

97
2 ef



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL
MOVIMIENTO DINÁMICO DE UN
EDIFICIO INSTRUMENTADO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

SERGIO SANTIAGO MEJÍA



DIRECTOR DE TESIS:

M. I. MARCO ANTONIO MACÍAS CASTILLO

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-042/95

Señor
SERGIO SANTIAGO MEJIA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MARCO ANTONIO MACIAS CASTILLO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"ANALISIS ESTADISTICO DEL MOVIMIENTO DINAMICO DE UN EDIFICIO
INSTRUMENTADO"**

- INTRODUCCION**
- I. INSTRUMENTACION EXISTENTE EN DIVERSOS NIVELES DE LA ESTRUCTURA**
 - II. EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION**
 - III. VARIANZA Y DESVIACION ESTANDAR DE CADA REGISTRO Y SU RELACION CON ESPECTROS DEL MOVIMIENTO**
 - IV. FACTORES DE AMPLIFICACION DE DESVIACION ESTANDAR**
 - V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 21 de abril de 1995.
EL DIRECTOR



ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*jbr

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

DIRECCION
60-1-1995/5329

C. DIRECTOR GENERAL DE ADMINISTRACION ESCOLAR
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
P R E S E N T E .

Por medio de la presente, se hace constar que el Sr. SANTIAGO MEJIA SERGIO, con número de cuenta 87202830, que estudia la carrera de INGENIERO CIVIL que se imparte en esta Facultad, realizó trabajos en EL INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM, en el periodo del 19 de Octubre de 1994 al 19 de Abril de 1995. Por lo cual ha cumplido con el SERVICIO SOCIAL, en los términos que establece el Reglamento General del Servicio Social que en la materia tiene dispuesto la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se extiende la presente para los fines que convengan al interesado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., 2 de mayo de 1995

EL DIRECTOR

Ing. José Manuel Covarrubias Solís

Facultad de Ingeniería
Oficina de Servicio Social

JMCS/PGyC/MFS/JAPP

A mis padres:

Jacinto Santiago y Célida Mejía.
Con amor y respeto; porque lo que alcanzo es sobre sus hombros, por su dedicación y amor a la vida, a la familia y al trabajo.

A mis hermanos

Con cariño; deseando que a pesar de las carencias y adversidades que se presenten, mantengamos firmes nuestras convicciones, nuestro espíritu de lucha y nuestra unión para alcanzar la siguiente meta.

A Janitz y Andrea

... y a todos los que vengan.

A mis abuelitos

... a los que ya se adelantaron y a los que aún nos acompañan.

A todas las personas con quienes he compartido algo en esta vida.

Y... a todos los que han sentido un sismo.

Agradecimientos

Quiero dar gracias y dedicar este trabajo a la profesora Tomasa García Morales, a los profesores Gustavo López Aquino y Gregorio Quijas Durán, quienes guiaron mis primeros pasos en la Escuela Primaria "Atonaltzin".

Al personal (académico, administrativo y alumnado) de la Escuela Secundaria Técnica # 14 de Reyes Mantecón Oax., porque convivimos en forma casi familiar durante tres años.

A los profesores del CCH "Oriente" por su labor docente, de concientización y lucha contra las injusticias, en especial a Ruperto Gaona Peláez profesor de matemáticas y Roberto Torres González de ciencias de la salud; por su apoyo, amistad y consejos.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM; porque en sus aulas, laboratorios y bibliotecas aunados al estudio, se comprenden muchos fenómenos inherentes a la vida; a todos los profesores de la misma con admiración y respeto, porque transmiten sus conocimientos con orgullo y en forma desinteresada.

Al personal del Instituto de Ingeniería, en particular al del área de Instrumentación Sísmica; al M. I. Marco Antonio Macías, quien aceptó dirigir y revisar este trabajo, al M. I. Leonardo Alcántara porque aceptó mi ingreso a este Instituto y me permitió colaborar en los proyectos de investigación que se llevan a cabo, al Ing. Héctor Sandoval por su amistad y consejos.

A "Chucho", Gerardo, Yanet, Anita, Isabel, Angeles, Diana, Xóchitl, "Nico", Fernando, Emilio, Miguel Angel, Oswaldo, Mauricio, "Richard", Alberto, Armando y Julieta, etc. por su compañía.

A todos las personas que me han brindado su amistad en forma desinteresada, Tomás Zúñiga, Omega Hernández, Marcos Ocampo, Armando Acevedo, etc. ... a familiares y no familiares que me han soportado todo este tiempo.

A todos ellos, donde quiera que se encuentren, ... sinceramente, muchas gracias.

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL
MOVIMIENTO DINÁMICO DE UN
EDIFICIO INSTRUMENTADO**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes	1
2. Instrumentación sísmica de edificios	2
3. Instrumentación sísmica en edificios del Distrito Federal	3
4. Alcance de la presente tesis	7
I. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE EN DIVERSOS NIVELES DE LA ESTRUCTURA	
I.1 Introducción	8
I.2 Ubicación de los equipos	11
I.3 Características de la instrumentación	17
II. EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICIÓN	
II.1 Registros obtenidos en el edificio Plaza Córdoba	19
II.2 Registros obtenidos en la estación # 56	42
III. VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE CADA REGISTRO Y SU RELACIÓN CON ESPECTROS DEL MOVIMIENTO	
III.1 Varianza y Desviación Estándar	50
III.2 Espectros de Fourier	51
III.3 Relación entre la Varianza y los Espectros de Potencia	60
IV. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
IV.1 Factores de amplificación de desviación estándar y de aceleraciones máximas	75
IV.2 Funciones de Tránsito	79
IV.3 Configuraciones modales del edificio	86

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones	89
V.2 Recomendaciones	90

BIBLIOGRAFÍA

Referencias	91
-------------	----

APÉNDICE

1. Conceptos de Sismología	A-1
2. Sismicidad en el mundo y en México	A-3
3. Medición de los sismos	A-5
4. Magnitud e Intensidad de un temblor	A-5
5. Varianza y Espectros de Potencia	A-7
6. Valores normalizados	A-9
7. Función de Tránsito	A-10

INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes

El desarrollo de las grandes aglomeraciones humanas, en las que se construyen edificios de varios niveles y estructuras variadas y complicadas, ha planteado el problema y la necesidad de realizar construcciones que puedan resistir la acción de los terremotos en las mejores condiciones posibles. Los procesos de la ciencia y la tecnología han facilitado esta tarea encontrando las bases necesarias para la resolución de este problema.

Aunque los terremotos han existido siempre, no se encuentran en el pasado formulaciones de sistemas constructivos sismorresistentes, con excepción de algunas precauciones de tipo elemental. Quizá sea debido a que las construcciones normales eran de altura reducida y estaban realizadas con barro, madera, arcilla cocida en forma de ladrillos o de piedra con materiales aglomerantes o sin ellos, que permitían tener secciones más robustas y por ende aumentaban su resistencia a la acción de las fuerzas horizontales producidas por los sismos. Por otra parte, los daños sufridos en estas construcciones estaban limitados por sus propias dimensiones (secciones robustas y altura reducida). Tampoco existía una ciencia de la construcción, ni los conocimientos científicos necesarios para proyectar edificios resistentes a los terremotos. Hemos de aceptar que la humanidad consiguió los elementos necesarios para crear una ciencia de la construcción hace solamente un siglo. Durante milenios el hombre construyó sin más base que su experiencia e ingenio, que le permitieron como máximo, formular leyes y métodos empíricos.

Toda la experiencia acumulada a través del tiempo enseña que los efectos de un sismo se traducen en fuerzas horizontales que actúan en las bases de las estructuras, lo que lleva a la idea de rigidizar los edificios mediante enlaces horizontales y verticales, que puedan resistir dichas fuerzas sin deformarse considerablemente, completados con diagonales o enlaces en forma de cruces.

Los primeros intentos para aclarar científicamente los problemas planteados por las acciones sísmicas y aplicar las conclusiones a la práctica se deben a Robert Mallet (ref. 1), que en el año 1848 presentó un estudio sobre la dinámica de las construcciones, en la Academia de Ciencias de Irlanda.

En los últimos años los conocimientos sobre los terremotos y la ingeniería sísmica han experimentado un proceso importante tanto en lo que se refiere a las investigaciones teóricas como a las experimentales que posteriormente deben ser aplicadas a la práctica.

Aunque hubo cambios importantes en los materiales y técnicas de construcción, que han permitido obtener métodos y fórmulas suficientemente precisas para el cálculo de las fuerzas producidas por los sismos, se ha planteado la necesidad de conocer con mayor detalle la acción del fenómeno sísmico sobre los edificios lo que implica el registro del mismo en distintos sitios de interés.

Como consecuencia de esto se ha implantado la instrumentación sísmica en las estructuras para obtener información tangible y cuantitativa de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos que induce un movimiento sísmico. Esta información es de gran importancia para los ingenieros civiles dedicados al diseño, construcción y supervisión de estructuras, pues conociendo las aceleraciones es posible estimar las fuerzas de inercia que se generan en las estructuras las cuales deben ser resistidas adecuadamente por los elementos estructurales de las mismas.

2. Instrumentación Sísmica de Edificios

Los métodos de análisis y diseño sísmico de edificios incluyen algunos parámetros cuyos valores no pueden justificarse por deducciones racionales inobjectables, sino que se han fijado de manera de producir resultados que concuerden con el desempeño observado de las construcciones sometidas a sismos severos. Por otro lado, las características dinámicas de las estructuras no son fáciles de estimar correctamente, debido a las incertidumbres existentes en la determinación de las propiedades elástico-geométricas de sus elementos, a la variación de las propiedades al presentarse comportamiento inelástico, así como a incertidumbres en cuanto a la colaboración a la resistencia y rigidez de elementos no estructurales; también es poco frecuente incluir la participación de la cimentación y del suelo circundante en la determinación de las propiedades dinámicas de un edificio.

Por carecer de medidas cuantitativas de la excitación impuesta a los edificios y de la respuesta de los mismos, las conclusiones con respecto al desempeño de las construcciones son necesariamente subjetivas y, por tanto, sujetas a controversias.

El proceso de calibración de los métodos analíticos de diseño solo podrá ser plenamente convincente cuando se base en una amplia comprobación cuantitativa de las acciones que realmente se imponen a los edificios y de la respuesta que éstos experimentan, o sea, en el análisis de registros obtenidos de la instrumentación sísmica de una vasta gama de edificios.

En años recientes se ha extendido enormemente la instrumentación sísmica del terreno, lo que ha permitido grandes avances en el conocimiento que experimenta el terreno durante un sismo y de las grandes diferencias que tiene este movimiento por las condiciones locales de topografía y propiedades del subsuelo. Muy limitado ha sido, por el contrario, los frutos que se han tenido de la instrumentación sísmica de edificios. En parte porque el esfuerzo dedicado a este aspecto ha sido mucho más limitado que el que se ha puesto en la medición del movimiento del terreno, y en parte porque la mayoría de los registros obtenidos son de movimientos de poca amplitud. Otros factores importantes son que en muchos casos no se contaba con información suficientemente detallada de las propiedades del edificio, como para elaborar modelos refinados de su respuesta, y que la instrumentación era muy limitada para que pudiera describir en forma completa la respuesta estructural.

2.1 Objetivos que se persiguen con la Instrumentación Sísmica de edificios

Los objetivos que se persiguen con la instrumentación sísmica de edificios son varios y tienden a conocer diversas variables que expliquen su respuesta, como son:

- a) Avanzar en la comprensión de la amplificación de las ondas sísmicas.
- b) El movimiento espacial en campo libre, tanto en la superficie del terreno, como en estratos profundos.
- c) La transmisión de energía cinética medida en campo libre, hacia la base de la construcción.
- d) El movimiento tridimensional de la base del edificio.
- e) La amplificación del movimiento de los pisos superiores.
- f) Los niveles de amortiguamiento, tanto del suelo, como del sistema suelo-estructura.
- g) Conocer detalladamente la interacción entre el suelo y la estructura, y finalmente:
- h) La distribución espacial de los movimientos de la estructura y su relación con resultados de modelos matemáticos que comúnmente se emplean en la práctica profesional.

La instrumentación sísmica de edificios y la interpretación de los registros de la respuesta ante sismos severos constituyen, probablemente la línea más productiva de investigación para mejorar los métodos de diseño sismorresistente de edificios.

3. Instrumentación Sísmica en edificios del Distrito Federal

Considerando que México se encuentra enclavado en el llamado Cinturón de Fuego del Pacífico (fig. 1), la región de mayor actividad sísmica en el mundo y ante las fallas estructurales ocurridas principalmente en edificios del Distrito Federal debidas a los sismos de septiembre de 1985, se vio la necesidad de realizar estudios más profundos sobre el comportamiento de estructuras excitadas por movimientos fuertes del terreno.

Los sismos en México son causados principalmente por la interacción de las placas de Rivera y Cocos con respecto a la placa Norteamericana (figs. 1 y 2). También se tienen problemas sísmicos causados por la falla de San Andrés en Baja California y el norte de Sonora, así mismo a lo largo del eje Neovolcánico, que atraviesa al país de lado a lado en su parte central.

Los movimientos sísmicos en la ciudad de México presentan características particulares que requieren ser estudiadas directamente en el sitio. El movimiento que experimenta el terreno durante un sismo es diferente

del que se tiene el la mayoría de otros lugares, por su gran duración y por su contenido de vibraciones de baja frecuencia. Por otra parte, la respuesta de edificios sobre los estratos de terreno compresible está fuertemente influida por la interacción del suelo y la estructura. Lamentablemente, en septiembre de 1985 no pudo contarse con ningún registro de la respuesta sísmica de edificios, así que la interpretación del comportamiento de los mismos tuvo que basarse exclusivamente en la evaluación de los daños.

A partir de esa fecha los esfuerzos de instrumentación se han enfocado principalmente al registro del movimiento del terreno. Esta instrumentación ha dado ya frutos extraordinarios, en cuanto a la comprensión de la amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México y de las diferencias de los movimientos que se presentan en los diferentes sitios por efecto de las condiciones del subsuelo. Mucho más limitada ha sido la atención prestada a la instrumentación de edificios. Existe actualmente pocas estructuras instrumentadas, lo cual es insuficiente, si se piensa en la gran variedad de tipos de estructuras y de condiciones de subsuelo y de cimentación para las cuales se requiere conocer el comportamiento. Por esta razón el Instituto de Ingeniería (Idel) de la UNAM a través de su Coordinación de Instrumentación Sísmica decidió instalar redes acelerográficas en algunos edificios del Distrito Federal.

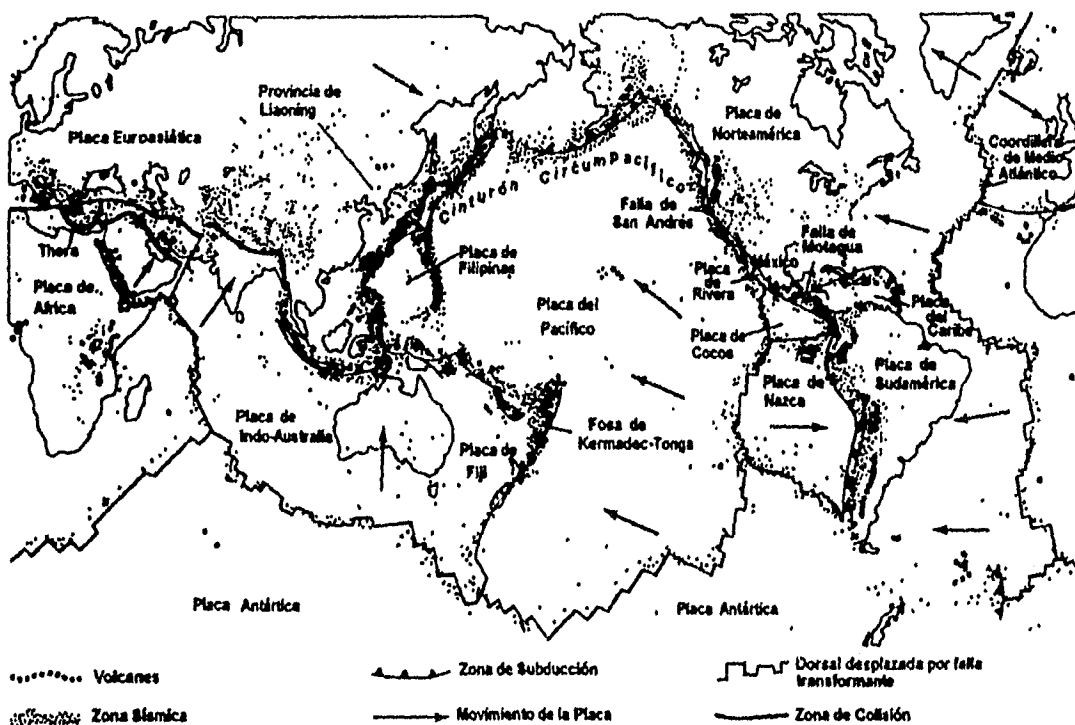


Figura 1. Principales placas tectónicas de la Corteza terrestre.

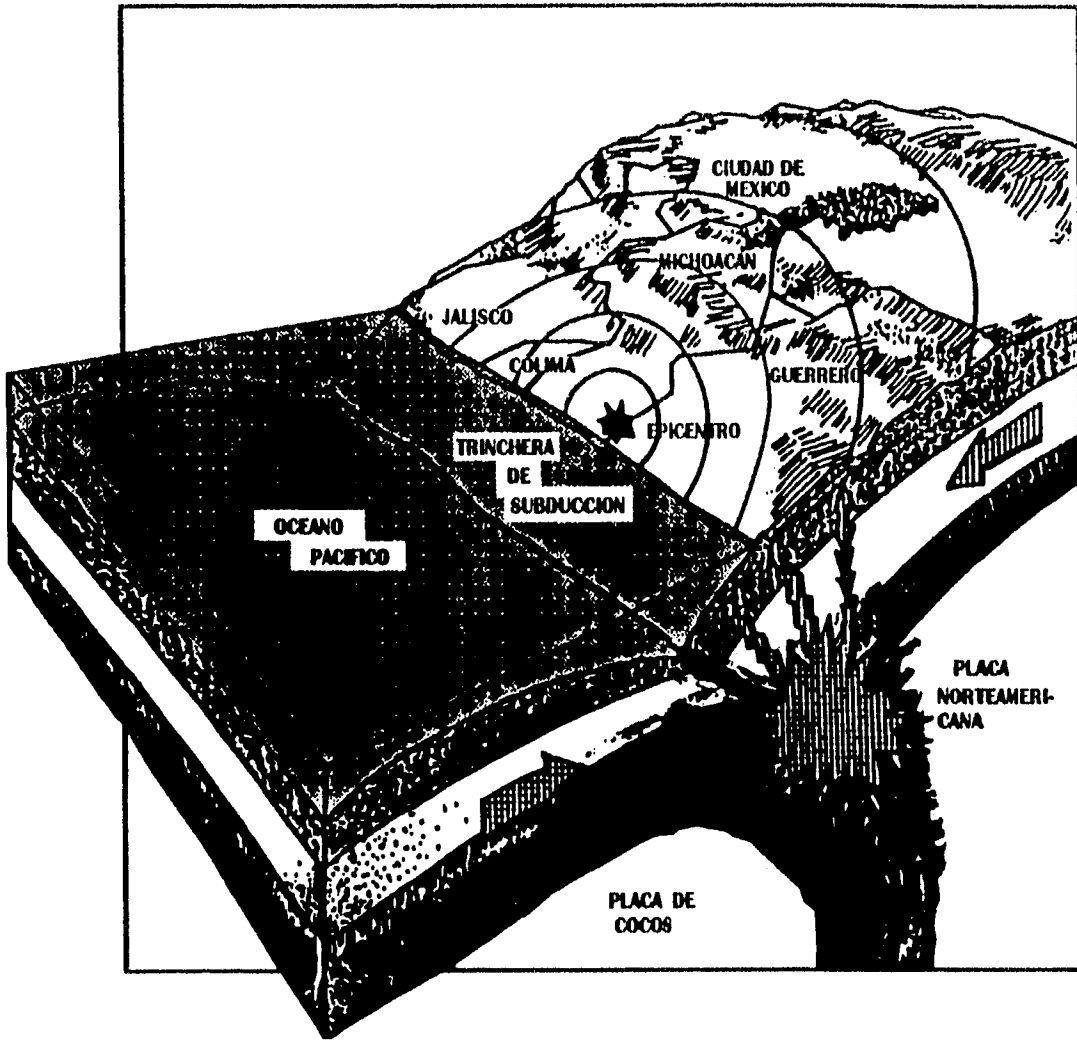


Figura 2. Penetración de la placa de Cocos debajo de la placa Norteamericana. Fenómeno de subducción.

3.1 Selección de los edificios como prospectos para instrumentarse

Para obtener el mayor provecho de la instrumentación sísmica en las estructuras se establecieron los siguientes criterios en su selección:

- a) Tipo de edificios cuyo uso es generalizado en la ciudad, estructura de concreto basada en marcos con muros estructurales perfectamente definidos, planta regular, análisis y metodología típicas de la época en la que se construyeron y que además en su construcción se emplearon materiales comunes en la ciudad de México.
- b) Contar con información en planos, memorias de cálculo que incluyeran cargas y criterios de diseño, bitácora de construcción y propiedades de sus materiales para generar un modelo matemático representativo de su comportamiento.
- c) Estar localizado en una zona del valle de México con una alta sensibilidad sísmica (zona de lago), y en la cual se presentan altos niveles de aceleración, velocidad y desplazamiento durante sismos.
- d) Tener un rango de altura entre 6 y 20 niveles dado que esta es la altura promedio de los edificios que sufrieron daños severos durante los terremotos de septiembre de 1985.
- e) Contar con la aprobación de los propietarios para instalar y mantener en operación el sistema de medición.
- f) Tener seguridad y vigilancia del sistema de medición seleccionado, así como acceso libre al personal encargado de la operación y mantenimiento de los instrumentos.

En la selección final de las estructuras a instrumentar se examinaron cerca de 40 edificios con diversas características se realizaron mediciones de vibración ambiental (ref. 2) para obtener sus periodos naturales de vibración así como una recopilación de sus características estructurales. Los resultados obtenidos se emplearon en la selección final y en la ubicación de los instrumentos. Se revisó la memoria de cálculo de los edificios mediante modelado en computadora (ref. 3). Como resultado de lo anterior se escogieron 9 inmuebles (tabla 1) que tienen diversas características pero que a su vez cumplen con los requisitos antes descritos.

Edificio	No. Niveles
Guerrero No. 117	11
Culiacán No. 123	15
Hamburgo y Oxford	21
Reforma No. 175	20
Durango No. 49	12
Av. México 129	16
Metro Juárez	6
Plaza Córdoba	17
Jalapa No. 15	13

Tabla 1. Ubicación de los edificios estudiados como prospectos para instrumentarse.

Finalmente el Idel se decidió por instrumentar los edificios, Metro Juárez, Jalapa y Plaza Córdoba; siendo este último el que se analizará en el presente trabajo.

4. Alcance de la presente tesis

En el presente trabajo se da una breve descripción de lo que es la instrumentación sísmica de edificios y de los objetivos que se pretenden alcanzar con este proyecto. En seguida se trata la instrumentación sísmica en edificios del Distrito Federal, haciendo énfasis en el edificio Plaza Córdoba (PC). También se realiza un análisis mediante parámetros estadísticos de varianza y desviación estándar de los registros de aceleración más importantes obtenidos en la historia de la instrumentación sísmica del edificio PC; posteriormente, estos resultados se comparan con los obtenidos mediante un análisis hecho utilizando un programa de análisis tridimensional elástico lineal. Por último se presentan los apéndices en los cuales se definen los términos empleados y se plantea la teoría en la que se sustenta el desarrollo de la tesis.

I. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE EN DIVERSOS NIVELES DE LA ESTRUCTURA

I.1 Introducción

Después de los catastróficos efectos de los sismos de septiembre de 1985 (ref. 4) y particularmente en la ciudad de México, se vio la necesidad de tener un mejor conocimiento de la respuesta del suelo y de las estructuras ante una sollicitación dinámica de dicha naturaleza, por lo que se realizó un esfuerzo importante para incrementar la instrumentación sísmica de tal manera que se tuviera una buena cobertura de las diferentes zonas geotécnicas de la ciudad. Actualmente existen del orden de 170 acelerógrafos en la ciudad, sin embargo la mayoría está destinada a medir las aceleraciones que experimenta el suelo y solo algunos están instalados en las estructuras (edificios, presas, sistemas de conducción de agua, etc.). La expansión de la red sísmica ha permitido realizar estudios enfocados a conocer las diferencias que presenta el movimiento sísmico en las zonas del valle, y con base en estos resultados se modificó su microzonificación. En realidad para poder hablar de una instrumentación sísmica completa es necesario registrar el movimiento en el subsuelo, en el terreno libre y en la estructura; así podremos conocer como llega la onda sísmica, la forma en que se transmite a la estructura y finalmente los efectos que provoca sobre ella.

Existen instrumentaciones de edificios en otros países (ref. 5), e instrumentados comúnmente en el sótano a media altura y en la azotea.

I.1.1. Descripción del edificio

El primer edificio instrumentado en la ciudad de México (Edificio Plaza Córdoba) se encuentra ubicado en la calle de Córdoba 42, entre las calles de Puebla y Durango, colonia Roma (figura I.1). Situado en una zona del valle de México donde normalmente se presentan altos niveles de aceleración, velocidad y desplazamiento durante sismos.

La estratigrafía de esta zona (ref. 6) se compone en forma ascendente de la formación arcillosa inferior con 10 m de espesor, sobre el cual se encuentra un estrato de 2 m de arena y 3 m de limo; formación arcillosa superior de 30 m y finalmente un relleno superficial de 2 m.

El edificio Plaza Córdoba es una estructura de concreto reforzado de 17 niveles (fig. I.2), cimentado sobre 266 pilotes de fricción de sección triangular que penetran 27 m dentro del subsuelo. Consta de un sótano con muros perimetrales de concreto reforzado, planta baja (de 38 m x 54 m), mezzanine, varios niveles de estacionamiento y una torre de 12 niveles (de 32 m x 40 m); la altura total del inmueble es de 51 m. Esta característica de tener estacionamiento en los niveles inferiores y oficinas en los superiores, es común en edificios modernos en la ciudad de México.

Sufrió ligeros daños durante los sismos del 19 y 21 de septiembre de 1985, los cuales fueron reparados, además de realizarse un refuerzo mediante la colocación de muros de rigidez de concreto en toda su altura y la sustitución de muros de mampostería por muros de concreto. Se han realizado mediciones para determinar sus periodos principales de vibración natural en ambos ejes y se ha modelado en computadora para lo cual se cuenta con la información completa de planos, memoria de cálculo, etc.

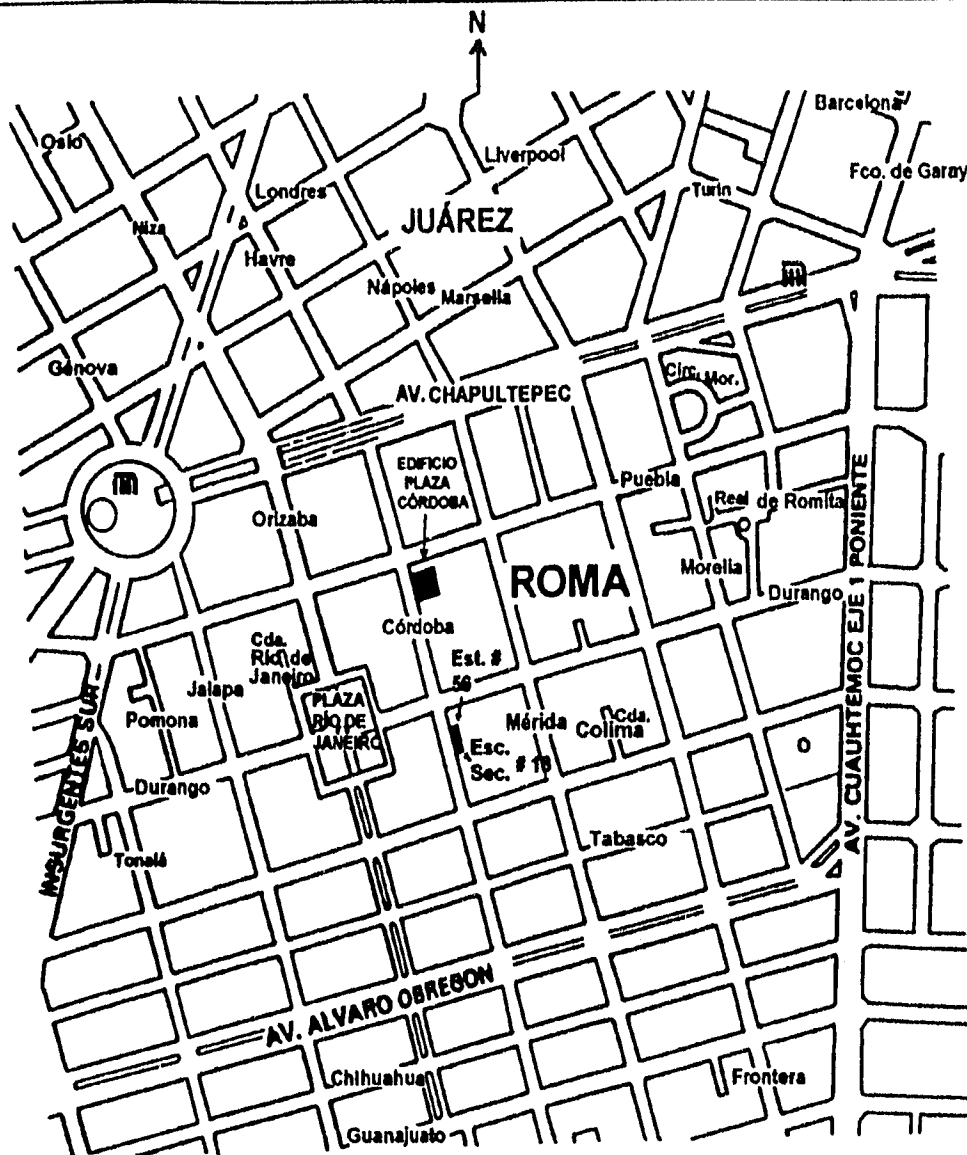


Figura I.1. Localización del edificio Plaza Córdoba y la estación # 56.

Existe un cambio importante de las características estructurales entre los niveles indicados como E8 y N1 (figura I.3). La transición entre los niveles de estacionamiento y la torre principal provoca efectos locales irregulares en su respuesta dinámica lo que se traduce en niveles altos de deformación. Los daños por los sismos de septiembre de 1985 se presentaron principalmente en esta zona.

Es posible considerar a este edificio de dos formas: como una sola estructura desde el sótano hasta la azotea, es decir considerarla en su totalidad; y la segunda, como una torre de oficinas desplantada en el nivel E8, que inicia en el nivel I y termina en la azotea (ref. 3).

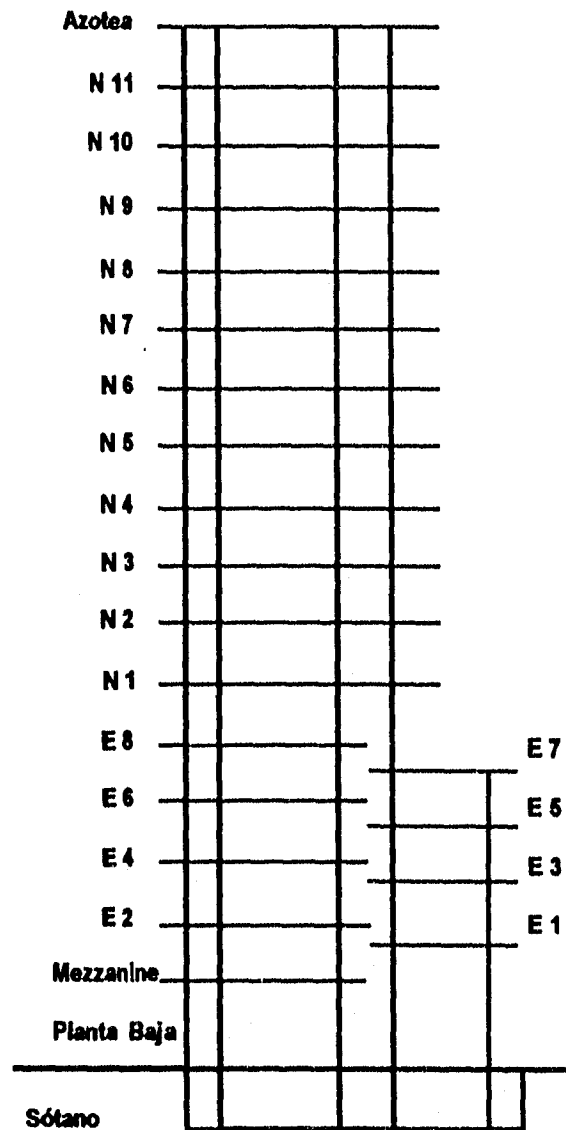


Figura I.3. Características de la superestructura del edificio Plaza Córdoba.

I.2. Ubicación de los equipos instalados

El número de equipos y la selección del lugar para su colocación se hizo con base en las características estructurales del edificio, (ref. 7) se instalaron 11 instrumentos digitales DCA-333 de tres componentes ortogonales cada uno. En la tabla I se indica el nombre de la estación y la clave asignada.

ESTACIÓN	CLAVE
Plaza Córdoba Azotea Centro	PCAC
Plaza Córdoba Azotea Este	PCAE
Plaza Córdoba Nivel 6 de Oficinas Centro	PC6C
Plaza Córdoba Nivel 6 de Oficinas Este	PC6E
Plaza Córdoba Nivel 8 de Estacionamiento Oeste	PCEO
Plaza Córdoba Nivel 8 de Estacionamiento Centro	PCEC
Plaza Córdoba Nivel 8 de Estacionamiento Este	PCE8
Plaza Córdoba Nivel 7 de Estacionamiento Este	PCE7
Plaza Córdoba Sótano Oeste	PCSO
Plaza Córdoba Sótano Centro	PCSC
Plaza Córdoba Sótano Este	PCSE

Tabla I. Nombre y clave de las estaciones de registro en el edificio Plaza Córdoba.

La ubicación de los aparatos se muestra en las figuras I.4 a I.7. Tres instrumentos (PCSO, PCSE y PCSC) fueron instalados en el sótano con la distribución mostrada en las figuras I.4 y I.5; los dos primeros (PCSO y PCSE) se situaron en las columnas extremas y el último (PCSC) en la parte central del sótano. Esta disposición permite conocer la rotación de la cimentación.

En el entrepiso E7-E8 se colocaron cuatro acelerógrafos (figs. I.4 y I.6), el PCEC, PCEO, PCE7 y PCE8, estos dos últimos colocados en los extremos de la misma columna. Para conocer el movimiento de entrada a la torre y para observar el movimiento diferencial de la columna.

En el cuerpo de la torre se instalaron cuatro aparatos; dos (PC6C y PC6E) en el nivel 6 de oficinas (figs. I.4 y I.7); y dos más (PCAC y PCAE) en la azotea del edificio (figs. I.4 y I.8), a fin de conocer las formas características de los modos de vibrar de la estructura

De esta forma los instrumentos colocados en PCSE, PCE7, PCE8, PC6E y PCAE se encuentran en una línea vertical sobre una columna al sureste del edificio que inicia en el sótano y termina en la azotea. Lo mismo ocurre con los aparatos instalados en PCSC, PCEC, PC6C y PCAC colocados en la esquina noroeste del cubo de elevadores (fig. I.4).

En la figura 1.4 se muestra la dirección positiva de cada sensor.

