

03077



Universidad Nacional Autónoma de México

UNIDAD DE CICLOS PROFESIONALES Y DE POSGRADO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

Posgrado en Ciencias de la Tierra

**INFLUENCIA DEL PARQUE INMOBILIARIO EN EL
MOVIMIENTO SÍSMICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

(SISMOLOGÍA Y FÍSICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA)

presenta

MARÍA LUISA BERMÚDEZ ANGULO

1 9 9 7

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

Las condiciones en las que los efectos de interacción suelo-estructura son más importantes, son aquellas en las que las estructuras masivas están desplantadas sobre suelos muy blandos. Dichos efectos se favorecen asimismo, cuando los periodos naturales de las estructuras coinciden con los periodos naturales de las capas de suelo blando. Estas condiciones están presentes en la zona de lago del valle de México, pero los numerosos estudios realizados hasta el momento sobre la respuesta sísmica del valle han ignorado los posibles efectos de las estructuras en los registros de "campo libre". En este trabajo se analizan datos acelerográficos recopilados en la Ciudad de México para identificar y cuantificar los efectos de interacción suelo-estructura en los registros de "campo libre".

Los datos empleados corresponden a los registrados durante los sismos del 10 de diciembre de 1994 ($M_S=6.4$) y 14 de septiembre de 1995 ($M_S=7.3$). Se recopilaron los acelerogramas obtenidos en el valle de México durante estos eventos, tanto los de "campo libre" como los obtenidos en 8 edificios instrumentados. Primero se identificaron las frecuencias fundamentales de las estructuras. En seguida se estudiaron los registros de "campo libre" obtenidos en las cercanías de las estructuras buscando picos en los espectros a las frecuencias propias de los edificios. A continuación se realizó un análisis en el dominio del tiempo, asignándose una base de tiempo común a los registros y buscando identificar trenes de onda propagándose a partir de las estructuras. Por último se realizó un modelado preliminar que simula la respuesta sísmica de un edificio sobre un medio heterogéneo viscoelástico en 2D ante incidencia de ondas P-SV y SH, mediante un esquema de diferencias finitas.

Los resultados obtenidos indican que los efectos de interacción suelo-estructura son importantes en la zona de lago. Esto por el contraste de la propiedades mecánicas de las estructuras y las del suelo blando. Los efectos de las estructuras resultan difíciles de cuantificar debido a la gran densidad del parque inmobiliario en la Ciudad de México. De igual forma, los resultados muestran que estos efectos contribuyen a que no exista coherencia en el movimiento sísmico de estaciones cercanas.

A mi madre,

***Porque su vida ha sido y seguirá siendo un
constante ejemplo de lucha y superación.***

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Coordinación de Ingeniería Sismológica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, las facilidades que me brindaron para el desarrollo de este trabajo. En especial a cada uno de sus integrantes, por su colaboración y apoyo cuando fue requerido. A mi director de tesis, Dr. Francisco J. Chávez García por darme la oportunidad de trabajar a su lado, así como por su comprensión, ayuda y enseñanzas durante el transcurso de mi tesis. A todos los amigos que he adquirido en mi estancia en este país, por su incondicional ayuda.

De igual forma a todas las personas que integraron el jurado de examen de grado, por sus sugerencias y comentarios. Dr. Mario Ordaz Schröder, Dr. Shri Krishna Singh Singh, Dr. Cinna Lomnitz Aronsfrau. y Dr. Javier Avilés López.

De manera especial a las siguientes instituciones y personas por facilitar amablemente los registros de aceleración de los edificios: Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (edificios Metro Juárez y Plaza Córdoba); Dr. David Muria Vila (edificio Jalapa); Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, CIRES (edificios Plaza Inn e IMSS); Coordinación de Instrumentación Sísmica del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (edificios Unidad Kennedy e IMP); Fundación Javier Barros Sierra (edificio Secundaria No.3). La figura 18 fue proporcionada amablemente por el M en I Luis Eduardo Pérez Rocha. Los cálculos de diferencias finitas fueron llevados a cabo por el Dr. Peter Moczo. Este proyecto fue financiado por la Dirección General de Obras del Departamento del Distrito Federal, DDF, bajo el contrato CA-038/97.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	5
Figuras	10
2. DESCRIPCIÓN, INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA Y REGISTROS DE LOS EDIFICIOS Y LA RED ACELEROGRÁFICA DEL VALLE DE MÉXICO	15
2.1 Historia de la instrumentación sísmica con fines ingenieriles	15
2.2 Datos de los edificios instrumentados y temblores empleados	17
2.2.1 Edificios instrumentados por el Instituto de Ingeniería, UNAM	17
2.2.1.1 Edificio Jalapa	18
2.2.1.2 Edificio Plaza Córdoba	18
2.2.1.3 Edificio Metro Juárez	19
2.2.2 Edificios instrumentados por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, CIRES.	19
2.2.2.1 Conjunto Plaza Inn	19
2.2.2.2 Instituto Mexicano del Seguro Social, IMSS	20
2.2.2.3 Escuela Secundaria No. 3	21
2.2.3 Edificios instrumentados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED	22
2.2.3.1 Instituto Mexicano del Petróleo	22
2.2.3.2 Unidad Kennedy	23
2.3 Red Acelerográfica del Valle de México (RAVM)	23
2.3.1 Objetivos generales de la red	23
2.3.2 Características de la red	24

2.3.3 Acelerógrafos de la red	24
2.3.4 Sismos registrados	25
Figuras y tablas	26
3. ANÁLISIS EN FRECUENCIA	40
3.1 Interacción suelo-estructura	41
3.2 Función de transferencia	43
3.3 Análisis del movimiento observado en los edificios	44
3.3.1 Frecuencia fundamental del edificio Jalapa	44
3.3.2 Frecuencia fundamental del edificio Plaza Córdoba	45
3.3.3 Frecuencia fundamental del edificio Metro Juárez	46
3.3.4 Frecuencia fundamental del conjunto Plaza Inn	46
3.3.5 Frecuencia fundamental del edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social	47
3.3.6 Frecuencia fundamental de la escuela Secundaria No. 3	47
3.3.7 Frecuencia fundamental del edificio del Instituto Mexicano del Petróleo	47
3.3.8 Frecuencia fundamental del edificio No. 81 de la Unidad Kennedy	48
3.4 Análisis del movimiento sísmico de campo libre	49
3.5 Comparación de la frecuencia fundamental del edificio con el HVSR de las estaciones cercanas	51
3.6 Conclusiones	53
Figuras y tablas	55
4. ANÁLISIS EN EL TIEMPO	95
4.1 Asignación de una base de tiempo común	95

4.1.1 Corrección de tiempo para los registros de los edificios	96
4.2 Identificación de trenes de onda comunes	98
4.2.1 Análisis para el edificio Plaza Córdoba	98
4.2.1.1 Análisis en la dirección radial al epicentro	98
4.2.1.2 Análisis en la dirección transversal al epicentro y al edificio	100
4.2.2 Análisis para el edificio Jalapa	101
4.3 Análisis de los resultados	101
4.4 Conclusiones	102
Figuras y tablas	104
5. MODELADO	140
5.1 Modelo utilizado	141
5.2 Análisis de los resultados	142
5.3 Conclusiones	143
Figuras	145
6. CONCLUSIONES GENERALES	153
Referencias	155

INTRODUCCIÓN

La respuesta sísmica del valle de México ha sido objeto de numerosas investigaciones durante los últimos años, pues la Ciudad de México además de ser la concentración urbana más importante del país, enfrenta un elevado riesgo sísmico. A través de la historia la ciudad ha sido afectada por grandes temblores, los cuales han ocasionado pérdidas humanas y materiales importantes. Dentro de este siglo se pueden mencionar varios sismos cuya intensidad en el Distrito Federal fue estimada mayor o igual a 7 (Figueroa, 1987): el temblor del 28 de julio de 1957, conocido como el "temblor del ángel", el temblor del 14 de marzo de 1979 y el temblor del 19 de septiembre de 1985.

Durante el temblor del ángel ocurrieron numerosos daños materiales y lamentablemente la pérdida de decenas de vidas humanas. Salvo los sismos de 1985, este evento, ha sido quizá el más intenso y destructivo para las obras civiles de la Ciudad de México. El temblor del 14 de marzo de 1979, es recordado principalmente por haber ocasionado el colapso de la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México. Su origen estuvo en la brecha sísmica de Petatlán, región en la cual también se originó la réplica del gran terremoto de Michoacán de 1985. Este último es el evento que más pérdidas humanas y materiales ha originado; pero cabe destacar que fueron las consecuencias de este evento las que propiciaron un fuerte impulso a la Sismología y la Ingeniería Sísmica.

Formalmente, podemos dividir en cuatro a los fenómenos que intervienen en la respuesta sísmica del valle de México: los relacionados con los procesos de la fuente sísmica, los efectos de trayecto, los efectos de interacción suelo-estructura y los efectos de sitio. Estos últimos, se originan por la geometría y propiedades mecánicas de las formaciones geológicas locales, y afectan considerablemente el movimiento del suelo. Los acelerogramas registrados durante el sismo de Michoacán en la Ciudad de México, evidenciaron grandes diferencias entre el movimiento del terreno en la zona de lomas y el observado en la zona de lago. Adicionalmente a la amplificación del movimiento, se observaron en los registros de la zona de lago arribos tardíos de energía, los cuales ocasionaron que la duración del movimiento fuerte en esta zona fuera tres veces mayor que en la zona de lomas (Singh et al., 1988a). Las estructuras que fueron más afectadas estaban sobre la capa de arcilla muy blanda que cubre la zona de lago en la ciudad (Meli y Ávila, 1989).

Numerosos estudios (Bard et al., 1988; Sánchez-Sesma et al., 1988; Kawase y Aki, 1989; Seligman et al., 1989; Lomnitz, 1990; Chávez-García, 1991; Singh y Ordaz, 1993; Lermo y Chávez-García, 1994 y Chávez-García et al., 1994 y 1995) sobre los efectos de sitio en el valle de México se han llevado a cabo, intentando explicar la gran duración del movimiento

sísmico en la zona de lago de la Ciudad de México, sin que se pueda entender claramente las causas que originan este fenómeno.

Desde la creación de la Red Acelerográfica del Valle de México, los datos registrados en sus estaciones se han utilizado para estudios que intentan entender y cuantificar el movimiento debido a temblores en la Ciudad de México. En todas estas investigaciones se ha considerado que los acelerógrafos de "campo libre" representan fielmente el movimiento del terreno. Ninguno de esos estudios ha considerado la posible influencia de las estructuras en los acelerógrafos de "campo libre".

Dentro de los efectos de sitio que tanto interés han despertado en la comunidad científica, podemos añadir la posible contribución del parque inmobiliario de la Ciudad de México en el movimiento del terreno. Todos los trabajos que se han elaborado sobre efectos de sitio ignoran la respuesta dinámica de las estructuras (Bard et al., 1988; Sánchez-Sesma et al., 1988; Kawase y Aki, 1989; Seligman et al., 1989; Lomnitz, 1990; Chávez-García, 1991; Singh y Ordaz, 1993; Lermo y Chávez-García, 1994 y Chávez-García et al., 1994 y 1995), a pesar de que la interacción suelo-estructura puede afectar los registros de "campo libre", especialmente aquellos presentes sobre suelo blando obtenidos cerca de cualquier edificación (Bard y Wirgin, 1995).

Al existir una construcción sobre la superficie del terreno, el movimiento del suelo debido a la llegada de ondas sísmicas se ve afectado por la presencia de la cimentación del edificio, la cual produce radiación del movimiento de la estructura hacia el subsuelo, así como procesos de difracción de ondas. Esta modificación de los movimientos del suelo circundante (campo libre) con respecto a los movimientos de la base de la cimentación se conoce como interacción suelo-estructura (ISE). Una consecuencia de la ISE a la cual se le ha prestado poco interés es la influencia de los edificios en los registros de "campo libre". En efecto, algunos estudios han señalado que la presencia de estructuras en la superficie de un semiespacio infinito puede modificar substancialmente el movimiento del terreno hasta distancias al menos de un orden de magnitud mayores que las dimensiones de dichas estructuras (Trifunac, 1972; Wong et al., 1977).

Estudios recientes en el valle de México han demostrado que hay una influencia significativa de estructuras en el movimiento de "campo libre" (Fundación ICA, 1993; Romo y Bárcena 1994; Bard y Wirgin, 1995). De ser ciertas todas las suposiciones planteados por estos autores, entonces deberemos tomar en cuenta que los registros que utilizamos actualmente para predecir el movimiento durante temblores futuros incluye efectos (que no han sido cuantificados) debidos a las estructuras cercanas a los puntos en que se registra. Por esto es importante utilizar los registros actuales para identificar y posiblemente cuantificar la influencia de la interacción suelo-estructura en los registros de "campo libre". Este es el objetivo central de este trabajo.

Esta investigación se encuentra organizada de la siguiente forma. En el capítulo 1, se presenta una revisión de algunos trabajos sobre la influencia del parque inmobiliario de la Ciudad de México en el movimiento sísmico. Los resultados de los diferentes trabajos que

se presentan (teóricos y prácticos) muestran como las estructuras modifican el movimiento del suelo circundante a ellas. Cabe resaltar que todas esas respuestas tan evidentes en los modelos teóricos no siempre se aprecian fácilmente en los registros acelerográficos.

En el capítulo 2 se hace una descripción de la instrumentación sísmica de 8 edificios dentro de la Ciudad de México, el funcionamiento y características principales de sus redes, así como los registros obtenidos durante los temblores del 10 de diciembre de 1994 (121094) y 14 de septiembre de 1995 (091495). Los registros de “campo libre” utilizados en el estudio se obtuvieron de las estaciones de la Red Acelerográfica del Valle de México (RAVM). En este capítulo se incluye una pequeña descripción de la características de esta red, sus acelerógrafos y los registros del 121094 y 091495.

Contando con los registros de los edificios y de “campo libre” se procedió a realizar un análisis en la frecuencia y en el tiempo. El análisis en frecuencia se realizó con la intención de encontrar en los registros de “campo libre” picos en el espectro de amplitudes que coincidieran con la frecuencia fundamental de vibrar de los edificios cercanos. El modo fundamental de vibrar de las estructuras se determinó al calcular los cocientes espectrales entre los registros de la base, sótano o “campo libre” según fuera el caso y los registros de la azotea. Conocidas las frecuencias fundamentales se localizaron las estaciones de la RAVM que estaban cerca a los edificios y se calcularon los cocientes espectrales entre los componentes horizontales sobre vertical. Por último se presenta una comparación de las frecuencias fundamentales de los edificios con los cocientes espectrales de los registros de “campo libre” obtenidos en las estaciones cercanas a dichas estructuras.

Como resultado del análisis en la frecuencia, se encontró que el movimiento de dos de los edificios del estudio al ser excitados por los sismos del 121094 y 091495, generaban en los registros de “campo libre” cercanos la aparición de picos en el espectro de amplitudes que coincidía con la frecuencia de vibrar de estas dos estructuras. Esto sugería la influencia de los edificios en el movimiento del suelo cercano a él, por lo cual se realizó un análisis en el tiempo, con el fin de ratificar estas observaciones.

Los análisis que se hicieron en el dominio del tiempo, presentados en el capítulo 4, tuvieron por objeto identificar trenes de onda que se propagaran de la estructura hacia las estaciones de “campo libre” cercanas. Para poder hacer el análisis de los datos, primero se asignó una base de tiempo común a los registros de los edificios, y estos se integraron a los registros de “campo libre” ya alineados. Una vez que se alinearon los registros con la misma base de tiempo de los registros de “campo libre” se rotaron en la dirección epicentral y del edificio, y se filtraron en bandas de frecuencias que contenían o no la frecuencia fundamental de cada uno de los edificios en los cuales se sabía que había más posibilidades de éxito, con el fin de identificar trenes de onda en los registros de “campo libre” que se observaran en los registros de los edificios. El análisis en el tiempo, sugirió la existencia de la influencia para una de las estructuras analizadas.

Por otra parte, presentamos los resultados preliminares de la influencia del movimiento de un edificio en los registros de campo libre cercanos. Para ello empleamos el esquema de

diferencias finitas, desarrollado por Moczo et al. (1997) para simular la respuesta sísmica de un edificio sobre un medio heterogéneo viscoelástico en 2D ante incidencia de ondas P-SV y SH.

Finalmente se presentan las conclusiones generales obtenidas en este estudio, así como algunas recomendaciones.

ANTECEDENTES

Uno más de los efectos de sitio que tanto interés ha despertado en la comunidad científica es la posible contribución del parque inmobiliario de la Ciudad de México en el movimiento del terreno. A continuación se presenta un resumen de las investigaciones que se han realizado sobre este tema, presentando primero los estudios observacionales y después los teóricos.

El fenómeno de interacción suelo-estructura (ISE) se puede observar comparando los registros dentro y fuera de la estructura. Celebi (1992) presentó el análisis de 4 edificios altos instrumentados, localizados en la ciudad de San Francisco, los cuales registraron el sismo de Loma Prieta de 1989. En su trabajo se determinaron las propiedades dinámicas de los edificios (frecuencia y amortiguamiento) empleando análisis espectral, así como procedimientos de identificación de sistemas. De los 4 edificios instrumentados fue en el Pacific Park Plaza (PPP) donde se observó un inusual amortiguamiento (15.5%) el cual fue atribuido a la ISE. Esta estructura de hormigón reforzado a base de marcos, cimentada sobre suelo blando, tiene una altura de 89.2 m y cuenta con instrumentación dentro de ella y dos equipos en "campo libre" a 25 y 125 m aproximadamente.

Al realizarse análisis espectrales se encontró que la frecuencia fundamental de la estructura era de 0.38 Hz y los modos siguientes 0.95 Hz, 1.10 Hz y 1.95 Hz. Al comparar la respuesta espectral de la azotea, planta baja y "campo libre", se observó que los datos de "campo libre" contenían frecuencias propias de la estructura, especialmente a 0.95 y 1.95 Hz. Esto se aprecia claramente en la figura 1, donde se muestran los espectros correspondientes a los datos de último nivel, planta baja y "campo libre" a una distancia de 125 m. Al comparar estos espectros, el autor concluye que es necesario ser cuidadosos cuando se emplean registros de "campo libre" que se encuentran cercanos a estructuras altas tales como el PPP, ya que estos están influenciados por la presencia de grandes estructuras.

Desde el inicio de su operación en 1987, hasta 1992 la Fundación ICA formuló un programa de trabajo en el cual uno de sus objetivos era identificar los efectos de la vibración del suelo en las edificaciones. En el estudio presentado por la Fundación ICA (1993), se evalúa un modelo determinista, para conocer el comportamiento de edificaciones construidas en la superficie del terreno. El edificio seleccionado para el análisis fue el que lleva el nombre de Ing. Bernardo Quintana Arrijoa, el cual alberga al Puesto Central de Control del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México. Esta edificación de hormigón reforzado está cimentada sobre pilotes de fricción. Cuenta con ocho niveles y sus dimensiones en planta son de 41.3 m de longitud en la dirección este-oeste y 33.5 m en dirección norte-sur. Su altura es de 33.3 m. Para el estudio se instalaron 12 acelerógrafos: 9

en la estructura misma, uno en “campo libre” y dos de pozo, los cuales registraron los sismos del 25 de abril de 1989 (250489) y 11 de mayo de 1990 (110590). Durante el sismo de 1985, el edificio soportó el movimiento sufriendo pocos daños. En vista de la importancia de esta estructura para el transporte de la ciudad, en 1989 se decidió reforzar su cimentación y en 1990 se construyeron cuatro torres metálicas de refuerzo en las esquinas del edificio.

El modelo determinista empleado para el análisis, representa la estructura como un sistema de masas, unidas mediante resortes y amortiguadores, la cual se excita por el movimiento del suelo. Inicialmente se determinaron las características dinámicas del edificio (modos fundamentales, amortiguamiento) y luego se procedió a excitar el modelo con las aceleraciones registradas en la estación de “campo libre” cercana a la base con el fin de establecer comparaciones de las frecuencias de la estructura y las observadas en la base de la misma. Se escogieron los registros de aceleración de los sismos 250489 y 110590 como excitación. El primero de estos sismos ocurrió antes de que se rigidizara la estructura, mientras que el segundo se presentó cuando ya se habían instalado las torres metálicas.

Se observó al excitar el modelo con los registros obtenidos en “campo libre” durante el sismo 250489 (fecha en la cual el edificio no había sido reforzado en su cimentación, ni en su estructura), una coincidencia en la frecuencia del primer máximo del espectro del movimiento en “campo libre” y en el subsuelo, con la frecuencia natural del edificio. De igual forma, durante el sismo 110590 (fecha en la cual el edificio ya había sido reparado y se presentaban nuevas frecuencias naturales), se observó en los espectros de Fourier de los registros en “campo libre” y en los de pozo colocados a 20 y 40 m de profundidad, un máximo de densidad espectral en la frecuencia del primer modo de vibrar del edificio. Para los autores, estos resultados evidencian la existencia de radiación de energía desde el edificio en movimiento hacia el suelo, contaminando la señal sísmica en la frecuencia de vibración del edificio.

Romo y Bárcena (1994) presentaron un procedimiento simplificado para modelar, con elementos finitos el problema de ISE en la Ciudad de México. Para esto, se seleccionaron dos edificios instrumentados, los cuales fueron excitados por dos sismos moderados. Una de estas estructuras es el edificio Ing. Bernardo Quintana Arrijoa, el cual ya fue descrito anteriormente. En esta ocasión los registros de aceleración que se emplearon como excitación del modelo fueron los correspondientes al temblor del 31 de mayo de 1991 (310591). Cuando tuvo lugar este sismo, en la estructura no se habían instalado los acelerógrafos, solo se contaba con tres registros: dos de pozo (a 20 y 40 m) y uno en la superficie.

Al comparar los espectros de aceleraciones de los componentes NS y EW de los registros obtenidos a diferentes profundidades, Romo y Bárcena (1994) observaron que las ordenadas espectrales se amplificaban al pasar de 40 a 20 m de profundidad; sin embargo, al ascender a la superficie del terreno las amplitudes se atenúan respecto a las correspondientes a 20 m de profundidad (figura 2). En vista de que este fenómeno de amplificación-atenuación en depósitos de arcilla no es congruente con la experiencia y los

resultados teóricos en caso de depósitos de suelo blando, los autores plantean tres posibles causas del fenómeno: 1) que las características estratigráficas del sitio tuvieran particularidades tales que al combinarse con las características del sismo se produjera la atenuación de los movimientos en la superficie del terreno; 2) que la intensidad del sismo produjera efectos no lineales importantes en los 20 m superiores de la estratigrafía y 3) que la presencia del edificio Bernardo Quintana modifique los movimientos del terreno. Para ellos lo más válido es pensar que la presencia del edificio modifica, por su interacción con el suelo, el movimiento del terreno. Esto lo atribuyen (al igual que Fundación ICA, 1993) a la superposición de ondas sísmicas primarias con las generadas por la interacción dinámica suelo-estructura. Con base en estos razonamientos argumentan que el fenómeno de amplificación-atenuación se desarrolla por la interacción dinámica que se desarrolla entre el edificio y el suelo aledaño.

Hasta el momento se han enseñado estudios experimentales en los cuales se evidencia la influencia de las estructuras en los movimientos de "campo libre". A continuación se presentan varios modelos matemáticos propuestos en la literatura (dos de ellos referentes a la Ciudad de México) que han intentado estudiar el fenómeno de ISE.

Se han desarrollado dos de estos modelos para un caso tan especial (por las características tan especiales de su arcilla) como es el de la Ciudad de México. Seed (1990) dice: "En general, la interacción inercial tiende a provocar una leve reducción en la intensidad de los movimientos del terreno en la base de la estructura, en comparación con la intensidad de los movimientos desarrollados en campo libre". Dentro de esta afirmación hace una distinción entre estructuras extremadamente grandes y edificios de menos de 20 pisos. Realizando un análisis por el método del elemento finito para una estructura masiva y rígida, como una nucleoelectrónica, observó que la colocación de esa estructura masiva sobre un depósito de suelo ejerció una influencia considerable sobre los movimientos que se hubieran desarrollados de no haber estado ahí. Esto se aprecia en los resultados analíticos de la figura 3, los cuales muestran cambios notables en la aceleración máxima del terreno en la superficie, en la vecindad de la estructura, variando de un valor pico de 0.24 g en el campo libre hasta 0.12 g en las cercanías a la estructura. Todo esto deja claro la fuerte influencia de estructuras muy grandes sobre la respuesta del terreno.

Por otra parte, Seed (1990) presenta un estudio analítico similar (empleando el método del elemento finito) para un edificio de 10 pisos, desplantado sobre un depósito de suelo en la ciudad de San Francisco. En ese estudio se observó que la presencia de la estructura no ejerció una influencia apreciable en los movimientos del terreno. Al compararse los espectros de respuesta obtenidos en la base con los originados en campo libre, se observó una reducción en las aceleraciones espectrales de la base con respecto al terreno firme de solo un 10 a 20 % (figura 4).

En el estudio de Seed (1990) se consideran algunos casos especiales en los cuales sí se cumple que la presencia de la estructura influye en los movimientos del terreno, citando un análisis llevado a cabo por Rollins (1987). Este autor demostró que en lugares donde las velocidades de ondas de corte son inferiores a los 100 m/s, el período natural de una

edificación aumenta en un 40%. Rollins (1987) llegó a esta conclusión después de realizar un análisis de ISE para un edificio de 10 pisos desplantado en la arcilla de la Ciudad de México el cual estuvo sujeto a la excitación del temblor del 19 de septiembre de 1985. Los resultados teóricos evidenciaron que los efectos de la interacción inercial provocan que las amplitudes espectrales para los movimientos en la base de la estructura sean menores que los correspondientes a los movimientos de campo libre (figura 5).

Otro modelo es el presentado por Bard y Wirgin (1995). Este modelo 2-D asume las estructuras como bloques cilíndricos, paralelos, de sección rectangular, compuestas de un material elástico e isotrópico. A su vez estos edificios están desplantados sobre un semiespacio horizontal con un estrato superficial que representa las características (lacustres) propia de las arcillas de la Ciudad de México y un sustrato correspondiente a los sedimentos más profundos y rígidos. La respuesta del sistema se calcula bajo la incidencia vertical de un onda plana SH.

El movimiento fue calculado en 8 puntos: uno en la azotea, otro en la base y los restantes en la superficie del suelo a 15, 200, 400, 600, 800 y 1000 m de distancia al edificio. Los resultados que se presentan a continuación se obtuvieron al variar la altura de los edificios y el espesor de la capa de arcilla. Para tres diferentes espesores de la capa de arcilla, se observó, en las funciones de transferencia entre la azotea y cada uno de los puntos de la superficie, que el efecto de ISE provocaba una disminución de la frecuencia fundamental de 0.5 Hz (base rígida) a 0.223 Hz (espesor de 50m), además de un ligero incremento en la amplitud (figura 6). De igual forma, se observó que cuando el estrato es muy delgado, la frecuencia fundamental del mismo es mayor que la frecuencia del edificio, y la ISE es muy débil. Cuando el espesor del estrato es considerable, su frecuencia natural es comparable con la frecuencia del edificio, produciéndose una fuerte ISE.

En la figura 7 se aprecia que al incrementar la altura del edificio se incrementa la excitación de los modos "Cutler/Love" (Bard y Wirgin, 1995). En los sismogramas sintéticos de la figura 8, el registro de la parte superior representa el movimiento del estrato de arcilla, los siguientes son registros en campo libre a diferentes distancias del edificio considerando el movimiento del suelo más la estructura y el último es el registro de la azotea. Si se comparan los registros de la azotea con respecto a los de campo libre, en estos últimos las amplitudes son de aproximadamente un 40 % menos. Ahora bien, al comparar los registros del sistema suelo-estructura con los del suelo, los del sistema suelo-estructura tienen mayores duraciones. Según los autores, esto ocurre porque los edificios difractan las ondas incidentes hacia la capa de suelo, quedando atrapadas en el estrato de arcilla. Con estos resultados, se propone que la interpretación de los registros en "campo libre" en ciudades densamente urbanizadas como la Ciudad de México debe incluir los posibles efectos de edificios vecinos especialmente en la última parte de las grabaciones. También se afirma que la construcción de edificios altos en suelos blandos puede modificar significativamente la distribución amplitud y duración del movimiento del suelo a distancias de cientos de metros del edificio.

Estudios presentados hasta el momento han considerado el problema de la ISE en edificios. Chiaruttini et al. (1996) presentan un modelo 2-D, que considera estructuras lineales de sección trapezoidal o rectangular (terraplenes o presas), desplantadas sobre un semiespacio homogéneo y elástico, al cual inciden ondas Rayleigh. El modelo simula una estructura masiva sobre una superficie libre, la cual esta localizada a grandes distancias de la fuente. Dentro y fuera de la estructura se recolecta el campo de ondas a través de 8 receptores: tres en sitios estratégicos de la estructura y cinco en campo libre a diferentes distancias. Al comparar las aceleraciones captadas por cada uno de los receptores, se observó que el movimiento en campo libre está perturbado por la resonancia de la estructura (terraplén o presa). Esta perturbación se manifiesta especialmente a poca distancia de la estructura, y persiste hasta una distancia de 600 m. Esto conduce a los autores a afirmar que la interacción suelo-estructura puede alterar substancialmente el movimiento del suelo en campo libre. Por esto, cuando se cuente con grabaciones del movimiento del suelo en la fundación o cerca a estructuras grandes tales como terraplenes o presas de tierra, éstas deben ser tratadas con precaución.

Al comparar los resultados experimentales con los de los modelos presentados por diferentes autores, se observa que todas esas respuestas tan evidentes en el modelado teórico no siempre se aprecian con datos experimentales. Esto sucede debido a que los modelos nunca pueden representar fielmente todos los factores que influyen en el problema, ya que se hacen variaciones de alguna propiedad física. Los estudios presentados aquí (teóricos y prácticos) han demostrado la existencia de un importante efecto de los edificios en los registros de campo libre. De encontrarse estos efectos en el trabajo experimental que aquí se propone, podremos saber en qué medida los modelos utilizados hasta el momento son válidos para predecir el movimiento del terreno, y también determinar si el acoplamiento de la resonancia suelo-estructura puede contribuir a explicar las grandes duraciones presente en los sismogramas de la zona de lago.

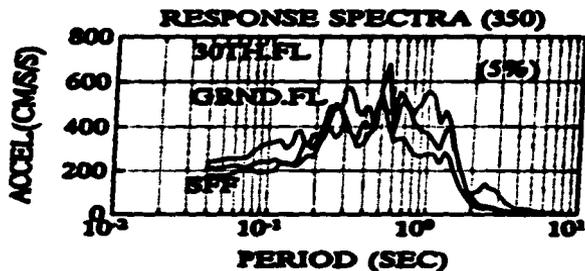


Figura 1. Comparación de la respuesta espectral de los registros del último nivel, planta baja y "campo libre" a 125 m del edificio Pacific Park Plaza. (Adaptada de Celebi, 1992).

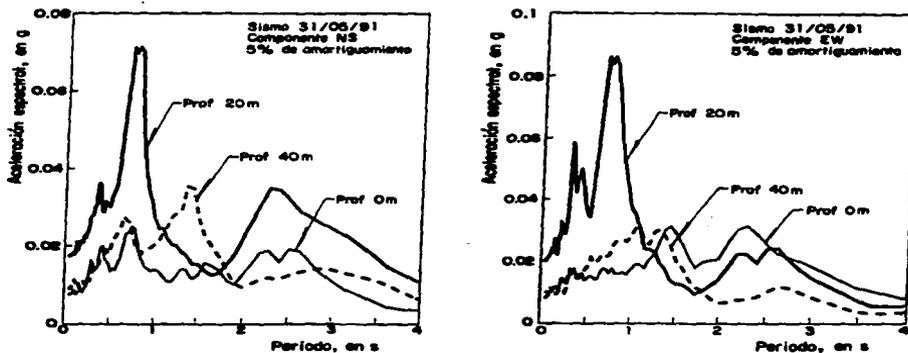


Figura 2. Variación de las ordenadas espectrales con la profundidad en el terreno cerca del edificio Ing. Bernardo Quintana Arrijoja. (Adaptada de Romo y Bárcena, 1994).

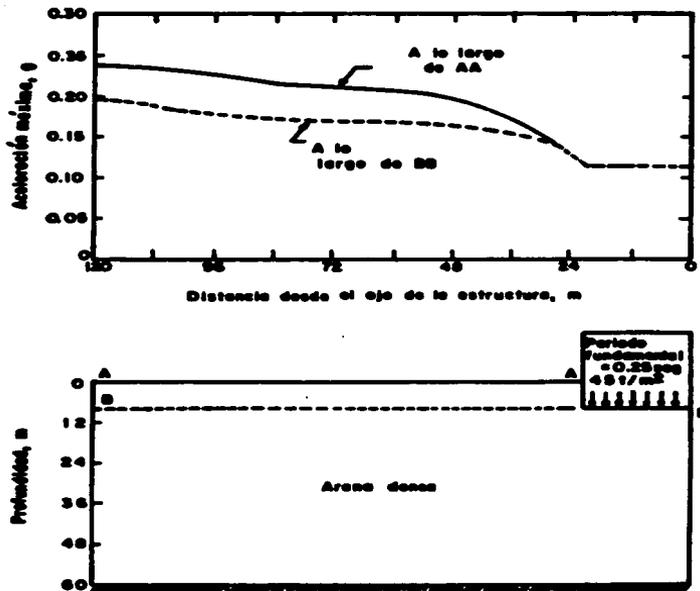


Figura 3. Influencia de estructuras rígidas y masivas sobre los movimientos del terreno en la cercanía de la estructura. (Adaptada de Seed, 1990).

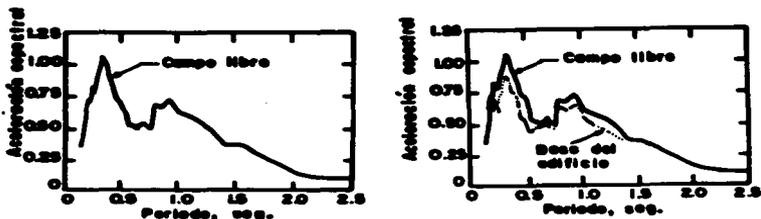


Figura 4. Comparación de los espectros de respuesta obtenidos en la base y "campo libre" de un edificio de 10 pisos cimentado sobre arena. (Adaptada de Seed, 1990).

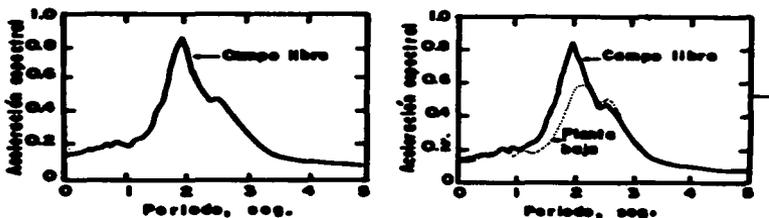


Figura 5. Variación de las amplitudes espectrales para los movimientos en la base de la estructura con los correspondientes a "campo libre", para un edificio de 10 pisos cimentado sobre arcilla deformable. (Adaptada de Rollins, 1987).

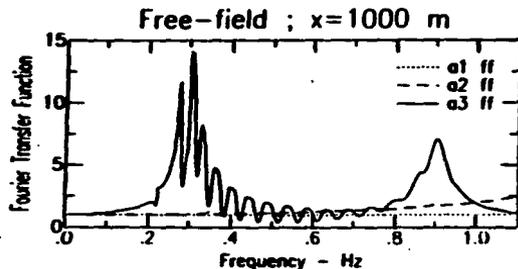
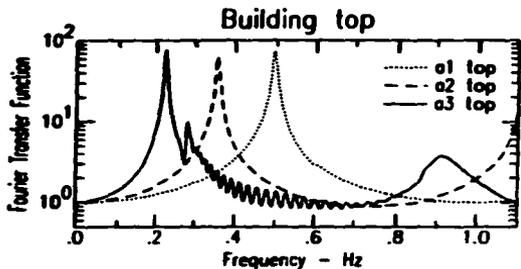


Figura 6. Funciones de transferencia en la azotea del edificio y en "campo libre" a 1000 m de distancia, variando el espesor de la capa de arcilla. (Adaptada de Bard y Wirgin, 1995).

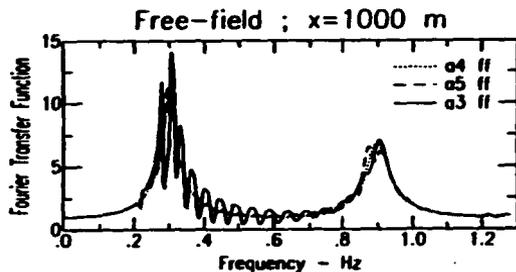
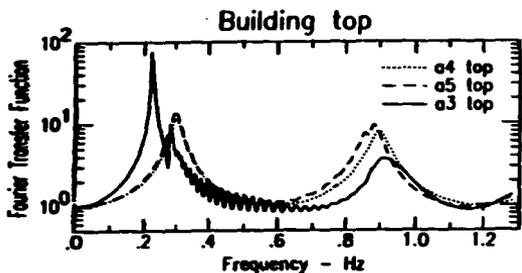


Figura 7. Funciones de transferencia en la azotea del edificio y en "campo libre" a 1000 m, variando la altura del edificio. (Adaptada de Bard y Wirgin, 1995).

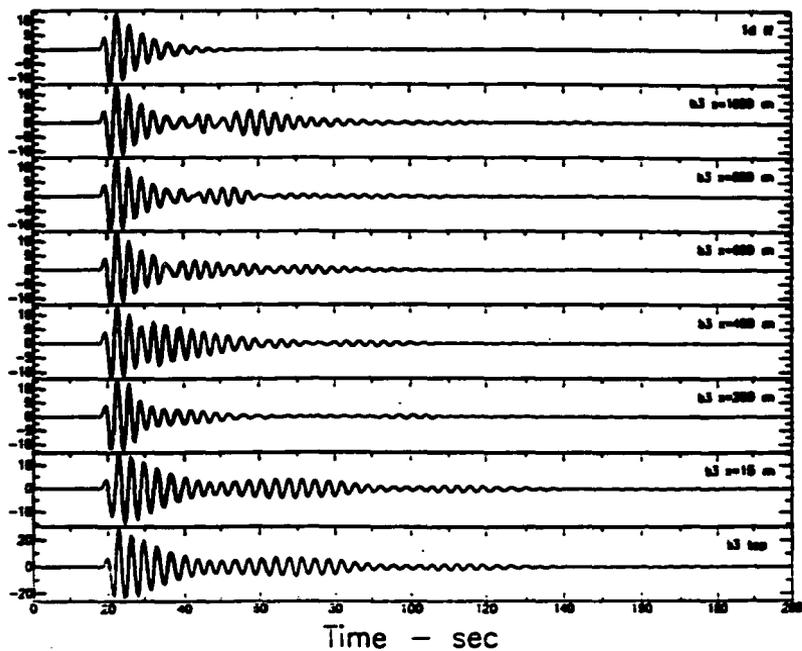


Figura 8. Comparación de los sismogramas sintéticos en la azotea del edificio y seis puntos diferentes en "campo libre" con la respuesta 1D de un estrato de arcilla. (Adaptada de Bard y Wirgin, 1995).

DESCRIPCIÓN, INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA Y REGISTROS DE LOS EDIFICIOS Y LA RED ACELEROGRÁFICA DEL VALLE DE MÉXICO

México, entre las costas de los estados de Jalisco y Chiapas, cuenta con una de las regiones de subducción más activas del mundo. Los efectos de algunos eventos sísmicos importantes provenientes de esta zona, generalmente se manifiestan en la Ciudad de México, causando alarma entre sus habitantes o en el peor de los casos daños materiales. La actividad de medición, registro y análisis de temblores por medio de instrumentos sísmicos (instrumentación sísmica) en México, se remonta a 1910 cuando se crea el Servicio Sismológico Nacional y se instala una red de sismógrafos en diversas partes de la República con un observatorio central en Tacubaya (Espíndola y Jiménez, 1984). Los registros generados por estos sismógrafos se empleaban para estimar epicentros, magnitudes, distribución e intensidad de los temblores. Fue solo hasta después del temblor de julio de 1957 (el cual fue uno de los más intensos y destructivos para las estructuras en la Ciudad de México) que se instalaron los primeros acelerógrafos. Estos instrumentos a diferencia de los sismógrafos permitían el registro de movimientos más intensos sin llegar a la saturación. Esta nueva herramienta pasó a ser de gran utilidad para la ingeniería, ya que permitía a los ingenieros medir directamente la respuesta de suelos y estructuras bajo la acción de movimientos fuertes.

Sabemos que la Ciudad de México es una ciudad densamente poblada de edificios, los cuales albergan un gran número de personas. En la medida en que se conozca el comportamiento de estas estructuras se estará garantizando la seguridad de sus habitantes. Es así como surge la necesidad de instrumentar estructuras para mejorar el conocimiento de la respuesta sísmica de los edificios ante eventos de gran intensidad, conocer la evolución de las propiedades dinámicas durante su vida útil y hacer los ajustes requeridos en las normas de construcción que se aplican en el Distrito Federal. Con este propósito diversas instituciones han instalado equipos de registros en diferentes edificios, en la superficie y en pozos, dentro de la Ciudad de México. A continuación presentamos la historia de la instrumentación para registro de sismos fuertes en México, así como una descripción de algunos de los edificios instrumentados en la Ciudad de México a cuya información tuvimos acceso. Se describe como está compuesta y como opera la red de cada edificio, así como los temblores que han sido registrados desde el inicio de su operación. Por último se hace una breve descripción de la Red Acelerográfica del Valle de México (RAVM).

