



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**OBTENCIÓN DE LEYES DE
ATENUACIÓN SÍSMICA
PARA LA CIUDAD DE PUEBLA**

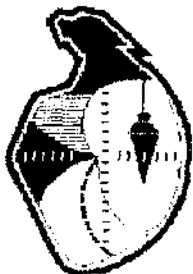
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

PRESENTADO POR:

TIZIANO PEREA OLVERA

PUEBLA, PUE., MEX.

OCTUBRE DE 1996



**Ingeniería
civil**



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, 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 de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

México D. F. a 23 de septiembre de 1996.

Ing. Mario Jiménez Suárez.

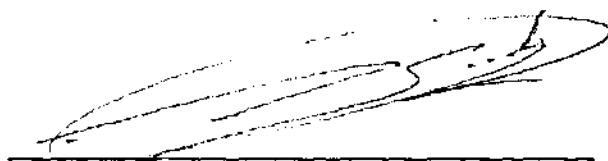
Director de la Facultad de Ingeniería Civil de la UPAEP.

Presente:

Por medio de la presente le comunico que el C. Tiziano Perea Olvera, estudiante de su facultad de ingeniería civil, con número de matrícula 70071, ha terminado satisfactoriamente con su tesis "OBTENCIÓN DE LEYES DE ATENUACIÓN SÍSMICA PARA LA CIUDAD DE PUEBLA", cumpliendo con los objetivos planteados para ésta.

Para los fines que a la institución convengan, se extiende la presente a los 23 días del mes de septiembre de 1996.

ATENTAMENTE.



Dr. Emilio Sordo Zabay.

63172

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación no se hubiera logrado sin la asistencia de especialistas en el área, a quienes les agradezco su apoyo, colaboración y profesionalismo; en especial a los ingenieros:

Dr. Emilio Sordo Zabay
por su excelente dirección y asesoría

M. I. Jesús Iglesias Jiménez
por su revisión crítica a la obra

Agradezco los comentarios y sugerencias que hicieron a la misma los ingenieros:

Manuel Cuatlayotl Sarmiento

Jaime Juárez Botello

Mario Jiménez Suárez

Gerardo López Arciga

También agradezco el apoyo recibido por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) y por el área de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).

Deseo expresar un profundo reconocimiento al Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIS), al Instituto de Ingeniería de la UNAM, al Instituto de Geofísica de la UNAM, al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y al United States Geological Survey (USGS) por la valiosa información proporcionada para el buen desarrollo de la investigación.

El autor.

RESUMEN

En este trabajo se estudian los efectos producidos en la ciudad de Puebla por los mecanismos y fuentes sismogénicas de relevancia cercanas a la misma, a través de la obtención de leyes de atenuación locales. Para tal fin se recopila en primer lugar la información acelerográfica local disponible, misma que se clasifica de acuerdo a la localización epicentral de los sismos asociados a los registros. Con base en esta información, se obtienen leyes de atenuación propias para la ciudad de Puebla asociadas a diferentes zonas sismogénicas, utilizando los 33 espectros de respuesta correspondientes a los eventos disponibles registrados por estaciones ubicadas en suelo moderadamente blando de la ciudad. Dichas leyes se obtienen de relacionar los espectros de respuesta de pseudoaceleraciones, de cada registro, con los parámetros de magnitud y distancia epicentral de la fuente.

Se comparan los espectros calculados a partir de las leyes de atenuación propuestas con aquellos obtenidos de los registros que se usaron para la generación de las mismas. Se comenta la dispersión de las leyes obtenidas con base en los resultados derivados del cálculo de las desviaciones estándar. Además, se incluye la comparación del espectro de respuesta del sismo del 15 de julio de 1996 con el que se obtiene a partir de las leyes de atenuación de la zona correspondiente.

Son evaluados varios escenarios considerados máximos, tanto históricos como hipotéticos. Los espectros de respuesta para estos escenarios máximos, calculados a partir de las leyes obtenidas, son comparados con el espectro de diseño para zona II del reglamento vigente y con otras propuestas de diseño para dicha zona.

ABSTRACT

Seismic effects at the city of Puebla from the nearby seismic zones are evaluated through the statistical computation of local attenuation relationships. First, available accelerographic information is processed and classified according to the epicentral location of the corresponding ground motions. From this information, attenuation relationships for the city of Puebla are obtained for different seismic zones, based on the 33 response spectra registered by Puebla stations, located on moderate soft soil.

Response spectra directly computed from the ground motion records are compared with the spectral values predicted by the attenuation relationships. The statistical limitations of the attenuation relationships are discussed, based on the computed standard deviations and confidence intervals. The response spectrum of the 15th of July, 1996 earthquake is compared with that predicted by the relationships.

Some important historic and hypothetic scenarios were evaluated through the attenuation relationships, and their predicted response spectra were compared with the design spectrum for moderate soft soil of the current local building code and with the design spectra proposed by several researchers.

CONTENIDO

RESUMEN / ABSTRACT	1
CONTENIDO	2
INTRODUCCIÓN	4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1 INTRODUCCIÓN.....	6
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.3 ANTECEDENTES.....	6
1.4 OBJETIVOS Y LIMITACIONES	8
2. SISMICIDAD	9
2.1 INTRODUCCIÓN.....	9
2.2 ORIGEN DE LOS SISMOS	9
2.3 OBTENCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS.....	13
2.4 SISMICIDAD EN EL MUNDO	15
2.5 SISMICIDAD DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	20
2.6 SISMICIDAD EN EL ESTADO DE PUEBLA	24
2.7 MECANISMOS Y ZONAS SISMOGÉNICAS QUE AFECTAN A LA CIUDAD DE PUEBLA.....	30
2.8 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE PUEBLA.....	31
2.8.1 CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA.....	31
2.8.2 CARACTERÍSTICAS GEODINÁMICAS	31
3. INFORMACIÓN ACELEROGRÁFICA	36
3.1 INTRODUCCIÓN.....	36
3.2 INSTRUMENTACIÓN ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE PUEBLA.....	36
3.3 INFORMACIÓN ACELEROGRÁFICA DISPONIBLE.....	39
3.4 INFORMACIÓN SISMOLÓGICA.....	45
3.5 ZONAS SISMOGÉNICAS CONSIDERADAS.....	47
3.6 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	48
4. LEYES DE ATENUACIÓN PARA LA CIUDAD DE PUEBLA	60
4.1 INTRODUCCIÓN.....	60
4.2 LEYES DE ATENUACIÓN EXISTENTES.....	60
4.3 MODELO MATEMÁTICO SELECCIONADO	62
4.4 CRITERIOS EMPLEADOS	65
4.5 OBTENCIÓN DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN.....	66
4.5.1 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 1.....	67
4.5.1.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes.....	67
4.5.1.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O.....	70
4.5.2 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 2.....	72
4.5.2.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes.....	72
4.5.2.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O.....	75
4.5.3 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 3.....	78
4.5.3.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes.....	78
4.5.3.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O.....	81

4.5.4 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONAS SISMOGÉNICAS 2 Y 3	84
4.5.4.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes	84
4.5.4.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O	89
4.5.5 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 4.	94
4.5.5.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes	94
4.5.5.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O	97
4.5.6 DISPERSIÓN DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN OBTENIDAS	100
4.6 SISMO DEL 15 DE JULIO DE 1996	101
5. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS MÁXIMOS	102
5.1 INTRODUCCIÓN	102
5.2 SISMOS ORIGINADOS EN LA TRINCHERA MEXICANA	103
5.2.1 SISMOS HISTÓRICOS INTENSOS	103
5.2.2 BRECHA DE GUERRERO	105
5.3 SISMOS CERCANOS AL ESTADO DE PUEBLA	108
5.3.1 SISMOS HISTÓRICOS INTENSOS	108
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES	114
APÉNDICE	115
TABLAS	118
FIGURAS	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	124

INTRODUCCIÓN

“Si hay una rama de la ingeniería que necesita apoyarse primordialmente en datos de campo, esta es la ingeniería sísmica; y de dichos datos, con mucho, los más valiosos son los registros de sismos fuertes. El papel toral que desempeñan tales registros obedece a lo sumamente complejos que son los procesos sismogénicos, al grado que todas las teorías que al respecto se han desarrollado necesitan hacer uso de los registros y aún así siguen preñadas de enormes incertidumbres” (E. Rosenblueth, prólogo del “catálogo de estaciones acelerográficas 1960-1992”, 1993).

Es obligación del ingeniero civil diseñar y construir estructuras que cumplan con estados límites mínimos de seguridad, tanto de falla como de servicio. Atención especial deberá tener el análisis sísmico en construcciones localizadas en regiones de alta sismicidad. Las sollicitaciones sísmicas a las que deberá responder una estructura dependen de las características de sismicidad de la región donde se edifique, que generalmente resultan diferentes de una zona a otra. El diseñador deberá entonces contar con parámetros de diseño óptimos para cada región, que aseguren el buen comportamiento de las estructuras sin elevar excesivamente los costos de construcción.

Los daños y pérdidas provocados por sismos fuertes en nuestro país han resaltado la gran responsabilidad que tiene el ingeniero civil al diseñar y construir. El terremoto del 19 de septiembre de 1985 no sólo afectó drásticamente la infraestructura urbana de algunas ciudades del país, sino también sacudió con fuerza su estructura social. En particular, en la ingeniería civil se produjo una profunda reflexión crítica sobre la normatividad y su práctica profesional y académica.

Se ha hecho evidente la necesidad prioritaria de impulsar la investigación en esta área de la ingeniería en el país, y basarla en registros de sismos fuertes y en teorías bien fundadas. Los primeros trabajos en materia de sismicidad hicieron patente la falta de información sobre sismicidad local, debida a la carencia de instrumentación sísmica de que adolecen la mayoría de los centros urbanos del país. Esto generó conciencia entre los investigadores sobre la necesidad de instrumentar las ciudades con el fin de retroalimentar estudios previos. El sismo de 1985 dejó al descubierto la escasa instrumentación sísmica en la ciudad de México y en ciudades de provincia que han tenido gran desarrollo demográfico, y que por su situación geográfica conllevan un riesgo sísmico importante.

La motivación que el sismo de 1985 provocó en los profesionistas se encauzó a la creación de nuevos grupos de trabajo que aportaron ideas frescas, gracias a las cuales se avanzó con rapidez en la interpretación del fenómeno y en la conscientización de su importancia social. Este entusiasmo no sólo se dio en la capital del país, sino también en aquellos estados sujetos a los efectos de la actividad sísmica.

La ciudad de Puebla, a lo largo de su historia ha sido sacudida por varios sismos provenientes de diversas provincias o zonas sismogénicas que han puesto en peligro la seguridad estructural de sus construcciones, y con ello, el patrimonio y la vida de sus ocupantes.

Se han puesto en operación por todo el mundo estaciones acelerográficas para la medición de sismos fuertes y, particularmente en México, la ciudad de Puebla no ha sido la excepción. En 1993 la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), integrantes del Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS), pusieron en operación dos estaciones de registro para sismos fuertes en la ciudad de Puebla. Dichas estaciones se sumaron a las cuatro instaladas por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y a una del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El GIIS es una agrupación de siete universidades del país creada con el objetivo de estudiar los fenómenos de sismicidad en algunos centros urbanos de la República Mexicana. El GIIS ha venido trabajando desde su fundación en la integración y operación de una red acelerométrica, dando origen así a la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), cuyo fin es la obtención de registros del movimiento del terreno en las ciudades instrumentadas (Sordo et. al., 1994; 1996). Las siete universidades que integran al GIIS y a la RIIS son: Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), en México D.F.; Universidad Autónoma de Guerrero (UAG), en Chilpancingo; Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), en Toluca; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en Morelia; Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), en Tuxtla Gutiérrez; Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), en Guadalajara; y la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), en la ciudad de Puebla.

Los registros acelerográficos de Puebla disponibles hasta la fecha, permiten conocer la respuesta espectral y realizar estudios de peligro sísmico de la ciudad. Si se conoce el peligro sísmico se pueden efectuar estudios de riesgo y analizar los parámetros de diseño con enfoques determinísticos y probabilísticos. La comparación de los resultados obtenidos con ambos enfoques permitirán elaborar una propuesta final razonable.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la necesidad de realizar el estudio de riesgo sísmico para la ciudad de Puebla con base en la información acelerográfica disponible en la ciudad.

Se incluye un resumen de la evolución del reglamento de construcciones para la ciudad de Puebla con énfasis en la selección de los parámetros de diseño sísmico, así como también se describe el desarrollo habido en la instalación y operación de aparatos que registren sismos fuertes. Para finalizar, se plantean los objetivos que se persiguen en el presente trabajo de investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Se estima que aproximadamente del 80 al 90% de la actividad sísmica mundial se genera en lo que se conoce como cinturón Circumpacífico o zona del fuego, que incluye la costa mexicana del océano Pacífico. En particular, el 3% de la actividad sísmica mundial se produce en la zona de subducción de la placa de Cocos con la placa de Norteamérica, también conocida como trinchera mexicana, que abarca desde las costas de Jalisco hasta las de Chiapas en la República Mexicana (Fundación ICA, 1987).

El estado de Puebla está próximo a la zona de mayor actividad sísmica del país, que es la zona de subducción, siendo además vulnerable a otras fuentes sismogénicas como el eje neovolcánico mexicano, sismos de falla normal a la subducción, fallas locales, etc. De particular interés resulta entonces estudiar el riesgo sísmico de la ciudad de Puebla, capital del estado del mismo nombre, considerada entre las ciudades más importantes de la República Mexicana, tanto por su situación geográfica como por su desarrollo demográfico e industrial. En la actualidad la ciudad de Puebla tiene aproximadamente 1.2 millones de habitantes y cuenta con una de las plantas industriales más importantes del país.

1.3 ANTECEDENTES

El primer reglamento de construcciones para el estado de Puebla fue decretado en 1935, reimprimiéndose en 1952. En dicho reglamento no se contemplaba todavía una propuesta de espectros de diseño sísmico (ELSP, 1935; 1952). Es hasta el "Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla" de 1987 (AMP, 1987) cuando se proponen por primera vez parámetros de diseño sísmico (CICPAC, 1984); sin embargo, éstos fueron adaptados del reglamento de construcciones para el D.F. (DDF, 1976) sin considerar alguna modificación basada en las características sismológicas locales.

Conscientes de esta situación, los ingenieros locales diseñaban sus estructuras por sismo usando directamente el "Reglamento de Construcciones para el D.F." (DDF, 1962; 1976; 1987) o el "Manual de Diseño de Obras Civiles" (IIE, 1969;1981;1993), según el criterio del calculista.

Para 1993 se hace una revisión del reglamento municipal de 1987, y como resultado se expide el "Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla" (AMP, 1994), en el cual, en su título quinto sobre "Diseño estructural, requisitos de seguridad y servicio para las estructuras" propone parámetros de diseño sísmico propios para el municipio de Puebla. Éstos son resultado de un estudio que se basa en relacionar las intensidades de Mercalli Modificada (MM) asociadas a sismos históricos con coeficientes de cortante basal resistente (K) de edificios dañados (C. Ruiz et. al., 1994). Esta relación se estableció a partir de las experiencias derivadas del sismo de 1985 (Jara et. al., 1992). Lo anterior es un primer acercamiento al análisis del riesgo sísmico, justificable ante la ausencia de registros acelerográficos de sismos fuertes.

Con motivo de estudios previos realizados en la ciudad de Puebla en el área de la ingeniería sísmica, se observó la escasa información existente de registros de sismos fuertes. Esto provocó que diversas instituciones se preocuparan por invertir en equipos que registraran dichos eventos, para emplear la información que se obtuviera en estudiar con más detalle el fenómeno de la sismicidad local.

El primer acelerógrafo en la ciudad de Puebla fue un DCA-310 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se instaló en 1978. En 1988 la BUAP instaló tres estaciones DCA-333 y en 1993 se pusieron en operación dos estaciones SSA-2 por parte de la RIIS, y otro DCA-333 por la BUAP (SMIS, 1993; 1996).

Con la información obtenida, desde la instalación de dichos instrumentos hasta la fecha, se pueden obtener leyes de atenuación locales para la ciudad que permitan predecir intensidades espectrales de diversos escenarios y para varias zonas sismogénicas en función de los parámetros que definen al sismo: típicamente magnitud y distancia. Es indudable que conforme se obtengan más registros de sismos importantes, la confiabilidad de las estimaciones irá en aumento.

Las leyes de atenuación son la base para realizar estudios de peligro sísmico que, junto con estudios de vulnerabilidad en las estructuras, permitirán finalmente evaluar el riesgo sísmico para la ciudad de Puebla. El peligro o amenaza sísmica es la probabilidad de exceder el nivel de ocurrencia de un evento, con una cierta intensidad en un sitio específico y en un periodo de tiempo determinado. El riesgo sísmico es la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias socioeconómicas, en un sitio específico y dentro de un periodo de tiempo determinado, el cual puede mitigarse puesto que no sólo depende del peligro, sino también de la vulnerabilidad estructural, la cual es modificable. La vulnerabilidad estructural, es la pérdida potencial específica de construcciones expuestas en lugares donde el peligro sísmico es latente. Ésta última, es la única variable que puede ser modificable por el hombre para cambiar el nivel de riesgo sísmico de la región considerada.

Toda esta serie de estudios permitirán, además de llegar a conocer el riesgo sísmico que tiene la ciudad de Puebla, mejorar el reglamento de construcciones local y de esta manera asegurar un comportamiento sísmico satisfactorio en las estructuras de la ciudad.

Hasta hace muy poco el objetivo de la ingeniería sísmica se centraba en la determinación del peligro, llamado hasta entonces riesgo, y en la determinación de los criterios de diseño sismo-resistente para ser aplicados en las estructuras. En la actualidad, ha sido necesario replantear la definición de riesgo, para entenderse como un problema en el cual se relaciona al peligro sísmico y a la vulnerabilidad de diversas estructuras con características diferentes y distribuidos de manera específica.

Hoy en día, es necesario la determinación de las políticas de planificación urbana para mitigar el riesgo con enfoques interdisciplinarios de sismólogos, geólogos, ingenieros, arquitectos, administradores, economistas, sociólogos, planificadores y otros profesionistas involucrados en la construcción de infraestructura y de programas preventivos contra consecuencias catastróficas de los temblores.

1.4 OBJETIVOS Y LIMITACIONES

El presente trabajo está enfocado a proponer leyes de atenuación locales para el suelo moderadamente blando de la ciudad de Puebla, basadas en los espectros de respuesta asociados a los sismos registrados en las estaciones acelerográficas de la ciudad de Puebla.

Las leyes de atenuación permitirán predecir espectros de respuesta de cualquier escenario, proveniente de las zonas sismogénicas que involucren un peligro sísmico importante a la ciudad de Puebla. Los espectros de respuesta generados corresponderán al suelo moderadamente blando, dado que solo se contó con registros de este tipo de terreno.

La evaluación de varios escenarios, con enfoques determinísticos y probabilísticos, conllevarán a estudios de peligro sísmico que, junto a un estudio de vulnerabilidad estructural, completarán el estudio de riesgo sísmico el cual ayudará a mitigar posibles daños por estos eventos naturales.

2. SISMICIDAD

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se definen los sismos, y se describen su origen y la obtención de los registros del movimiento del terreno que producen. Además, se presenta la sismicidad en el mundo, en la República Mexicana y en particular en el estado de Puebla. Se explican los mecanismos y zonas sismogénicas que afectan a la ciudad de Puebla, y se incluye un resumen del trabajo de zonificación sísmica de la misma.

2.2 ORIGEN DE LOS SISMOS

Un sismo (Fig. 2.1) se puede definir como el movimiento que sufre la superficie terrestre por la liberación de energía debida a perturbaciones tales como: explosiones, impactos de meteoros, colapsos de cavernas, actividad volcánica, tectonismo, etc. Los sismos de mayor interés para la ingeniería son los de origen tectónico (Fig. 2.2), debido a los desastres que en el mundo han generado por la gran intensidad que pueden alcanzar.