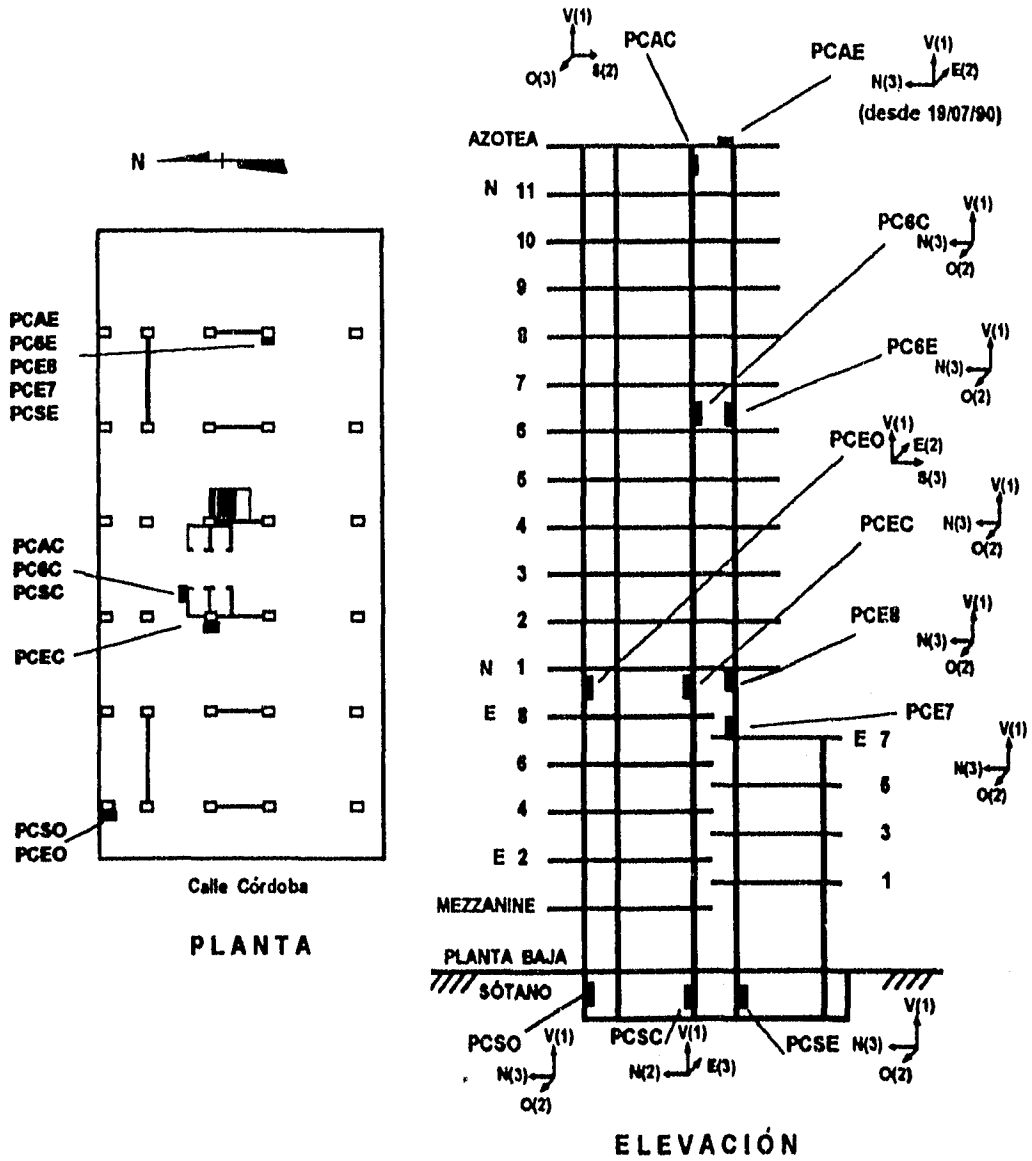
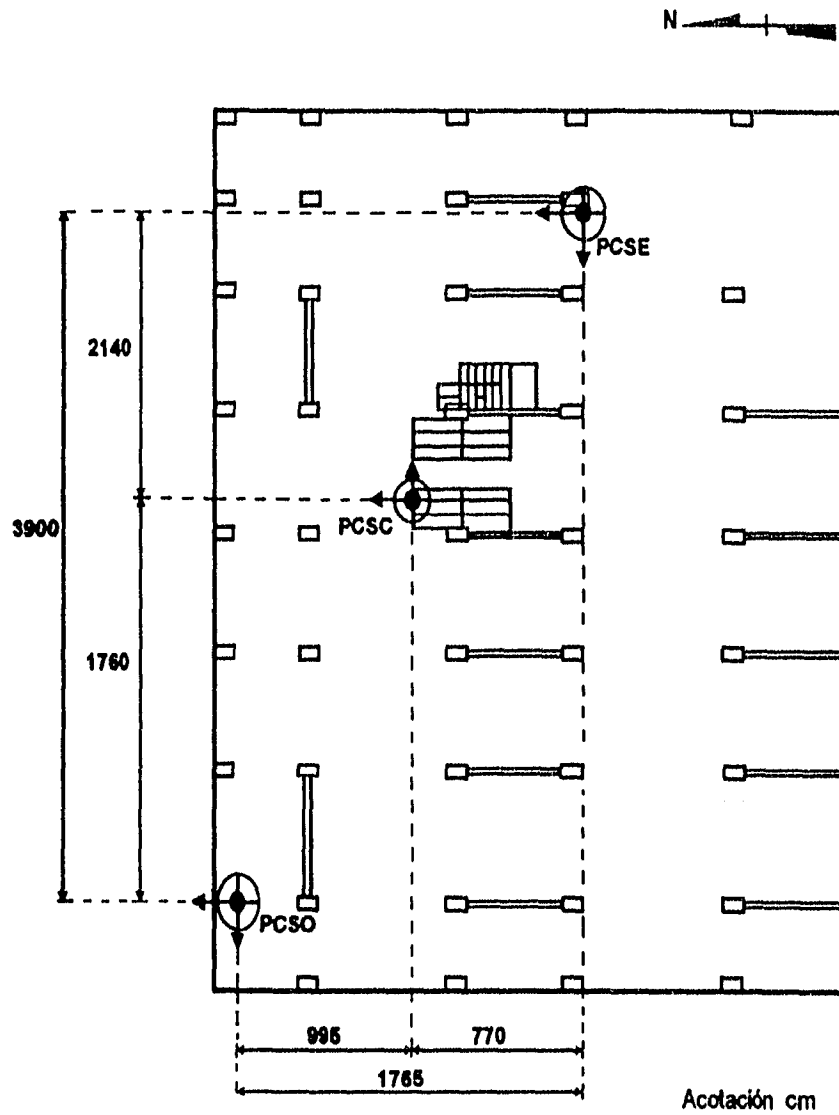


Figura 1.4. Instrumentación Sísmica del edificio Plaza Córdoba. Ubicación de los equipos y orientación de los sensores.



PLANTA SÓTANO

Figura I.5. Localización de los acelerógrafos en el sótano de edificio Plaza Córdoba.

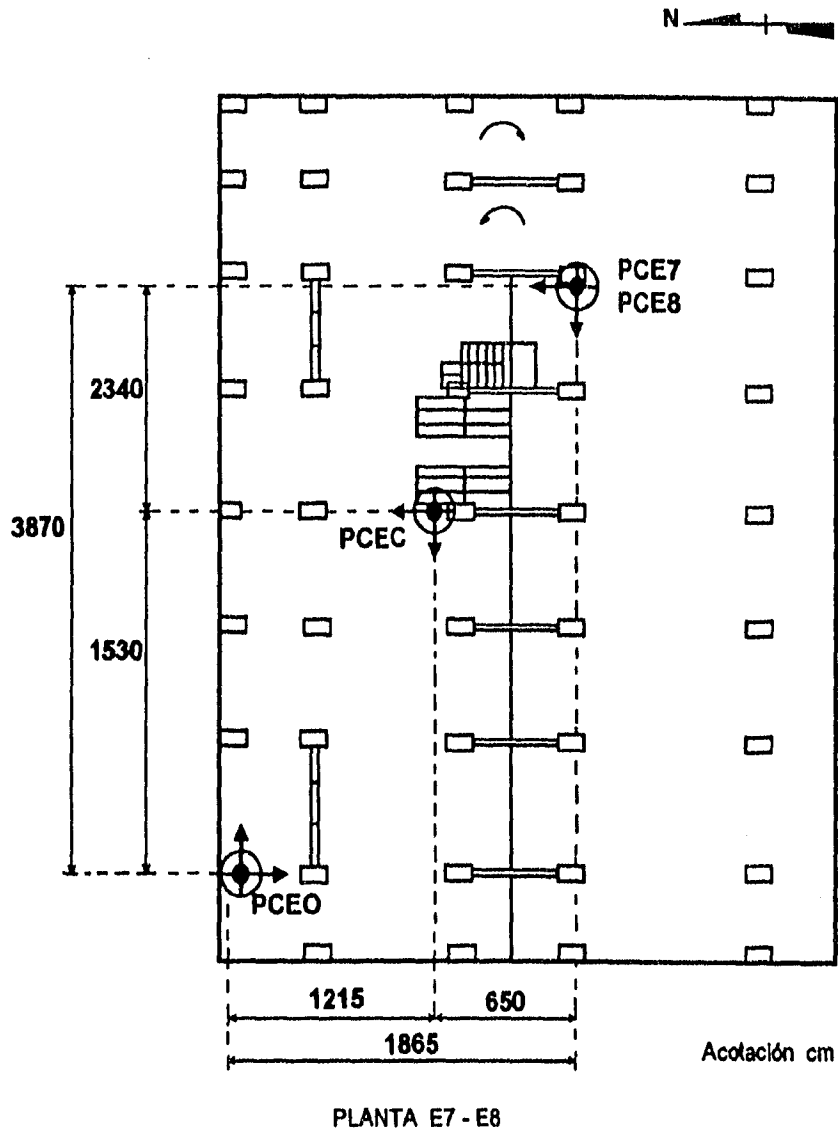


Figura I.6. Localización de los acelerógrafos en los niveles E7-E8 del edificio Plaza Córdoba.

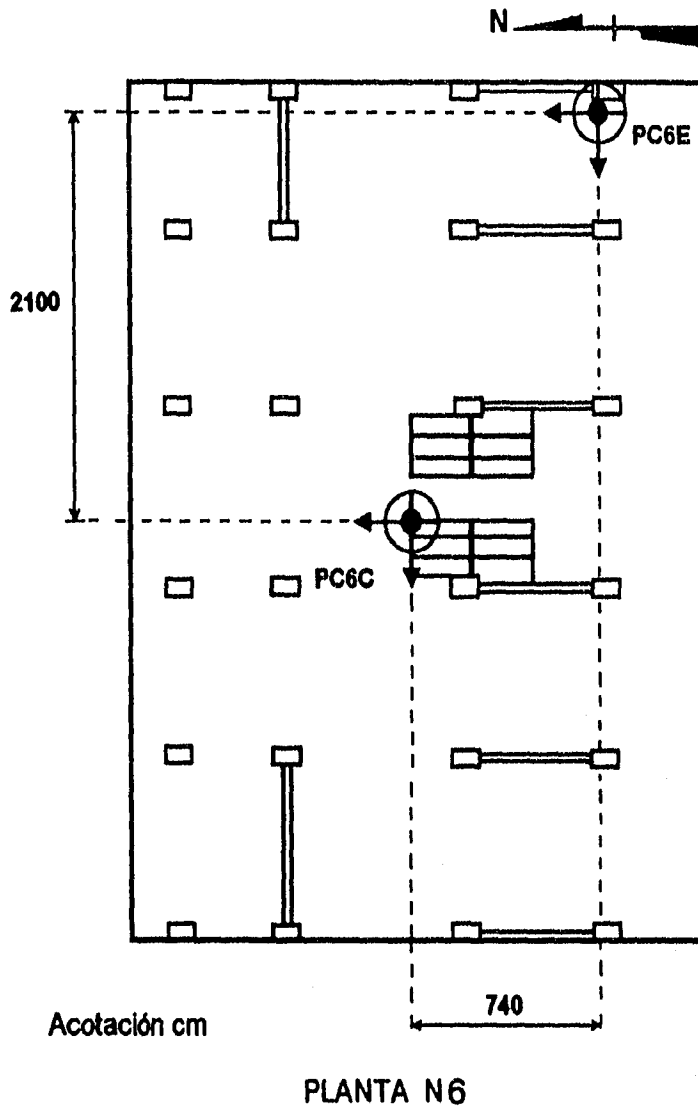


Figura I.7. Localización de los acelerógrafos en el nivel N6 de oficinas del edificio Plaza Córdoba.

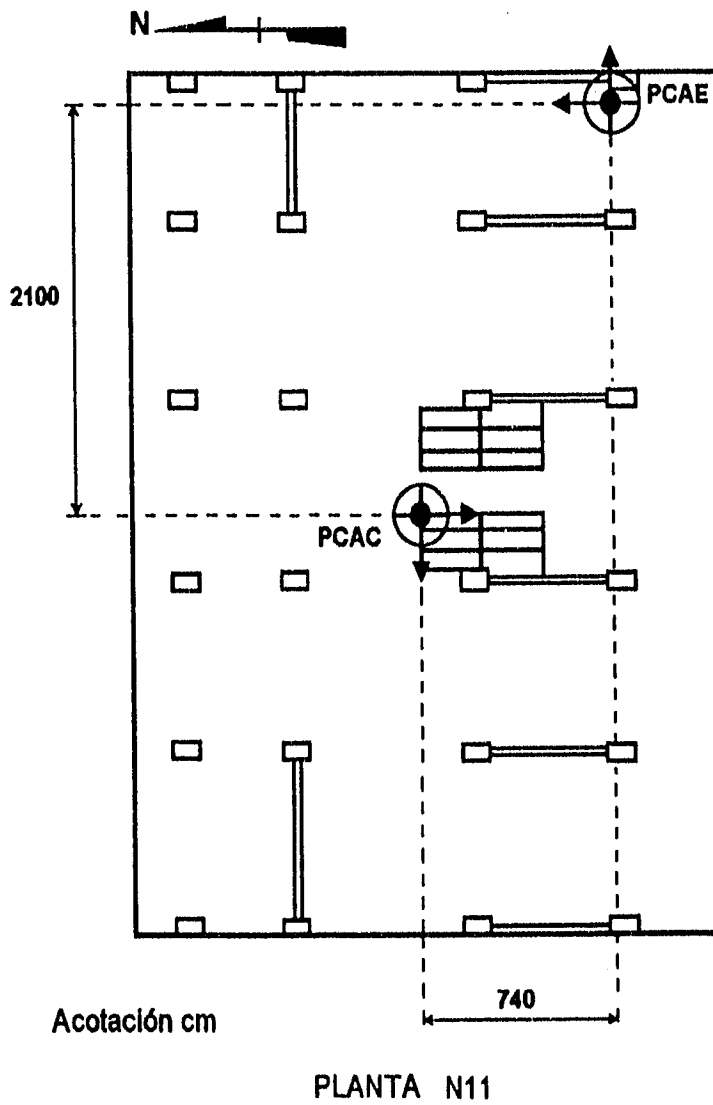


Figura I.8. Localización de los acelerógrafos en el nivel de azotea del edificio Plaza Córdoba.

I.3 Características de la instrumentación

Entre las características relevantes de la red se pueden mencionar las siguientes: un sistema de registro en memoria de estado sólido, la memoria de pre-evento es de 4 s y la de pos-evento de 15 s; se tiene una capacidad máxima de registro de 15 minutos y una velocidad de captura de 100 muestras por segundo por cada canal (tabla II).

Medio de registro	Memoria de estado sólido
Sensores	Servoacelerómetros Triaxiales Internos
Frecuencia natural	30.0 Hz
Amortiguamiento	0.70 del crítico
Escala	± 0.25 g, 0.50 g, 1.00 g y 2.00 g
Memoria de preevento	4.0 s
Tiempo de postevento	15.0 s
Tiempo total de registro	15.0 min.
Velocidad de muestreo	100 muestras/s/canal
Longitud de palabra del conversor A/D	12 bit, 11 + signo
Rango dinámico	72 dB
Umbral de disparo	Ajustable
Referencia de tiempo	Reloj interno, 1×10^{-6} y marcas externas
Alimentación	12 VCD, cargador y batería automotriz en flotación

Tabla II. Características de los acelerógrafos instalados en el edificio Plaza Córdoba.

La escala completa de registro de los sensores es de ± 0.25 g¹ a ± 2.0 g y los niveles de disparo de los mismos, son variables de acuerdo con el nivel en que se encuentran instalados y con la dirección en que registran los equipos (tabla III).

¹ g = 981 cm/s²

ESTACIÓN	ESCALA DE REGISTRO			NIVEL DE DISPARO (gal ¹)	
	NORTE-SUR	ESTE-OESTE	VERTICAL	HORZ.	VERT.
PCAC	±1.00 g [°]	±1.00 g	±0.25 g	11.0	2.75
PCAE	±2.00 g	±2.00 g	±0.50 g	12.0	3.00
PC6C [°]	±1.00 g	±1.00 g	±0.25 g	6.0	1.50
PC6E	±1.00 g	±1.00 g	±0.25 g	6.0	1.50
PCEC	±0.50 g	±0.50 g	±0.25 g	5.0	2.50
PCEO	±0.50 g	±0.50 g	±0.25 g	5.0	2.50
PCE8	±0.50 g	±0.50 g	±0.25 g	5.0	2.50
PCE7	±0.50 g	±0.50 g	±0.25 g	5.0	2.50
PCSC	±0.25 g	±0.25 g	±0.25 g	2.0	2.00
PCSO	±0.25 g	±0.25 g	±0.25 g	2.0	2.00
PCSE	±0.25 g	±0.25 g	±0.25 g	2.0	2.00

[°] g = 981 cm/s²

[°] Aparato maestro

¹ 1 gal = 1 cm/s²

Tabla III. Escala de registro y nivel de disparo de los sensores.

Todos los instrumentos se encuentran interconectados entre sí, y cuentan con una señal codificada común de tiempo a fin de obtener un registro sincrónico en todos los equipos, esto permitirá conocer con precisión el movimiento relativo de la estructura en sus distintos puntos de medición. La interconexión se basa en una configuración maestro-esclavo en la cual al alcanzarse la aceleración programada de disparo del aparato maestro, se ponen en operación simultánea todos los acelerógrafos. A su vez cada instrumento es capaz de iniciar su operación en forma autónoma cuando su propio sistema detecta un valor de aceleración mayor al umbral de disparo programado. Todos los aparatos se instalaron verticalmente y se fijaron a elementos estructurales, excepto el aparato ubicado en PCAE instalado horizontalmente en la azotea.

II. EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICIÓN

II.1 Registros obtenidos en el edificio Plaza Córdoba

La experiencia acumulada a través de los años ha planteado la necesidad de conocer con mayor detalle el fenómeno sísmico y sus efectos tanto en el terreno natural como en las estructuras, lo cual implica el registro de los mismos.

Después de casi 7 años de operación de la red acelerográfica del edificio Plaza Córdoba, hasta la fecha se han registrado varios eventos sísmicos, dentro de los cuales destacan los registros de los sismos del 11 y 31 de mayo de 1990, 1 de abril de 1991, 15 de mayo y 24 de octubre de 1993, 10 de diciembre de 1994 (refs. 8 a 13), y 14 de septiembre de 1995 (ref. 14).

Las figuras II.1 a II.21 muestran las historias de aceleración registradas por cada componente ortogonal en cada evento sísmico haciendo un arreglo vertical de la instrumentación en la estructura. Así los instrumentos colocados en PCSE, PCE8, PC6E y PCAE registran en una línea vertical sobre una columna del edificio, que inicia en el sótano y termina en la azotea. Lo mismo ocurre con los aparatos instalados en PCSC, PCEC, PC6C y PCAC colocados en la esquina noroeste del cubo de elevadores.

Las gráficas tienen un encabezado común donde se señalan características importantes del sismo y de las estaciones de registro, con la siguiente información:

A la izquierda se señalan los parámetros del sismo: fuente de donde se obtuvieron los datos, fecha del evento (año, mes, día y evento del día), hora en que ocurrió (hh:mm:ss.s (GMT)), coordenadas epicentrales (latitud Norte, longitud Oeste), magnitud (Mb, Ms y Mc) y profundidad H en (Km).

En la parte media se incluyen: clave del registro formada por la fecha y número de evento del día, distancia del epicentro a la estación de registro (en Km).

A la derecha se muestran las aceleraciones máximas (en Gal) producidas por el evento sísmico y la dirección en que fueron registradas por las estaciones que forman el arreglo.

En la parte inferior izquierda de la figura se muestran las historias de aceleración registradas en PCAC, PC6C, PCEC y PCSC y en la parte inferior derecha las obtenidas en PCAE, PC6E, PCE8 y PCSE.

Todas las gráficas están referidas a una misma escala lo que hace posible notar la amplificación de las aceleraciones en función con la altura del edificio.

Todos los epicentros de estos eventos sísmicos fueron localizados en la zona de subducción entre la placa de Cocos y la Norteamericana (Tabla II.1). En la cual se muestran además los parámetros más importantes de los eventos sísmicos registrados.

PARÁMETROS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS							
Fecha	11 Mayo 90	31 Mayo 90	1 Abril 91	15 Mayo 93	24 Oct 93	10 Dic 94	14 Sep 95
TIEMPO UTC* HH:MM:SS.ss	23:43:49.1	07:35:26.9	07:34:45.9	03:09:39.40	07:52:18.20	16:17:40.90	14:04:30.5
COORD. EPIC. Lat. N ^(o)	17.046	17.106	16.044	16.430	16.540	18.020	16.310
Long. O ^(o)	100.840	100.893	98.387	98.740	98.980	101.560	98.880
Dist. al D.F. (Km)	317.00	315.00	382.00	334.00	319.00	297.00	345.00
Azimut ^(o)	216.71	216.90	165.70	165.00	177.00	238.60	176.50
Profundidad Focal (Km)	12	16	26	20	19	20	22
Magnitud							
M _b	5.3	5.8	5.5	5.8	6.2		6.4
M _s	4.9	5.9	5.4	5.8	6.6		7.2
M _c	5.3	5.5	5.3	5.8	6.5	6.3	7.3

* Tiempo del Meridiano de Greenwich

Tabla II.1. Parámetros más importantes de los eventos sísmicos estudiados.

Todos los equipos han registrado estos eventos en sus tres componentes (dos horizontales y una vertical) a excepción del ubicado en PCEO, que no registró el primer evento (11 de mayo de 1990) y del ubicado en PCEC que no registró el tercer evento (1 de abril de 1991).



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO
 Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9005111
 Hora: 23:43:49.10 [GMT]
 Epic: 17.046, 100.840
 Mag: Mb=5.3, Ms=4.9
 H: 12 km

ESTACIONES
 EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9005111
 Distancia: 294 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS
 DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= -23.48 Gal	Azotea Este	PCAE= -19.72 Gal
PC6C= -11.88 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 10.56 Gal
PCEC= -5.60 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= -6.39 Gal
PCSC= -3.11 Gal	Sotano Este	PCSE= -3.65 Gal

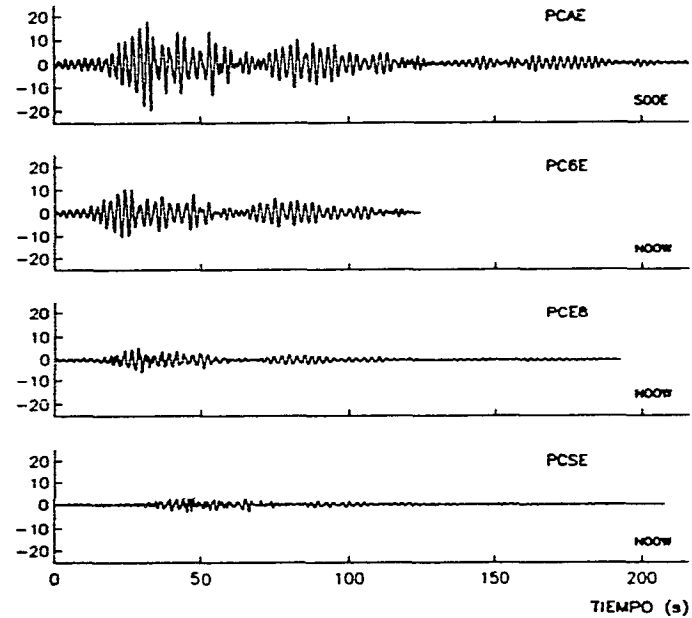
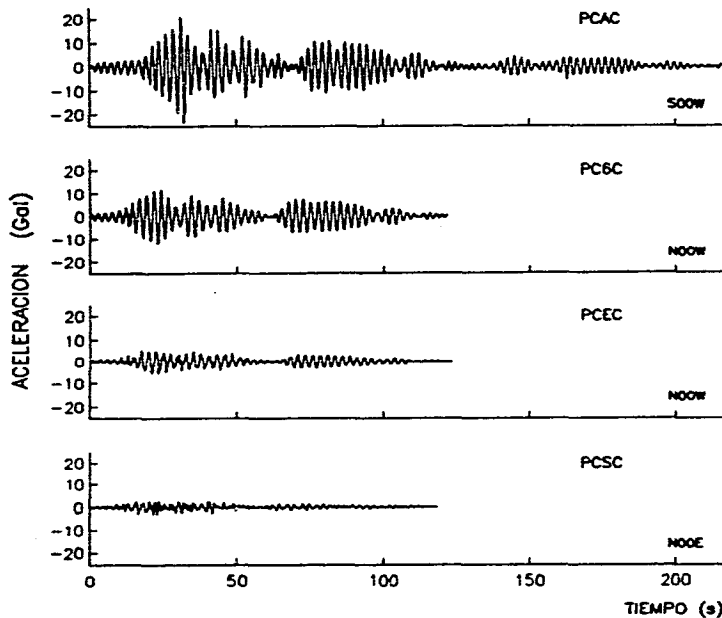
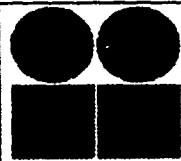


Figura II.1



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9005111
 Hora: 23:43:49.10 [GMT]
 Epic: 17.046, 100.840
 Mag: Mb=5.3, Ms=4.9
 Mc=5.3
 H: 12 km

ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9005111
 Distancia: 294 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION ESTE - OESTE

PCAC= 15.61 Gal	Azotea Este	PCAE= -15.64 Gal
PC6C= -8.05 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= -8.62 Gal
PCEC= -6.28 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= -6.21 Gal
PCSC= 2.44 Gal	Sotano Este	PCSE= -2.71 Gal

-22-

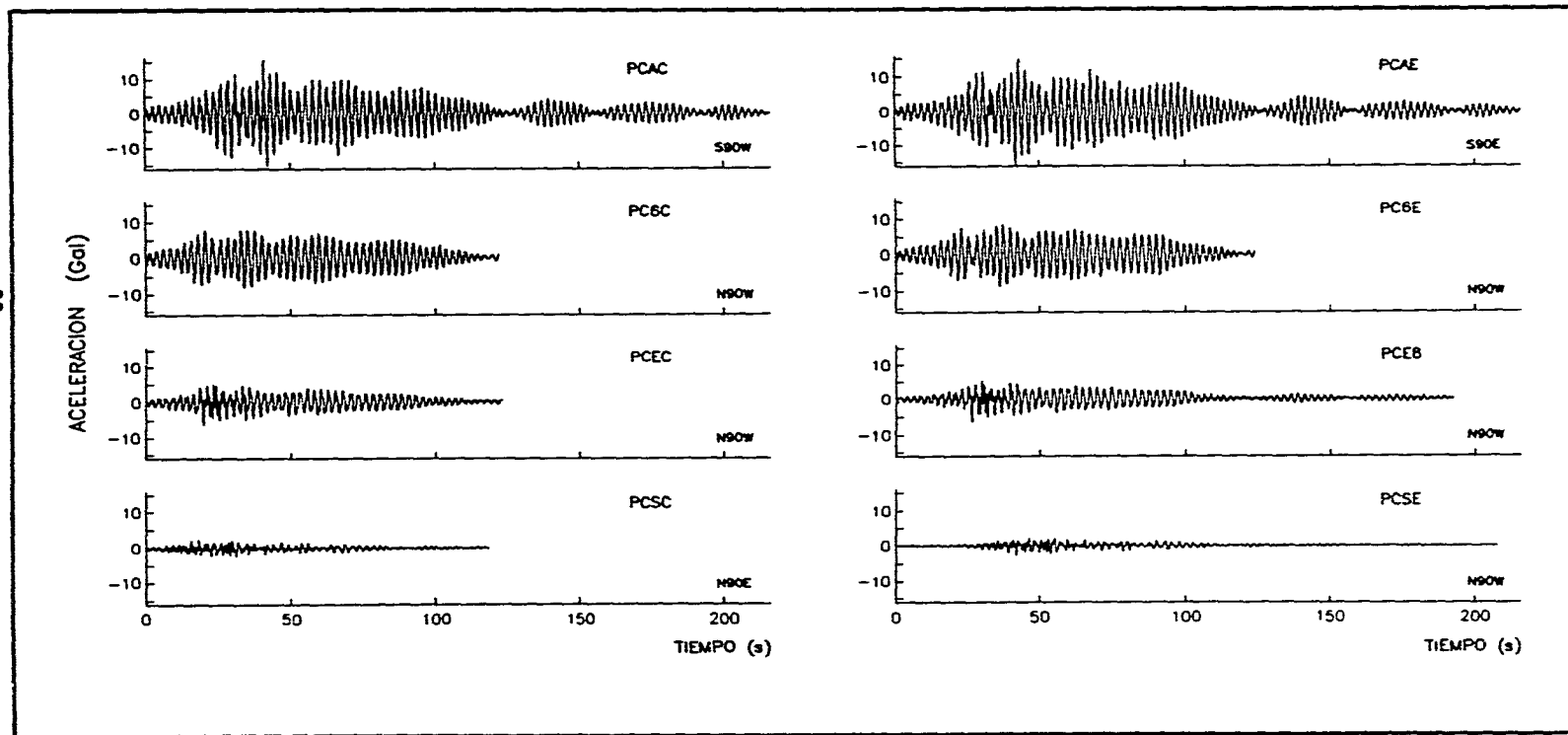
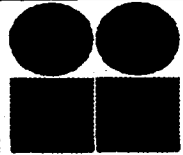


Figura II.2



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO
Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9005111
Hora: 23:43:49.10 [GMT]
Epic: 17.046, 100.840
Mag: Mb=5.3, Ms=4.9
H: 12 km

ESTACIONES
EDIFICIO PLAZA CORDOBA
Registro: 9005111
Distancia: 294 km
Azotea Centro PCAC=
Nivel 6 Centro PC6C=
Estac. Centro PCEC=
Sotano Centro PCSC=

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION VERTICAL

Azotea Este PCAE=
Nivel 6 Este PC6E=
Estac. 8 Este PCE8=
Sotano Este PCSE=

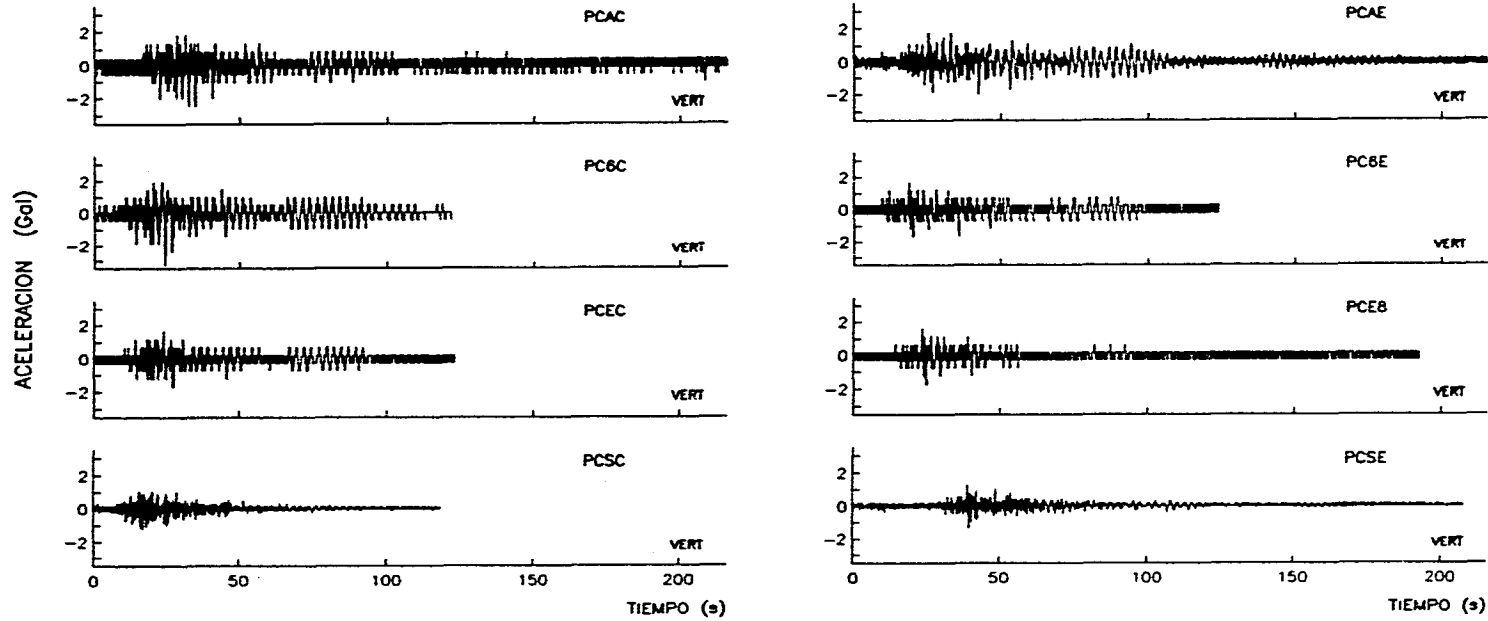


Figura II.3



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9005311
Horo: 07:35:26.90 [GMT]
Epic: 17.106, 100.893
Mag: Mb=5.8, Ms=5.9
H: 16 km

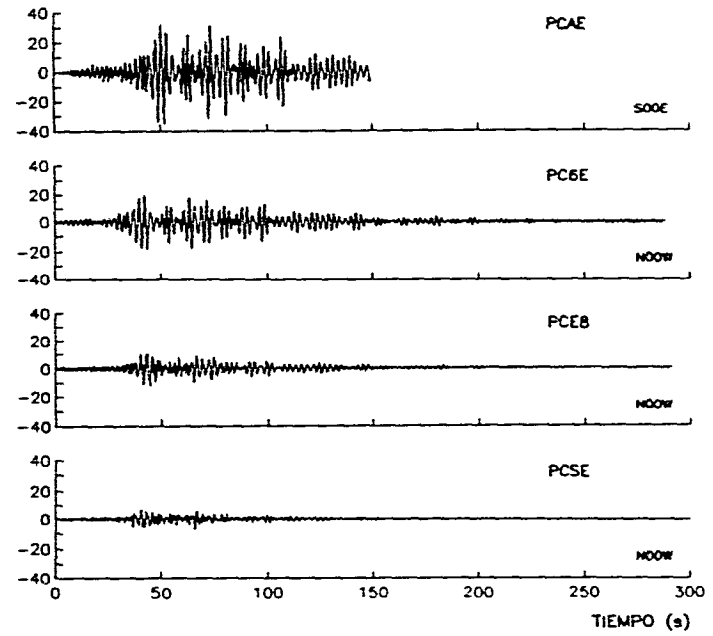
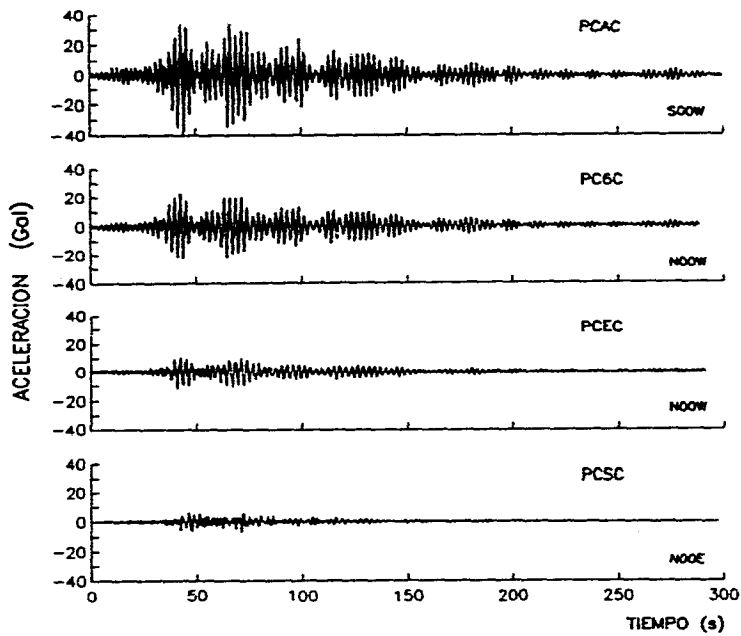
ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
Registro: 9005311
Distancio: 298 km
Azotea Centro
Nivel 6 Centro
Estac. Centro
Sotono Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