2.1 Historia de la instrumentación sísmica con fines ingenieriles

El temblor del ángel del 28 de julio de 1957 ocasionó muchos daños a obras civiles, así como la pérdida de numerosas vidas humanas. Con este sismo quedó clara la necesidad de

contar con instrumentos apropiados para registrar y medir el movimiento del suelo y de estructuras, provocado por sismos fuertes. En esa época, solo se contaba con sismógrafos, los cuales no registraban en forma completa los movimientos fuertes debido a su gran sensibilidad, su alto factor de amplificación y limitado rango dinámico que los llevaba a saturarse. Fue así como en 1960 se inició la instalación, por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de 2 acelerógrafos en la Ciudad de México: uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, ambos modelo SMAC-B, marca Akashi (Quaas, 1995). Instrumentos similares se instalaron en 1961 en la base de tres edificios también en la Ciudad de México (Zeevaert, 1963).

A partir de esas fechas, la instrumentación sísmica para el registro de temblores fuertes tomó auge. Se despertó un interés por estudiar la respuesta dinámica de suelos y estructuras no solo con modelos matemáticos sino a través de mediciones instrumentales. Fue así como se inició la instalación de una red de acelerógrafos en el país primero por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM reforzándose este esfuerzo por instituciones como el CICESE y CFE. Ya para el año de 1985 existían cerca de 150 estaciones acelerográficas. Los instrumentos comprendían desde aparatos analógicos con registro fotográfico como los acelerógrafos RFT-250, AR-240 y SMA-1, hasta aparatos digitales como los DSA-1, PDR-1, DCA-310 y DCA-333 (Quaas, 1995).

A raíz de los sismos de septiembre de 1985, se incrementó la instrumentación sísmica en México. En ese entonces en la Ciudad de México operaban 12 acelerógrafos y hacía solo unas semanas se acababa de instalar una nueva red digital a lo largo de las costas de Guerrero y Michoacán (Quaas et al., 1985). Daños a las estructuras y las numerosas pérdidas humanas ocurridas por los sismos de septiembre de 1985 evidenciaron la necesidad de impulsar la investigación e incrementar el número de estaciones de registros, especialmente en el valle de México (Quaas, 1995). Fue así como otras instituciones tales como la Fundación Barros Sierra, la Fundación ICA, CENAPRED, el CIRES, la UAM Azcapotzalco y la Universidad Autónoma de Puebla expandieron y complementaron las redes acelerográficas existentes con modernos equipos de registro.

La red acelerográfica en México contaba en 1993 con 339 estaciones instaladas, número que se incrementó a 360 en 1994 y a más de 390 en 1995. A partir de 1985 los equipos analógicos de registro empezaron a dejarse de utilizar, siendo reemplazados por los digitales. Dentro de la Red Acelerográfica de México se destaca la Red del Valle de México la cual cuenta con numerosas estaciones, así como las redes de estaciones en distintos estados, ligadas a grandes obras para la generación de electricidad y riego (Quaas, 1995).

Hoy en día el valle de México cuenta con un gran número de edificios instrumentados con acelerógrafos, bajo la supervisión de las diferentes instituciones mencionadas anteriormente. Todos estos instrumentos generan registros que contribuyen al análisis de los efectos sísmicos de la Ciudad de México. A continuación se hace la descripción de algunos edificios instrumentados en la Ciudad de México, los cuales fueron empleados en este estudio. La selección de los edificios se hizo teniendo en cuenta que estuvieran localizados en las diferentes zonas de la ciudad, además que hubieran registrado sismos de

mediana intensidad y que se contara con la disponibilidad de dichos registros por parte de las instituciones que se encargan del manejo de sus redes.

2.2 Datos de los edificios instrumentados y temblores empleados

Para entender el comportamiento estructural de edificios ante un evento sísmico, es necesario conocer la evolución de sus propiedades dinámicas a lo largo de su vida útil. Una forma de determinar las propiedades dinámicas de una estructura, es analizar los registros que se obtengan de acelerógrafos localizados en sitios estratégicos dentro de ella. Esta información nos permite desarrollar modelos analíticos, con los cuales se puede predecir el comportamiento de la estructura; y ante la evidencia de que pueda sufrir cambios notorios (comportamiento no-lineal y deterioro de la rigidez), hacer las correcciones necesarias. Con este objeto, diferentes instituciones han instrumentado varios edificios dentro de la Ciudad de México. Para esto han empleado acelerógrafos, colocados en forma provisional o permanente dentro de edificios, con el fin de registrar eventos sísmicos.

En esta investigación se emplearon los registros acelerográficos de 8 edificios instrumentados, los cuales están localizados dentro de las diferentes zonas de la Ciudad de México (figura 9). Se utilizaron los registros de los edificios Jalapa (JAL), Plaza Córdoba (PC) y Metro Juárez (MJ) a cargo del Instituto de Ingeniería, UNAM; Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Plaza Inn (PI) y Escuela Secundaria No. 3 (SE) a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, CIRES y Unidad Kennedy (UK) e Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) a cargo del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. Algunas características de estos edificios se presentan en la tabla 1.

Los sismos procesados corresponden a los ocurridos el 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Los dos ocurridos frente a las costas del estado de Guerrero. Los parámetros epicentrales reportados por el Servicio Sismológico Nacional son los presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros epicentrales de los sismos del 10 de diciembre de 1994 y del 14 de septiembre de 1995.

SISMO	HORA LOCAL	MAGNITUD	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	PROFUNDIDAD (Km)
10-dic	10:17:40	$M_c=6.3$	18.02	101.56	20
14-sep	08:04:36	$M_E=7.3$	16.793	98.615	45

M_c = Magnitud calculada con base en la duración de la coda

M_E = Magnitud basada en la energía sísmica radiada

A continuación se hace una descripción de estos 8 edificios empleados en este estudio.

2.2.1 Edificios instrumentados por el Instituto de Ingeniería, UNAM

Los tres edificios aquí descritos: Jalapa, Plaza Córdoba y Metro Juárez cuentan con redes de instrumentación de características similares. Cada red está interconectada a una señal común de tiempo con el fin de obtener un registro síncrono que permita conocer con precisión el movimiento relativo de la estructura en sus distintos puntos de medición. La interconexión emplea una configuración maestro-esclavo con la cual al rebasar el movimiento, del umbral de disparo del maestro, pone en operación los acelerógrafos esclavos. De igual forma, cada instrumento es capaz de iniciar su operación en forma autónoma cuando su propio sistema detecta un valor de aceleración mayor al umbral programado. En su mayoría, los aparatos fueron instalados sensibles al movimiento vertical y se fijaron a elementos estructurales. Los acelerógrafos son DCA-333R autónomos digitales de estado sólido, con sensores triaxiales, dos horizontales y uno vertical. El sistema almacena los datos en memoria de estado sólido y la escala completa de los sensores es de ± 0.25 a ± 2.0 g. Se cuenta con memoria de pre-evento de 4 s y de 15 s de pos-evento. La capacidad máxima de registro es de 15 minutos y la velocidad de captura es de 100 muestras por segundo (Alcántara et al., 1995a).

2.2.1.1 Edificio Jalapa

El edificio Jalapa está localizado en la calle Jalapa No. 15 (Colonia Roma), en la zona de lago. El edificio tiene una estructura principal de 14 niveles con un apéndice y otra anexa de tres niveles. La planta típica del cuarto al décimo piso tiene forma rectangular de 20 m de ancho por 32.45 m de largo. Las plantas de estacionamientos abarcan el cuerpo anexo y sus dimensiones son de 20 m por 40 m. El edificio está instrumentado en 14 puntos con acelerógrafos (figura 10): 2 debajo de la superficie, en pozos a 20 m y 45 m de profundidad, 1 en la superficie del terreno a aproximadamente 50 m del edificio, 4 en el sótano, 2 en el nivel tres, 2 en el nivel ocho y 3 en la azotea (tabla 3) (González, 1995).

Los trabajos de instrumentación del edificio y el ajuste de los equipos de registro concluyeron a finales de 1992 (González, 1995). Desde esa fecha se han registrado una serie de eventos sísmicos dentro de los cuales se destacan por su calidad en los registros, nivel de amplitud de respuesta y duración de los eventos, los siguientes: 10 de septiembre de 1993, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994 el único instrumento que no registró fue P1 (pozo a 20 m de profundidad). Durante el temblor del 14 de septiembre de 1995 se obtuvieron registros en todos los instrumentos de la red.

2.2.1.2 Edificio Plaza Córdoba

El edificio Plaza Córdoba está localizado en la calle Córdoba No. 42 (Colonia Roma), en la zona de lago. El edificio tiene una estructura de hormigón reforzado de 17 niveles. Consta de un sótano, planta baja cuyas dimensiones son 38 m por 54 m, mezzanine, estacionamientos y una torre de 12 niveles de (32 m por 40 m). Su altura total es de 51 m. La estructura cuenta con 11 acelerógrafos (figura 11): 3 situados en el sótano, 4 en el entrepiso E7-E8, 2 en el nivel seis y 2 en la azotea (tabla 4) (Alcántara et al., 1995b).

Desde la fecha de instalación de la red, se han registrado los eventos sísmicos del 11 y 31 de mayo de 1990, 1 de abril de 1991, 15 de mayo y 24 de octubre de 1994, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Con este último sismo se obtuvo la más importante colección de datos que se haya recopilado en la historia de registro sísmico de la estructura, debido a la gran cantidad y calidad de los registros que se generaron (Alcántara et al., 1995b). Durante los sismos del 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995 se obtuvieron registros en todos los instrumentos de la red.

2.2.1.3 Edificio Metro Juárez

El edificio Metro Juárez se encuentra localizada en la calle Balderas entre Independencia y Artículo 123. Exactamente sobre la estación Juárez de la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo, en la zona de lago. El edificio es de hormigón reforzado, consta de dos sótanos, planta baja y seis niveles. Sus dimensiones en planta son de 29.7 m por 21.4 m. La estructura cuenta con 5 acelerógrafos (figura 12): 2 en la azotea, 2 en la planta baja a nivel de acceso y 1 en el sótano de la estructura a nivel de andén del Metro (tabla 5) (Alcántara et al., 1995a).

La red se instaló en el año de 1990. Desde el inicio de su operación hasta la fecha se han registrado numerosos eventos, dentro de los cuales se encuentran los sismos del 15 de mayo de 1993, 24 de octubre de 1993, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994 se obtuvieron registros en todos los instrumentos. Durante el temblor del 14 de septiembre de 1995 el único aparato que no registró fue MJAC (azotea centro).

2.2.2 Edificios instrumentados por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, CIRES

2.2.2.1 Conjunto Plaza Inn

En agosto de 1990, Nacional Financiera, S.A. (NAFINSA) firmó un convenio con el CIRES, para implementar un sistema registrador de aceleraciones sísmicas en el conjunto de edificios comerciales Plaza Inn. El objetivo de este contrato fue registrar el comportamiento dinámico de dos de las torres del conjunto comercial durante la acción de sismos fuertes (CIRES, 1996a).

El conjunto de edificios comerciales Plaza Inn se encuentra localizado en la Avenida Insurgentes Sur, esquina Río San Ángel y Villalpando, en la zona de lomas. El conjunto está instrumentado con 6 acelerógrafos digitales de tres componentes ortogonales cada uno, distribuidos en dos torres (figura 13). La torre uno, cuenta con los siguientes equipos: 1 en la azotea, 1 en el sótano y 1 en campo libre (Avenida Insurgentes, esquina Vito Alessio Robles). En la torre cuatro, los acelerógrafos están distribuidos así: 1 en la azotea, 1 en el jardín y 1 en el sótano (tabla 6) (Quaas et al., 1993).

Desde el momento de instalación de la red se han registrado varios sismos, dentro de los cuales se destacan por su mediana intensidad los del 10 de diciembre de 1994 y el 14 de septiembre de 1995. Durante el temblor del 10 de diciembre de 1994 el equipo de "campo libre" (I6) no registró. Durante el temblor del 14 de septiembre de 1995 solo registraron los equipos I3 e I6.

Características de la red

El sistema se integra por una red local de seis acelerógrafos DCA-333 digitales. Cinco de ellos localizados dentro de las torres uno y cuatro, el sexto se encuentra en un jardín en el costado este de los edificios. Los cinco equipos están interconectados con una configuración maestro-esclavo, a fin de asegurar el inicio sincronizado de los registros sísmicos. Estos equipos cuentan con una señal de tiempo común generada por un reloj externo, OMEGA FACE, el cual está sincronizado con la hora universal que se transmite por medio de la estación de radio WWV. El acelerógrafo de "campo libre", queda sincronizado con los otros equipos por medio de un radio enlace; además, cuenta con referencia de tiempo externo (CIRES, 1996a).

Cada acelerógrafo detecta la aceleración del terreno en tres componentes ortogonales. Si la aceleración rebasa un umbral de disparo preestablecido, el equipo inicia la grabación en casete. Esta se suspende 15 segundos después de que la amplitud de aceleración se reduce por debajo del umbral de activación. El equipo puede almacenar hasta quince minutos de datos. Cada registrador opera mediante una batería de 12 volts que se alimenta con un cargador conectado al suministro de energía eléctrica comercial. Esta batería permite operar el acelerógrafo durante 15 días en caso de ausencia de energía. El registro de datos en los aparatos esclavos se inicia simultáneamente cuando el maestro se activa. Esto sucede cuando el equipo localizado en el sótano de la torre cuatro (I3) detecta un sismo, o cuando, se recibe la señal del Sistema de Alerta Sísmica enviada desde las instalaciones del CIRES (CIRES, 1996a).

2.2.2.2 Instituto Mexicano del Seguro Social, IMSS

El Instituto Mexicano del Seguro Social convino con la Fundación Barros Sierra el desarrollo del proyecto de la instrumentación, medición, procesamiento y análisis de registros sísmicos del edificio que aloja las oficinas centrales administrativas del IMSS. Para esto, el CIRES colaboró en las labores de instalación, operación y conservación de la red de instrumentación acelerográfica del inmueble. Este convenio se llevó a cabo con el objetivo principal de mejorar el conocimiento de la respuesta sísmica del edificio.

El edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social se encuentra localizado en la Avenida Reforma 476, en la zona de lomas. El edificio cuenta con 10 niveles, los cuales alojan las oficinas centrales administrativas del Instituto Mexicano del Seguro Social. En total, la estructura tiene 8 acelerógrafos (figura 14) DCA-333 digitales de tres componentes ortogonales (Quaas et al., 1993). Dentro de la estructura hay 7 acelerógrafos (tabla 7): 2 en

el sótano, 2 en el tercer nivel y 3 en la azotea. Por último, tiene un equipo en “campo libre”, ubicado frente al edificio (CIRES, 1996b).

Desde la instalación de la red hasta el momento se han registrado varios sismos, como los del 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994 se obtuvieron registros de todos los instrumentos de la red. Durante el temblor del 14 de septiembre de 1995 el único equipo que no registró fue el de “campo libre” (S8).

Características de la red

La red esta compuesta de 8 acelerógrafos interconectados por un sistema maestro-esclavo. Siete están en puntos estratégicos de la estructura y uno más a nivel del terreno, fuera del edificio. Cada instrumento registra el movimiento del terreno correspondiente al sitio de instalación y para ello cuenta con tres sensores de aceleración dispuestos ortogonalmente. Los acelerógrafos utilizan microprocesadores programados para iniciar automáticamente la grabación de los eventos en cinta magnética, cuando se detectan aceleraciones del sitio de instalación que sobrepasan un umbral mínimo pre-seleccionado. Este microprocesador está programado para muestrear las señal a razón de 100 muestras por segundo y detener la cinta 15 segundos después de que las aceleraciones producidas por el movimiento sean menores que el umbral de activación. El registrador dispone de un casete con capacidad para almacenar hasta 14 minutos de datos. Los acelerógrafos se alimentan con una batería sellada de 12 volts, la cual continuamente está conectada a la energía eléctrica comercial. En caso de falla de la red eléctrica, la batería puede mantener en operación el acelerógrafo aproximadamente 15 días (CIRES, 1996b).

El sistema de sincronización de registros, está instalado en el equipo (S7), ahí se genera una señal de sincronización cuando ocurre un sismo, la cual es enviada a todos los equipos de la red. Adicionalmente el equipo (S7), envía una señal de radio disparo al equipo (S8) de “campo libre”, para activarlo.

2.2.2.3 Escuela Secundaria No. 3

La Escuela Secundaria No. 3 se encuentra localizada en la Avenida Chapultepec, entre Venecia y Niza (Colonia Roma), en la zona de lago. La escuela tiene dos estructuras de hormigón reforzado de tres niveles sobre un cajón rígido de concreto. Estas dos estructuras identificadas como cuerpo A y cuerpo B, se encuentran separadas por una junta constructiva de 10 cm de espesor. Las dimensiones en planta del cuerpo A son de 8 m por 26 m y las del cuerpo B, 8 m por 29 m (Romo y Bárcena, 1994).

La escuela tiene 3 acelerógrafos en el cuerpo A, todos ellos digitales tipo DCA-333 de tres componentes ortogonales (figura 15): uno en la azotea, otro en la base del edificio y el último en “campo libre”, cerca del edificio de la biblioteca (tabla 8) (Romo y Bárcena, 1994). De los 3 acelerógrafos con que cuenta la escuela, en julio de 1987 se pusieron en operación dos acelerógrafos localizados en el cuerpo A del edificio: uno en el centro de la

planta baja y otro en la esquina SE, además de colocar otro en el terreno cerca de la estructura (Murià et al., 1993). En la actualidad el aparato de la esquina SE de la azotea se encuentra en el centro de la azotea del cuerpo A y los otros dos continúan en el mismo sitio. Desde la instalación de la red se han registrado varios sismos dentro de los cuales se destacan los del 8 de febrero de 1988, 25 de abril de 1989, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995, por presentar una magnitud de coda mayor de 5. Durante los sismos del 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995 se obtuvieron registros de todos los instrumentos de la red.

Características de la red

Cada acelerógrafo utiliza un microprocesador de 12 bits que controla el inicio y el final de la grabación en casete, cada vez que la aceleración detectada rebasa un umbral preestablecido. El registrador toma 100 muestras por segundo de tres sensores ortogonales. El microprocesador detiene la grabación del casete 15 segundos después de que la aceleración detectada supera por última vez el umbral de disparo. Con el fin de capturar la información completa del sismo, el equipo dispone de una memoria de pre-evento que permite registrar los cuatro segundos previos al momento en el que el instrumento lo detectó (Contreras et al., 1989).

El sistema externo de señales de tiempo de referencia se conoce como "Omega", constituido por un conjunto de transmisores de radio distribuidos alrededor del mundo, que cada 10 s envía información codificada en frecuencia próxima a los 10 KHz. Mediante la recepción de esta señal, se sincroniza automáticamente un reloj local que genera un código (BCD) del tiempo universal cada 10 s. El código también indica las condiciones de recepción de la señal Omega. El sistema asegura un error medio no mayor de 0.01 s al día, en condiciones de recepción adecuadas. La energía eléctrica de los acelerógrafos es suministrada por medio de paneles solares que recargan las baterías internas de los aparatos, lo que asegura la continuidad de su servicio (Murià et al., 1993).

2.2.3 Edificios instrumentados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED

Con objeto de estudiar la respuesta dinámica de edificios y su interacción con el suelo durante un movimiento fuerte, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, instrumentó dos edificios: uno se ubica en el Instituto Mexicano del Petróleo y otro en el conjunto habitacional Unidad Kennedy. Las redes internas de cada edificio envían la señal por telemetría a un puesto centralizado de recepción y procesamiento de la información ubicado en las instalaciones de CENAPRED. Los instrumentos de medición son acelerógrafos digitales (SMAC-MD) de estado sólido de alta resolución, con sensores triaxiales.

2.2.3.1 Instituto Mexicano del Petróleo, IMP

El edificio esta localizado sobre el Eje Central Cárdenas, esquina poniente 134, en la zona de transición. El edificio es una estructura prefabricada de cinco niveles. Sus dimensiones en planta son de 14.7 m por 71.03 m (Romo, 1991).

La estructura tiene 3 acelerógrafos digitales (figura 16), distribuidos así: azotea, base y "campo libre", cerca del edificio (tabla 9). La instalación de la instrumentación sísmica se llevó a cabo en marzo de 1990 (López y Quaaas, 1993). A partir de esa fecha hasta el momento se han registrado los sismos del 26 de enero, 12 de febrero, 31 de marzo, 1 de abril y 7 de junio de 1992, 14 de mayo de 1993, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995 se obtuvieron registros de todos los instrumentos de la red.

2.2.3.2 Unidad Kennedy

El edificio en cuestión es el señalado con el No. 81 de la Unidad Habitacional Kennedy. Este edificio se ubica en la calle Fray Servando Teresa de Mier, esquina Nicolás León, en la zona de lago. El edificio es de 4 niveles, cimentado sobre un cajón desplantado a 2.2 m de profundidad. La estructura cuenta con 5 acelerógrafos en total (figura 17). Los equipos están distribuidos así: 2 en pozos a 30 m y 83 m de profundidad, uno en "campo libre" (aproximadamente a 20 m), uno en planta baja y uno en la azotea (tabla 10) (Quaaas et al., 1993).

La instrumentación sísmica del edificio se llevó a cabo en mayo de 1990. Desde entonces se han registrados varios sismos dentro de los cuales se encuentra los del 12 de febrero y 7 de junio de 1992, 14 de mayo de 1993, 10 de diciembre de 1994 (López y Quaaas, 1993). Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994 se obtuvieron registros de todos los instrumentos de la red. Cuando ocurrió el sismo del 14 de septiembre de 1995 ya se había retirado la instrumentación del edificio.

2.3 Red Acelerográfica del Valle de México (RAVM)

Durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, solo 8 aparatos digitales registraron el movimiento sísmico. Estos aparatos estaban ubicados en la zona de lago, donde se encontraban la mayoría de las estructuras que sufrieron los daños más graves o que fallaron totalmente. Después de observarse los efectos de estos sismos, las autoridades del Departamento del Distrito Federal (DDF), a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), intensificaron su apoyo para instalar un conjunto de acelerógrafos ubicados en las diferentes zonas de suelo característico del Distrito Federal. A continuación se hace una descripción de los aspectos más importantes de esta red, dicha información, en su mayoría, fue adaptada de Espinosa et al. (1991).

2.3.1 Objetivos generales de la red

El objetivo primordial de la Red Acelerográfica del Valle de México (RAVM) era aumentar el número de acelerógrafos de la Ciudad de México, mediante la instalación de una red de

40 acelerógrafos de superficie y tres subterráneos. A partir de julio de 1986 el CIRES quedó encargado del desarrollo y la ejecución de ese propósito contando con el patrocinio del DDF, a través del CONACYT. En este proyecto de instalación, el CIRES obtuvo la colaboración de investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, durante las etapas iniciales para la capacitación del personal, así como de la Fundación ICA.

2.3.2 Características de la red

En la RAVM la instrumentación empleada para la captura y registro de eventos sísmicos es de dos tipos: acelerógrafos de superficie y de pozo profundo. Para la colocación de cada una de estas estaciones se intentó satisfacer una serie de requisitos tales como: localización apropiada, seguridad de los acelerógrafos y demás equipos de soporte, libertad de acceso a la estación a cualquier hora y en cualquier día, así como la certeza de que la estación podría permanecer en ese sitio por plazo indefinido.

Las estaciones de superficie cuentan con bases de concreto, donde se colocan las cajas metálicas que alojan a los aparatos. Estas bases están empotradas en el terreno, permitiendo una conexión del aparato con el suelo. Su diseño consiste en la utilización de casetones armados con malla electro-soldada, para mejorar el control de calidad.

En 1985 la red solo contaba con 8 estaciones, número que aumentó a 108 para 1990 y 177 aparatos para 1995 (56% del total en el país). Las estaciones están en los tres tipos de suelo de la ciudad, siendo la zona de lago la más densamente instrumentada (Quaas, 1995).

2.3.3 Acelerógrafos de la red

Las estaciones de campo cuentan con acelerógrafos que graban digitalmente en casete las señales de 3 acelerógrafos ortogonales, y usan un microprocesador de 12 bits programado para disparar automáticamente la grabación de las aceleraciones causadas por eventos sísmicos cuando se detectan movimientos del terreno que sobrepasan un umbral mínimo preseleccionado.

Los aparatos toman muestras a razón de 100 por segundo. Simultáneamente al registro de las señales los aparatos agregan el número de serie del acelerógrafo, para identificarlo, un número progresivo para indicar que sismos se han almacenado y las horas de los relojes interno y externo del instrumento para sincronizar el tiempo de ocurrencia de los sismos. La memoria pos-evento con la que cuentan es de 15 segundos.

El sistema de alimentación de los acelerógrafos consiste en una batería de plomo-ácido de 12 volts que se recarga en una celda solar en aquellos sitios donde no hay alimentación comercial. En condiciones óptimas de operación la celda produce hasta 15 watts de potencia pico a 15 volts. Entre la celda y la batería se tiene un regulador de tensión que la reduce a 13.6 volts. En condiciones óptimas este arreglo permite la operación durante 20 a 25 días sin energía comercial.

2.3.4 Sismos registrados

Con la instalación de una red de acelerógrafos en el área urbana de la Ciudad de México se inició la operación de un sistema que permite analizar los efectos de los sismos en los diferentes tipos de suelo de la ciudad. Hasta el año de 1991 se había recolectado información que totalizaba 15.196 s de grabación, contenida en 248 registros. Todos estos registros proveen información para revisar y mejorar las normas de diseño sísmico aplicables a todo tipo de construcciones civiles. De igual forma facilitan la generación de nuevas investigaciones para el valle de México sobre las características generales de la respuesta del valle (Sánchez-Sesma et al., 1988; Singh et al., 1988b), la amplificación regional (Ordaz y Singh, 1992) y los efectos de sitio (Lermo y Chávez-García, 1994; Chávez-García et al., 1994; Ramos-Martínez et al., 1997).

A pesar de que hoy en día el volumen de datos generados por la red es considerable, se presentan algunos problemas. El más importante es que no se cuenta con una base de tiempo común, además no todos los aparatos son de la misma marca y cada institución que se encarga del manejo de un número determinado de aparatos utiliza un formato diferente para sus registros (Quaas, 1995). Hoy, toda esta información se encuentra publicada en los diferentes catálogos de la Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes, creados bajo el convenio de las distintas instituciones dedicadas a la instrumentación sísmica en el país.

A partir de la fecha de instalación de la RAVM, se han registrado varios sismos dentro de los cuales destacamos por su mediana intensidad los que se mencionan a continuación. Durante el temblor del 25 de abril de 1989 el total de registros de campo libre obtenidos en la Ciudad de México fue de 63. Tan solo tres de estos registros resultaron inutilizables debido a la presencia de glitches en las grabaciones originales. Durante el temblor del 10 de diciembre de 1994, 80 estaciones registraron de las cuales solo cuatro registros resultaron defectuosos. Ahora bien, durante el temblor del 14 de septiembre de 1995, se obtuvieron registros en 99 estaciones, de los cuales 10 presentaban una señal defectuosa. Como se aprecia, con los años se ha ido incrementado el número de registros de buena calidad que se obtienen de la red. En este trabajo empleamos los registros de los sismos del 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. La selección de estos sismos se realizó previendo que existieran registros en cada uno de los edificios que se estudiaban. Una muestra de las estaciones que registraron durante el sismo del 14 de septiembre de 1995 se presenta en la figura 18.

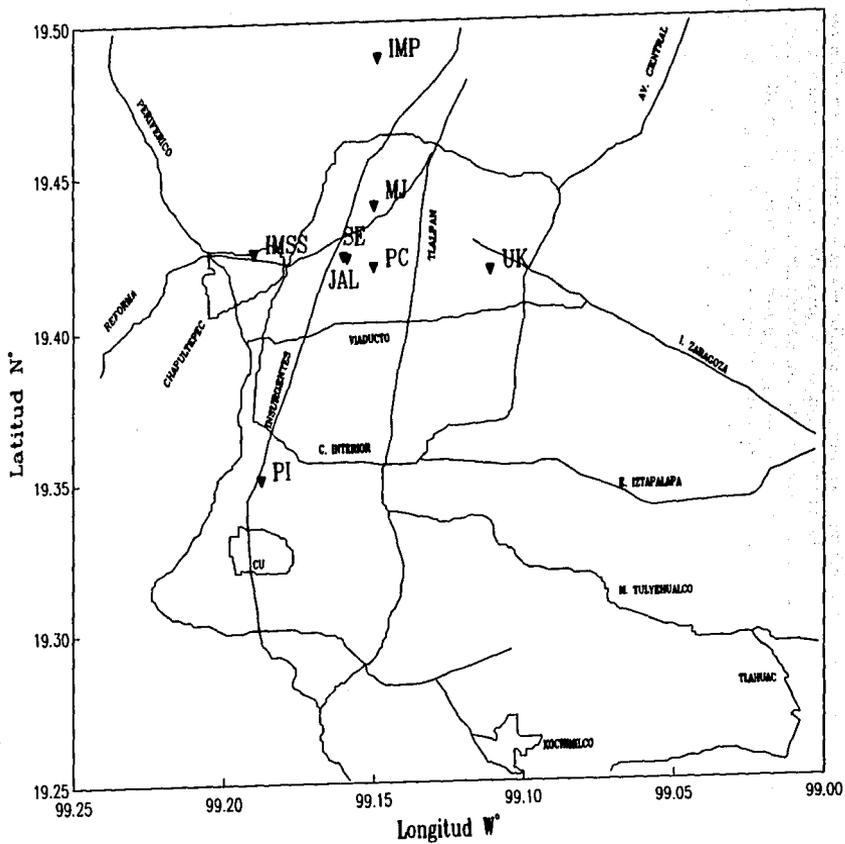


Figura 9. Localización de ocho edificios instrumentados dentro de la ciudad de México, los cuales fueron empleados en este estudio.

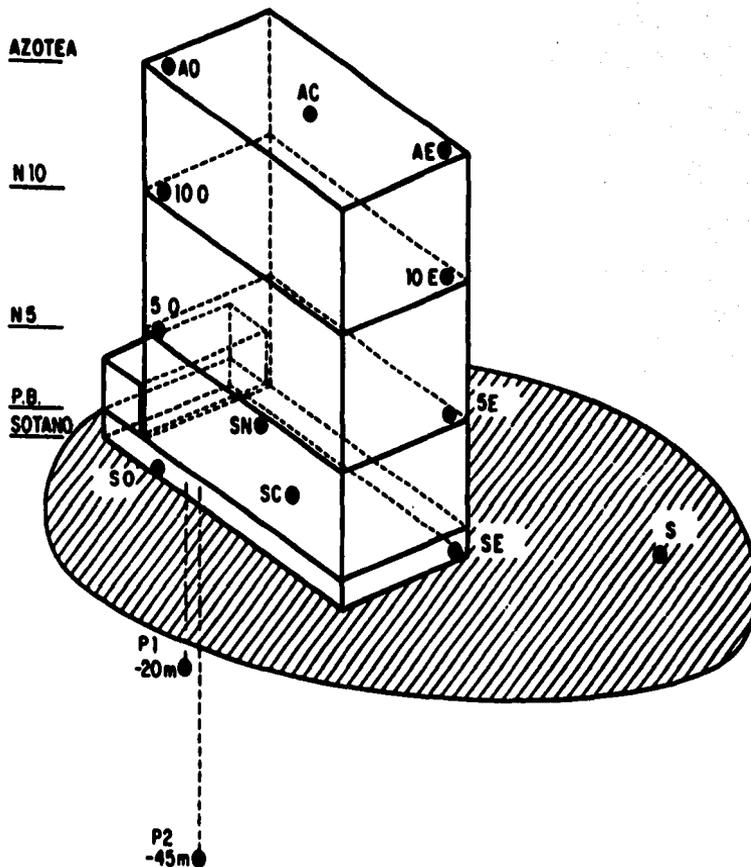


Figura 10. Instrumentación sísmica del edificio Jalapa. (Adaptada de González, 1995).

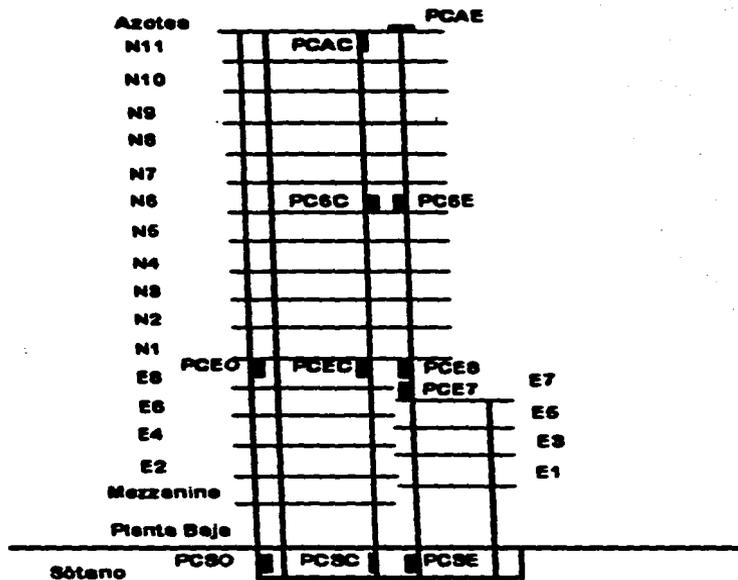


Figura 11. Instrumentación sísmica del edificio Plaza Córdoba. (Adaptada de Alcántara et al., 1995b).

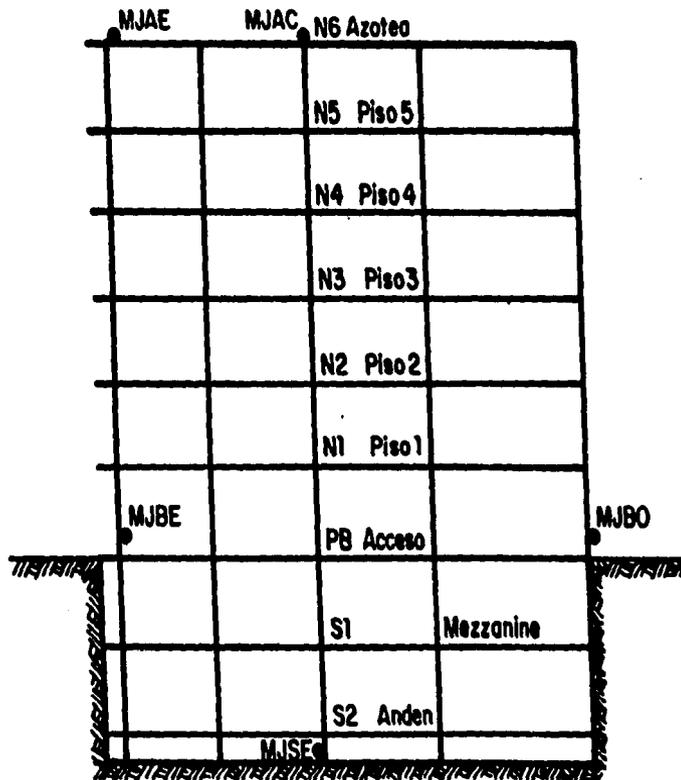


Figura 12. Instrumentación sísmica del edificio Metro Juárez. (Adaptada de Alcántara et al., 1995a).

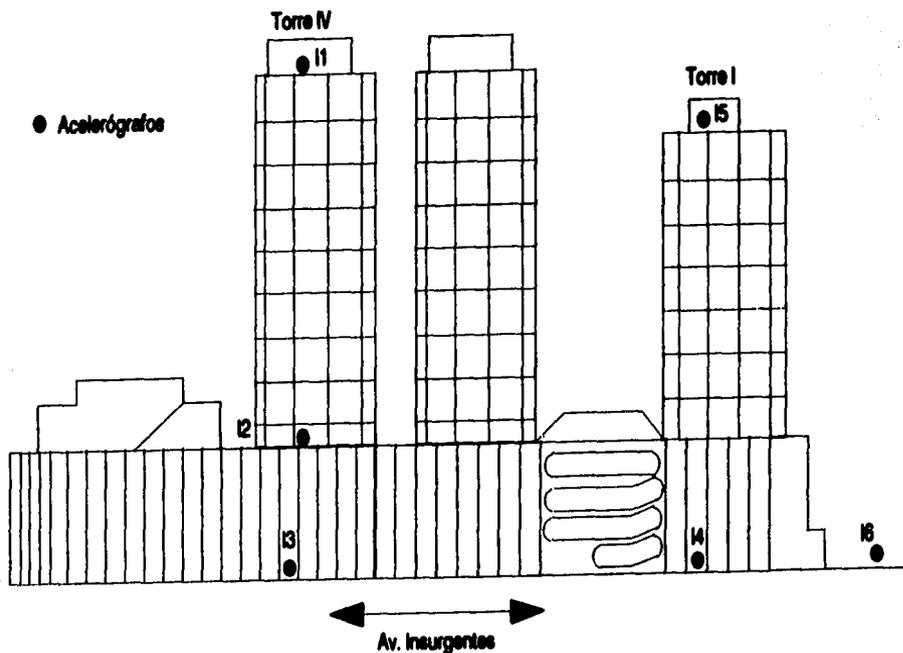


Figura 13. Instrumentación sísmica del Conjunto Plaza Inn. (Adaptada de CIRES, 1996a).

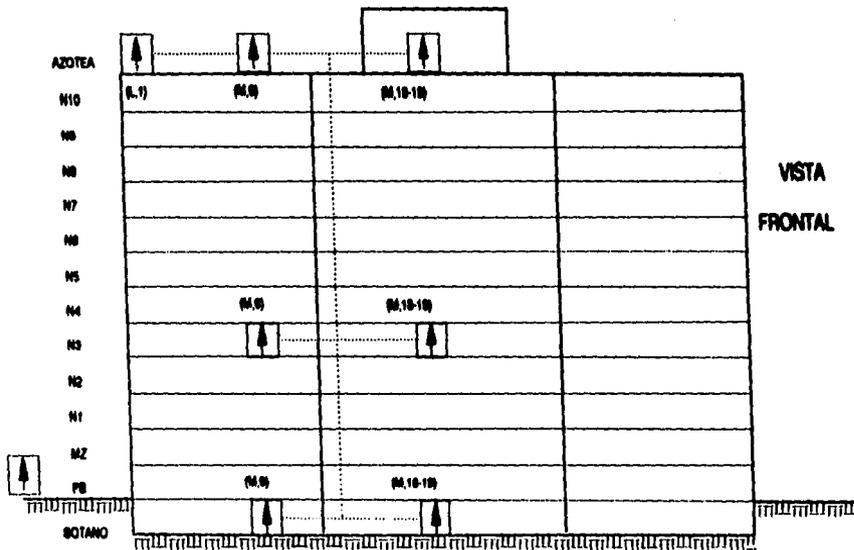


Figura 14. Instrumentación sísmica del edificio Instituto Mexicano del Seguro Social.
 (Adaptada de CIRES, 1996b).

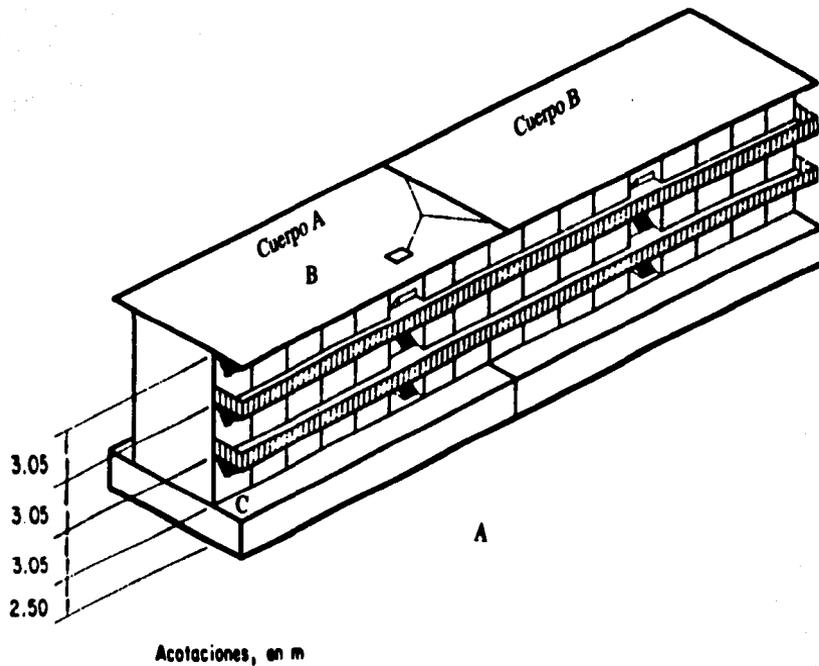


Figura 15. Instrumentación sísmica del edificio Secundaria No. 3. (Adaptada de Muria et al., 1993).

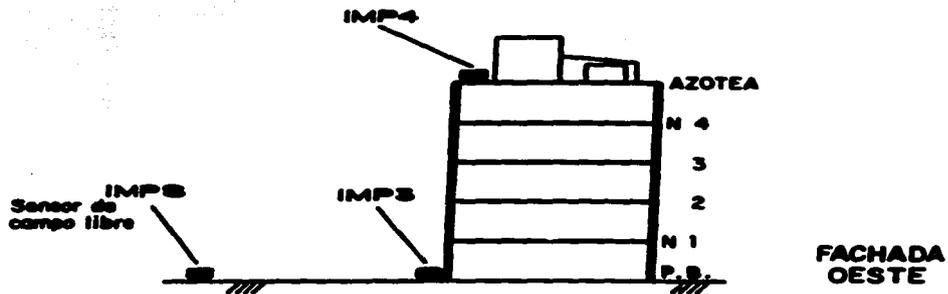


Figura 16. Instrumentación sísmica del edificio Instituto Mexicano del Petróleo. (Adaptada de Quas et al., 1993).