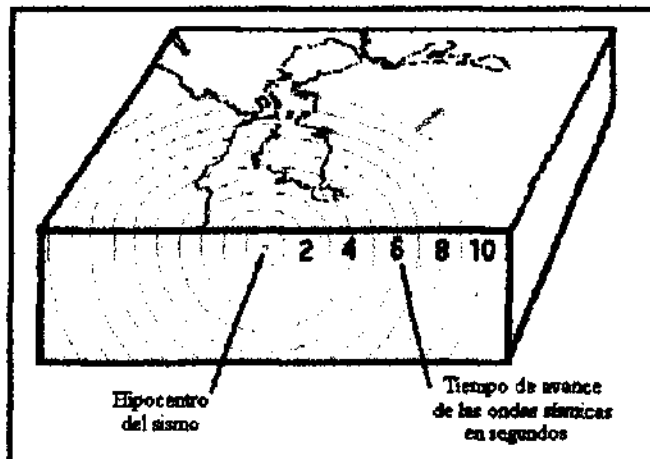


Fig. 2.1.- Localización hipocentral de un sismo y la propagación de sus ondas en el tiempo en la superficie.

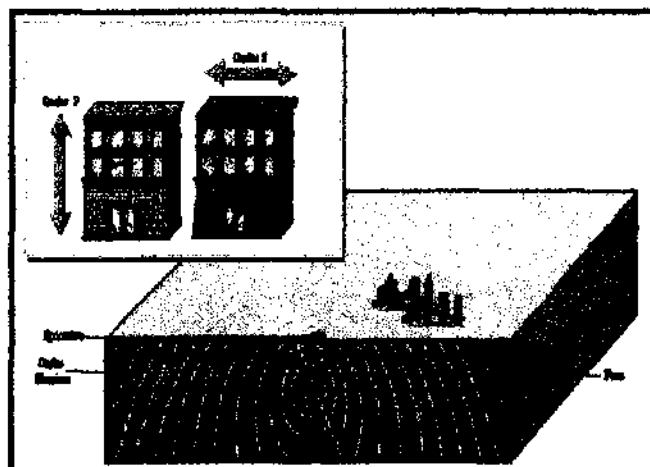


Fig. 2.2.- Efectos de un sismo en las construcciones.

Dada la importancia y necesidad de construir estructuras sismo-resistentes, los ingenieros civiles se han dado a la tarea de desarrollar e investigar métodos de análisis y diseño, métodos constructivos, etc., para mitigar los daños que se pudieran suscitar en una construcción ante solicitaciones que pongan en riesgo la seguridad estructural, y con ello, no sólo el patrimonio, sino además la vida de los seres humanos que las habitan. Cada sismo representa para la ciencia una experiencia nueva y un avance en los conocimientos sobre sismicidad, asimismo, los sismos son los mejores inspectores de la seguridad de muestras estructuras.

Generalmente los sismos fuertes y moderados son producto del tectonismo de las placas de las que esta formada la corteza terrestre.

La Tierra, cuyo radio es de aproximadamente 6,370 km., está constituida por un núcleo de 3,400 km. de radio formado por materiales de gran densidad. La parte central de este núcleo es sólida y el resto del núcleo, con un espesor de 2,100 km., se encuentra en estado viscoso. El manto, capa intermedia, tienen un espesor de 2,780 km. y sobre él se encuentra la corteza terrestre con espesor variable que va desde 10 a 60 km., una densidad promedio de 2.8 y que está constituida principalmente por granitos y basaltos (Fig. 2.3), (P. J. Wyllie, 1975).

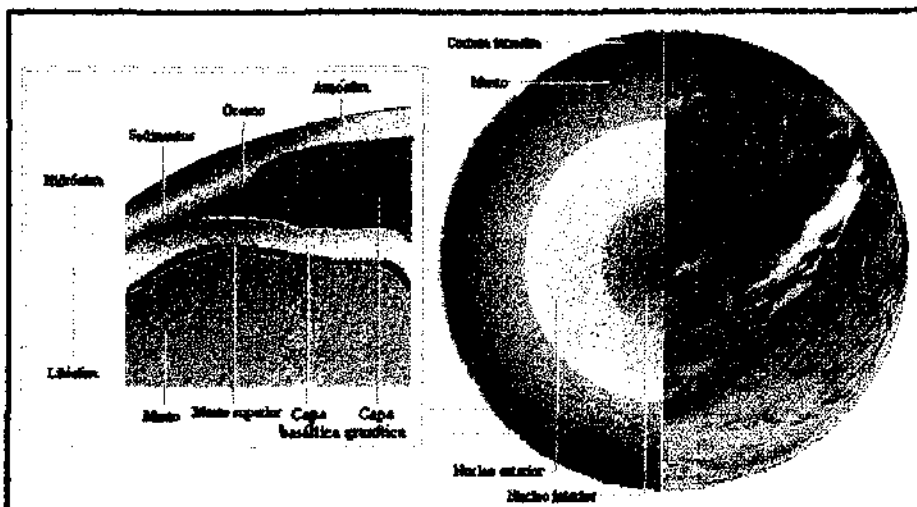


Fig. 2.3.- Corte del planeta en el que se muestra el núcleo interior, el núcleo exterior, el manto y la corteza terrestre.

A la teoría que explica el origen de los sismos por tectonismo se le conoce como "Teoría tectónica de placas", la cual se fundamenta en la "Teoría de la deriva continental" propuesta a principios de siglo por el astrónomo y meteorólogo Alfred Wegener, que actualmente es aceptada de manera generalizada por la comunidad científica gracias a los estudios geológicos de los fondos marinos y mediciones desde satélite de las distancias entre los continentes (A. Hallam, 1975).

La teoría de la tectónica de placas explica que la corteza terrestre está constituida por fragmentos denominados placas (Fig. 2.4). El movimiento y la alta temperatura en el manto provocan que en la interfase de las placas se acumule energía y que en un momento dado se libere en forma de un sismo.

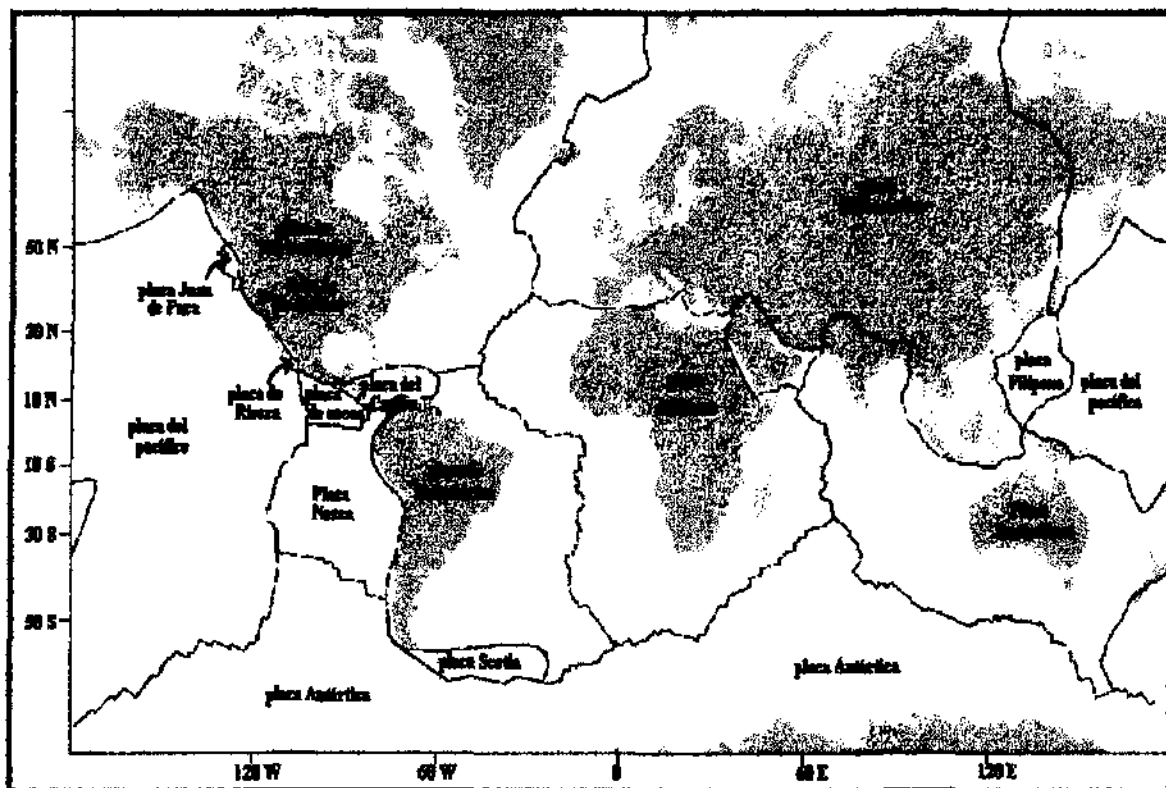


Fig. 2.4.- Placas tectónicas en el mundo.

Los desplazamientos relativos que sufren las placas tectónicas pueden ser de tipo lateral, choque o impacto, subducción, etc. El desplazamiento lateral es el movimiento de las placas en sentidos opuestos una respecto de la otra. Ejemplo de este movimiento es la falla de San Andrés (Fig. 2.5), muy conocida por los desastres que ha ocasionado en las ciudades de California (USA) y cercanas al estado.

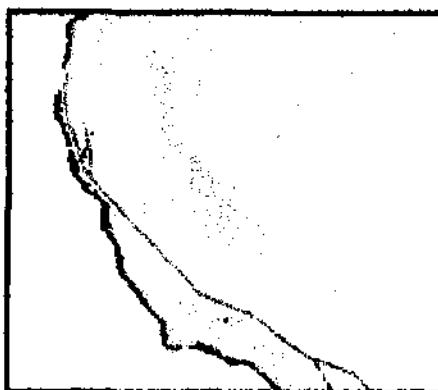


Fig. 2.5.- Falla de San Andrés

Las placas pueden tener desplazamientos longitudinales y provocar el choque de una placa con la otra. Alguna de las placas puede llegar a deslizarse por debajo de otra, provocando así un desplazamiento de subducción (Fig. 2.6). Los sismos de subducción son los más frecuentes en nuestro país, y generalmente son de magnitudes grandes lo que causa daños importantes en las estructuras.

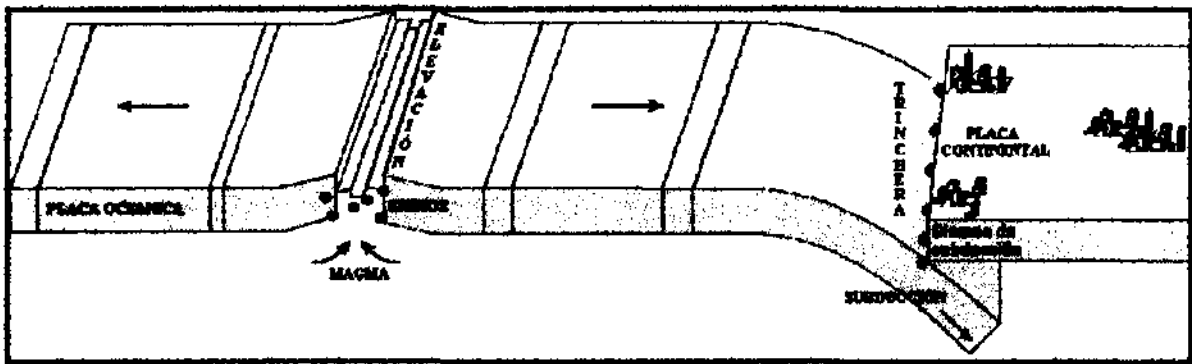


Fig. 2.6.- Subducción de placas tectónicas.

Cuando una placa se subduce y se aproxima al manto, a una alta temperatura y a una gran profundidad, suele ocurrir una falla por cortante en la placa subducida, es decir una fractura en la placa. Esta fractura origina un sismo normal, es decir perpendicular a la superficie terrestre (Fig. 2.7).

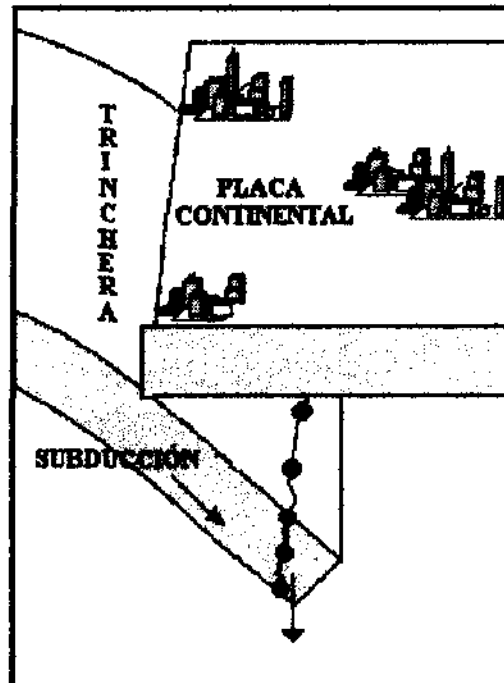


Fig. 2.7.- Sismos por fallamiento normal.

Los eventos sísmicos debidos a falla normal, por los esfuerzos cortantes presentados en la placa subducida, son eventos moderadamente importantes que ocurren a gran profundidad y cuyo epicentro se ubica dentro de la placa continental.

2.3 OBTENCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS.

Se ha implementado por todo el mundo estaciones sismográficas y acelerográficas para la determinación de los parámetros de la fuente generadora y para la medición del movimiento del terreno que producen los sismos fuertes respectivamente.

Los sismógrafos (Fig. 2.8) son aparatos muy sensibles, que captan y amplifican las vibraciones (desplazamientos) de la tierra (Fig. 2.9). Debido a su sensibilidad pueden registrar movimientos originados a gran distancia del lugar en que está instalado el aparato, a pesar de que llegan a él muy atenuados. Su limitación para registrar las características de movimientos locales fuertes por la saturación de su capacidad de registro, hace necesario el uso de instrumentos específicos para el registro de estos movimientos.

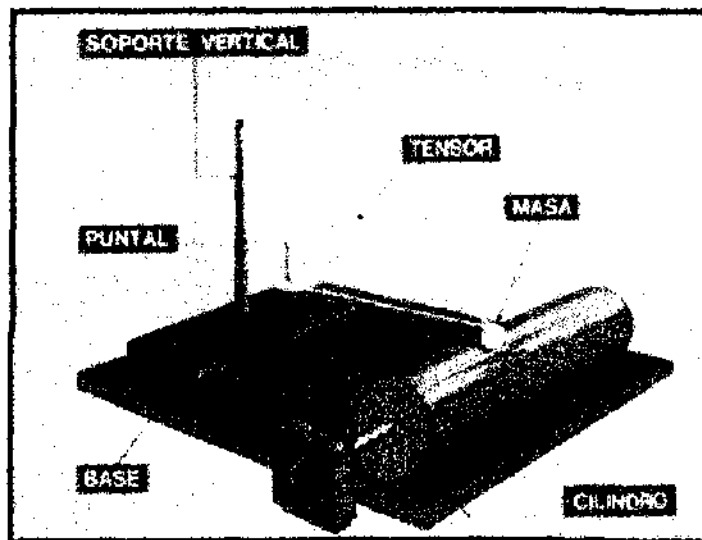


Fig. 2.8.- Sismógrafo.

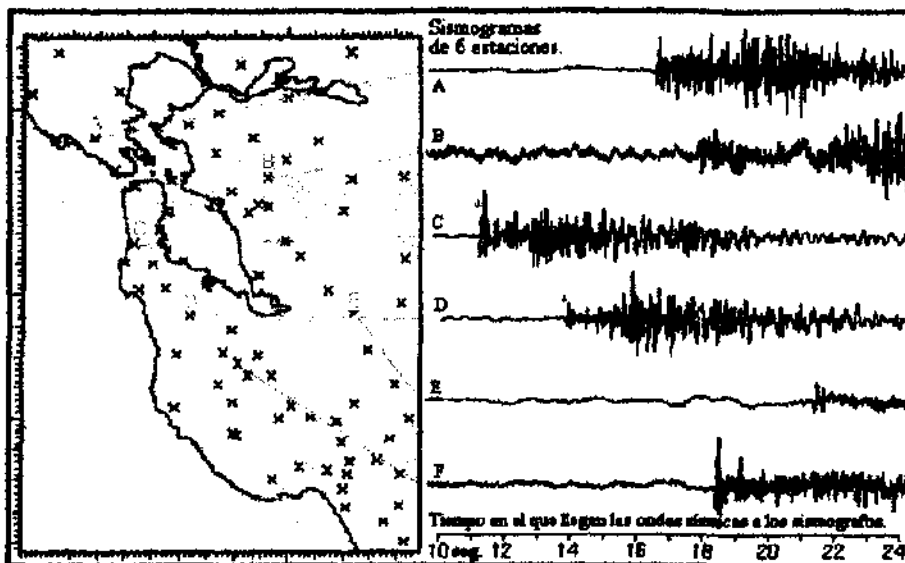


Fig. 2.9.- Registro de los sismogramas (amplitudes de onda sísmica en el tiempo) en 6 sismógrafos para el cálculo de la magnitud, coordenadas epicentrales y profundidad.

Los acelerógrafos (Fig. 2.10), están diseñados para medir aceleraciones del terreno durante sismos intensos. El intervalo de registro de estos equipos es más elevado que el de los sismógrafos, pero tiene menos sensibilidad. En general no operan las 24 horas del día, sino que poseen dispositivos especiales de arranque que los activan cuando el movimiento del terreno llega a una cierta intensidad, la cual puede determinarse.



Fig. 2.10.- Estación acelerográfica.

En fechas recientes, se está desarrollando tecnología que permita tener aparatos con la sensibilidad necesaria para detectar movimientos pequeños y tener a la vez un intervalo de operación elevado. Este desarrollo tecnológico avanzado permitirá contar con equipos cuyas funciones sean a la vez las de un sismógrafo y un acelerógrafo, tal como ya lo hacen algunos modelos disponibles en el mercado.

2.4 SISMICIDAD EN EL MUNDO

En la actualidad existen muchos centros de investigación que observan la sismicidad del planeta, y diariamente reportan gran cantidad de sismos, aunque debido a su baja magnitud la mayoría no son perceptibles por las personas. Algunos sismos de magnitud moderada llegan a sentirse pero las estructuras resisten favorablemente estas sollicitaciones. Desafortunadamente hay zonas altamente sísmicas donde se presentan eventos de magnitud grande, o bien, sismos moderados a distancia cortas, que ponen en riesgo la estabilidad de las construcciones.

Se estima que aproximadamente del 80 al 90% de la actividad sísmica mundial se presenta en la zona conocida como cinturón Circunpácifico, mientras que el porcentaje restante en lo que se conoce como cinturón Alpino (Fundación ICA, 1987). El cinturón Circunpácifico es una zona que rodea al océano Pacífico y comprende desde la parte sur de América, Chile, Perú, Ecuador, Colombia, América Central, México, Estados Unidos, Canadá, y Alaska para seguir por Japón, las islas Filipinas y terminar en la isla de Nueva Zelanda. El cinturón Alpino comprende desde el extremo occidental de Europa, pasando por África, Italia, Grecia, Rumania, Yugoslavia, Irán, Irak, Turquía, parte de India y China y termina en las islas de Sumatra, Indonesia y Nueva Guinea (Fig. 2.11).