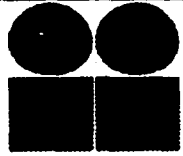
DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= -39.38 Gal	Azotea Este	PCAE= -35.45 Gal
PC6C= -23.09 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 19.94 Gal
PCEC= -12.33 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= -11.63 Gal
PCSC= - 6.53 Gal	Sotono Este	PCSE= - 7.10 Gal



-24-

Figura II.4



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO
 Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9005311
 Hora: 07:35:26.90 [GMT]
 Epic: 17.106, 100.893
 Mag: Mb=5.8, Ms=5.9
 Mc=5.5
 H: 16 km

ESTACIONES
EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9005311
 Distancia: 298 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION ESTE - OESTE

PCAC= -32.27 Gal	Azotea Este	PCAE= -34.85 Gal
PC6C= -17.79 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= -21.30 Gal
PCEC= -13.45 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= -14.32 Gal
PCSC= - 6.66 Gal	Sotano Este	PCSE= - 6.07 Gal

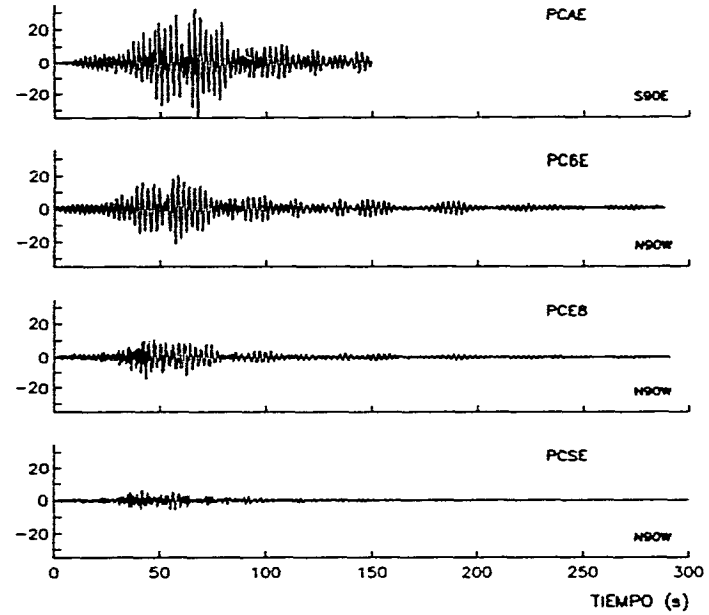
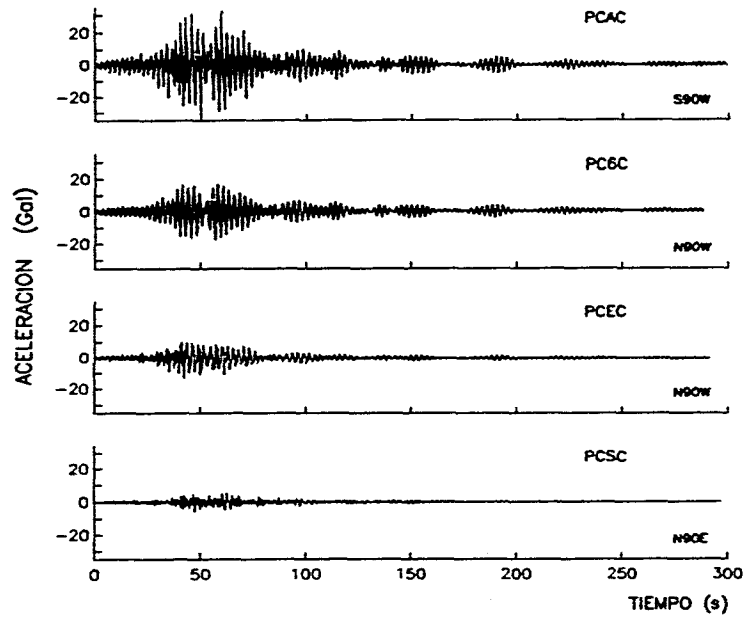


Figura II.5

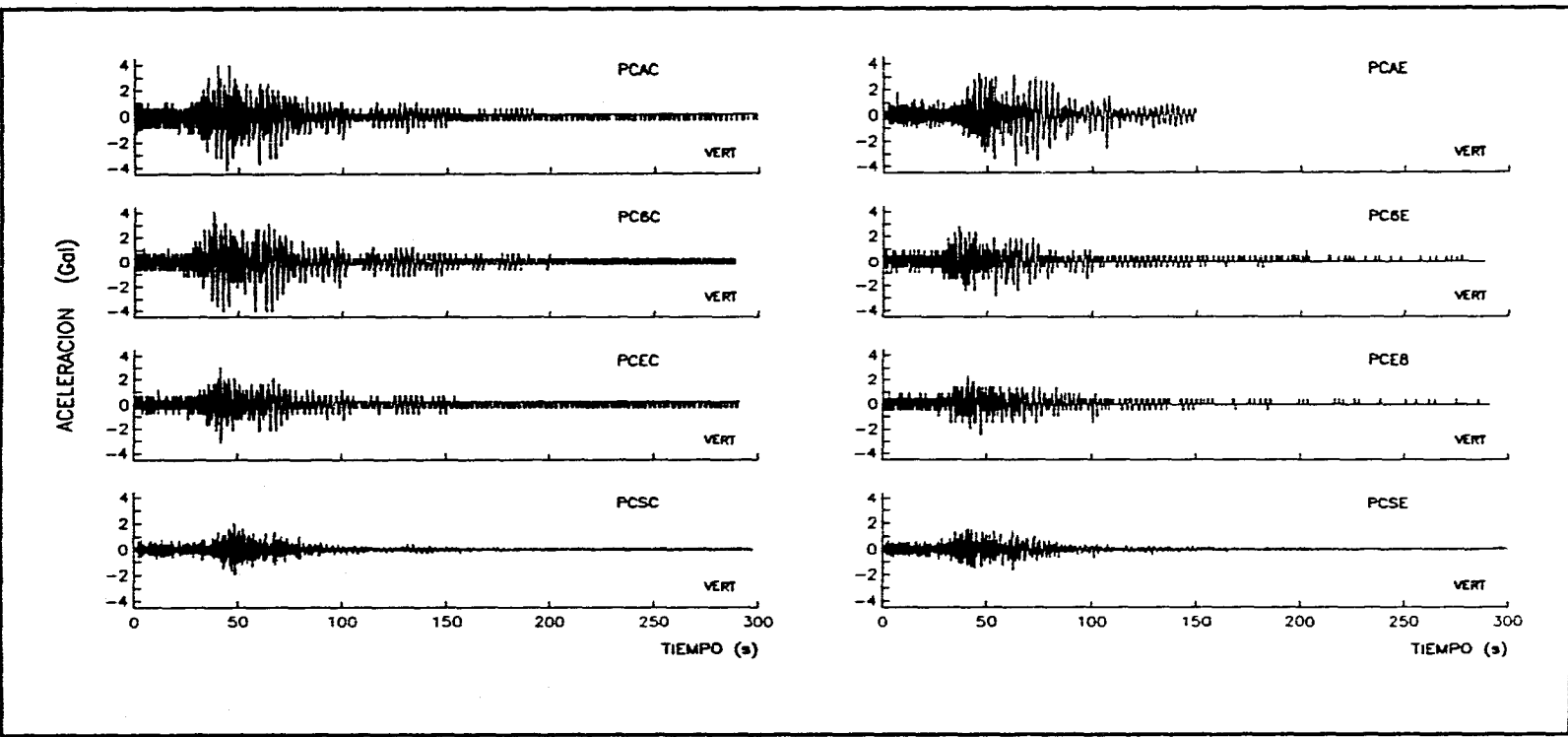
EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICIÓN

CAPITULO II



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO		ESTACIONES		ACELERACIONES MAXIMAS			
Datos:	IDEI, UNAM	EDIFICIO PLAZA CORDOBA		DIRECCION VERTICAL			
Fecha:	9005311	Registro:	9005311				
Hora:	07:35:26.90 [GMT]	Distancia:	298 km				
Epic:	17.106, 100.893	Azotea Centro	PCAC= - 4.20 Gal	Azotea Este	PCAE= - 4.01 Gal		
Mag:	Mb=5.8, Ms=5.9	Nivel 6 Centro	PC6C= - 4.54 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= - 2.93 Gal		
	Mc=5.5	Estac. Centro	PCEC= - 3.17 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= - 2.43 Gal		
H:	16 km	Sotano Centro	PCSC= - 2.10 Gal	Sotano Este	PCSE= - 1.66 Gal		



-26-

Figura II.6

EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CARITULO II



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 910401
 Hora: 07:34:45.90 [GMT]
 Epic: 16.044, 98.387
 Mag: Mb=5.5, Ms=5.4
 Mc=5.3
 H: 26 km

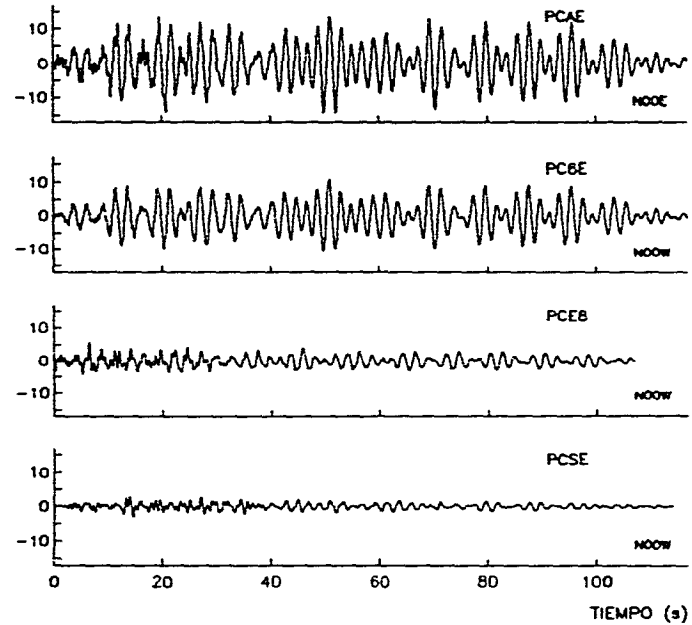
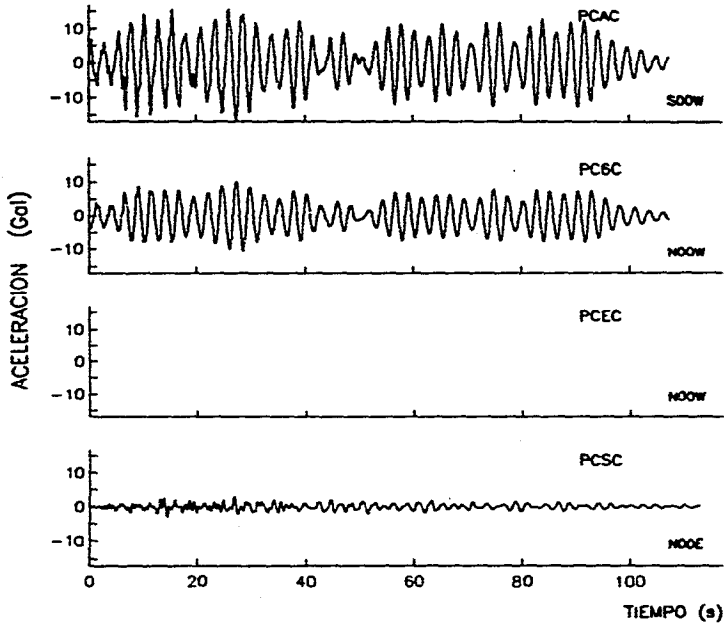
ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 910401
 Distancia: 370 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

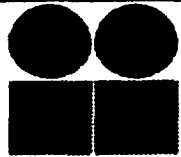
DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= -17.47 Gal	Azotea Este	PCAE= -14.22 Gal
PC6C= -10.79 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 11.07 Gal
PCEC No hubo registro	Estac. 8 Este	PCE8= 5.72 Gal
PCSC= -3.16 Gal	Sotano Este	PCSE= -3.29 Gal



-27-

Figura II.7



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 910401
Hora: 07:34:45.90 [GMT]
Epic: 16.044, 98.387
Mag: Mb=5.5, Ms=5.4
Mc=5.3
H: 26 km

ESTACIONES EDIFICIO PLAZA CORDOBA

Registro: 910401
Distancia: 370 km
Azotea Centro
Nivel 6 Centro
Estac. Centro
Solano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION ESTE - OESTE

PCAC= -12.89 Gal	Azotea Este	PCAE= 15.57 Gal
PC6C= -7.14 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 8.84 Gal
PCEC No hubo registro	Estac. 8 Este	PCE8= -5.87 Gal
PCSC= 1.88 Gal	Solano Este	PCSE= -1.98 Gal

-28-

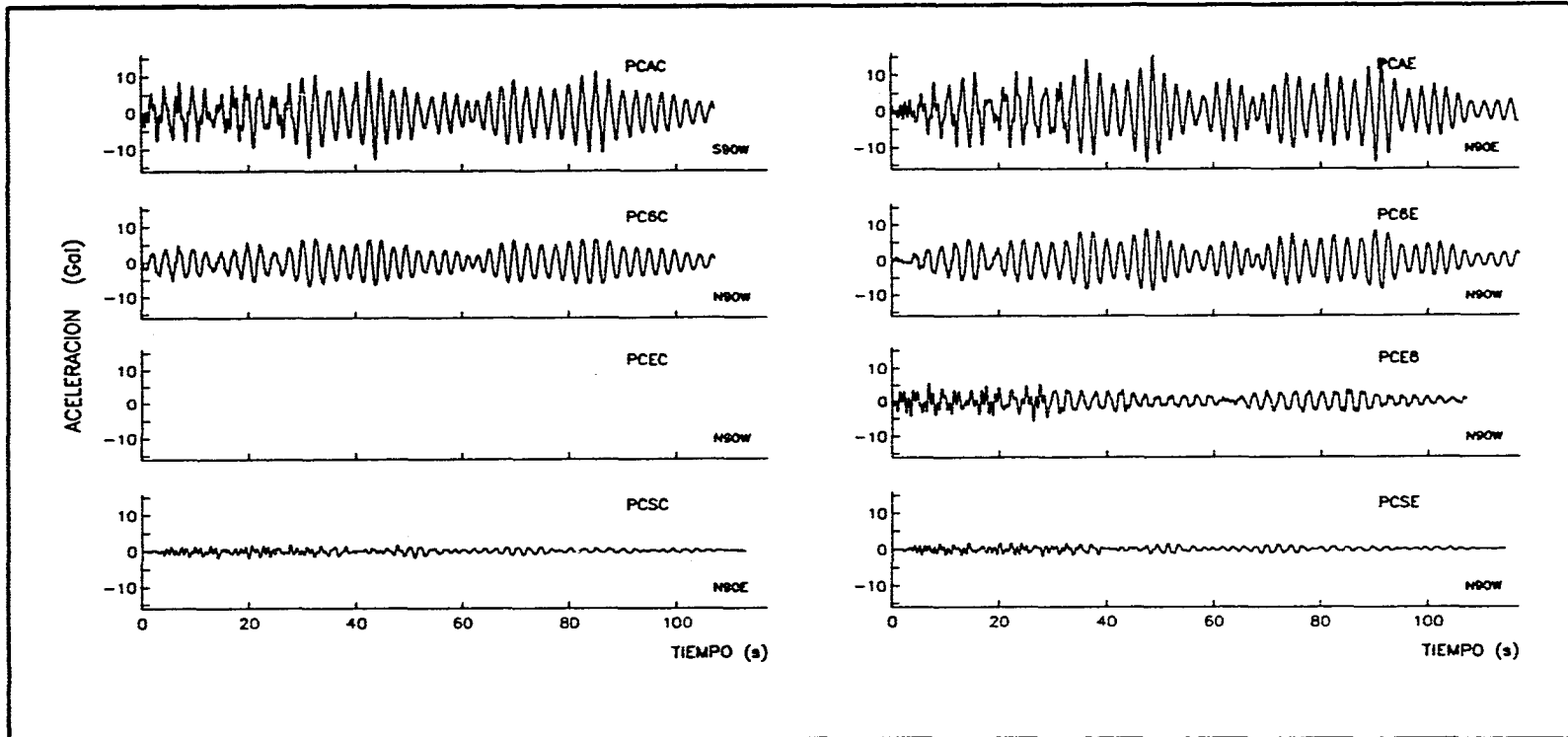


Figura II.8



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 910401
 Hora: 07:34:45.90 [GMT]
 Epic: 16.044, 98.387
 Mag: Mb=5.5, Ms=5.4
 H: 26 km

ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 910401
 Distancia: 370 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION VERTICAL

PCAC= -1.93 Gal	Azotea Este	PCAE= 2.32 Gal
PC6C= -2.05 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 1.88 Gal
PCEC No hubo registro	Estac. 8 Este	PCEB= 1.69 Gal
PCSC= -1.63 Gal	Sotano Este	PCSE= 1.25 Gal

-29-

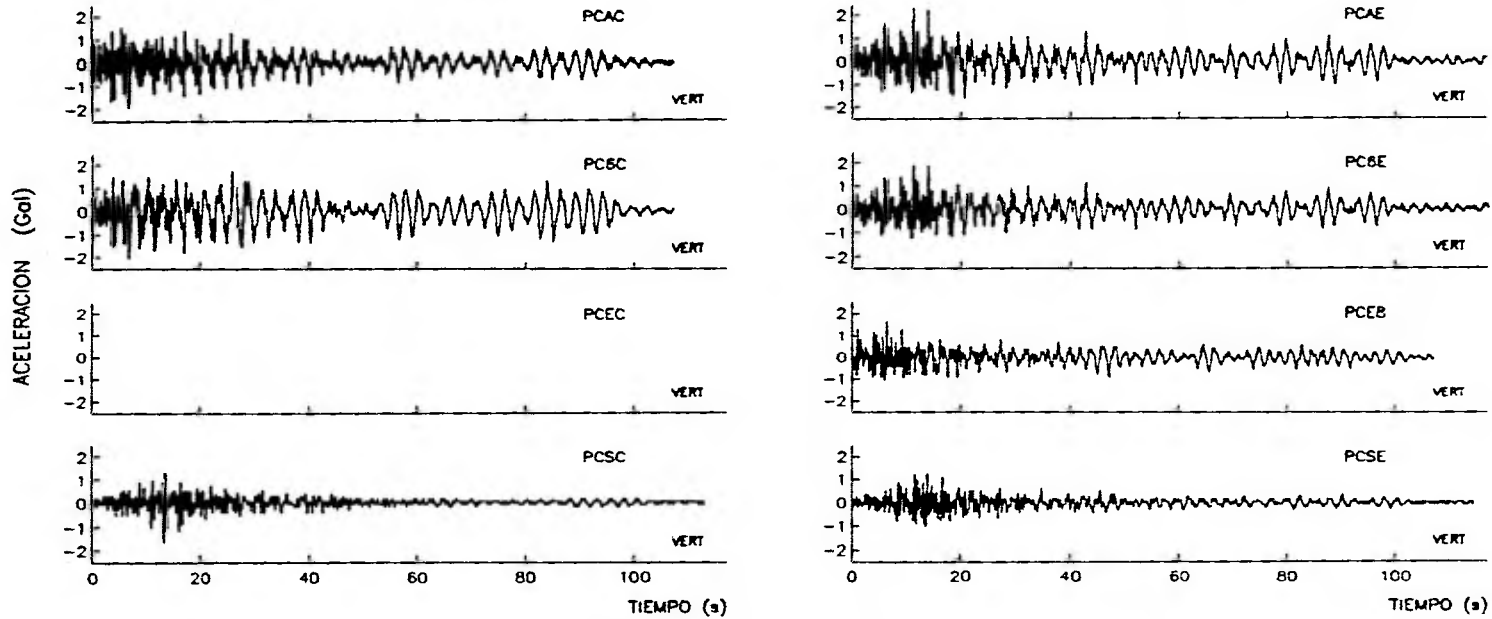


Figura II.9



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9305151
 Hora: 03:09:39.40 [GMT]
 Epic: 16.430, 98.740
 Mag: Mb=5.8, Ms=5.8
 Mc=5.8
 H: 20 km

ESTACIONES

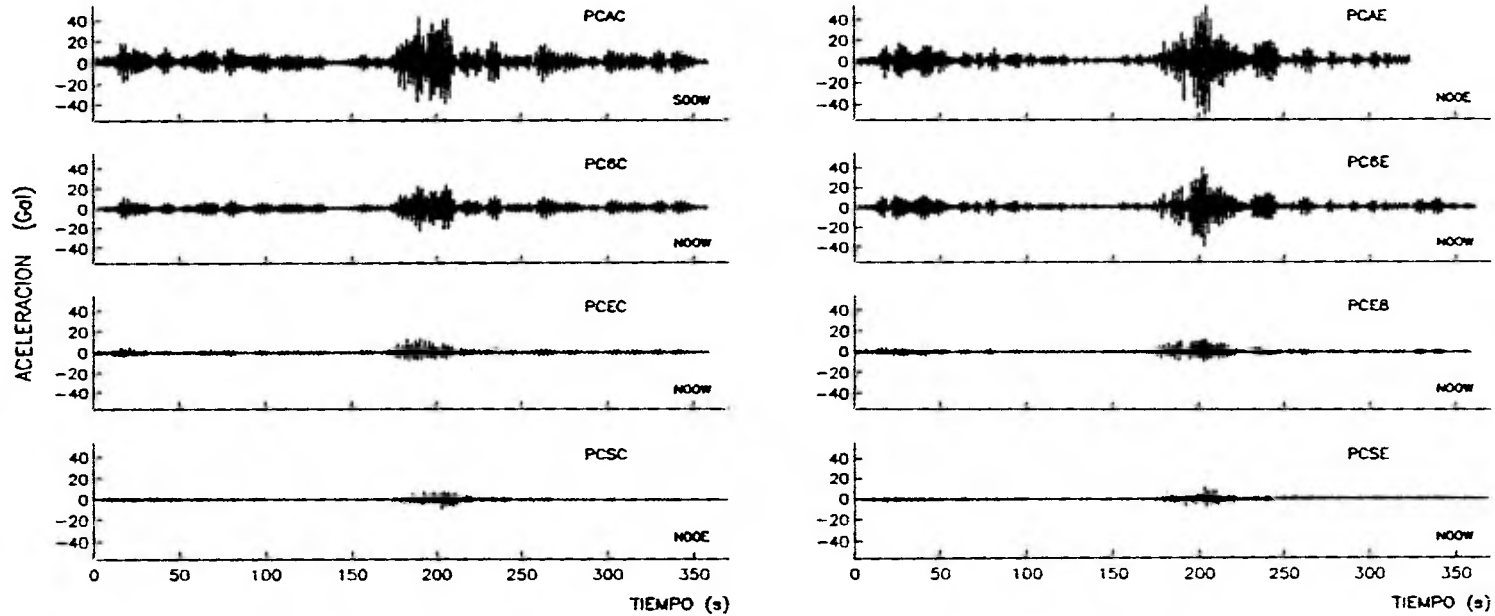
EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9305151
 Distancia: 371 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= 42.64 Gal	Azotea Este	PCAE= 53.46 Gal
PC6C= -24.06 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 39.72 Gal
PCEC= -11.49 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= 11.98 Gal
PCSC= -10.48 Gal	Sotano Este	PCSE= 10.85 Gal

-30-



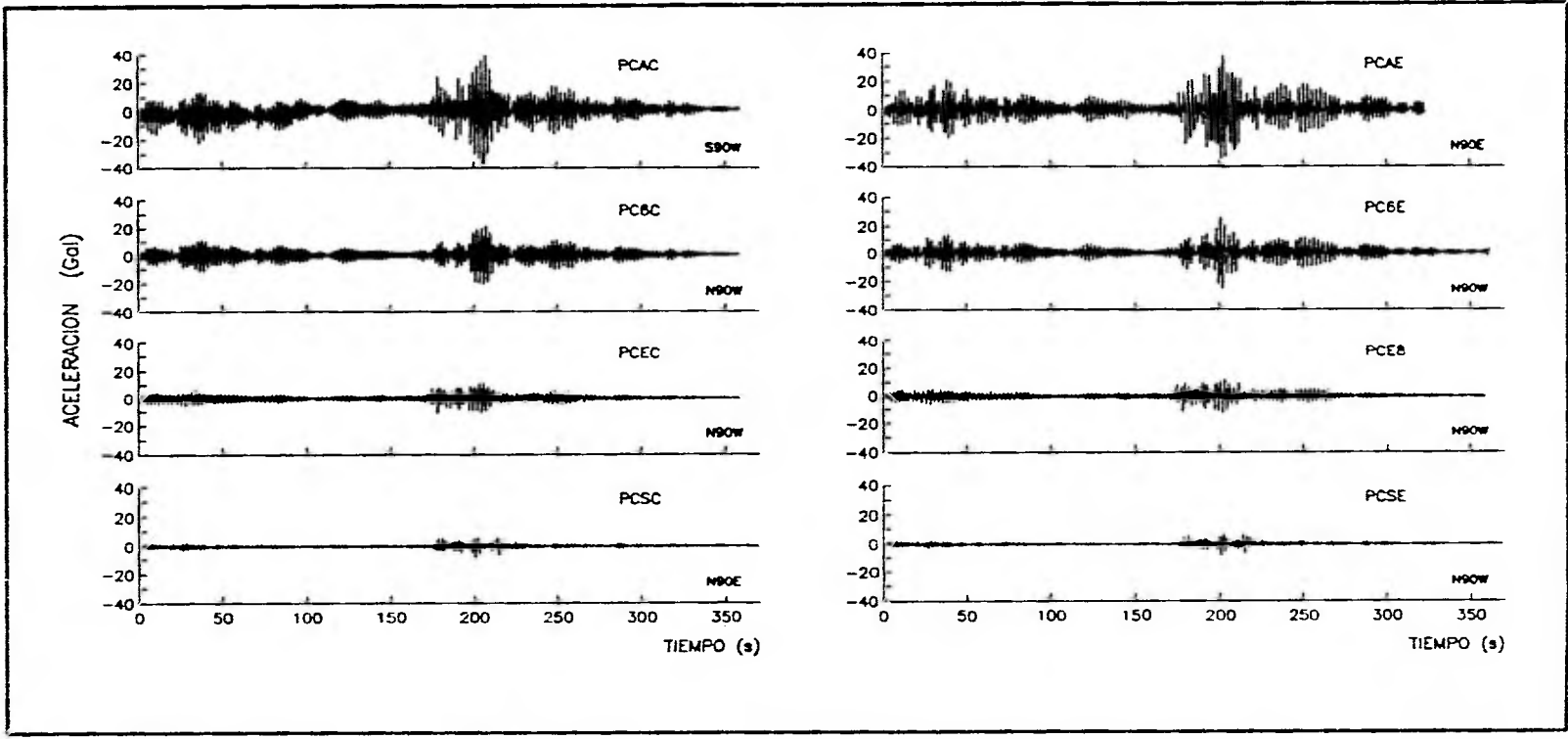
EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II

Figura II.10



SISMO		ESTACIONES		ACELERACIONES MAXIMAS				
Datos:	IDEI. UNAM	EDIFICIO PLAZA CORDOBA		DIRECCION ESTE - OESTE				
Fecha:	9305151	Registro:	9305151	PCAC=	39.62 Gal	Azoteo Este	PCAE=	38.27 Gal
Hora:	03:09:39.40 [GMT]	Distancia:	371 km	PC6C=	21.20 Gal	Nivel 6 Este	PC6E=	-25.66 Gal
Epic:	16.430, 98.740	Azoteo Centro		PCEC=	12.504 Gal	Estac. 8 Este	PCE8=	-12.78 Gal
Mag:	Mb=5.8, Ms=5.8	Nivel 6 Centro		PCSC=	-8.321 Gal	Sotano Este	PCSE=	-8.55 Gal
Mc=	5.8	Estac. Centro						
H:	20 km	Sotano Centro						



-31-

Figura II.11

EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION CAPITULO II



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO
 Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9305151
 Hora: 03:09:39.40 [GMT]
 Epic: 16.430, 98.740
 Mag: Mb=5.8, Ms=5.8
 H: 20 km

ESTACIONES
 EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9305151
 Distancia: 371 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS
 DIRECCION VERTICAL

PCAC= 3.98 Gal	Azotea Este	PCAE= -5.50 Gal
PC6C= -4.91 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 4.97 Gal
PCEC= -3.49 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= 4.57 Gal
PCSC= -3.14 Gal	Sotano Este	PCSE= 3.39 Gal

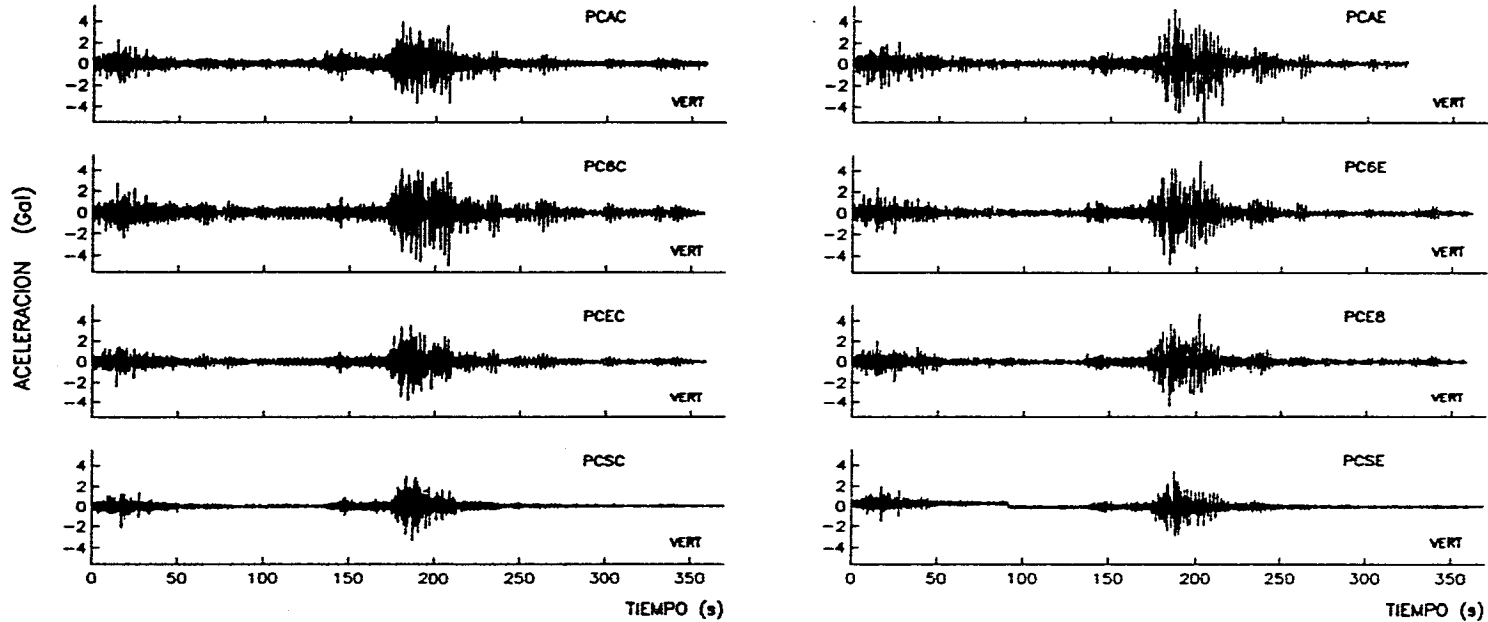
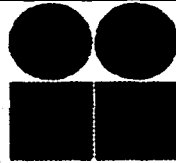


Figura II.12



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9310241
Hora: 07:52:18.20 [GMT]
Epic: 16.540, 98.980
Mag: Mb=6.2, Ms=6.6
Mc=6.5
H: 19 km

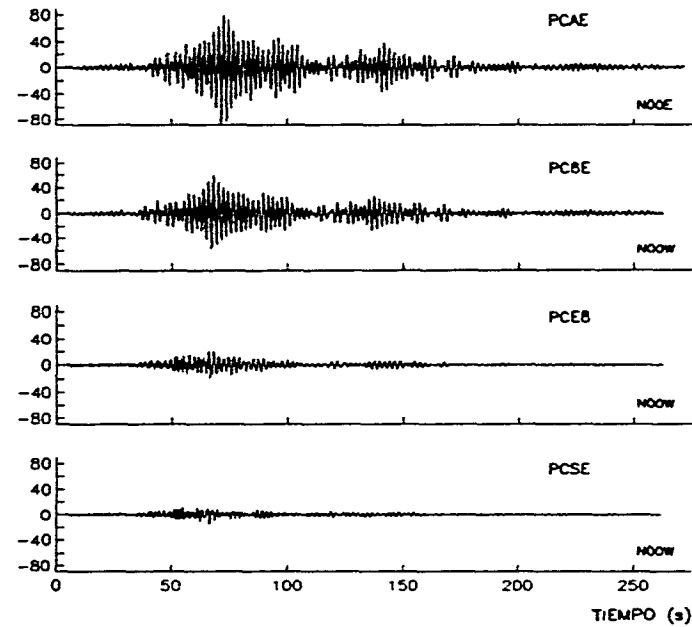
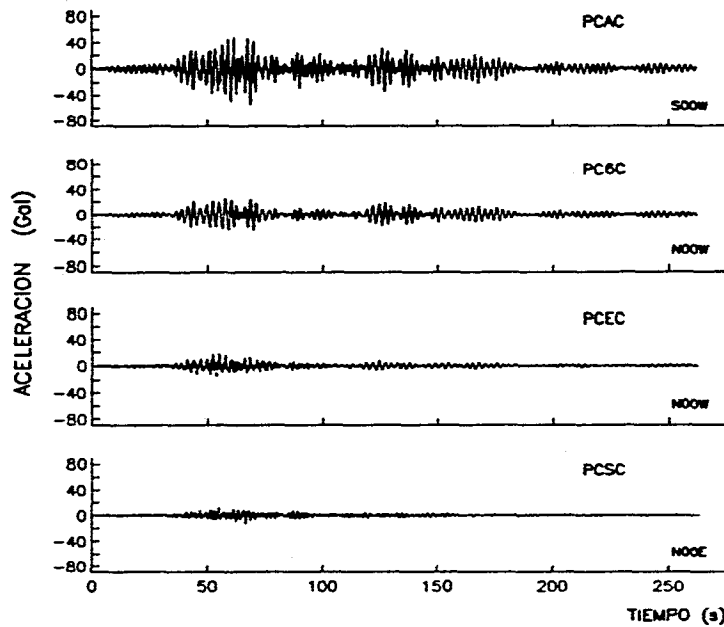
ESTACIONES
EDIFICIO PLAZA CORDOBA

Registro: 9310241
Distancia: 319 km
Azotea Centro
Nivel 6 Centro
Estac. Centro
Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= -54.13 Gal	Azotea Este	PCAE= -90.05 Gal
PC6C= 24.91 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 59.40 Gal
PCEC= 18.20 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= 20.60 Gal
PCSC= -13.29 Gal	Sotano Este	PCSE= -15.09 Gal