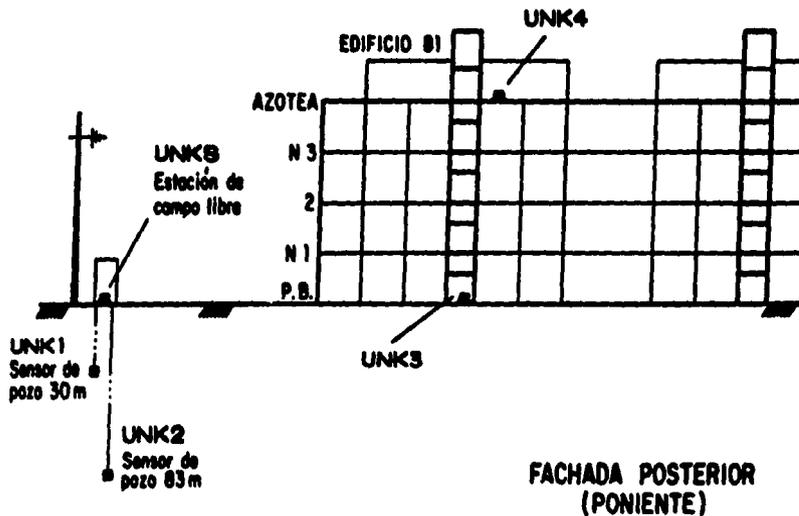


Figura 17. Instrumentación sísmica del edificio No. 81 de Unidad Kennedy. (Adaptada de Quas et al., 1993).

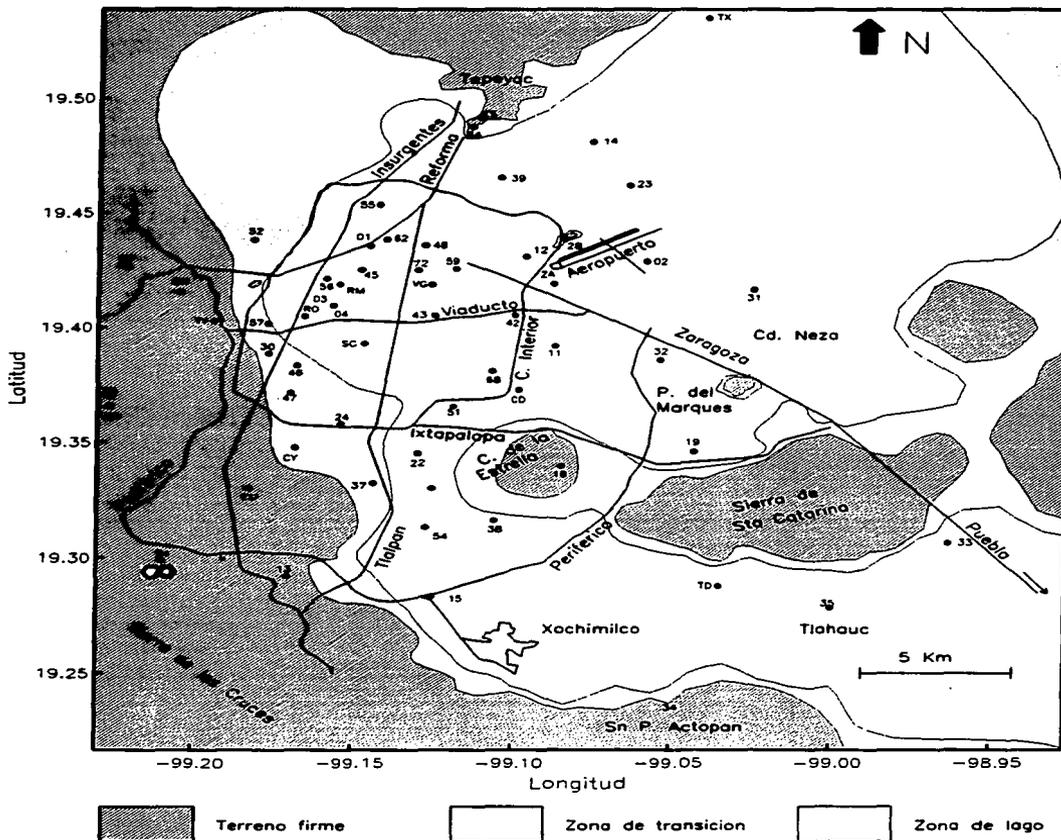


Figura 18. Estaciones de la Red Acelerográfica del Valle de México que registraron durante el sismo del 14 de septiembre de 1995. (Facilitada por Luis E. Pérez Rocha).

EDIFICIO	INSTITUCIÓN	UBICACIÓN	ACELERÓGRAFO	No. DE EQUIPOS
1. Jalapa	IdI, UNAM	Lago	DCA-333 (Digital)	14
2. Metro Juárez	IdI, UNAM	Lago	DCA-333 (Digital)	5
3. Plaza Córdoba	IdI, UNAM	Lago	DCA-333 (Digital)	11
4. Seguro Social	CIRES	Lomas	DCA-333 (Digital)	8
5. Plaza Inn	CIRES	Lomas	DCA-333 (Digital)	6
6. Escuela Secundaria No. 3	CIRES	Lago	DCA-333 (Digital)	3
7. Instituto Mexicano del Petróleo	CENAPRED	Transición	SMAC MD (Digital)	3
8. Unidad Kennedy	CENAPRED	Lago	SMAC MD (Digital)	5

Tabla 1. Características más importantes de los edificios empleados en este estudio.

EQUIPO	UBICACION
P1	Pozo a 20 m de profundidad
P2	Pozo a 45 m de profundidad
S	Campo libre
SO	Sótano oeste
SE	Sótano este
SN	Sótano norte
SC	Sótano centro
5 O	Tercer nivel oeste
5 E	Tercer nivel este
10 O	Octavo nivel oeste
10 E	Octavo nivel este
AO	Azotea oeste
AE	Azotea este
AC	Azotea centro

Tabla 3. Localización de los acelerógrafos en el edificio Jalapa.

EQUIPO	UBICACION
PCSO	Sótano oeste
PCSE	Sótano este
PCSC	Sótano centro
PCE7	Nivel 7 de estacionamiento este
PCEO	Nivel 8 de estacionamiento oeste
PCE8	Nivel 8 de estacionamiento este
PCEC	Nivel 8 de estacionamiento centro
PC6E	Nivel 6 de oficinas este
PC6C	Nivel 6 de oficinas centro
PCAE	Azotea este
PCAC	Azotea centro

Tabla 4. Localización de los acelerógrafos en el edificio Plaza Córdoba.

EQUIPO	UBICACION
MJSE	Sótano este
MJBO	Base oeste (estacionamiento)
MJBE	Base este
MJAE	Azotea este
MJAC	Azotea centro

Tabla 5. Localización de los acelerógrafos en el edificio Metro Juárez.

EQUIPO	UBICACION
I1	Torre IV, azotea, cuarto de máquinas
I2	Torre IV, manejadora, nivel jardín
I3	Torre IV, sótano 3, c. contra incendios
I4	Torre I, sótano 3, c. hidroneumático
I5	Torre I, azotea, cuarto de máquinas
I6	Campo libre

Tabla 6. Localización de los acelerógrafos en el Conjunto Plaza Inn.

EQUIPO	UBICACION
S1	Sótano, frente a elevadores centrales
S2	Sótano, cuerpo lateral oeste
S3	Tercer nivel, dentro de la sala de cómputo
S4	Tercer nivel, oficinas lateral oeste
S5	Azotea, al centro del edificio
S6	Azotea, junto al módulo de salud
S7	Azotea, cuerpo lateral oeste
S8	Campo libre, frente al edificio

Tabla 7. Localización de los acelerógrafos en el edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social.

EQUIPO	UBICACION
A	Campo libre, cerca a la biblioteca
B	Azotea
C	Planta baja

Tabla 8. Localización de los acelerógrafos del edificio Secundaria No. 3

EQUIPO	UBICACION
IMP3	Base
IMP4	Azotea
IMPS	Campo libre

Tabla 9. Localización de los acelerógrafos en el edificio Instituto Mexicano del Petróleo.

EQUIPO	UBICACION
UNK1	Pozo a 30 m de profundidad
UNK2	Pozo a 83 m de profundidad
UNK3	Base del edificio
UNK4	Azotea
UNKS	Campo libre

Tabla 10. Localización de los acelerógrafos en el edificio No. 81 de Unidad Kennedy.

ANÁLISIS EN FRECUENCIA

Los datos sísmicos se conciben por lo general como la variación del movimiento del suelo con el tiempo. Cuando se toma este punto de vista se están considerando en el dominio del tiempo. A veces también resulta conveniente considerar una onda sísmica como el resultado de la superposición de muchas ondas sinusoidales que difieren en frecuencia, amplitud y fase, las cuales se toman como funciones de la frecuencia y se consideran en el dominio de la frecuencia (Sheriff y Geldart, 1991).

Al llegar las ondas sísmicas a la superficie se originan movimientos que son registrados en acelerógrafos. Si existe una edificación sobre la superficie del terreno, el movimiento se modifica por la presencia de la cimentación de la estructura, o por la radiación del movimiento de la estructura hacia el suelo. Es así como el movimiento en "campo libre", difiere del movimiento en la base de la cimentación, desarrollándose el fenómeno que se conoce como interacción suelo-estructura (ISE). La manera de determinar la respuesta de un edificio ante movimientos del terreno, es relacionando el movimiento originado en el foco, con el movimiento máximo del edificio. En este enfoque es necesario conocer varias funciones de transferencia (foco-"campo libre"; "campo libre"-base de la estructura y base de la estructura-azotea). Debido a la necesidad de establecer que tanto puede afectar la ISE a una edificación o al suelo, se hace necesario conocer la función de amplificación relativa entre el movimiento en "campo libre" y la base de la estructura (función de transferencia), producida por dicha interacción. Dentro de un edificio esta función de amplificación relativa (función de transferencia), se establece entre los movimientos registrados en la base y los registrados en la azotea. Para un edificio, esta función de transferencia permite determinar las frecuencias naturales de vibración de la estructura.

Se ha observado en señales sísmicas que existe radiación de energía desde la estructura, la cual contamina los registros en la base y en "campo libre" (Celebi, 1992). Para poder determinar esa "contaminación" se miden los movimientos en "campo libre" y en la base de la edificación, de tal forma que al procesar dichas señales en el dominio de la frecuencia se pueda determinar la función de transferencia.

La relación entre los dominios del tiempo y la frecuencia fue establecida por Fourier en 1822. En el caso de registros de aceleración de un mismo sismo, y debido a que comúnmente los acelerógrafos no inician su operación en el mismo instante, el realizar la comparación de las señales en el dominio de la frecuencia evita el problema que puede tenerse cuando no se conocen con precisión los tiempos de inicio de registro. En este capítulo presentamos lo concerniente al análisis en frecuencia como un primer intento de

establecer correlaciones entre los registros sísmicos de los 8 edificios escogidos para el estudio con los registros de "campo libre" más cercanos a las estructuras.

El objetivo de este capítulo es el de encontrar en los registros de "campo libre" picos (en el espectro de amplitudes de Fourier) en la frecuencia correspondiente al modo fundamental de vibrar del edificio. Para lograr esto se sugiere en primer lugar conocer la frecuencia fundamental del edificio. Esta frecuencia se determinó al calcular los cocientes espectrales entre los registros de la base, sótano y "campo libre" según sea el caso y los registros de la azotea. Para este análisis en frecuencia se emplearon los registros de aceleración de los 8 edificios descritos en el capítulo anterior, correspondientes al sismo del 10 de diciembre de 1994 (121094). Conociendo la frecuencia fundamental de cada estructura, se localizaron las estaciones de la RAVM más cercanas a la edificación en cuestión. Identificadas las estaciones, se rotaron los registros en la orientación del edificio al cual estaban próximas, luego se determinaron los espectros de Fourier y se calculó el cociente espectral entre los componentes horizontales sobre vertical. Por último se compararon las frecuencias picos de los cocientes espectrales de los registros de "campo libre" con la frecuencia fundamental de la estructura.

3.1 Interacción suelo-estructura

En vista de que es difícil predecir el movimiento sísmico esperado, se analizan los movimientos del suelo ocurridos en el pasado, para su utilización en el estudio del comportamiento de las estructuras que descansan sobre el suelo. De esta forma se puede conocer el movimiento del "campo libre". Antes de proseguir se definirá el término campo libre ya que éste se empleará durante todo el estudio. Se llama campo libre al movimiento del suelo, libre de la presencia de cualquier estructura.

Para identificar la influencia que ejerce una estructura al suelo es necesario conocer el movimiento en "campo libre", así como el movimiento de la base de la estructura adyacente, para poder establecer diferencias entre el uno y el otro. La forma como la presencia de la estructura influye en el movimiento del terreno es conocido como interacción suelo-estructura (ISE). La ISE es un fenómeno complejo por lo cual es necesario establecer distinciones en los tipos de estructuras (p.e. represas ó edificios). En general, para edificaciones pequeñas se ignora el efecto de interacción debido a que se sabe que éste reduce los esfuerzos dentro de la estructura. Existen situaciones en las que no hay reducciones en los esfuerzos dentro de la estructura y por ello se hace necesario considerar el efecto de ISE. Una de estas situaciones es cuando edificios altos están desplantados sobre suelos blandos. Este es el caso de las estructuras sobre la zona de lago en la Ciudad de México.

El fenómeno de la interacción ocurre por el acoplamiento de los movimientos del suelo y de la cimentación del edificio. Cuando las ondas sísmicas llegan a la superficie del suelo generan movimientos en las estructuras que están desplantadas sobre él. Si los desplazamiento en "campo libre" (U_0) son diferentes a los de la cimentación (U_1), se dice que la estructura y el terreno están acoplados y, por tanto, hay interacción suelo-estructura.

Si los desplazamiento en "campo libre" son iguales a los de la cimentación ($U_0 = U_1$), el fenómeno no se presenta (Romo, 1991). La figura 19 muestra esquemáticamente el concepto de interacción suelo-estructura.

Según Seed (1990), la interacción suelo-estructura implica tres aspectos diferentes:

a) Prorrateo debido a la losa de cimentación

Las ondas sísmicas que llegan a diferentes puntos de la base de una estructura siguen caminos distintos a través de las formaciones geológicas y del suelo. Es así como se generan variaciones temporales y espaciales en los movimientos sísmicos. Si la estructura tiene como base una losa rígida, este elemento tendrá un movimiento único (todo a la vez). Como las amplitudes máximas de los movimientos en los puntos de la base de la losa no ocurrirán simultáneamente, en general las amplitudes máximas del movimiento de la cimentación serán menores que las que ocurren en "campo libre". La magnitud de este efecto dependerá del área y rigidez de la cimentación y del grado de heterogeneidad de los movimientos en "campo libre".

b) Interacción inercial

Cuando la base de un edificio es excitada debido a la llegada de ondas sísmicas, el edificio presenta una resistencia inercial al movimiento dinámico la cual persiste durante toda la excitación. Este efecto, denominado interacción inercial, genera cambios en la presión de contacto entre la cimentación y el suelo, lo cual causa deformación en éste. El efecto principal de la interacción inercial es reducir la frecuencia resonante de la estructura y modificar su amortiguamiento efectivo.

c) Interacción cinemática

Si un edificio está empotrado a una profundidad significativa dentro del terreno, estará sujeto a los movimientos de éste en su base y en las paredes laterales de la porción empotrada del edificio; dichos movimientos variarán con la profundidad bajo la superficie del terreno. Esto significa que mientras más profundo sea el empotramiento, menores serán las aceleraciones desarrolladas en la base y menor será la respuesta de la estructura. A los efectos del empotramiento en la estructura se le ha llamado "interacción cinemática" y son muy significativos para las estructuras empotradas profundamente.

Hoy en día la interacción suelo-estructura implica solo dos aspectos importantes: interacción inercial y cinemática. Dentro de esta última se considera que está contenido el prorrateo debido a la losa de cimentación.

De los tres efectos de ISE mencionados anteriormente trataremos solo el efecto de la estructura sobre el suelo blando, debido a la interacción inercial, ya que los otros efectos tienen menor influencia en el movimiento del suelo. Para evaluar la interacción inercial, primero se calcula la frecuencia fundamental de vibración de la estructura. Si se conocen las series de tiempo-aceleración de un edificio instrumentado, después de calcular las transformadas de Fourier se puede establecer su modo fundamental de vibración por medio de una función de transferencia definida como el cociente de la transformada de Fourier de

la señal de salida sobre la transformada de Fourier de la señal de entrada. Conocido el modo fundamental de vibrar de la estructura se establecen comparaciones con las frecuencias picos de los cocientes espectrales horizontales sobre vertical de las señales de "campo libre" registradas en estaciones cercanas.

3.2 Función de transferencia

En un sistema lineal, la salida $s(t)$ puede obtenerse por la aplicación a la entrada $e(t)$ de un operador lineal H :

$$s(t) = H\{e(t)\} \quad (1)$$

En un sistema lineal debe cumplirse lo siguiente:

$$H\{ae(t)\} = aH\{e(t)\} \quad (2)$$

$$H\{e_1(t) + e_2(t)\} = H\{e_1(t)\} + H\{e_2(t)\} \quad (3)$$

donde una forma general de caracterizar un sistema lineal es mediante su función de respuesta $h(t)$. Esta representa la salida del sistema cuando la entrada es una excitación. La salida $s(t)$ puede representarse como la convolución de la entrada $e(t)$ por $h(t)$, es decir:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

que se representa como

$$s(t) = e(t) * h(t) \quad (5)$$

Si aplicamos la transformada de Fourier a los dos miembros de la ecuación anterior obtenemos:

$$S(\omega) = E(\omega)H(\omega) \quad (6)$$

Donde ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia) y $S(\omega)$, $E(\omega)$ y $H(\omega)$ son funciones complejas de ω transformadas de $s(t)$, $e(t)$ y $h(t)$, respectivamente.

Mediante la transformada de Fourier se ha pasado del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, con lo cual las expresiones que se presentan a continuación se simplifican. La convolución corresponde a un producto, y la integración y derivación corresponden a una división o multiplicación, respectivamente, por $i\omega$, donde i es la unidad imaginaria.

La función compleja $H(\omega)$, la cual caracteriza el comportamiento del sistema, se denomina función de transferencia. De la ecuación (6):

$$H(\omega) = \frac{S(\omega)}{E(\omega)} \quad (7)$$

Es decir, la función de transferencia del sistema, $H(\omega)$, se obtiene por el cociente entre dos funciones complejas $S(\omega)$, transformada de Fourier de la salida $s(t)$ y $E(\omega)$, transformada de Fourier de la entrada $e(t)$.

Ahora vamos a aplicar todos los conceptos expuestos anteriormente a la ISE. Los términos "sistema lineal" se usan para indicar un grupo de objetos relacionados de tal modo que, cuando se aplica una entrada a un punto, se genera una salida en otro punto. Podemos pensar en un edificio como un sistema lineal (siempre y cuando la excitación sea pequeña); y en el movimiento del terreno debido a las ondas sísmicas generadas por el temblor como la excitación. Si consideramos la entrada al sistema como el espectro de la señal que corresponde al movimiento registrado en la base o sótano de la estructura, mientras que la salida al espectro que corresponde a los movimientos medidos en la azotea, la frecuencia fundamental de una estructura se puede obtener calculando el cociente espectral de la función de salida sobre la función de entrada.

3.3 Análisis del movimiento observado en los edificios

Anteriormente mencionábamos que los edificios pueden ser considerados como sistemas lineales. De igual forma, sabemos que las estructuras pueden ser representadas como un sistema de un grado de libertad. En este tipo específico de sistemas lineales, su función de transferencia es el máximo valor que se obtiene del espectro de amplitud de Fourier de la señal de salida sobre el espectro de amplitud de Fourier de la señal de entrada.

Se han desarrollado métodos numéricos de aproximaciones sucesivas, para obtener modos y frecuencias de vibrar de las estructuras. Algunos de ellos son: método de Newmark, el cual calcula el modo fundamental; método de Holzer, con el cual se obtienen los modos superiores al primero y el método de iteración inversa, apropiado para resolver problemas de valores característicos mediante operaciones matriciales. Estos métodos son explicados con detalle en Bazán y Meli (1985).

Si se cuenta con acelerogramas de edificios instrumentados, una interpretación correcta de las señales de entrada y salida del sistema hace posible calcular frecuencias naturales de vibración. Para calcular el modo fundamental de vibrar de las 8 estructuras de este trabajo se emplearon los registros correspondientes al temblor del 10 de diciembre de 1994 (121094).

3.3.1 Frecuencia fundamental del edificio Jalapa

El procedimiento que se describe a continuación fue empleado para determinar la frecuencia fundamental de vibración de cada una de las 8 estructuras del estudio. En primer lugar, se graficaron las tres componentes de los registros originales de aceleración correspondientes a la azotea (señal de salida) y los registros que podíamos considerar como señal de entrada. Estos fueron diferentes según la instrumentación específica de cada edificio. En algunos de ellos, el registro obtenido en la base del edificio o en el sótano fueron lo más cercano que se tuvo a un registro de la excitación que llegó a la estructura. En otros casos, se contó con un registro obtenido en un acelerógrafo de "campo libre" instalado a proximidad del edificio, expresamente para registrar el campo de ondas incidente (señal de entrada) al edificio. De ser necesario, estos registros fueron corregidos por línea base. Seguidamente se determinaron los espectros de amplitud de Fourier de todas los componentes. Dichos espectros fueron suavizados con una ventana cuadrada de 1/3 de octava (Orcutt, 1979) la cual conserva la energía tanto en bajas como en altas frecuencias. Por último se calcularon los cocientes espectrales de la señal de salida sobre la señal de entrada, para cada una de los componentes horizontales.

La figura 21 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos AE (azotea este) y S (campo libre) localizados en el edificio Jalapa. Nos referiremos a la dirección transversal (T) como aquella que coincide con la orientación de la parte más corta del edificio, y dirección longitudinal (L), como aquella que coincide con la orientación de la parte más larga del edificio. El registro de AE es considerado como señal de salida y el registro de S como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección T y L de AE y S se muestran en la figura 22. El cociente espectral de AE sobre S para los componentes T y L se aprecia en la figura 23. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 0.32 Hz en la dirección T y 0.52 Hz en la dirección L.

En la tabla 11 aparecen las frecuencias a las que se presentan los máximos de los cocientes espectrales en la dirección T y L del edificio Jalapa; calculados entre 3 puntos de la azotea (centro, este y oeste) y 3 puntos en el sótano (centro, este y oeste), al igual que para los mismos puntos en la azotea sobre el espectro de amplitud de Fourier del registro en "campo libre". Ahora bien, la frecuencia correspondiente al valor máximo de cada cociente espectral será considerada la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura. Las frecuencias fundamentales obtenidas oscilaron entre 0.31-0.34 Hz en la dirección T y 0.44-0.52 Hz en la dirección L.

Para esta misma estructura, González (1995) determinó una frecuencia fundamental de 0.32 Hz en la dirección T y 0.48 Hz en la dirección L. Estos valores presentan diferencias menores a 10% con los nuestros, presentados en la tabla 11.

3.3.2 Frecuencia fundamental del edificio Plaza Córdoba

La figura 24 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos PCAE (azotea este) y PCSE (sótano este) localizados en el edificio Plaza Córdoba. El registro de PCAE es considerado como señal de salida y el

registro de PCSE como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección T y L de PCAE y PCSE se muestran en la figura 25. El cociente espectral de PCAE sobre PCSE para los componentes T y L se aprecia en la figura 26. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 0.44 Hz en la dirección T y 0.34 Hz en la dirección L.

En la tabla 12 aparecen las frecuencias a las que se presentan los máximos de los cocientes espectrales en la dirección T y L del edificio Plaza Córdoba, calculados entre 2 puntos de la azotea (este y centro) y 2 puntos en el sótano (este y centro). Las frecuencias fundamentales obtenidas estuvieron entre 0.34-0.36 Hz en la dirección T y 0.35-0.44 Hz en la dirección L.

3.3.3 Frecuencia fundamental del edificio Metro Juárez

La figura 27 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos MJAE (azotea este) y MJSE (sótano este) localizados en el edificio Metro Juárez. El registro de MJAE es considerado como señal de salida y el registro de MJSE como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección T y L de MJAE y MJSE se muestran en la figura 28. El cociente espectral de MJAE sobre MJSE para los componentes T y L se aprecia en la figura 29. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 1.75 Hz en la dirección T y 1.76 Hz en la dirección L.

En la tabla 13 aparecen las frecuencias a las que se presenta el máximo de los cocientes espectrales en la dirección T y L del edificio Metro Juárez, calculados entre 2 puntos de la azotea (este y centro) y 2 puntos en el sótano (este y centro). Las frecuencias fundamentales obtenidas fueron 1.75 y 1.76 Hz en la dirección T y L respectivamente.

3.3.4 Frecuencia fundamental del conjunto Plaza Inn

La figura 30 muestra las tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos I1 (azotea, Torre IV) e I2 (nivel jardín) localizados en el conjunto Plaza Inn. El registro I1 es considerado como señal de salida y el registro I2 como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes N-S y E-W de I1 e I2 se muestran en la figura 31. El cociente espectral de I1 sobre I2 para los componentes N-S y E-W se aprecia en la figura 32. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 0.82 Hz en la dirección N-S y 0.80 Hz en la dirección E-W.

En la tabla 14 aparecen las frecuencias en las que se presentan los máximo de los cocientes espectrales en la dirección N-S y E-W del conjunto Plaza Inn, calculados así: para la Torre IV, I1 (azotea) sobre I2 (jardín) e I3 (sótano), para la Torre I, I5 (azotea) sobre I4 (sótano). Las frecuencias fundamentales obtenidas estuvieron entre 0.58-0.80 Hz en la dirección N-S y 0.62-0.82 Hz en la dirección E-W. En CIRES (1996a), se calcularon las frecuencias fundamentales de vibración para el mismo temblor del 121094, que aquí se estudia. Si comparamos sus resultados (tabla 15), observamos una sobrestimación del 14% por parte nuestra, especialmente en el cociente (I1/I2). Como en el trabajo de CIRES (1996a) no se

especifica el manejo que se le dió a la señal (p.e. corrección de línea base o suavizado), estas diferencias pueden atribuirse a los criterios de selección empleados para decidir cuales eran los máximos picos espectrales.

3.3.5 Frecuencia fundamental del edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social

La figura 33 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094 correspondientes a los acelerógrafos S7 (azotea) y S8 (campo libre) localizados en el edificio del IMSS. El registro de S7 es considerado como señal de salida y el registro de S8 como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección N-S y E-W de S7 y S8 se muestran en la figura 34. El cociente espectral de S7 sobre S8 para los componentes N-S y E-W se aprecia en la figura 35. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 0.57 Hz en la dirección N-S y 0.66 Hz en la dirección E-W.

En la tabla 16 aparecen las frecuencias en las que se presentan los máximos de los cocientes espectrales en la dirección N-S y E-W del edificio del IMSS, calculados entre 3 puntos de la azotea (oeste, centro y junto al módulo de salud), sobre 3 puntos así: 2 en el sótano y uno en "campo libre". Las frecuencias fundamentales obtenidas estuvieron entre 0.57-0.66 Hz en la dirección N-S y 0.66-0.71 Hz en la dirección E-W.

3.3.6 Frecuencia fundamental de la escuela Secundaria No. 3

La figura 36 muestra las tres componentes de los registros del temblor del 121094 correspondientes a los acelerógrafos B (azotea) y C (planta baja) localizados en la escuela Secundaria No. 3. El registro de B es considerado como señal de salida y el registro de C como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes N-S y E-W de B y C se muestran en la figura 37. El cociente espectral de B sobre C para los componentes N-S y E-W se aprecia en la figura 38. Al calcular el cociente espectral no se obtuvo una frecuencia dominante, los valores fluctuaron entre 5 y 9 Hz en la dirección N-S (no hubo un pico definido). Para la dirección E-W, la frecuencia fue de 8.53 Hz.

En la tabla 17 aparece la frecuencia en la que se presenta el máximo del cociente espectral en la dirección N-S y E-W de la escuela Secundaria No.3 calculado entre la azotea, y el "campo libre". Según Murià et al. (1993), la estructura sobre base rígida tiene una frecuencia fundamental en la dirección T de 10 Hz y 8 Hz en la dirección L. Romo y Bárcena (1994) modelaron este edificio con el método del elemento finito considerando la estructura sobre base rígida. Ellos encontraron que la frecuencia fundamental en la dirección T es de 9.70 Hz y 7.75 Hz en la dirección L. Las diferencias entre estos resultados y los nuestros se deben a que Murià et al. (1993) y Romo y Bárcena (1994) no consideran la ISE. Recordemos que el efecto ISE, reduce la frecuencia resonante de un edificio.

3.3.7 Frecuencia fundamental del edificio del Instituto Mexicano de Petróleo

La figura 39 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos IMP4 (azotea) e IMP5 (campo libre) localizados en el

edificio del IMP. El registro IMP4 es considerado como señal de salida y el registro IMPS como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección T y L de IMP4 e IMPS se muestran en la figura 40. El cociente espectral de IMP4 sobre IMPS para los componentes T y L se aprecian en la figura 41. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 1.97 Hz en la dirección T y 1.03 Hz en la dirección L.

En la tabla 18 aparecen las frecuencias en las que se presentan los máximos de los cocientes espectrales en la dirección T y L del edificio del IMP, calculados entre la azotea y 2 puntos así: planta baja y "campo libre". Las frecuencias fundamentales obtenidas se encontraron entre 1.87-1.97 Hz en la dirección T y 0.99-1.03 Hz en la dirección L.

Muriá y González (1990) estudiaron este edificio y determinaron una frecuencia fundamental en la dirección T de 2.32 Hz y 1.28 Hz en la dirección L. Estos resultados difieren mucho de los nuestros resumidos en la tabla 18. Debido a ello repetimos el análisis empleando los registros del sismo del 14 de septiembre de 1995 (091495). Los resultados se observan en la tabla 19. Los resultados que obtenemos para los dos temblores analizados son similares entre sí y difieren significativamente de los reportados por Muriá y González (1990) para esta misma estructura. Las diferencias sin embargo son explicables al considerar que Muriá y González (1990) utilizan registros de vibración ambiental. En efecto, González (1995) observó que las frecuencias naturales de un sistema, registrados con vibración ambiental pueden diferir sensiblemente de aquellas que se obtienen analizando registros de temblores, aún de mediana intensidad y sin daño aparente. Un sismo en comparación a la vibración ambiental produce una disminución en la rigidez de la estructura, produciendo por consiguiente una disminución de la frecuencia fundamental.

3.3.8 Frecuencia fundamental del edificio No. 81 de la Unidad Kennedy

La figura 42 muestra los tres componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos UNK4 (azotea) y UNKS (campo libre) localizados en el edificio No. 81 de la Unidad Kennedy. El registro UNK4 es considerado como señal de salida y el registro UNKS como señal de entrada. Los espectros suavizados de los componentes en la dirección N-S y E-W de UNK4 y UNKS se muestran en la figura 43. El cociente espectral de UNK4 sobre UNKS para los componentes N-S y E-W se aprecia en la figura 44. Al calcular el cociente espectral se obtuvo una frecuencia de 4.97 Hz en la dirección N-S y valores entre 2.67-3.96 Hz en la dirección E-W.

En la tabla 20 aparecen las frecuencias en las que se presentan los máximos de los cocientes espectrales en la dirección N-S y E-W del edificio No. 81 de la Unidad Kennedy, calculados entre la azotea y 2 puntos así: planta baja y "campo libre". Las frecuencias fundamentales de vibración de la estructura se encuentran entre 4.82-4.97 Hz en la dirección N-S y 2.26-3.96 Hz en la dirección E-W.

Para concluir esta parte del estudio, un resumen de las frecuencias propias de vibrar de cada una de las ocho estructuras se presenta en la tabla 21. Somos conscientes de que no es posible calcular la verdadera frecuencia de vibrar de los edificios ya que se podría estar

considerando la ISE; pero creemos que estos resultados están dentro del rango en el cual se encuentra el valor verdadero. Al comparar la frecuencia fundamental del edificio Jalapa en la dirección L y la frecuencia fundamental del sitio (0.5 Hz) obtenida del trabajo de Lermo y Chávez-García (1994), se observa que el edificio está prácticamente en resonancia. De igual forma para el edificio Plaza Córdoba. Su frecuencia fundamental en la dirección T coincide con la frecuencia fundamental del sitio (0.44 Hz).

3.4 Análisis del movimiento sísmico de campo libre

Para estimar la función de amplificación de un estrato de suelo con respecto a otro que tiene características diferentes (función de transferencia empírica), usualmente se calculan los cocientes espectrales de los componentes horizontales registradas en terreno blando relativamente a una estación de referencia (Borcherdt, 1970). Para esto se obtienen señales de un conjunto de estaciones, una de las cuales (colocada sobre roca) sirve como referencia. Aunque el cálculo de funciones de transferencia empíricas ha resultado ser muy útil para evaluar efectos de sitio en una amplia variedad de ambientes (Borcherdt y Gibbs, 1976; Jarpe et al., 1988; Singh et al., 1988a y b; Chávez-García et al., 1990), esta técnica tiene límites para estimar los efectos de sitio. Uno de los más importantes es que requiere una estación de referencia adecuada.

Una alternativa para evaluar la función de transferencia empírica que no requiere una estación de referencia, fue originalmente propuesta por Nakamura (1989) para interpretar mediciones de microtemores. Para el desarrollo de esta técnica conocida como cociente horizontal sobre vertical (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSr, por sus siglas en inglés), Nakamura plantea varias hipótesis. El supone que los microtemores consisten fundamentalmente en ondas Rayleigh, y que los efectos de amplificación de un sitio, son debidos a la presencia de un estrato blando sobre un semi-espacio. Según Nakamura, en el dominio de la frecuencia hay 4 amplitudes espectrales comprometidas: los componentes horizontales y vertical del movimiento en la superficie y en la base del estrato blando (Figura 45). Él asume que el movimiento del microtemor es producido por fuentes muy locales tales como el tráfico. Suponiendo ahora que las fuentes locales no afectan el movimiento del microtemor en la base del estrato del suelo, es posible estimar la amplitud de la fuente, A_S , por el cociente:

$$A_S = \frac{V_S}{V_B} \quad (1)$$

Donde V_S es la amplitud del espectro del componente vertical del movimiento en la superficie y V_B es la amplitud del espectro del componente vertical del movimiento en la base del estrato. Nakamura define una estimación de los efectos de sitio, S_E , como el cociente:

$$S_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (2)$$

Donde H_S es la amplitud del espectro de Fourier del componente horizontal del movimiento en la superficie y H_B es la amplitud del espectro de Fourier del componente horizontal del movimiento en la base del estrato.

Para compensar los efectos de sitio (S_E) por el efecto de la fuente, se calculan los efectos de sitio modificados, S_M , así:

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} \quad (3)$$

Lo cual es equivalente a escribir:

$$S_E = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{H_S V_B}{H_B V_S} = \frac{H_S}{H_B} \frac{V_B}{V_S} \quad (4)$$

Si finalmente se acepta que el cociente $H_B / V_B = 1$, los efectos de sitio corregidos por la fuente serán:

$$S_M = \frac{H_S}{V_S} \quad (5)$$

Esto indica que la estimación de los efectos de sitio está dada por el cociente espectral del componente horizontal sobre el componente vertical del movimiento en la superficie.

La hipótesis de que $H_B / V_B = 1$ fue verificada experimentalmente por Nakamura (1989), usando registros de microtemores obtenidos con mediciones en pozo. Lermo y Chávez-García (1993) verificaron si las hipótesis de Nakamura eran consistentes. Ellos supusieron que tenían una onda Rayleigh (modo fundamental) propagándose en un estrato sobre un semiespacio. De ser ciertas las suposiciones de Nakamura, la elipticidad en la superficie (cociente del movimiento horizontal sobre vertical) debía ser semejante a la función de transferencia de un modelo 1-D con incidencia vertical de una onda S. Adicionalmente, la elipticidad en la interfase sedimentos substratos debería ser cercana a la unidad. Los sitios elegidos para hacer esta prueba fueron dos estaciones de movimientos fuertes en la Ciudad de México: CDAO y SXVI (figura 46). La primera estación sobre suelo blando (zona de lago) y la última sobre suelo más duro (zona de transición). Los resultados para la estación CDAO se muestran en la figura 47. Se observa una buena congruencia entre la línea gruesa continua que representa el valor absoluto de la elipticidad en la superficie para el modo fundamental de ondas Rayleigh calculado para un modelo estratificado y la línea delgada continua que representa la función de transferencia de un modelo unidimensional para la incidencia vertical de una onda S. Esta buena aproximación de las curvas para la frecuencia de ocurrencia del más alto pico de amplificación entre la función de transferencia unidimensional y la elipticidad en la superficie corrobora la expuesto por Nakamura. En la

elipticidad de la superficie se observa un cambio de signo, debido a que las elipses de Rayleigh cambian de movimiento retrógrado a prógrado. En cuanto a la elipticidad a 67 m de profundidad, se observa que en gran parte del rango de frecuencias la amplitud de la función de transferencia es aproximadamente la unidad como lo supuso Nakamura. Resultados similares se obtuvieron en la estación SXVI, corroborando así las hipótesis de Nakamura.

Desde que Nakamura propuso la técnica del HVSR para interpretar registros de microtemblores, diferentes autores la han utilizado en varios sitios (Duval, 1994; Field, 1994; Field et al., 1995; Chávez-García y Cuenca, 1995) para identificar el período dominante de sedimentos de suelos blandos. También se ha empleado para estimar niveles de amplificación. Sin embargo, Kudo (1995) encontró numerosas diferencias en la amplitud de los cocientes espectrales calculado con el HSRV propuesto por Nakamura (1989) y el método estándar.

La técnica de Nakamura fue concebida para analizar ondas de Rayleigh presentes en las grabaciones de microtemblores, pero se ha demostrado que también puede ser utilizada en registros de temblores (Lermo y Chávez-García, 1993) para evaluar los efectos de sitio debido a la topografía o a la geología local. Para eventos como el del 25 de abril de 1989 ($M_S=6.9$), Chávez-García (1991) confirmó para la Ciudad de México, que el componente vertical no estaba sujeta a los importantes efectos de sitio que sufrían los componentes horizontales, por lo cual el HVSR era una técnica que empíricamente podía evaluar los efectos de sitio.

En nuestro estudio calcularemos el cociente HVSR de los registros de las estaciones en “campo libre” para poder determinar las frecuencias predominantes de cada uno de los sitios donde se alojaban estas estaciones y compararlos con la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura más cercana. Para esto se emplearon los registros de “campo libre” correspondientes a los temblores del 121094 y 091495.

3.5 Comparación de la frecuencia fundamental del edificio con el HVSR de las estaciones cercanas.

Conocida la frecuencia fundamental de vibrar de las estructuras, se identificaron las estaciones de la RAVM que estaban cercanas a ellas, luego se rotaron los registros (de los temblores 121094 y 091495) obtenidos en cada una de estas estaciones, con respecto a la orientación del edificio más cercano y por último se calculó el cociente espectral del componente horizontal sobre vertical. De la tabla 22 a la tabla 26 se muestran las frecuencias predominantes para cada una de las estaciones cercanas a los edificios; en forma comparativa se presenta la frecuencia fundamental de vibrar de cada estructura y la frecuencia predominante del sitio. La figura 48 muestra los cocientes espectrales en la dirección R (radial) y T (transversal), calculados con los registros de los temblores del 121094 y 091495; correspondientes a la estación 62 ubicada cerca del edificio Metro

Juárez. Adicionalmente se mencionan las estaciones de “campo libre” cercanas a los edificios y sus respectivas distancias (tabla 27).

Los cocientes espectrales de un modelo unidimensional en un medio isotrópico que considera una capa, sobre un semiespacio, con incidencia vertical deben ser similares en las dos direcciones horizontales del movimiento del suelo. Esta similitud de frecuencias picos en las dos direcciones del movimiento, solo se observó en algunos de los cocientes espectrales de los registros de “campo libre”. Fue por esto que se compararon las frecuencias predominantes obtenidas en cada estación con las frecuencias predominantes de cada sitio de la Ciudad de México presentadas en el mapa de isoperíodos del valle de México elaborado por Lermo y Chávez-García (1994) (figura 49) y un mapa similar presentado por Flores (1996) (figura 50). Al comparar las frecuencias predominantes reportadas para cada estación en estos dos trabajos, con las obtenidas en este estudio, se observó que existen frecuencias que no están relacionadas con los efectos de sitio. Ahora bien, una forma de entender a qué se pueden asociar estos cambios, es comparando las frecuencias picos correspondientes a los HVSR de las estaciones de “campo libre”, con la frecuencia fundamental de vibrar de cada estructura, para buscar picos de frecuencia que coincidan. Esta comparación se justifica ya que los HVSR eliminan los efectos de fuente y trayecto, enfatizando los producidos por los edificios. Nuestro análisis lo dividiremos de acuerdo a tres zonas geotécnicas de la ciudad. Recordando, dentro de la zona de lago se encuentran los edificios Jalapa, Metro Juárez, Plaza Córdoba, Escuela Secundaria No. 3 y Unidad Kennedy, en la zona de lomas, el edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social y Plaza Inn, y por último en la zona de transición el edificio del Instituto Mexicano del Petróleo.