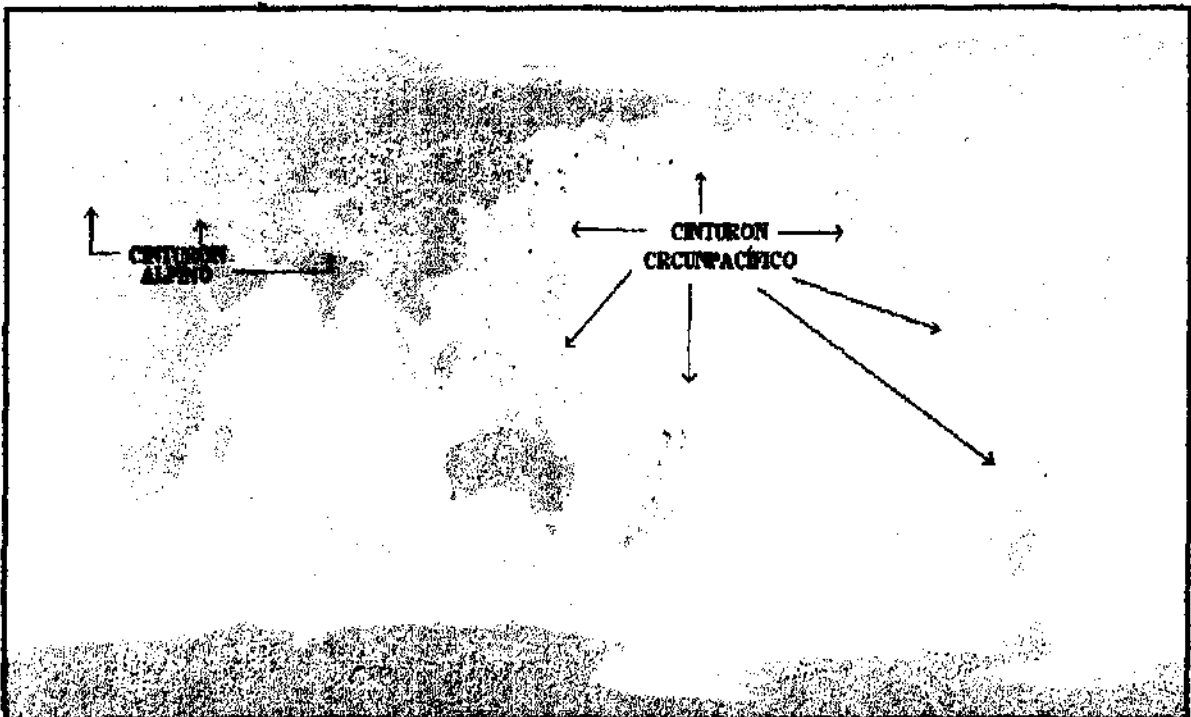


Fig. 2.11.- Cinturones Circunpácifico y Alpino delimitados por la sismicidad en el mundo.

A lo largo de la historia han ocurrido muchos temblores de gran intensidad en distintas partes del mundo. La tabla 2.1 indica la lista de los sismos, desde 1900 a la fecha, que han provocado la muerte a más de 1,000 personas. Esta tabla y las cuatro siguientes fueron tomadas de la red Internet, en la página WWW del United States Geological Survey (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqlists.html>).

Tabla 2.1.- Sismos que han provocado más de 1000 muertes (1900-1996).
(USGS, <http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmajr>).

Fecha (GMT)	Lugar	Coordenadas		Muertes	M	Fecha (GMT) *	Lugar	Coordenadas		Muertes	Ms
		Lat.	Long.					Lat.	Long.		
16/dic/1902	Turkestan	40.8 N	72.6 E	4,500	6.4	29/feb/1960	Morocco, Agadir	30 N	9 W	12,500	5.9
4/abr/1905	India, Kangra	33.0 N	76.0 E	19,000	8.6	22/may/1960	Chile	39.5 S	74.5 W	4,500	9.5
3/sep/1905	Italy, Calabria	39.4 N	16.4 E	2,500	7.9	1/sep/1962	Iran, Qazvin	35.6 N	49.9 E	12,230	7.3
31/ene/1906	Colombia	1 N	81.5 W	1,000	8.9	26/jul/1963	Yugoslavia, Skopje	42.1 N	21.4 E	1,100	6
17/mar/1906	Formosa, Kagi	¿?	¿?	1,300	7.1	19/ago/1966	Turkey, Varto	39.2 N	41.7 E	2,520	7.1
17/ago/1906	Chile, Santiago	33 S	72 W	20,000	8.6	31/ago/1968	Iran	34.0 N	59.0 E	16,000	7.3
14/ene/1907	Jamaica, Kingston	18.2 N	76.7 W	1,600	6.5	25/jul/1969	Eastern China	21.6 N	111.9 E	3,000	5.9
21/oct/1907	Central Asia	38 N	69 E	12,000	8.1	4/ene/1970	Yunnan, China	24.1 N	102.5 E	10,000	7.5
28/dic/1908	Italy, Messina	38 N	15.5 E	85,000	7.5	28/mar/1970	Turkey, Gediz	39.2 N	29.5 E	1,100	7.3
9/ago/1912	Marmara Sea	40.5 N	27 E	1,990	7.8	31/may/1970	Peru	9.2 S	78.8 W	66,000	7.8
13/ene/1915	Italy, Avezzano	42 N	13.5 E	29,980	7.5	10/abr/1972	Iran, southern	28.4 N	52.8 E	5,054	7.1
16/ene/1920	China, Gansu	35.8 N	105.7 E	200,000	8.6	23/dic/1972	Nicaragua, Managua	12.4 N	86.1 W	5,000	6.2
1/sep/1923	Japan, Kwantoo	35.0 N	139.5 E	143,000	8.3	6/sep/1975	Turkey	38.5 N	40.7 W	2,300	6.7
16/mar/1925	China, Yunnan	25.5 N	100.3 E	5,000	7.1	4/feb/1976	Guatemala	15.3 N	89.1 W	23,000	7.5
7/mar/1927	Japan, Tango	35.8 N	134.8 E	3,020	7.9	6/may/1976	Italy, northeast	46.4 N	13.3 E	1,000	6.5
22/may/1927	China, near Xining	36.8 N	102.8 E	200,000	8.3	25/jun/1976	West Irian	4.6 S	140.1 E	422	7.1
1/may/1929	Iran	38 N	58 E	3,300	7.4	27/jul/1976	China, Tangshan	39.6 N	118.0 E	255,000	8
23/jul/1930	Italy	41.1 N	15.4 E	1,430	6.5	16/ago/1976	Philippines, Mindanao	6.3 N	124.0 E	8,000	7.9
25/dic/1932	China, Gansu	39.7 N	97.0 E	70,000	7.6	24/nov/1976	Northwest Iran-USSR	39.1 N	44.0 E	5,000	7.3
2/mar/1932	Japan, Sanriku	39.0 N	143.0 E	2,990	8.9	4/mar/1977	Romania	45.8 N	26.8 E	1,500	7.2
15/ene/1934	India, Bihar-Nepal	26.6 N	86.8 E	10,700	8.4	16/sep/1978	Iran	33.2 N	57.4 E	15,000	7.8
20/abr/1935	Formosa	24.0 N	121.0 E	3,280	7.1	10/oct/1980	Algeria, El Asnam	36.1 N	1.4 E	3,500	7.7
30/may/1935	Pakistan, Quetta	29.6 N	66.5 E	45,000	7.5	23/nov/1980	Italy, southern	40.9 N	15.3 E	3,000	7.2
25/ene/1939	Chile, Chillan	36.2 S	72.2 W	28,000	8.3	11/jun/1981	Iran, southern	29.9 N	57.7 E	3,000	6.9
26/dic/1939	Turkey, Erzinjan	39.6 N	38 E	30,000	8	28/jul/1981	Iran, northern	30.0 N	57.8 E	1,500	7.3
10/sep/1943	Japan, Tottori	35.6 N	134.2 E	1,190	7.4	13/dic/1982	Western Arabian	14.7 N	44.4 E	2,800	6
7/dic/1944	Japan, Tonankai	33.7 N	136.2 E	1,000	8.3	30/oct/1983	Turkey	40.3 N	42.2 E	1,342	6.9
12/ene/1945	Japan Mikawa	34.8 N	137.0 E	1,900	7.1	19/sep/1985	Mexico, Michoacan	18.2 N	102W	9,900	8.1
31/may/1946	Turkey	39.5 N	41.5 E	1,300	6	10/oct/1986	El Salvador	13.8 N	89.2 W	1,000	5.5
10/nov/1946	Peru, Areash	8.3 S	77.8 W	1,400	7.3	6/mar/1987	Colombia-Ecuador	0.2 N	77.8 W	1,000	7
20/dic/1946	Japan, Tonankai	32.5 N	134.5 E	1,330	8.4	20/ago/1988	Nepal-India	26.8 N	86.6 E	1,450	6.6
28/jun/1948	Japan, Fukui	36.1 N	136.2 E	5,390	7.3	7/dic/1988	Turkey-USSR	41.0 N	44.2 E	25,000	7
5/ago/1949	Ecuador, Ambato	1.2 S	78.5 E	6,000	6.8	20/jun/1990	Western Iran	37.0 N	49.4 E	50,000	7.7
15/ago/1950	India, Assam, Tibet	28.7 N	96.6 E	1,530	8.7	16/jul/1990	Philippine Islands	15.7 N	121.2 E	1,621	7.8
9/sep/1954	Algeria, Orleansville	36 N	1.6 E	1,250	6.8	14/ene/1995	Japan, Kobe	32.0N	139.0E	6,000	7.2
2/jul/1957	Iran	36.2 N	52.7 E	1,200	7.4						

* Hora del meridiano de Greenwich.

La tabla 2.2 muestra los sismos más destructivos en el mundo, dado el número de muertes que causaron. (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmosde.lis>)

*Tabla 2.2.- Sismos que han provocado más de 50,000 muertes.
(USGS, <http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmosde.lis>)*

Fecha (GMT*)	Lugar	Muertes	Magnitud
23-ene-1556	China, Shansi	830,000	?
11-oct-1737	India, Calcutta	300,000	?
27-jul-1976	China, Tangshan	255,000	8
9-ago-1138	Syria, Aleppo	230,000	?
22-may-1927	China, near Xining	200,000	8.3
22-dic-856	Iran, Damghan	200,000	?
16-dic-1920	China, Gansu	200,000	8.6
23-mar-893	Iran, Ardebil	150,000	?
1-sep-1923	Japan, Kwanto	143,000	8.3
28-dic-1908	Italy, Messina	85,000	7.5
sep-1290	China, Chihli	100,000	?
nov-1667	Caucasia, Shemakha	80,000	?
18-nov-1727	Iran, Tabriz	77,000	?
1-nov-1755	Portugal, Lisbon	70,000	8.7
25-dic-1932	China, Gansu	70,000	7.6
31-may-1970	Peru	66,000	7.8
21-jun-1903	Asia Minor, Silicia	60,000	?
11-ene-1693	Italy, Sicily	60,000	?
30-may-1935	Pakistan, Quetta	50,000	7.5
4-feb-1783	Italy, Calabria	50,000	?
20-jun-1990	Iran	50,000	7.7

* Hora del meridiano de Greenwich.

A partir de los registros obtenidos por la National Earthquake Information Center del USGS de 1985 a 1994, el USGS elaboró el siguiente resumen indicado en la tabla 2.3, en la cual se presenta el número de sismos ocurridos por año y para diferentes intervalos de magnitudes (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>). Recuérdese que el único sismo de magnitud mayor a los 8 grados en 1985 fue el presentado en las costas de Michoacán, México. Véase que existen muchos registros a los cuales no se les puede asociar una magnitud.

*Tabla 2.3.- Número de sismos de 1985 a 1994 registrados por la NEIC del USGS.
(USGS, <http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>)*

Magnitud	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
8.0-9.9	1	1	0	0	1	0	0	0	1	2
7.0-7.9	13	5	11	8	6	12	11	23	15	13
6.0-6.9	110	89	112	93	79	115	105	104	141	161
5.0-5.9	1674	1665	1437	1485	1444	1635	1469	1541	1449	1542
4.0-4.9	4281	4476	4146	4018	4090	4493	4372	5196	5034	4544
3.0-3.9	1764	1942	1806	1932	2452	2457	2952	4643	4263	5000
2.0-2.9	935	1169	1037	1479	1906	2364	2927	3068	5390	5369
1.0-1.9	97	153	102	118	418	474	801	887	1177	779
0.1-0.9	0	0	0	3	0	0	1	2	9	17
magnitud desconocida	4240	3218	2639	3575	4189	5062	3878	4084	3997	1944
Total	13115	12718	11290	12711	14585	16612	16516	19548	21476	19371

Con base en el análisis estadístico de los sismos registrados desde 1900, el USGS reporta una ocurrencia anual en el mundo de un sismo mayor a los 8 grados en magnitud (Tabla 2.4). Véase también que en el mundo se presentan diariamente alrededor de 8,000 eventos con magnitud menor a los 2 grados. (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>).

Tabla 2.4.- Frecuencia de ocurrencia de sismos desde 1900 (USGS, <http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>).

Descripción	Magnitud	Ocurrencia anual
Grande	>8	1
mayor	7 - 7.9	18
Fuerte	6 - 6.9	120
Moderado	5 - 5.9	800
Ligero	4 - 4.9	6,200 (estimado)
Menor	3 - 3.9	49,000 (estimado)
Pequeño	2 - 3	aprox. 1,000 por día
Muy pequeño	<2.0	aprox. 8,000 por día

La tabla 2.5 muestra lo que repercute un incremento en la magnitud de un sismo en incremento en el movimiento del terreno (desplazamientos) y en la energía liberada, con base en observaciones del USGS (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>). Por ejemplo, un sismo de 7.2 grados de magnitud produciría 10 veces más de movimiento en el suelo que un sismo de 6.2 grados, pero incrementaría aproximadamente 32 veces más la energía. El incremento de energía indica mejor el poder destructivo de un sismo.

Tabla 2.5.- Incremento en magnitud contra incremento en desplazamientos y energía. (USGS, <http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>).

Incremento en magnitud (grados)	Incremento del movimiento del terreno (Desplazamientos)	Incremento en energía del sismo
1	10 veces	32 veces
0.5	3.2 veces	5.5 veces
0.3	2 veces	3 veces
0.1	1.3 veces	1.4 veces

En las siguientes fotos se muestran diversas estructuras colapsadas por diferente sismos en distintas regiones del mundo (Figs. 2.12 a 2.16).



Fig. 2.12.- Sismo de 1964. Alaska, USA. M=9.2 (Encarta, 1994)



Fig. 2.13.- Sismo del 19 de septiembre, 1985. México, D.F. $M=8.1$ (Encarta, 1994)



Fig. 2.14.- Sismo de octubre de 1989. Loma Prieta, USA. $M=7.1$ (Encarta, 1994)



*Fig. 2.15.- Sismo del 17 de enero de 1995. Kobe (Hyogo-Ken Nanbu), Japón. $M=7.2$
(EQE, <http://www.eqe.com/publications/kobe/kobe.htm>)*



*Fig. 2.16.- Sismo del 9 de octubre de 1995. Manzanillo, México. $M=7.3$
(GIIS, <http://www.pue.upaep.mx/carrs/GIIS/manzanillo.html>)*

2.5 SISMICIDAD DE LA REPÚBLICA MEXICANA

México está dentro de la zona del cinturón Circunpácífico, y tan sólo en él se disipa aproximadamente el 3% de la actividad sísmica mundial (Fundación ICA, 1987). Por lo tanto, es de vital importancia que se estudien estos fenómenos en el país puesto que representan un gran peligro. El país a lo largo de su historia, frecuentemente ha sido afectado por temblores fuertes que han provocado considerables pérdidas humanas y materiales.

El servicio sismológico del Instituto de Geofísica de la UNAM, a través de su red de sismógrafos en la República Mexicana, reporta la sismicidad en el país. A continuación se presenta un mapa (Fig. 2.17) de la localización epicentral de los sismos presentados de 1911 a 1994 en México.

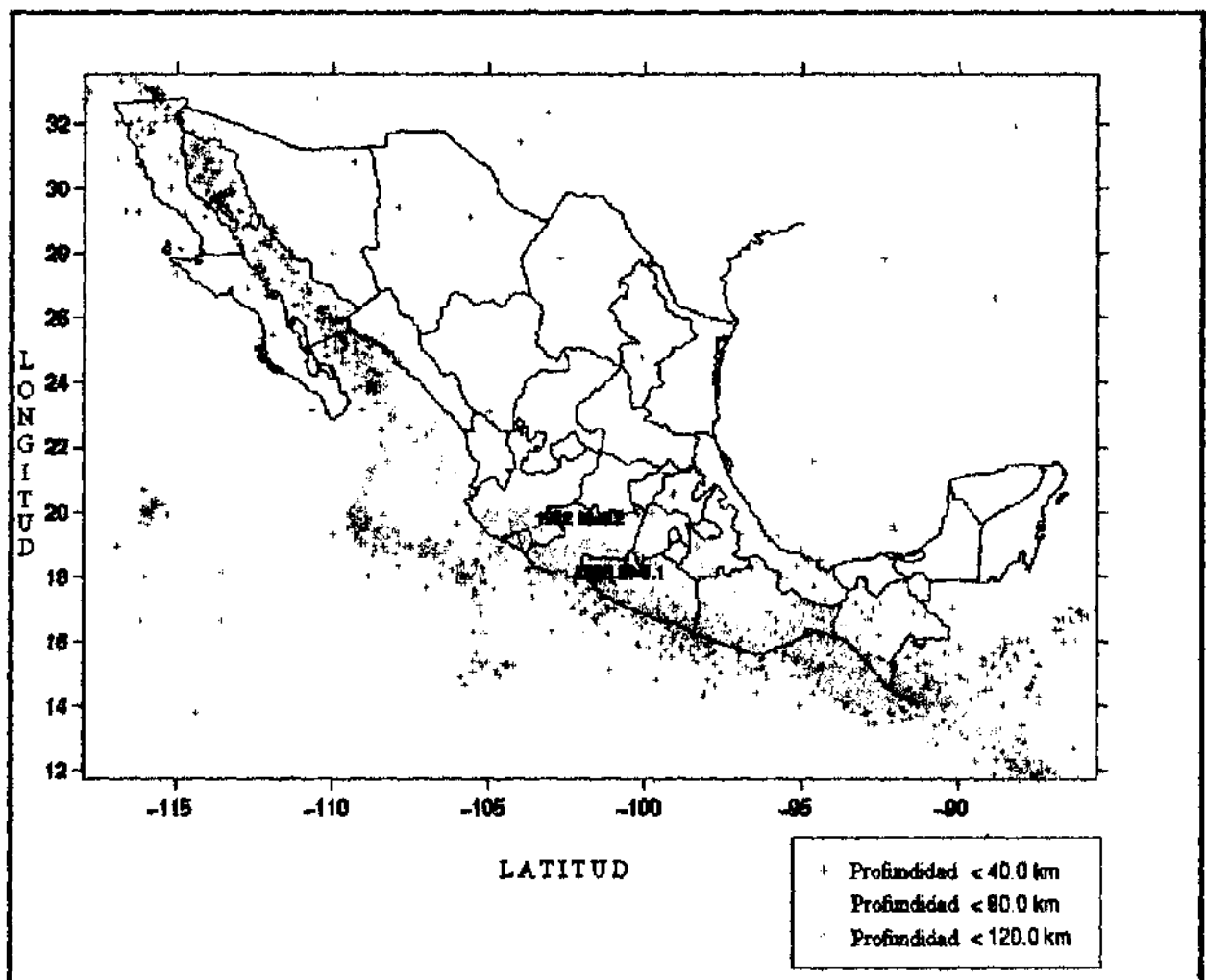


Fig. 2.17.- Sismicidad de México de 1911 a 1994; $M > 4.5$.
(R. Zúñiga, <http://www.ilacaele/igofscu.unam.mx/sismo.html>).

En la República Mexicana coinciden las placas de Cocos, Norteamérica, Rivera, Pacífico y Caribe (Fig. 2.18).



Fig. 2.18.- Placas tectónicas que llegan a la República Mexicana.

La actividad sísmica en México es debida principalmente a la subducción de la placa de Cocos en la placa de Norteamérica, al choque de la placa de Rivera contra la de Norteamérica y Cocos, a las fallas normales de la subducción de la placa de Cocos, y a los eventos por la presencia del eje neovolcánico mexicano y por las fallas geológicas como la de San Andrés en Baja California Norte, las de Motagua y Polochic en Chiapas, la de Acambay en el estado de México, las de Clarión y Zacamboxo en Puebla (Fig. 2.22), entre otras.

La mayor actividad sísmica en el país ocurre en la zona de subducción del Pacífico a lo largo de las costas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. La placa de Cocos en su avance se sumerge bajo la placa continental de Norteamérica, provocando deslizamientos entre ambas placas que producen la mayoría de los temblores en México. La zona de subducción en México es la comprendida desde Jalisco hasta Chiapas, y también se le conoce como trinchera mexicana.