-33-

Figura II.13



SISMO		ESTACIONES		ACELERACIONES MAXIMAS			
Datos:	IDEI, UNAM	EDIFICIO PLAZA CORDOBA		DIRECCION ESTE - OESTE			
Fecha:	9310241	Registro:	9310241				
Hora:	07:52:18.20 [GMT]	Distancia:	319 km				
Epic:	16.540, 98.980	Azotea Centro	PCAC= 70.41 Gal	Azotea Este	PCAE= -71.85 Gal		
Mag:	Mb=6.2, Ms=6.6	Nivel 6 Centro	PC6C= 34.01 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= -40.72 Gal		
	Mc=6.5	Estac. Centro	PCEC= 22.27 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= 23.95 Gal		
H:	19 km	Sotano Centro	PCSC= 9.70 Gal	Sotano Este	PCSE= -10.18 Gal		

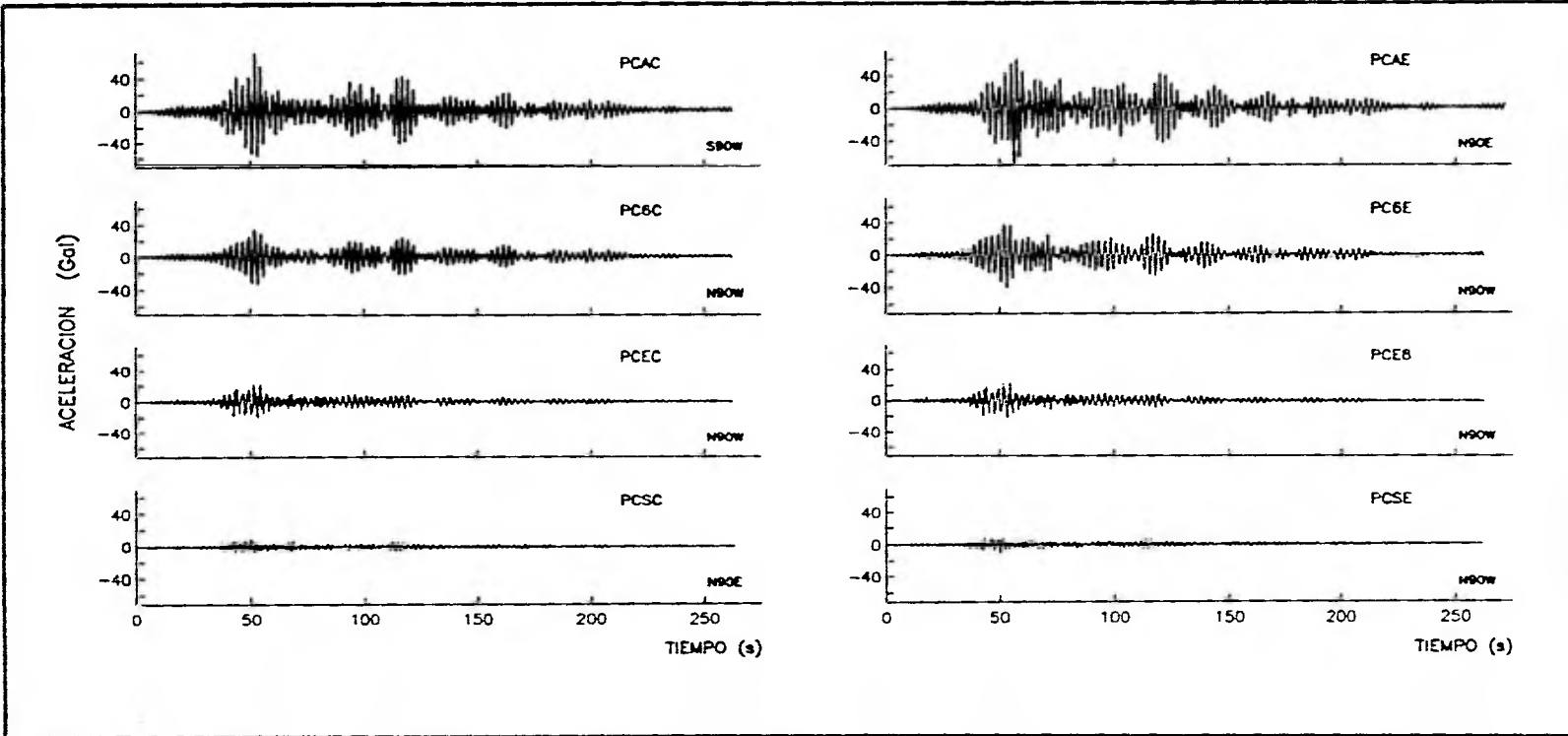
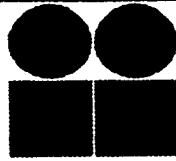


Figura II.14

-34-

EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION CAPITULO II



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9310241
Hora: 07:52:18.20 [GMT]
Epic: 16.540, 98.980
Mag: Mb=6.2, Ms=6.6
Mc=6.5
H: 19 km

ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
Registro: 9310241
Distancia: 319 km
Azotea Centro
Nivel 6 Centro
Estac. Centro
Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION VERTICAL

PCAC=	8.74 Gal	Azotea Este	PCAE=	-7.78 Gal
PC6C=	9.22 Gal	Nivel 6 Este	PC6E=	6.71 Gal
PCEC=	4.19 Gal	Estac. 8 Este	PCE8=	5.87 Gal
PCSC=	3.47 Gal	Sotano Este	PCSE=	3.23 Gal

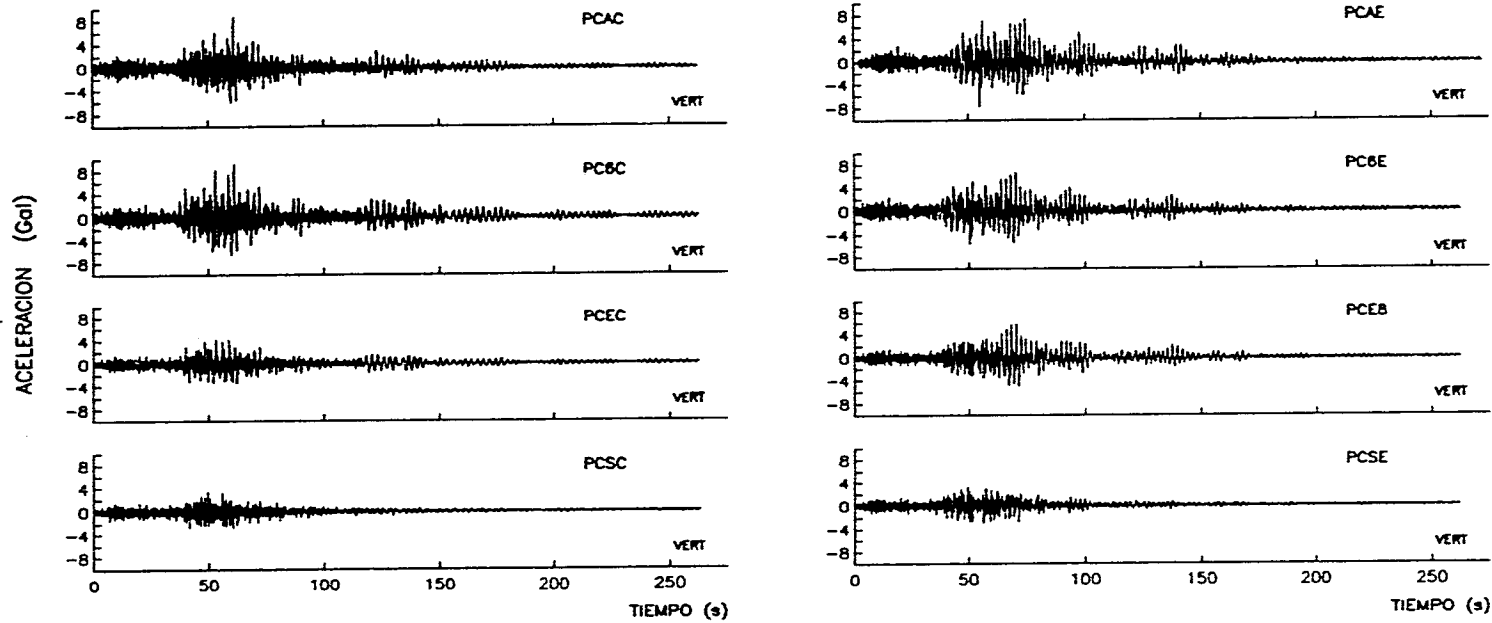


Figura II.15



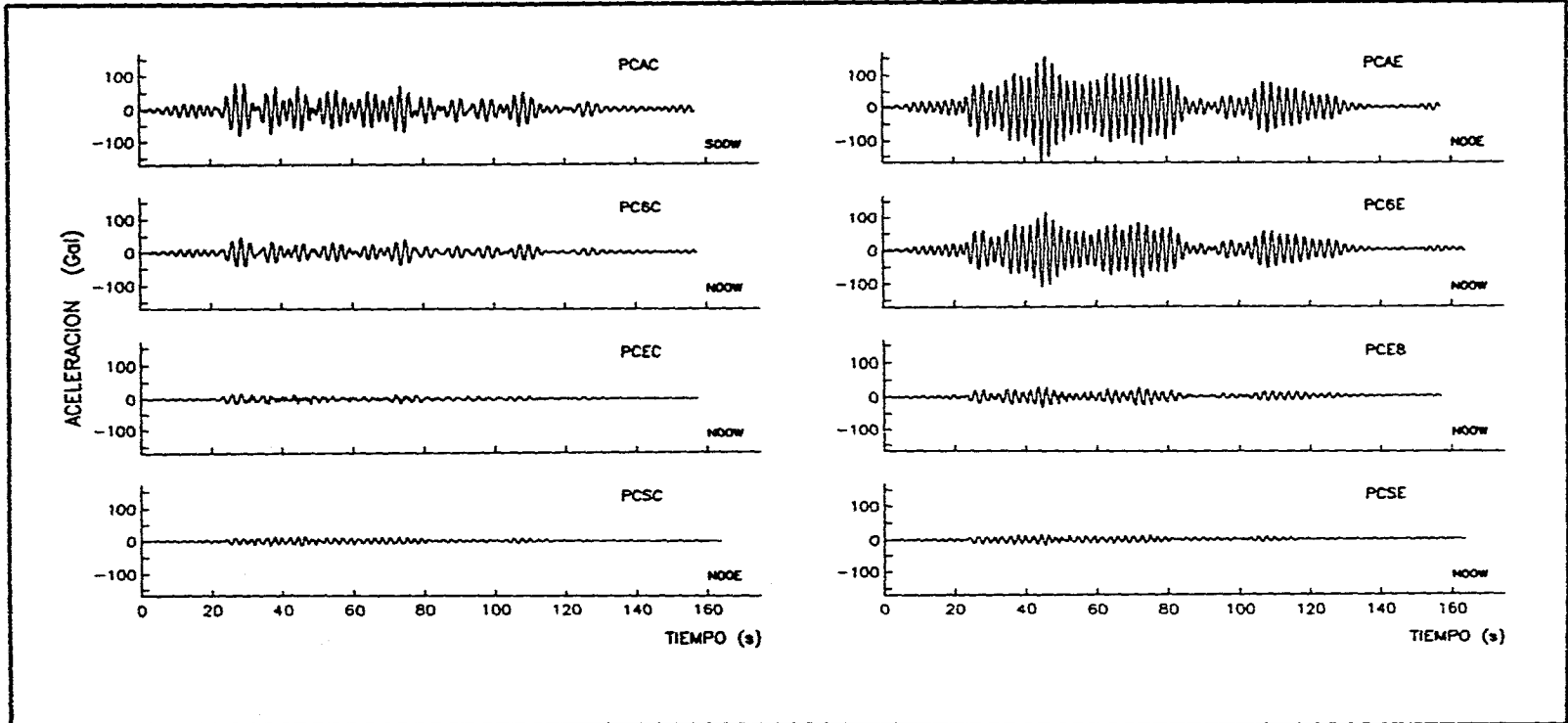
**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO
 Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9412101
 Hora: 16:17:40.90 [GMT]
 Epic: 18.020, 101.560
 Mag: Mc=6.3
 H: 20 km

ESTACIONES
 EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9412101
 Distancia: 297 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS
 DIRECCION NORTE - SUR

PCAC= -82.39 Gal	Azotea Este	PCAE= -169.57 Gal
PC6C= 47.42 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 116.88 Gal
PCEC= 17.00 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= -33.05 Gal
PCSC= 15.21 Gal	Sotano Este	PCSE= -17.24 Gal



-36-

Figura II.16



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9412101
 Hora: 16:17:40.90 [GMT]
 Epic: 18.020, 101.560
 Mag: Mc=6.3
 H: 20 km

ESTACIONES

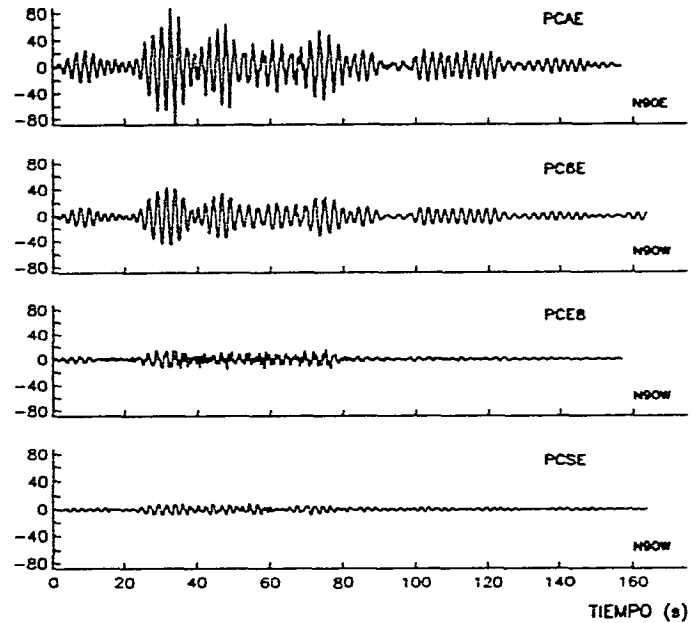
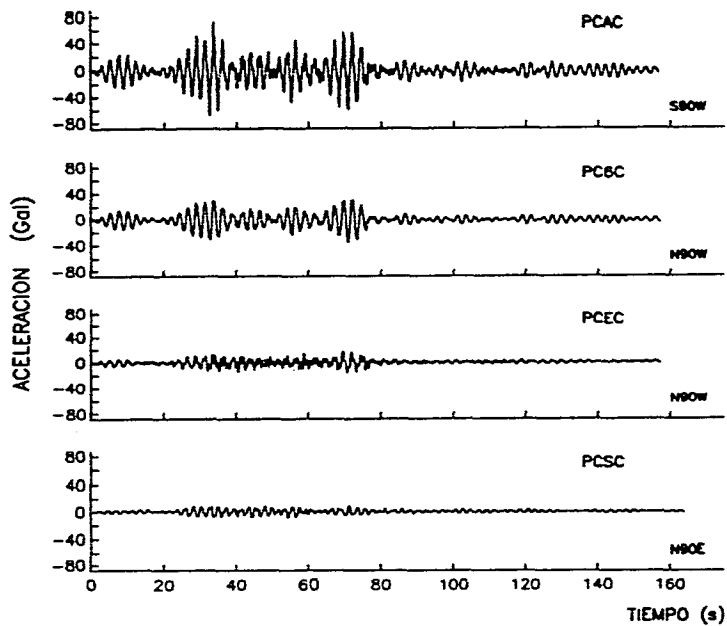
EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9412101
 Distancia: 297 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Solano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION ESTE - OESTE

PCAC= 73.29 Gal	Azotea Este	PCAE= -89.10 Gal
PC6C= -35.92 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= -45.98 Gal
PCEC= 17.48 Gal	Estac. 8 Este	PCEB= 16.76 Gal
PCSC= -9.22 Gal	Sotano Este	PCSE= -9.58 Gal

-37-



EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II

Figura II.17



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

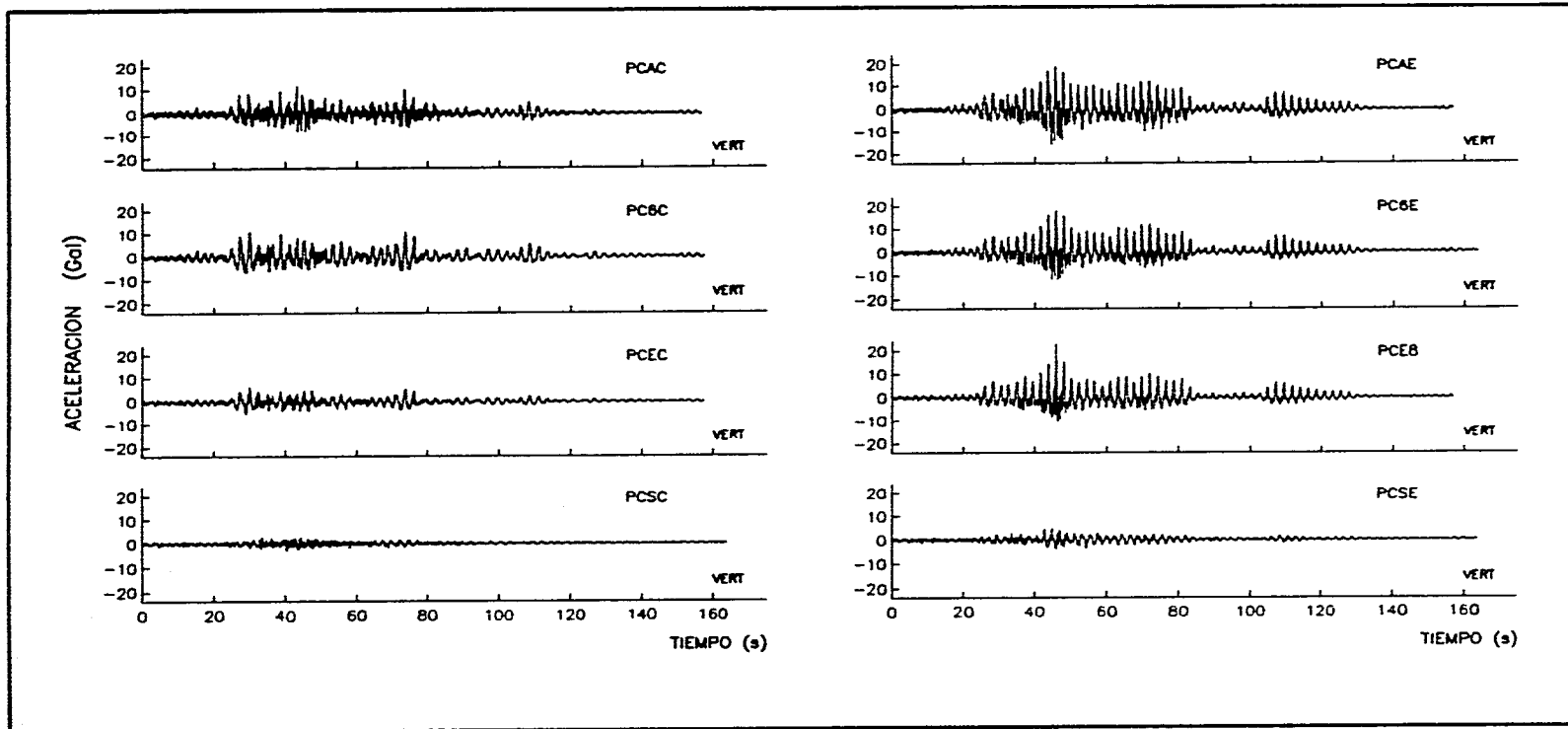
SISMO
 Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9412101
 Hora: 16:17:40.90 [GMT]
 Epic: 18.020, 101.560
 Mag: Mc=6.3
 H: 20 km

ESTACIONES
 EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9412101
 Distancia: 297 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

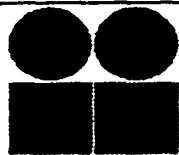
DIRECCION VERTICAL

PCAC= 11.62 Gal	Azotea Este	PCAE= 19.16 Gal
PC6C= 11.26 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 18.08 Gal
PCEC= 6.23 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= 22.75 Gal
PCSC= -3.11 Gal	Sotano Este	PCSE= 5.03 Gal



-88-

Figura II.18



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO
Datos: IDEG, UNAM
Fecha: 9509141
Hora: 14:04:30.50 [GMT]
Epic: 16.310, 98.880
Mag: Mb=6.4, Ms=7.2
Mc=7.3
H: 22 km

ESTACIONES
EDIFICIO PLAZA CORDOBA
Registro: 9509141
Distancia: 345 km
Azotea Centro
Nivel 6 Centro
Estac. Centro
Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS
DIRECCION NORTE - SUR
PCAC= -128.37 Gal
PC6C= 70.89 Gal
PCEC= 48.14 Gal
PCSC= -30.06 Gal
Azotea Este
Nivel 6 Este
Estac. 8 Este
Sotano Este
PCAE= -195.43 Gal
PC6E= 140.83 Gal
PCEB= -40.96 Gal
PCSE= -34.61 Gal

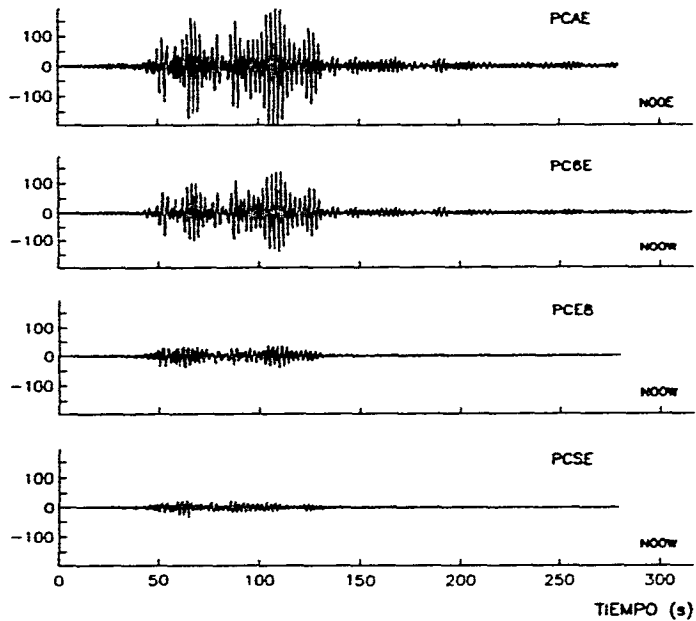
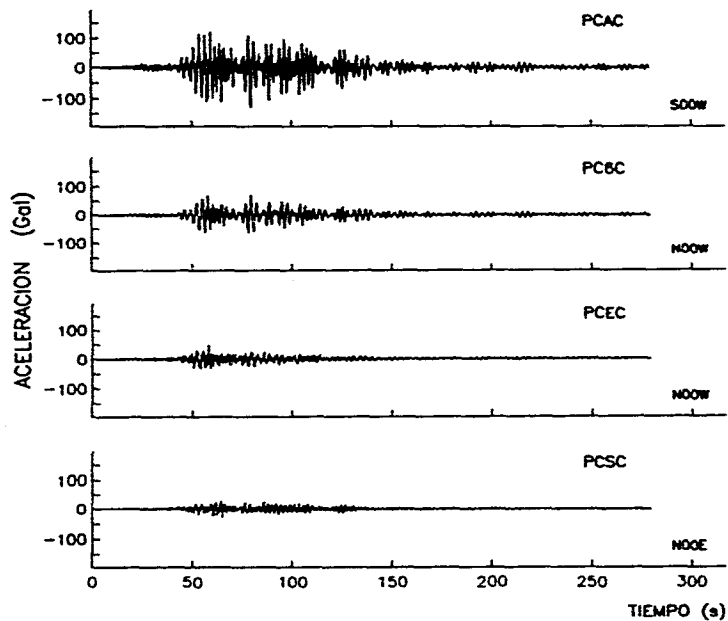


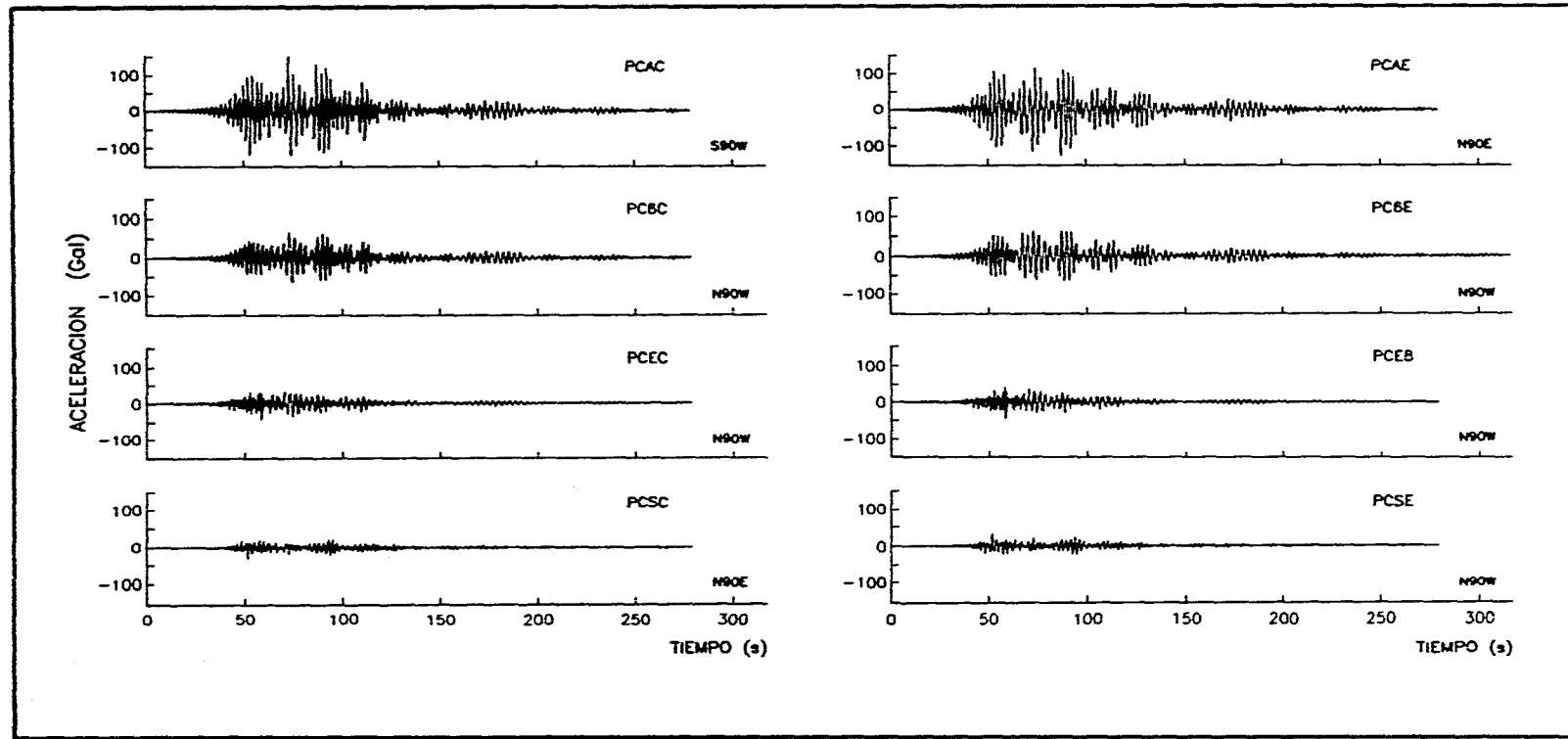
Figura II.19

EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II



SISMO		ESTACIONES		ACELERACIONES MAXIMAS				
Datos:	IDEG, UNAM	EDIFICIO PLAZA CORDOBA		DIRECCION ESTE - OESTE				
Fecha:	9509141	Registro:	9509141	PCAC=	150.89 Gal	Azotea Este	PCAE=	-126.46 Gal
Hora:	14:04:30.50 [GMT]	Distancia:	345 km	PC6C=	67.54 Gal	Nivel 6 Este	PC6E=	-65.62 Gal
Epic:	16.310, 98.880	Azotea Centro		PCEC=	-43.59 Gal	Estac. 8 Este	PCE8=	-47.66 Gal
Mag:	Mb=6.4, Ms=7.2	Nivel 6 Centro		PCSC=	-32.57 Gal	Sotano Este	PCSE=	33.53 Gal
	Mc=7.3	Estac. Centro						
H:	22 km	Sotano Centro						



EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II

Figura II.20

-40-



**INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM**

SISMO

Datos: IDEG, UNAM
 Fecha: 9509141
 Hora: 14:04:30.50 [GMT]
 Epic: 16.310, 98.880
 Mag: Mb=6.4, Ms=7.2
 Mc=7.3
 H: 22 km

ESTACIONES

EDIFICIO PLAZA CORDOBA
 Registro: 9509141
 Distancia: 345 km
 Azotea Centro
 Nivel 6 Centro
 Estac. Centro
 Sotano Centro

ACELERACIONES MAXIMAS

DIRECCION VERTICAL

PCAC= -20.60 Gal	Azotea Este	PCAE= 31.14 Gal
PC6C= 20.36 Gal	Nivel 6 Este	PC6E= 24.19 Gal
PCEC= -10.78 Gal	Estac. 8 Este	PCE8= 20.72 Gal
PCSC= 10.90 Gal	Sotano Este	PCSE= 10.18 Gal

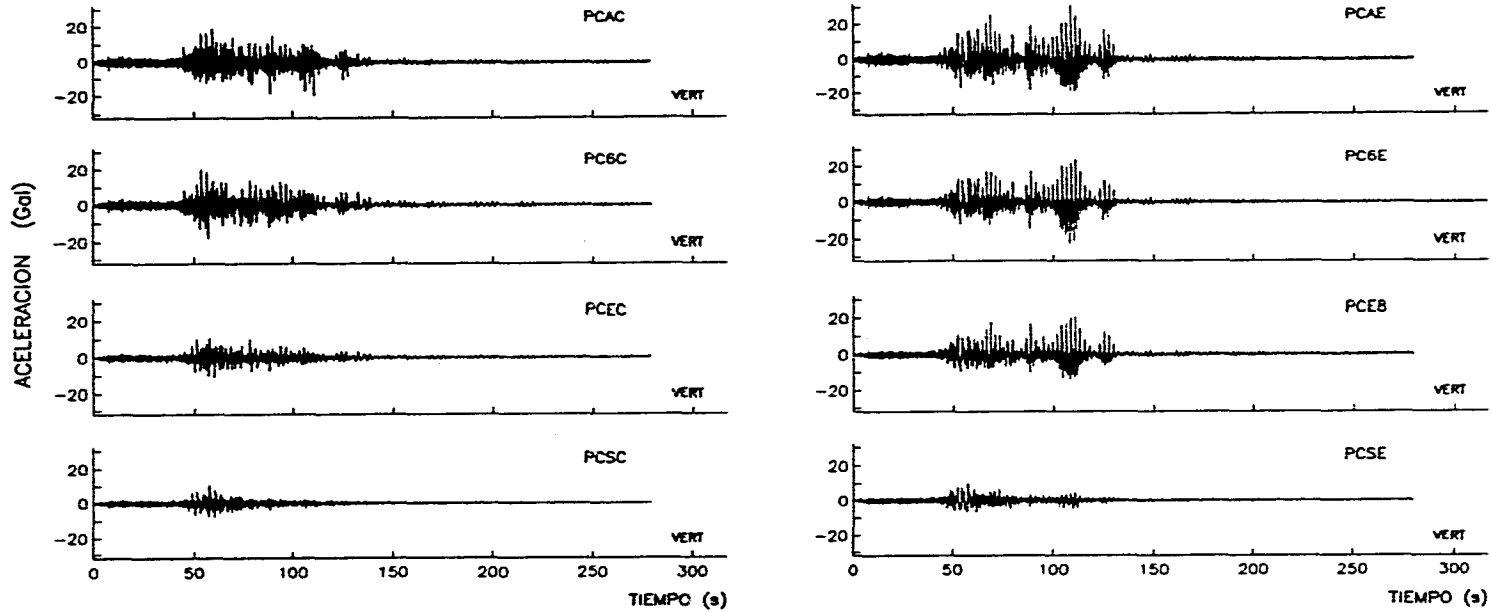


Figura II.21

II.2 Registros obtenidos en la estación # 56

Como se mencionó anteriormente, para tener una visión más clara de como se transmiten las ondas a través de diferentes medios se hace necesario contar con registros en la fuente, en el subsuelo, en la superficie próxima al sitio de interés y en la estructura analizada.

Durante este periodo se han obtenido registros en estaciones de campo libre cercanas al edificio mencionado, una de estas estaciones de registro es la número 56, (ES56) a cargo de la fundación Javier Barros Sierra (FJBS). Ubicada en la Escuela Secundaria N° 18 en la calle de Córdoba 68, colonia Roma (figura. I.1).

Los registros obtenidos en este sitio corresponden a los eventos del: 11 y 31 de mayo de 1990, 1 de abril de 1991, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995 (ref. 16).

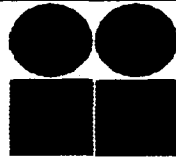
Las figuras II.23 a II.26 muestran las historias de aceleración de las tres componentes ortogonales. Las gráficas tienen un encabezado común y en parte son similares a las construidas con los registros obtenidos en el edificio Plaza Córdoba con algunas variantes; además de indicar características importantes del sismo y de la estación se incluyen los valores máximos del registro, con la siguiente información:

A la izquierda se señalan los parámetros del sismo: fuente de donde se obtuvieron los datos, fecha del evento (año, mes, día y evento del día), hora en que ocurrió (hh:mm:ss.s (GMT)), coordenadas epicentrales (latitud N y longitud W), magnitud (Mb, Ms y Mc) y profundidad H en (Km).

En la parte media se incluyen los datos de la estación: clave del registro (formada por la clave de la estación de dos letras, fecha (aanumdd), número de evento del día y la letra N o C de no corregido o corregido), clave de la estación de cuatro letras, código del instrumento, coordenadas epicentrales (latitud N, longitud W), hora de la primer muestra (hh:mm:ss.s (GMT)) y distancia del epicentro a la estación (en Km).

A la derecha se indican los valores máximos del registro: número de muestras, incremento del tiempo (en segundos), duración y aceleraciones máximas, componentes: Norte-Sur, Vertical y Este-Oeste respectivamente (en Gal).

En la parte inferior de la figura se muestran las trazas de aceleración en el orden: norte-sur, vertical y este-oeste.