En las tablas 22 a 26 se establece una comparación de la frecuencia natural de vibración de cada edificio con las frecuencias predominantes de los cocientes espectrales calculados con los registros de las estaciones más cercanas, y la frecuencia dominante del sitio (Lermo y Chávez García, 1994). Las frecuencias en negrilla están dentro del rango de vibración fundamental de la estructura y las frecuencias subrayadas son aquellas cuyos valores coinciden en las dos direcciones, respetando los resultados de un modelo unidimensional de una capa sobre un semiespacio con incidencia vertical. En la figura 48 se presentan las máximas frecuencias de los cocientes espectrales calculados con los registros (de los temblores 121094 y 091495) rotados con la misma orientación del edificio Metro Juárez (MJ) correspondiente a la estación de “campo libre” 62. Para el temblor del 121094 se destacan picos a 0.15, 0.29, 0.85 y 1.17 Hz en la dirección R; en la dirección T estos picos se encuentran a 0.15, 0.25 y 0.85 Hz. Ahora bien, para el temblor del 091495 en la dirección R se aprecian picos a 0.15, 0.39 y 1.04 Hz; en la dirección T se localizan a 0.14, 0.39 y 0.92 Hz. En todos los casos se seleccionaron los picos que presentaban mayor amplitud.

Comparemos primero las frecuencias picos de los HVSR de los registros de “campo libre” localizados a menos de 2 km de las estructuras dentro de la zona de lago, para los temblores del 121094 y 091495. El comportamiento difiere según el edificio utilizado. En los edificios Jalapa, Plaza Córdoba y Unidad Kennedy, se observó que las frecuencias dominantes de los

cocientes espectrales (negrillas) de algunas estaciones de la RAVM que se encuentran cerca a estas edificaciones estaban dentro del rango de vibración fundamental de la estructura más cercana. Cabe resaltar que para algunos casos estas frecuencias no estaban relacionadas con la frecuencia dominante del sitio. Para los demás edificios ubicados en la zona de lago no se apreció que las frecuencias dominantes de los cocientes espectrales calculados con los registros de “campo libre” tuvieran valores similares a los de la frecuencia fundamental de la vibrar de la estructura más cercana.

En la zona de lago se vislumbra una influencia de los edificios Jalapa, Plaza Córdoba y Unidad Kennedy en los registros de “campo libre” localizados a menos de 2 km. Esta influencia es más notoria en edificaciones mayores de 10 niveles tales como los edificios Jalapa y Plaza Córdoba debido al contraste de ellas con el suelo blando.

Dentro de la zona de transición contamos con un solo edificio, el del Instituto Mexicano del Petróleo. Desafortunadamente las estaciones de “campo libre” más cercanas a él que registraron durante los temblores del 121094 y 091495 están a más de 2 km. Por lo cual no se hizo el análisis descrito. A distancias tan grandes se dificulta establecer comparaciones entre las frecuencias propias de vibrar de la estructura y las frecuencias dominantes de los cocientes espectrales calculados con los registros obtenidos en las estaciones de “campo libre”.

Por último consideremos los edificios Plaza Inn e Instituto Mexicano del Seguro Social, localizados en la zona de lomas. Cerca al edificio Plaza Inn solo registró una estación localizada a 1.97 km (estación 40). Para el sismo 121094 en la estación 40, las frecuencias picos obtenidas fueron 0.38, 0.57, 0.92 y 1.82 en la dirección R y 0.15, 0.29, 0.38, 1.82 y 3.42 en la dirección T. Estas frecuencias no están asociadas al modo fundamental de vibrar de la estructura. Para el edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social desafortunadamente las estaciones más cercanas (52 y ch) que se activaron con los temblores, registraron menos de un minuto, por lo cual no se calcularon los cocientes espectrales.

3.6 Conclusiones

La aparición de ondas cuya frecuencia coincide con la frecuencia fundamental de estructuras cercanas no se pudo establecer para los edificios desplantados en la zona de transición, debido a que las estaciones de “campo libre” más cercanas a las estructuras, que registraron los sismos que aquí se estudiaron se encontraban a distancias mayores de 2 km. A distancias tan grandes no es posible establecer comparaciones, ya que la influencia que se apreciaria en los registros podría ser debido a edificios más cercanos que la estructura que nosotros consideramos (Instituto Mexicano del Petróleo).

Para la zona de lomas no se contó con un número suficiente de registros, tales que pudiéramos hacer un análisis como el que se realizó para los edificios localizados en la zona de lago. A pesar de que no se pudo establecer una influencia clara de los edificios localizados en la zona de transición y lomas hacia los registros de “campo libre”, se puede

decir que las condiciones propias de estos suelos no propician la aparición de ondas radiadas desde las estructuras hacia el suelo. Esto lo podemos concluir retomando lo propuesto por Seed (1990), quien afirma que los efectos de interacción inercial son de especial importancia en la Ciudad de México debido a la baja velocidad de las ondas de corte en la arcilla que subyace la mayor parte de la ciudad (aproximadamente 60 m/s en la zona de lago). Por esto, los períodos naturales de los edificios bajo una fuerte excitación sísmica son significativamente más largos que los de las estructuras iguales sobre terreno firme (zona de lomas y transición). Así, los períodos de vibración para los edificios en las parte de la ciudad apoyados sobre arcilla blanda son más altos que en aquellas zonas de la ciudad subyacida por suelos más rígidos.

El estudio del movimiento de los edificios Plaza Córdoba y Jalapa (desplantados en la zona de lago) bajo las excitaciones de los temblores 121094 y 091495 registradas tanto en las estructuras como en las estaciones de la RAVM cercanas a ellos, inicialmente mostraba que en algunas frecuencias pico de los cocientes espectrales de la señales de "campo libre" existían valores asociados a la frecuencia del sitio. De igual forma se observó cómo algunas frecuencias picos tenían relación con el modo fundamental de vibrar de estas estructuras. Fue así como se determinó que algunas de esas frecuencias pico coincidían o estaban dentro del rango de vibración de la estructura. La aparición de estos picos a frecuencias asociadas a la vibración de la estructura más cercana, puede denotar la generación de ondas por parte de la estructura hacia el subsuelo.

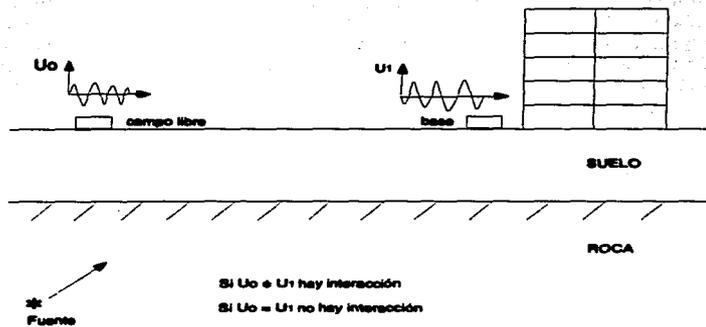


Figura 19. Representación esquemática del fenómeno de interacción suelo-estructura. (Adaptada de Soriano, 1989).



Figura 20. Representación esquemática de la función de transferencia de un edificio. (Adaptada de Roca, 1989).

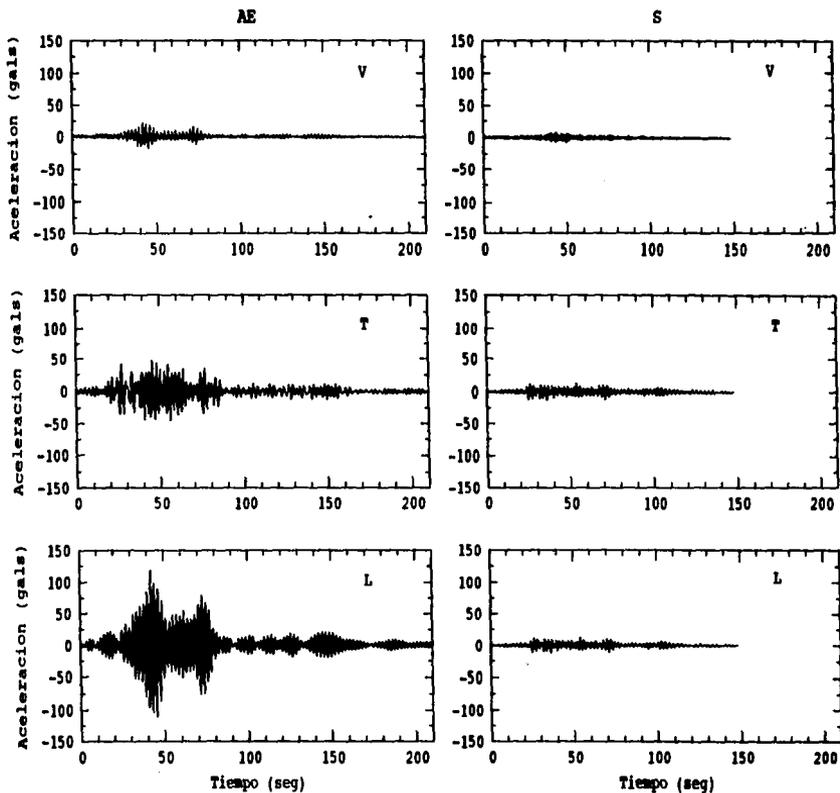


Figura 21. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos AE y S localizados en el edificio Jalapa.

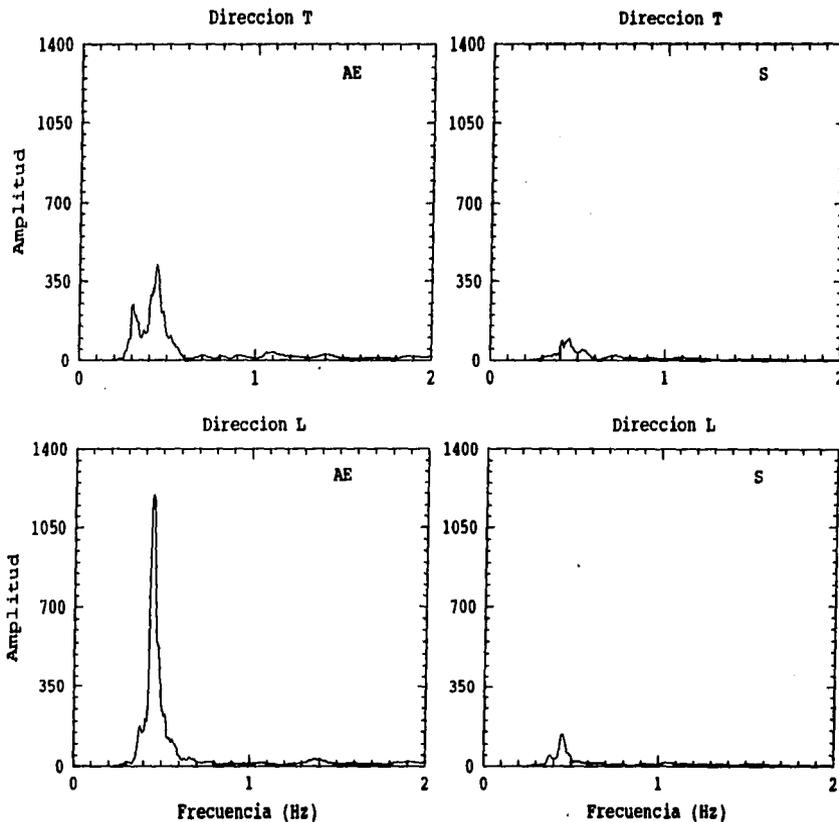


Figura 22. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos AE y S localizados en el edificio Jalapa.

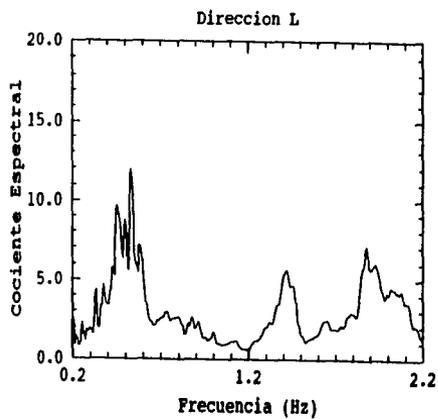
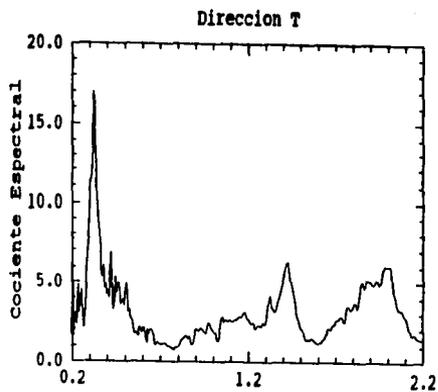


Figura 23. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida AE sobre la entrada S, del edificio Jalapa.

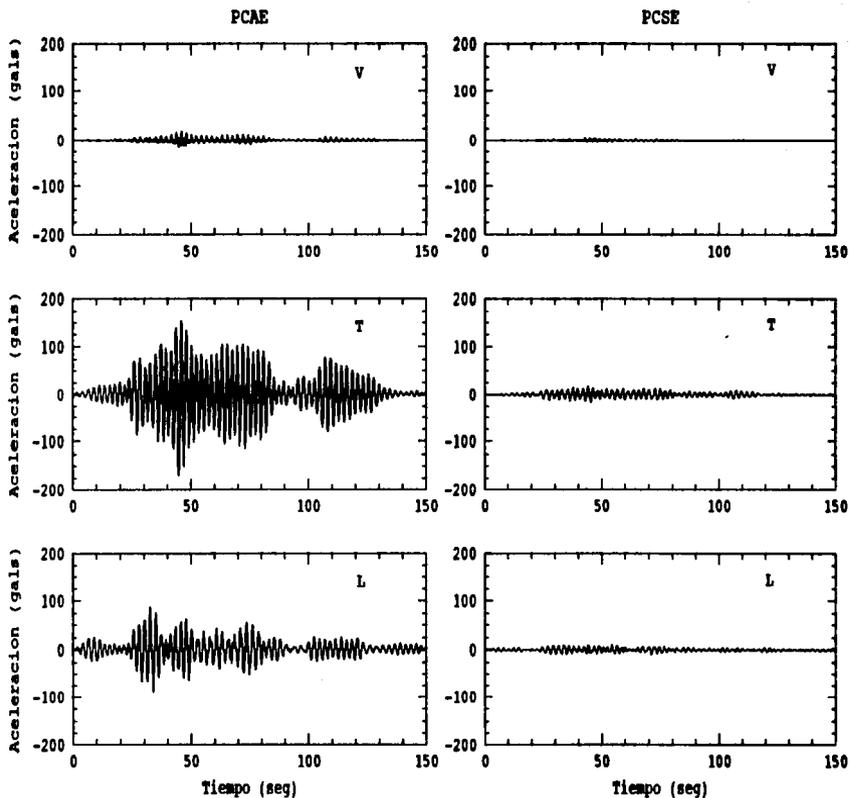


Figura 24. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos PCAE y PCSE localizados en el edificio Plaza Córdoba.

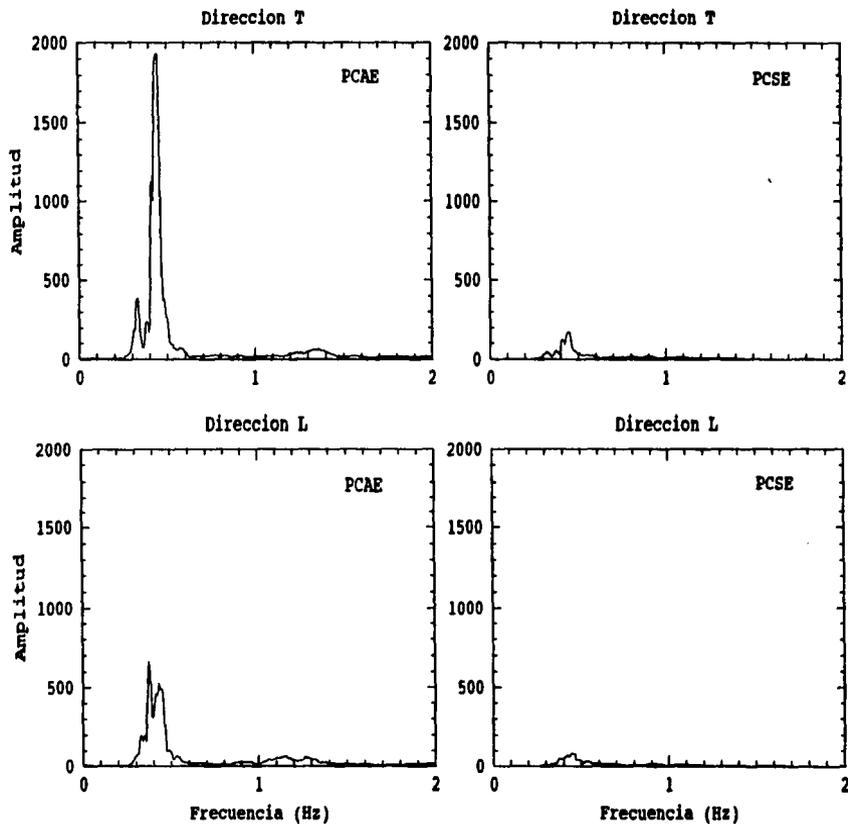


Figura 25. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos PCAE y PCSE localizados en el edificio Plaza Córdoba.

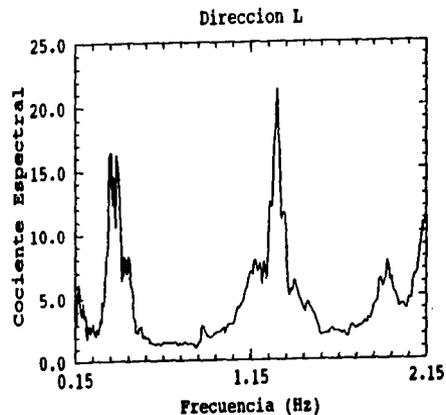
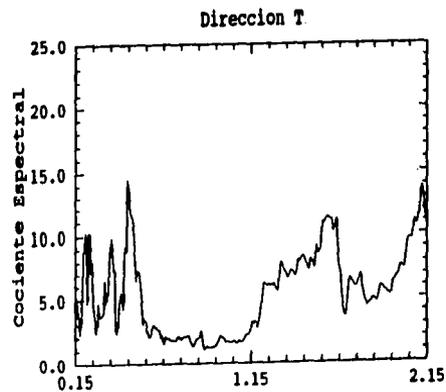


Figura 26. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida PCAE sobre la entrada PCSE, del edificio Plaza Córdoba.

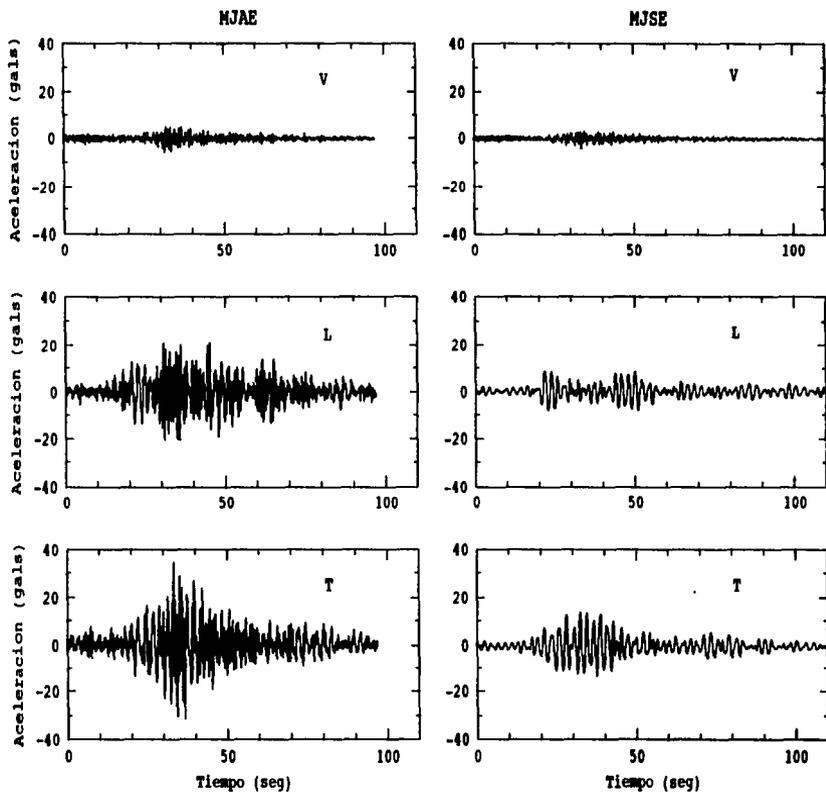


Figura 27. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos MJAE y MJSE localizados en el edificio Metro Juárez.

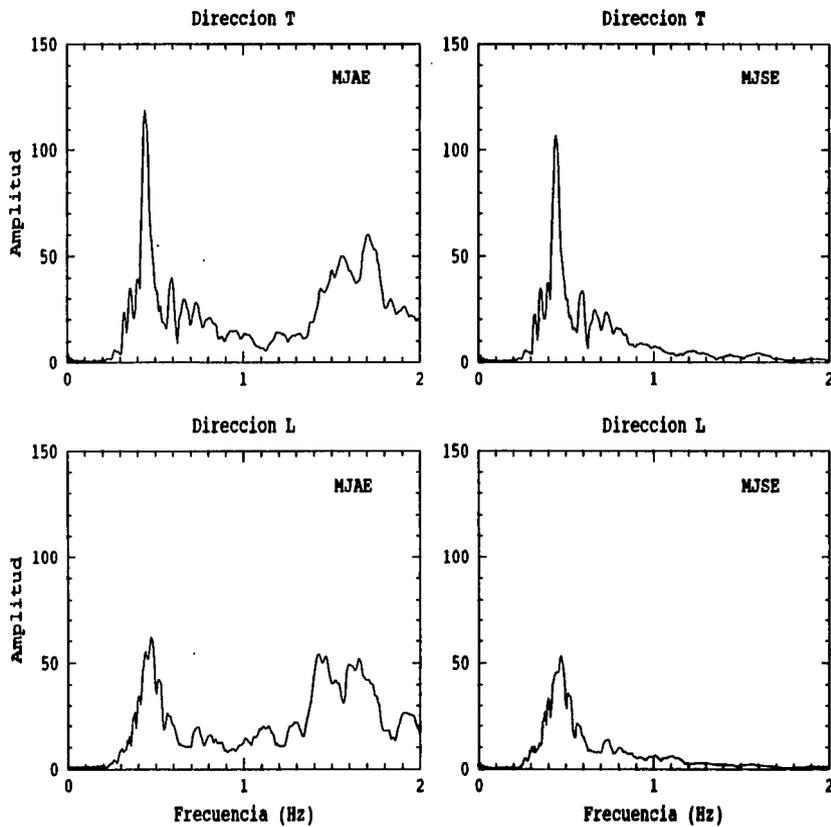


Figura 28. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos MJAE y MJSE localizados en el edificio Metro Juárez.

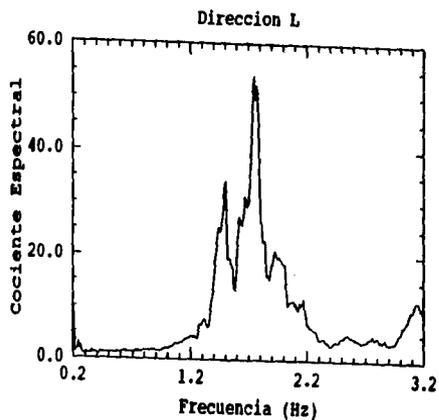
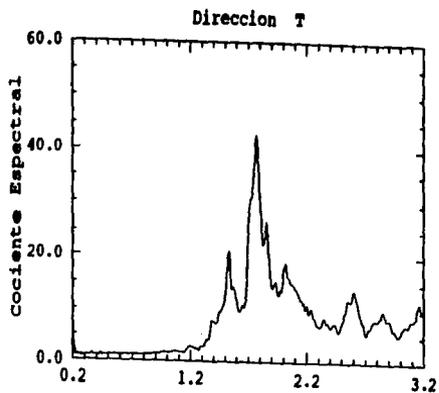


Figura 29. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida MJAE sobre la entrada MJSE, del edificio Metro Juárez.

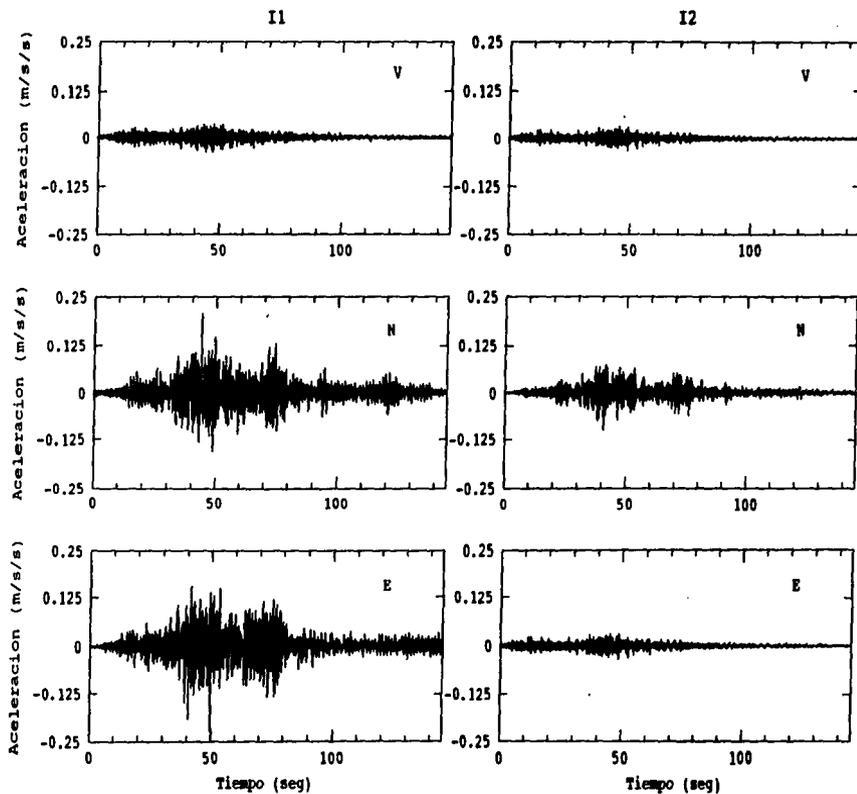


Figura 30. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos I1 e I2 localizados en el edificio Plaza Inn.

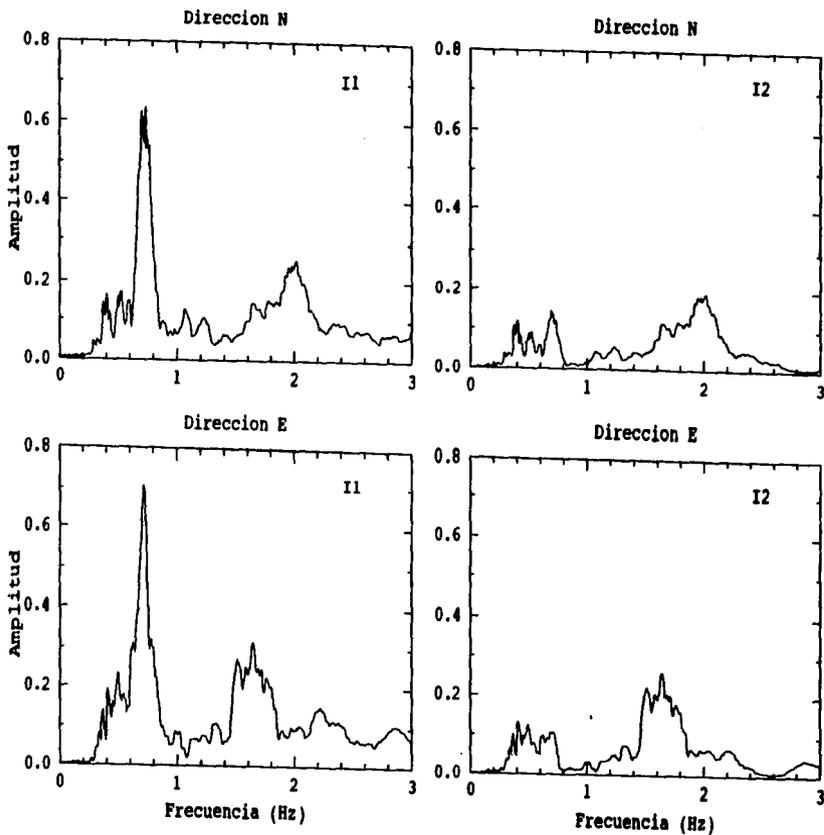


Figura 31. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos I1 e I2 localizados en el edificio Plaza Inn.

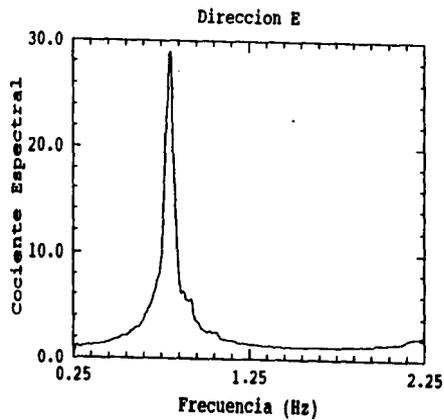
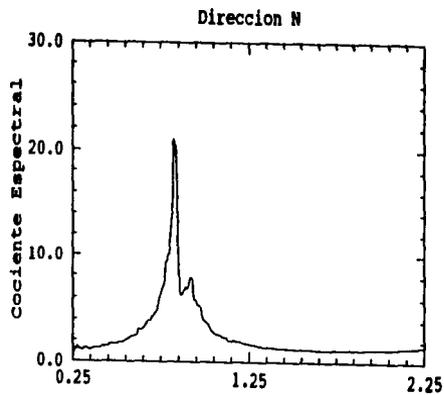


Figura 32. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida I1 sobre la entrada I2, del edificio Plaza Inn.

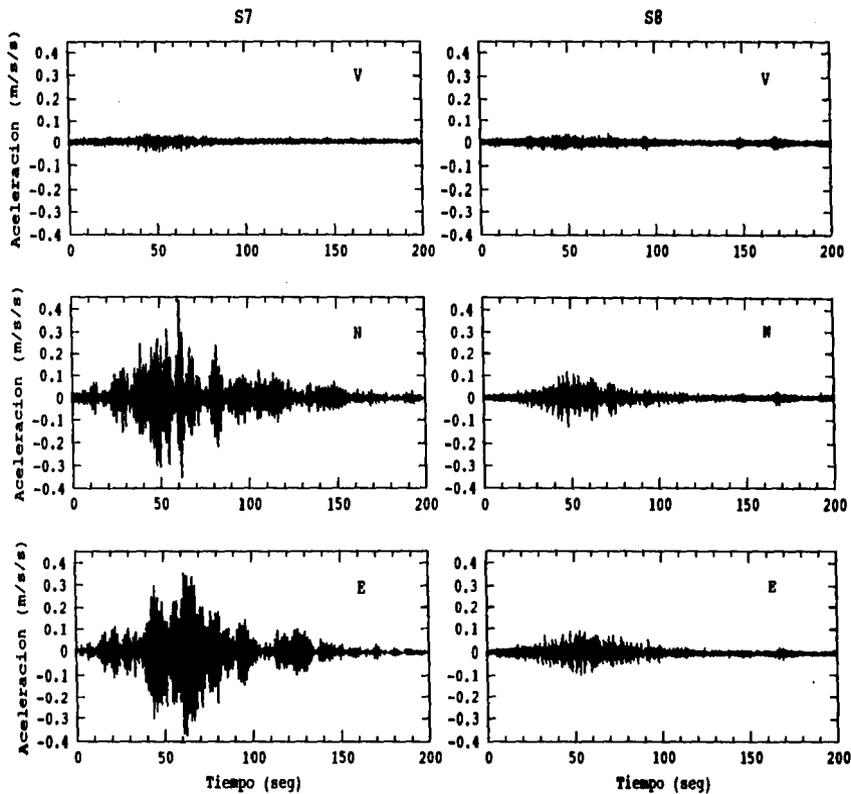


Figura 33. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos S7 y S8 localizados en el edificio del IMSS.

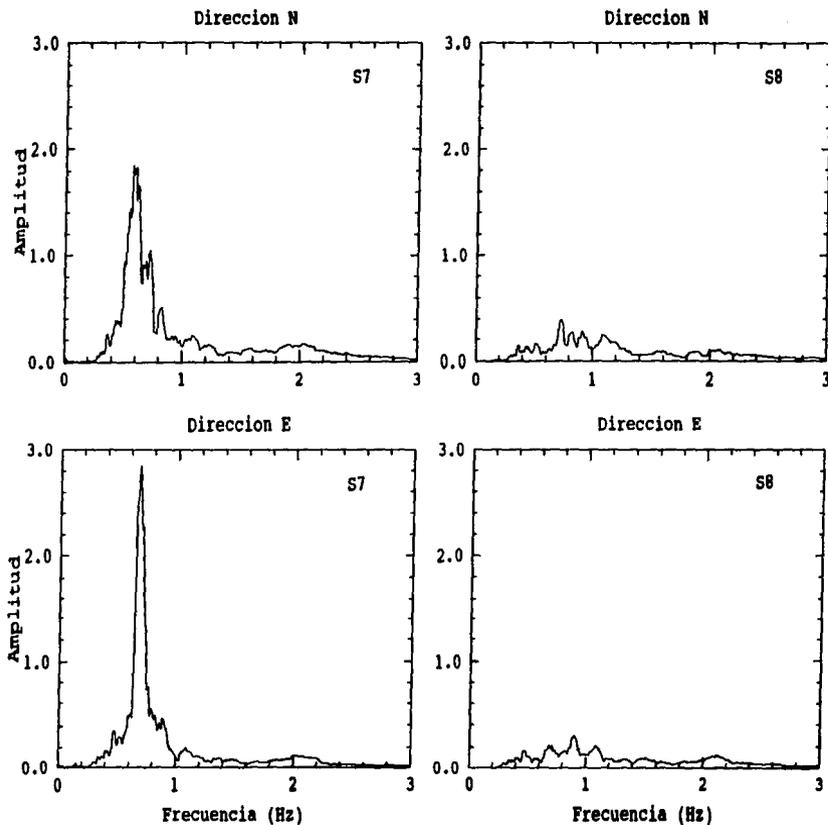


Figura 34. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos S7 y S8 localizados en el edificio del IMSS.

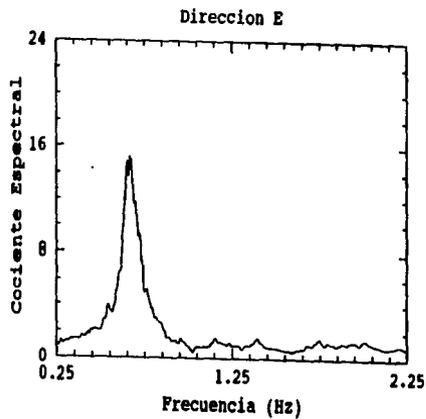
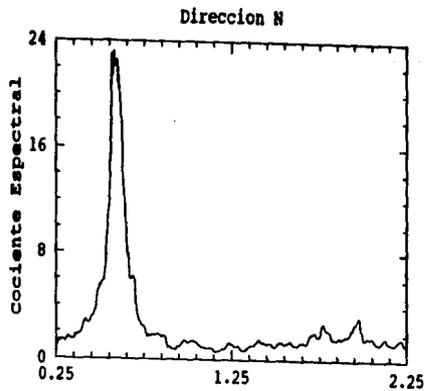


Figura 35. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida S7 sobre la entrada S8, del edificio del IMSS.

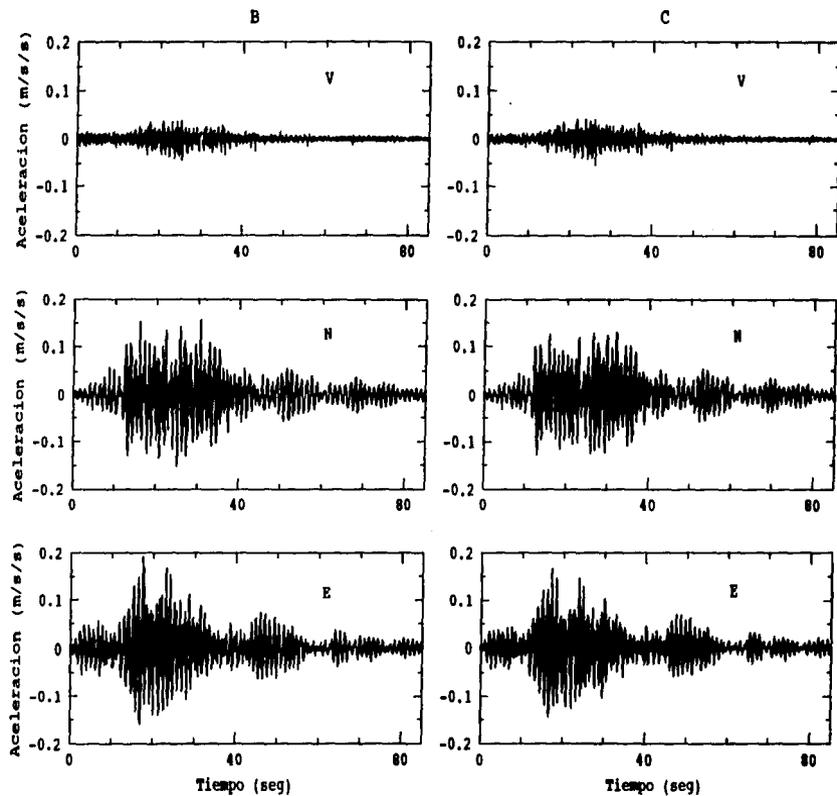


Figura 36. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos B y C localizados en el edificio Secundaria No.3.

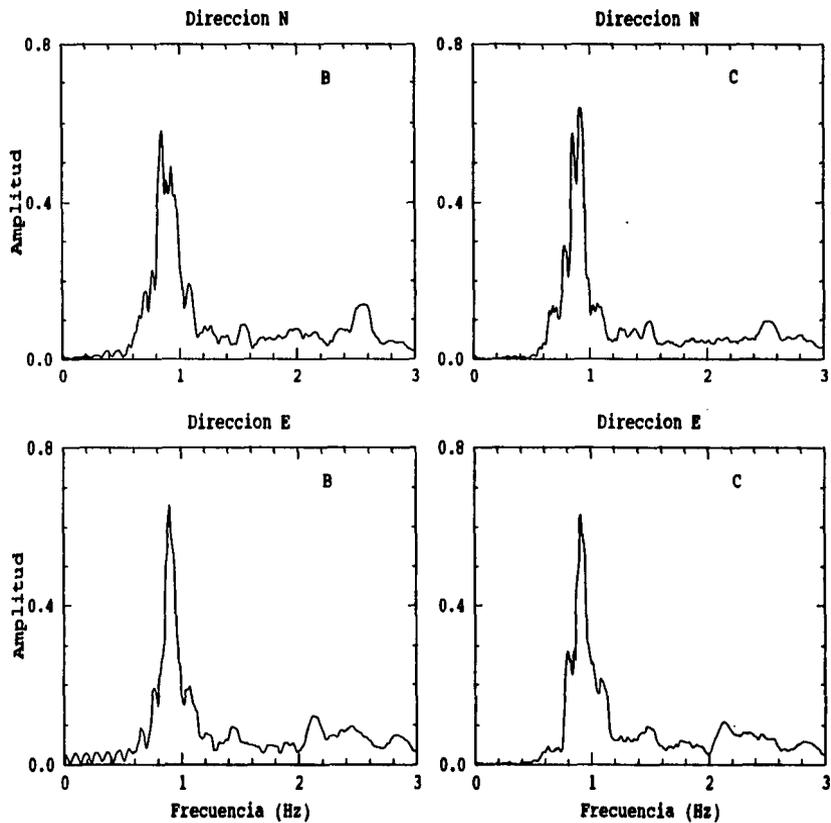


Figura 37. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 12/10/94 en los acelerógrafos B y C localizados en el edificio Secundaria No.3.

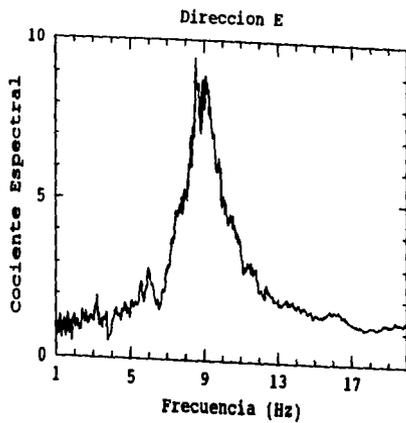
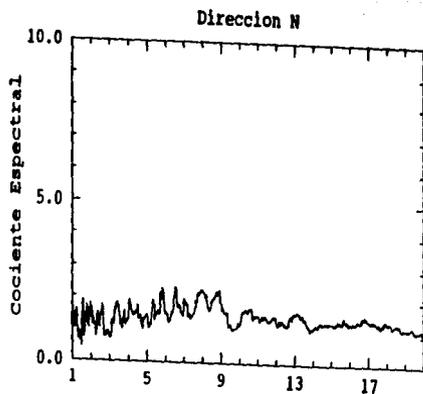


Figura 38. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida B sobre la entrada C, del edificio Secundaria No.3.