La actividad de la zona de subducción puede separarse en dos procesos, cada uno actuando sobre una parte de dicha zona; en la parte más cercana al contacto entre las placas, donde los epicentros son más superficiales, los mecanismos sísmicos son de falla inversa de cortante, mientras que en la parte donde los sismos se originan a mayor profundidad, los mecanismos son de falla normal, desarrollada sobre la sección transversal de la placa que se subduce. A su vez, la actividad correspondiente a los temblores con mecanismo de falla de cortante se puede separar en dos subprocesos: los temblores característicos y la actividad de fondo. Se le llama temblores característicos a aquellos eventos telúricos críticos que suelen ser límites para fines de diseño estructural, por su parte, la actividad de fondo es referida a eventos menores que ocurren con mucha frecuencia, que sin embargo no son considerados límites o característicos.

Nishenko y Singh (1987) dividieron para su estudio a la zona de subducción en regiones independientes para determinar los periodos medios de recurrencia (T_r) y estimar probabilidades condicionales de ruptura ($P_c\%$) en cada región (Tabla 2.6; Fig. 2.19). Desde la publicación de este artículo a la fecha, se han presentado temblores que han modificado las probabilidades condicionales calculadas por estos autores, como es el caso de los sismos del 14 de septiembre de 1995 ($M=7.2$) en Ormetepec y del 9 de octubre de 1995 ($M=7.3$) en Manzanillo, por lo que las probabilidades asociadas a sus regiones han disminuido actualmente.

En el caso del sismo de Manzanillo (Lat. 19.15°N , Long. 104.22°W), se puede observar en la tabla 2.6 que no era esperado para 1995, lo que da una idea de que aún falta mucho por conocer de la actividad sísmica en el país.

U. S. A.

Tabla 2.6.- Periodos medios de recurrencia y probabilidades condicionales estimadas de ruptura en la subducción de la placa de Cocos (Nishenko y Singh, 1987).

No.	Zona (Longitud Oeste)	Tr (años)	Pc% (1986-1996)	Pc% (1986-2006)
1	Tehuantepec (93.5° - 95.2°)	No hay información	¿?	¿?
2	Oaxaca este (95.2° - 96.4°)	37	21 %	70 %
3	Oaxaca central (96.4° - 97.3°)	54	0 %	0 %
4	Oaxaca central (97.3° - 97.7°)	¿56?	59 %	86 %
5	Oaxaca oeste (97.7° - 98.2°)	38	9 %	52 %
6	Ometepec (98.2° - 99.3°)	¿30-47?	83 %	98 %
7	San Marcos (99.3° - 100.0°)	56-68	1-5 %	9-29 %
8	Guerrero central (100.0°-101.0°)	¿54?	56-79 %	83-96 %
9	Petalán (101.0°-101.5°)	36	0 %	10 %
10	Michoacán (101.5°-103.0°)	¿74?	0 %	0 %
11	Colima (103.0°-103.7°)	32	7 %	57 %
13	Jalisco (104.3°-105.7°)	No calculada	0-7 %	1-41 %

El valor del periodo medio de recurrencia (Tr), significa el número de años promedio para que se presenten sismos de magnitud grande ($M_s > 7$) en la región. Este cálculo del periodo de retorno es muy subjetivo y por lo tanto no es confiable, aunque nos da una idea de la probabilidad de ocurrencia de un sismo en cierta zona. La probabilidad condicional (Pc%) es una estimación asociada a un posible rompimiento para cada región en cierto intervalo de tiempo.

De gran interés para los científicos en todo el mundo es la zona 8 o brecha de Guerrero (Figs. 2.19 y 2.20), donde se presenta una velocidad de deformación de alrededor de 7 cm/año desde 1911, que indica que más o menos 6 m. de deformación elástica será liberada en un futuro inmediato (Whitney, 1996). La última secuencia sísmica en este segmento consistió de seis eventos independientes entre 1989 y 1911, cuatro de los cuales tuvieron una magnitud mayor a los 7.5 grados. Por lo anterior, se prevé un sismo en esta zona antes del fin de siglo con una magnitud estimada entre 8.2 y 8.3° (Singh y Ordaz, 1990). Se sabe que hasta no presentarse este sismo, la energía acumulada se incrementará pudiéndose liberar y generar una magnitud mayor a la estimada para fin de siglo. Como se mostró en la tabla 2.5, el incremento de un décimo de grado en magnitud representa un incremento de aproximadamente el 40% de la energía acumulada.

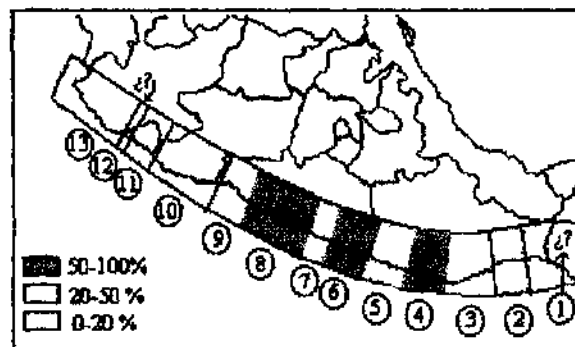


Fig. 2.19.- Mapa de probabilidades condicionales (Pc% 1986-1996) en la trinchera mexicana (Nishenko y Singh, 1987).

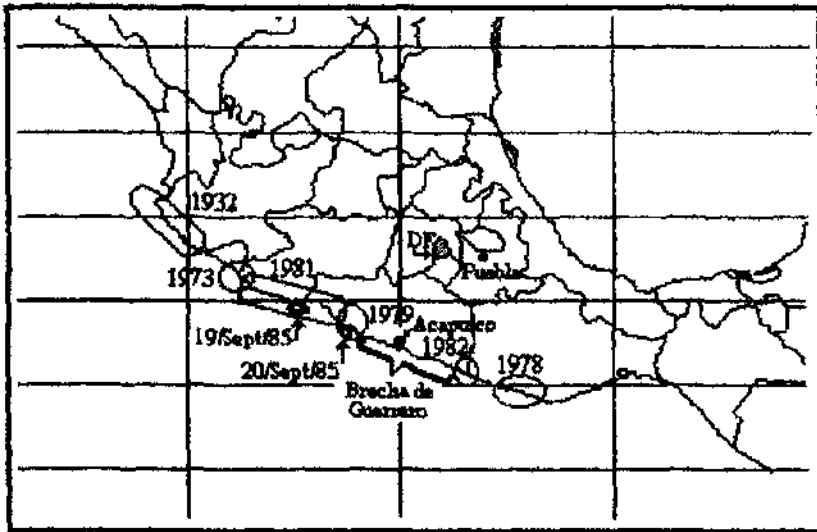


Fig. 2.20.- Áreas de ruptura recientes en la trinchera mexicana.

En la República Mexicana el diseño de estructuras sismo-resistentes está basado en los parámetros de diseño sísmico del reglamento local, y en caso de que éste no exista se recurre al mapa de regionalización sísmica (Fig. 2.21) contenido en el capítulo de diseño por sismo del “Manual de Diseño de Obras Civiles” (IIE., 1993). Se aprecia en el mapa que el país se divide en cuatro zonas designadas con las letras de la A hasta la D, crecientes en peligro sísmico según la cercanía a la trinchera mexicana. Deben tenerse ciertas precauciones al emplear mapas de regionalización sísmica, ya que la subdivisión puede ser burda y en una misma zona pueden quedar incluidos sitios de peligro sísmico significativamente distinto (R. Meli, 1995).

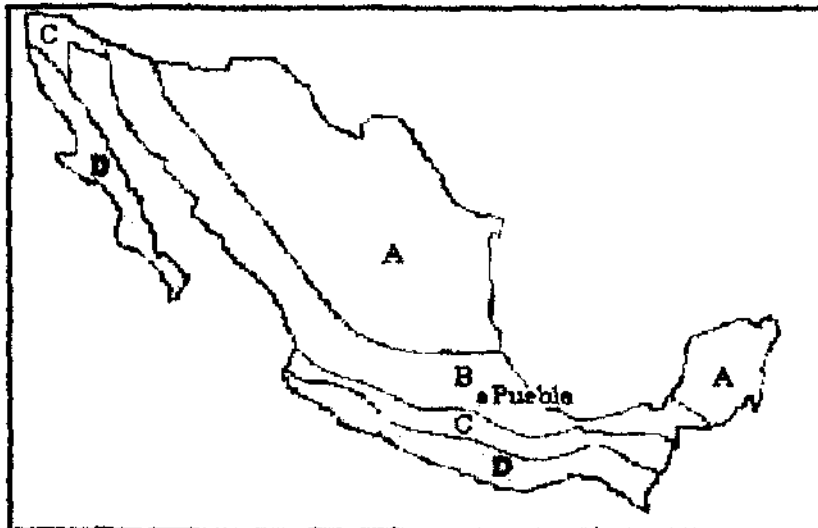


Fig. 2.21.- Carta sísmica de la República Mexicana. (IIE., 1993).

México siempre estará en una zona de alto peligro sísmico, por ello, hay que aprender a vivir con estos efectos naturales y hacer que nuestras construcciones estén diseñadas para resistir dichos eventos. A lo largo de la historia han ocurrido muchos temblores de gran intensidad en distintas partes del país, los más intensos se resumen a continuación (Tabla 2.7).

Tabla 2.7.-Sismos más intensos a la fecha en la República Mexicana (Fundación ICA,1987).

Fecha (local)	Lat. N.	Long. W.	Magnitud
19 Ene 1900	20.0	105.0	8.1
16 May 1900	20.0	105.0	7.6
16 Ene 1902	17.6	99.7	7.0
14 Ene 1903	15.0	98.0	8.3
15 Abr 1907	16.7	99.2	7.8
26 Mar 1908	18.0	99.0	7.7
27 Mar 1908	17.0	101.0	7.2
30 Jul. 1909	16.8	99.9	7.6
31 Jul. 1909	16.6	99.5	7.7
31 Oct. 1909	17.0	101.2	7.0
3 Feb. 1911	18.2	96.2	7.3
27 Mar 1911	16.7	95.9	7.0
7 Jul. 1911	19.7	103.7	7.9
16 Dic 1911	16.9	100.7	7.6
19 Dic 1912	19.9	99.8	7.0
30 Mar 1914	16.7	92.2	7.5
2 Jun 1916	17.4	94.9	7.1
29 Dic 1917	15.0	97.0	7.1
17 Abr 1919	14.5	92.3	7.0
3 Ene 1920	19.3	97.0	7.8
30 Abr 1921	19.7	104.3	7.8
16 Nov 1925	20.4	106.4	7.0
9 May 1927	16.7	93.5	7.0
9 Feb 1928	17.9	97.6	7.7
21 Mar 1928	16.2	95.5	7.7
16 Abr 1928	17.8	97.1	7.0
17 Jun 1928	16.3	96.7	8.0
4 Ago 1928	16.8	97.6	7.4
9 Oct 1928	16.3	97.3	7.8
15 Ene 1931	16.1	96.6	8.0
21 May 1932	13.2	89.6	7.0
3 Jun 1932	19.8	104.0	8.4
18 Jun 1932	19.5	103.5	8.0
22 Jun 1932	18.9	104.5	7.0
30 Nov 1934	19.0	105.3	7.2
14 Dic 1934	16.7	93.1	7.3
31 Dic 1934	32.0	114.8	7.0
26 Jul 1937	18.8	97.5	7.7

Fecha (local)	Lat. N.	Long. W.	Magnitud
6 Oct 1937	17.8	99.2	7.2
23 Dic 1937	16.3	98.6	7.2
2 Ene 1938	16.1	98.3	7.3
28 Jun 1938	18.2	100.3	7.0
15 Abr 1941	18.9	102.9	7.9
20 Nov 1942	16.5	99.4	7.2
25 Nov 1942	16.1	98.3	7.2
22 Feb 1943	17.6	101.2	7.7
26 Jun 1945	14.7	91.3	7.2
27 Jun 1945	27.0	111.0	7.0
21 Nov 1947	19.0	107.4	7.0
6 Ene 1948	16.1	98.8	7.0
27 Jun 1948	17.0	85.0	7.0
4 Dic 1948	21.6	106.7	7.5
29 Sep 1950	19.0	107.4	7.0
23 Oct 1950	13.8	91.8	7.0
14 Dic 1950	17.2	98.2	7.3
21 Ago 1951	19.8	106.0	7.0
29 Abr 1954	29.5	112.5	7.7
17 Nov 1954	13.8	91.8	7.0
8 May 1955	25.5	110.0	7.0
26 Sep 1955	15.8	92.8	7.0
28 Jul 1957	17.1	99.2	7.7
11 May 1962	17.3	99.6	7.2
19 May 1962	17.1	99.6	7.2
6 Jul 1964	18.3	100.4	7.4
23 Ago 1965	16.3	95.8	7.8
2 Ago 1968	16.6	97.7	7.4
30 Ene 1973	18.4	103.2	7.5
28 Ago 1973	18.3	96.5	7.0
4 Feb 1976	15.3	89.7	7.5
29 Nov 1978	16.0	96.7	7.7
14 Mar 1979	17.5	101.5	7.6
24 Oct 1981	17.8	102.3	7.3
19 Sep 1985	17.7	102.5	8.1
20 Sep 1985	17.4	102.0	7.6
14 Sep 1995 *	16.8	98.6	7.2
9 Oct 1995 *	19.15	104.22	7.3

* Agregado por el autor, basado en información proporcionada por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

2.6 SISMICIDAD EN EL ESTADO DE PUEBLA

El estado de Puebla, entidad federativa de la República Mexicana, limita con los estados de Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo. Está situado entre los 18 y 21° de latitud norte y entre los 97 y 99° de longitud oeste de Greenwich, a una altitud promedio de 2,150 metros sobre el nivel del mar. Tiene una superficie aproximada de 34,000 km² y una población de 4.6 millones de habitantes. Su territorio está atravesado en su parte media por la Cordillera Neovolcánica, y se levantan en sus límites el Citlaltépetl (Pico de Orizaba), el Popocatepetl, el Iztacihuatl y la Malinche (Matlalcueyan) (Fig. 2.22). La Sierra Madre Oriental da origen a las serranías de Huauchinango y Zacatlán. En la parte oriental lo recorre la Sierra de Puebla y hacia el sur las estribaciones de la Sierra Madre del Sur. El estado tiene una variada fisonomía que continúa desarrollándose con la consiguiente inestabilidad manifestada por una sismicidad importante de origen tectónico, volcánico y de acomodamientos superficiales.

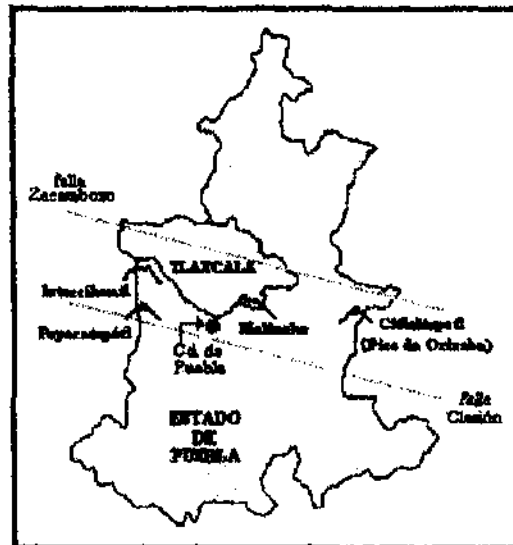


Fig. 2.22.- El estado de Puebla y las estructuras volcánicas en sus límites.

El estado de Puebla se localiza en la proximidad de la zona de mayor actividad sísmica del país (la trinchera mexicana), además, se presentan otras causas de sismicidad por la presencia de las fallas geológicas y del eje neovolcánico mexicano.

El eje neovolcánico es una zona prominente de vulcanismo que atraviesa el país a la altura del paralelo 19° con un ancho de 200 a 300 km.

Las fallas activas en el estado (Fig. 2.22) pueden provocar efectos sísmicos moderados (Fig. 2.23) a profundidad somera, las más conocidas son las de Clarión y Zacamboxo.

En la figura 2.23 se presenta un mapa de sismicidad del estado de Puebla para el periodo 1974-1992, con datos del Servicio Sismológico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se indican de manera particular los epicentros del temblor de Jalapa (3/Ene/1920, M=7.8) y de Ciudad Serdán (28/Ago/1973, M=6.8), los cuales posiblemente están asociados a un origen por fallamientos geológicos (Fig. 2.23).

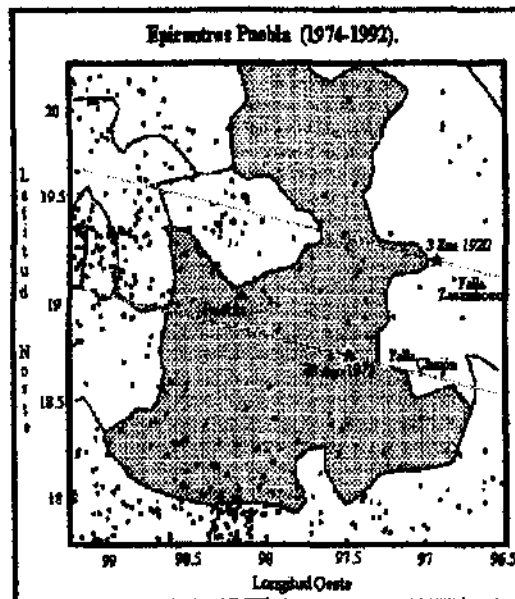


Fig. 2.23.- Mapa de sismicidad del estado de Puebla para el periodo de 1974-1992 (Instituto de Geofísica de la UNAM).

La carta sísmica del estado de Puebla (Fig. 2.24), muestra que esta entidad se encuentra comprendida dentro de las siguientes tres zonas.

- Zona Asísmica (A): De los 19.5° a los 21.0° de latitud norte, y de los 97.0° a los 98.5° de longitud oeste. Los sismos son raros.
- Zona Penesísmica (B): De los 18.69° a los 19.5° de latitud norte, y de los 96.8° a los 99.45° de longitud oeste. Los sismos son menos frecuentes.
- Zona Sísmica (C): De los 17.13° a los 18.69° de latitud norte, y de los 96.13° a los 99.45° de longitud oeste. Los sismos son frecuentes.

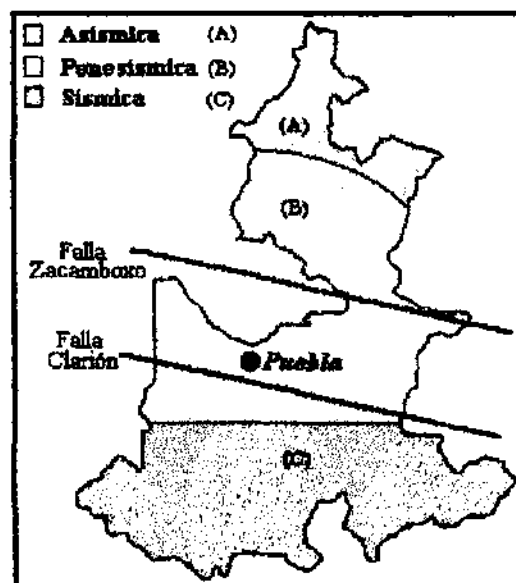


Fig. 2.24.- Carta Sísmica del estado de Puebla (Figuroa, 1974)

La tabla 2.8 presenta los sismos que más han afectado al estado de Puebla, indicando las magnitudes estimadas y las intensidades de Mercalli Modificada máximas en el estado.

Tabla 2.8.- Sismos más intensos a la fecha en el estado de Puebla (Figuroa, 1974).

Fecha (local)	Magnitud	Intensidad (MM)
1523	7.0	VIII
25/Ago/1611	7.5	VI
⇒ 30/Jul/1667	7.0	VII
⇒ 16/Ago/1711	7.5	VIII
22/Nov/1837	6.5	VI
3/Mar/1845	6.0	VII
7/Abr/1845	7.0	VI
⇒ 3/Oct/1864	7.0	IX
⇒ 19/Jul/1882	7.5	VIII
15/Abr/1907	7.8	V

Fecha (local)	Magnitud	Intensidad (MM)
3/Ene/1920	7.8	X
19/Abr/1920	6.7	VII
16/Abr/1928	7.0	V
26/Jul/1937	7.7	VIII
24/May/1959	6.8	VII
⇒ 28/Ago/1973	7.0	VIII
* 24/Oct/1980	6.4	VI

* Agregada por el autor con base en información proporcionada por el Instituto de Geofísica de la UNAM.
 ⇒ Sismos que han provocado daños en la ciudad de Puebla.