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9005111
Hora: 23:43:49.10 [GMT]
Epic: 17.046, 100.840
Mag: Mb=5.3, Mc=5.3
H: 12 km

ESTACION

Registro: ES9005111N
Estacion: ES56
Aparato: DCA-333
Coor: 19.423 99.159
Hora: 23:44:40.00 [GMT]
Distancia: 294 km

MAXIMOS

NP: 5600
DT: 0.010
Duracion: 56.00 s
Max.Acel. (N-S): 3.96 Gal
Max.Acel. (V): 3.29 Gal
Max.Acel. (E-W): 5.28 Gal

ESTACION No. 56

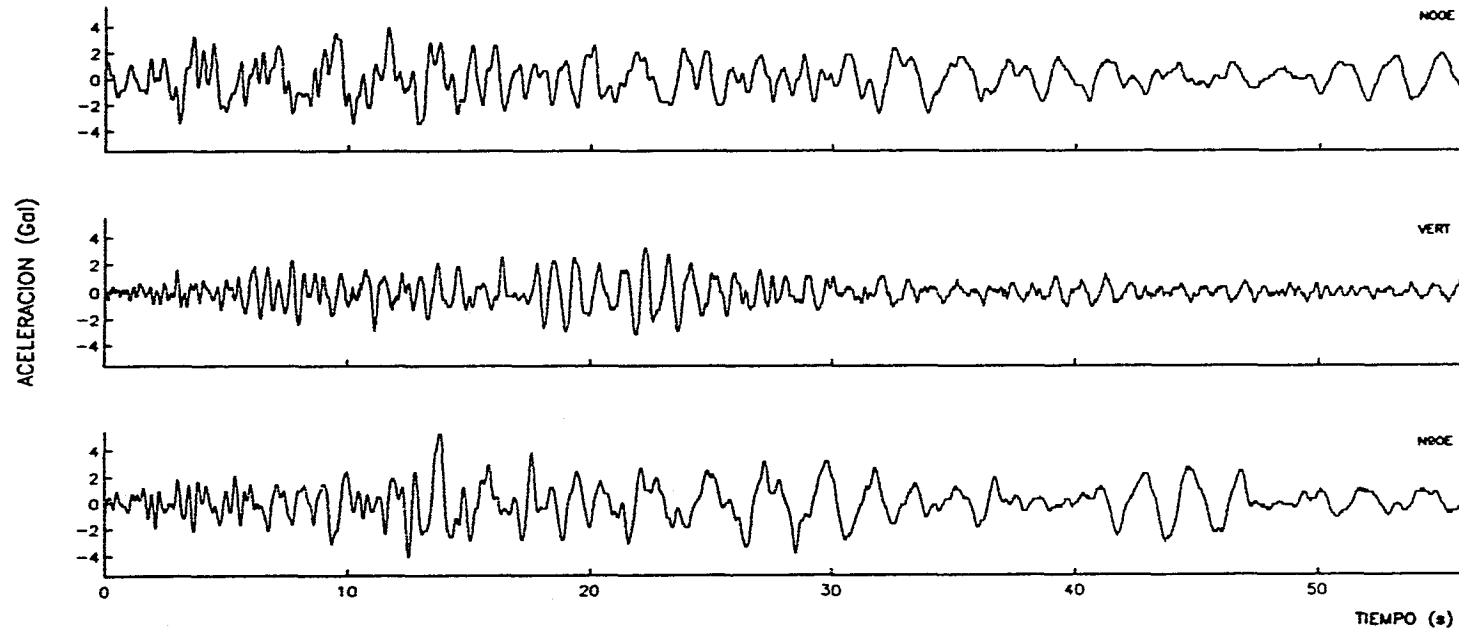
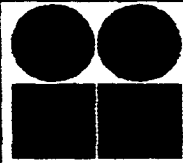


Figura II.22



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
Fecha: 9005311
Hora: 07:35:26.90 [GMT]
Epic: 17.106, 100.893
Mag: Mb=5.8, Mc=5.5
H: 16 km

ESTACION

Registro: ES9005311N
Estacion: ES56
Aparato: DCA-333
Coor: 19.423 99.159
Hora: 07:36:16.10 [GMT]
Distancia: 297 km

MAXIMOS

NP: 9800
DT: 0.010
Duracion: 98.00 s
Max.Acel. (N-S): 9.82 Gal
Max.Acel. (V): - 4.85 Gal
Max.Acel. (E-W): - 9.48 Gal

ESTACION No. 56

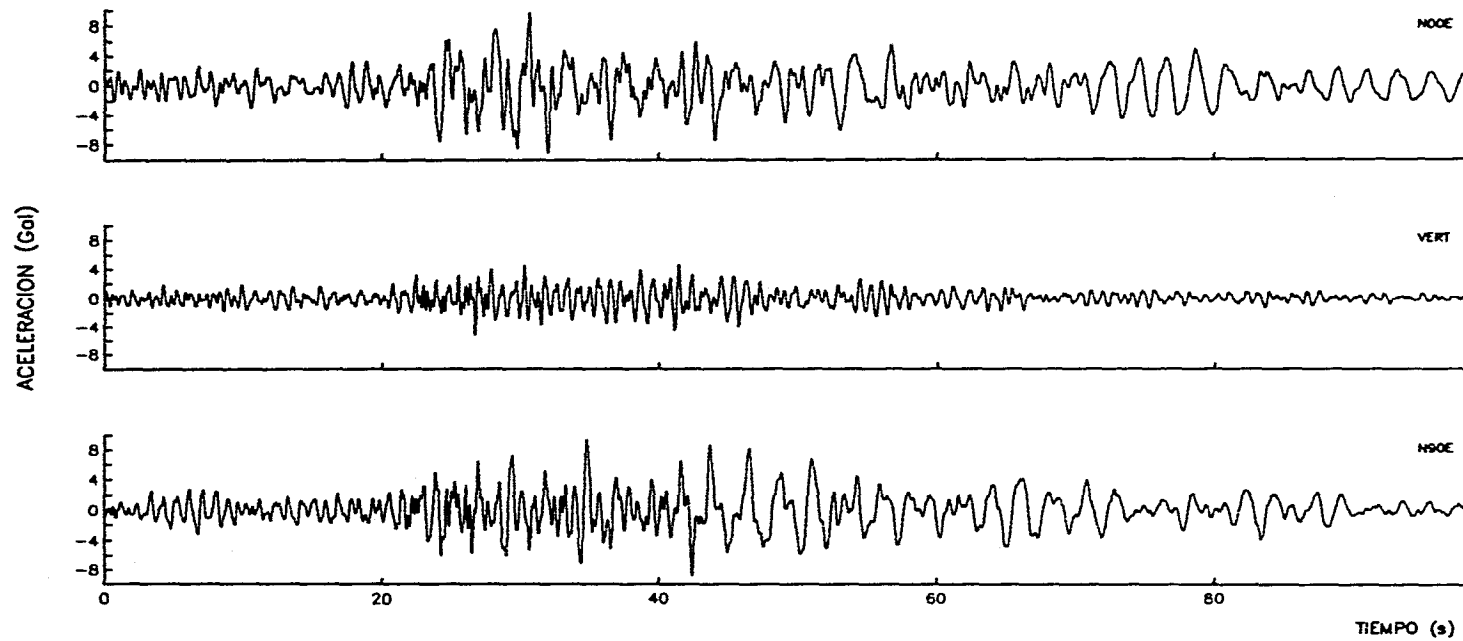


Figura II.23



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEI, UNAM
 Fecha: 9104011
 Hora: 07:34:45.90 [GMT]
 Epic: 16.044, 98.387
 Mag: Mb=5.5, Mc=5.3
 H: 26 km

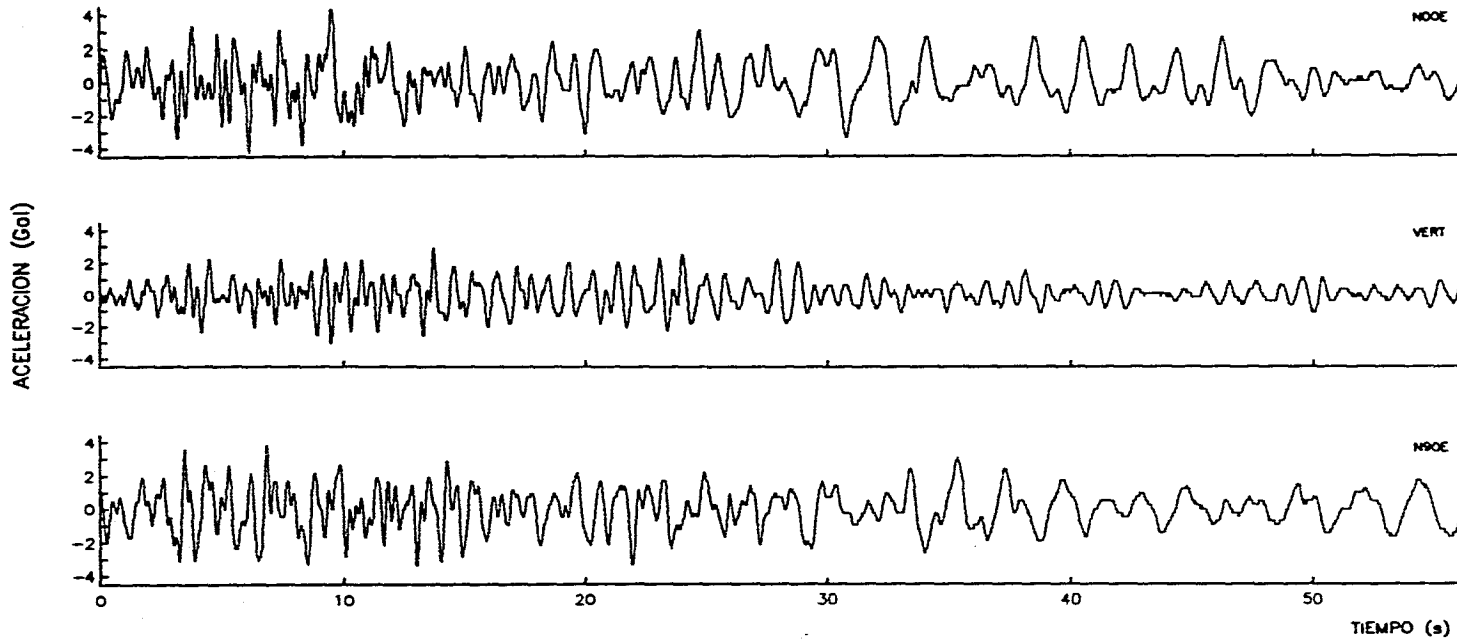
ESTACION

Registro: ES9104011N
 Estacion: ES56
 Aparato: DCA-333
 Coord: 19.423 99.159
 Hora: 07:35:35.10 [GMT]
 Distancia: 370 km

MAXIMOS

NP: 5600
 DT: 0.010
 Duracion: 56.00 s
 Max.Acel. (N-S): 4.56 Gal
 Max.Acel. (V): - 3.04 Gal
 Max.Acel. (E-W): 3.84 Gal

ESTACION No. 56



EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II

Figura II.24

-45-



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO		ESTACION		MAXIMOS	
Datos:	IDEI, UNAM	Registro:	ES9412101N	NP:	8490
Fecha:	9412101	Estacion:	ES56	DT:	0.020
Hora:	16:17:40.90 [GMT]	Aparato:	DCA-333	Duracion:	169.90 s
Epic:	18.020, 101.560	Coor:	19.423 99.159	Max.Acel. (N-S):	-17.23 Gal
Mag:	Mc=6.3	Hora:	16:18:30.90 [GMT]	Max.Acel. (V):	8.14 Gal
H:	20 km	Distancia:	297 km	Max.Acel. (E-W):	17.58 Gal

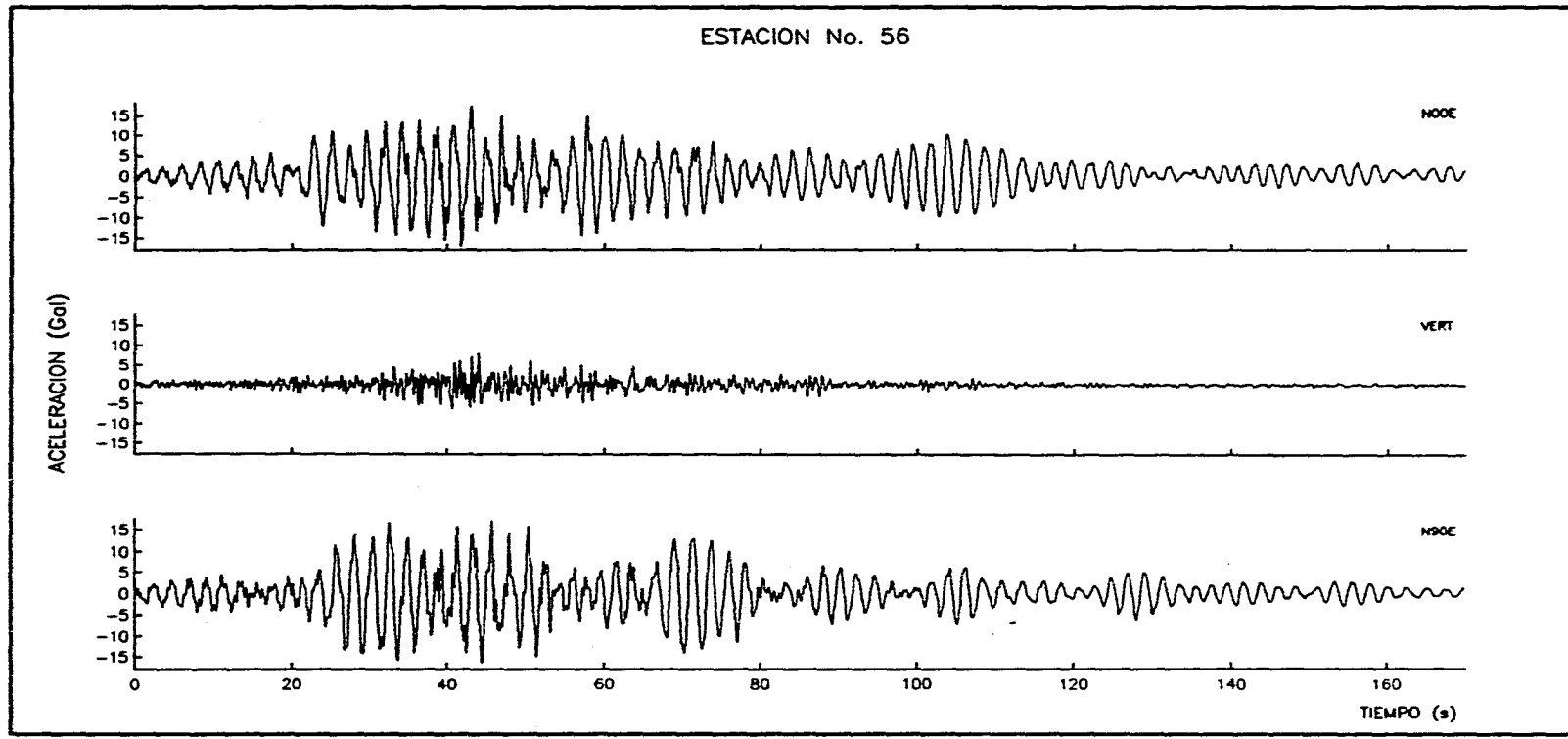


Figura II.25

EVENTOS SISMICOS REGISTRADOS POR EL SISTEMA DE MEDICION

CAPITULO II



INSTITUTO
DE
INGENIERIA
UNAM

SISMO

Datos: IDEG. UNAM
Fecha: 9509141
Hora: 14:04:30.50 [GMT]
Epic: 16.310, 98.880
Mag: Mb=6.4, Mc=7.3
H: 22 km

ESTACION

Registro: ES9509141N
Estacion: ES56
Aparato: DCA-333
Coor: 19.423 99.159
Hora: 14:05:30.50 [GMT]
Distancia: 268 km

MAXIMOS

NP: 13072
DT: 0.020
Duracion: 261.44 s
Max.Acel. (N-S): -44.31 Gal
Max.Acel. (E-W): -45.18 Gal

ESTACION No. 56

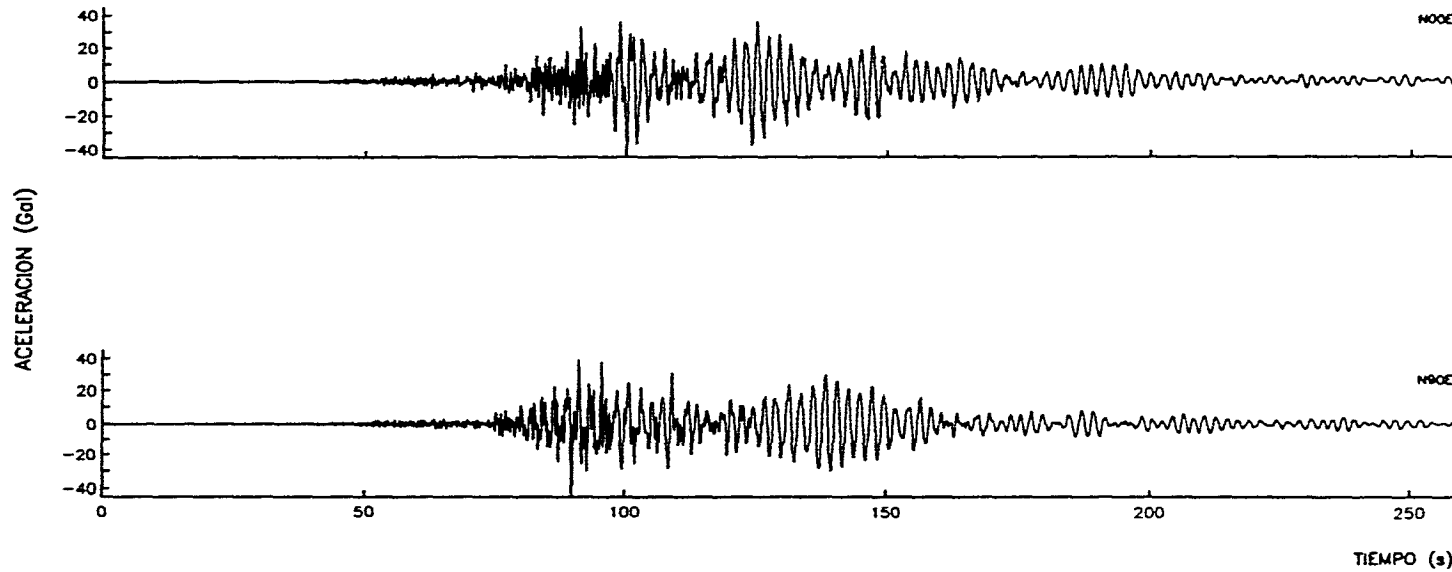


Figura II.26

En el evento del 14 de septiembre de 1995 ($M_c = 7.3$) se presentaron las aceleraciones máximas registradas en la historia de la estructura instrumentada (tabla II.2). En este caso se alcanzaron 195 gales en la dirección Norte-Sur del sitio PCAE (ref. 15) y de 45 gales en la dirección Este-Oeste de la estación # 56 "de campo libre".

ACELERACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS (gal)						
SISMO	MAGNITUD Mb	ES56	PCSE	PCE8	PC6E	PCAE
11 MAY 90	5.3	5.53	-3.649	-6.385	10.560	-19.718
31 MAY 90	5.8	9.82	-7.095	-14.319	-21.298	-35.448
1 ABR. 91	5.5	4.57	-3.288	-5.872	11.067	15.571
15 MAY 93	5.8	*	10.854	-12.777	39.721	53.455
24 OCT. 93	6.2	*	-15.100	23.787	59.416	-89.887
10 DIC. 94	6.3°	17.58	-17.279	-32.184	115.849	-169.338
14 SEP. 95	6.4	-45.18	-34.384	-46.882	-140.45	-195.270

* Evento no registrado

° Magnitud M_c

Tabla II.2 Aceleraciones máximas registradas en la estación # 56 y en el edificio Plaza Córdoba.

Si observamos la tabla II.2, y hacemos una comparación de los valores de aceleración registrados en el terreno natural (ES56) con los valores correspondientes registrados en el sótano del edificio (PCSE), es claro que los primeros son generalmente mayores a pesar de la pequeña diferencia de niveles que separa a las estaciones de registro; aquí podemos notar la influencia de la cimentación rígida del edificio, pues parte de la energía sísmica la refracta hacia el subsuelo y la otra parte la transmite a la superestructura.

En la tabla II.3 se muestra la duración en segundos de los registros obtenidos.

DURACIÓN DE LOS REGISTROS OBTENIDOS							
EVENTOS							
ESTACIÓN	11 Mayo 90	31 Mayo 90	1 Abril 91	15 Mayo 93	24 Oct 93	10 Dic 94	14 Sep 95
PCAC	216.23	298.92	107.15	358.32	261.96	156.57	278.76
PCAE	215.27	151.37	117.35	323.12	271.56	156.57	279.16
PC6C	121.89	288.59	107.22	357.52	262.36	156.57	278.76
PC6E	126.27	288.44	117.00	360.72	262.36	173.97	315.92
PCEO	*	299.82	144.44	359.44	261.96	157.11	278.76
PCEC	122.97	293.02	*	358.32	262.36	157.17	278.76
PCE8	191.54	291.46	106.94	357.52	261.96	156.57	279.16
PCE7	122.28	291.31	106.02	358.32	262.38	158.03	279.16
PCSO	227.30	292.36	113.38	370.08	263.14	167.35	279.16
PCSC	118.47	297.07	112.85	368.72	263.16	166.77	278.76
PCSE	207.14	292.51	114.47	368.72	261.96	168.27	279.16
ES56	58.02	100.86	56.00	*	*	169.88	261.44

* Evento no registrado

Tabla II.3 Duración en (s) de los registros obtenidos en la red acelerográfica del edificio Plaza Córdoba y en la estación No. 56.

Como se observa en la tabla anterior la duración de los registros obtenidos tiene cierta relación con la magnitud y distancia epicentral (Tabla II.1) de los eventos sísmicos, también se observa una diferencia entre la duración de los registros obtenidos en el edificio y los obtenidos en la estación # 56, la duración de los registros obtenidos en el edificio son mayores lo cual nos indica que existe un proceso de repetición de cargas que puede afectar la estabilidad de la estructura.

III. VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE CADA REGISTRO Y SU RELACIÓN CON ESPECTROS DEL MOVIMIENTO

En este capítulo se definen los parámetros estadísticos de varianza y desviación estándar, se calculan los mismos para las series de datos tiempo-aceleración (figuras II.1 a II.21) obtenidas en el edificio instrumentado, posteriormente se habla de los espectros de Fourier y de la relación que guardan con los parámetros mencionados. Los datos obtenidos en este capítulo (tablas III.2 y III.3) se analizarán en forma condensada más adelante (capítulo IV).

III.1 Varianza y Desviación Estándar

Se define la **varianza** de una muestra con observaciones $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ como la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar de cada observación respecto a la media, dividida por el número de observaciones totales menos una.

Esto es, si tenemos $X(t) = \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ como una serie de datos de aceleración del evento sísmico registrado, la varianza estará definida como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\chi_i - \bar{\chi}_m)^2 \quad \text{Ecuación III.1.1}$$

$$\bar{\chi}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_i}{N} \quad \text{Ecuación III.1.2}$$

Donde σ^2 : varianza

N : número total de muestras observadas

$\bar{\chi}_m$: valor medio del número total de muestras observadas.

Y la raíz cuadrada positiva de la varianza es la Desviación Estándar y se denota por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\chi_i - \bar{\chi}_m)^2}{(N-1)}} \quad \text{Ecuación III.1.3}$$

La varianza es una medida razonablemente buena de la variabilidad debido a que:

Si muchas de las diferencias $(x_i - \bar{x}_m)$ son grandes entonces el valor de la varianza σ^2 será grande; por el contrario si estas diferencias son pequeñas entonces el valor de la varianza σ^2 será obviamente pequeño. El valor de la varianza puede sufrir un cambio muy desproporcionado, aún más que la media, por la existencia de algunos valores extremos en el conjunto de muestras.

A menudo se prefiere la desviación estándar en relación a la varianza porque tiene las mismas unidades físicas que las muestras observadas.

III.2 Espectros de Fourier

En física el "espectro" se conoce como el arreglo de los siete colores que produce la descomposición de un rayo luminoso, este arreglo es según la longitud de onda de cada color. Cuando se trabaja con una señal, en lugar de un rayo luminoso, se tiene un conjunto de datos aleatorios ordenados en el tiempo y mediante el empleo del espectro se trata de descomponerlo en un arreglo de funciones con distinta frecuencia.

En forma general se puede definir al espectro como la representación gráfica de la distribución de energía de un fenómeno con respecto a la frecuencia en que se puede descomponer, esta distribución se debe a las fluctuaciones que normalmente se presentan en la mayoría de las mediciones de un fenómeno.

Al espectro también se le conoce como espectro de frecuencia, espectro de densidad de potencia o función de densidad de potencia espectral (ref. 17).

Para la Ingeniería Civil es importante analizar las señales de aceleración obtenidas en los registros sísmicos, ya que si se conocen las aceleraciones del terreno es posible estimar las fuerzas sísmicas que se generan en la base de las estructuras. Con el fin de realizar un mejor análisis de las series de datos tiempo-aceleración, es necesario el uso de algún tipo de herramienta matemática que permita visualizar la información registrada en forma espectral empleando para ello la Transformada de Fourier.

Con la transformada de Fourier es posible encontrar la relación que existe entre el dominio del tiempo y el de la frecuencia en una señal. Su aplicación incluye cualquier proceso que involucre una variable que sea función del tiempo (ref. 18).

La representación de señales en el dominio del tiempo a señales en el dominio de la frecuencia se define por medio de la transformada de Fourier. Matemáticamente esta relación se establece como:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{-j2\pi ft} dt \qquad \text{Ecuación III.2.1}$$

donde: $S(f)$ es la transformada de Fourier en función de la frecuencia f
 $S(t)$ es la función en el dominio del tiempo t
 f = Frecuencia en Hertz
 t = Tiempo en s y $j = \sqrt{-1}$

En general, la transformada de Fourier es una expresión compleja representada por:

$$H(f) = R(f) + jI(f) \quad \text{Ecuación III.2.2}$$

en la cual: $R(f)$ es la parte real de la transformada de Fourier
 $jI(f)$ es la parte imaginaria de la transformada de Fourier
 $|H(f)|$ es la amplitud o el espectro de Fourier de $S(t)$ y está dada por:

$$|H(f)| = \sqrt{R^2(f) + I^2(f)}$$

$$R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cos(\omega t) dt$$

$$I(f) = - \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \text{sen}(\omega t) dt$$

$$\omega = 2\pi f$$

Una aproximación para representar la historia del movimiento durante un temblor es proporcionada por el Espectro de Fourier definido como (refs. 19 y 20):

$$F(\omega) = \int_0^s S(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^s S(t) \cos \omega t dt - j \int_0^s S(t) \text{sen} \omega t dt \quad \text{Ecuación III.2.3}$$

en la que s es la duración del movimiento en segundos.

La amplitud del espectro de Fourier es:

$$|F(\omega)| = \left\{ \left[\int_0^s S(t) \cos \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^s S(t) \text{sen} \omega t dt \right]^2 \right\}^{1/2}$$

La amplitud del espectro de Fourier es una medida de la energía total contenida en una señal tiempo-aceleración, evaluada en el instante $t = s$ del movimiento. Por supuesto la energía máxima se alcanza en algún instante antes de finalizar el movimiento.

Las figuras III.1 y III.2 muestran los espectros de Fourier de la estructura instrumentada en estudio para los sitios y direcciones indicadas en las mismas. También se presentan los espectros de Fourier de la estación # 56 ubicada cerca del edificio Plaza Córdoba a nivel del terreno natural (figuras III.5 y III.6).

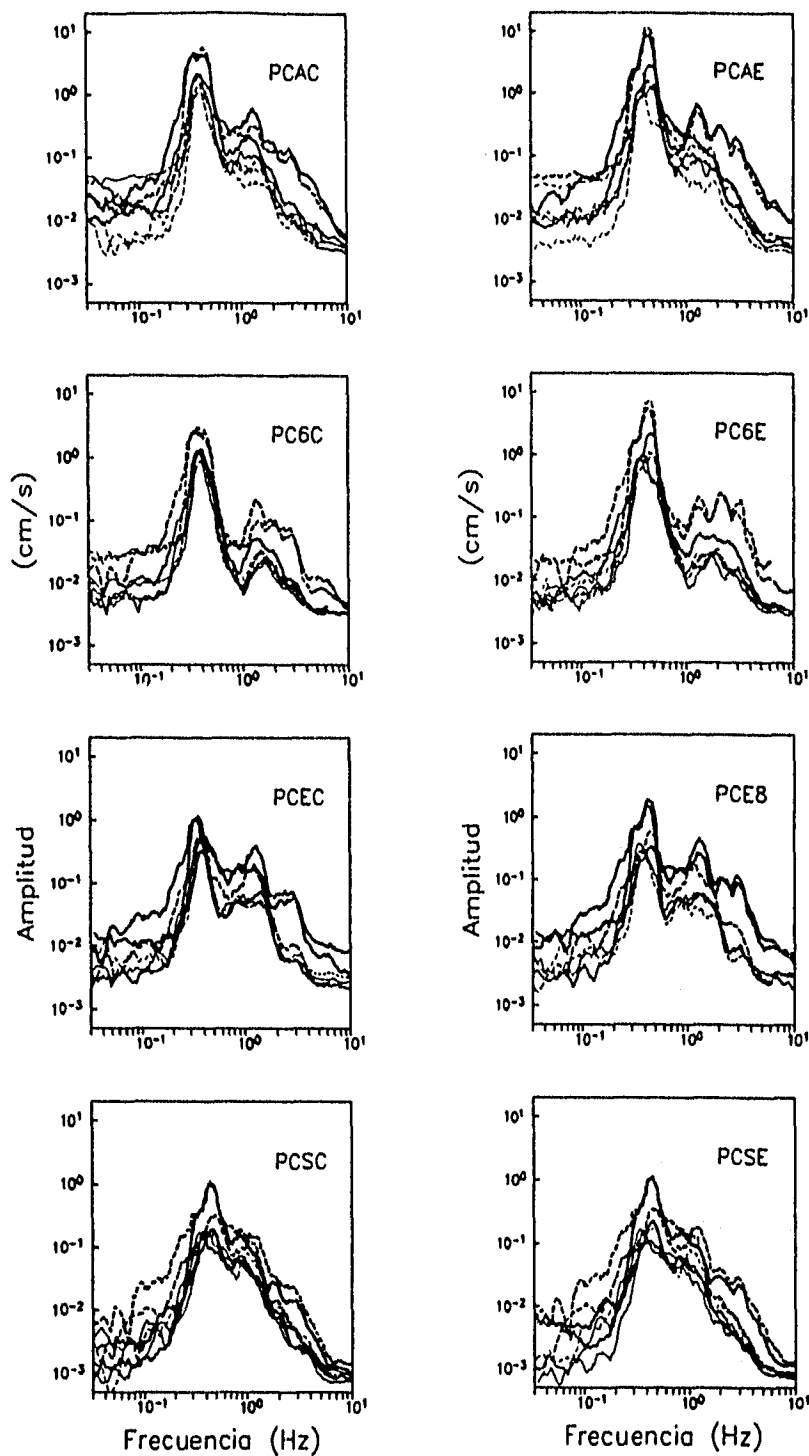


Figura III.1. Espectros de Fourier obtenidos en el edificio Plaza Córdoba. Dirección Norte-Sur.

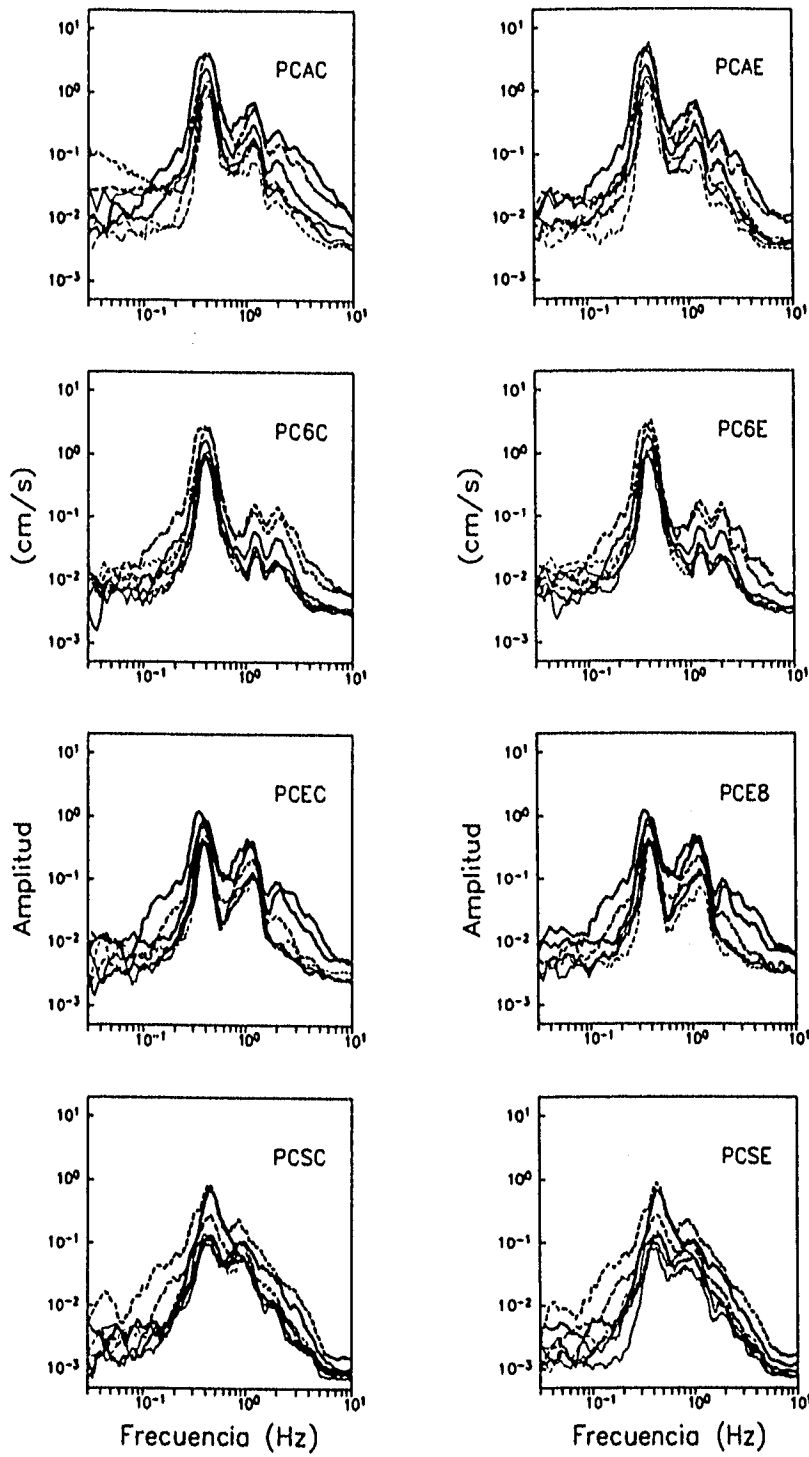


Figura III.2. Espectros de Fourier obtenidos en el edificio Plaza Córdoba. Dirección Este-Oeste.

En las figuras mencionadas podemos notar un comportamiento uniforme en los diferentes sitios de registro del edificio mostrando algunos picos alrededor de las frecuencias de 0.34, 1.3 y 2.8 Hz que corresponden a los modos naturales de vibrar de la estructura en la dirección Norte-Sur (figura III.1), mientras que en la dirección Este-Oeste las frecuencias naturales de vibrar se ubican alrededor de 0.39 1.2 y 2.0 Hz aproximadamente (figura III.2).

Sin embargo, aún cuando el comportamiento tiende a ser uniforme en todos los eventos sísmicos estudiados, si observamos cuidadosamente y comparamos los espectros de Fourier del evento del 11 de mayo de 1990 con los espectros del 14 de septiembre de 1995; podemos notar una variación en la frecuencia natural de vibrar de la estructura, (tabla III.1, figura III.3 y figura III.4), esto indica que el periodo del edificio está evolucionando, esto puede ser consecuencia de que algunos de los elementos estructurales estén dañados o se estén deteriorando y además ilustra que los edificios tienen incursiones inelásticas durante eventos sísmicos.

<i>FRECUENCIAS DOMINANTES EN EL EDIFICIO PLAZA CÓRDOBA</i>				
Estación	Norte-Sur		Este-Oeste	
	1990	1995	1990	1995
PCAC	0.41	0.44	0.43	0.39
PCAE	0.40	0.44	0.43	0.38
PC6C	0.39	0.34	0.43	0.39
PC6E	0.39	0.44	0.43	0.38
PCEC	0.39	0.34	0.38	0.34
PCE8	0.38	0.43	0.40	0.34
PCSC	0.39	0.45	0.39	0.44
PCSE	0.41	0.45	0.43	0.44

Tabla III.1. Variación de la frecuencia natural de vibrar en algunos sitios del edificio Plaza Córdoba.

Por otra parte, después de procesar los datos de aceleración obtenidos en la estación # 56 y calcular sus espectros de Fourier, es notable que la frecuencia dominante (frecuencia natural del terreno) se ubica alrededor de 0.45 Hz en la dirección Norte-Sur (figura III.5) y alrededor de 0.4 Hz para la la dirección Este-Oeste (figura III.6).