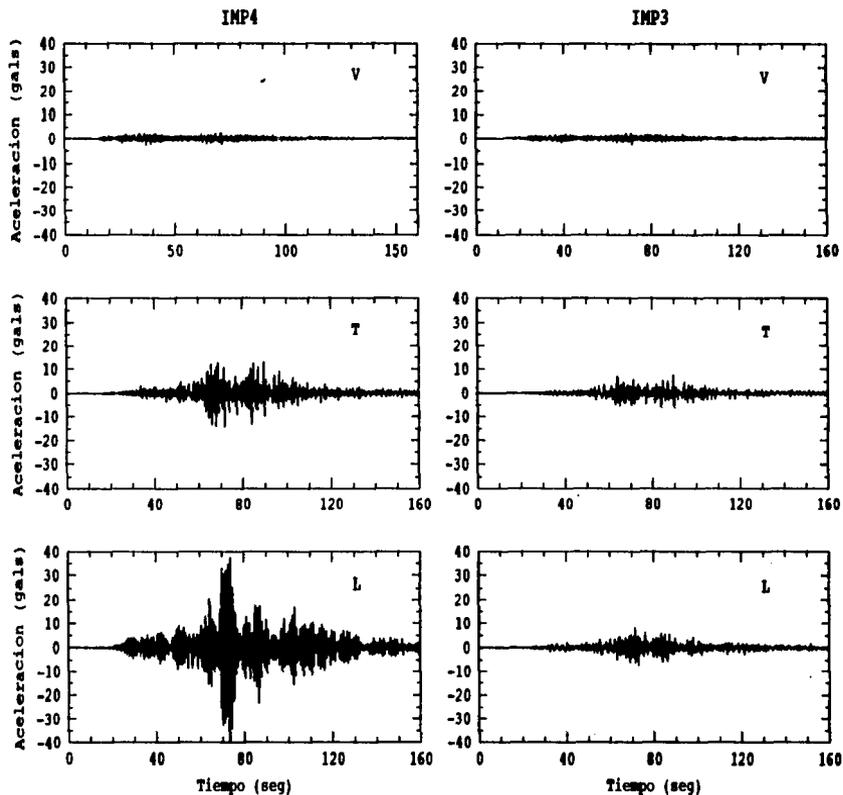


Figura 39. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos IMP4 y IMPS localizados en el edificio del IMP.

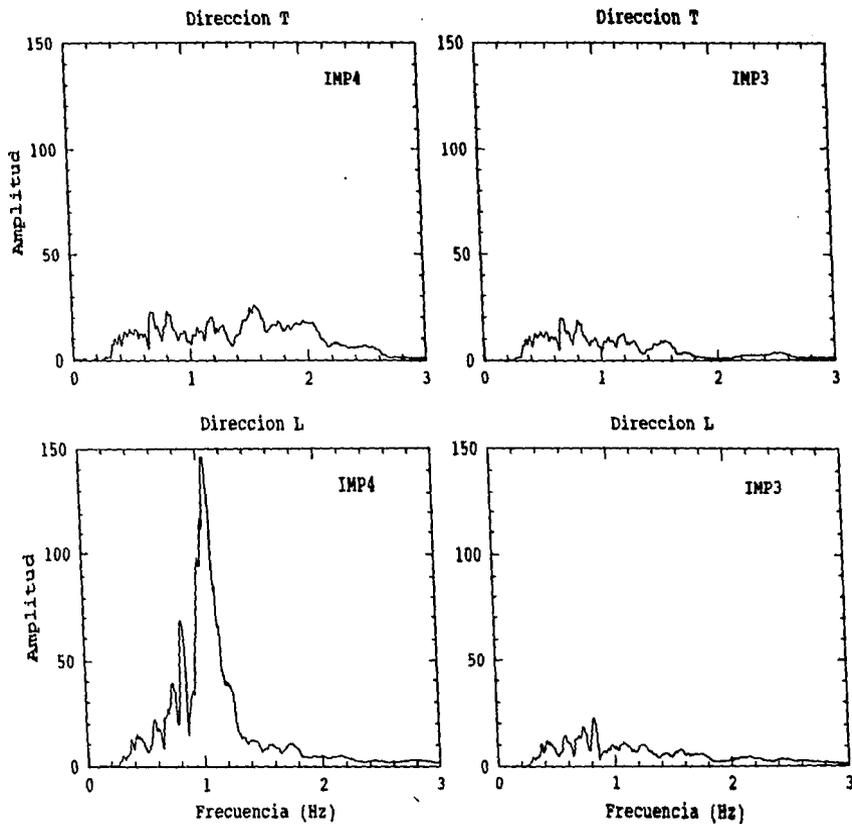


Figura 40. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos IMP4 y IMP3 localizados en el edificio del IMP.

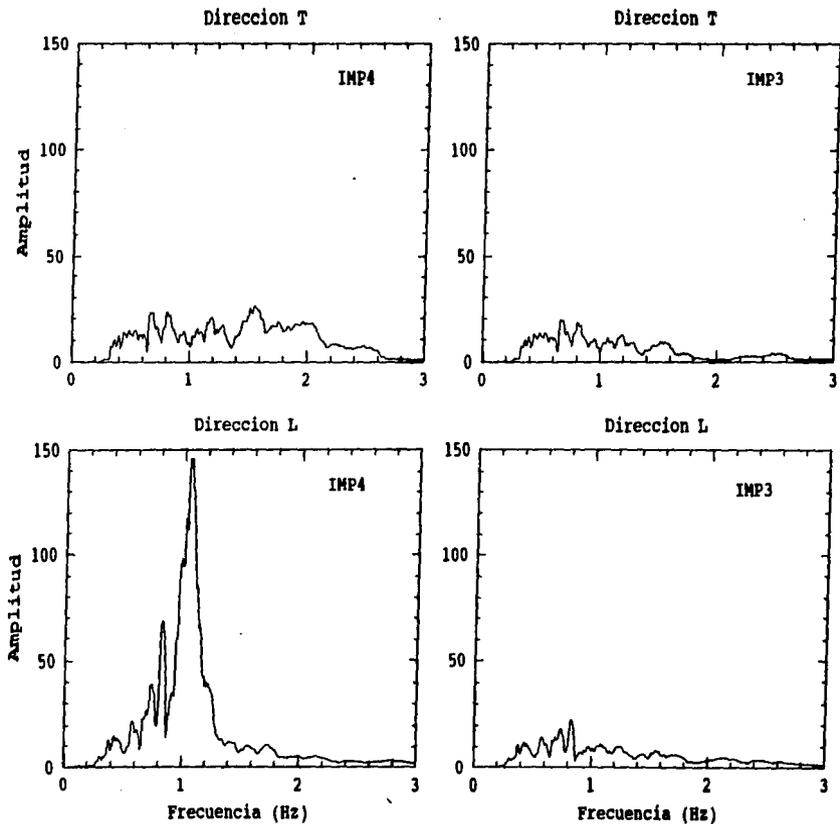


Figura 40. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 12/10/94 en los acelerógrafos IMP4 y IMP3 localizados en el edificio del IMP.

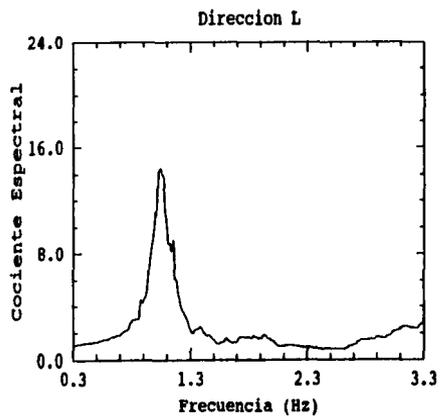
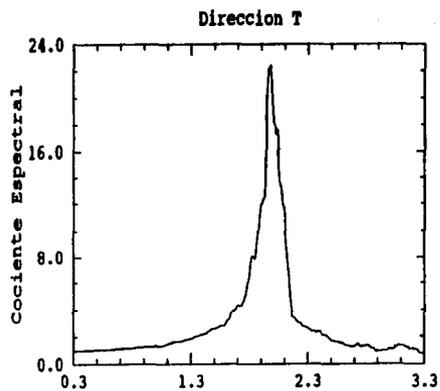


Figura 41. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida IMP4 sobre la entrada IMPS, del edificio Jalapa.

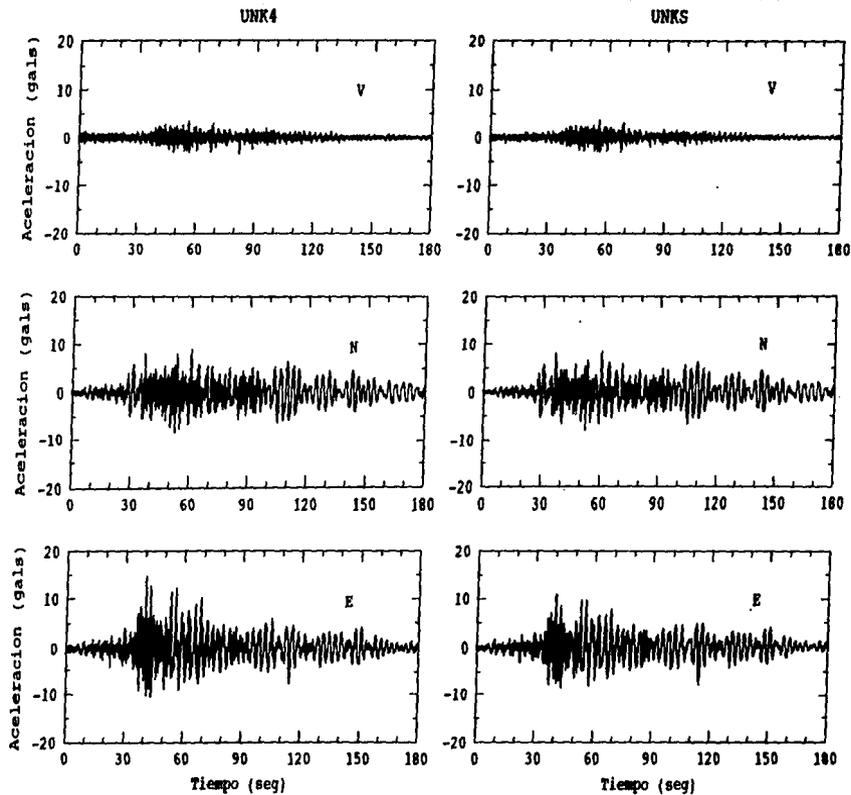


Figura 42. Componentes de los registros del temblor del 121094, correspondientes a los acelerógrafos UNK4 y UNKS localizados en el edificio Unidad Kennedy.

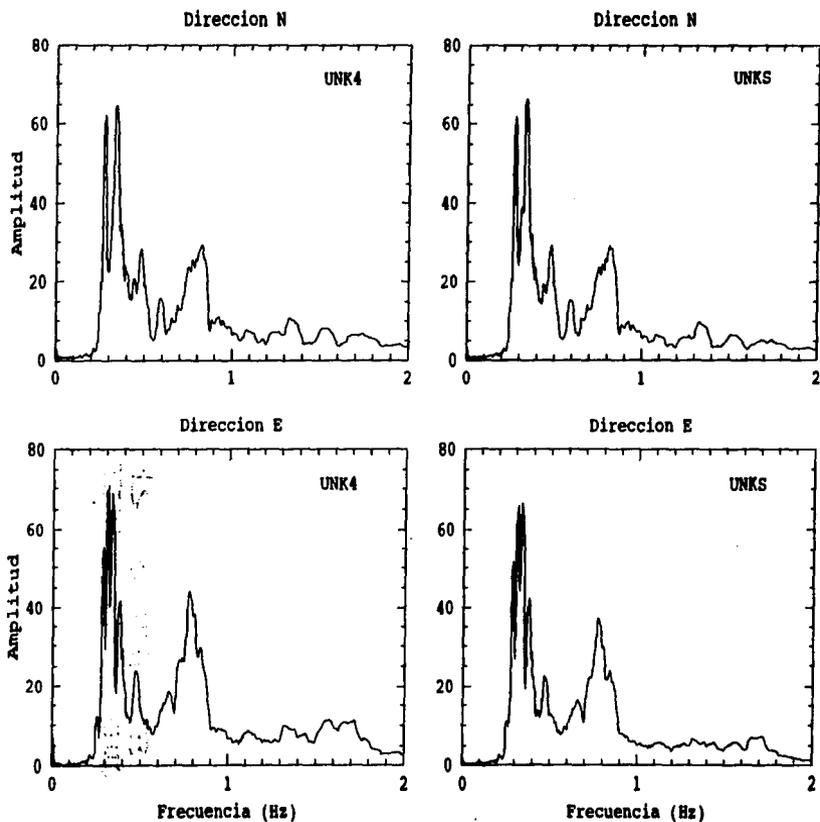


Figura 43. Espectros suavizados de las señales registradas durante el temblor del 121094 en los acelerógrafos UNK4 y UNKS localizados en el edificio Unidad Kennedy.

ESTO
SALIN DE LA BIBLIOTECA
TESIS NO BENE

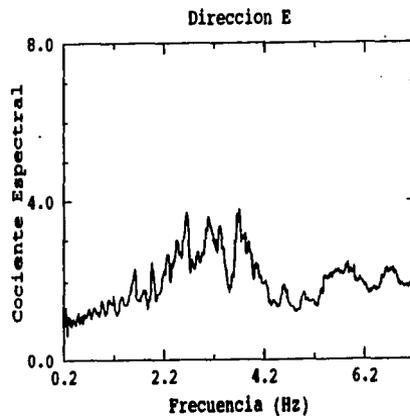
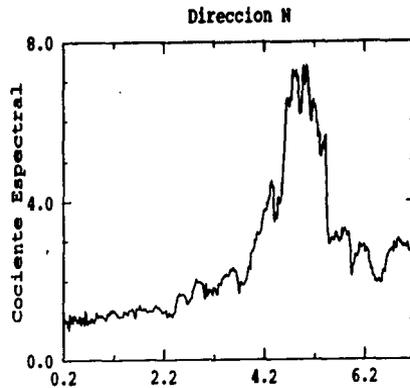


Figura 44. Funciones de transferencia obtenidas de los registros del temblor del 121094 correspondientes a la salida UNK4 sobre la entrada UNKS, del edificio Unidad Kennedy.

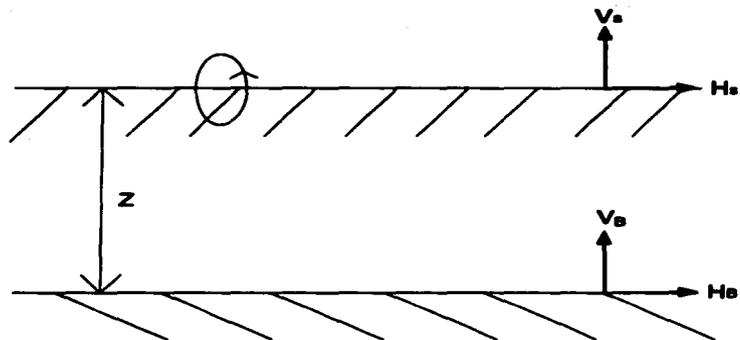


Figura 45. Modelo simplificado asumido por Nakamura (1989) para interpretar las mediciones de microtremores. (Adaptada de Lermo et al., 1992).

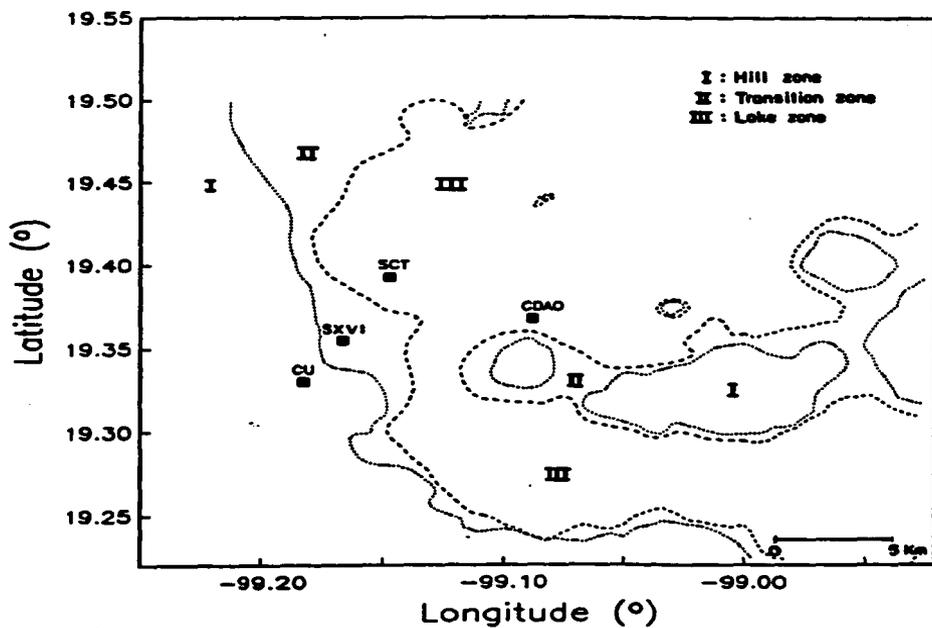


Figura 46. Distribución de estaciones en la ciudad de México, empleadas en el estudio de Lermo et al., 1992.

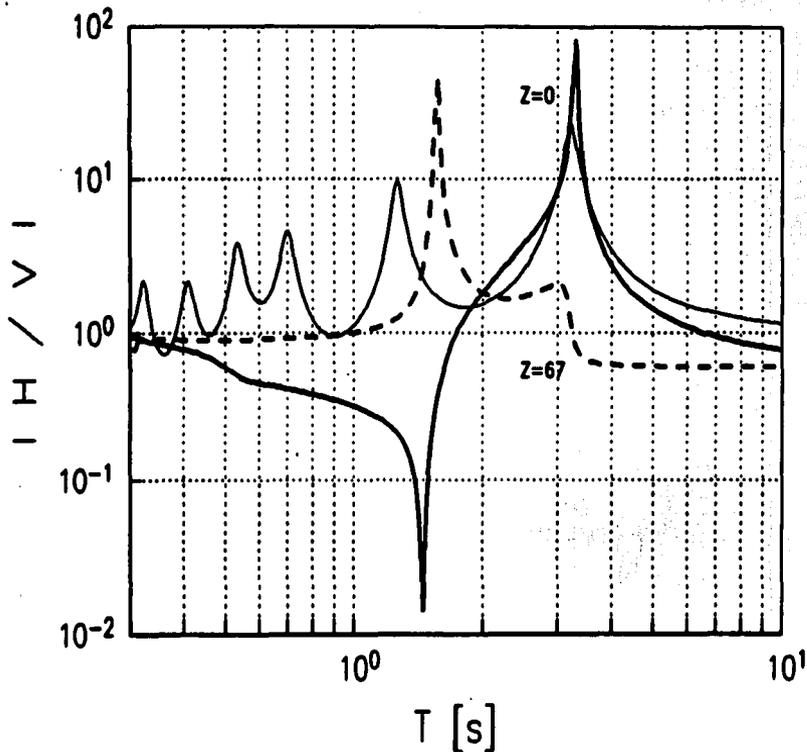


Figura 47. Resultado numérico para el sitio CDAO. La línea gruesa continua representa el cociente espectral en la componente horizontal sobre vertical en la superficie para el modo fundamental de Rayleigh. La línea delgada continua representa la función de transferencia de un modelo 1-D para incidencia vertical de una onda S. (Adaptada de Lermo et al., 1992).

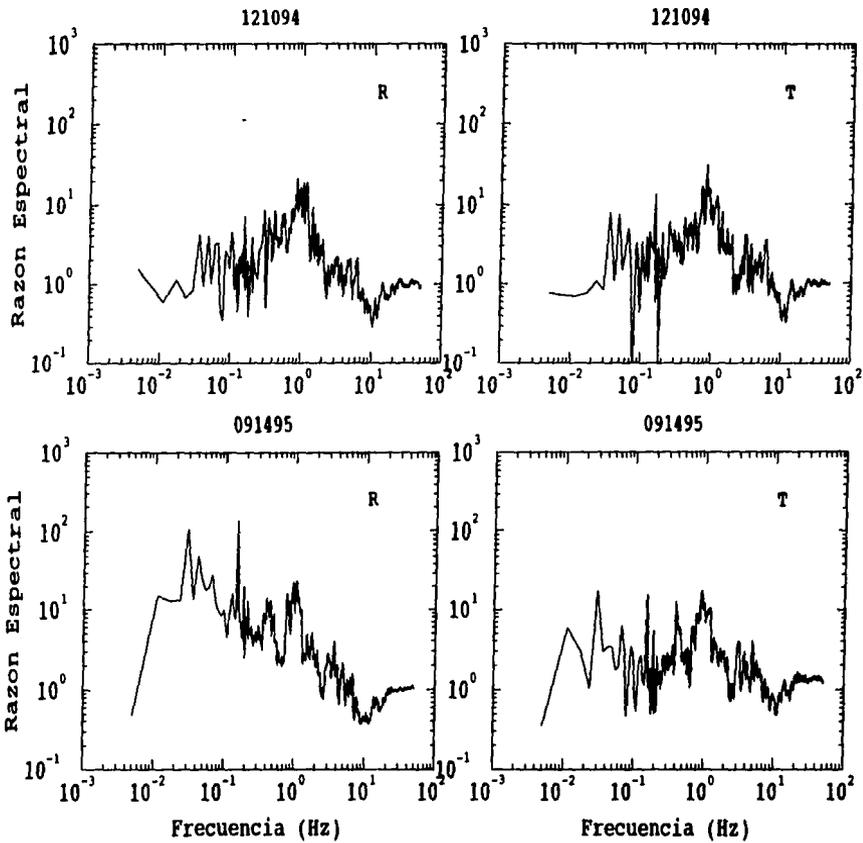


Figura 48. Cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical de los temblores del 121094 y 091495, correspondientes a la estación 62 ubicada cerca del edificio Metro Juárez.

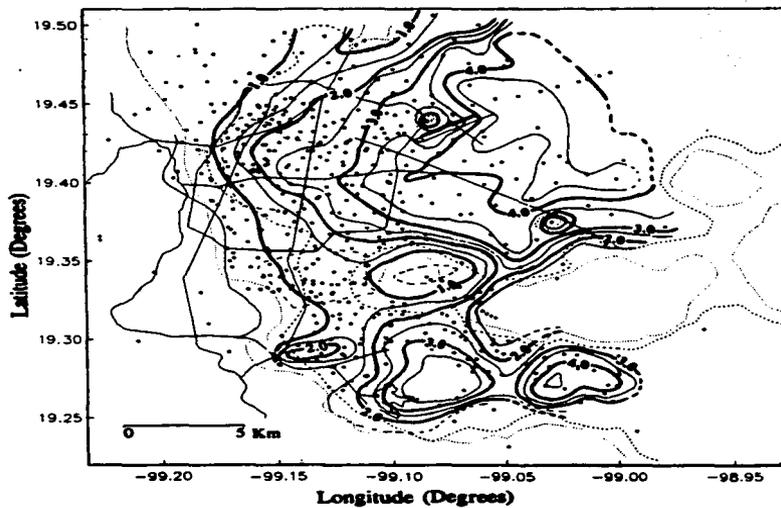


Figura 49. Mapa de isoperíodos de la Ciudad de México. (Adaptada de Lermo y Chávez-García, 1994).

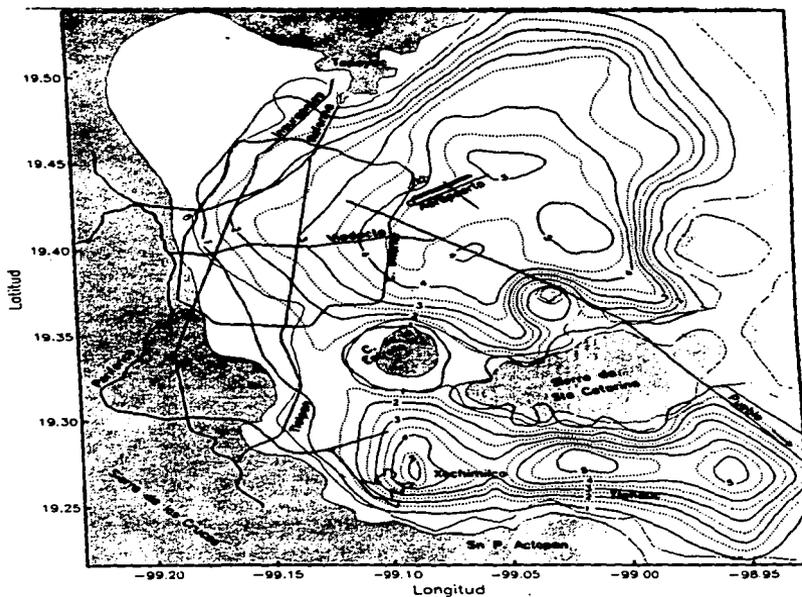


Figura 50. Mapa de isoperíodos de la Ciudad de México. (Adaptada de Flores, 1996).

Dirección T	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	AC	SC	0.31
	AE	SE	0.32
	AO	SO	0.34
	AC	S	0.32
	AE	S	0.32
	AO	S	0.322
Dirección L	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	AC	SC	0.44
	AE	SE	0.52
	AO	SO	0.49
	AC	S	0.52
	AE	S	0.52
	AO	S	0.44

Tabla 11. Frecuencias naturales de vibración del edificio Jalapa, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Dirección T	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	PCAE	PCSE	0.44
	PCAC	PCSC	0.35
Dirección L	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	PCAE	PCSE	0.34
	PCAC	PCSC	0.36

Tabla 12. Frecuencias naturales de vibración del edificio Plaza Córdoba, obtenidos mediante cocientes espectrales de los registros del temblor del 121094.

Dirección T	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	MJAE	MJSE	1.75
	MJAC	MJSE	1.75
Dirección L	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	MJAE	MJSE	1.76
	MJAC	MJSE	1.76

Tabla 13. Frecuencias naturales de vibración del edificio Metro Juárez, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Dirección N-S	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	I1	I2	0.82
	I1	I3	0.72
	I5	I4	0.62
Dirección E-W	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	I1	I2	0.8
	I1	I3	0.7
	I5	I4	0.58

Tabla 14. Frecuencias naturales de vibración del edificio Plaza Inn, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Salida	Entrada	Este trabajo N-S	CIRES (1996) N-S	Este Trabajo E-W	CIRES (1996) E-W
I1	I2	0.82	0.72	0.8	0.71
I5	I4	0.62	0.62	0.58	0.6

Tabla 15. Comparación de las frecuencias fundamentales de vibración del edificio Plaza Inn obtenidos con los registros del temblor del 121094 por parte de este estudio y el desarrollado por CIRES, 1996a.

Dirección N-S	Entrada	Salida	Frecuencia (Hz)
	S7	S8	0.66
	S6	S2	0.71
	S5	S1	0.71
Dirección E-W	Entrada	Salida	Frecuencia (Hz)
	S7	S2	0.57
	S6	S2	0.6
	S5	S1	0.59

Tabla 16. Frecuencias naturales de vibración del edificio del IMSS, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Dirección N-S	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	B	C	5 a 9
Dirección E-W	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	B	C	8.53

Tabla 17. Frecuencias naturales de vibración del edificio Secundaria No. 3, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Dirección T	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	IMP4	IMP3	1.97
	IMP4	IMPS	1.87
Dirección L	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	IMP4	IMP3	1.03
	IMP4	IMPS	0.99

Tabla 18. Frecuencias naturales de vibración del edificio del IMP, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

Dirección T	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	IMP4	IMP3	1.98
	IMP4	IMPS	1.88
Dirección L	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	IMP4	IMP3	1.01
	IMP4	IMPS	0.97

Tabla 19. Frecuencias naturales de vibración del edificio del IMP, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 091495.

Dirección E-W	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	UNK4	UNK3	2.67-3.96
	UNK4	UNKS	1.36-3.35
Dirección N-S	Salida	Entrada	Frecuencia (Hz)
	UNK4	UNK3	4.97
	UNK4	UNKS	4.82

Tabla 20. Frecuencias naturales de vibración del edificio Unidad Kennedy, obtenidos mediante cocientes espectrales, de los registros del temblor del 121094.

EDIFICIO	Frecuencia (Hz) Dirección T	Frecuencia (Hz) Dirección L
Jalapa	0.31-0.34	0.44-0.52
Plaza Córdoba	0.35-0.44	0.34-0.36
Metro Juárez	1.75	1.76
IMP	1.87-1.97	0.99-1.03
EDIFICIO	Frecuencia (Hz) Dirección N-S	Frecuencia (Hz) Dirección E-W
Plaza Inn	0.62-0.82	0.58-0.80
IMSS	0.66-0.71	0.57-0.60
Unidad Kennedy	4.82-4.97	1.36-3.96
Secundaria No. 3	5.0-9.0	8.53

Tabla 21. Frecuencias propias de vibrar de cada una de las ocho estructuras de este estudio.

EDIFICIO JALAPA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	Frecuencia de sitio (Hz)
	Dirección L 0.44-0.52	Dirección T 0.31-0.34	
S I S M O 1 2 1 0 9 4			
ESTACION	Dirección R	Dirección T	Frecuencia de sitio (Hz)
56	0.15,0.20,0.36,0.87	0.20,0.35,0.68,0.86	0.5
5	0.83	0.83	0.66
45	0.86	0.79	0.44
4	0.15,0.42,1.06	0.10,0.15,0.20,0.35,1.06	0.5
3	0.31,1.06	0.31,1.06	0.5
S I S M O 0 9 1 4 9 5			
ESTACION	Dirección R	Dirección T	Frecuencia de sitio (Hz)
56	0.15,0.18,0.46,0.80	0.18,0.46,0.81	0.5
45	0.15,0.40,0.83	0.42,0.83,1.30	0.44
4	0.15,0.40,1.14	0.15,0.40,1.12	0.5
3	0.46,1.12	0.15,0.46,1.14	0.5

Tabla 22. Frecuencias predominantes de los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical, calculado para las señales obtenidas de los temblores del 121094 y 091495 en las estaciones de "campo libre" cerca del edificio Jalapa.

EDIFICIO PLAZA CORDOBA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	Frecuencia de sitio (Hz)
	Dirección L 0.34-0.36	Dirección T 0.35-0.44	
S I S M O 1 2 1 0 9 4			
ESTACION	Dirección R	Dirección T	Frecuencia de sitio (Hz)
45	0.17,0.86	0.12,0.79	0.44
56	0.15,0.20,0.36,0.68,0.87	0.15,0.20,0.35,0.68,0.86	0.5
4	0.15,0.42,1.06	0.15,0.20,0.35,1.06	0.5
3	0.16,0.31,1.06	0.14,0.31,1.06	0.5
6	0.12,0.17,0.48,0.69	0.12,0.17,0.32,0.58,0.69	0.4
5	0.83,1.34,1.68	0.83,1.05,1.68	0.57
S I S M O 0 9 1 4 9 5			
ESTACION	Dirección R	Dirección T	Frecuencia de sitio (Hz)
45	0.15,0.42,0.85	0.42,0.85,1.30	0.44
56	0.15,0.46,0.80	0.18,0.46,0.92	0.5
4	0.15,0.40,0.97	0.15,0.40,1.14	0.5
3	0.39,1.14	0.46,1.12	0.5
1	0.15,0.40,1.00	0.15,0.45,1.13	0.5

Tabla 23. Frecuencias predominantes de los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical, calculado para las señales obtenidas de los temblores del 121094 y 091495 en las estaciones de "campo libre" cerca a el edificio Plaza Córdoba.

EDIFICIO METRO JUAREZ	FRECUENCIA (Hz) Direccion L 1.76	FRECUENCIA (Hz) Direccion T 1.75	Frecuencia de sitio (Hz) 0.57
S I S M O 1 2 1 0 9 4			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
62	0.15,0.29,0.85,1.17	0.15,0.25,0.85	0.5
45	0.12,0.86	0.17,0.49,0.86	0.44
55	0.16,0.42,0.55,0.92,1.85	0.16,0.20,0.90,1.18,1.85	0.66
S I S M O 0 9 1 4 9 5			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
1	0.45,1.00	0.15,0.40,1.14	0.5
62	0.15,0.39,1.04	0.14,0.39,0.92	0.5
45	0.42,0.85	0.42,0.85	0.44
55	0.98	0.98	0.66

Tabla 24. Frecuencias predominantes de los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical, calculado para las señales obtenidas de los temblores del 121094 y 091495 en las estaciones de "campo libre" cerca a el edificio Metro Juárez.

EDIFICIO ESCUELA SE No. 3	FRECUENCIA (Hz) Direccion L 5-9	FRECUENCIA (Hz) Direccion T 8.53	Frecuencia de sitio (Hz) 0.5
S I S M O 1 2 1 0 9 4			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
56	0.12,0.20,0.35,0.68,0.87	0.15,0.36,0.88	0.5
5	0.83	0.83	0.66
45	0.12,0.79	0.17,0.86	0.44
4	0.15,0.20,0.35,1.06	0.15,0.42,1.06	0.5
3	0.14,0.31,1.06	0.14,0.31,1.06	0.5
S I S M O 0 9 1 4 9 5			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
56	0.18,0.40,0.92	0.18,0.46,0.80	0.5
45	0.42,0.85,1.30	0.15,0.42,0.85	0.44
4	0.15,0.40,1.12	0.15,0.40,1.14	0.5
3	0.46,1.12	0.15,0.41,1.14	0.5

Tabla 25. Frecuencias predominantes de los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical, calculado para las señales obtenidas de los temblores del 121094 y 091495 en las estaciones de "campo libre" cerca a el edificio Secundaria No. 3.

EDIFICIO UNIDAD KENNEDY	FRECUENCIA (Hz) Direccion N-S 4.82 - 4.97	FRECUENCIA (Hz) Direccion E-W 2.67 - 3.96	Frecuencia de sitio (Hz) 0.33
S I S M O 1 2 1 0 9 4			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
59	0.12,0.16,0.32,1.34,3.63,5.05	0.10,0.16,0.42,0.32,1.90,3.26	0.36
42	0.20,0.49,0.69,0.85,2.93,4.69	0.39,0.49,0.95,2.93,4.81,6.79	0.26
S I S M O 0 9 1 4 9 5			
ESTACION	Direccion R	Direccion T	Frecuencia de sitio (Hz)
59	0.44,0.62	0.44,0.62	0.36
42	0.15,0.47	0.15,0.47	0.26

Tabla 26. Frecuencias predominantes de los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre vertical, calculado para las señales obtenidas de los temblores del 121094 y 091495 en las estaciones de "campo libre" cerca a el edificio Unidad Kennedy.

EDIFICIO	ESTACION	DISTANCIA (Km)
Jalapa	56	0.16
	5	0.85
	45	1.23
	4	1.49
	3	1.5
Plaza Córdoba	45	0.62
	56	1.01
	4	1.35
	3	1.36
	6	1.63
	5	1.7
	1	1.81
Metro Juárez	1	0.71
	62	1.11
	45	1.64
	55	1.72
Secundaria No.3	56	0.26
	5	0.79
	45	1.35
	4	1.58
	3	1.59
Unidad Kennedy	59	1.13
	42	1.93
Plaza Inn	40	1.97

Tabla 27. Distancia de cada una de las estaciones de "campo libre" localizadas cerca a los edificios de este estudio, que registraron durante los temblores del 121094 y 091495.

ANÁLISIS EN EL TIEMPO

Al hacer el análisis en el dominio de la frecuencia de los registros correspondientes a los temblores del 10 de diciembre de 1994 (121094) y 14 de septiembre de 1995 (091495), se observó, principalmente para los edificios Plaza Córdoba y Jalapa, que el movimiento de los edificios ante estas dos excitaciones, generaba en los registros de “campo libre” cercanos picos en el espectro de amplitudes cuya frecuencia coincidía con la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura. Esto sugiere la posible influencia de los edificios en el movimiento del suelo cercano a él. Ahora se propone un análisis en el dominio del tiempo, con el fin de ratificar las observaciones hechas a estas dos estructuras.

El objetivo de este capítulo es identificar trenes de onda que se propagan desde la estructura hacia las estaciones de “campo libre” analizando los registros correspondientes al temblor del 091495. Se escogió este evento por ser de mayor magnitud que el evento del 121094, por lo cual era más fácil identificar un pulso común en todos los registros. Al iniciar el procesamiento de los registros observamos que estos no contaban con un tiempo común. Sin embargo, en trabajos anteriores se ha mostrado que es posible alinearlos basándose en la identificación del modo fundamental de ondas Rayleigh propagándose desde el epicentro. En este trabajo utilizaremos los procedimientos para agregar a los registros de “campo libre” del evento del 091495 que ya fueron alineados por Romero-Jiménez, (comunicación personal), los registros obtenidos en la planta baja ó sótano de los edificios estudiados.

Una vez que tengamos los registros de planta baja ó sótano con la misma base de tiempo que los registros de “campo libre” de Romero-Jiménez (comunicación personal) se procederá a analizarlos. Para ello se rotarán en la dirección epicentral y del edificio, y se filtrarán en bandas de frecuencias que contengan o no, la frecuencia fundamental de cada uno de los edificios, con el fin de identificar direcciones de propagación y la posible aparición de trenes de onda en los registros de “campo libre”, que sean generados por la vibración de la estructura. Todo este desarrollo se hace solo para los edificios Plaza Córdoba y Jalapa, debido a que es en ellos donde la posibilidades de éxito son mayores.

4.1 Asignación de una base de tiempo común

Para poder establecer alguna relación entre los registros de los edificios y los de “campo libre”, es necesario que cuenten con un tiempo común. Desafortunadamente los datos registrados en la RAVM durante el temblor 091495, no cuenta con una base de tiempo común. Este problema se ha intentado solucionar de diferentes formas. Sánchez-Sesma et al. (1993) recurrieron a el alineamiento de un pulso de desplazamiento observado en la componente vertical del temblor del 25 de abril de 1989 (250489). Su análisis partió de la

supuesta existencia de un tiempo común para 5 estaciones de la red. Esta suposición los condujo a obtener para el pulso fundamental de ondas de Rayleigh una velocidad de grupo (1.6 km/s para los desplazamientos, en la banda de periodos superior a 5 s) muy baja en comparación a los valores para trayectos continentales. Chávez-García y Romero-Jiménez (1996) asignaron una base de tiempo común a los acelerogramas del temblor 250489, al imponer una velocidad de fase al modo fundamental de ondas de Rayleigh (3.17 km/s en una banda de periodos de 7 a 10 s) identificado claramente en casi todas las estaciones.

De igual forma, Romero-Jiménez (comunicación personal) realizó el análisis de los registros de aceleración del temblor 091495, filtrados en 2 intervalos de periodos: 8 y 12 s y 4 y 8 s. En el intervalo de 8 a 12 s, resolvió el problema del tiempo común de las trazas, debido a que para periodos largos, la energía registrada en el valle de México, a distancias grandes del epicentro, viaja preferentemente en el modo fundamental de ondas de Rayleigh, R_0 , el cual presenta una alta coherencia en todas las estaciones. En cambio para bandas de periodos más cortos, no existe una buena coherencia en los registros y resulta difícil identificar trenes de onda comunes entre los diferentes acelerogramas. Al filtrar los registros entre 8 y 12 s se identificaron 4 pulsos (formas de onda) comunes entre los registros para las componente vertical y radial. De estos cuatro pulsos, el primero se identificó en todas las estaciones sin importar su ubicación, destacándose de los otros pulsos por su amplitud y duración. La propagación de este pulso se observa en los componentes vertical y radial por lo que se asoció al modo fundamental de ondas Rayleigh. Para este modo, modelos corticales promedio entre la costa del Pacífico y el Distrito Federal proporcionan una velocidad de fase de 3.2 km. Al imponer esta velocidad, se impone una base de tiempo común a los acelerogramas.

Teniendo un tiempo común en los registros de "campo libre" de la RAVM para el temblor 091495, se incorporaron los registros de aceleración de los edificios siguiendo el mismo procedimiento. Para ello se seleccionó para cada edificio un registro de aceleración que representara el movimiento de la base (preferiblemente el de planta baja o en su defecto el de sótano) (tabla 28). El análisis de estos registros se realizó en las direcciones vertical, radial y transversal al epicentro. La dirección epicentral se calculó con el programa Range (Herrmann, 1987). Se utilizaron las coordenadas geográficas del epicentro y de la estación CU (19.33° N; 99.183° W), obteniéndose un rumbo de N12°W y una distancia epicentral de 287.92 Km.

4.1.1 Corrección de tiempo para los registros de los edificios

La corrección de tiempo que se hizo a los registros de los edificios se basó en aplicar el retraso de tiempo que le correspondía a cada registro de acuerdo a su ubicación con respecto a la estación CU, la cual fue tomada como referencia. Para esto se seleccionaron los componentes verticales de los registros de la base ó sótano de cada estructura. Se eligió alinear primero la componente vertical, ya que el movimiento vertical es poco afectado por las condiciones locales (Sánchez-Sesma et al., 1993). Los registros verticales se filtraron con un filtro pasa bandas entre 8 y 12 s. En los registros filtrados se identificó un pulso común (figura 51), el cual se alineó primero por envolvente (figura 52) y luego por fase

(figura 53). La alta coherencia del pulso alineado que se observa en la figura 53 se obtuvo al cambiar la polaridad en algunas de las trazas originales.

Para incluir el retraso debido a la distancia y velocidad de propagación del movimiento sísmico, entre el epicentro y cada una de las estaciones de registro se impuso la velocidad de fase teórica leída en las curvas de dispersión, obtenidas a partir del modelo de Campillo et al. (1989) (tabla 29). En las figuras 54 y 55 se observan las curvas de velocidad de grupo y fase para las ondas de Love y de Rayleigh respectivamente, obtenidas del modelo de Campillo et al. (1989). En este trabajo se calculó el retraso del modo fundamental de ondas de Rayleigh (R_0) a 8.8 s de período en función de la distancia epicentral a cada estación imponiendo el valor de la velocidad de fase de 3.2 km/s para esa onda.