El Ing. Jesús Figuroa pasó gran parte de su vida recuperando información de daños causado por los sismos y produjo mapas de isosistas para los principales sismos ocurridos en los últimos 150 años. A continuación, se presentan las curvas de isosistas de los sismos del 7 de abril de 1845 (Fig. 2.25), 3 de octubre de 1864 (Fig. 2.26), 19 de julio de 1882 (Fig. 2.27), 3 de enero de 1920 (Fig. 2.28) y 28 de agosto de 1973 (Fig. 2.29).

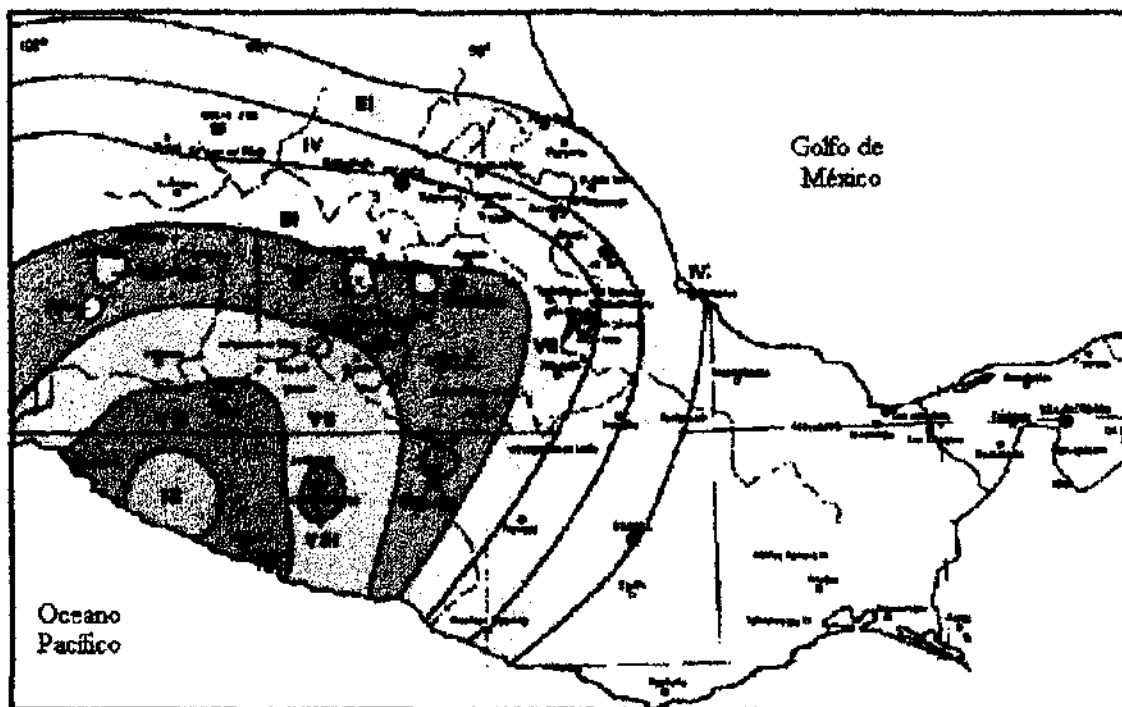


Fig. 2.25.- Mapa de isosistas del sismo del 7 de abril de 1845 (M=7.0). Intensidades de IV a VI en los estado de Puebla. Fuerte en Ciudad Serdán (Figuroa, 1974).

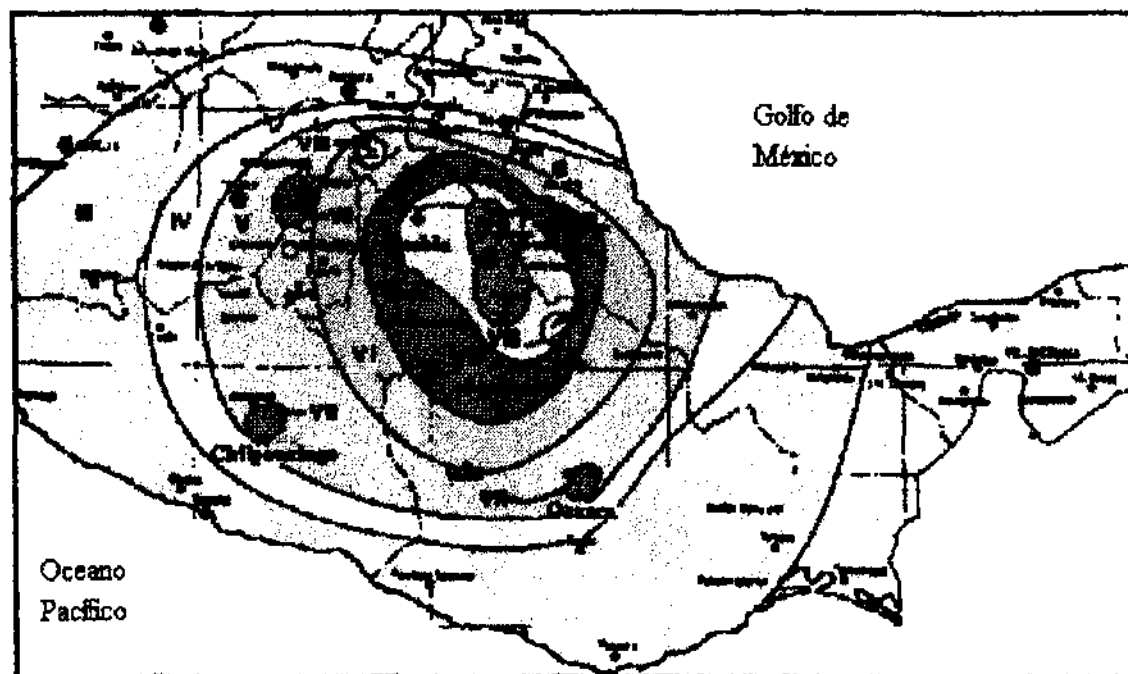


Fig. 2.26.- Mapa de isosistas del sismo del 3 de octubre de 1864 (M=7). Intensidades de V al IX en el estado de Puebla. Es el más intenso que se tiene memoria en Puebla, donde los edificios fueron seriamente dañados y los templos más sólidos sufrieron algunos daños. Hubo 20 muertos y un gran número de heridos. Se abrieron grandes grietas en el terreno. Afectó con mayor intensidad a las cercanías de Ciudad Serdán (Figueroa, 1974).

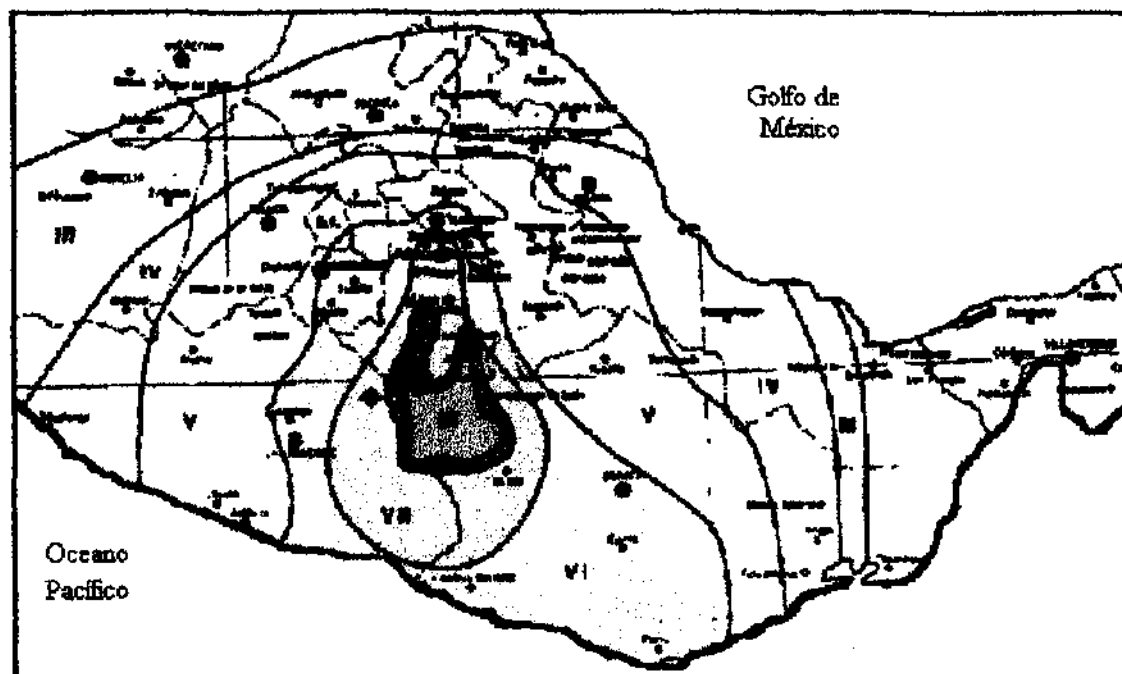


Fig. 2.27.- Mapa de isosistas del sismo del 19 de julio de 1882 (M=7.5) Intensidades de IV a VIII en los estados de Veracruz y Puebla. En Puebla sufrieron bastantes daños los edificios. (Figueroa, 1974).

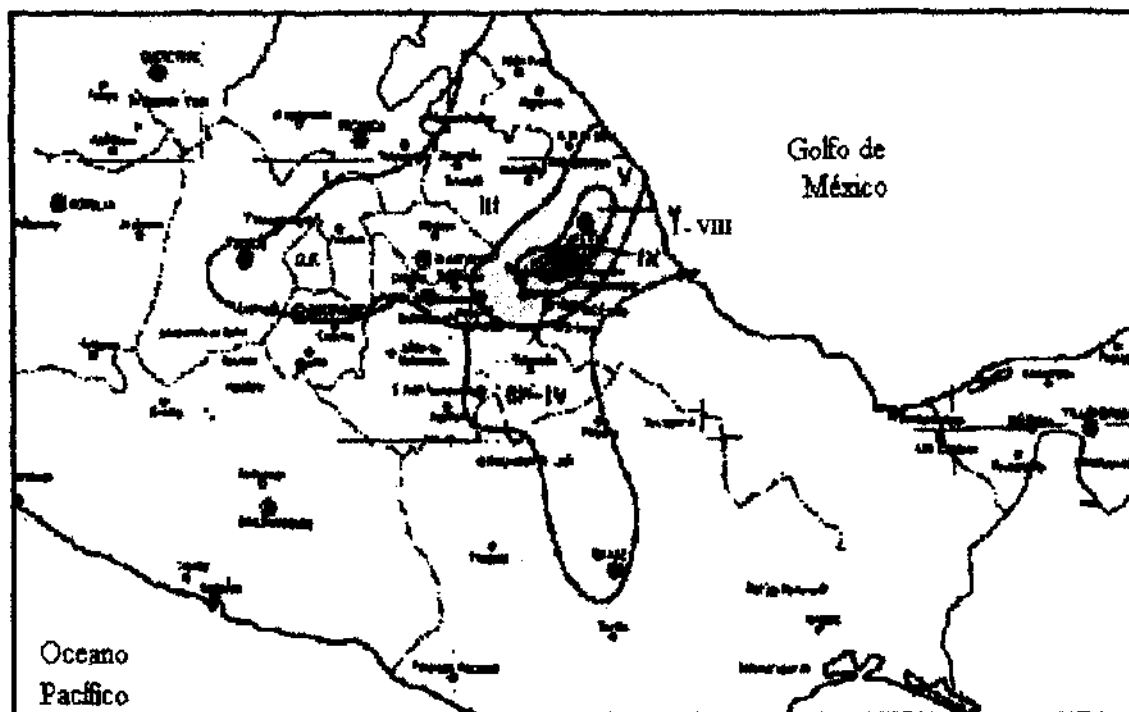


Fig. 2.28.- Mapa de isosistas del sismo del 3 de enero de 1920 (Sismo de Jalapa, $M=7.8$). Intensidades de VII a X en el estado de Puebla (Figuroa, 1974).

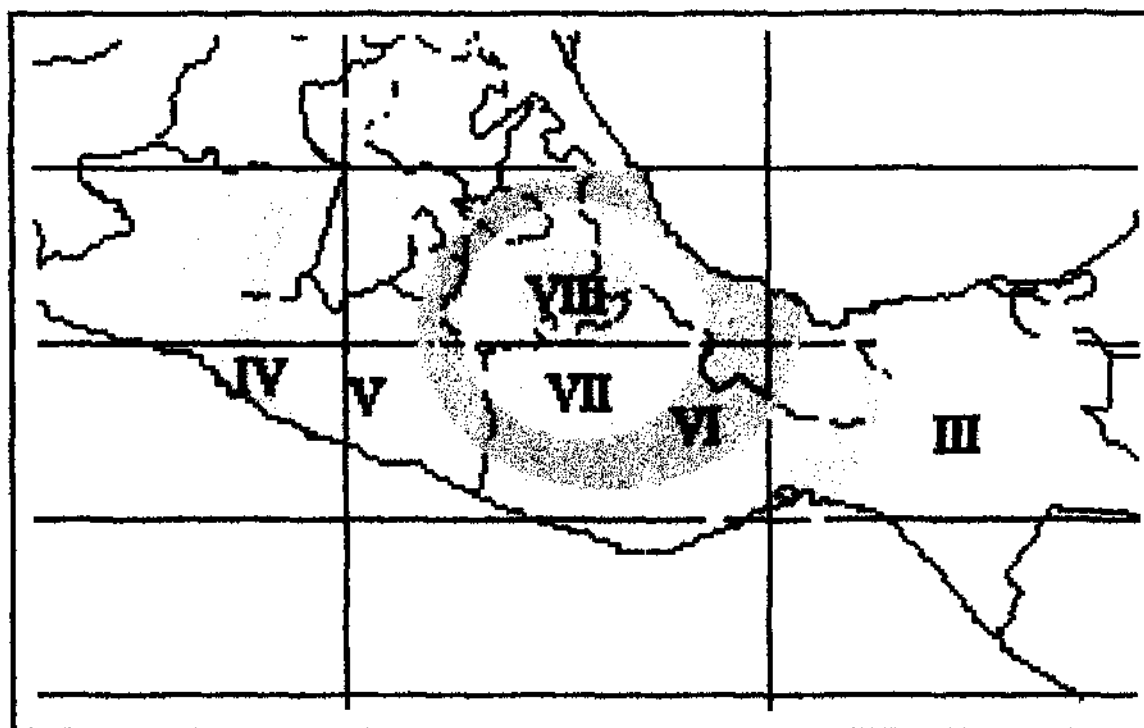


Fig. 2.29.- Mapa de isosistas del sismo del 28 de agosto de 1973 ($M=7$). Ampliamente sentido en 400,000 km² del centro y sureste de México. Daños mayores en el área epicentral, y los mayores efectos se manifestaron en los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz, (Figuroa, 1974).

2.8 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE PUEBLA

El trabajo de "Zonificación Sísmica de la ciudad de Puebla" (C. Ruiz et. al., 1994) presenta los resultados que incluyen la caracterización geodinámica de la ciudad, con base en la determinación en campo de las características dinámicas del terreno. De este trabajo se presenta un resumen a continuación.

2.8.1 CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA

La configuración geológica y geotécnica de la ciudad de Puebla (Fig. 2.31) es la siguiente (Auvinet, 1976).

Calizas.- Esta formación aflora en el límite sur. La roca se presenta en estratos de 20 a 30 cm. de espesor y se encuentra muy fracturada. Al norte de la zona de afloramiento de calizas existen los cerros del Tepozchitl y Tultepec.

Basaltos y tobas limosas.- En los lomeríos que se encuentran al sur y al este de la ciudad y en las lomas de Loreto y Guadalupe aparecen lavas basálticas, recubiertas por tobas limo-arenosas y arenosas de color amarillento, generalmente compactas.

Escorias basálticas.- El cerro de la Paz, ubicado en la porción noroeste de la ciudad, es un cono volcánico formado por escorias basálticas de color rojizo.

Depósitos volcánicos y fluviales.- En casi la totalidad de la ciudad se encuentran tobas interestratificadas con depósitos de origen fluvio-palustre que van desde arcillas hasta cantos rodados.

Depósitos de travertino.- Existen afloramientos de aguas sulfurosas templadas asociados a depósitos de travertino que se ubican en la zona de rancho Colorado, en las proximidades del cerro de la Paz, en el balneario Agua Azul, en la avenida Juárez y en el centro histórico, a profundidades muy diversas y en estratos de espesores variables.

Depósitos aluviales.- A lo largo de los ríos Alseseca, San Francisco y Atoyac, existen depósitos aluviales constituidos por arenas limosas principalmente.

2.8.2 CARACTERÍSTICAS GEODINÁMICAS

Se estimaron los periodos naturales del terreno (T), a partir de la información proporcionada por 107 estudios de mecánica de suelos (93 sondeos profundos y 14 superficiales o pozos a cielo abierto), mediante el modelo elástico de propagación de ondas de cortante (2-1) (Zeevaert, 1988).

$$T = 4 \sum_i \frac{H_i}{V_i} \quad (2-1)$$

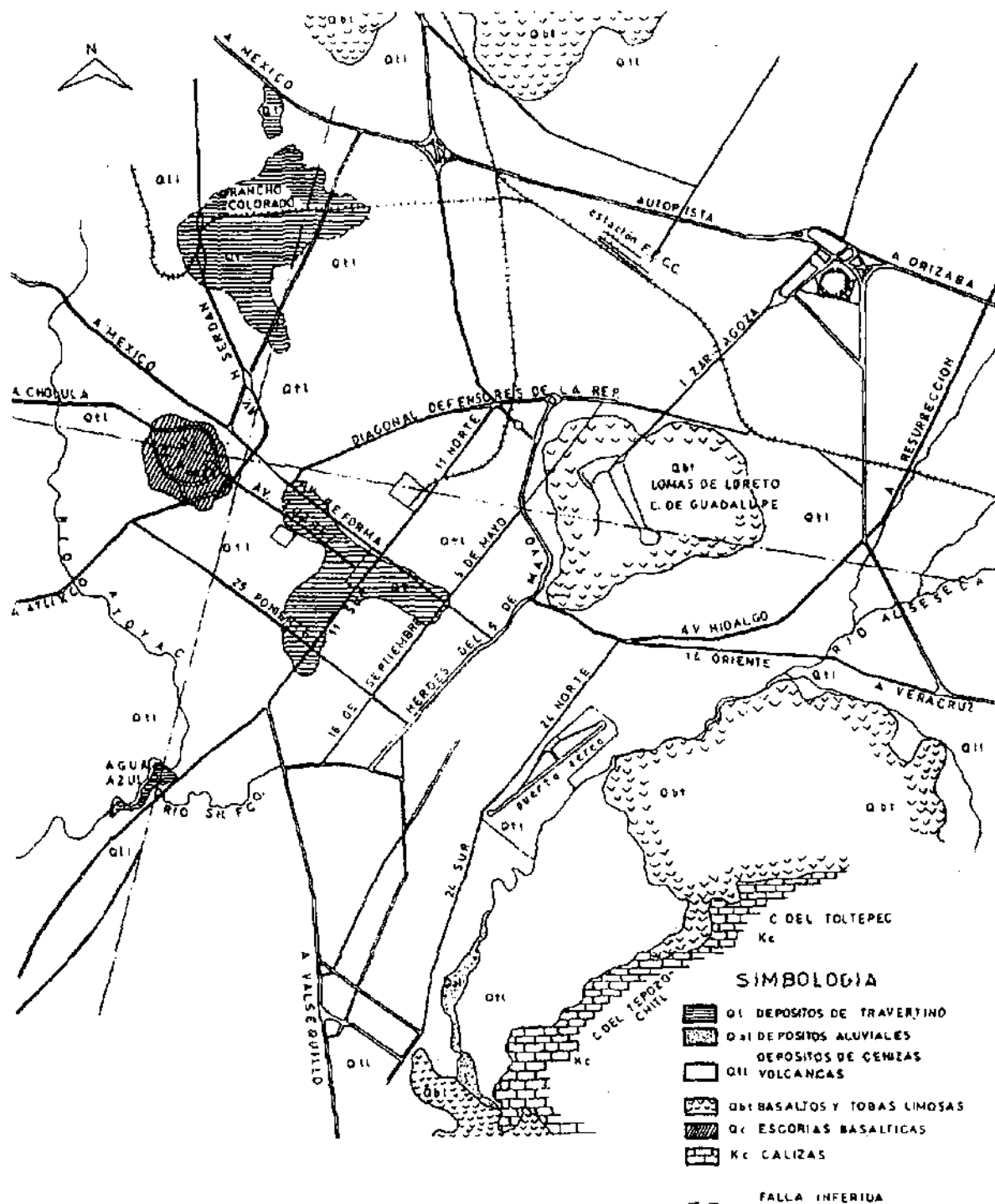


Fig. 2.31.- Mapa geológico de la ciudad de Puebla (Auvinet, 1976).