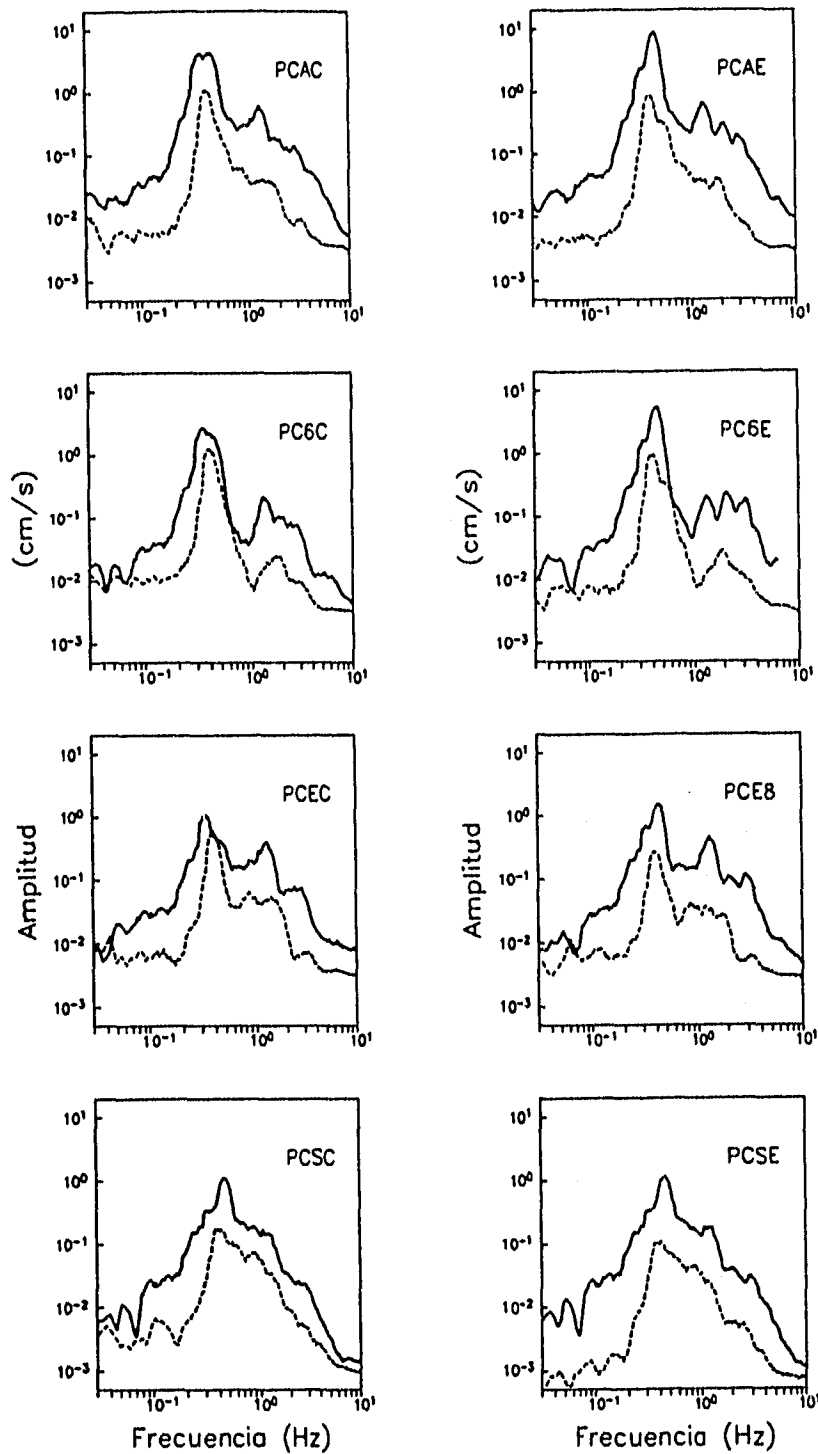


Figura III.3. Espectros de Fourier del edificio Plaza Córdoba. 1990 línea discontinua y 1995 línea continua. Dirección Norte-Sur.

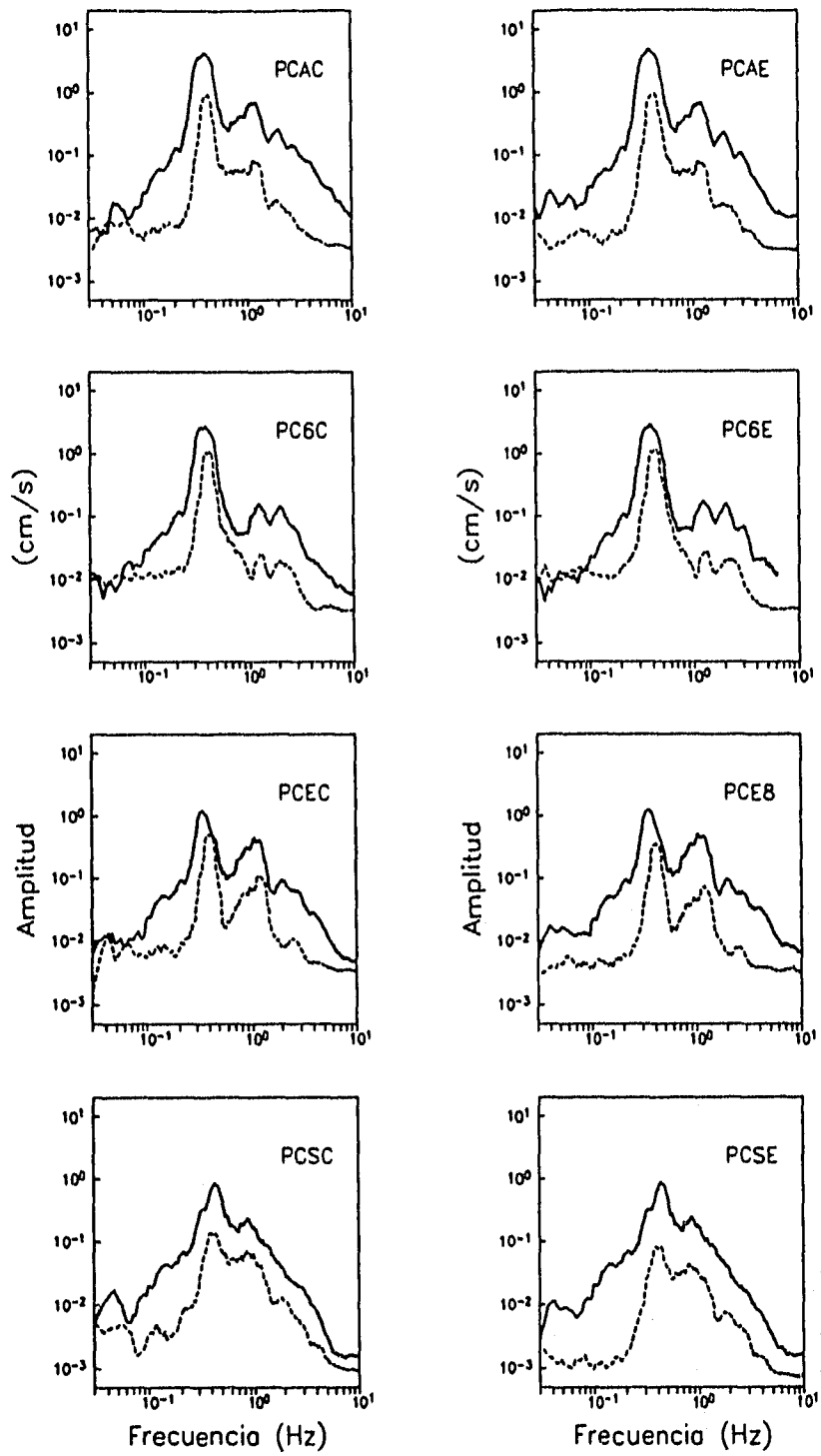


Figura III.4. Espectros de Fourier del edificio Plaza Córdoba. 1990 línea discontinua y 1995 línea continua. Dirección Este-Oeste.

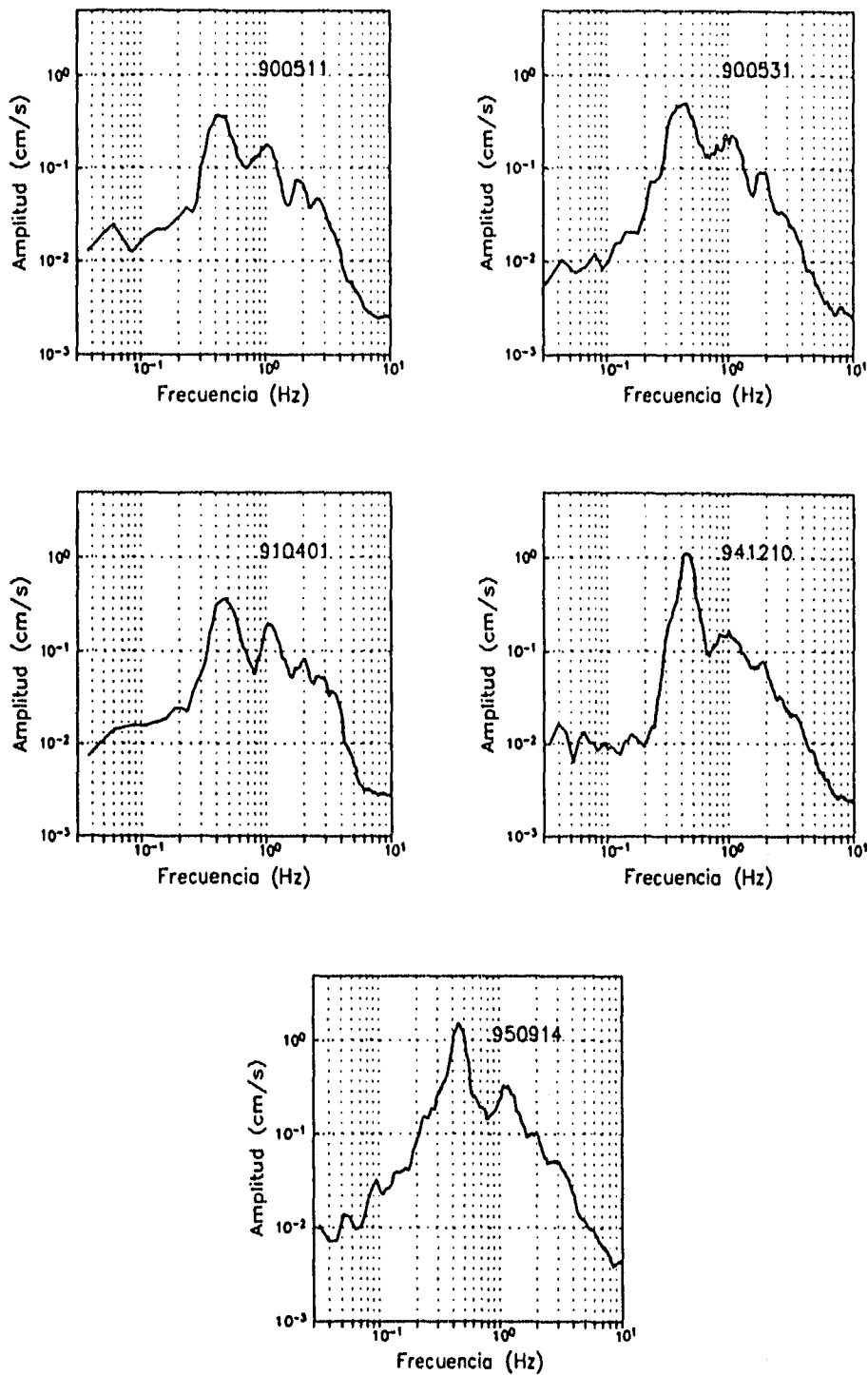


Figura III.5. Espectros de Fourier obtenidos en la Estación # 56. Dirección Norte-Sur.

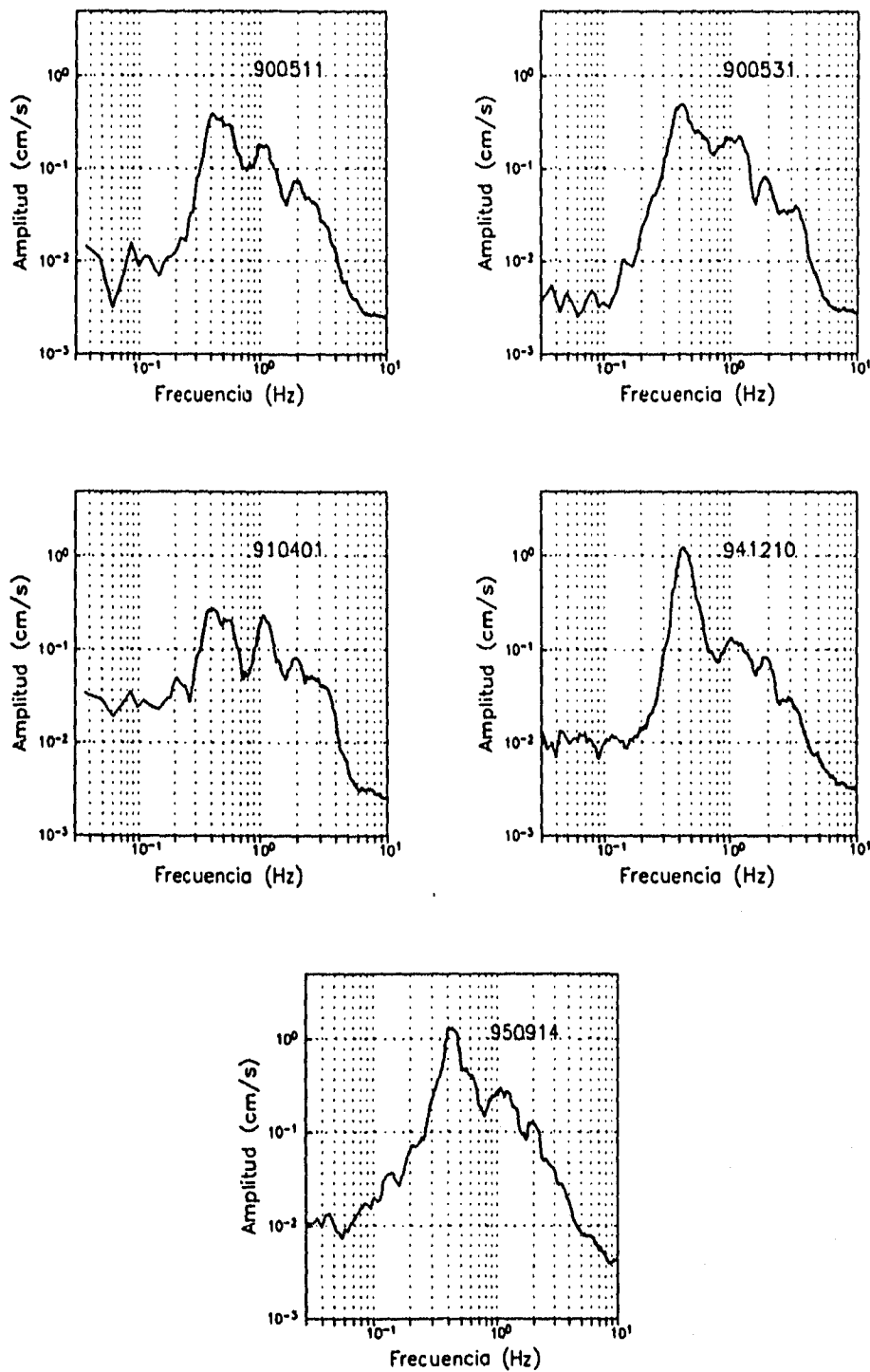


Figura III.6. Espectros de Fourier obtenidos en la Estación # 56. Dirección Este-Oeste.

III.3 Relación entre la Varianza y los Espectros de Potencia

Como vimos en la sección anterior el espectro de Fourier está definido como:

$$F(\omega) = \int_0^s S(t)e^{-i\omega t} dt = \int_0^s S(t) \cos \omega t dt - j \int_0^s S(t) \sin \omega t dt$$

Y su amplitud es:

$$|F(\omega)| = \left\{ \left[\int_0^s S(t) \cos \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^s S(t) \sin \omega t dt \right]^2 \right\}^{1/2}$$

Al elevar al cuadrado la amplitud del espectro de Fourier y dividirla entre la duración s del movimiento obtenemos la función conocida como Densidad Espectral de Potencia (DEP); esto es:

$$DEP = |F(\omega)|^2 / s$$

Por otro lado, para encontrar la relación de la varianza con los espectros de potencia (función de densidad de potencia espectral), se partirá del teorema de Wiener-Khincine (ref. 21), el cual establece que el valor medio cuadrado (varianza) del proceso estacionario $X(t)$ es el área bajo la curva $S_x(\omega)$ (función de densidad de potencia espectral), que por definición es la energía (o potencia) contenida del proceso (ver anexo 5), como ya se mencionó anteriormente.

Es decir si se tiene una función de autocorrelación, en este caso la correspondiente a la historia tiempo-aceleración de una señal, así como la transformada de Fourier de esa señal, se llega a obtener que la varianza de la función es igual a la suma de los componentes discretos de la transformada de Fourier; esto significa que *la varianza de la señal es el área bajo el espectro de Potencia $S_x(\omega)$, que por definición es la potencia o energía contenida en la señal tiempo-aceleración* (refs. 17, 20 y 21); entonces bastará conocer la varianza de los registros de aceleración y así correlacionar la energía contenida de los mismos, para poder establecer factores de amplificación de un sitio a otro.

A partir de este teorema se calcularon la varianza y desviación estándar de las señales tiempo-aceleración obtenidas en las estaciones de campo libre y sobre la estructura en estudio.

En las tablas III.2 y III.3 se muestran los valores de número de muestras que contiene el registro, aceleración media (A_{med}) o valor promedio de la señal (según ecuación III.1.2), aceleración máxima registrada ($A_{máx}$), varianza (σ^2) (según ecuación III.1.1) y desviación estándar (σ) (según ecuación III.1.3); de los registros de aceleración obtenidos en la estación de "campo libre" y en ocho puntos alojados a lo largo de dos líneas verticales dentro del edificio instrumentado, correspondientes a los sismos del 11 y 31 de mayo de 1990, 1 de abril de 1991, 15 de mayo y 24 de octubre de 1993, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995.

SISMO DEL 11 DE MAYO DE 1990					
Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	A _{máx} (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	7200	0.20	-23.478	19.246	4.387
PC6C	6090	0.50	-11.875	13.496	3.674
PCEC	6150	0.30	-5.599	2.648	1.627
PCSC	5920	-0.10	-3.113	0.568	0.754
ES56	5600	0.24	3.970	1.494	1.222
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	7200	0.20	15.608	12.999	3.605
PC6C	6090	0.00	-8.048	10.695	3.270
PCEC	6150	0.80	-6.276	2.803	1.674
PCSC	5920	0.50	2.444	0.330	0.575
ES56	5600	0.36	5.530	1.768	1.330
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	7200	0.30	-2.483	0.139	0.373
PC6C	6090	-0.20	-3.311	0.264	0.514
PCEC	6150	-0.20	-1.697	0.131	0.362
PCSC	5920	-0.50	-1.229	0.046	0.214
ES56	5600	0.27	3.300	0.699	0.836

Tabla III.2. Parámetros estadísticos de los registros obtenidos.

SISMO DEL 31 DE MAYO DE 1990					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ³) x 10 ⁻³	Amáx (cm/s ³)	Varianza (σ^2) (cm ³ /s ⁶)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ³)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	7490	-0.40	-39.376	59.599	7.720
PC6C	7210	-1.80	-23.089	26.577	5.155
PCEC	7280	-0.20	-12.333	5.056	2.249
PCSC	7430	0.00	-6.532	1.076	1.037
ES56	9800	-0.11	9.820	5.05	2.247
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	7490	0.10	-32.273	27.463	5.241
PC6C	7210	0.40	-17.789	13.710	3.703
PCEC	7280	-0.30	-13.447	3.995	1.999
PCSC	7430	0.40	-6.658	0.741	0.861
ES56	9800	-0.11	-9.480	4.671	2.161
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	7490	-0.10	-4.197	0.326	0.571
PC6C	7210	0.70	-4.543	0.504	0.710
PCEC	7280	-0.40	-3.165	0.213	0.461
PCSC	7430	-0.40	2.099	0.073	0.270
ES56	9800	0.54	-5.090	1.330	1.065

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 1 DE ABRIL DE 1991					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed ($\text{cm/s}^2 \times 10^{-3}$)	Amáx (cm/s^2)	Varianza (σ^2) (cm^2/s^4)	Desviación (σ) Estándar (cm/s^2)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	5360	0.30	-17.474	44.856	6.698
PC6C	5360	-0.70	-10.789	18.391	4.288
PCEC	*	*	*	*	*
PCSC	5640	-0.10	-3.156	0.579	0.761
ES56	5600	0.29	4.570	1.515	1.231
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	5360	-0.20	-12.891	20.646	4.544
PC6C	5360	-0.30	-7.143	10.292	3.208
PCEC	*	*	*	*	*
PCSC	5640	-0.50	1.880	0.350	0.592
ES56	5600	0.66	3.840	1.348	1.161
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	5360	-0.40	-1.934	0.136	0.369
PC6C	5360	-0.10	-2.046	0.307	0.554
PCEC	*	*	*	*	*
PCSC	5640	0.20	-1.629	0.042	0.205
ES56	5600	0.22	-3.040	0.664	0.815

* Evento no registrado

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 15 DE MAYO DE 1993					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ³) x 10 ⁻⁵	Amáx (cm/s ³)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	4480	-0.50	42.638	58.282	7.634
PC6C	4470	0.00	-24.056	21.298	4.615
PCEC	4480	0.00	12.504	3.297	1.816
PCSC	4610	-0.30	-10.475	1.557	1.248
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	4480	-0.50	39.618	42.713	6.536
PC6C	4470	-0.40	21.204	19.123	4.373
PCEC	4480	-0.20	-11.490	4.723	2.173
PCSC	4610	-0.30	-8.321	0.925	0.962
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	4480	-0.40	3.981	0.301	0.549
PC6C	4470	0.00	-4.913	0.549	0.741
PCEC	4480	-0.40	3.485	0.240	0.490
PCSC	4610	-0.20	-3.136	0.122	0.349
ES56	*	*	*	*	*

* Evento no registrado

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 24 DE OCTUBRE DE 1993

Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	Amáx (cm/s ²)	Varianza (σ^2) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	6550	0.10	-53.286	113.989	10.677
PC6C	6560	-0.30	24.989	38.991	6.244
PCEC	6560	0.00	17.164	7.235	2.690
PCSC	6580	-0.20	-13.314	4.420	2.102
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	6550	0.30	69.975	103.273	10.162
PC6C	6560	-0.40	33.845	47.684	6.905
PCEC	6560	-0.20	22.181	11.326	3.365
PCSC	6580	-0.10	9.714	2.515	1.586
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	6550	0.10	8.705	0.741	0.861
PC6C	6560	0.10	9.242	1.280	1.131
PCEC	6560	0.10	4.254	0.437	0.661
PCSC	6580	-0.20	3.513	0.196	0.443
ES56	*	*	*	*	*

* Evento no registrado

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 10 DE DICIEMBRE DE 1994					
Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	A _{máx} (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	5220	0.50	-80.54	501.895	22.403
PC6C	5240	0.10	46.708	139.301	11.803
PCEC	5240	0.20	16.478	16.579	4.072
PCSC	5560	0.30	15.207	17.157	4.142
ES56	4240	-0.00	-17.230	20.849	4.566
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	5220	0.90	74.617	190.095	13.788
PC6C	5240	0.50	-34.899	75.636	8.697
PCEC	5240	0.30	17.685	13.654	3.695
PCSC	5560	0.00	-9.358	7.124	2.669
ES56	4240	0.00	17.580	20.670	4.547
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	5220	-0.40	9.846	2.707	1.645
PC6C	5240	0.40	10.880	4.363	2.089
PCEC	5240	-0.20	6.118	1.260	1.123
PCSC	5560	-0.30	-3.102	0.304	0.551
ES56	4240	-0.10	8.140	1.486	1.219

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	Amáx (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAC	6970	-0.30	-127.679	605.503	24.607
PC6C	6970	0.10	70.599	171.275	13.087
PCEC	6970	0.40	48.045	33.353	5.775
PCSC	6970	-0.40	-29.86	29.513	5.433
ES56	6530	0.30	-44.310	54.318	7.370
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAC	6970	0.30	146.729	476.751	21.835
PC6C	6970	-0.40	67.086	188.730	13.738
PCEC	6970	0.10	-43.462	41.380	6.433
PCSC	6970	0.00	-32.406	18.688	4.323
ES56	6530	0.30	-45.180	51.451	7.173
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAC	6970	-0.40	19.071	6.326	2.515
PC6C	6970	0.40	19.672	7.081	2.661
PCEC	6970	0.30	-10.699	2.234	1.495
PCSC	6970	-0.20	10.838	1.134	1.065
ES56	°	°	°	°	°

° Dato no disponible

Tabla III.2. Continuación

SISMO DEL 11 DE MAYO DE 1990

Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	A _{máx} (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	7200	-0.20	-19.718	13.134	3.624
PC6E	6200	-0.10	10.56	8.698	2.949
PCE8	6420	0.10	-6.385	1.153	1.074
PCSE	6930	-59.8	-3.649	0.365	0.604
ES56	5600	0.24	3.970	1.494	1.222
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	7200	0.40	-15.643	13.927	3.732
PC6E	6200	-0.10	-8.62	11.740	3.426
PCE8	6420	-0.50	-6.21	1.997	1.413
PCSE	6930	-9.30	-2.712	0.210	0.458
ES56	5600	0.36	5.530	1.768	1.330
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	7200	-0.20	-1.977	0.121	0.348
PC6E	6200	-0.80	1.702	0.126	0.355
PCE8	6420	0.90	-1.722	0.088	0.297
PCSE	6930	0.11	-1.348	0.026	0.162
ES56	5600	0.27	3.300	0.699	0.836

Tabla III.3. Parámetros estadísticos de los registros obtenidos.

SISMO DEL 31 DE MAYO DE 1990

Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ²) x 10 ⁻³	A _{máx} (cm/s ²)	Varianza (σ^2) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	4990	-1.00	-35.448	74.153	8.611
PC6E	7210	0.10	19.936	16.603	4.075
PCE8	7280	-0.20	-11.632	3.313	1.820
PCSE	7500	0.10	-7.095	1.113	1.055
ES56	9800	-0.11	9.820	5.05	2.247
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	4990	-1.30	-34.847	56.693	7.529
PC6E	7210	0.10	-21.298	15.858	3.982
PCE8	7280	-1.30	-14.319	4.277	2.068
PCSE	7500	-0.10	6.074	0.777	0.882
ES56	9800	-0.11	-9.480	4.671	2.161
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	4990	-0.30	-4.006	0.611	0.782
PC6E	7210	0.30	-2.926	0.188	0.434
PCE8	7280	0.40	-2.431	0.139	0.373
PCSE	7500	1.00	-1.659	0.065	0.255
ES56	9800	0.54	-5.090	1.330	1.065

Tabla III.3. Continuación

SISMO DEL 1 DE ABRIL DE 1991

Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	Amáx (cm/s ²)	Varianza (σ^2) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	5860	0.00	-14.22	27.823	5.275
PC6E	5860	0.30	11.067	16.213	4.027
PCE8	5350	-1.00	5.719	2.142	1.464
PCSE	5720	0.20	-3.288	0.608	0.780
ES56	5600	0.29	4.570	1.515	1.231
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	5860	0.00	15.571	27.310	5.226
PC6E	5860	0.50	8.843	13.767	3.71
PCE8	5350	-0.40	-5.872	3.251	1.803
PCSE	5720	-0.10	-1.978	0.379	0.616
ES56	5600	0.66	3.840	1.348	1.161
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	5860	0.30	2.321	0.192	0.438
PC6E	5860	-0.80	1.877	0.133	0.364
PCE8	5350	0.50	1.694	0.095	0.307
PCSE	5720	0.00	1.246	0.047	0.216
ES56	5600	0.22	-3.040	0.664	0.815

* Evento no registrado

Tabla III.3. Continuación

SISMO DEL 15 DE MAYO DE 1993					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ²) x 10 ⁻³	Amáx (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	4040	-0.40	53.455	69.321	8.326
PC6E	4510	0.00	39.721	36.464	6.039
PCE8	4470	0.30	11.981	4.279	2.069
PCSE	4610	-1.00	10.854	1.840	1.356
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	4040	0.20	38.265	48.675	6.977
PC6E	4510	-0.50	-25.655	21.844	4.674
PCE8	4470	-0.10	-12.777	5.021	2.241
PCSE	4610	-0.30	-8.548	0.987	0.994
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	4040	-0.40	-5.504	0.516	0.719
PC6E	4510	-0.50	4.973	0.351	0.592
PCE8	4470	-0.40	4.567	0.280	0.530
PCSE	4610	0.40	3.393	0.151	0.389
ES56	*	*	*	*	*

* Evento no registrado

Tabla III.3. Continuación

SISMO DEL 24 DE OCTUBRE DE 1993

Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	A _{máx} (cm/s ²)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	6790	-0.30	-89.887	217.367	14.743
PC6E	6560	-0.10	59.416	122.348	11.061
PCE8	6550	0.40	20.406	11.605	3.407
PCSE	6550	-0.20	-15.100	4.923	2.219
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	6790	0.20	-71.763	128.743	11.347
PC6E	6560	-0.10	-40.82	63.602	7.975
PCE8	6550	0.20	23.787	12.536	3.541
PCSE	6550	-0.10	-9.967	2.625	1.620
ES56	*	*	*	*	*
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	6790	0.10	-7.805	1.226	1.107
PC6E	6560	0.10	6.667	0.976	0.988
PCE8	6550	0.40	5.935	0.744	0.863
PCSE	6550	0.00	3.123	0.259	0.509
ES56	*	*	*	*	*

* Evento no registrado

Tabla III.3. Continuación

SISMO DEL 10 DE DICIEMBRE DE 1994					
Estación (Clave)	Número de muestras	Amed (cm/s ²) x 10 ⁻⁵	Amáx (cm/s ²)	Varianza (σ^2) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	5220	0.00	-169.338	1929.280	43.924
PC6E	5800	-0.30	115.849	886.699	29.778
PCE8	5220	-0.50	-32.184	62.068	7.878
PCSE	5610	0.30	-17.279	18.397	4.289
ES56	4240	-0.00	-17.230	20.849	4.566
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	5220	0.20	-90.079	327.443	18.095
PC6E	5800	0.70	-45.136	123.495	11.113
PCE8	5220	-0.20	17.004	16.233	4.029
PCSE	5610	-0.20	9.699	7.074	2.660
ES56	4240	0.00	17.580	20.670	4.547
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	5220	0.20	18.716	10.208	3.195
PC6E	5800	0.30	17.365	7.468	2.733
PCE8	5220	-0.20	22.666	6.287	2.507
PCSE	5610	0.40	4.999	0.640	0.800
ES56	4240	-0.10	8.140	1.486	1.219

Tabla III.3. Continuación

SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995

Estación (Clave)	Número de muestras	A _{med} (cm/s ³) x 10 ⁻³	A _{máx} (cm/s ³)	Varianza (σ ²) (cm ² /s ⁴)	Desviación (σ) Estándar (cm/s ²)
<i>COMPONENTE LONGITUDINAL (L) N-S</i>					
PCAE	6980	-0.20	-195.270	1502.733	38.765
PC6E	3950	0.30	-140.451	663.453	25.758
PCE8	6980	-0.20	-39.650	68.281	8.263
PCSE	6980	-0.10	-34.384	30.752	5.545
ES56	6530	0.30	-44.310	54.318	7.370
<i>COMPONENTE TRANSVERSAL (T) E-W</i>					
PCAE	6980	0.30	-126.657	498.903	22.336
PC6E	3950	0.20	-63.355	185.752	13.629
PCE8	6980	0.20	-46.882	44.055	6.637
PCSE	6980	-0.30	33.496	20.141	4.488
ES56	6530	3.00	-45.180	51.451	7.173
<i>COMPONENTE VERTICAL (V)</i>					
PCAE	6980	-0.20	31.167	12.764	3.573
PC6E	3950	0.00	22.960	8.707	2.951
PCE8	6980	-0.40	20.139	6.375	2.525
PCSE	6980	0.00	10.060	1.399	1.183
ES56	°	°	°	°	°

° Dato no disponible

Tabla III.3. Continuación

IV. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Como notamos en los capítulos II (Tabla II.2) y III (Tabla III.2 y III.3) los valores de aceleración máxima (Amáx) registrados en la azotea del edificio son muy superiores a los valores registrados en el sótano y en la estación # 56 de "campo libre". A su vez las aceleraciones máximas registradas en la estación # 56 son mayores a las registradas en el sótano del edificio. Así, partiendo de estos datos, en este capítulo mostraremos gráficamente la configuración modal de la estructura que se obtiene al normalizar los datos de desviación estándar, aceleración máxima y funciones de transferencia obtenidos en las diferentes niveles respecto al sótano del edificio y comparar ésta con la obtenida a partir de un modelo matemático.

IV.1 Factores de amplificación de desviación estándar y de aceleraciones máximas

Al dividir los valores de la desviación estándar de los registros de aceleración, calculados en cada punto de medición del edificio, entre la correspondiente al valor del sótano, sobre un mismo eje vertical y en una misma dirección, se obtendrán factores de amplificación o de deamplificación respecto al nivel del sótano. Si además se normaliza este valor (ver anexo 6) se tendrá una visión más clara del comportamiento de los valores en cada uno de los niveles.

En la tabla IV.1 y IV.2 se resumen los valores de la desviación estándar calculadas en el capítulo III y normalizados respecto a los valores obtenidos en el sótano del edificio. Así también en la figura IV.1 se presenta gráficamente la variación de este parámetro con la altura del edificio.

DESVIACIONES ESTÁNDAR NORMALIZADAS								
Dirección N-S								
Estación	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC	5.818	7.445	8.802	6.117	5.079	5.409	4.529	6.724
PCAE	6.000	8.162	6.763	6.140	6.644	10.241	6.991	
PC6C	4.873	4.971	5.635	3.698	2.971	2.850	2.409	4.453
PC6E	4.883	3.863	5.163	4.453	4.985	6.943	4.645	
PCEC	2.158	2.169	*	1.455	1.280	0.983	1.063	1.606
PCE8	1.778	1.725	1.877	1.526	1.535	1.837	1.490	
PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

Tabla IV.1. Desviaciones estándar normalizadas. Dirección N-S.

DESVIACIONES ESTÁNDAR NORMALIZADAS Dirección E-O								
Estación	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC	6.270	6.087	7.676	6.794	6.407	5.166	5.051	6.744
PCAE	8.148	8.536	8.484	7.019	7.004	6.803	4.977	
PC6C	5.687	4.301	5.419	4.546	4.354	3.259	3.178	4.686
PC6E	7.480	4.515	6.023	4.702	4.923	4.178	3.037	
PCEC	2.911	2.322	*	2.259	2.122	1.384	1.488	2.175
PCE8	3.085	2.345	2.927	2.255	2.186	1.515	1.479	
PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

Tabla IV.2. Desviaciones estándar normalizadas. Dirección E-O.