El perfil tiempo-distancia obtenido, al tomar como referencia a la estación CU se muestra en la figura 56. A cada traza se le aplicó un retraso de tiempo igual a su distancia a la estación CU, medida en la dirección epicentral, dividida por la velocidad de propagación supuesta (3.2 km/s). La tabla 30 muestra la distancia de cada edificio a la estación CU, además el retraso de tiempo que se le aplicó a las trazas de los edificios.

Además de filtrar los registros del componente vertical entre 8 y 12 s, se obtuvieron los desplazamientos (integrando dos veces los registros de aceleración) para verificar el alineamiento obtenido por el análisis de las señales filtradas. En la figura 57 se ilustra el perfil tiempo-distancia en dirección epicentral de los desplazamientos del componente vertical. Al comparar las figuras 56 y 57 se ve el alineamiento coherente de un pulso en las señales filtradas y en los desplazamientos.

Teniendo como base el alineamiento de los registros del componente vertical se alinearon los componentes horizontales. La única diferencia que se presenta es que los componentes horizontales, fueron rotadas en la dirección radial y transversal del epicentro. Dentro del intervalo de tiempo de 60 a 120 s de la componente radial se observa un pulso común (figura 58), el cual presenta una buena coherencia con el pulso de la componente vertical. Para lograr esto se tuvieron que hacer algunos cambios de signo. En la componente transversal (figura 59) también se observó una buena coherencia del primer pulso en todos los registros, después de cambiar la polaridad de algunas de las trazas originales. Cabe anotar que estos cambios se conservaron durante todo el estudio. La componente transversal sugiere que el modo fundamental de las ondas Love fue excitado.

Contando con una base de tiempo común a los registros de los edificios y los de "campo libre", se procedió a filtrarlos en distintas bandas de frecuencias con el fin de identificar trenes de onda comunes.

Resulta evidente que un mal alineamiento puede modificar los resultados. Si se supone una velocidad de propagación errada, naturalmente el tiempo absoluto asignado a los registros no será correcto y resultará imposible reconocer trenes de onda comunes. Por ello se tuvo especial cuidado en la suposición de una velocidad de propagación la cual estuviera acorde para trayectos continentales. De igual forma el análisis partió de los registros verticales los

cuales sufren menor influencia de las condiciones locales y se comprobó el alineamiento de las señales filtradas con los desplazamientos.

4.2 Identificación de trenes de onda comunes

Una forma de establecer que la vibración de una estructura está afectando los movimientos del suelo cercano es observar en los registros de "campo libre" trenes de onda propagándose desde el edificio. Estos trenes de onda deben ser más claros cuando los registros de "campo libre" sean filtrados en el rango de vibración de la estructura. El razonamiento anterior se aplicó a los registros de los edificios Plaza Córdoba y Jalapa. El análisis se hizo por separado en la componente radial y transversal con el fin de determinar, en el caso de que existiese, en que dirección era más evidente la influencia de la estructura.

4.2.1 Análisis para el edificio Plaza Córdoba

El primer paso fue seleccionar las estaciones de "campo libre" cercanas al edificio Plaza Córdoba que registraron el temblor 091495 (estaciones RM, 45, 56, 03, 04 y 01). Una vez identificadas estas estaciones sus registros se rotaron en la dirección radial y transversal al epicentro, y se filtraron en una banda de frecuencia (0.3-0.5 Hz) que contenía la frecuencia de vibrar de la estructura (0.35-0.44). Una forma de facilitar el análisis es hacerlo en forma separada para las direcciones radial y transversal al epicentro.

Antes de continuar con el análisis nos detendremos un poco para especificar que tipo de filtro empleamos en el procesamiento de estas señales. Se utilizó un filtro pasa-bandas de Butterworth de orden 1 y fase cero. El orden del filtro representa la pendiente del mismo. Al emplear el mínimo valor disponible estamos minimizando las oscilaciones (fenómeno de Gibbs). El que la señal sea filtrada con fase cero garantiza que el valor máximo presente en el rango de frecuencias en las que estoy filtrando esté al mismo tiempo que en la señal original.

4.2.1.1 Análisis en la dirección radial al epicentro

En la figura 60 se identificaron 2 pulsos semejantes (señalados como 1 y 2) en el edificio y en la estación 56. Se procedió a filtrar los registros en el rango estricto de vibración de la estructura (0.35-0.44 Hz) (figura 61) y se observó que el pulso que anteriormente se había identificado como (1) desapareció. El pulso identificado como (2) permaneció en la estación (56) y se hizo notorio en la estación RM. Seguidamente fueron filtrados todos los registros (edificio y estaciones cercanas) en bandas de frecuencias que se encontraban fuera del rango de vibración de la estructura, por encima (0.6-0.8 Hz) (figura 62) y por debajo (0.1-0.25 Hz) (figura 63). En estos rangos de frecuencia no se observaron ninguno de los dos pulsos identificados anteriormente (pulso 1 y 2). Por último se seleccionaron solo los registros filtrados en el rango de la frecuencia propia de vibrar de la estructura (0.35-0.44 Hz) (figura 64) donde se apreciaba bien el pulso 2, para centrar nuestro estudio en él.

Después de identificar un pulso común entre el edificio y las estaciones RM y 56, intentamos comprobar que efectivamente éste se generó por la vibración de la estructura. Dos formas de comprobar que nuestra hipótesis es cierta es calculando las velocidades de grupo de estos pulsos; las cuales deben estar dentro de los rangos de velocidades, obtenidas de un modelo representativo del sitio. De igual forma el movimiento de partícula en el plano horizontal de estos dos pulsos debe coincidir con el movimiento del pulso observado en el edificio.

Observemos los pulsos 2a, 2b y 2c (figura 64). A simple vista resulta evidente que los tres son muy parecidos. Se intentó calcular una dirección y velocidad de propagación del pulso común, pero desafortunadamente no se pudo ya que solo se contaba con 2 estaciones de "campo libre" cercanas (RM y 56). Debido a esto se calcularon las velocidades de grupo de los pulsos 2b y 2c, obteniéndose una velocidad de 19.5 m/s y 28.8 m/s respectivamente. Estas velocidades se compararon con las curvas de velocidad de grupo y de fase para las ondas de Rayleigh y de Love (figuras 65 y 66), obtenidas de un modelo de velocidades de ondas S propuesto por Ovando et al. (1993) para el sitio del edificio Jalapa (tabla 31), localizado aproximadamente a 1 km del edificio Plaza Córdoba. Sabemos sin embargo que en la zona de lago, puede haber algunas variaciones estratigráficas en cientos de metros. Se observó que las velocidades obtenidas para los pulsos 2b y 2c, se encuentran dentro del rango de los mínimos de velocidad de grupo mostradas en las figuras 65 y 66.

Analicemos ahora el movimiento de la estructura. Al observar las amplitudes de los registros en la azotea del edificio en la dirección T y L (PCAE) (véase figura 24) es claro que los mayores desplazamientos se presentan en el sentido más corto (transversal) es decir, menos rígido de la estructura. Este movimiento en la dirección transversal puede generar ondas superficiales de Rayleigh (figura 67) que se propagan hacia las estaciones más cercanas. La posible aparición de estas ondas en los registros de la estaciones cercanas debe apreciarse claramente en la orientación N25°W. Podría pensarse que estas ondas se atenúan rápidamente, pero Chávez-García (1991) demostró todo lo contrario. En este trabajo el autor modeló una onda superficial que se propagaba en una capa de arcilla (con características propias de la arcilla de la Ciudad de México). Empleando un valor de $Q=25$, Chávez-García (1991) encontró que a 1 km de distancia la atenuación aunque se presentaba era poca.

Al trazar el movimiento de partícula en el plano, de la componente transversal contra radial de los pulsos que presentaban cierto parecido (2a, 2b y 2c) (figuras 68, 69 y 70) se observó que el movimiento de las estaciones RM y 56 no coincidía con el movimiento del edificio. Esto descarta que los trenes de onda se hayan generado en el edificio. Solo en la estación RM se apreció que el movimiento estaba orientado N25W (como se esperaba que apareciera) pero éste no coincidía con el movimiento del edificio. Al no encontrar una relación entre las amplitudes de los pulsos comunes, ni una coincidencia en la orientación de los pulsos obtenidos en los registros de "campo libre" y el edificio suponemos que los pulsos 2b y 2c no se generaron desde el edificio.

La posible generación de ondas superficiales por parte del edificio hacia las estaciones cercanas quizás pueda observarse en la componente transversal. Por eso ahora realizaremos el análisis de los registros en la dirección transversal.

4.2.1.2 Análisis en la dirección transversal al epicentro y al edificio

El procedimiento que se siguió para los componentes transversales fue el mismo, es decir se filtraron los registros en una banda de frecuencias (0.3-0.5 Hz) que contiene la frecuencia propia de vibrar del edificio Plaza Córdoba (figura 71). En esta gráfica se identificaron 2 pulsos semejantes (señalados como 1 y 2) en el edificio y en las estaciones RM, 45, 03 y 04 respectivamente, luego se procedió a filtrar los registros en el rango estricto de vibración de la estructura (0.35-0.44 Hz) (figura 72) y se observó que el pulso que anteriormente se había identificado como (2) desapareció y el pulso identificado como (1) permaneció solamente en la estación RM. A continuación se filtraron todos los registros en bandas de frecuencias que se encuentran fuera del rango de vibración de la estructura, por encima (0.6-0.8 Hz) (figura 73) y por debajo (0.1-0.25 Hz) (figura 74). En estos rangos de frecuencia no se observó ninguno de los dos pulsos identificados anteriormente (pulso 1 y 2). Por último se seleccionaron solo los registros filtrados en el rango de la frecuencia propia de vibrar de la estructura (0.35-0.44 Hz) (figura 75) donde se apreciaba bien el pulso (1).

Dada la orientación del edificio y de los componentes analizadas, el pulso identificado como (1) podría ser provocado por la aparición de ondas de Love debido al movimiento de la estructura. Al calcularse la velocidad de grupo del pulso en la estación RM se obtuvo un valor de 2.7 m/s. Esta velocidad claramente se sale del rango de las curvas que aparecen en las gráficas 65 y 66. Podemos concluir que el pulso observado en la estación RM no fue generado por la estructura.

Si el edificio al moverse genera ondas superficiales, la aparición de trenes de onda en los registros de estaciones cercanas debería ser mucho más evidente cuando se rotasen los registros en la dirección radial y transversal al edificio. Por esto los registros fueron rotados en la dirección del edificio y luego filtrados en diferentes bandas que contuvieran o no la frecuencia fundamental de la estructura.

Solo en los registros filtrado en el rango de vibrar de la estructura (dirección transversal) se pudo apreciar un pulso común, identificados como 1a, 1b y 1c (figura 76). Al calcularse la velocidad de grupo de estos pulsos se obtuvieron valores de 22.3 m/s para 1b y 34.8 m/s para 1c. Estas velocidades se encuentran dentro de las curvas de las figuras 65 y 66. Al trazar el movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial se encontró que el movimiento del registro obtenido en el edificio y en la estación RM era aproximadamente igual en la dirección N75W (figuras 77 y 78). Esto sugiere que debido al movimiento de la estructura se generaron ondas de Love, las cuales se aprecian en los registros de la estación RM (0.52 km). El tren de onda de la estación 56 (1c), el cual tenía una forma igual a la de los pulsos 1a y 1b, no presentó un movimiento de partícula parecido

al del edificio (figura 79), por lo cual se descarta que se haya generado a partir del movimiento de la estructura.

4.2.2 Análisis para el edificio Jalapa

El análisis descrito anteriormente también se hizo para el edificio Jalapa. Es decir que los registros originales (horizontales) se rotaron en la dirección epicentral y se filtraron en bandas de frecuencias cercanas o alejadas a la frecuencia de vibrar de la estructura. Solo el análisis de los registros en la dirección radial (al epicentro) mostró un pulso común (figura 80).

Supongamos que al ser excitado el edificio Jalapa se presenta una mayor vibración en el sentido menos rígido de la estructura (dirección T). Este movimiento deberá generar ondas superficiales de Rayleigh (figura 81) que a su vez deberán aparecer predominantemente en la dirección N15°W. Al realizarse el movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso (1) en el registro del edificio y la estación RM (figuras 82 y 83), no se pudo apreciar que existiese una coincidencia del movimiento con el del edificio. El movimiento de partícula de ambos caso no presenta una dirección preferencial.

Durante el análisis del edificio Plaza Córdoba observamos que al rotar los registros en dirección del edificio era posible apreciar la generación de ondas superficiales desde el edificio hacia las estaciones cercanas. Por ello los registros del edificio Jalapa fueron rotados en la dirección del edificio y filtrados en bandas de frecuencias que contenían o no la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura. Solo en los registros filtrado en el rango de vibrar de la estructura (dirección transversal) se pudo apreciar un pulso común, identificados como 1a y 1b (figura 84). El pulso 1b pudiera asociarse a la generación de ondas de Love desde la estructura, las cuales deberían manifestarse en la dirección N75W. Al realizar el movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial, de los registros del edificio y de la estación RM (figuras 85 y 86), no se observó una coincidencia del movimiento, por lo cual el tren de onda observado en la estación RM, no se generó desde el edificio.

4.3 Análisis de los resultados

Al analizar los registros de los edificios Plaza Córdoba y Jalapa, así como los de las estaciones de "campo libre" cercanos a ellos se observó que solo el edificio Plaza Córdoba, generó ondas superficiales (Love), las cuales se vislumbraron en los registros de las estaciones cercanas como trenes de onda similares a los observados en el edificio. Esta influencia se apreció solo hasta 520 m de distancia del edificio.

Los edificios Plaza Córdoba y Jalapa son estructuras de número de niveles semejante, y ambas están en la zona de lago. A pesar de esto, solo se logró observar una influencia del edificio Plaza Córdoba en los registros de "campo libre" cercanos. Esto puede atribuirse a que el edificio Plaza Córdoba esta rodeado de edificaciones de altura menor, es decir, es un edificio muy alto en comparación a las edificaciones aledañas. Ello explicaría porqué su

influencia es muy notoria en los acelerógrafos cercanos. Por el contrario el edificio Jalapa, se encuentra rodeado de edificios de igual o mayor altura que él. Esto nos indica que la posible influencia que vislumbramos durante el análisis en frecuencia por parte del edificio Jalapa, se deba a la superposición de los efectos de varios edificios, o a que la frecuencia propia de los otros edificios sea cercana a la del Jalapa.

4.4 Conclusiones

Hemos podido alinear los registros representativos del movimiento incidente a los edificios, con los registros (ya con tiempo común) de “campo libre”, correspondientes al temblor 091495. Para esto, se empleó el procedimiento de Romero-Jiménez (comunicación personal), según el cual se impuso una velocidad de fase de 3.2 km/s a los registros filtrados entre 8 y 12 s. Este alineamiento en fase se comprobó con el alineamiento de los desplazamientos, obteniéndose una buena coherencia. Nuevamente se resolvió el problema de una falta de tiempo común en registros.

Al incorporar los registros de los edificios a la base de tiempo común de los registros de “campo libre” de la RAVM se comprobó que los registros verticales están muy poco afectados por las condiciones locales.

Una vez que se impuso una base de tiempo común en los registros de los edificios y los de “campo libre”, se filtraron en distintas bandas de frecuencias que contenían o no el rango fundamental de vibrar de la estructura con el fin de identificar trenes de onda comunes. A este análisis fueron sometidos los edificios Plaza Córdoba y Jalapa, obteniéndose los siguientes resultados. En los registros de “campo libre” cercanos (a menos de 1 km) del edificio Plaza Córdoba, filtrados en la banda de frecuencia de vibrar de la estructura, se lograron identificar trenes de onda comunes. La aparición de estos trenes de onda, se puede atribuir a la generación de ondas de Love por parte del edificio cuando vibra.

El que aparezcan o no trenes de onda en las estaciones de “campo libre” cercanas a edificios puede depender en gran medida de que las frecuencias propias de las estructuras aledañas sean parecidas y eso enmascare los efectos. De igual forma de la localización de la estación de “campo libre” con respecto al edificio. En nuestro análisis no se pudo observar como la distancia entre el edificio y la estación influye en que se aprecien o no los efectos. Se observó para el edificio Plaza Córdoba que estaciones que estaban cerca del edificio no presentaban trenes de onda comunes, solo por no estar situadas en la misma dirección en la que el edificio generó ondas de mayor amplitud.

Se vislumbró que el edificio Plaza Córdoba influye en el movimiento de las estaciones de “campo libre” cercanas a él. En el análisis en frecuencia se encontraron frecuencias propias de esta estructura en las estaciones de “campo libre” cercanas. En el análisis en el tiempo se observó que el edificio al ser excitado generó ondas de Love las cuales se propagaron a las estaciones más cercanas con velocidades de grupo de 22.3 y 34.8 m/s, propiciando la aparición de trenes de onda similares a los observados en las señales registradas en la estructura.

Los trenes de onda observados en los registros de "campo libre" cercanos al edificio Jalapa, se atribuyen a la superposición de los efectos de edificios cercanos cuya frecuencia fundamental coincide con la del propio Jalapa

Bard y Wirgin (1995), concluyeron que la construcción de edificios altos sobre suelos blandos podía modificar la distribución, amplitud y duración (especialmente la última parte) de los registros de "campo libre", además que esta influencia se manifestaba en la aparición de reverberaciones en las fases tardías de los registros. Al compararse los registros de "campo libre" filtrados a diferentes frecuencias (que incluían o no la frecuencia fundamental del edificio) casi siempre se observó la aparición de ondulaciones en los registros, es decir que el que se observen o no estas reverberaciones no está condicionado por el movimiento del edificio. Se intentó establecer relaciones del movimiento de los edificios con la amplitud de los registros de "campo libre", sin poder obtener un patrón entre ellos. El aumento o disminución de la amplitud de los registros, en algunos casos no pareció depender de la distribución espacial o de la orientación de las estaciones de "campo libre" con respecto a los edificios instrumentados.

Por último haremos una anotación con respecto a la gran duración que se observó en los registros de las estaciones RM, 03 y 04; apreciándose de manera especial en la estación RM. Al compararse los registros de "campo libre" cercanos a los edificios Jalapa y Plaza Córdoba, filtrados en diferentes banda de frecuencia, siempre se observó que la duración de los registros de las estaciones RM, 03 y 04 era mucho mayor que la de otras estaciones cercanas. No podemos atribuir esta gran duración a la influencia de los edificios en el movimiento del suelo ya que éste fenómeno apareció aún en los registros filtrados a frecuencias que no estaban asociadas a la frecuencia fundamental de vibrar de las estructuras instrumentadas cercanas. A pesar de que todos las señales de "campo libre" que estamos analizando fueron registradas en la zona de lago, la gran duración apareció solo en algunos registros, por lo cual creemos que el aumento en la duración de los registros está más relacionado con las condiciones locales o con el umbral de disparo del aparato.

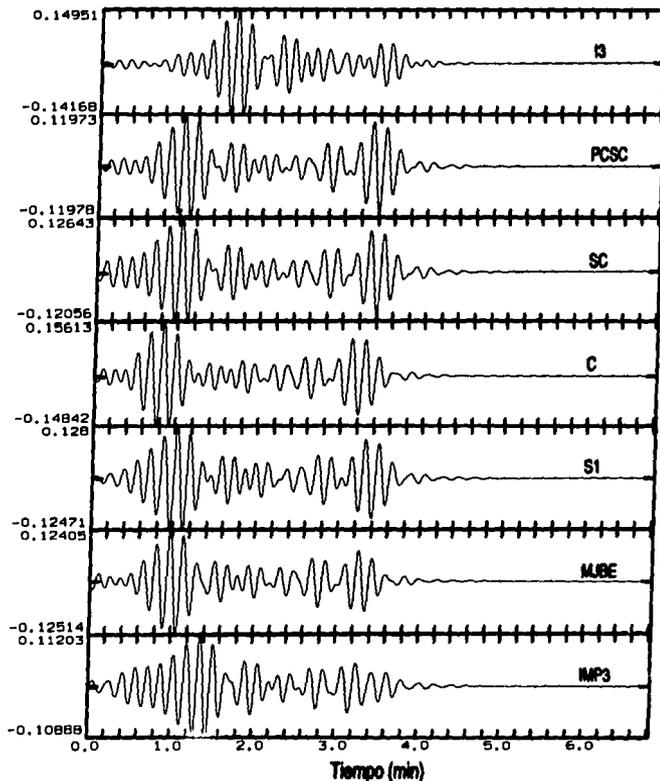


Figura 51. Componente vertical de los registros del temblor del 091495 captados en los edificios, filtrados entre 8 y 12 seg. Se observa claramente en todas las estaciones un pulso común.

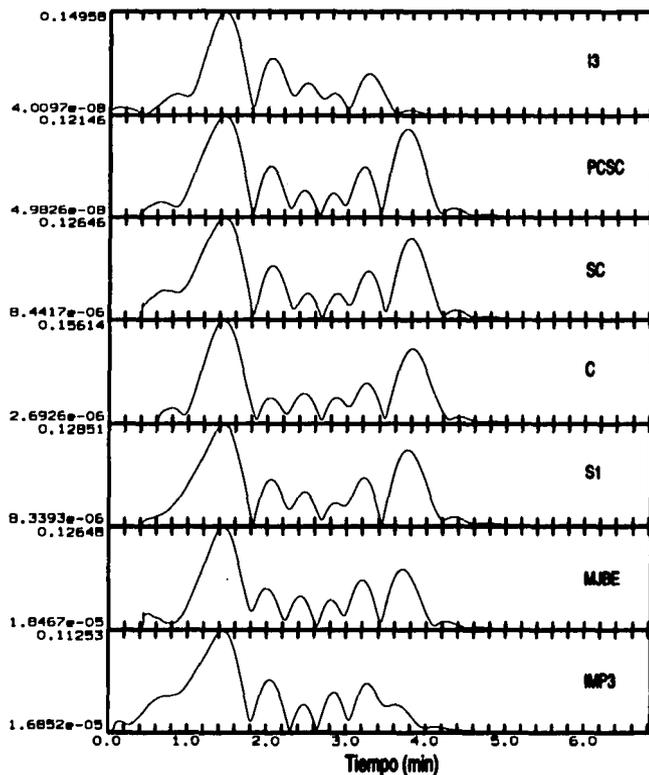


Figura 52. Alineamiento por envolvente de un pulso común observado en la componente vertical de los registros de aceleración correspondientes a los edificios, para el temblor del 091405.

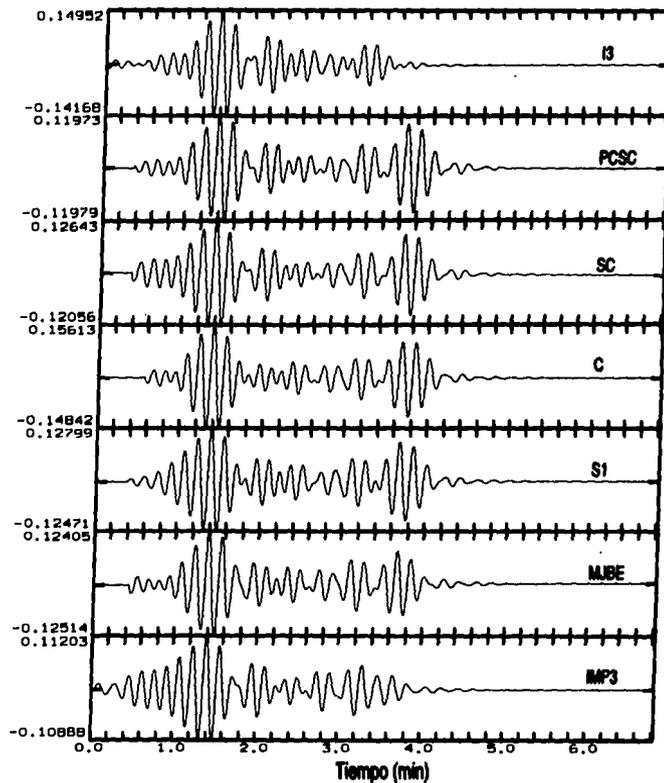


Figura 53. Alineamiento por fase de un pulso común observado en la componente vertical de los registros de aceleración correspondientes a los edificios para el temblor del 091495.

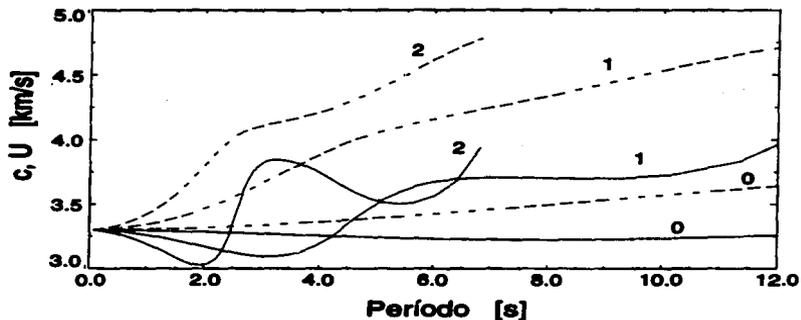


Figura 54. Curvas teóricas de velocidad de grupo (línea continua) y fase (línea discontinua) de las ondas de Love, obtenidas del modelo de Campillo et al. (1989).

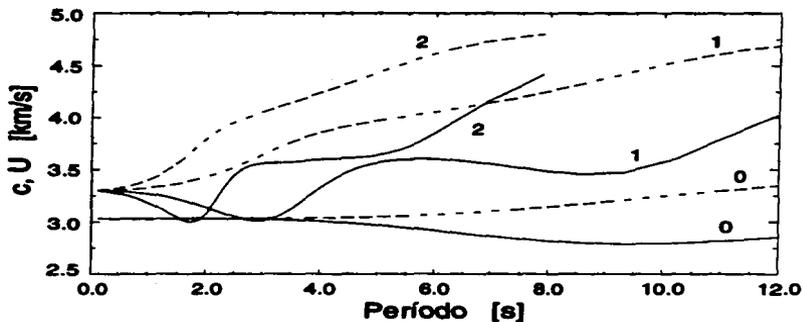


Figura 55. Curvas teóricas de velocidad de grupo (línea continua) y fase (línea discontinua) de las ondas de Rayleigh, obtenidas del modelo de Campillo et al. (1989).

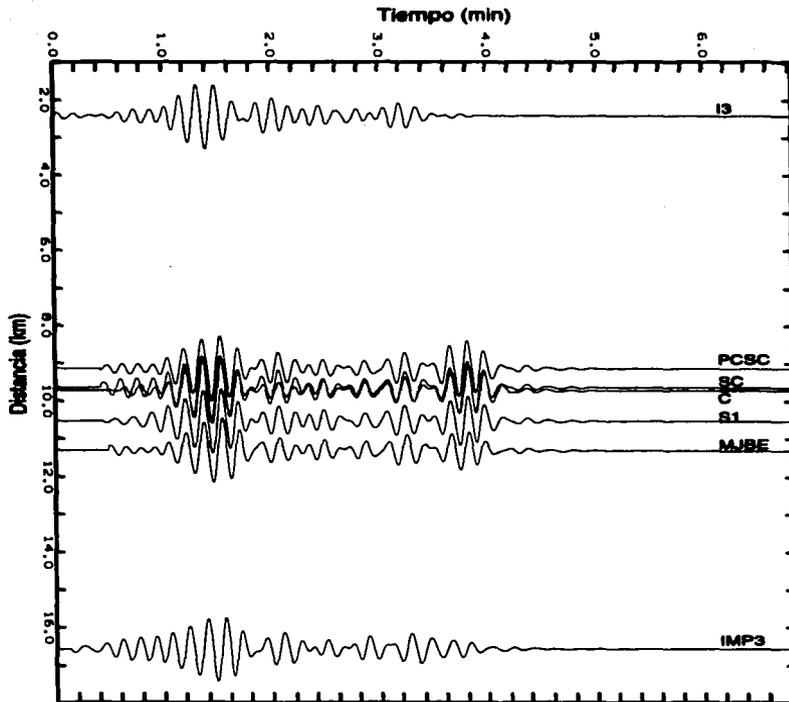


Figura 56. Perfil tiempo-distancia de la componente vertical de los registros de aceleración de los edificios, filtrados entre 8 y 12 segundos de período. La estación que se tomó como referencia fue CU.

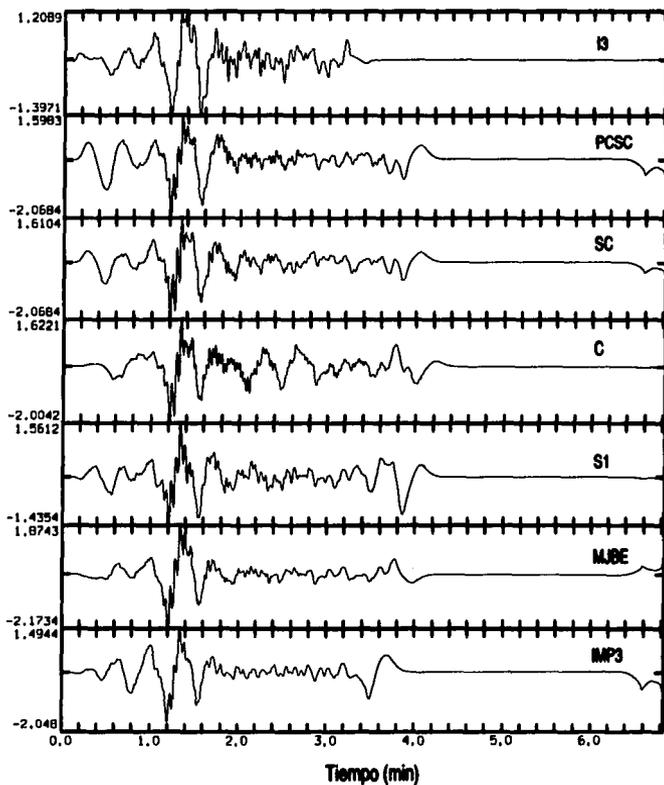


Figura 57. Perfil tiempo-distancia en dirección epicentral de los registros de desplazamientos obtenidos de las aceleraciones del componente vertical.

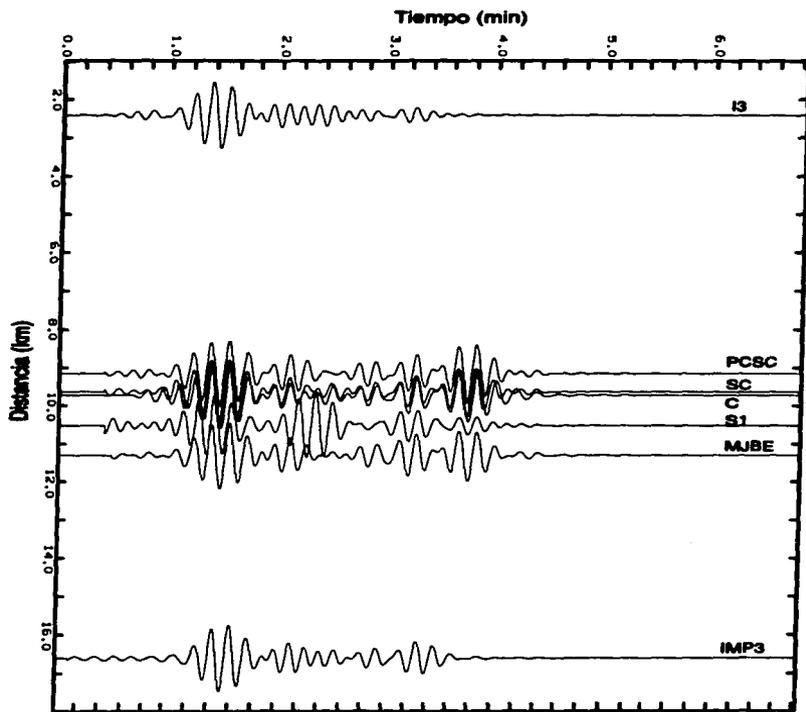


Figura 58. Perfil tiempo-distancia en dirección epicentral del componente radial de los registros de aceleración de los edificios, filtrados entre 8 y 12 segundos de período.

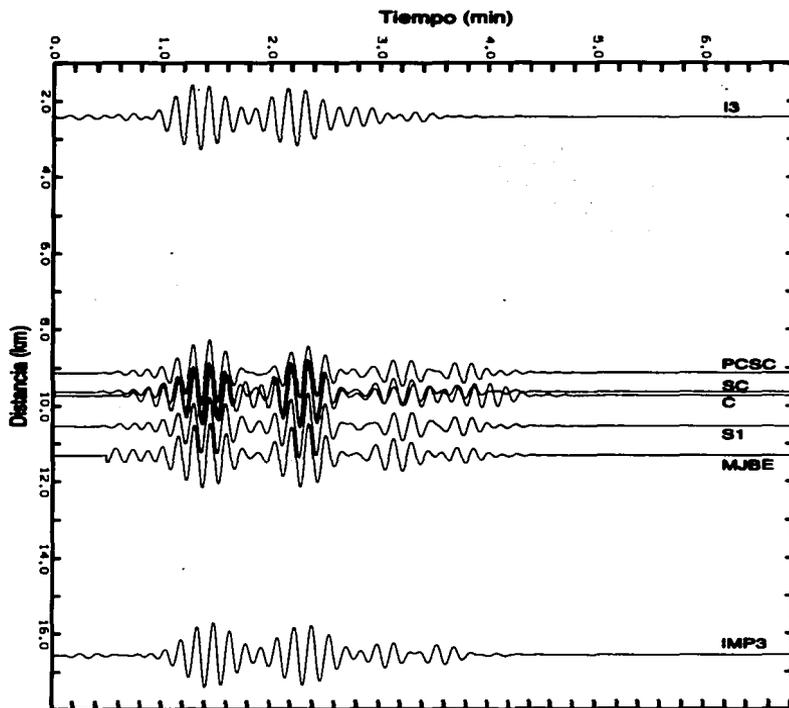


Figura 59. Perfil tiempo-distancia en dirección epicentral del componente transversal de los registros de aceleración de los edificios, filtrados entre 8 y 12 segundos de período.

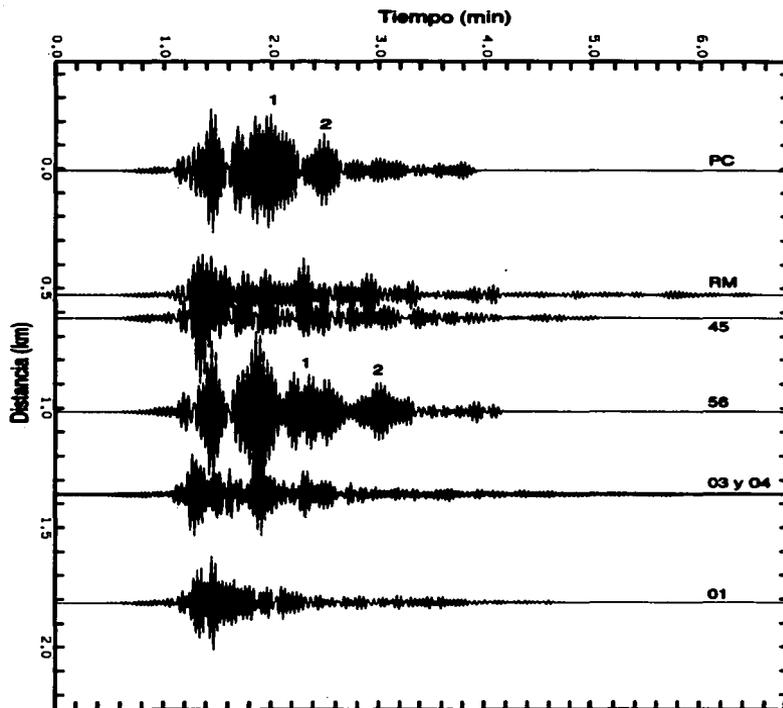


Figura 60. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.3 y 0.5 Hz. Se aprecian dos pulsos comunes en la estación 56 a los encontrados en el registro del edificio (PC).

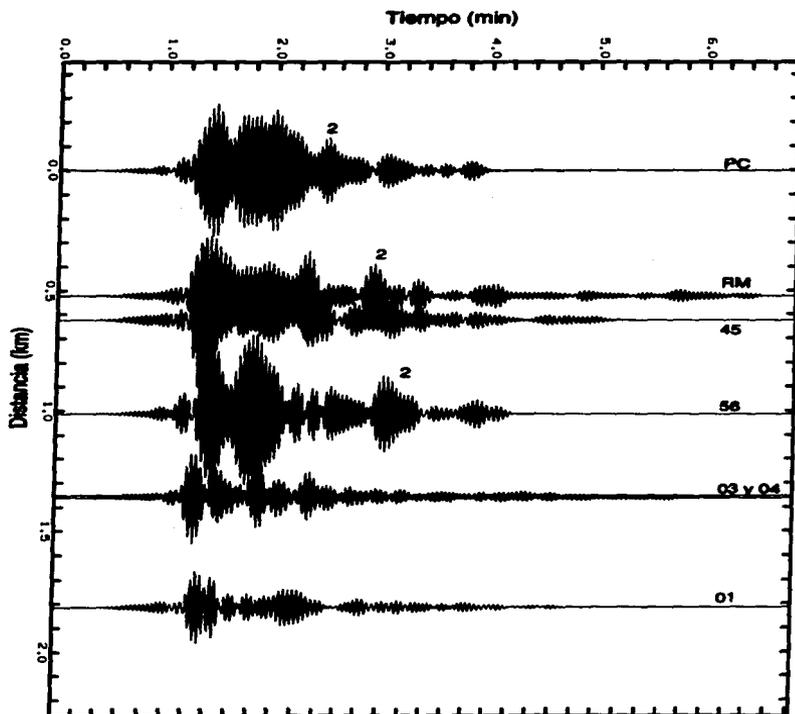


Figura 61. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.35 y 0.44 Hz. Se aprecia un pulso común en las estaciones RM y 56 el cual es parecido al presente en el registro del edificio (PC).

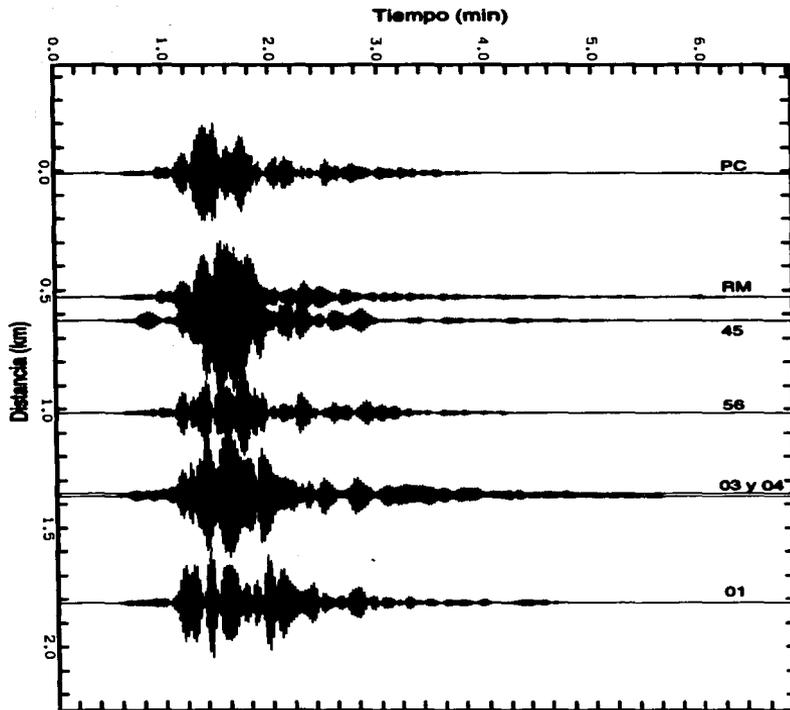


Figura 62. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.6 y 0.8 Hz. Nótese que no existe ningún pulso común en los registros.

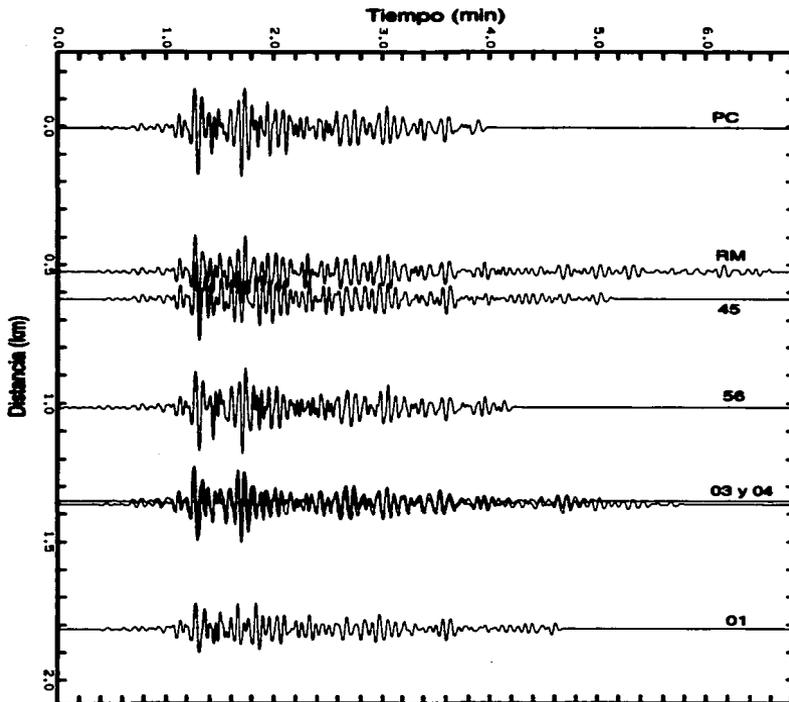


Figura 63. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.1 y 0.25 Hz. Nótese que no existe ningún pulso común en los registros.

