.2	4	0.2	3	0.2	4
MO7		0.2	3	0.2	6	0.2	5
MO8		0.6	4	0.6	5	0.6	4
MO9		0.4	7	0.4	7	0.4	7
MO11		0.2	3	0.2	3	0.2	3
MO14		0.2	3	0.2	3	0.2	3
MO15		0.3	13	0.3	17	0.3	15
MO18		0.5	5	0.5	5	0.5	5
MO19		0.5	8	0.5	9	0.5	9

¹Estación de referencia en zona alta

sismógrafos. En la Tabla 1 se indica el número de los eventos registrados por cada estación, así como los valores de período y amplificación para cada componente horizontal. Las últimas dos columnas de la Tabla 1 proporcionan el promedio de las componentes horizontales para cada sitio. En lo que concierne a las estaciones para las cuales no se dispone de sismogramas, se reportan asimismo valores de período dominante y de amplificación relativa. Como se desprende de la sección anterior, los valores reportados son aquellos determinados por la técnica de Nakamura. Se observa una buena coherencia entre estos resultados y los obtenidos con datos de temblores para estaciones cercanas. Los valores máximos de amplificación promedio se sitúan alrededor de 15, y ocurren para períodos dominantes inferiores a 0.25 s. Los períodos medidos para las estaciones en sedimentos varían entre 0.25 y 0.8. La información presentada en la Tabla 1 se muestra gráficamente en la figura 8. En cada estación se indica el promedio obtenido para período dominante y valor de amplificación relativa. Adicionalmente se han trazado las curvas de isoperíodos para la zona urbana.

Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad

Finalmente, se integró toda la información para proponer un mapa de microzonificación de la zona urbana de la ciudad de Oaxaca. Este mapa se presenta en la figura 9 y está basado principalmente en los resultados presentados en la sección anterior. Se han identificado 4 zonas de comportamiento sísmico diferente. En primer lugar, la zona alta, corresponde a aquellos sitios de suelo competente, que presentan períodos dominantes inferiores a 0.25 s y amplificación relativa inferior a un factor 4. En segundo lugar, se incorporó al mapa una zona de pendientes. En esta zona se realizaron únicamente dos mediciones (M16 y M17) que no muestran una amplificación significativa. Sin embargo, hemos incluido esta zona como susceptible de sufrir derrumbes y deslizamientos en caso de sismos fuertes, debido a que se trata de material no consolidado y dispuesto en pendientes mayores de 15 grados. Esta zona bordea el Cerro del Fortín, al Norte de la ciudad, y el Cerro de Monte Albán al Oeste.

La zona intermedia abarca períodos de 0.25 a 0.5 s, con valores de amplificación relativa entre 3 y 7 (un solo punto de medición de microtemblores

indica una amplificación de 15). Esta zona corresponde a la parte colonial de la ciudad de Oaxaca, por lo que se le considera de mayor riesgo.

Finalmente, la zona baja abarca períodos dominantes mayores a 0.5 s (los valores máximos medidos fueron de 0.8 s) y valores de amplificación comprendidos entre 5 y 17. Esta zona corresponde a los depósitos fluviales de mayor espesor, situados al sur de la zona urbana. Esta zona, por su período dominante y altos valores de amplificación relativamente a VHO, presenta el mayor peligro en la zona urbana de Oaxaca.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos utilizado el análisis espectral de registros de temblores pequeños y de microtemblores para evaluar el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelos en la ciudad de Oaxaca. Tomando en consideración las dudas existentes en la literatura sobre la aplicación de microtemblores, exploramos dos formas diferentes de interpretar estas mediciones. Nuestros resultados indican que los cocientes espectrales de microtemblores no garantizan la obtención del período dominante y en general sobrestiman los valores de amplificación relativa medida con sismogramas. La técnica de Nakamura, en cambio, proporcionó en casi todos los casos una estimación del período dominante muy similar a la obtenida con temblores y una estimación de la amplificación relativa también cercana a la obtenida con sismogramas. Este resultado valida la aplicación de microtemblores para la estimación del efecto de sitio en la ciudad de Oaxaca y permitió incorporar mediciones de microtemblores en sitios en los que no se instalaron sismógrafos.

Finalmente se integraron los resultados para presentar el mapa de isoperíodos de la zona urbana de Oaxaca, estimaciones de los valores de amplificación relativa en algunos sitios y el mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Oaxaca.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a los Ings. Mario Cruz y Carlos Cuevas del Instituto Tecnológico de Oaxaca y a los Lics. José Millán S. y Carlos Aldeco R. del Sistema Estatal de Protección Civil del Edo. de Oaxaca por las facilidades otorgadas en el trabajo de campo. Se agradece al Dr.