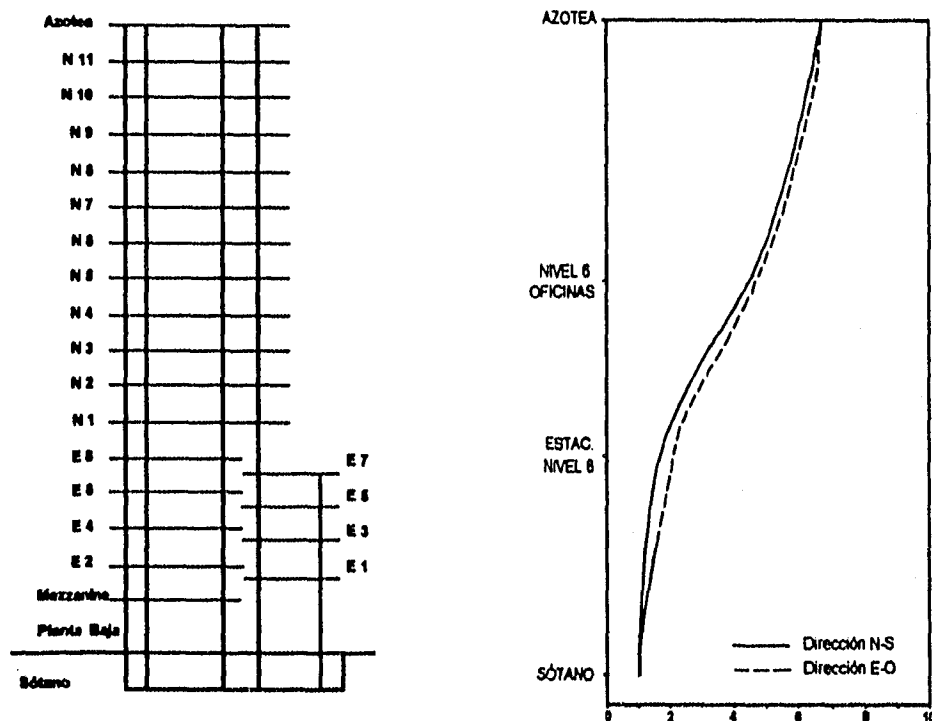


Figura IV.1. Factores de amplificación de desviaciones estándar normalizadas.

Para el cálculo del valor medio de las desviaciones estándar normalizadas obtenidas en cada nivel de medición, se tomaron en cuenta los sismos del 11 y 31 de mayo de 1990, 1 de abril de 1991, 15 de mayo y 24 de octubre de 1993, 10 de diciembre de 1994 y 14 de septiembre de 1995 en sus dos componentes horizontales Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-O).

En esta línea de proceso y análisis de datos, así como se obtuvieron aproximadamente los valores de amplificación normalizados para las desviaciones estándar, también se realizó para los valores de aceleración máxima, los cuales se muestran en las tablas IV.3 y IV.4 y en la figura IV.2.

ACELERACIONES MÁXIMAS NORMALIZADAS								
Dirección N-S								
Estación	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC	7.542	6.028	5.537	4.070	4.002	5.296	4.276	5.560
PCAE	5.404	4.996	4.325	4.925	5.953	9.800	5.679	
PC6C	3.815	3.535	3.419	2.297	1.877	3.071	2.364	3.417
PC6E	2.894	2.810	3.366	3.660	3.935	6.705	4.085	
PCEC	1.799	1.888	*	1.194	1.289	1.084	1.609	1.497
PCE8	1.750	1.639	1.739	1.104	1.351	1.863	1.153	
PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

Tabla IV.3. Aceleraciones máximas normalizadas. Dirección N-S.

ACELERACIONES MÁXIMAS NORMALIZADAS Dirección E-O								
Estación	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC	6.386	4.847	6.857	4.761	7.204	7.974	4.528	6.191
PCAE	5.768	5.737	7.872	4.477	7.200	9.287	3.781	
PC6C	3.293	2.672	3.799	2.548	3.484	3.729	2.070	3.314
PC6E	3.178	3.506	4.471	3.001	4.096	4.654	1.891	
PCEC	2.568	2.020	*	1.381	2.283	1.890	1.341	2.010
PCE8	2.290	2.357	2.969	1.495	2.387	1.753	1.400	
PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

Tabla IV.4. Aceleraciones máximas normalizadas. Dirección E-O.

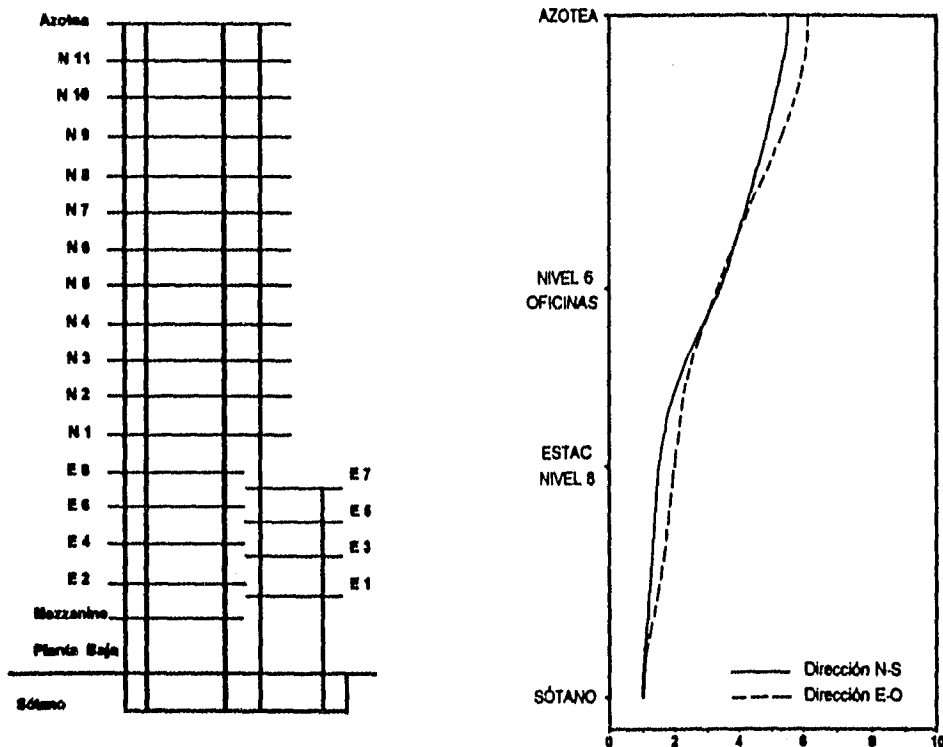


Figura IV.2. Factores de amplificación de aceleraciones máximas normalizadas.

IV.2 Funciones de Tránsito

Las funciones de tránsito sirven para estimar la amplificación relativa entre dos sitios ocurrida durante un mismo temblor o las diferencias en la fuente de dos sismos registrados en un mismo sitio (ref. 22).

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 del registro (Ver apéndice 7).

La función de tránsito entre dos acelerogramas se puede obtener a partir de sus transformadas de Fourier previamente calculadas, las cuales deberán tener el mismo incremento en frecuencia para poder operarse entre sí.

Al conocer las series de tiempo-aceleración del edificio instrumentado y después de calcular sus transformadas de Fourier, se establecieron funciones de tránsito a lo largo de dos ejes verticales respecto a las estaciones del sótano, obteniendo así en un eje las relaciones PCAC/PCSC, PC6C/PCSC, PCEC/PCSC y en el otro eje PCAE/PCSE, PC6E/PCSE y PCE8/PCSE. Esto está encaminado a conocer alrededor de qué frecuencias se tiene una amplificación o deamplificación relativa de la energía contenida en los diferentes puntos de medición respecto al sótano del edificio. Y con la finalidad de conocer la disipación de energía entre el terreno libre y la cimentación se realizaron funciones de tránsito con la estación del sótano (PCSC) y la de campo libre (ES56).

Las figuras IV.3 y IV.4 muestran algunas de las funciones de tránsito calculadas para los sismos estudiados. En ellas se observa la existencia de tres máximos alrededor de las frecuencias 0.40, 1.30 y 6.50 Hz con tendencias a amplificar, esto es, la energía contenida y el movimiento en los niveles superiores de la estructura siempre son mayores a los de la base.

Con relación al sótano respecto al terreno natural (figuras IV.5 y IV.6) estas funciones presentan tendencias a deamplificar lo cual es congruente si consideramos la presencia de la cimentación rígida de la superestructura a excepción de algunos picos ($f = 0.80$ Hz) en los cuales se amplifica la relación establecida.

Para el caso de visualizar la amplificación del movimiento del edificio con relación a su altura se tabularon los valores (Tablas IV.5 y IV.6) de estas funciones para la frecuencia natural de vibración del edificio ($f = 0.38$ Hz) y se hizo una representación gráfica aproximada (figura IV.7) con los datos obtenidos.

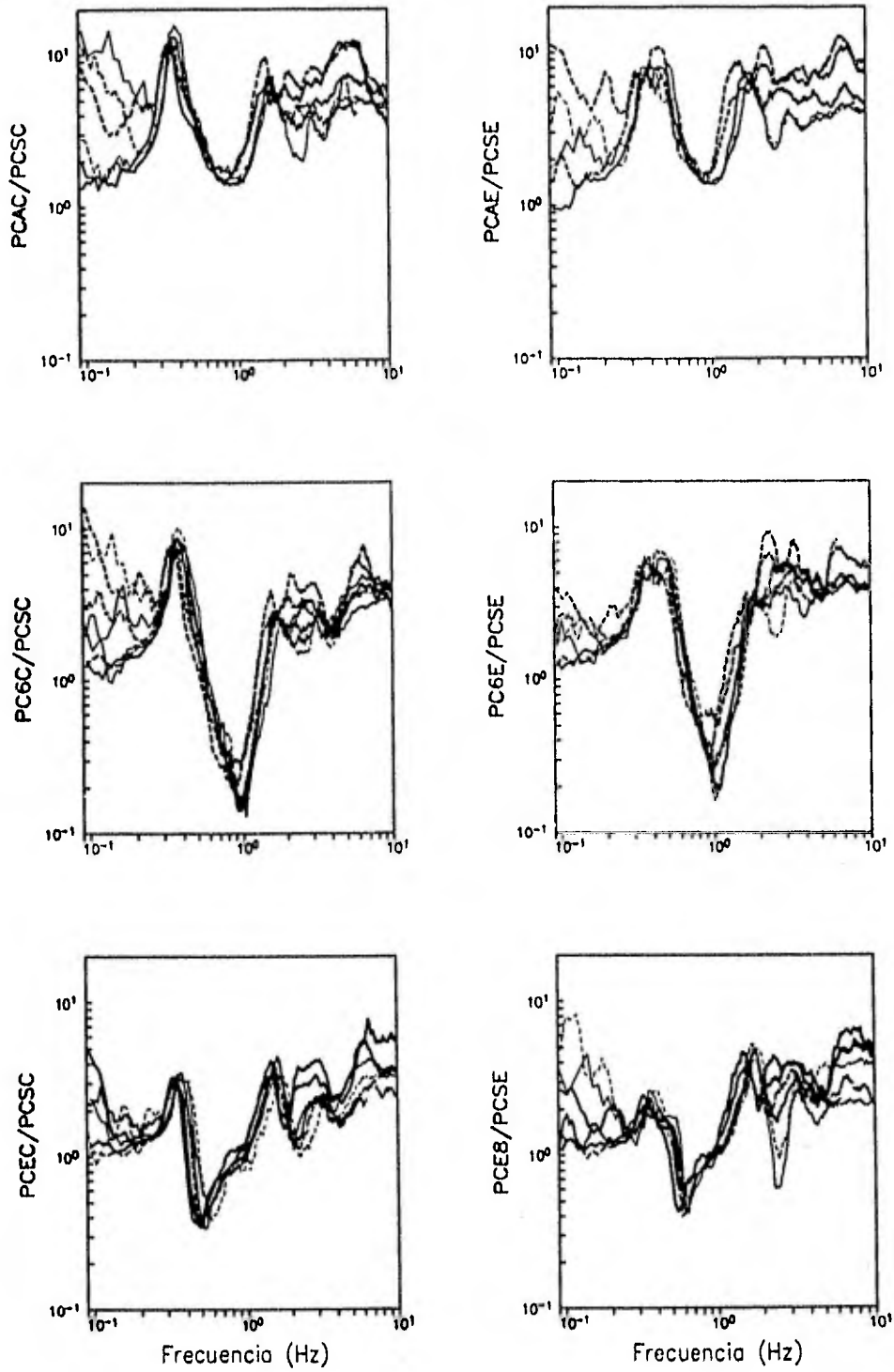


Figura IV.3. Funciones de transferencia obtenidas en el edificio Plaza Córdoba. Dirección Norte-Sur.

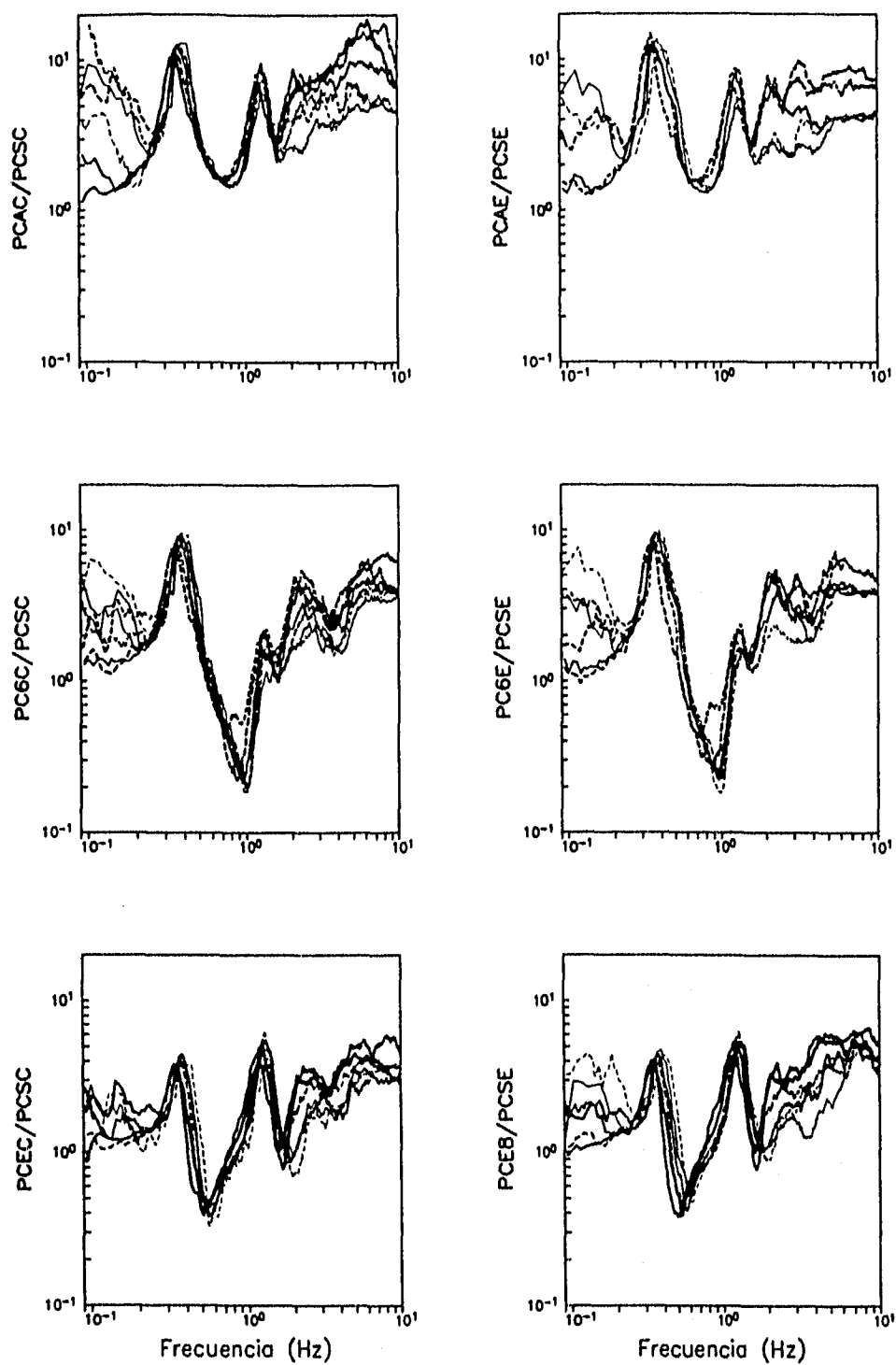


Figura IV.4. Funciones de trasferencia obtenidas en el edificio Plaza Córdoba. Dirección Este-Oeste.

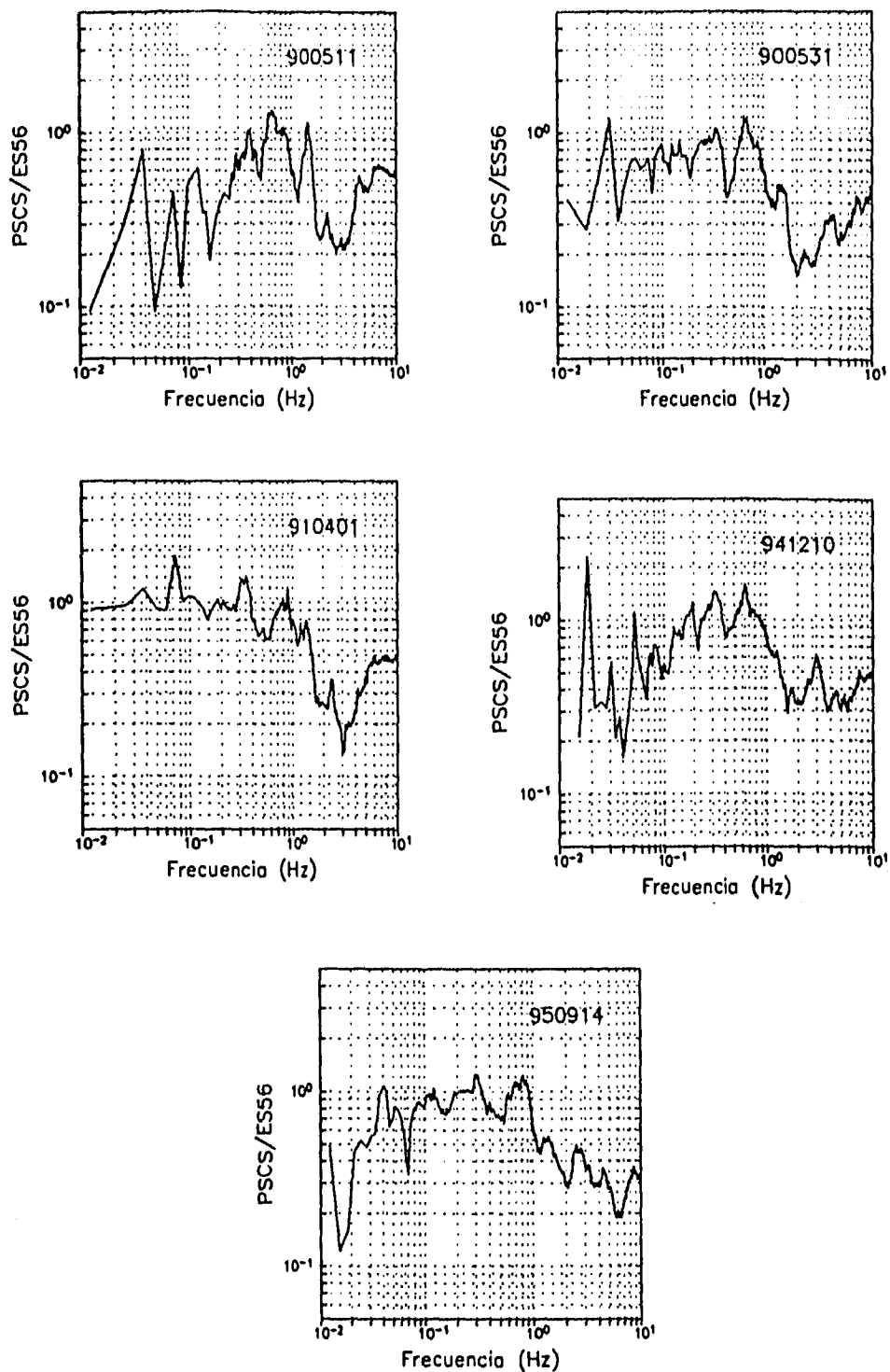


Figura IV.5. Funciones de transferencia obtenidas entre la Estación # 56 y el sótano del edificio.
Dirección Norte-Sur.

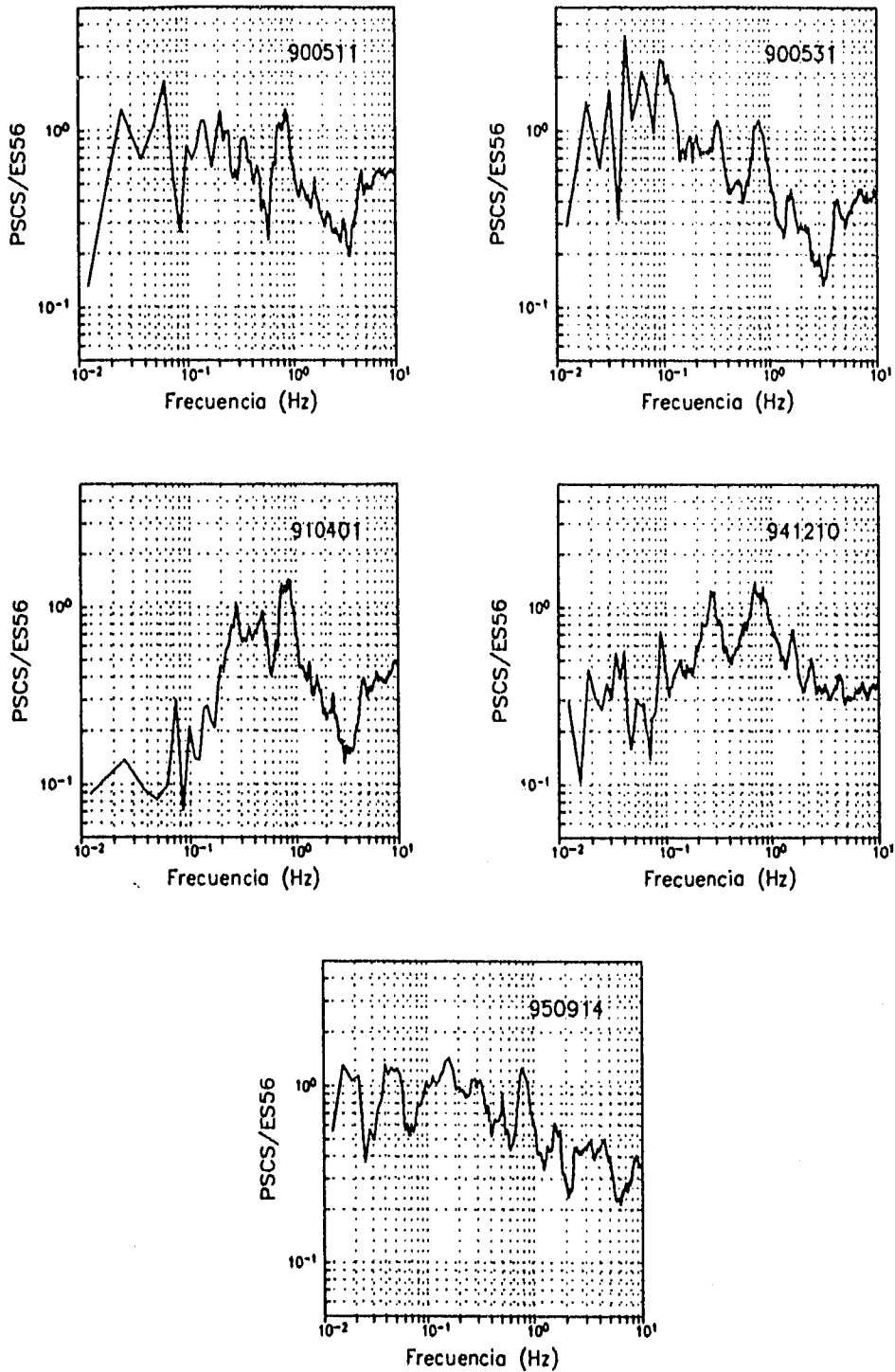


Figura IV.6. Funciones de transferencia obtenidas entre la Estación # 56 y el sótano del edificio. Dirección Este-Oeste.

FUNCIONES DE TRASFERENCIA Dirección N-S								
Función	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC/PCSC	o	11.400	15.110	12.484	12.930	10.334	7.470	8.990
PCAE/PCSE	7.830	o	7.600	o	7.000	6.810	7.705	
PC6C/PCSC	6.800	7.820	10.000	8.140	8.460	6.660	4.632	6.507
PC6E/PCSE	o	5.415	6.000	5.375	5.580	4.615	5.100	
PCEC/PCSC	3.030	3.141	*	3.115	3.020	2.138	1.263	2.320
PCE8/PCSE	2.595	2.236	2.300	1.875	1.849	1.775	1.800	
PCSC/PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE/PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

° Función no calculada

Tabla IV.5. Funciones de Transferencia. Dirección N-S.

FUNCIONES DE TRASFERENCIA Dirección E-O								
Función	Fecha de sismo (aammdd)							Valor Medio
	900511	900531	910401	930515	931024	941210	950914	
PCAC/PCSC	o	11.000	13.200	12.650	11.200	10.300	7.860	11.050
PCAE/PCSE	9.700	o	13.470	o	11.500	11.650	9.000	
PC6C/PCSC	7.800	8.300	9.800	9.260	8.050	7.000	5.200	8.030
PC6E/PCSE	o	8.500	9.900	9.350	8.600	7.190	5.500	
PCEC/PCSC	3.880	3.840	o	4.310	3.450	2.650	1.900	3.440
PCE8/PCSE	3.990	3.780	4.700	4.160	3.460	2.710	1.920	
PCSC/PCSC	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PCSE/PCSE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

* Evento no registrado

° Función no calculada

Tabla IV.6. Funciones de transferencia. Dirección E-O.

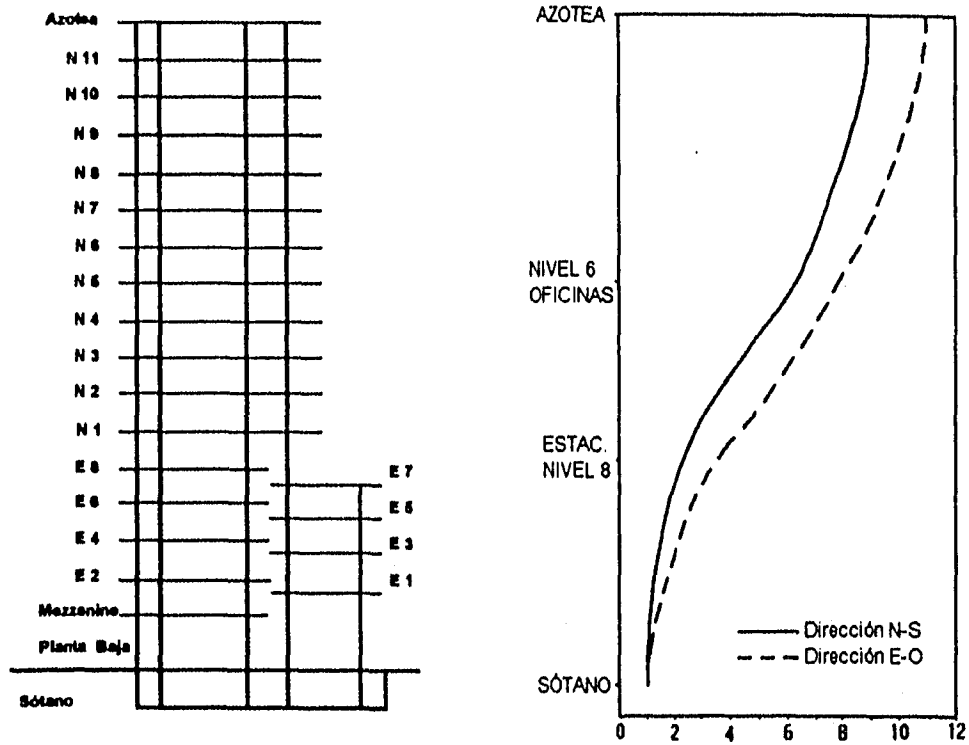


Figura IV.7. Factores de amplificación de las funciones de transferencia.

IV.3 Configuraciones modales del edificio

En un trabajo previo (ref. 23), se elaboró un modelo tridimensional del edificio Plaza Córdoba, mediante el programa "Super-Etabs" en el cual la rigidez angular y lineal de la cimentación se relacionó con el valor del periodo del sistema suelo-estructura, a fin de identificar la rigidez aparente de la cimentación durante diversos sismos. Se obtuvieron las formas características que aparecen en las figuras IV.8 y IV.9, donde se muestran las configuraciones modales en dos direcciones ortogonales y en la tabla IV.7 se muestran los desplazamientos obtenidos con este análisis.

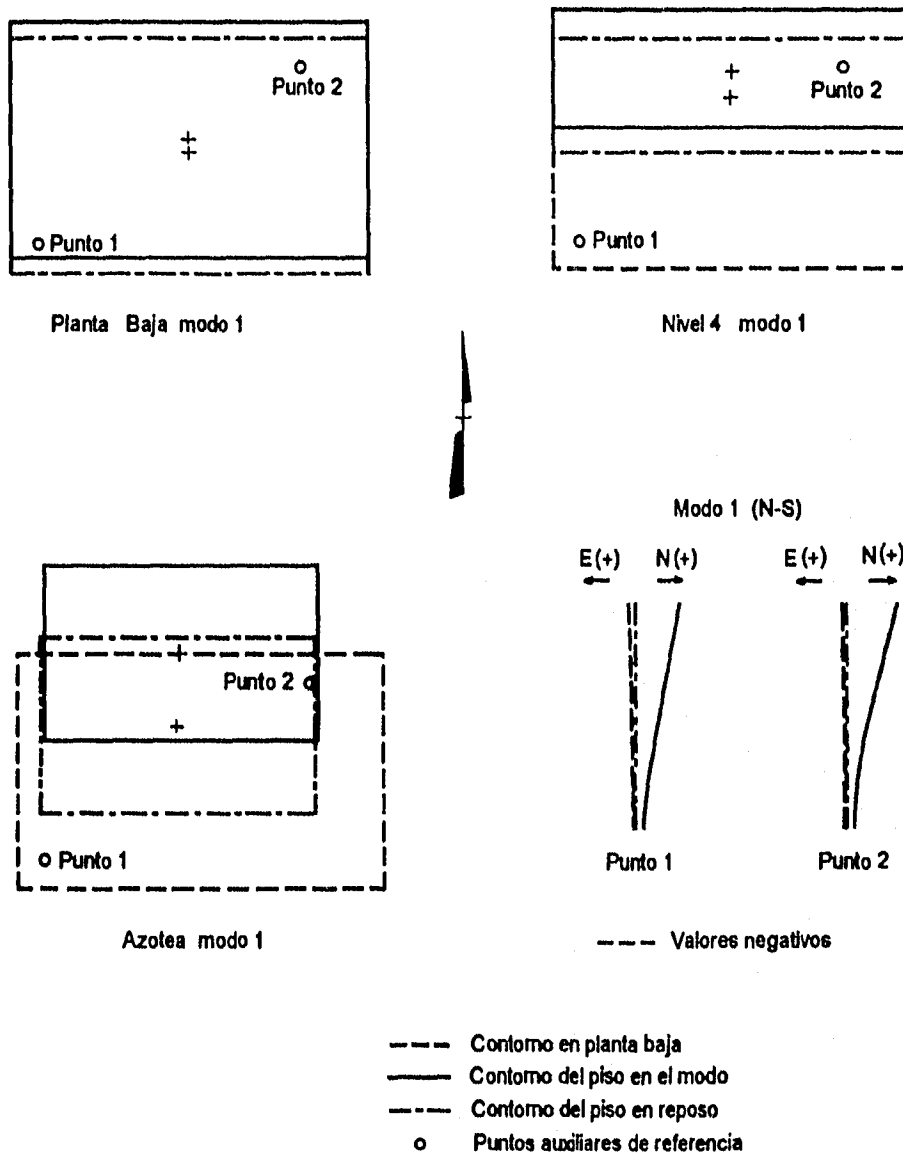


Figura IV.8. Formas naturales de vibrar del edificio. Dirección Norte-Sur.

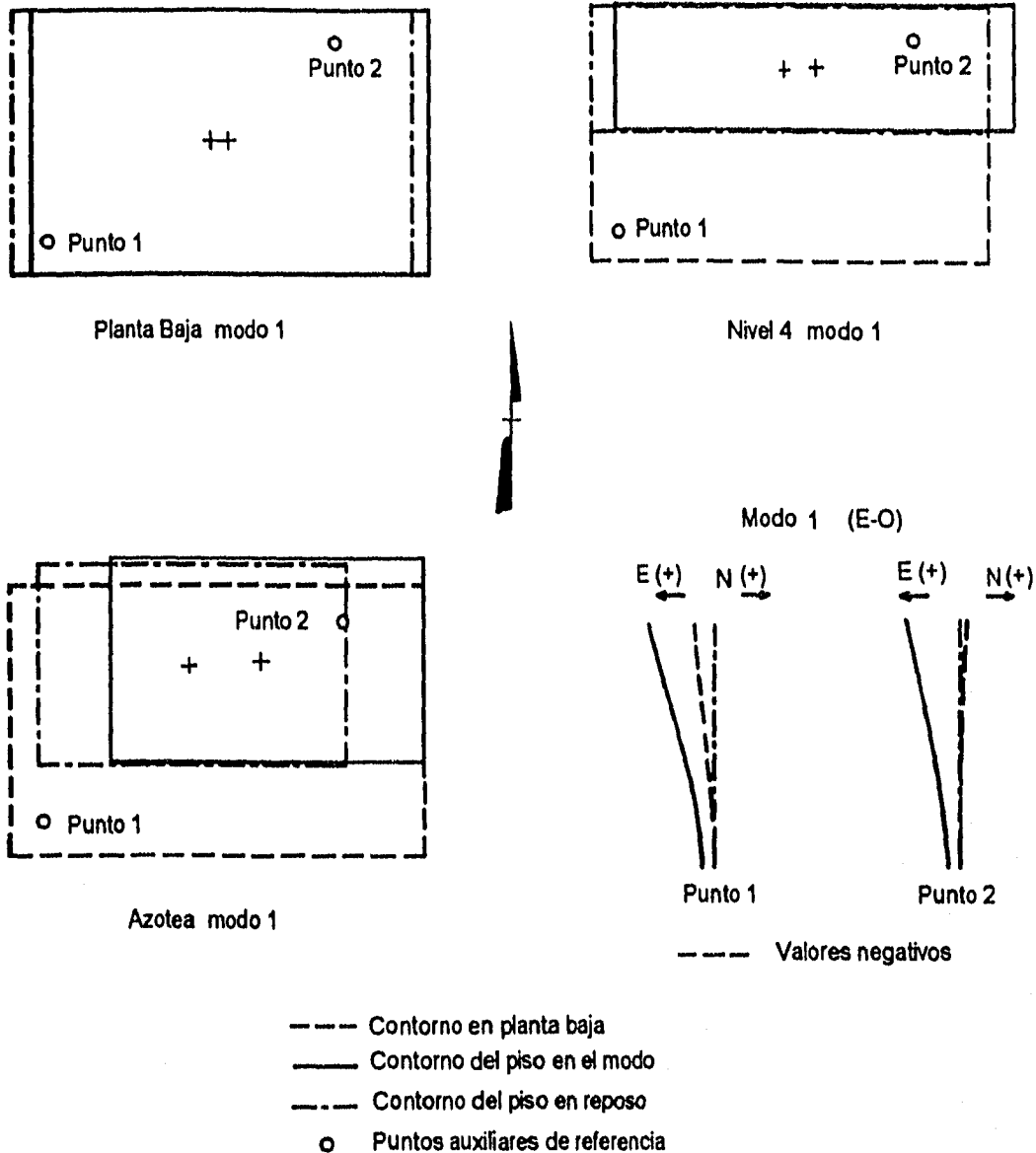


Figura IV.9. Formas naturales de vibrar del edificio. Dirección Este-Oeste.

Se observa en la figura IV.1 que el valor medio de las desviaciones estándar normalizadas, proporciona una configuración similar a las configuraciones modales del modelo matemático seleccionado para representar el modo fundamental del edificio, figuras IV.8 y IV.9.

Por otra parte, la curva de amplificación de aceleraciones máximas normalizadas (figura IV.2) en cada nivel es también creciente con la altura, sin embargo, a diferencia de la desviación estándar se tiene

menos semejanza a la forma del modo fundamental de vibración natural del edificio, sólo la dirección N-S da una forma similar a la configuración obtenida por el modelo matemático.