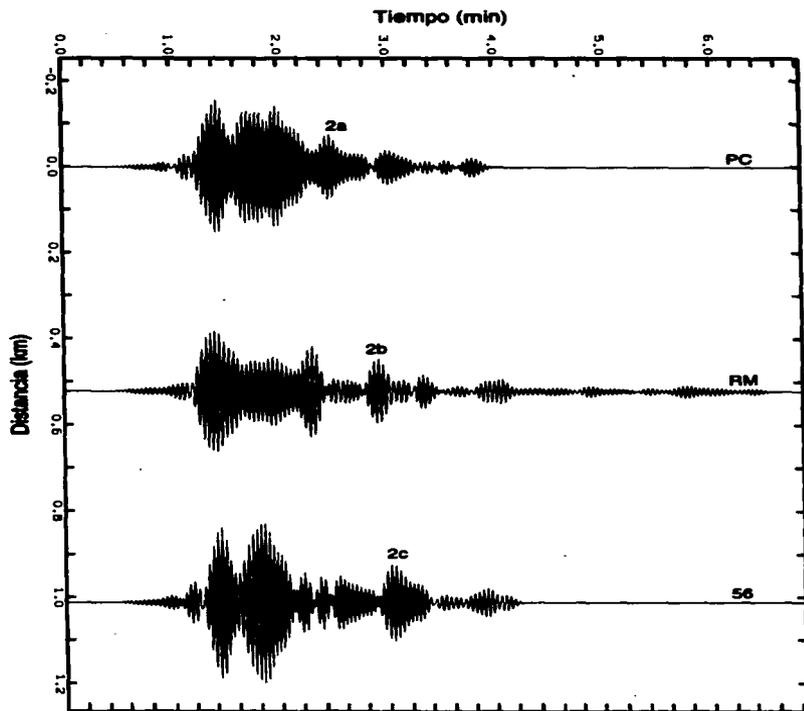


Figura 64. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones RM y 56, filtrados en el rango de la frecuencia propia de vibrar de la estructura (0.35-0.44). Nótese un pulso común identificado como 2a, 2b y 2c.

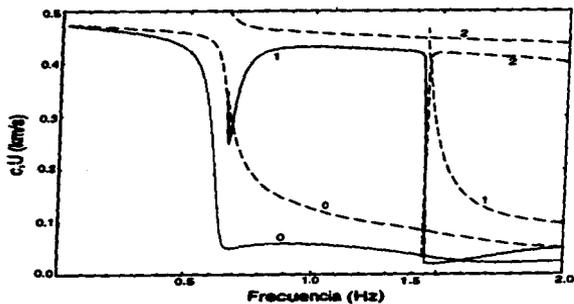


Figura 65. Curvas teóricas de velocidad de grupo (línea continua) y fase (línea discontinua) de las ondas de Rayleigh, obtenidas del modelo de Ovando et al. (1991).

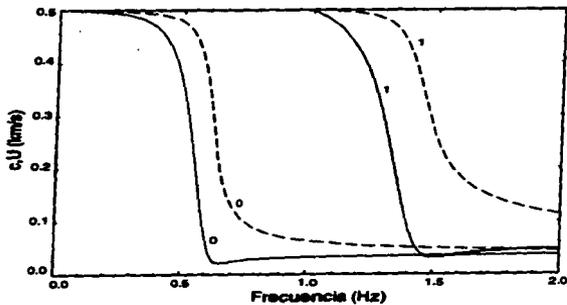


Figura 66. Curvas teóricas de velocidad de grupo (línea continua) y fase (línea discontinua) de las ondas de Love, obtenidas del modelo de Ovando et al. (1991).

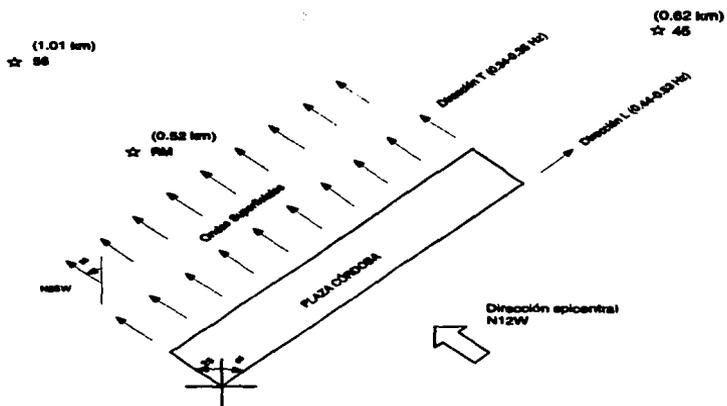


Figura 67. Representación esquemática de la generación de ondas superficiales por parte del edificio Plaza Córdoba hacia las estaciones cercanas.

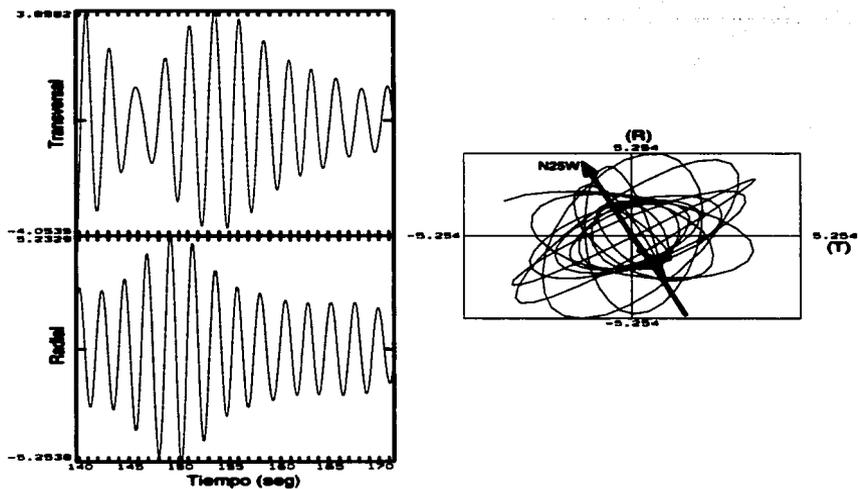


Figura 68. Movimiento de partícula en el plano, de la componente transversal contra radial del pulso identificado como 2a en la figura 64.

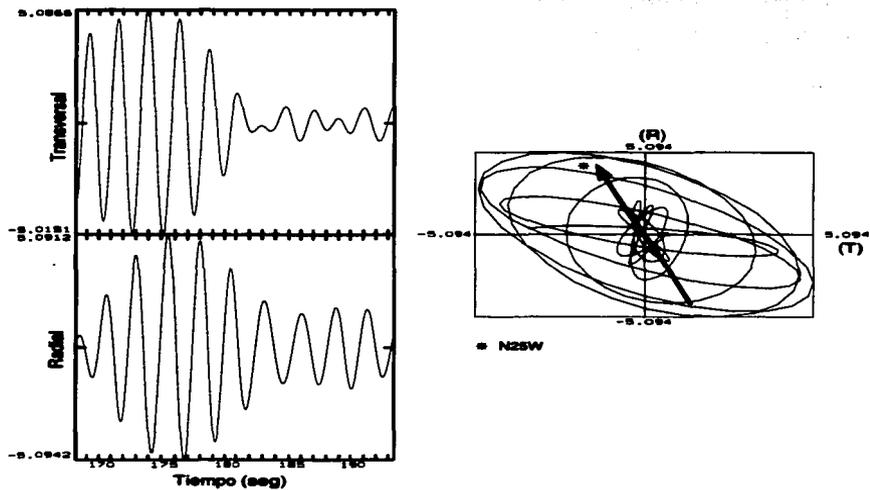


Figura 69. Movimiento de partícula en el plano, de la componente transversal contra radial del pulso identificado como 2b en la figura 64.

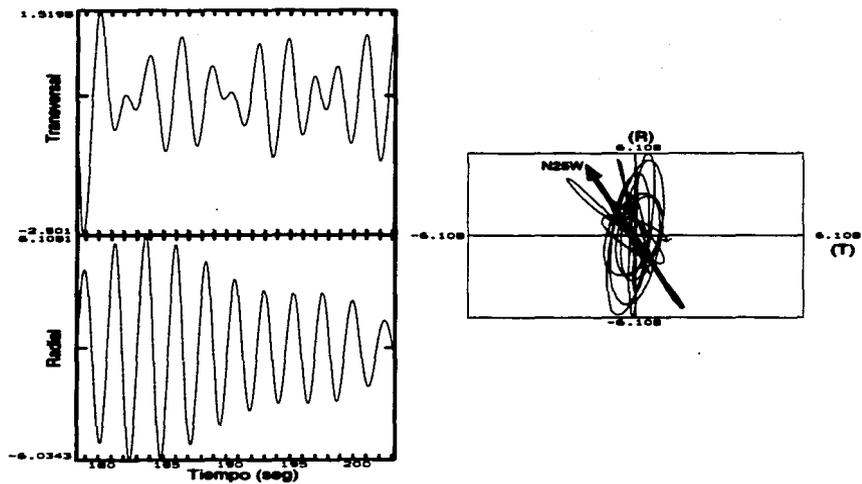


Figura 70. Movimiento de partícula en el plano, de la componente transversal contra radial del pulso identificado como 2c en la figura 64.

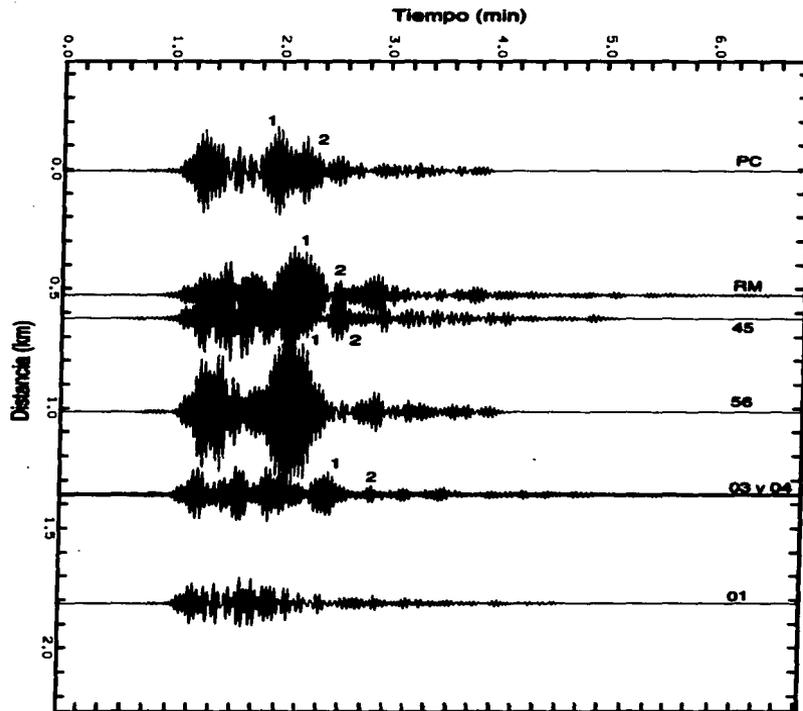


Figura 71. Registros en dirección transversal al epicentro, de las estaciones cercanas al edificio Plaza Córdoba, filtrados entre 0.3 y 0.5 Hz. Se aprecia la aparición en las estaciones RM, 45, 03 y 04 de dos pulsos comunes a los encontrados en el registro del edificio (PC).

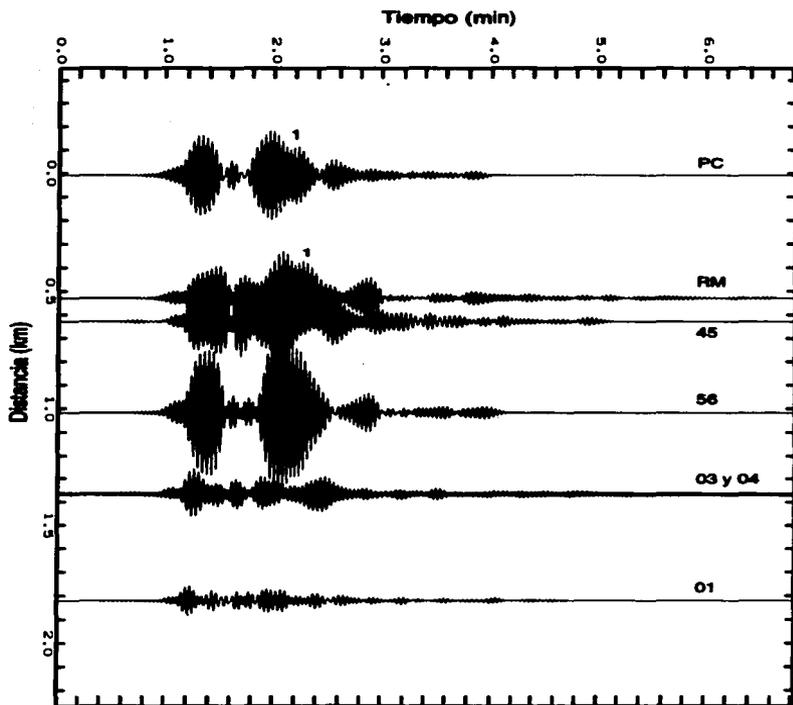


Figura 72. Registros en dirección transversal al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.35 y 0.44 Hz. Se aprecia en la estación RM el pulso identificado como (1), el cual es parecido al presente en el registro del edificio (PC).

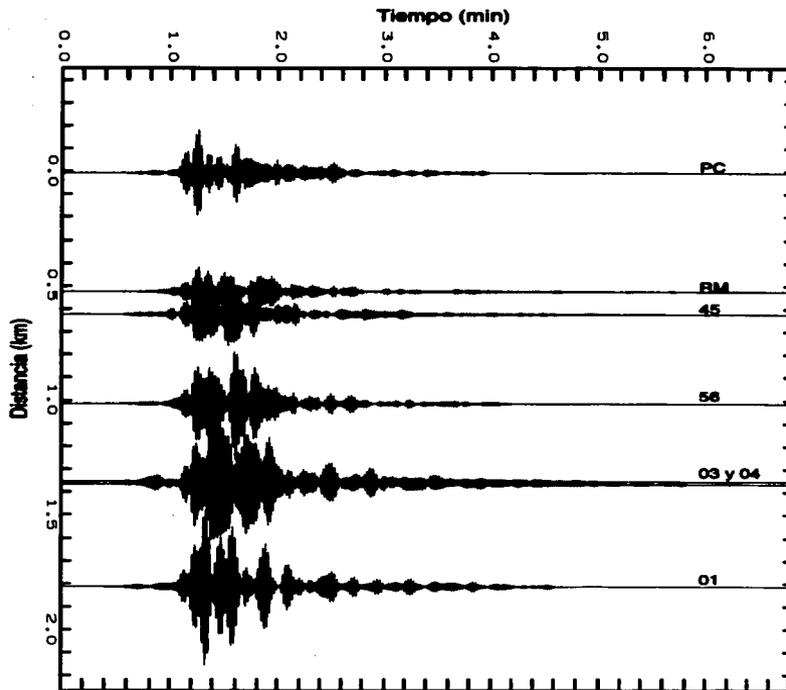


Figura 73. Registros en dirección transversal al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a el, filtrados entre 0.6 y 0.8 Hz. Nótese que no existe ningún pulso común en los registros.

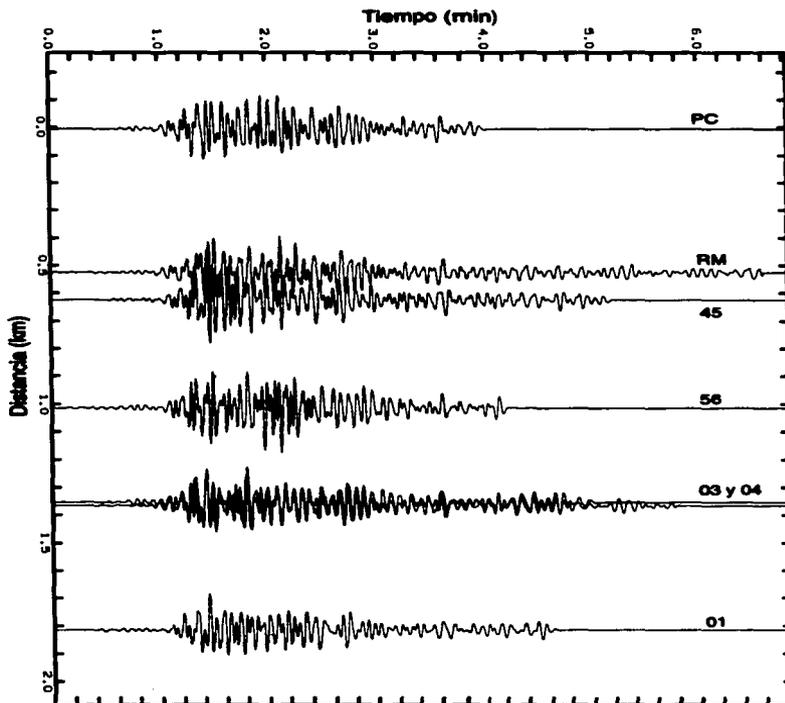


Figura 74. Registros en dirección transversal al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y las estaciones cercanas a él, filtrados entre 0.1 y 0.25 Hz. Nótese que no existe ningún pulso común en los registros.

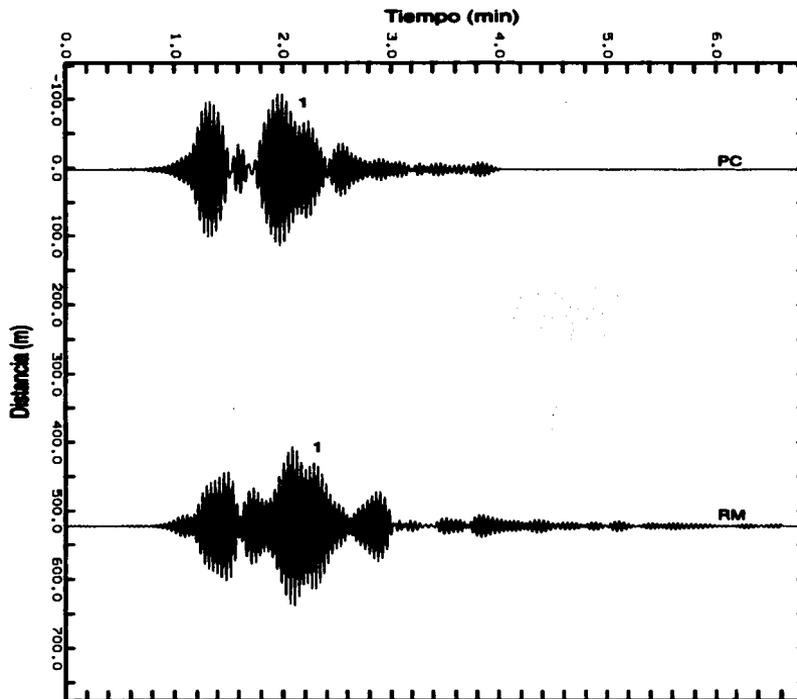


Figura 75. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio Plaza Córdoba y la estación RM cercana a él, filtrados en el rango de la frecuencia propia de vibrar de la estructura (0.35-0.44). Nótese un pulso común identificado como (1).

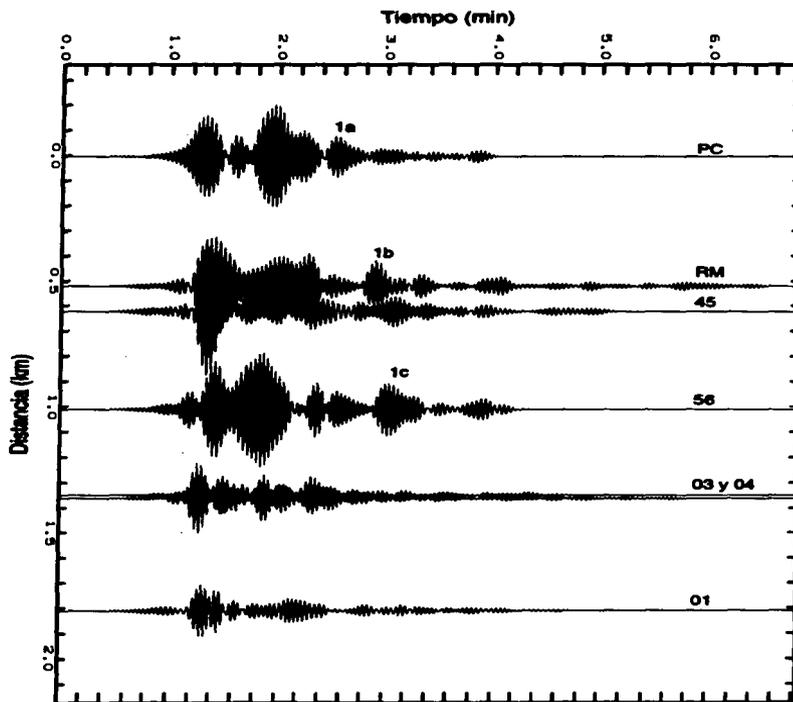


Figura 76. Registros en dirección transversal al edificio, de la estructura y las estaciones cercanas a ella, filtrados entre 0.35 y 0.44Hz. Se aprecia la aparición en las estaciones RM y 56 de un pulso común al encontrado en el registro del edificio (PC).

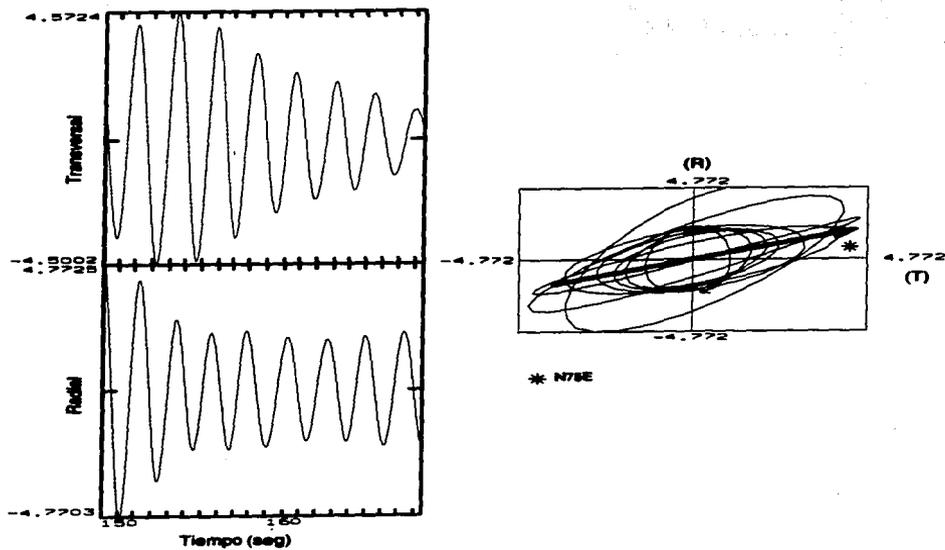


Figura 77. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1a) en la figura 76.

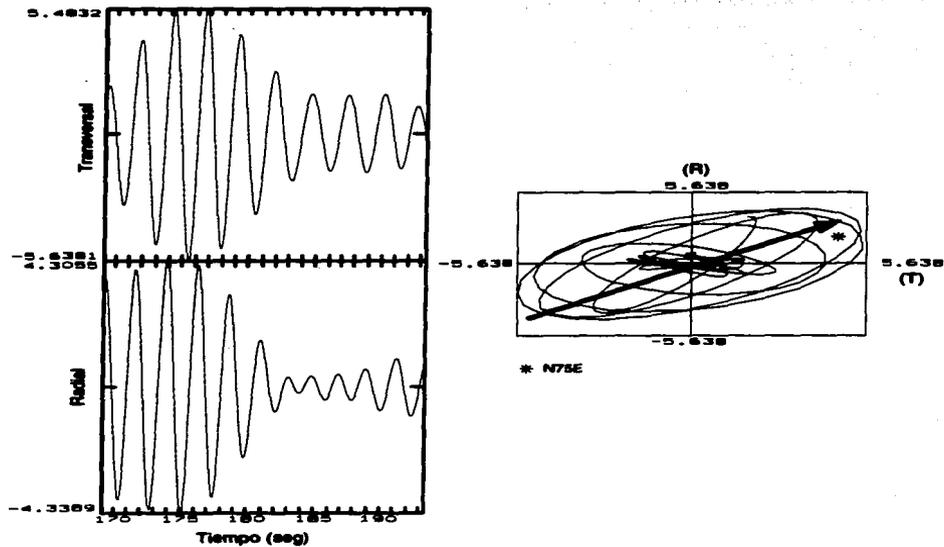


Figura 78. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1b) en la figura 76.

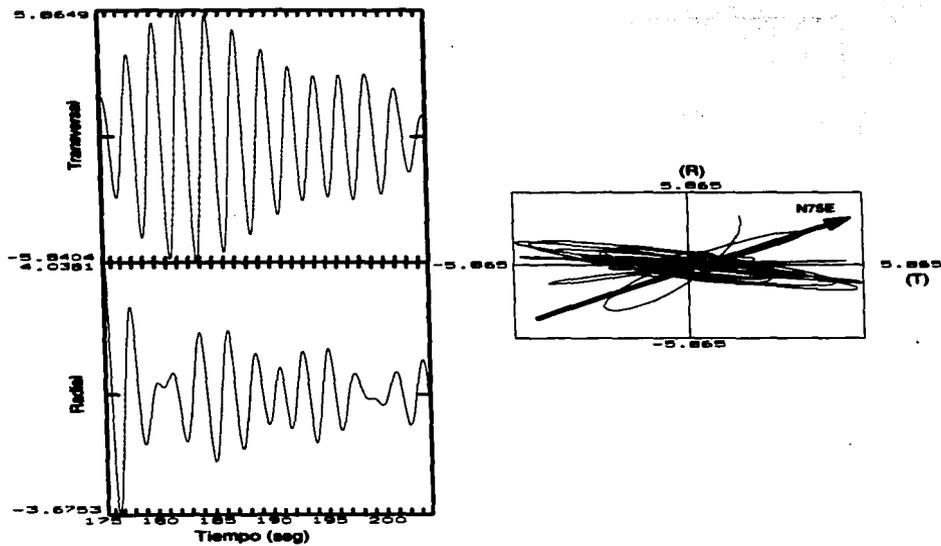


Figura 79. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1c) en la figura 76.

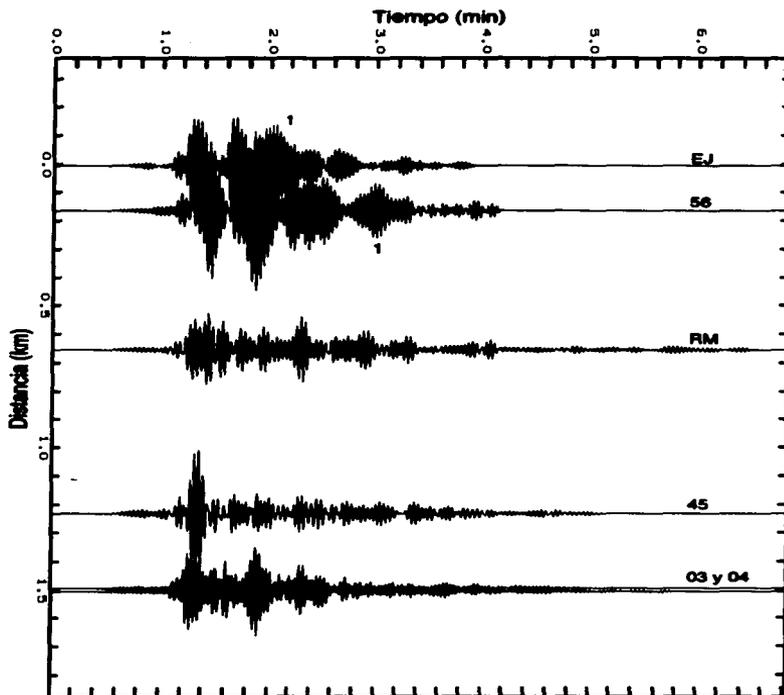


Figura 80. Registros en dirección radial al epicentro, del edificio y las estaciones cercanas al edificio Jalapa, filtrados entre 0.25 y 0.60 Hz. Nótese un pulso común identificado como (1).

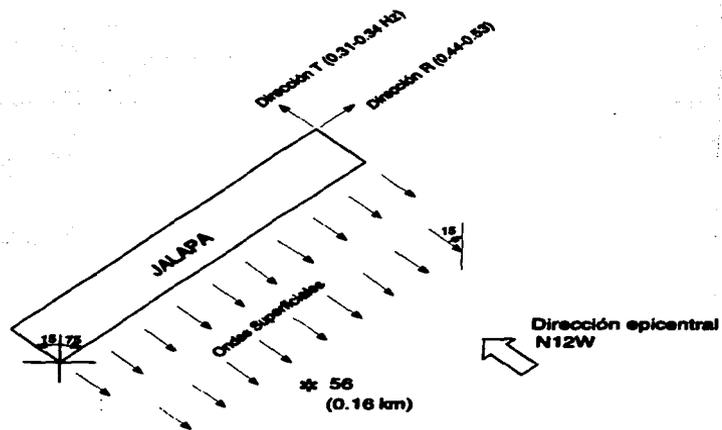


Figura 81. Representación esquemática de la generación de ondas superficiales por parte del edificio Jalapa hacia las estaciones cercanas.

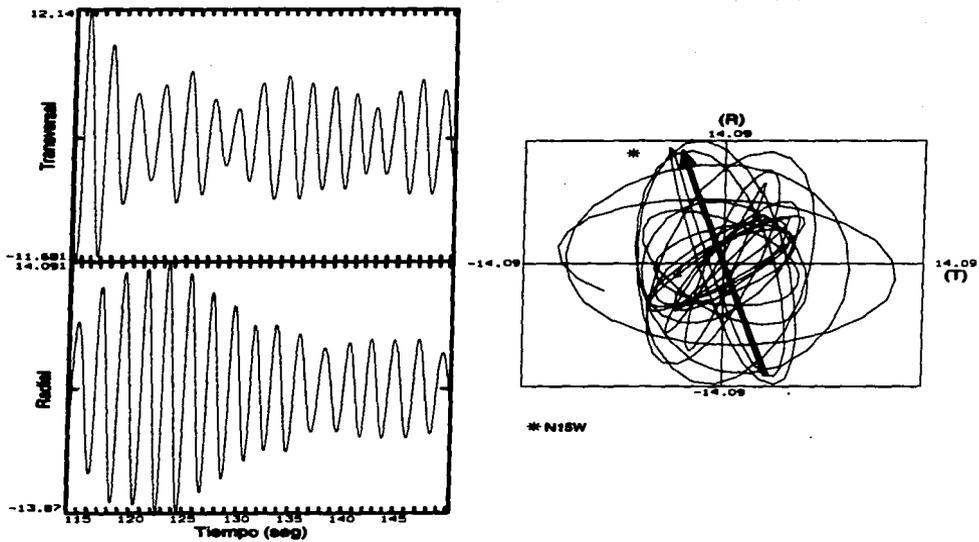


Figura 82. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1) en el registro EJ de la figura 80.

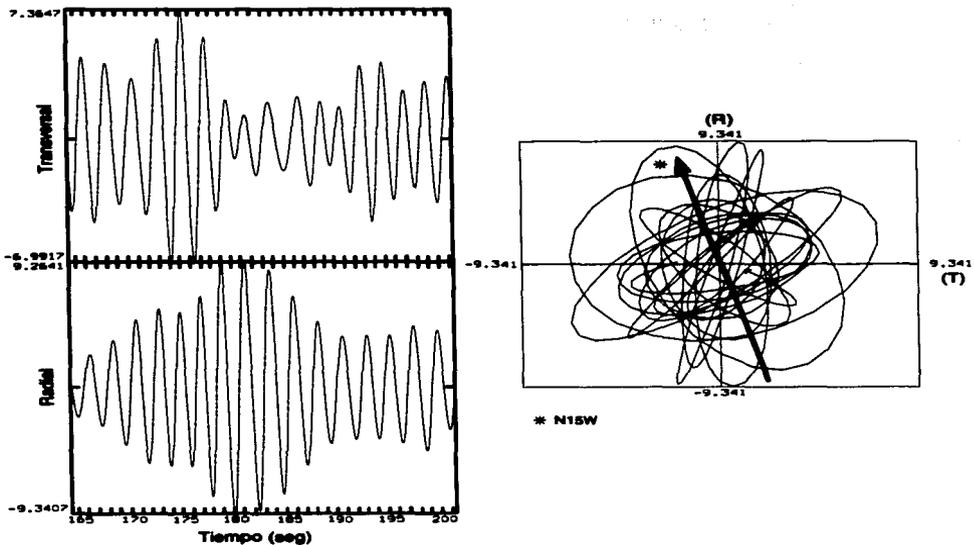


Figura 83. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1) en el registro 56 de la figura 80.

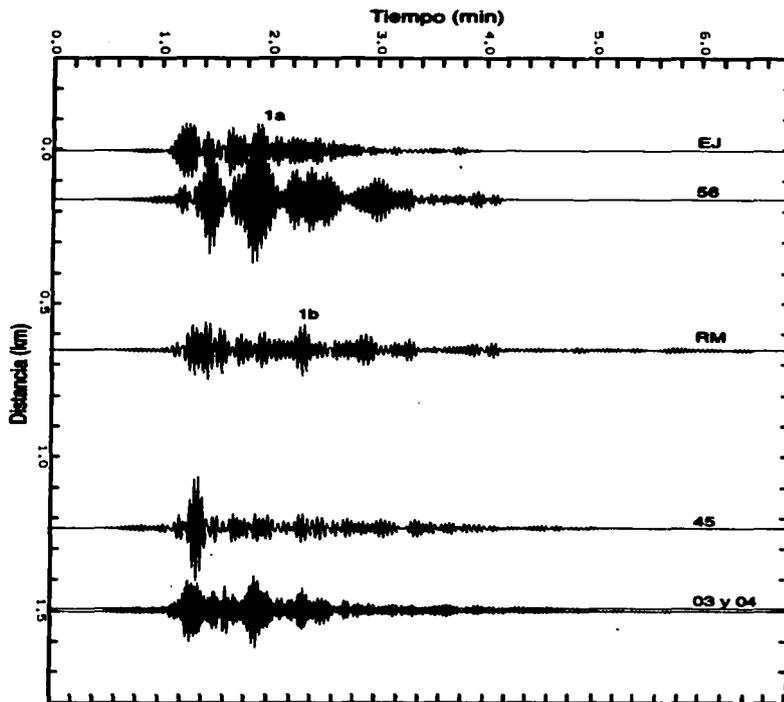


Figura 84. Registros en dirección transversal al edificio, de la estructura y las estaciones cercanas a ella, filtrados entre 0.31 y 0.52Hz. Se aprecia la aparición en la estación RM de un pulso común al encontrado en el registro del edificio (EJ).

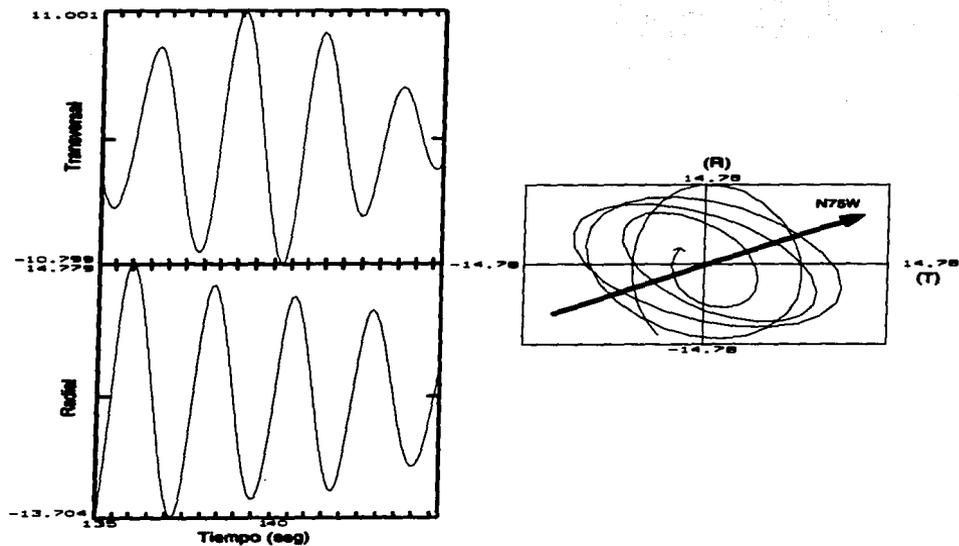


Figura 85. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1a) en el registro EJ de la figura 84.

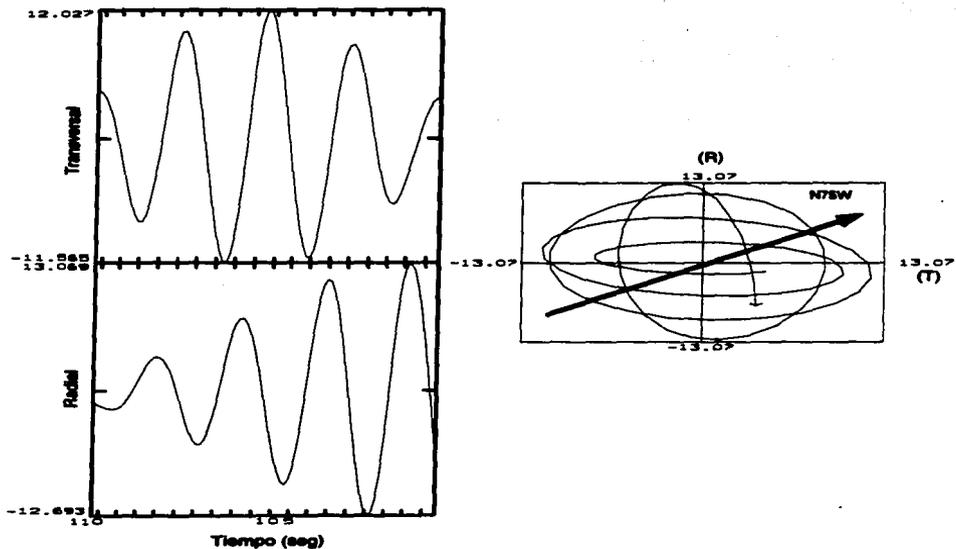


Figura 86. Movimiento de partícula en el plano de la componente transversal contra radial del pulso identificado como (1b) en el registro RM de la figura 84.

EDIFICIO	REGISTRO
1. Plaza Inn	I3, sótano Torre IV
2. Plaza Córdoba	PCSC, sótano centro
3. Jalapa	SC, sótano centro
4. Secundaria No.3	C, planta baja
5. Seguro Social	S1, sótano
6. Metro Juárez	MJBE, base este
7. IMP	IMP3, base

Tabla 28. Registros de aceleración correspondientes al temblor del 091495, captados en los edificios; los cuales fueron empleados para asignar una base de tiempo común.

Espesor (km)	Velocidad de ondas P (km/s)	Velocidad de ondas S (km/s)	Densidad gr/cm ³
15	5.7	3.3	2.77
15	6.8	4.03	3.09
15	7	4.1	3.09
	8.2	4.82	3.33

Tabla 29. Modelo estratigráfico propuesto por Campillo et al., 1989.

EDIFICIO	Distancia a CU (km)	Retraso (seg)
1. Plaza Inn	2.4	0.75
2. Plaza Córdoba	9.12	2.85
3. Jalapa	9.63	3.01
4. Secundaria No.3	9.78	3.05
5. Seguro Social	10.51	3.28
6. Metro Juárez	11.31	3.53
7. IMP	16.65	5.2

Tabla 30. Distancia de cada edificio a la estación CU y retraso de tiempo aplicado a cada traza.

Profundidad m	V_s m/s
5.5	40.0
8.0	51.0
10.5	57.6
14.0	98.0
15.5	72.0
17.5	99.8
20.5	73.97
23.0	169.5
24.5	161.5
27.5	74.8
30.0	170.0

Tabla 31. Modelo de velocidades de ondas S propuesto por Ovando et al. (1991) para el sitio del edificio Jalapa.

MODELADO

El análisis de registros sísmicos en el dominio de la frecuencia presentado en el capítulo 3 vislumbró que el movimiento de los edificios Plaza Córdoba y Jalapa afecta los registros de “campo libre” cercanos. Esta influencia se manifestó como picos en el espectro de amplitudes cuya frecuencia coincidía con la frecuencia fundamental de vibrar de las estructuras. Al realizar el análisis en el dominio del tiempo (capítulo 4) se ratificó que el edificio Plaza Córdoba estaba afectando el suelo circundante. Se pudo apreciar que, al vibrar, el edificio genera trenes de onda que pueden observarse en los registros de las estaciones cercanas. Ahora bien, los trenes de onda observados en los registros de “campo libre” cercanos al edificio Jalapa se atribuyeron a la superposición de los efectos de edificios aledaños cuya frecuencia fundamental coincidía con la del edificio Jalapa. En este capítulo intentamos ratificar los resultados encontrados para el edificio Jalapa mediante la simulación numérica de la propagación de ondas. Dadas las dificultades que presenta la simulación completa del problema, presentamos únicamente resultados preliminares enfocados a determinar en la configuración más sencilla posible la magnitud de la influencia del movimiento de un edificio en los registros de campo libre cercanos. Para ello emplearemos el esquema de diferencias finitas, desarrollado por Moczo et al. (1997) para simular la respuesta sísmica de un edificio sobre un medio heterogéneo viscoelástico en 2D ante incidencia de ondas P-SV y SH.

La utilización del método de diferencias finitas para resolver la propagación de ondas elásticas se remonta a mediados de los años sesenta. Su base teórica se desarrolló paralelamente a la de los métodos numéricos, pero al igual que estos, tardaron en aplicarse intensamente hasta el desarrollo del computador, herramienta fundamental para la aplicación del método.