En la expresión 2-1, H_i es el espesor del estrato y V_i es la velocidad de ondas de cortante, la cual es función del módulo dinámico de cortante (G_i) y de la densidad del material (P_i).

$$V_i = \sqrt{\frac{G_i}{P_i}} \tag{2-2}$$

Para extender la cobertura de la información geodinámica, se recurrió a la determinación de los periodos naturales del terreno a partir de mediciones de vibración ambiental. El equipo utilizado fue una grabadora digital de estado sólido Kinometrics SSR-1, resolución de 16 bits, tres canales de acceso, muestreo de 200 muestras por segundo (mps) por canal, y dos sensores sismológicos de campo Kinometrics WR-1 con frecuencia nominal de 20 Hz y un intervalo eficiente de respuesta de 0.05 a 5 seg. de periodo, controlados mediante una computadora portátil con su software de comunicación al sismógrafo.

A partir de los resultados obtenidos del cálculo de los periodos naturales del suelo con los sondeos y con la vibración ambiental, se trazaron las curvas de isoperiodos (Fig. 2.32) para valores de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70 seg. que definen las propiedades dinámicas del suelo y se ajustan razonablemente al mapa geológico.

El mapa de isoperiodos permitió distinguir una zona de terreno firme, con periodos menores de 0.40 seg. del resto de la ciudad, donde el periodo más grande llega a ser de 0.74 seg. Por lo anterior se decidió proponer el mapa de zonificación sísmica (Fig. 2.33), el cual distingue una zona de terreno firme (Zona A) de otra de terreno moderadamente blando (Zona B); (Tabla 2.10).

El actual reglamento de construcciones. (AMP., 1994) con base en la propuesta de C. Ruiz et. al. (1994), en su artículo 333 del título quinto zonifica a la ciudad en las siguientes tres zonas: zona de tobas (I), zona de calizas lacustres y travertino (II), zona con suelos blandos o sueltos (III); (Tabla 2.10, Fig. 2.33).

Tabla 2.10.- Zonificación de la ciudad de Puebla.

Zonificación Sísmica (C. Ruiz et. al., 1994)	Reglamento de Construcciones del Municipio de Puebla, Art. 333. (AMP., 1994)
Consistencia de muy firme a dura (zona firme o dura; A).	Suelos de consistencia de muy firme a dura para limos y arcillas, y de compactos a muy compactos para suelos granulares. (Zona de Tobas; I).
Consistencia de blanda a firme (zona moderadamente blanda; B).	Suelos de consistencia de medianamente blanda a firme para limos y arcillas, y depósitos arenosos de compacidad mediana. (Zona de calizas lacustres y travertino; II).
	Suelos de consistencia de blanda a medianamente blanda para limos y arcillas, y depósitos arenosos de compacidad suelta (III).

Actualmente, la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS) delegación Puebla, está trabajando en la elaboración de una zonificación geotécnica para la ciudad, con base en la información contenida en aproximadamente 400 estudios de mecánica de suelos, la que permitirá conocer mejor las características de los suelos de la ciudad de Puebla (A. Vera, 1996).

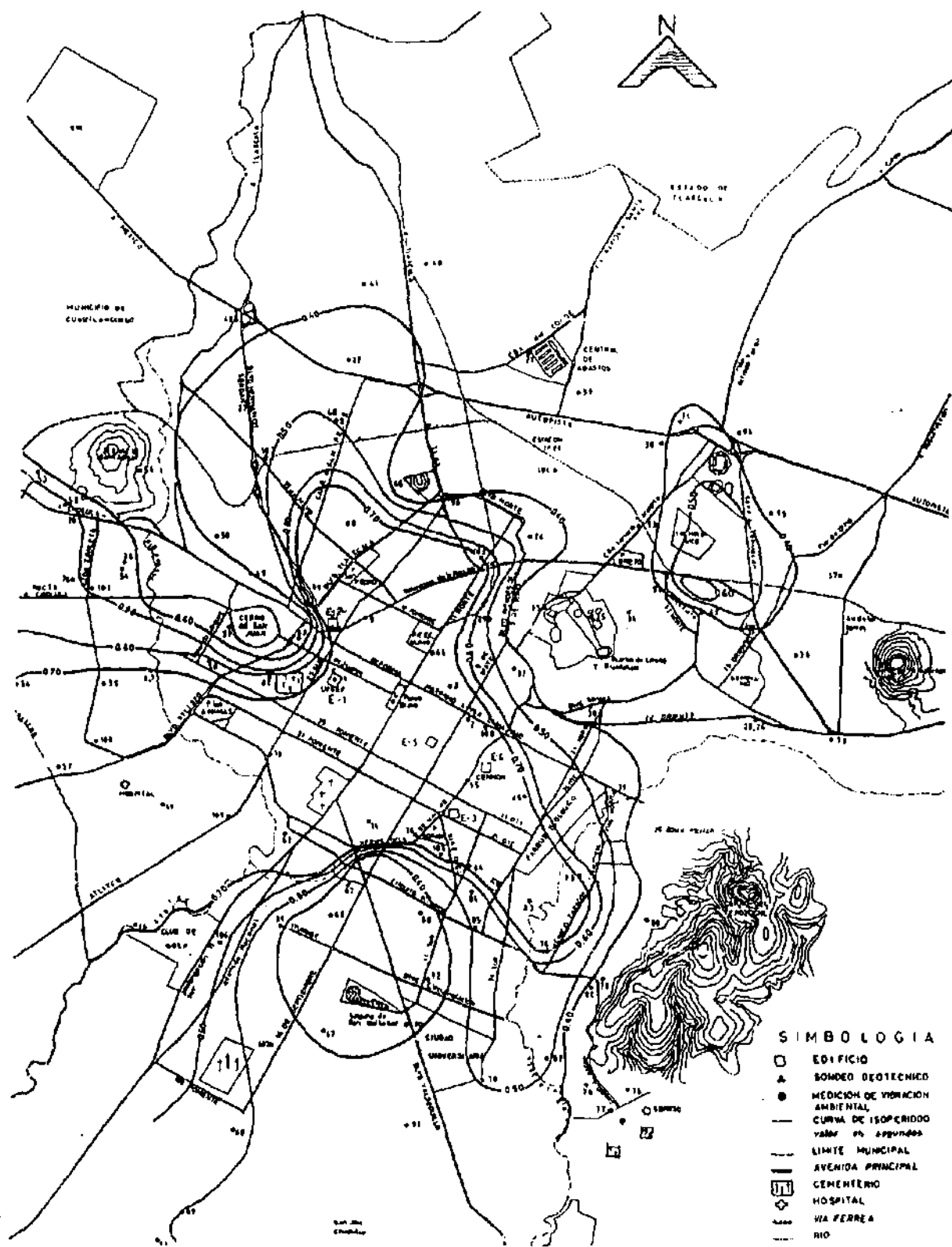


Fig. 2.32.- Mapa de Isoperiodos de la ciudad de Puebla (C. Ruiz et. al., 1994).

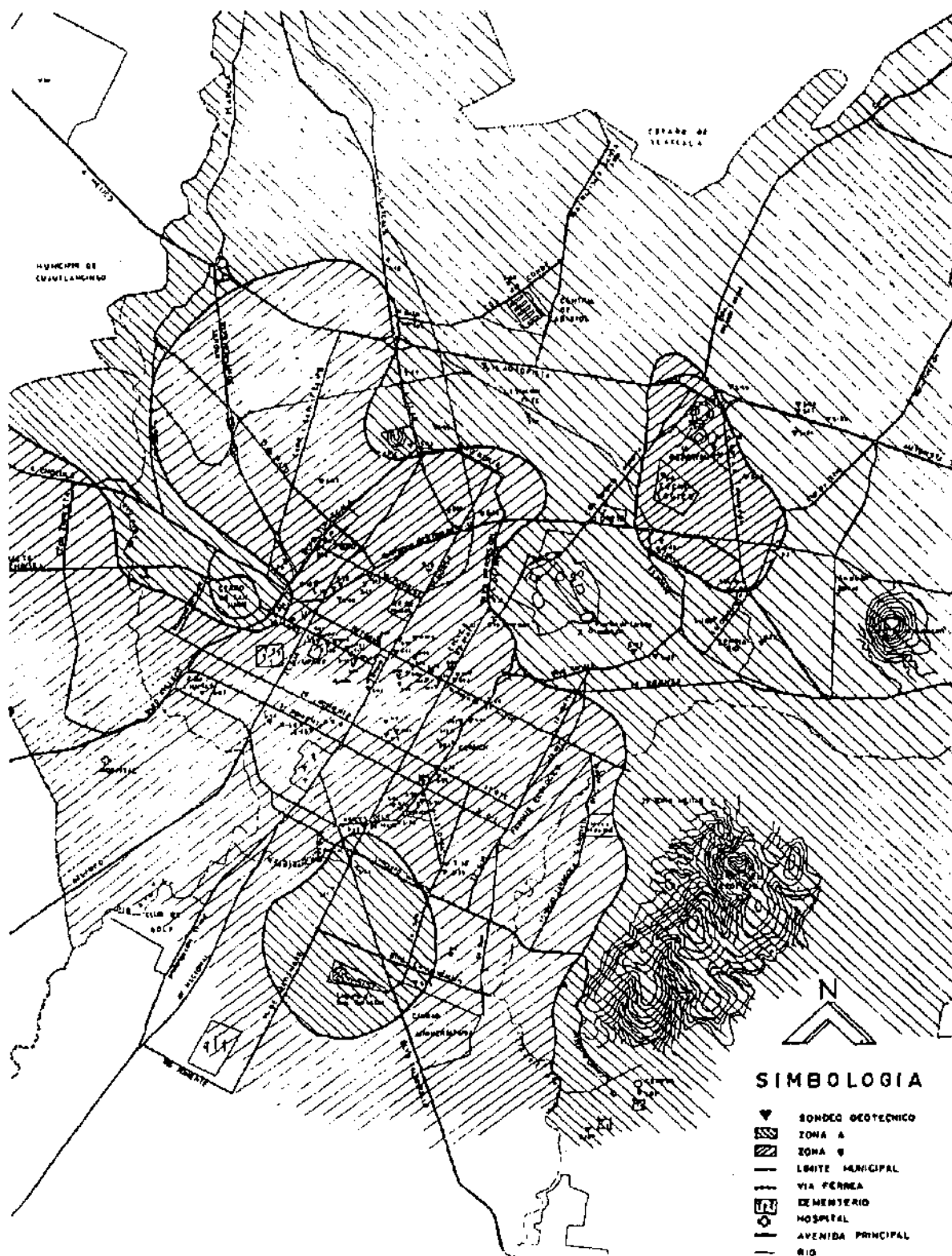


Fig. 2.33.- Mapa de zonificación para la ciudad de Puebla (C. Ruiz et. al., 1994).

3. INFORMACIÓN ACELEROGRÁFICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la información acelerográfica en la ciudad de Puebla obtenida por las tres instituciones que instalaron y están operando equipos en la ciudad. Además, se describe la información acelerográfica y sismográfica con la que se contó para el cálculo de las leyes de atenuación y se muestran las zonas sismogénicas consideradas para la ciudad.

3.2 INSTRUMENTACIÓN ACELEROGRÁFICA

En la ciudad de Puebla existen a la fecha 7 estaciones acelerográficas, las cuales son operadas por distintas instituciones. La ubicación de dichas estaciones se indica en la figura 3.1, y algunas otras características en la tabla 3.1.

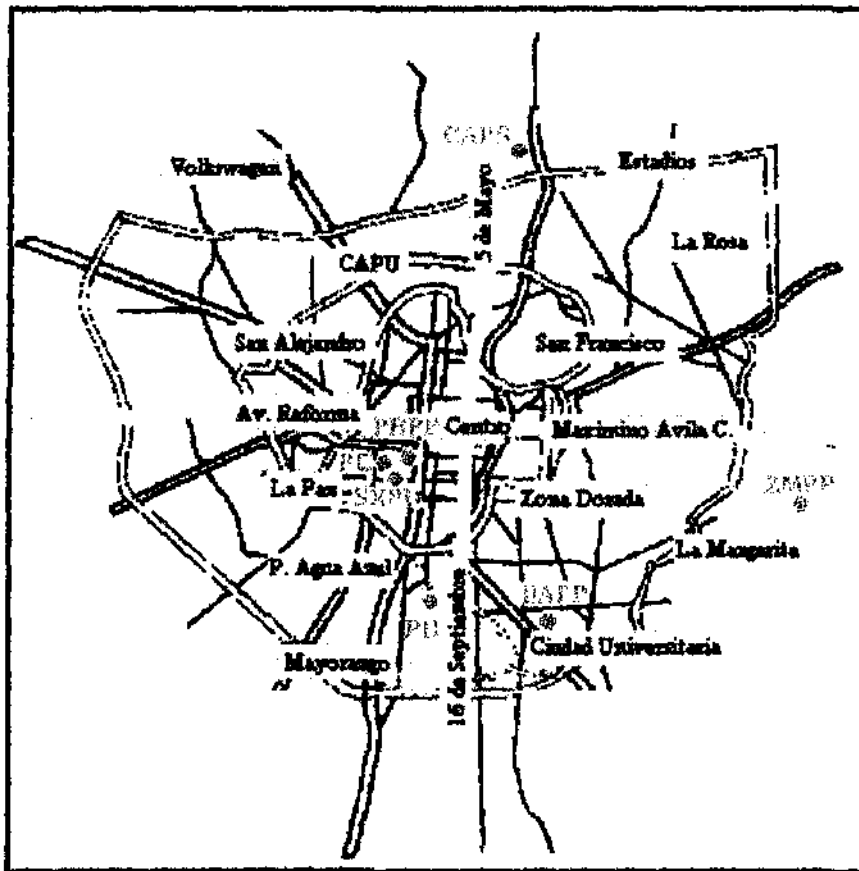


Fig. 3.1.- Localización de los acelerógrafos en la ciudad de Puebla.

El primer acelerógrafo en la ciudad de Puebla fue un DCA-310 (Fig. 3.2) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se instaló en 1978. En 1988 la BUAP instaló tres estaciones DCA-333 (Fig. 3.3) y en 1993 se pusieron en operación dos estaciones SSA-2 (Fig. 3.4) por parte de la RIIS, y otro DCA-333 por la BUAP (SMIS, 1993; 1996), (Tabla 3.2). Las características técnicas de dichos instrumentos se indica en la tabla 3.3.

Tabla 3.1.- Ubicación de las estaciones acelerográficas en la ciudad de Puebla.

Clave	Nombre	Ubicación	Tipo de suelo	Zona ¹
PC	Central	21 sur 1103, edificio central UPAEP, Col. Santiago.	Roca caliza fragmentada tipo travertino	B o II
PB	Baltazar	Calle del Lago No. 6136, Col. San Baltazar.	Arena arcillosa, roca caliza y arcilla.	A o I
SXPU	Sismex Puebla	Estacionamiento en las oficinas de CFE. de la 25 Poniente.	Travertino	B o II
PBPP	Nicolás Bravo	Parque Nicolás Bravo, 11 sur y Reforma.	Travertino con arena y limos	B o II
UAPP	U. Autónoma de Puebla	Ciudad Universitaria, BUAP. (a 20 m. de Ingeniería Civil)	Arena limosa	B o II
CAPS	Central de abastos	Central de abastos de la ciudad de Puebla.	Arena limosa con material orgánico	A o I
ZMPP	Zona militar	Zona militar de la ciudad de Puebla.	Afloramiento de toba	A o I

¹ Según ubicación en los mapas de la zonificación sísmica de la ciudad de Puebla (C. Ruiz et. al., 1994) y del reglamento de construcciones para el municipio de Puebla (AMP, 1994).

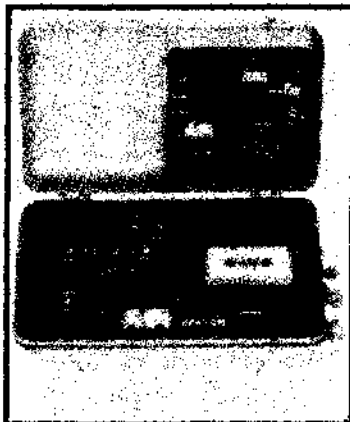


Fig. 3.2.- Acelerógrafo DCA-310 (Terra Technology)

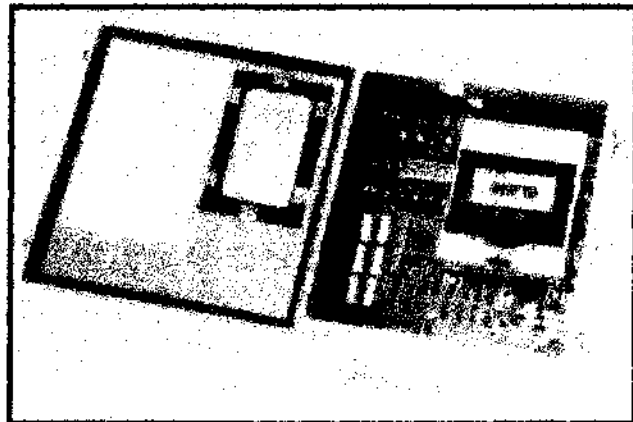


Fig. 3.3.- Acelerógrafo DCA-333 (Terra Technology)

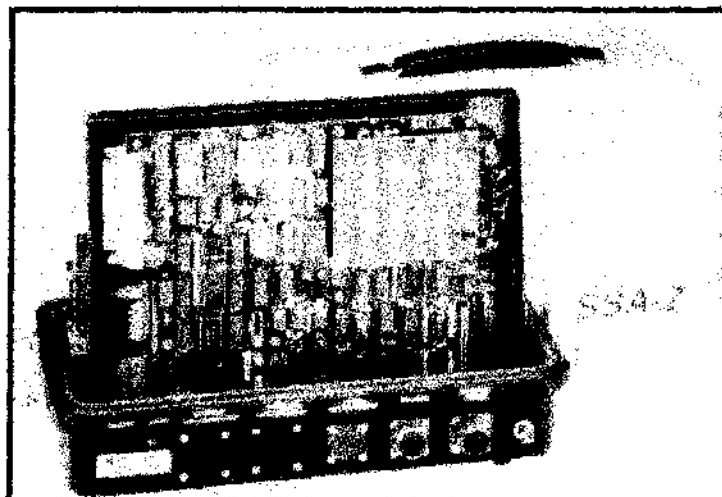


Fig. 3.4.- Acelerógrafo SSA-2 (Kinematics).

Tabla 3.2.- Modelo del acelerógrafo e institución que opera la estación.

Clave	Institución	Acelerógrafo
PC	RIIS*	SSA-2
PB	RIIS*	SSA-2
SXPU	II.+	DCA-310
PBPP	BUAP-	DCA-333
UAPP	BUAP-	DCA-333
CAPS	BUAP-	DCA-333
ZMPP	BUAP-	DCA-333

* Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica

+ Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Tabla 3.3.- Características de los acelerógrafos ubicados en la ciudad de Puebla.

Características del acelerógrafo	Modelo de la estación acelerográfica		
	DCA-310	DCA-333	SSA-2
Fabricante	Terra Technology	Terra Technology	Kinometrics
Tipo de aparato	digital electrónico	digital electrónico	digital electrónico
Medio de grabación	cinta magnética digital	cinta magnética digital	memoria de estado sólido
Rango	+/- 250 gales	+/- 250 gales	+/- 1000 gales
Frecuencia natural	30 Hz	30 Hz	50 Hz
Amortiguamiento	70 % del crítico	70 % del crítico	70 % del crítico
Frecuencia de muestreo	100 mps.	100 mps.	200 mps.
Resolución	12 bits.	12 bits.	12 bits
Capacidad de grabación	15 min.	15 min.	10 min. estándar
Memoria de pre-evento	1 a 4 seg.	1 a 4 seg.	0 a 15 seg.
Memoria post-evento	---	---	0 a 90 seg.
Umbral de disparo	omnidireccional por programa	omnidireccional por programa	Ajustable de 1 a 10 gales
Voltaje de alimentación	12 Volts.	12 Volts.	12 Volts

3.3 INFORMACIÓN ACELEROGRÁFICA DISPONIBLE

Para este trabajo se contó en total con 33 acelerogramas que corresponden a 27 sismos desde 1978 a 1996, todos ellos, registros de las estaciones PC, PB, SXPU, PBPP y UAPP. La información acelerográfica de los registros disponibles se resume en la tabla 3.4.