Nivel de Medición	Desplazamiento Normalizado N-S	Desplazamiento Normalizado E-O
Azotea	6.09	5.00
Nivel 8 Ofic.	4.71	3.93
Nivel 5 Ofic.	3.65	3.14
Nivel 1 Ofic.	2.38	2.14
Nivel 2 Estac.	1.68	1.50
Sótano	1.00	1.00

Tabla IV.7. Desplazamientos obtenidos con en el modelo matemático.

Para la figura de las funciones de transferencia (figura IV.7) podemos notar un mejor acoplamiento con el modelo mencionado; sin embargo las amplificaciones de la energía contenida en los registros son mayores en proporción a las que se obtienen ya sea en la desviación estándar y aceleraciones máximas normalizadas ó en el modelado de la estructura (tabla IV.7). Estos resultados pueden ser aceptables si se considera que la relación utilizada para hacer la figura se encuentra alrededor de la frecuencia natural de vibrar del edificio, por lo que se tienen mayores amplitudes y tal vez la estructura entre en resonancia con el suelo por lo que se incrementa más esta relación. Para trabajar con las funciones de transferencia y conseguir resultados más aceptables posiblemente, sería recomendable en trabajos de investigación a futuro, establecer un promedio de la amplificación de estos factores en todo el intervalo de frecuencias analizado y no en un solo punto como se hizo en este caso.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis de la información contenida en los registros de aceleración obtenidos durante los siete eventos sísmicos estudiados en este trabajo se llegó a las siguientes:

V.1 CONCLUSIONES

1. La instrumentación sísmica de edificios y la interpretación de los registros obtenidos durante sismos severos constituyen, probablemente, la línea más productiva de investigación para mejorar los métodos de diseño sismorresistente de edificios, pues los datos que se recolectan son reales y acordes con el prototipo estudiado.
2. Los movimientos sísmicos en la ciudad de México presentan características particulares que requieren ser estudiadas directamente en el sitio. El movimiento que experimenta el terreno compresible de la ciudad de México durante un sismo es diferente del que se tiene en la mayoría de otros lugares.
3. Es posible describir el movimiento del edificio Plaza Córdoba mediante parámetros estadísticos de varianza y desviación estándar, relacionados con el área bajo los espectros de potencia de las series de tiempo-aceleración registradas en los aparatos de medición, como se obtuvo en el capítulo tres, donde la variable de desviación estándar da una medida de la energía inducida a la estructura en cada punto de medición.
4. Se logró una representación estadística de la respuesta del edificio a cada temblor que permite su correlación con otros eventos sísmicos, así como analizar y condensar la información que se obtiene de los registros de aceleración, como se mostró en el capítulo cuatro, donde se resumieron los valores de desviación estándar normalizadas respecto a la estación del sótano, observándose así la amplificación de la desviación estándar del movimiento, configuración que resultó similar a las obtenidas del modelo matemático seleccionado para representar el modo fundamental de vibrar del edificio; lográndose así una visión clara de la cinemática del edificio.
5. Al observar los espectros de Fourier de los movimientos éstos fueron similares en los siete sismos estudiados sin embargo se detectó que el periodo de vibración del edificio se está incrementando y acercando al periodo del terreno natural, tal vez sea ésta la razón por la cual los ocupantes del inmueble perciben claramente cualquier movimiento sísmico aunque sea moderado. El incremento del periodo puede ser indicativo de que algunos elementos estructurales estén dañados o se estén deteriorando por el proceso de repetición de cargas al que se ven sometidos en cada evento sísmico.
6. Los espectros de Fourier de los registros sísmicos obtenidos en los diferentes puntos de medición de la estructura, muestran la amplitud máxima en 0.34 Hz, le sigue la amplitud a 1.3 y 2.8 Hz para la dirección N-S y en 0.39, 1.2 y 2.0 Hz para la dirección E-O, estas frecuencias corresponden a los primeros modos de vibrar de la estructura; para la estación de campo libre (estación # 56) las

amplitudes máximas de los espectros de Fourier se observan en 0.45 Hz para la dirección N-S y 0.40 Hz para la dirección E-O, que son las frecuencias naturales de vibrar del terreno natural.

7. Como notamos en los capítulos II y III los valores de aceleración registrados en la azotea del edificio son muy superiores a los valores registrados en el sótano y en la estación # 56 de "campo libre". A su vez las aceleraciones registradas en la estación # 56 todas son mayores a las registradas en el sótano del edificio. Esto se da por la presencia de la cimentación rígida del edificio que refracta hacia el terreno parte de las ondas sísmicas, disminuyendo así la energía total inducida; la otra parte se absorbe y transmite a la superestructura del edificio.

V.2 RECOMENDACIONES

1. Para poder enriquecer la información experimental y tipo de modelos a utilizar se sugiere mantener en operación la red acelerográfica instalada en el edificio ante la posible ocurrencia de eventos sísmicos de mayor magnitud e intensidad y por la notable variación del periodo fundamental del edificio hacia la resonancia con el suelo.
2. Se recomienda colocar un sensor en campo libre y otro de pozo para este edificio a fin de obtener una señal de entrada para el sistema que no esté influida por el movimiento de éste y cuantificar la amplificación que sufren las ondas sísmicas en los estratos de terreno blando. Esto ayudará además a conocer la influencia de la interacción suelo-estructura sobre el edificio.
3. Considerando, la gran variedad de tipo de estructuras, de condiciones de subsuelo y de cimentación, para los cuales se requiere conocer su comportamiento; resultaría provechoso instrumentar más edificios para que el proceso de calibración de los métodos analíticos de diseño sea convincente con la realidad. Esto resultará de una amplia comprobación cuantitativa de las acciones que realmente se imponen a los edificios durante un sismo y de la respuesta que éstos experimentan.
4. Aprovechando la información obtenida del procesamiento de acelerogramas del edificio Plaza Córdoba y la interpretación de la misma, es recomendable replantear el modelado del edificio, ya que es notable que algunas de sus propiedades dinámicas (periodo, rigidez) están cambiando al experimentar éste movimientos severos, esto, con el fin de mantener actualizada la información acerca de la evolución en la respuesta del mismo.

REFERENCIAS

1. Beles, Ifrim y García (1975). "Elementos de Ingeniería Sísmica". Editorial Omega S. A. Barcelona España.
2. Rodríguez Cuevas, N. (1990). "Determinación experimental de parámetros estructurales y de la cimentación de edificios mediante vibración ambiental". SMIS, Ingeniería Sísmica, No. 38 pp 5-36.
3. Mena E, Quaas R, (1989), "Instrumentación para registro de sismos en edificios del Distrito Federal", Informe final a CONACYT, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
4. Fundación ICA, A. C. (1988). "Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985". Ed. Limusa, Noriega Editores, México D. F.
5. Hart Gary C. (1975). "Torsional response of high-rise buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, pp 101, 397-414.
6. González R, Noguez F, Alcántara L y Vicitez D. (1994). "Análisis del comportamiento dinámico del edificio Córdoba a partir de registros sísmicos". Instituto de Ingeniería, UNAM.
7. Rodríguez N, Quaas R, (1990), "Respuesta Estructural de un edificio instrumentado en la ciudad de México, durante sismos recientes". Seminario Internacional "Instrumentación Sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural". pp 125-155. México D.F.
8. Alcántara L, Macías M A, (1990), "El sismo del 11 de mayo de 1990 en el edificio Plaza Córdoba. Registros procesados y funciones de transferencia", Instituto de Ingeniería, UNAM, reporte IPS-16, México D. F.
9. Quaas, E. Mena, D. Almora, L. Alcántara y M. A. Macías (1990). "Acelerogramas del temblor de mayo 31, 1990, obtenidos en el edificio Plaza Córdoba" Instituto de Ingeniería, UNAM, reporte IPS-14, México D. F.
10. Alcántara N, D. Almora M, R. Quaas W y M. A. Macías C, (1991) "Instrumentación Sísmica de dos edificios en la ciudad de México", IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VIII de Ingeniería Estructural, Vol. 1, 3-21 a 3-33, Manzanillo Colima, México.
11. Alcántara, D. Almora, M. A. Macías, H. Sandoval y G. Castro (1993). "Estudio del comportamiento sísmico de dos edificios instrumentados en el Distrito Federal", Informe final elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.
12. Alcántara L, Almora D, Castro G, Ylizaliturri J y Macías M A, (1993). "El sismo del 24 de octubre de 1993 en el edificio Plaza Córdoba, acelerogramas obtenidos", Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.
13. Coordinación de Instrumentación Sísmica. (1995). "Registros de aceleración obtenidos en el edificio Plaza Córdoba". Comunicación personal. Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.

14. Alcántara, D. Almora, G. Castro, M. A. Macías, H. Sandoval y J. Ylizaliturri (1995). "El sismo del 14 de septiembre de 1995 (ME=7.3) en el edificio Plaza Córdoba, acelerogramas obtenidos". Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.
15. Alcántara, D. Almora, G. Castro, M. A. Macías, J. Ylizaliturri, H. Sandoval y S. Santiago (1995). "Respuesta sísmica de dos edificios cimentados en terreno blando del valle de México". Informe final elaborado para el Departamento del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.
16. Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), Fundación Javier Barros Sierra (1995). Comunicación personal. México, D. F.
17. Brigham, E. Oran (1988). "The Fast Fourier Transform and its Applications". Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
18. Nava Mastache Arturo (1984). "Obtención de espectros en fenómenos hidráulicos". Trabajo de grado de maestría. Fac. de Ing., UNAM. México D.F.
19. Rosenblueth E. and Newmark N. M. (1971). "Fundamentals of Earthquake Engineering" Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
20. Ghiocel D, Lungu D (1975). "Wind, snow temperature effects on structures based on probability", Abacus Press, Kent Inglaterra.
21. Ray W. Clough and Joseph Penzien (1975). "Dinamics of Structures". Editorial Mc Graw-Hill Inc.
22. Mena, Sandoval E. (1990). "Sistema de Procesamiento avanzado de Acelerogramas para el Cenapred". Manual del Usuario. México D.F.
23. Martínez Lagunes R. (1989). "Respuesta Teórica y Experimental de un edificio de 17 niveles sobre suelo blando". Tesis Licenciatura, F. I. UNAM.

APÉNDICE

1. Conceptos de Sismología

Temblores. Es una vibración de la Tierra que puede ser producida por diferentes causas: el colapso del techo de cavernas o minas, el choque de objetos pesados contra la superficie (meteoritos), erupciones volcánicas, acomodamiento de la corteza terrestre (tectónica de placas), algunas explosiones (ensayos nucleares), deslizamientos de taludes en montañas y otras.

Foco de un temblor. También se le conoce como centro, hipofoco o hipocentro y es el punto donde se inicia la ruptura de las rocas.

Epicentro o epifoco. Se define como epicentro de un sismo a la proyección del foco sobre la superficie terrestre, a lo largo de un radio de la Tierra.

Profundidad focal. Es la distancia que existe entre el epicentro y el foco, se clasifica como normal intermedia y profunda. La normal está comprendida entre 0 y 70 km; la intermedia entre 70 y 300 km y la profunda mayor a 300 km; las mayores profundidades detectadas son del orden de 700 km.

Distancia epicentral. Es la distancia del epicentro a una estación donde se haya registrado el movimiento, se calcula con base en los registros de las ondas sísmicas P y S.

Ondas sísmicas. Al generarse un temblor se producen dos tipos de ondas sísmicas, conocidas como ondas de cuerpo y como ondas superficiales; las ondas de cuerpo se clasifican en dos: una que comprime el terreno, onda **P** y otra que trata de cortarlo moviéndose perpendicularmente, onda **S**. Al llegar a la superficie de la Tierra estas ondas dan lugar a las ondas superficiales, las cuales se clasifican en dos: Love (**L**) y Rayleigh (**R**). La onda **L** vibra en un plano paralelo a la superficie de la Tierra y perpendicularmente a la propagación de la onda. La onda **R** vibra en un plano perpendicular a la superficie de la Tierra y presenta un movimiento elíptico. En la figura A se muestran los principales tipos de ondas sísmicas y las características de su movimiento.

Teorías sobre el origen de los temblores. La teoría más aceptada, es que los temblores de origen tectónico se deben al acomodamiento de las grandes placas en que se encuentra dividida la corteza terrestre al haber movimiento relativo entre ellas.

Las principales placas tectónicas que forman la corteza terrestre son: la de Norteamérica, la Sudamericana, Pacífica, Euroasiática, Indoaustraliana, China, Antártica, Africana, Arábiga, Filipina, de Cocos, de Nazca, del Caribe, Iraní y Helénica, (véase figura 1 de la Introducción).

Al tender a moverse una placa con respecto a la otra, la fricción lo impide, acumulándose energía potencial que se libera bruscamente al rebasarse la resistencia de las rocas, produciéndose los temblores. Parte de la energía de deformación liberada se dispersa desde la región focal con un movimiento de onda sísmica, y el resto, permite que tenga lugar la deformación de la corteza y que la energía se absorba en la ruptura de las rocas y el deslizamiento en las fallas.

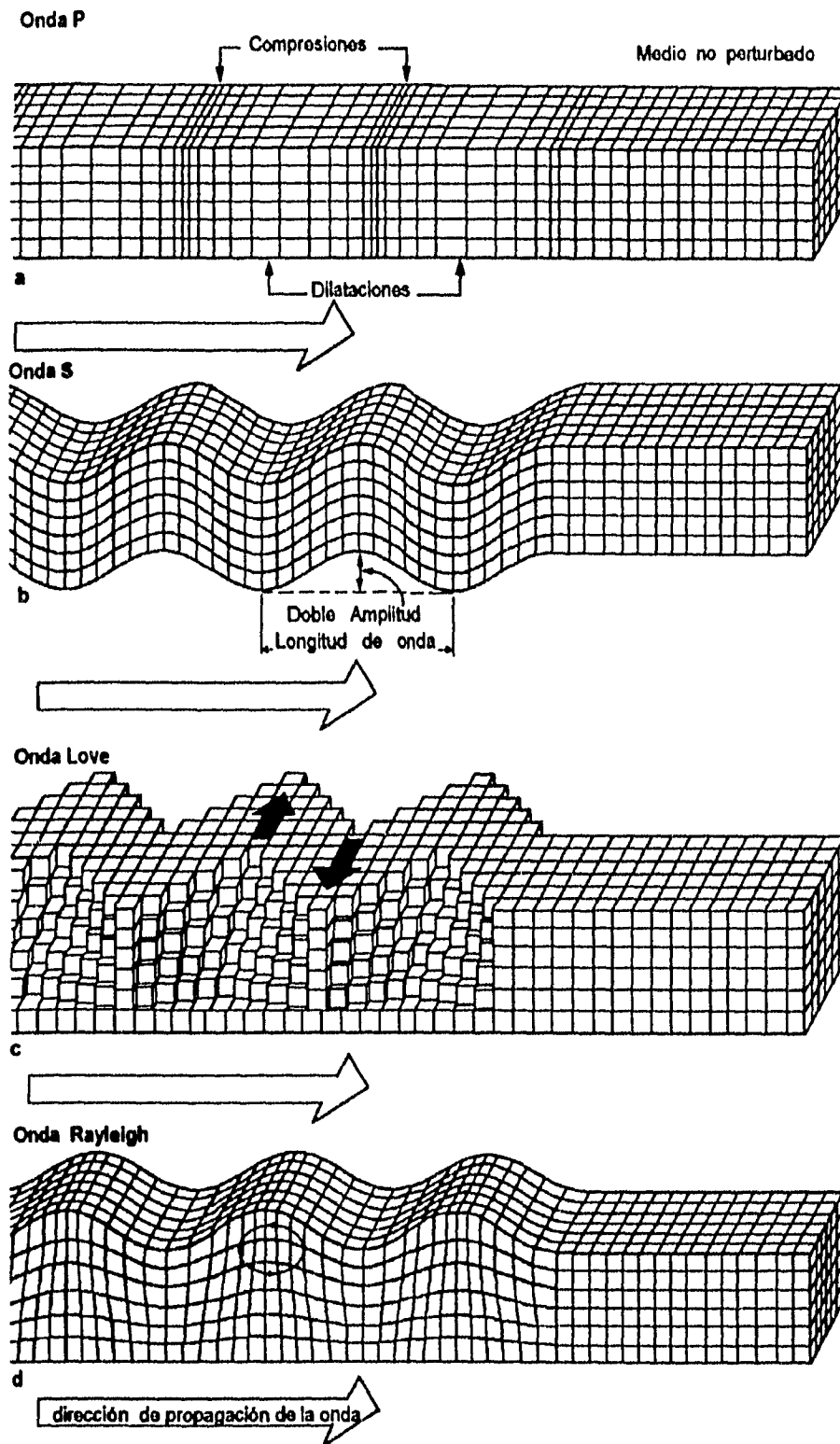


Figura A. Principales ondas sísmicas y características de su movimiento.

2. Sismicidad en el mundo y en México

Zonas Sísmicas

Hay dos zonas en el mundo donde es más frecuente la actividad sísmica. El Cinturón Circumpacífico (figura B) y el Cinturón Alpino. El primero es una zona relativamente angosta alrededor del Océano Pacífico. En esta zona se libera anualmente del 80 al 90 % aproximadamente de la energía sísmica mundial. En el Cinturón Alpino se libera el resto de la energía sísmica; sin embargo, suele causar verdaderas catástrofes, pues afecta zonas de alta densidad de población.

Buena parte de nuestro país está situado dentro del cinturón Circumpacífico, por lo que frecuentemente es sacudido por fuertes sismos.

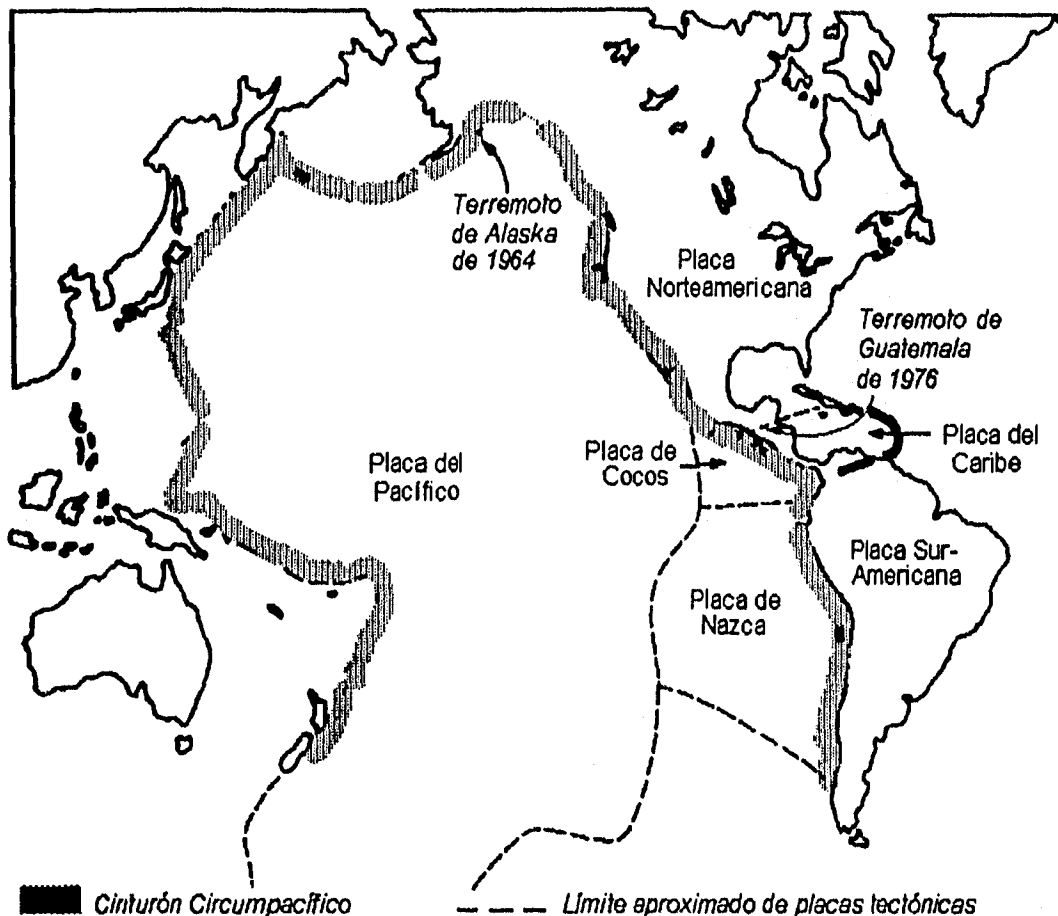


Figura B. Cinturón de fuego del Pacífico; zona de alto riesgo sísmico.

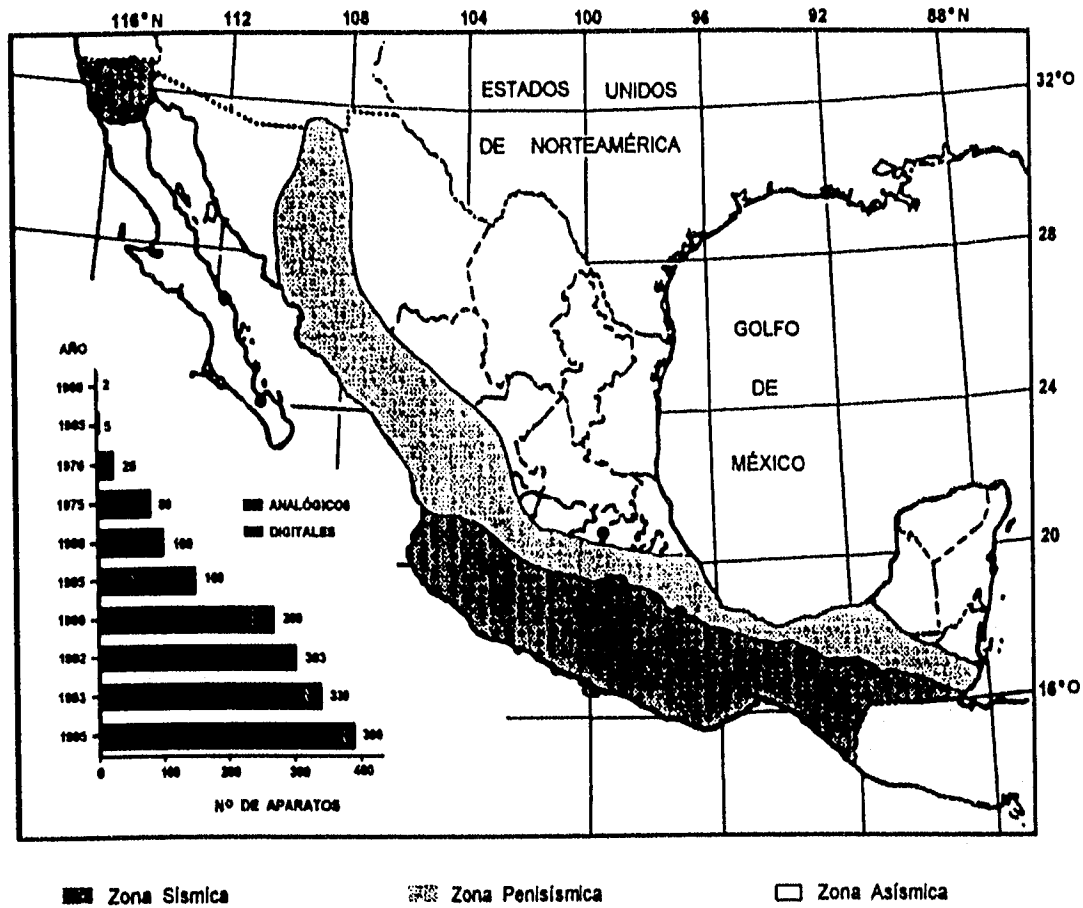


Figura C. Zonificación sísmica e instrumentación acelerográfica de México.

Los sismos en México son causados principalmente por la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana, (véase figura 2 de la Introducción). También se tienen problemas sísmicos causados por la falla de San Andrés en Baja California y el norte de Sonora, así como también a lo largo del eje Neovolcánico, que atraviesa al país de lado a lado en su parte central.

3. Medición de los sismos

Se han inventado aparatos para registrar los movimientos del suelo cuando tiembla y se han propuesto escalas de intensidad para comparar sus efectos destructivos o escalas de magnitud para definir su tamaño.

Para medir los sismos se pueden emplear distintos tipos de aparatos, los más comunes son los sismógrafos, los acelerógrafos y los sismoscopios.

Los sismógrafos son aparatos muy sensibles que captan y amplifican hasta 100,000 veces o más las vibraciones de la Tierra, operan las 24 horas del día.

Su registro, llamado sismograma, es útil para estudiar las características y mecanismos de generación de los temblores. Con él se puede estimar la distancia epicentral, la profundidad focal y la magnitud del temblor.

Los acelerógrafos son aparatos que miden las aceleraciones durante temblores intensos, sus características dinámicas son tales, que son más sensibles a los cambios de aceleración que a los cambios de desplazamiento, tienen dispositivos especiales de arranque (umbrales de disparo) que los activan cuando el movimiento llega a una intensidad determinada. Los registros son de gran utilidad a los ingenieros, pues conociendo las aceleraciones del terreno es posible estimar las fuerzas de inercia que se generan en la base de las estructuras.

Los sismoscopios son aparatos mucho más simples; son péndulos que representan estructuras reales, con un cierto periodo de vibrar y un cierto amortiguamiento y su registro permite obtener un punto del espectro de respuesta.

4. Magnitud e Intensidad de un temblor

Se han propuesto escalas de magnitud para definir el tamaño de un sismo y escalas de intensidad para comparar sus efectos destructivos.

La magnitud es equivalente al tamaño de un temblor. Es un valor único para cada temblor y se determina a partir del *sismograma* obtenido en las distintas estaciones que lo registraron.

Existen diferentes tipos de magnitudes dependiendo de las ondas sísmicas que se emplean para su cálculo, así; se tiene M_b , cuando se determina empleando la onda de cuerpo P; o magnitud M_s , que se determina con las ondas superficiales (L ó R), relacionándose mediante la expresión $M_b = 2.5 + 0.63M_s$. También se tiene M_{zz} cuando se emplea para su determinación la componente vertical de ondas superficiales y M_c cuando se emplea para su cálculo la parte final del registro.

La figura D ilustra un ejemplo para determinar la magnitud local (M_L) de un temblor. Como se indica en ella, la magnitud local se determina con un nomograma, como sigue:

- 1) Se fija en la columna de la izquierda al punto A, el cual corresponde a la diferencia de tiempos, en segundos, de llegada de las ondas S y las ondas P, y es equivalente a la distancia epicentral.
- 2) Se marca en la columna de la derecha el punto B correspondiente a la máxima amplitud, medida en milímetros, de las ondas del sismograma.
- 3) Se unen en línea recta los puntos A y B. Dicha recta intersecta la columna central en el valor de la magnitud local.

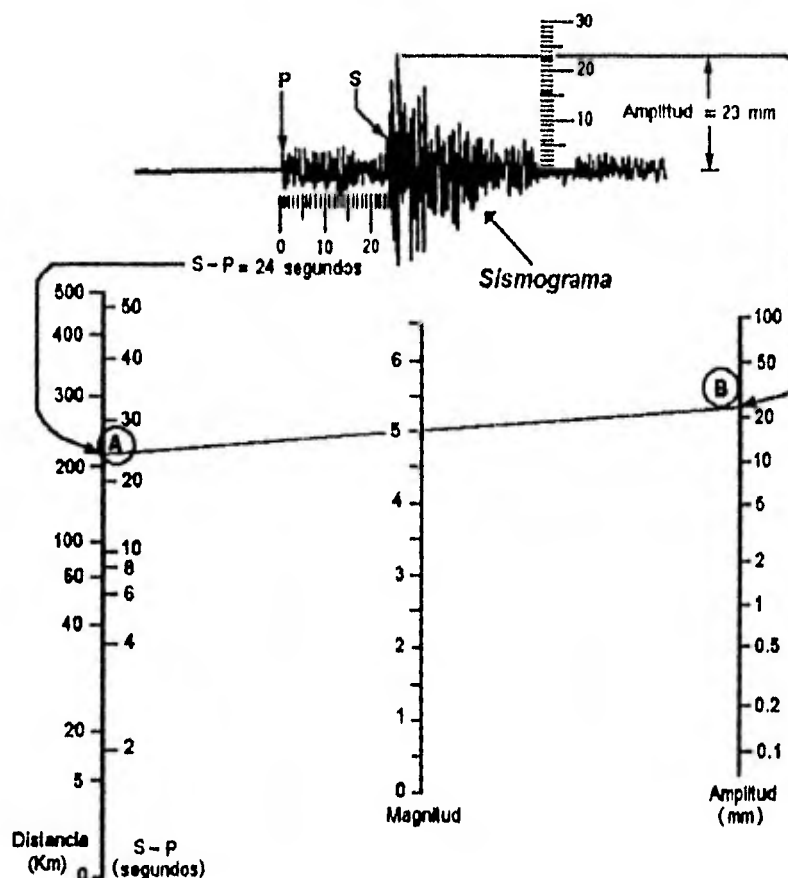


Figura D. Cálculo de la magnitud local (M_L) de un sismo a partir de un nomograma.

Por otra parte, un dato importante que se puede estimar en forma aproximada, a partir de la magnitud M_L , es la **energía** liberada por un sismo, la fórmula más aceptada en este sentido es: $\log_{10} E = 11.8 + 1.5M_L$, donde E es la energía expresada en ergios y M_L es la magnitud determinada con las ondas superficiales.

La **intensidad** de un temblor es una de la capacidad de destrucción sísmica local, generalmente varía de un lugar a otro. La escala de intensidad más empleada en América es la de Mercalli Modificada (MM).

Síntesis de la Escala de Mercalli Modificada

- I. No sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
- II. Sentido solo por personas en posición de descanso, especialmente en pisos altos de los edificios.
- III. Sentido muy sensiblemente en interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios. No se reconoce como sismo.
- IV. Se agitan puertas y ventanas, crujen las paredes, los vehículos detenidos se mueven apreciablemente.
- V. Sentido por casi todos, se percibe en exteriores, grietas en el revestimiento de algunos sitios. Se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos.
- VI. Todos lo perciben. Algún mueble pesado se mueve. Las ventanas se rompen, caminata inestable; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas.
- VII. Dificultad para estar de pie, daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción, leve a moderado en estructuras normales bien construidas; considerable en estructuras mal diseñadas.
- VIII. Daño leve en estructuras diseñadas especialmente, considerable en edificios normales bien construidos y grave en estructuras mal construidas. Se afecta la conducción de vehículos.
- IX. Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas, grande en edificios sólidos con colapso parcial. Grietas visibles en el suelo y tuberías subterráneas rotas.
- X. Algunos edificios bien construidos destruidos, obras de mampostería destruidas con los cimientos. Suelo muy agrietado.
- XI. Puentes destruidos. Grietas visiblemente grandes en el terreno. Tuberías subterráneas completamente destruidas. Las vías férreas se tuercen considerablemente.
- XII. Destrucción total. Objetos lanzados al aire. Se ven ondas sobre la superficie del suelo, líneas de nivel deformadas.

5. Varianza y Espectros de Potencia

Para encontrar la relación que existe entre la varianza y los espectros de potencia, se partirá del teorema de Wiener-Khincine, el cual establece que si tenemos el espectro de potencia $S_x(\omega)$ de un proceso aleatorio, $X(t)$ es definido como una función de autocorrelación $R_x(\omega)$ de $X(t)$ y $S_x(\omega)$ como un par de transformadas de Fourier, esto es:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad \text{Ecuación 5.1}$$

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde $\omega = 2\pi / T = 2\pi n$ es la frecuencia circular en radianes y $j = \sqrt{-1}$
 Si el proceso es estacionario la función de autocorrelación puede escribirse como:

$$R_x(\tau) = \overline{X(t) X(t+\tau)} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde la barra $\overline{\quad}$ denota el valor promedio.

En este caso, el valor medio cuadrado del proceso aleatorio viene dado por $R_x(0)$,

$$\overline{X^2(t)} = R_x(0) \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Además, si el valor medio del proceso estacionario $X(t)$ es cero, entonces la varianza del proceso, σ_x^2 es una constante, también dada por $R_x(0)$,

$$\sigma_x^2 = R_x(0), \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Si $\tau = 0$ al sustituir en la ecuación 5.2, se tiene lo siguiente:

$$R_x(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Y finalmente,

$$\sigma_x^2 = \overline{X^2(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(n) dn \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Ecuación que muestra que el valor medio cuadrado de un proceso estocástico es igual a la suma de los componentes discretos $S_x(\omega)d\omega$ y por consiguiente, el espectro de potencia $S_x(\omega)$ describe la distribución de densidad de $X^2(t)$ sobre el rango de frecuencias.

El valor medio cuadrado del proceso estacionario $X(t)$ es el área bajo la curva $S_x(\omega)/2\pi$, que por definición es la energía (o potencia) contenida del proceso.

6. Valores Normalizados

Se llaman valores normalizados a los que están referidos a un valor tomado como referencia, en el caso de nuestro análisis de registros de aceleración tomemos los valores de aceleración máxima (en valor absoluto) y desviación estándar de las tablas III.1 y III.2 (componente longitudinal (N-S)) registrados en algunos sitios del edificio durante el evento sísmico del 11 de mayo de 1990.

En este caso los valores a normalizar son los de aceleración máxima y desviación estándar con respecto a los valores registrados en el sótano esto es:

$PCAC/PCSC = 23.478/3.113 = 7.542_1$ Tabla IV.2 de aceleraciones máximas normalizadas
 $PCAE/PCSE = 19.718/3.649 = 5.404_2$ Tabla IV.2 de aceleraciones máximas normalizadas

$PCAC/PCSC = 4.387/0.754 = 5.818_3$ Tabla IV.1 de desviaciones estándar normalizadas
 $PCAE/PCSE = 3.624/0.604 = 6.000_4$ Tabla IV.1 de desviaciones estándar normalizadas

Estación	Acel. Máxima	Acel. Máxima normalizada	Desviación Estándar	Desviación Estándar normalizada
PCAC	23.478	7.542 ₁	4.387	5.818 ₃
PCAE	19.718	5.404 ₂	3.624	6.000 ₄
PC6C	11.875	3.815	3.674	4.873
PC6E	10.560	2.894	2.949	4.883
PCEC	5.599	1.799	1.627	2.158
PCE8	6.385	1.750	1.074	1.778
PCSC	3.113	1.000	0.754	1.000
PCSE	3.649	1.000	0.604	1.000

Al normalizar los valores se obtienen factores de amplificación adimensionales, pues se están operando cantidades que tienen las mismas unidades. Este procedimiento se hizo con todos los valores de aceleración máxima registrada en los diferentes sitios del edificio PC para los diferentes sismos estudiados.

7. Función de Tráferencia

Las funciones de tráferencia sirven para estimar la amplificación relativa entre dos sitios ocurrida durante un mismo temblor o las diferencias en la fuente de dos sismos registrados en un mismo sitio.

Si tenemos un sistema lineal con una sola señal de entrada y una sola de salida, de la forma:

$$I(t) \rightarrow H(t) \rightarrow O(t)$$

donde $I(t)$, $H(t)$ y $O(t)$ son funciones del tiempo, $I(t)$ es la entrada al sistema, $O(t)$ la de salida y $H(t)$ la función de tráferencia, las cuales se relacionan mediante la expresión:

$$O(t) = H(t) \circ I(t) \quad (\circ \text{ significa convolución})$$

En el dominio de la frecuencia la ecuación anterior puede expresarse como:

$$O(f) = H(f) I(f)$$

Dado que la operación involucrada en este caso es solo una multiplicación, la función de tráferencia puede calcularse como:

$$H(f) = \frac{O(f)}{I(f)}$$

Por tanto si se conocen las señales de entrada y salida del sistema, o cualquiera de ellas y la función de tráferencia, en el dominio de la frecuencia, es posible obtener la incógnita restante mediante una sencilla operación de multiplicación o división.