Las primeras investigaciones sobre la utilización del método de diferencias finitas en el modelado de la propagación de ondas sísmicas fueron hechas por Alterman y Karal (1968). Estos autores presentaron una formulación para la ecuación de onda por el método de diferencias finitas para un solo estrato sobre un semiespacio. Las condiciones de frontera para el problema estaban determinadas por el hecho de que los esfuerzos debían ser cero en la superficie libre. De igual forma los esfuerzos y desplazamiento en las interfases entre los medios en contacto debían ser continuos. De esta forma se desarrolló una solución discreta para la ecuación de onda elástica, usando el método de integración explícita de tiempo.

Boore (1972) empleó un algoritmo numérico para la solución de un sistema de segundo orden en una malla simple (utilizado posteriormente por Kelly et al., 1976), para generar sismogramas sintéticos. Madariaga (1976) desarrolla el algoritmo de malla escalonada,

basado en la ecuación de primer orden hiperbólica, marcando un cambio radical en los algoritmos desarrollados posteriormente, ya que permitió resolver el problema de nodos ficticios en las fronteras de interfase para implementar las ecuaciones de continuidad.

Gadzag (1981) aplicó el método de diferencias finitas al modelado de datos de exploración sísmica. A partir de los ochenta se presentaron algoritmos más eficientes de diferencias finitas basados en el esquema de malla escalonada. Virieux (1984) consideró la propagación de ondas SH por diferencias finitas usando el esquema de malla escalonada de Madariaga (1976). Dablain (1986) usa diferencia central de segundo orden para aproximar las derivadas de la ecuación de onda. Virieux (1986) utiliza el mismo esquema de malla escalonada para la propagación de ondas P-SV usando el método de sistemas de primer orden. Este método resuelve las ecuaciones en términos de velocidad y esfuerzos.

Posteriormente Bayliss et al. (1986) consideraron algoritmos de cuarto orden para el cálculo de propagación de ondas elásticas. Moczo (1989) simula la respuesta sísmica de estructuras homogéneas en 2D ante incidencia de ondas SH. Este esquema permite la incorporación de atenuación inelástica para simular la respuesta sísmica de medios absorbentes. Recientemente, Ohminato y Chouet (1997) presentan condiciones de frontera libre incluyendo topografía en 3D. De igual forma Moczo et al. (1997), presenta un método híbrido (número de onda discreto-elemento finito-diferencias finitas) con el cual calcula la respuesta sísmica ante incidencia de ondas P-SV de un medio no-homogéneo, viscoelástico con una estructura topográfica presente.

5.1 Modelo utilizado

Con el propósito de conocer los efectos del edificio Jalapa en la respuesta del suelo circundante ante la incidencia de ondas P-SV y SH, empleamos el esquema de diferencias finitas desarrollado por Moczo et al. (1997), el cual incorpora atenuación inelástica. Se sabe que el método de las diferencias finitas tiene muchos problemas con la implementación de las condiciones de frontera de formas geométricas complejas, por lo cual el modelo empleado es preliminar ya que se han presentado inestabilidades en las esquinas del mismo.

El modelo considera un estructura rectangular de hormigón, embebida sobre un estrato de arcilla, el cual se encuentra sobre un semiespacio. Las dimensiones de la estructura fueron cambiadas al igual que la profundidad de desplante y el espesor de la capa de arcilla, con el fin de que se pudiera obtener la frecuencia dominante del sitio. La figura 87 muestra un esquema del modelo. Nótese que la frontera lateral izquierda es un plano de simetría. El modelo está construido con una malla de espaciamiento regular de 2.5 m en las direcciones horizontal y vertical. Este espaciamiento es muy pequeño, pero se empleó para evitar una difracción artificial. La longitud del modelo es de 2500 m. Los receptores fueron colocados sobre la estructura y fuera de ella. Los receptores sobre campo libre fueron colocados a diferentes distancias hasta alcanzar 2490 m medidos a partir de la esquina del edificio.

Los parámetros del suelo se escogieron de forma tal que representaran las características de la arcilla sobre la cual esta apoyada el edificio Jalapa. Los valores del espesor de la capa de

arcilla, así como de velocidad de onda S y coeficiente de Poisson se tomaron del estudio de Ovando et al. (1993) para ese sitio (tabla 32). Para simular la fuente se empleó un pulso de Gabor con un período dominante de 2 s (figura 88). El pulso se encuentra centrado en 0.5 Hz ya que esta es la frecuencia dominante del sitio (figura 89). La excitación empleada es una onda plana incidiendo verticalmente.

	Q_p	Q_s	ρ Ton/m ³	β m/s	α m/s	σ
1	200	100	325	57.6	95	0.25
2	50	25	1.2	68	485.6	0.49
3	100	50	1.8	600	1800	0.44

Tabla 32. Características del edificio y del suelo.

Para poder establecer comparaciones, primero se calculó el campo de desplazamientos para el modelo que incluye únicamente la capa de arcilla sobre un semiespacio ante la incidencia de una onda P-SV y SH respectivamente. Luego se calculó el campo de desplazamientos incluyendo al edificio Jalapa.

5.2 Análisis de los resultados

Al analizar el campo de desplazamientos en cada uno de los modelos, buscamos determinar el efecto del edificio en los movimientos de campo libre. En las figuras 90 y 91 se presentan los sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas P en dirección horizontal y vertical respectivamente. En ambas figuras el primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio ante la incidencia de una onda P, sin considerar el edificio. Por supuesto, el movimiento horizontal es cero para una onda P incidiendo verticalmente sobre un medio estratificado. Los siguientes sintéticos muestran la respuesta del suelo registrada en receptores a 115 m, 240 m, 365 m, 490 m, 615 m, 1240 m, 1865 m y 2490 m del edificio al considerar la presencia del mismo. Se aprecia que el edificio afecta el movimiento del terreno que lo circunda. Como se esperaba este efecto tiende a disminuir conforme aumenta la distancia entre el receptor y el edificio.

Las figuras 90 y 91 muestran que los efectos de interacción suelo-estructura afectan al campo libre hasta al menos 365 m con una amplitud de 1.5 % menos de la amplitud del pulso incidente. Los sismogramas sintéticos de estas dos figuras confirman los resultados presentados en el capítulo 4. En el análisis en el dominio del tiempo realizado para los registros del edificio Jalapa y de las estaciones cercanas, observamos que los efectos del edificio Jalapa aunque estaban presentes eran difíciles de apreciar debido a la superposición de los efectos de edificios cercanos cuya frecuencia fundamental coincide con la del propio Jalapa.

Al calcularse la velocidad de fase y de grupo de un pulso común observado en las señales captadas en la base del edificio y 3 sitios en campo libre (115m, 240 m y 365m), se obtuvieron valores de 0.2 Km/s para la velocidad de fase y 0.09 Km/s para la velocidad de

grupo. Estas velocidades se compararon con las curvas de velocidad de fase y de grupo para las ondas de Rayleigh (figura 92), obtenidas del modelo de velocidades presentado en la tabla 32, encontrándose que están dentro del rango de las curvas correspondientes a el modo fundamental de Rayleigh a una frecuencia de 0.66 Hz. Esto nos indica que al vibrar el edificio se generan ondas de Rayleigh las cuales se están propagando hasta al menos una distancia de 365 m. El movimiento de partícula horizontal sobre vertical del pulso común observado en las estaciones de campo libre localizadas a 115 m, 240 m y 365 m respectivamente (figura 93) ratifica la presencia de ondas de Rayleigh en el suelo circundante al edificio.

Las figuras 94 y 95 presentan los sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas SV en dirección horizontal y vertical respectivamente. En ambas figuras el primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio ante la incidencia de una onda SV, sin considerar el edificio. En este caso el movimiento vertical es nulo. Los siguientes sintéticos muestran la respuesta del suelo registrada en receptores a 115 m, 240 m, 365 m, 490 m, 615 m, 1240 m, 1865 m y 2490 m del edificio al considerar la presencia del mismo. Nuevamente se aprecia que la presencia del edificio Jalapa afecta el movimiento del terreno que lo circunda hasta 2490 m. Al igual que en el caso de incidencia de una onda P, se generaron ondas superficiales a partir del edificio hasta al menos una distancia de 365m, ya que al calcular la velocidad de grupo de un pulso común se obtuvo un valor de 0.078 Km/s; observándose que este valor estaba contenido dentro de la curva correspondiente al modo fundamental de Rayleigh (figura 92).

En el capítulo 4 observábamos que la aparición de los efectos de interacción suelo-estructura en los registros de las estaciones de "campo libre" cercanas a edificios localizados en la zona de lago se debía a condiciones típicas de esta zona: a) suelo blando; b) coincidencia de las frecuencias fundamentales de las estructuras y la capa de suelo. Estas dos características fueron representadas en este modelo, por lo cual se hicieron evidentes los efectos de interacción suelo-estructura en los registros de campo libre.

5.3 Conclusiones

En este capítulo hemos empleado el esquema de diferencias finitas desarrollado por Moczo et al. (1997) para simular la respuesta sísmica del edificio Jalapa sobre un medio heterogéneo viscoelástico en 2D, ante incidencia de ondas P-SV y SH. El modelo fue construido tomando como antecedente las características del sitio propuestas por Ovando et al. (1993).

Al calcular el campo de desplazamientos de una capa de arcilla sobre un semiespacio considerando o no el edificio, observamos que la presencia de éste modifica la forma y la amplitud de los registros de campo libre hasta distancias de 2490 m. De igual forma se pudo establecer que el movimiento del edificio genera ondas superficiales las cuales se aprecian hasta al menos 365 m de distancia con una amplitud de 1.5 % menos que la de la onda incidente.

Queda de manifiesto que la aparición de los efectos de interacción suelo-estructura en los registros de las estaciones de "campo libre" cercanas a edificios localizados en la zona de lago se debe a condiciones típicas de esta zona: a) suelo blando; b) coincidencia de las frecuencias fundamentales de las estructuras y la capa de suelo. Es decir, que la presencia de edificios altos (como el edificio Jalapa) sobre suelos blandos (presentes en la zona de lago) incrementa la interacción suelo-estructura, propiciando un cambio en la amplitud y la forma del movimiento del terreno cercano a ellos.

Al comparar los resultados del análisis en el tiempo y los aquí presentados concluimos que el edificio Jalapa puede estar modificando las características del movimiento del suelo cercano a él.

Plano de simetría

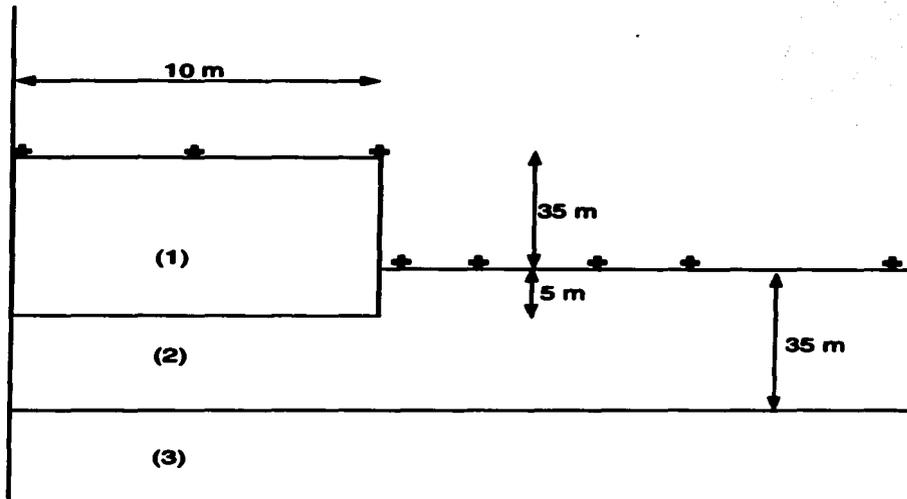


Figura 87. Sección del modelo empleado.

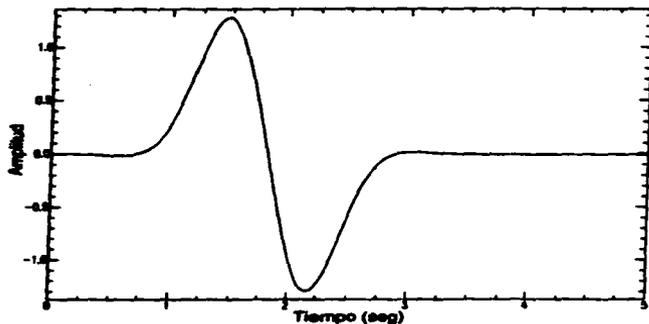


Figura 88. Dependencia en tiempo del pulso de Gabor ($T=2$ s) utilizado para simular la fuente.

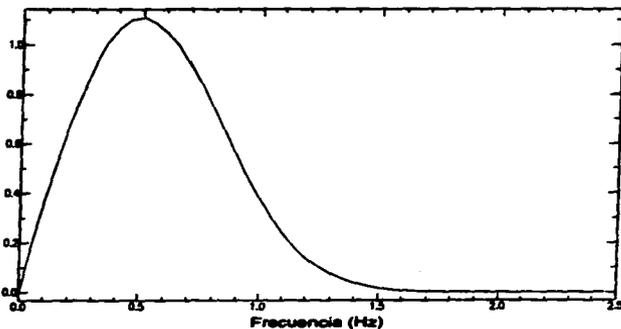


Figura 89. Dependencia en frecuencia del pulso de Gabor ($f=0.5$ Hz) utilizado para simular la fuente.

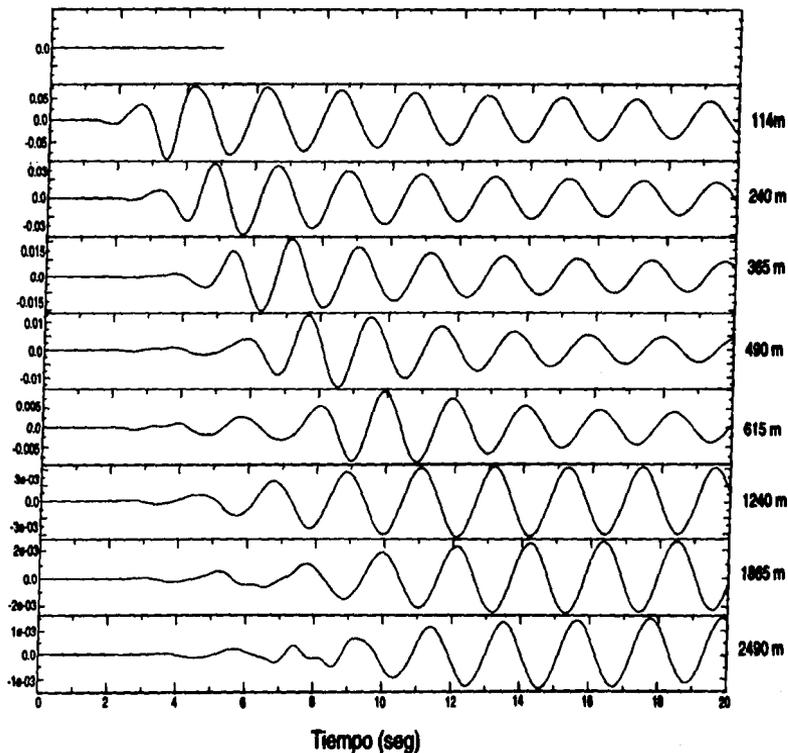


Figura 90. Sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas P en dirección horizontal. El primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio, los siguientes muestran la respuesta del suelo registrada en varios receptores considerando la presencia del edificio.

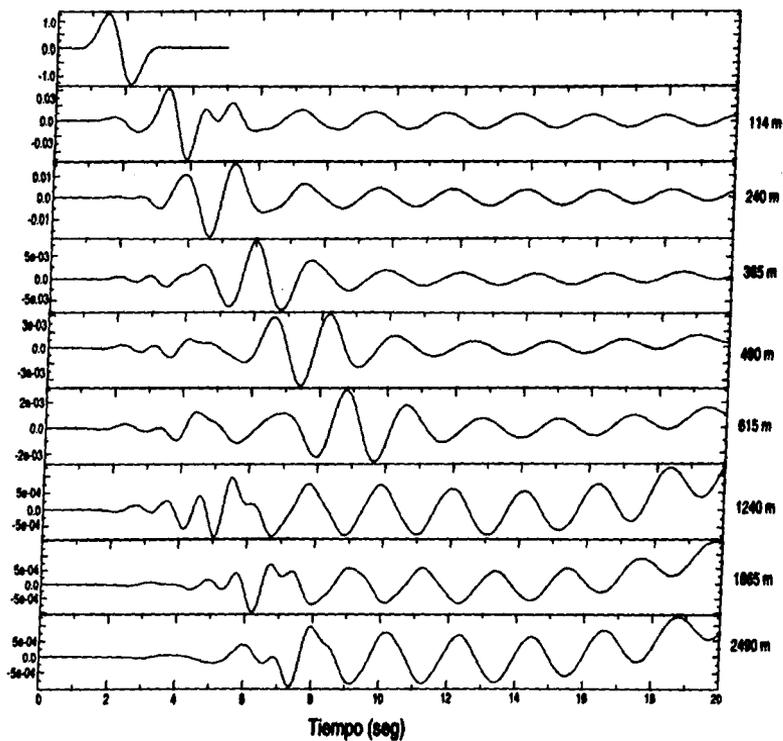


Figura 91. Sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas P en dirección vertical. El primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio, los siguientes muestran la respuesta del suelo registrada en varios receptores considerando la presencia del edificio.

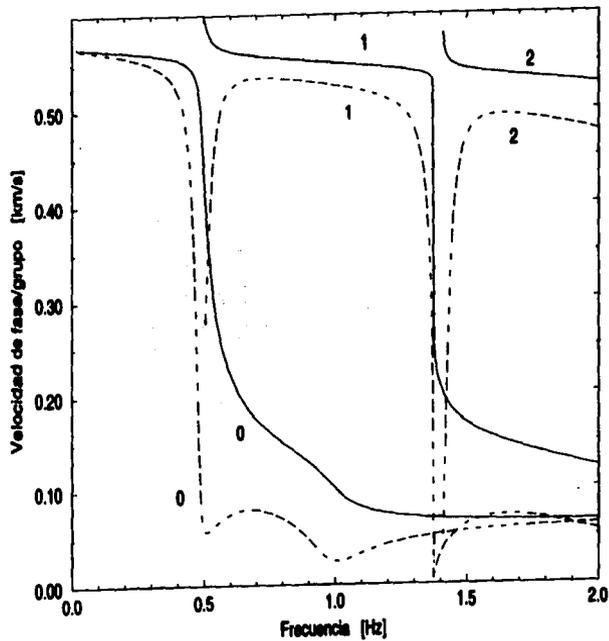


Figura 92. Curvas de velocidad de fase y de grupo para las ondas de Rayleigh, obtenidas del modelo de velocidades empleado en este estudio.

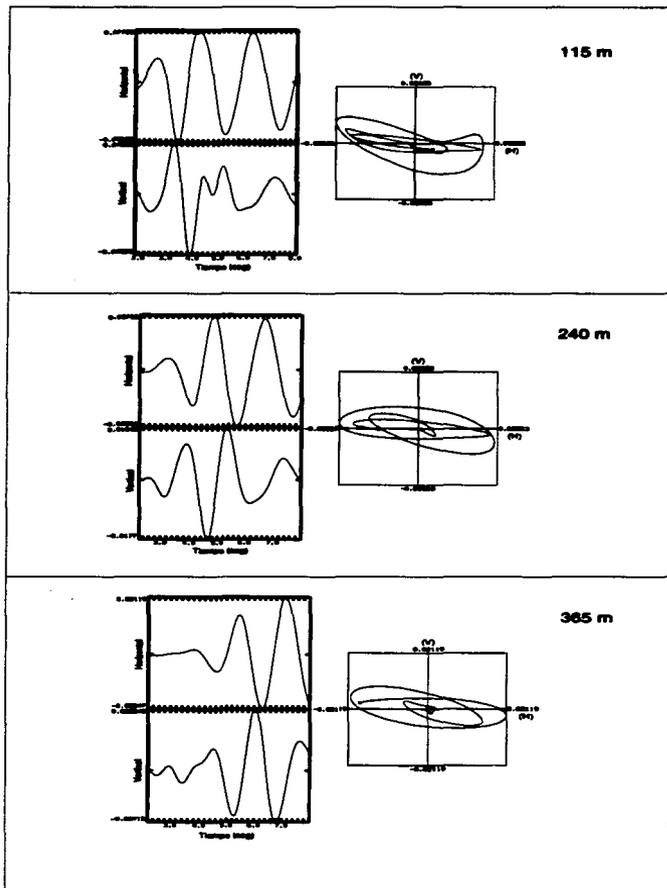


Figura 93. Movimiento de partícula horizontal sobre vertical del pulso común observado en las estaciones de campo libre localizadas a 115 m, 240 m y 365 m del edificio.

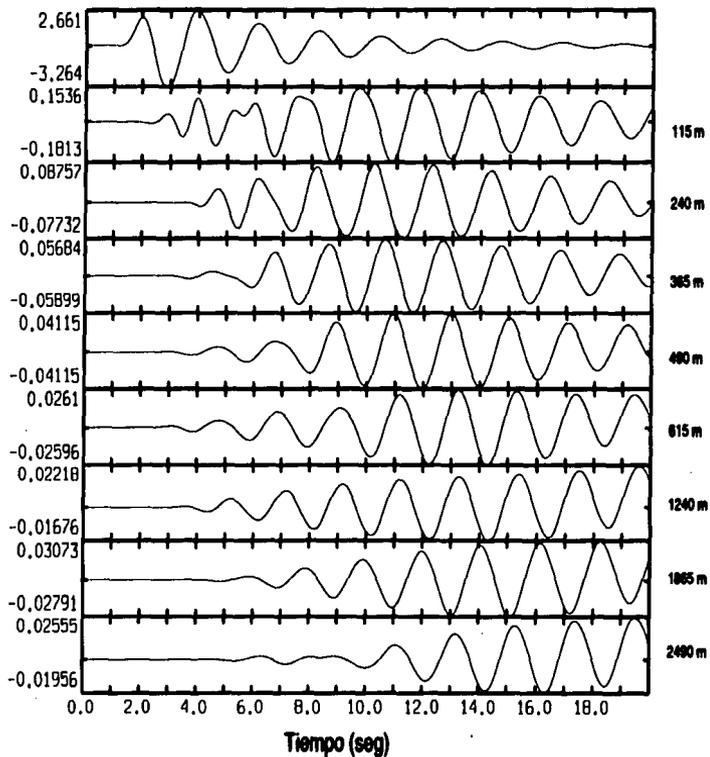


Figura 94. Sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas SV en dirección horizontal. El primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio, los siguientes muestran la respuesta del suelo registrada en varios receptores considerando la presencia del edificio.

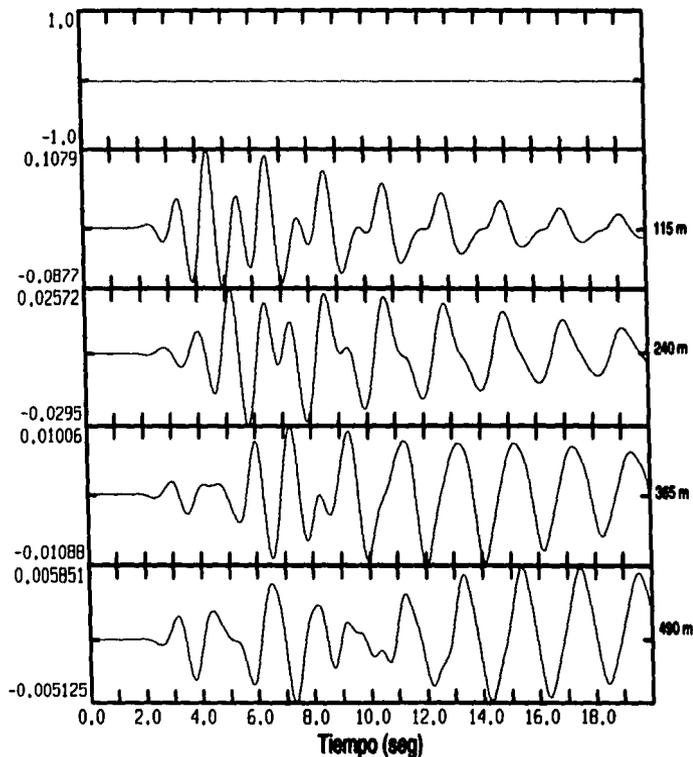


Figura 95. Sismogramas sintéticos para incidencia vertical de ondas SV en dirección vertical. El primer sintético representa los desplazamientos obtenidos en un estrato sobre un semiespacio, los siguientes muestran la respuesta del suelo registrada en varios receptores considerando la presencia del edificio.

CONCLUSIONES GENERALES

Trabajos teóricos recientes han dejado de manifiesto que los efectos de edificios grandes (desplantados sobre suelos blandos) sobre estaciones sismológicas cercanas, pueden ser considerables y que podría ser necesario modificar nuestro concepto de "campo libre" en los estudios del movimiento sísmico de la Ciudad de México. Con el propósito de mejorar nuestro conocimiento de este fenómeno, analizamos los registros para dos temblores: 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995. Estudiamos los registros obtenidos en 8 estructuras instrumentadas en la Ciudad de México y comparamos los registros (tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo) con los de las estaciones de "campo libre" más cercanas, pertenecientes a la Red Acelerográfica del Valle de México.

Con el fin de encontrar en los registros de "campo libre" picos en el espectro de amplitudes que coincidieran con la frecuencia fundamental de vibrar de los edificios cercanos, se calculó el modo fundamental de vibrar de las estructuras mediante el cociente espectral de los registros de la base, sótano o "campo libre" y los registros de la azotea. Conocidas las frecuencias fundamentales se localizaron las estaciones de la Red Acelerográfica del Valle de México que estaban cerca a los edificios y se calcularon los cocientes espectrales entre los componentes horizontales sobre vertical. De este análisis en frecuencia obtuvimos los siguientes resultados.

Para la zona de transición y de lomas no se pudo establecer una influencia clara de los edificios hacia los registros de "campo libre". Esto debido a que las condiciones propias de estos suelos no propician la aparición de ondas radiadas desde la estructura hacia el suelo. El estudio del movimiento de los edificios Plaza Córdoba y Jalapa (desplantados en la zona de lago) mostró que algunas frecuencias picos de los cocientes espectrales de la señales de "campo libre" tenían valores asociados a la frecuencia del sitio. De igual forma se pudo establecer que ciertas frecuencias picos tenían relación con el modo fundamental de vibrar de estas estructuras. La aparición de estos picos de frecuencias asociadas a la vibración de la estructura más cercana, sugiere la generación de ondas por parte de la estructura hacia el suelo.

Adicionalmente se hizo un análisis en el tiempo con el propósito de identificar trenes de onda que se propagaran de la estructura hacia las estaciones de "campo libre" cercanas, primero se asignó una base de tiempo común a los registros de los edificios y luego se integraron a los registros de "campo libre" ya alineados. En los registros de "campo libre" a menos de 1 km del edificio Plaza Córdoba, rotados en la dirección del edificio y filtrados en la banda de frecuencia de vibrar de la estructura, se lograron identificar trenes de onda comunes. Todas las evidencias en este análisis en el tiempo sugieren que el edificio Plaza

Córdoba al ser excitado generó ondas de Love las cuales se propagaron a las estaciones cercanas con velocidades de grupo de 22.3 m/s y 34.8 m/s. Los trenes de onda observados en los registros de “campo libre” cercanos al edificio Jalapa se atribuyen a la superposición de efectos de los edificios cercanos cuya frecuencia fundamental coincide con la del propio edificio Jalapa. Eso ocasiona que en los registros no se observe claramente el efecto del edificio Jalapa, en la banda de frecuencias en la que el edificio resuena.

Al emplear un esquema de diferencias finitas para simular la respuesta de un edificio (con características similares a las del Jalapa) sobre un medio heterogéneo viscoelástico, ante incidencia de ondas P-SV, se pudo establecer que el movimiento del edificio generaba ondas superficiales las cuales se apreciaban hasta al menos 365 m de distancias con un 1.5 % menos de amplitud que la onda incidente. Al comparar estos resultados con los del análisis en el tiempo, concluimos que el edificio Jalapa puede estar modificando las características del movimiento del suelo cercano a él.

La aparición o no de trenes de onda en las estaciones de “campo libre” cercanas a edificios, parece depender de dos condiciones típicas de la zona de lago que son: 1) suelo blando; 2) coincidencia de las frecuencias fundamentales de las estructuras y las capa de suelo. De igual forma de la localización de la estación de “campo libre” con respecto al edificio. En el análisis en el tiempo no se pudo observar como la distancia entre el edificio y la estación de “campo libre” influye en la aparición de trenes de onda.

Algunos registros de “campo libre” presentaron gran duración, la cual no podemos atribuir a la influencia de los edificios. Este fenómeno, apareció aún en los registros filtrados a frecuencias que no estaban asociadas a la frecuencia fundamental de vibrar de las estructuras instrumentadas cercanas. Consideramos que el aumento en la duración de los registros está más relacionado con las condiciones locales o con el umbral de disparo del aparato. En cuanto a la amplitud de los registros, el aumento o la disminución de esta, en algunos caso no pareció depender de la distribución espacial o de la orientación de las estaciones de “campo libre” con respecto a los edificios instrumentados.

Lo expuesto anteriormente vislumbra la influencia de las estructuras altas desplantadas en la zona de lago de la Ciudad de México, sobre los registros de estaciones cercanas, cuestionando la validez misma del concepto de “campo libre”. Estos resultados sugieren que en estudios de efectos de sitio es conveniente considerar la presencia de las estructuras en la superficie, si se quiere predecir el movimiento del terreno en forma acertada. De igual forma existe la posibilidad de que el espectro de piso de un edificio aislado sea modificado cuando tenga otra estructura cercana a él.

REFERENCIAS

- Alcántara, L., D. Almora, G. Castro, J. Ylizaliturri, M.A. Macías y H. Sandoval (1995a). El sismo del 14 de septiembre de 1995 (Mw=7.3) en el edificio Metro Juárez, acelerogramas obtenidos, Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 12 pp.
- Alcántara, L., D. Almora, G. Castro, J. Ylizaliturri, M.A. Macías y H. Sandoval (1995b). El sismo del 14 de septiembre de 1995 (Mw=7.3) en el edificio Plaza Córdoba, acelerogramas obtenidos, Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, 26 pp.
- Alterman, Z.S. y F.C Karal Jr. (1968). Propagation of elastic waves in finite difference methods, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 367-398.
- Bard, P.-Y., M. Campillo, F.J. Chávez-García y F.J. Sánchez-Sesma (1988). A theoretical investigation of large and small scale amplification effects in Mexico City valley, *Earthquake Spectra*, **4**, 609-633.
- Bard, P.-Y. y A. Wirgin (1995). Effects of built environment on "free field" motion for very soft, urbanized sites, *Proc. Third Intl. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthq. Engrg. and Soil Dyn.*, 2-7 april, St. Louis Missouri, **II**, 549-555.
- Bayliss, A., K.E. Jordan, B.J Lemesurier y E. Turkel (1986). A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic wave, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 1115-1132.
- Bazán, E. y R. Meli (1985). *Manual de diseño sísmico de edificios*. Editorial Limusa, tercera edición, México.
- Boore, D.M. (1972). A note on the effect of simple topography on seismic SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 275-284.
- Bocherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.
- Bocherdt, R.D. y J.F. Gibbs (1976). Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the earthquake *Bull. Seism. Soc. Am.* **66**, 467-500.
- Campillo, M., J.C. Gariel, K. Aki y F.J. Sánchez-Sesma (1989). Destructive strong ground motion in Mexico City: source, path and site effects during the great 1985 Michoacan earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 1718-1735.
- Celebi, M. (1992). Highlights of Loma Prieta reponses of four tall buildings, *Proc. X World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, **7**, 4039-4044.

- Chávez-García, F.J., G. Pedotti, D. Hatzfeld y P.-Y. Bard (1990). An experimental study of site effects near Thessaloniki (Northern Greece), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**,784-806.
- Chávez-García, F.J. (1991). Diffraction et amplification des ondes sismiques dans le bassin de Mexico, Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble, 331 pp.
- Chávez-García, F.J., F.J. Sánchez-Sesma, M. Campillo y P.-Y. Bard (1994). El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio, *Física de la Tierra*, **6**, 157-200.
- Chávez-García, F.J., J. Ramos-Martínez y E. Romero-Jiménez (1995). Surface-wave dispersion analysis in Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1116-1126.
- Chávez-García F.J. y J. Cuenca (1995). Site effects in Mexico City urban zone. A complementary study, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **15**, 141-146.
- Chávez-García, F.J. y E. Romero-Jiménez (1996). Análisis de los acelerogramas registrados en la Ciudad de México durante el temblor del 25 de abril de 1989. Evidencias de una posible explicación para la gran duración del movimiento fuerte, *Revista de Ingeniería Sísmica*, **54**, 1-15.
- Chiaruttini, C., S. Grimaz y E. Priolo (1996). Modelling of ground motion in the vicinity of massive structures, *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**, 75-82.
- CIRES (1996a). Primer informe bimestral de operación y conservación del sistema de instrumentación acelerográfica del conjunto Plaza Inn, en *Insurgentes*, San Ángel, período enero-febrero.
- CIRES (1996b). Primer informe semestral del proyecto de operación y conservación del sistema de instrumentación acelerográfica de las oficinas centrales del IMSS, período enero-junio.
- Contreras, O., G. Ibarrola y B. Frintana (1989). Sismo del 25 de abril de 1989. Acelerogramas captados en la Ciudad de México, Informe RA-DF-4 del CIRES.
- Dablain, M.A. (1986). The application of high-order differencing to the scalar wave equation, *Geophysics*, **51**, 54-66.
- Duval, A. M. (1994). Determination de la réponse d'un site aux séismes à L'aide du bruit de fond: evaluation expérimentale, Ph.D. Thesis, Université Paris, **6**, 265 pp.
- Espíndola, J.M. y Z. Jiménez (1984). Terremotos y ondas sísmicas. Una breve introducción, cuaderno del Instituto de Geofísica, UNAM.
- Espinosa, J.M., B. Frontana y G. Ibarrola (1991). Red básica de acelerógrafos digitales del Distrito Federal, Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, Vol I, Num 1, abril, 4-11.

- Field, E.H. (1994). Earthquake site response estimation, Ph.D. Thesis, Columbia University, New York, 303 pp.
- Field, E.H., A.C. Clement, K.H. Jacob, V. Aharonian, S.E. Hough, P.A. Friberg, T.O. Babaian, S.S. Karapetian, S.M. Hovanesian y H.A. Abramian (1995). Earthquake site response in Giumri (formely Leninakan), Armenia, using ambient noise observations, Bull. Seism. Soc. Am., **85**, 349-353.
- Figueroa, J. (1987). Isosistas de grandes temblores ocurridos en la república mexicana. Publicaciones del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Flores, F. (1996). Análisis espectral de datos sísmicos, tesis de licenciatura presentada a la Facultad de Ingeniería, UNAM, 67 pp.
- Fundación ICA (1993). Efectos del movimiento del terreno sobre las edificaciones. Informe de actividades 1987-1992, 159-226.
- Gazdag, J. (1981). Modeling of the acoustic wave equation with transform method, Geophysics, **46**, 854-859.
- González, R. (1995). Análisis y predicción de comportamiento dinámico de estructuras usando técnicas de identificación de sistemas y linealización equivalente. Tesis doctoral presentada a la DEPFI, UNAM.
- Herrmann, R.B. (1987). Computer programs in Seismology. Saint Louis University.
- Jarpe, S.P., H. Cramer, B.E. Tucker y A.F. Shakal (1988). A comparasion of observations of ground response to weak and ground motion at Coalinga, California, Bull. Seism. Soc. Am., **78**, 421-435.
- Kawase, H y K. Aki (1989). A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City, Bull. Seism. Soc. Am., **79**, 1361-1382.
- Kelly, K.R., R.W. Ward y R.M. Alford (1976). Synthetic seismograms: A finite-difference approach, Geophysics, **41**, 2-27.
- Kudo, K (1995). Practical estimates of site response. State-of-the-art report, Proc. of the Fifth Int. Conf. on seismic Zonation, 17-19 October, Nice, Ouest Editions Presses Academiques.
- Lermo, J., F.J. Chávez-García, R. Montecillo y H. Mijares (1992). Estimación de períodos dominantes y amplificación relativa en zonas faltantes (transición y lago) del D.F. (Informe final), Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.
- Lermo, J y F.J. Chávez-García (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records, *Soil. Dyn. Earthq. Engrg.*, **13**, 413-423.
- Lomnitz, C. (1990). Mexico 1985: the case for gravity waves, *Geophys. J. Int.*, **102**, 569-572.
- López, B. y R. Quaa (1993). Red de observación sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1992, Informe del Centro Nacional de Prevención de Desastres, febrero, 201 pp.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 639-666.
- Meli, R. y J.A. Ávila (1989). The Mexico Earthquake of September 19, 1985. Analysis of building response, *Earthquake Spectra*, **5**, 1-17.
- Moczo, P. (1989). Finite-difference technique for SH-waves in 2-D media using irregular grids: application to the seismic response problem, *Geophys. J. Int.*, **99**, 312-329.
- Moczo, P., E. Bystrický, J. Kristek, J.M. Carcione y M. Bouchon (1997). Hybrid modeling of P-SV seismic motion at inhomogeneous viscoelastic topographic structures, Submitted to the *Bull. Seism. Soc. Am.*
- Muriá D. y R. González (1990). Propiedades dinámicas del edificio Instrumentado con acelerógrafos del Instituto Mexicano del Petróleo. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Muriá D., R. González y J.M. Espinosa (1993). Efectos de interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un edificio instrumentado, *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. 555, 118 pp.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR o RTR* **30**, 1, February.
- Ohmizato, T. y B.A. Couet (1997). A free surface boundary condition for including 3D topography in the finite-difference method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 494-515.
- Ortiz, J. (1979). *Subrutina Smooth*
- Ortiz, M. y S.K. Singh (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of México City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 24-43.

Ovando, E., A. Sámano y R. Contreras (1993). Ensayes de cono sísmico en la Ciudad de México. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Quaas, R., J. Prince, M. Oñate, D. Almora, P. Pérez, J.M. Velasco, S. Medina, R. Carrera, R. Vázquez, J.G. Anderson, P. Bodin y J. Brune (1985). The Michoacan, Guerrero, Mexico earthquake of September 1985: Preliminary description of the strong motion accelerograph array, report GAA-1B, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Quaas, R., J.A. Otero, S. Medina, J.M. Espinosa, H. Aguilar y M. González (1993). Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes: Catálogo de Estaciones Acelerográficas 1960-1992, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 209 pp.

Quaas, R. (1995). 35 años de instrumentación y registro de temblores fuertes en México. La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1), Monografía No. 2, Unión Geofísica Mexicana, 191-197.

Rollins (1987). Mencionado por Seed (1990).

Ramos-Martínez, J., F.J. Chávez-García, E. Romero-Jiménez, J.L. Rodríguez-Zuñiga y J.M. Gómez-González (1997). Site effects in México City: Constrains from surface wave inversion of shallow refraction data, J. App. Geophys., 36, 157-165.

Roca, A. (1989). Instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas, Física de la Tierra, 1, 131-153.

Romo, M. (1991). Interacción dinámica suelo-estructura en suelos blandos. Memorias del Simposio Interacción Suelo-Estructura y Diseño Estructural de Cimentaciones, México, 129-144.

Romo, M. y A. Bárcena (1994). Análisis de la interacción dinámica suelo-estructura en la Ciudad de México, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 565, 87 pp.

Sánchez-Sesma, F.J., S. Chávez-Pérez, M. Suárez, M.A. Bravo y L.E. Pérez-Rocha (1988). On the seismic response of the Valley of México, Earthquake Spectra, 4, 569-589.

Sánchez-Sesma, F.J., L.E. Pérez-Rocha y E. Reinoso (1993). Ground motion in Mexico City during the April, 1989, Guerrero earthquake, Tectonophysics, 218, 127-140.

Seed, H.B. (1990). Influencia de las condiciones locales del suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos. Octava Conferencia Nabor Carrillo, 98-139.

Seligman, T.H., J.M. Alvarez-Tostado, J.L. Mateos, J. Flores y O. Novaro (1989). Resonant response models for the Valley of Mexico -I ; the elastic inclusion approach, Geophys. J. Int., 99, 789-799.

Sheriff, R.E y L.P. Geldart (1991). Exploración Sismológica. Volumen II. Procesamiento e interpretación de datos. Noriega-Limusa, México.

Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena y R. Quaaas (1988a). A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site, Earthquake Spectra, 4, 653-673.

Singh, S.K., E. Mena y R. Castro (1988b). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacán earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data, Bull. Seism. Soc. Am., 78, 451-477.

Singh, S.K. y M. Ordaz (1993). On the origin of the long coda observed in the lake-bed strong-motion records of Mexico City, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1298-1306.

Soriano, A. (1989). Interacción suelo-estructura. Modificación del movimiento, Física de la Tierra, 1, 287-308.

Trifunac, M.D. (1972). Interaction of a shear wall with the soil for incident plane SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 63-68.

Virieux, J. (1984). SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, Geophysics, 49, 1933-1942.

Virieux, J. (1986). P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, Geophysics, 51, 889-901.

Wong, H.L., M.D. Trifunac y B. Westermo (1977). Effects of surface and subsurface irregularities on the amplitudes of monochromatic waves, Bull. Seism. Soc. Am., 67, 353-368.

Zeevaert, L. (1963). Mediciones y cálculos sísmicos durante los temblores registrados en la Ciudad de México en mayo de 1962, Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Vol 1, No.2.