Los registros de las estaciones PC y PB pertenecen a la RIIS, de la cual la UPAEP forma parte. Los registros de las estaciones PBPP y UAPP fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería y los de la estación SXPU por el Instituto de Ingeniería y por el United States Geological Survey en una publicación en disco compacto (L. Seekins et. al., 1992).

Es importante señalar que de acuerdo a la clasificación del terreno en función de sus características dinámicas, se considerará como terreno firme aquél cuyo periodo esté comprendido entre 0.1 y 0.4 seg., mientras que el terreno intermedio ó transición entre los periodos de 0.4 y 1 seg. (Iglesias et. al., 1995).

Las estaciones PC, PBPP, SXPU y UAPP se encuentran dentro de la zona de transición, entre la curva de 0.7 y 0.8 seg. las tres primeras, y la última entre la curva de 0.4 y 0.5 seg. en el mapa de isoperiodos (Fig. 2.32). Por su parte la estación PB, aunque en el estudio de zonificación sísmica (C. Ruiz et. al., 1994) se ubica en zona firme, para fines de este estudio se considerará como si estuviera en zona de transición, ya que el periodo fundamental del suelo estimado ($T=0.36$ seg.) se encuentra cerca del límite de 0.4 segundos (J. R. Velázquez, 1995). En un futuro, con mayor cantidad de registros se podrá analizar el efecto de esta consideración en las leyes de atenuación. Por lo tanto, la generación de las leyes de atenuación en este estudio, está limitado a predecir intensidades espectrales correspondientes a la zona de transición.

Cabe hacer notar que se cuenta en este estudio con todos los acelerogramas registrados a la fecha en la ciudad de Puebla de las estaciones PC y PB de la RIIS, y de la estación SXPU del Instituto de Ingeniería. Se hubiera deseado ampliar la base de datos con los registros del periodo de 1993 a 1996, obtenidos en las estaciones PBPP y UAPP de la BUAP, e incluso generar leyes de atenuación para zona firme con los registros de las estaciones ZMPP y CAPS, pero desgraciadamente la BUAP no le facilitó esta información al autor debido a su política de no proporcionarla antes de su publicación (G. González Pomposo, 1996).

Las gráficas que se presentan en la figura 3.5, son los 33 acelerogramas con los que se contó en sus direcciones norte-sur (N-S) y este-oeste (E-O). Las aceleraciones en el eje de las ordenadas están en gals, (un gal equivale a un milésimo del valor de la gravedad), y en las abscisas se tiene el tiempo en segundos. La clave del registro lleva la siguiente nomenclatura: DDMAAXX

Donde:

- DD Día en el que se grabó el evento.
- M Mes. 1 a 9 de enero a septiembre y O, N y D para octubre, noviembre y diciembre.
- AA Dos últimos dígitos del año.
- XX Clave de la estación.

Tabla 3.4.- Resumen de la información acelerográfica disponible.

No.	Institución que registró	Clave del registro (DDMAAJO)	Fecha y hora (Local)	Duración del registro (seg.)	Aceleración máxima absoluta (gales)		
					N-S	VER	E-O
1	I. I. - UNAM	29N78SXPU1	29/11/78 - 13:52	40	15.240	13.850	22.130
2	I. I. - UNAM	29N78SXPU2	29/11/78 - 14:04	32	2.319	X	2.076
3	I. I. - UNAM	29N78SXPU3	29/11/78 - 14:49	82	3.905	X	3.945
4	I. I. - UNAM	14379SXPU	14/03/79 - 05:07	70	15.270	9.952	12.970
5	I. I. - UNAM	24N90SXPU	24/10/80 - 08:53	30	80.720	X	70.190
6	I. I. - UNAM	24N81SXPU	24/10/81 - 21:22	140	9.840	7.298	7.329
7	I. I. - UNAM	01784SXPU	01/07/84 - 22:50	14	8.358	2.769	3.868
8	I. I. - UNAM	10285SXPU	10/02/85 - 18:13	14	10.570	3.224	7.458
9	I. I. - UNAM	19985SXPU	19/09/85 - 07:17	86	30.380	18.110	33.440
10	I. I. - UNAM	20985SXPU	20/09/85 - 19:37	52	25.380	9.045	18.880
11a	BUAP	25489PBPP	25/04/89 - 08:29	200	9.111	5.002	6.806
11b	BUAP	25489UAPP	25/04/89 - 08:29	62	12.270	8.129	11.380
12	BUAP	02689PBPP	02/05/89 - 03:30	50	2.767	1.440	2.123
13	BUAP	30589UAPP	30/05/89 - 07:51	18	2.436	1.310	1.825
14a	BUAP	16989PBPP	16/09/89 - 17:21	16	4.577	1.982	2.435
14b	BUAP	16989UAPP	16/09/89 - 17:21	16	1.724	1.374	2.039
15	BUAP	31590PBPP	31/05/90 - 01:36	32	3.760	1.580	3.490
16	RIIS	24N93PC	24/10/93 - 01:54	24	4.019	2.549	4.533
17	RIIS	23294PB	23/02/94 - 08:15	62	6.229	2.840	6.327
18	RIIS	14394PB	14/03/94 - 14:55	72	4.287	1.477	3.053
19	RIIS	06594PC	06/05/94 - 16:11	78	4.203	2.828	5.094
20	RIIS	22594PB	22/05/94 - 19:44	78	4.039	1.783	2.877
21a	RIIS	10D94PC	10/12/94 - 10:19	94	3.397	1.850	3.826
21b	RIIS	10D94PB	10/12/94 - 10:19	84	7.620	2.344	5.873
22a	RIIS	14995PC	14/09/95 - 06:05	150	11.200	10.420	16.930
22b	RIIS	14995PB	14/09/95 - 06:05	210	25.810	9.283	26.410
23a	RIIS	09N95PC	09/10/95 - 09:38	78	2.480	1.486	2.300
23b	RIIS	09N95PB	09/10/95 - 09:38	180	4.631	1.331	3.221
24a	RIIS	20N95PC	20/10/95 - 20:40	96	2.778	1.771	3.447
24b	RIIS	20N95PB	20/10/95 - 20:40	120	4.187	1.538	2.721
25	RIIS	30N95PB	30/10/95 - 08:48	78	2.734	1.009	2.786
26	RIIS	24296PB	24/02/96 - 21:08	105	3.286	1.000	3.440
27	RIIS	25296PB	25/02/96 - 08:27	83	2.328	1.573	3.104

X No se tiene el registro de la componente.

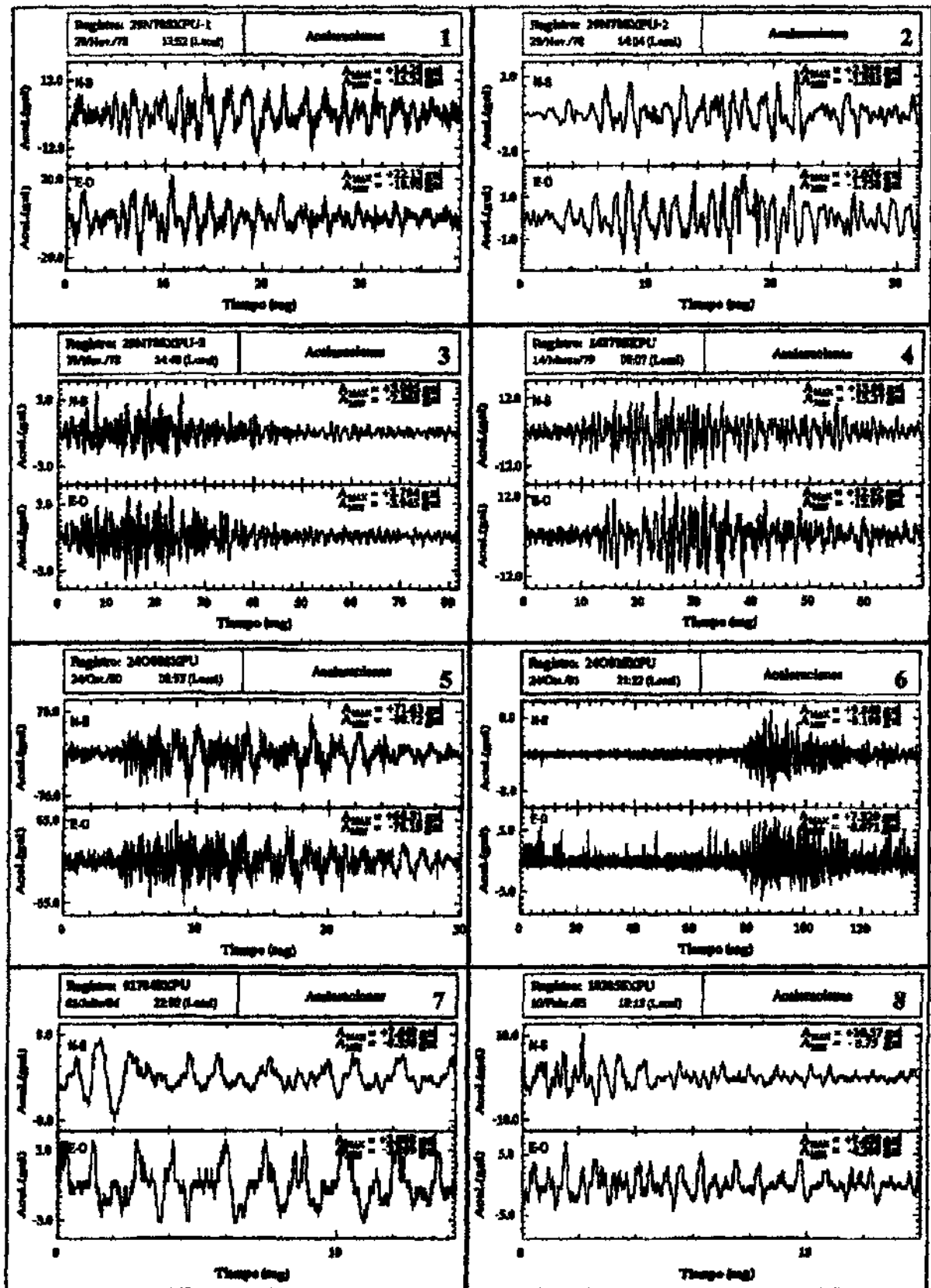


Fig. 3.5.- Acelerogramas disponibles, registrados en la ciudad de Puebla.

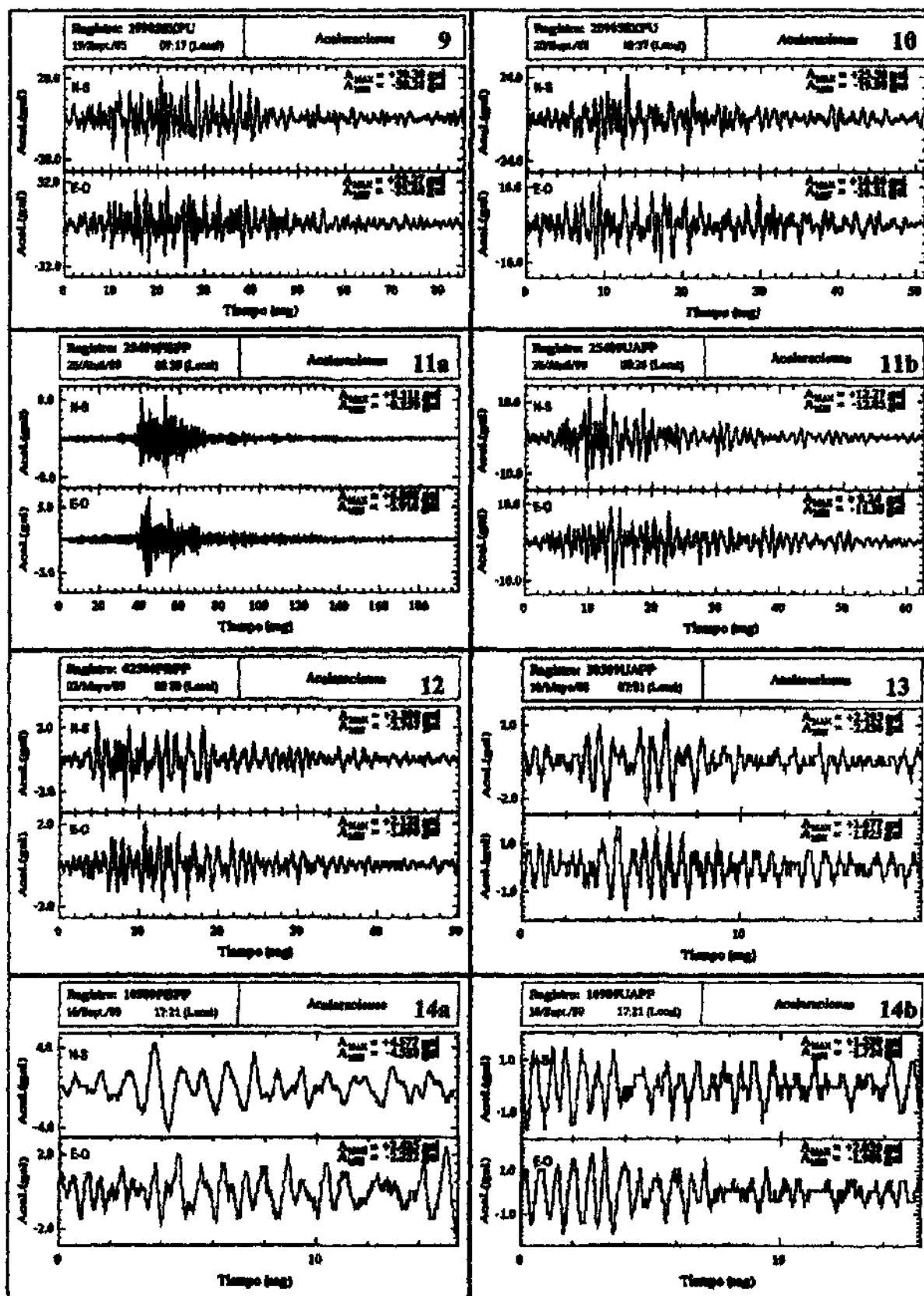


Fig. 3.5.- Acelerogramas disponibles, registrados en la ciudad de Puebla (cont.).

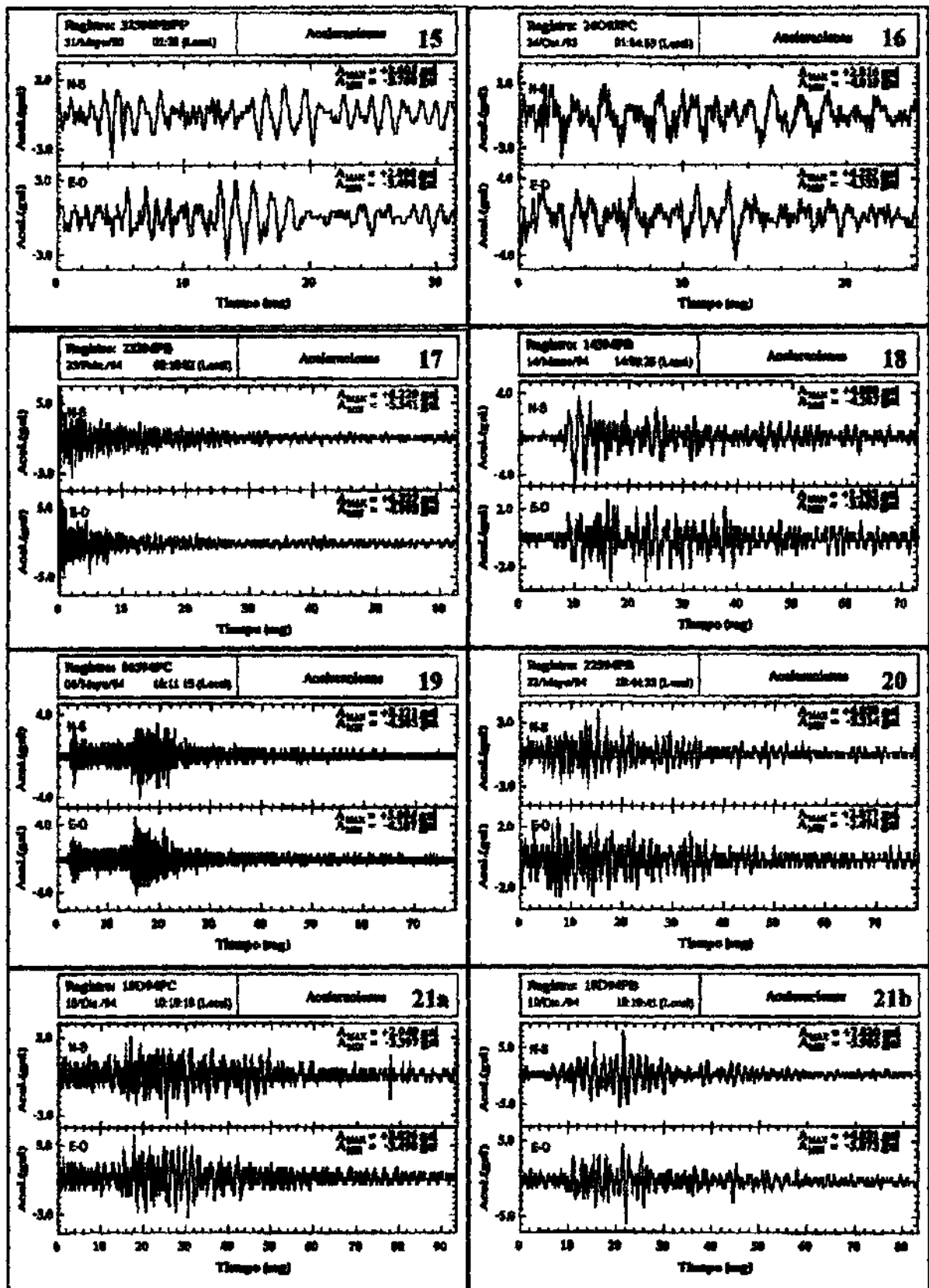


Fig. 3.5.- Acelerogramas disponibles, registrados en la ciudad de Puebla (cont.).