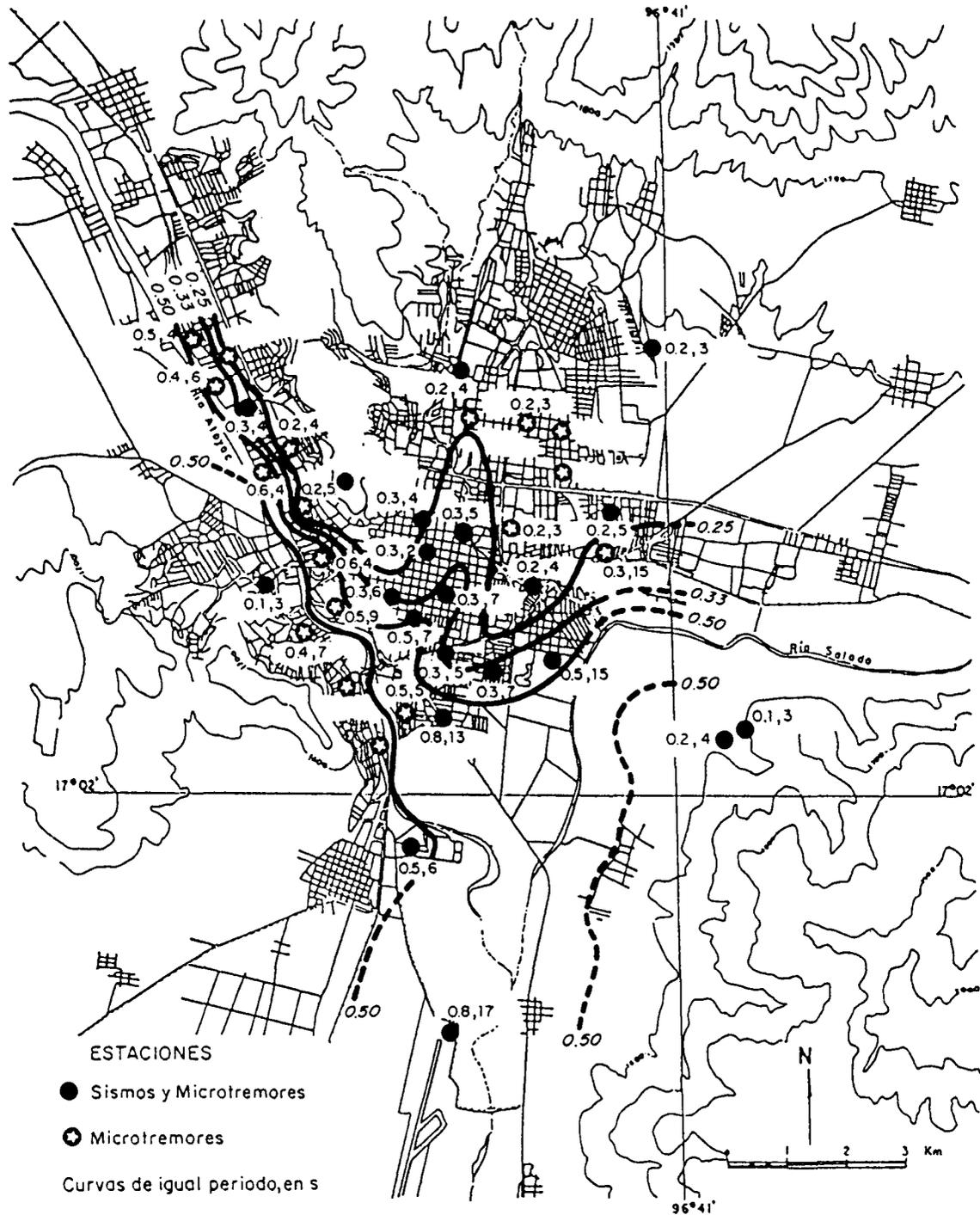


Fig 8. Mapa de isoperiodos para la zona urbana de la ciudad de Oaxaca. Se muestran junto a cada estación los valores promedios de período dominante en s, y de amplificación relativa (con respecto a VHO).

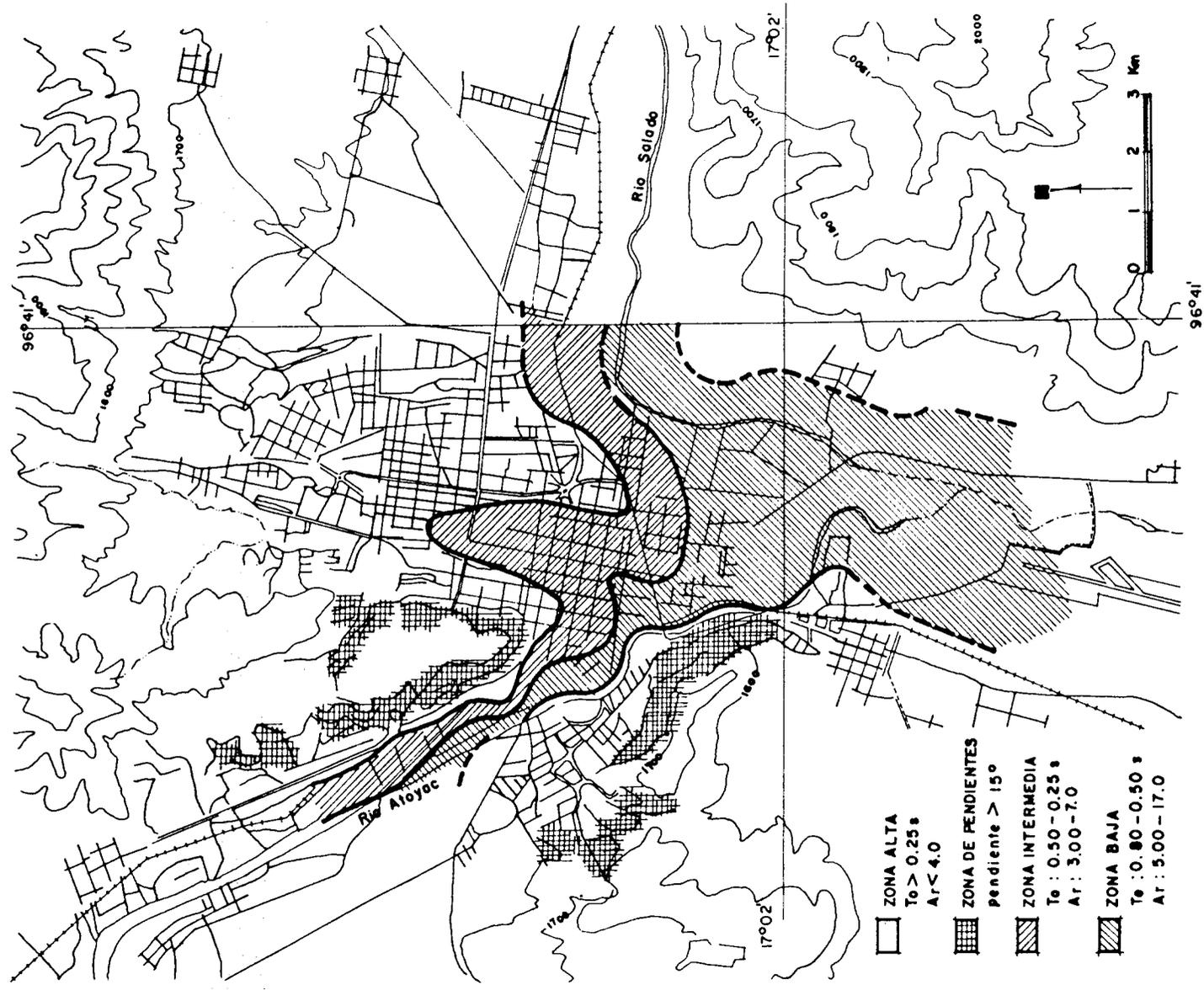


Fig 9. Mapa de microzonificación sísmica para la zona urbana de Oaxaca.

Mario Ordaz, sus comentarios a este trabajo. Este estudio fué patrocinado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

REFERENCIAS

- Aki, K.** (1988). "Local site effects on ground motion", *Earthquake Engineering and Soil Dynamics. II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, J.L. Von Thun (editor), Am. Soc. Civil Eng./Geotechnical Special Publication, 20, 103-155.
- Barrera, T.** (1931). "El temblor del 14 de enero de 1931", Instituto de Geología, UNAM, México, D.F.
- Finn, W.D.L.** (1991). "Geotechnical engineering aspects of microzonation", *Proc. 4th Int. Conf. on Seismic Zonation*, Stanford, California, Vol. I, 199-259.
- Lermo, J., M. Rodríguez y S.K. Singh** (1988a). "Observaciones de microtemblores y su aplicación en la ingeniería sísmica", *Revista Geofísica (IPGH)*, 28, 123-143.
- Lermo, J., M. Rodríguez, y S.K. Singh** (1988b). "Natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements", *Earthquake Spectra*, 4, 805-814.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García** (1993). "Site effect evaluation using spectral ratio with only one station", *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García** (1994a). "Are microtremors useful in site response evaluation?", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1350-1364.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García** (1994b). "Site effect evaluation at Mexico City: Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.
- Nakamura, Y.** (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *QR of RTRI*, 30, No.1, 25-33.
- Ohmachi, T., Y. Nakamura, and T. Toshinawa** (1991). "Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements", *Proc. 2nd. Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earth. Eng. & Soil Dyn.*, San Luis, Missouri, 11-15 March, 1643-1648.