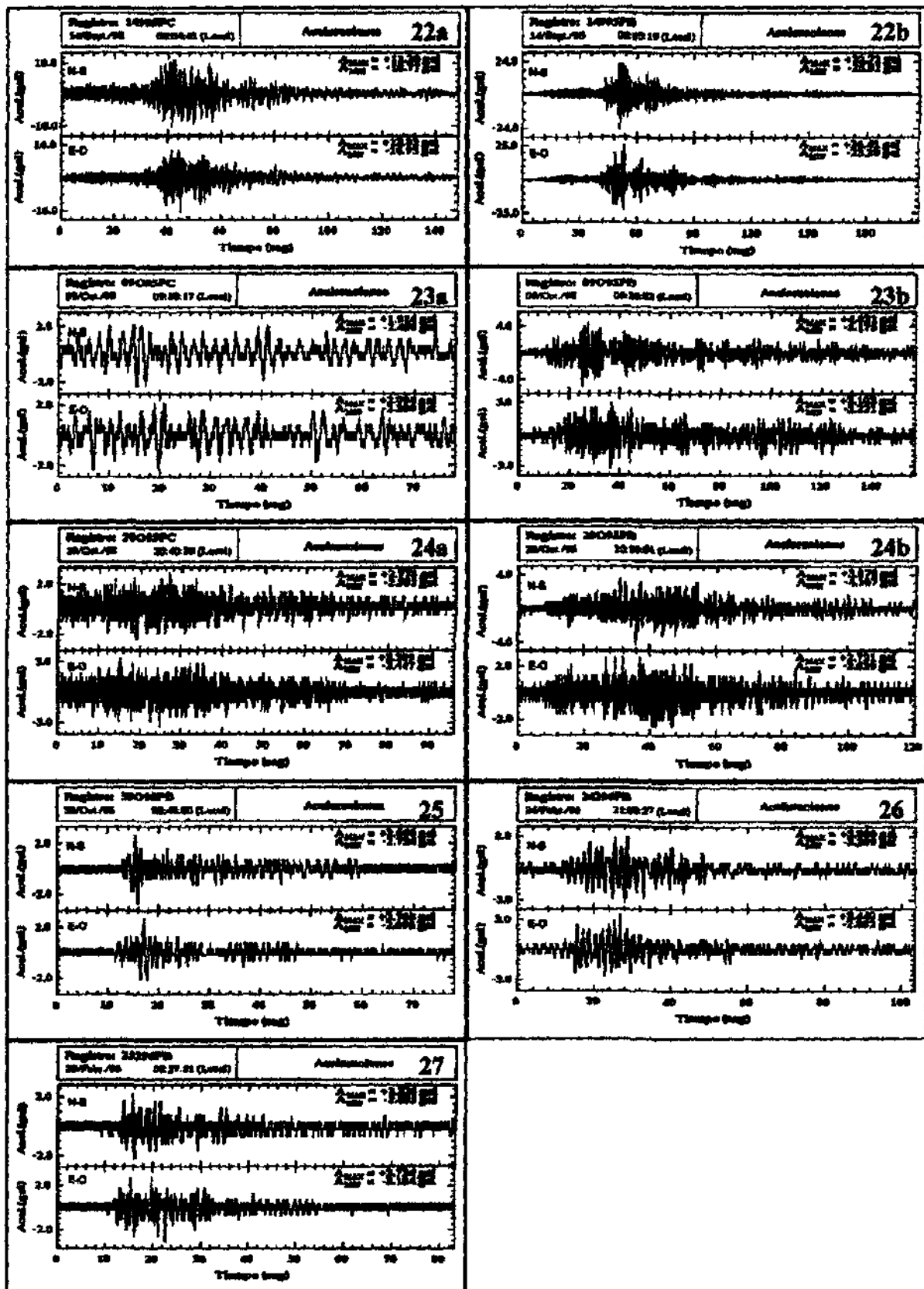


Fig. 3.5.- Acelerogramas disponibles, registrados en la ciudad de Puebla (cont.).

3.4 INFORMACIÓN SISMOLÓGICA

La información sismológica de los 27 sismos registrados se presenta en la tabla 3.5. Dicha información fue proporcionada por el Instituto de Geofísica de la UNAM, por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), por el United States Geological Survey (USGS) y por la National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER).

Tabla 3.5.- Información sismológica de los registros.

No	Fecha y hora (local)	Latitud Norte	Longitud Oeste	Prof. (km.)	Mb	Ms	Mw	Mc	M ^p	Distancia (km.)	Estación que grabó	Zona sismogénica
1	29/11/78 - 13:52	16.000	96.690	19	6.40	7.70			7.70	373	sxpu	3
2	29/11/78 - 14:04	15.740	96.830	<5	5.30				5.30	393	sxpu	3
3	29/11/78 - 14:49	15.740	96.180	<5	4.50				4.50	426	sxpu	3
4	14/03/79 - 05:07	17.490	101.260	<5	6.30	7.60			7.60	378	sxpu	2
5	24/10/80 - 08:53	18.030	98.290	7	6.40			7.00	6.40	112	sxpu	1
6	24/10/81 - 21:22	17.880	102.150	<5	6.20	7.30			7.30	453	sxpu	2
7	01/07/84 - 22:50	15.840	99.030	<5	5.90	6.00			6.00	364	sxpu	3
8	10/02/85 - 18:13	16.240	95.100	7	5.20				5.20	459	sxpu	4
9	19/09/85 - 07:17	18.081	102.942	15	6.80	8.10		8.10	8.10	533	sxpu	2
10	20/09/85 - 19:37	18.021	101.479	15	6.30	7.60		7.50	7.60	378	sxpu	2
11a	25/04/89 - 08:29	16.603	99.400	19	6.30	6.90		6.50	6.90	299	pbpp	3
11b	25/04/89 - 08:29	16.603	99.400	19	6.30	6.90		6.50	6.90	299	uapp	3
12	02/05/89 - 03:30	16.637	99.513	13	5.40	4.90		5.10	5.40	302	pbpp	3
13	30/05/89 - 07:51	17.220	94.830	12	5.10			5.20	5.10	421	uapp	4
14a	16/09/89 - 17:21	16.210	94.010	9	5.90			5.60	5.90	556	pbpp	4
14b	16/09/89 - 17:21	16.210	94.010	9	5.90			5.60	5.90	556	uapp	4
15	31/05/90 - 01:35	17.106	100.893	16	5.80	5.90		5.50	5.80	365	pbpp	2
16	24/10/93 - 01:54	16.755	98.717	21	6.30	6.70	6.70	6.50	6.70	258	pc	3
17	23/02/94 - 08:15	18.050	97.182	64	5.60		5.80		5.60	156	pb	1
18	14/03/94 - 14:55	15.994	92.428	95	5.80	6.20	6.90		6.20	718	pb	4
19	06/05/94 - 16:11	18.335	98.010	56	5.00		5.30		5.00	80	pc	1
20	22/05/94 - 19:44	18.165	100.527	29	6.00	5.60	6.30	5.60	6.00	274	pb	2
21a	10/12/94 - 10:19	18.084	101.184	67	6.30	6.30	6.60		6.30	345	pc	2
21b	10/12/94 - 10:19	18.084	101.184	67	6.30	6.30	6.60		6.30	345	pb	2
22a	14/09/95 - 08:05	16.800	98.600	21	6.40	7.2	7.5		7.20	251	pc	3
22b	14/09/95 - 08:05	16.800	98.600	21	6.40	7.2	7.5		7.20	251	pb	3
23a	09/10/95 - 09:38	19.147	104.220	16	6.50	7.3	7.6		7.30	663	pc	2
23b	09/10/95 - 09:38	19.147	104.220	16	6.50	7.3	7.6		7.30	663	pb	2
24a	20/10/95 - 20:40	16.890	93.451	120	6.20		7.3		6.20	573	pc	4
24b	20/10/95 - 20:40	16.890	93.451	120	6.20		7.3		6.20	573	pb	4
25	30/10/95 - 08:48	16.417	98.387	22	5.00	4.9			5.00	289	pb	3
26	24/02/96 - 21:08	16.204	97.963	18	5.90	6.9	7.1	5.6	6.90	313	pb	3
27	25/02/96 - 08:27	16.165	97.721	5	5.20	5.3			5.20	321	pb	3

En la tabla anterior, M' es la magnitud usada para el cálculo de las leyes de atenuación, la cual fue seleccionada tomando el siguiente criterio:

$$M' = Ms \quad (\text{si } Ms > 6) \qquad M' = Mb \quad (\text{si } Ms < 6)$$

Lo anterior es debido a que, para sismos pequeños, la magnitud calculada a partir de las ondas de cuerpo (Mb) es más representativa de la energía liberada; en cambio, para sismos moderados a grandes, la magnitud calculada a partir de las ondas de superficie (Ms) representa mejor dicha liberación de energía, ya que Mb se satura para este orden de magnitudes.

Una posibilidad que se pudo haber considerado es el estimar las magnitudes Ms (no encontradas en la tabla anterior) como función de Mb con una expresión que las relaciona (Rosenblueth, 1992).

$$Ms = 1.59 Mb - 3.97 \qquad (3.1)$$

Sin embargo, la correlación entre Mb y Ms no es del todo buena, por lo que se prefirió usar el primer criterio, el cual se consideró mejor, además ha sido muy utilizado por otros autores (Ver tabla 4.1).

Hubiera sido aún mejor calcular las leyes de atenuación teniendo como parámetro la magnitud momento (Mw), ya que es la que representa mejor a la energía liberada en un sismo, pero desafortunadamente no se contó con este parámetro en la mayoría de los eventos.

3.5 ZONAS SISMOGÉNICAS CONSIDERADAS

La localización de los 27 sismos registrados se distribuye en cuatro zonas sismogénicas que se consideran en el presente estudio (Fig. 3.6): sismos con distancia epicentral menor a 170 km. de la ciudad de Puebla cubriendo mecanismos de fallamiento local y normal (zona sismogénica 1); sismos provenientes de la subducción entre los 100 a 105° envolviendo las brechas de Colima, Michoacán y Petatlán (zona sismogénica 2); entre los 96 a 100° cubriendo las brechas de San Marcos, Ometepec, Oaxaca oeste y Oaxaca central (zona sismogénica 3); y entre los 92 a 96° de longitud oeste envolviendo las brechas de Oaxaca este y Tehuantepec (zona sismogénica 4).

Cabe hacer notar que los mecanismos considerados de los sismos en la zona sismogénica 1, son tanto normales como originados por fallas locales, no habiéndose hecho ninguna distinción debido a la escasez de registros acelerográficos provenientes de esta zona.

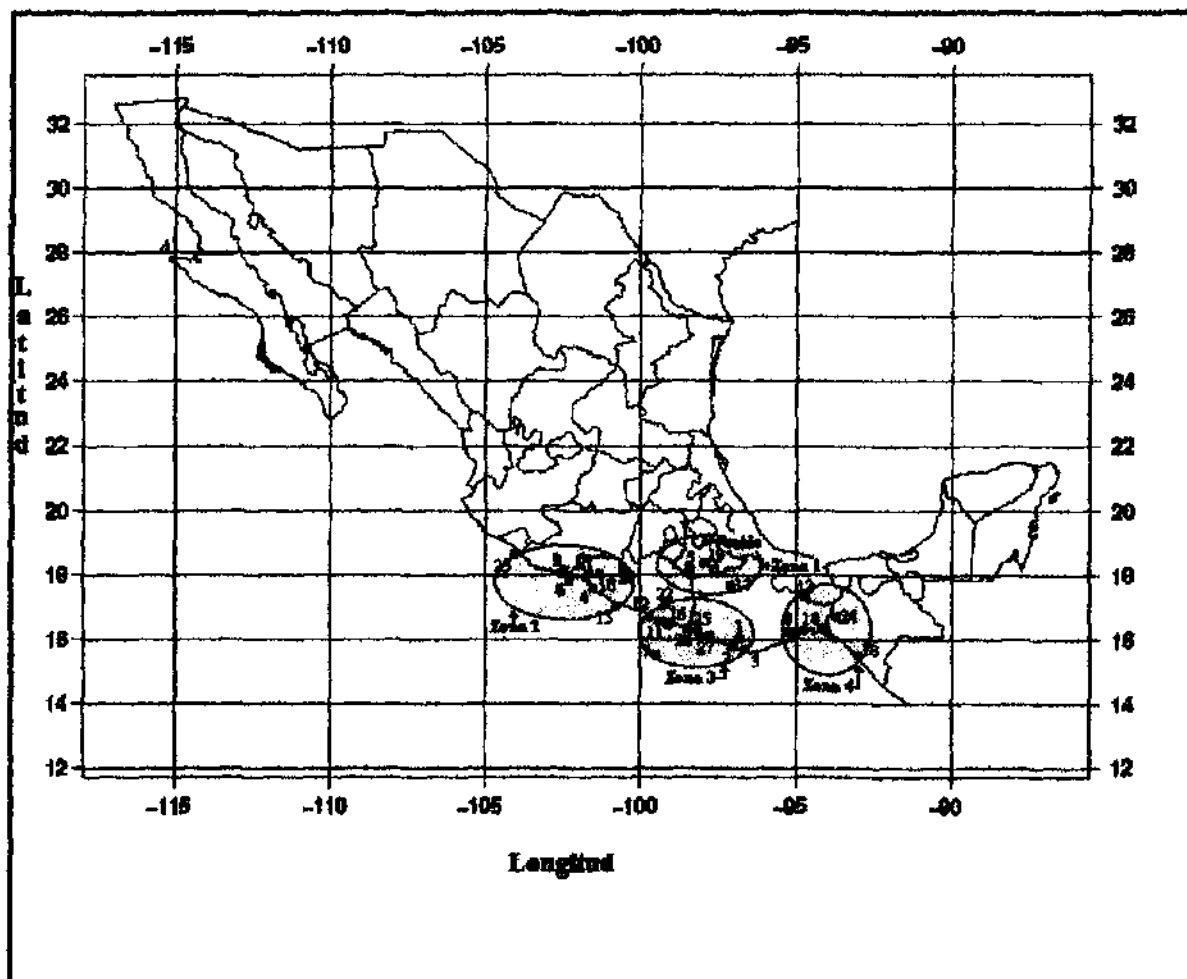


Fig. 3.6.- Localización de los sismos asociados a los acelerogramas disponibles.

3.6 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

De los registros acelerográficos, se procedió al procesamiento de la señal con el software RIISPROC (E. Sordo y A. Fernández, 1995), y se obtuvieron los acelerogramas corregidos por línea base y un filtro pasabanda (bandpass) para minimizar el ruido que pudiera tener la señal.

A partir de los acelerogramas corregidos se calculan los espectros de respuesta elásticos considerando amortiguamientos de 0, 2 y 5 % del crítico.

La solución al cálculo de la respuesta está dada por la integral de Duhamel (3-2), que proporciona el valor del desplazamiento (D) en un instante (t), (Newmark y Rosenblueth, 1976).

$$D = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) \exp\{-\xi\omega(t-\tau)\} \text{sen } \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (3-2)$$

Donde:

- D Desplazamiento (respuesta)
- ω Frecuencia circular natural
- ω_d Frecuencia circular natural amortiguada
- a Aceleración de entrada (excitación)
- t Instante para el que se calcula la respuesta
- τ Variable de tiempo entre $t=0$ y $t=\tau$
- ξ Coeficiente de amortiguamiento

La frecuencia circular natural amortiguada (ω_d) se calcula con la expresión:

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3-3)$$

El periodo como función de la frecuencia circular natural (ω) se calcula con la expresión:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3-4)$$

La velocidad y la aceleración de la masa se pueden calcular derivando sucesivamente la expresión 3-2 con respecto al tiempo.

De la ecuación 3-2 se desprende que conocida la historia de aceleraciones (a) en el tiempo, los valores de la respuesta (D) y sus derivadas dependen solamente de la frecuencia circular natural (ω) y del amortiguamiento (ξ) del sistema.

Conocidas las aceleraciones (a), es usual mantener fijo el amortiguamiento e ir calculando la respuesta espectral para distintos valores de la frecuencia circular natural (ω), o lo que es lo mismo, para distintos valores de periodo (T). Estas respuestas máximas se grafican teniendo como abscisa el valor del periodo y como ordenada la respuesta, obteniendo así el espectro de respuesta.

Los espectros de respuesta pueden ser de desplazamientos, de velocidades, de aceleraciones, de pseudo velocidades, de pseudo aceleraciones, etc. En este caso se obtuvieron los espectros de respuesta de pseudo aceleraciones mediante el software de procesamiento RIISPROC (E. Sordo y A. Fernández, 1995), que hace un análisis paso a paso y los calcula multiplicando el cuadrado de la frecuencia circular natural (ω^2) por el valor calculado en la expresión 3-2, es decir:

$$Pa = \omega^2 D \quad (3-5)$$

Las gráficas que se presentan en la figura 3.7 son los 33 espectros de respuesta elásticos de pseudo aceleraciones con 0, 2 y 5% de amortiguamiento crítico, en sus direcciones norte-sur (N00E) y este-oeste (N90E). Las pseudo aceleraciones (Pa) en el eje de las ordenadas están referidos al valor de la gravedad (g), y en las abscisas el periodo (T) está en segundos. La clave del registro también lleva la nomenclatura: DDMAAXX

El procesamiento de los registros en estaciones de la RIIS (Estación PC y PB) se puede encontrar en detalle en el "catálogo de acelerogramas de la RIIS para la ciudad de Puebla" (J. Juárez y T. Perea, 1996), donde se incluyen los acelerogramas del registro, acelerogramas corregidos y filtrados, los espectros de Fourier en escala semi-logarítmica no corregidos, los espectros de Fourier a escala natural corregidos y los espectros de respuesta de pseudo aceleraciones elásticos para periodos estructurales de 0.1 a 3.5 seg. y para 0, 2 y 5% de amortiguamiento crítico.

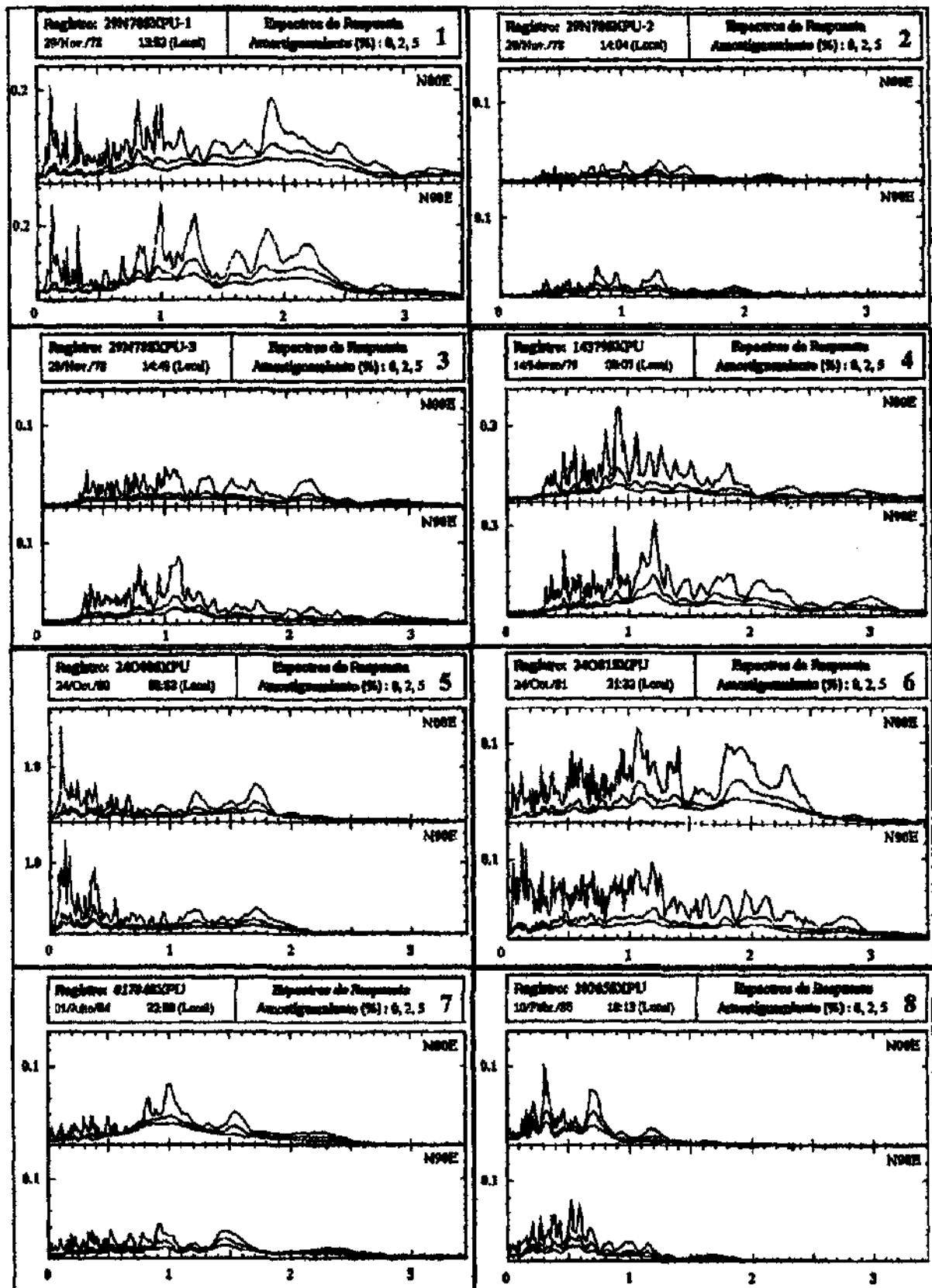


Fig. 3.7.- Espectros de respuesta elásticos para 0, 2 y 5% de amortiguamiento.

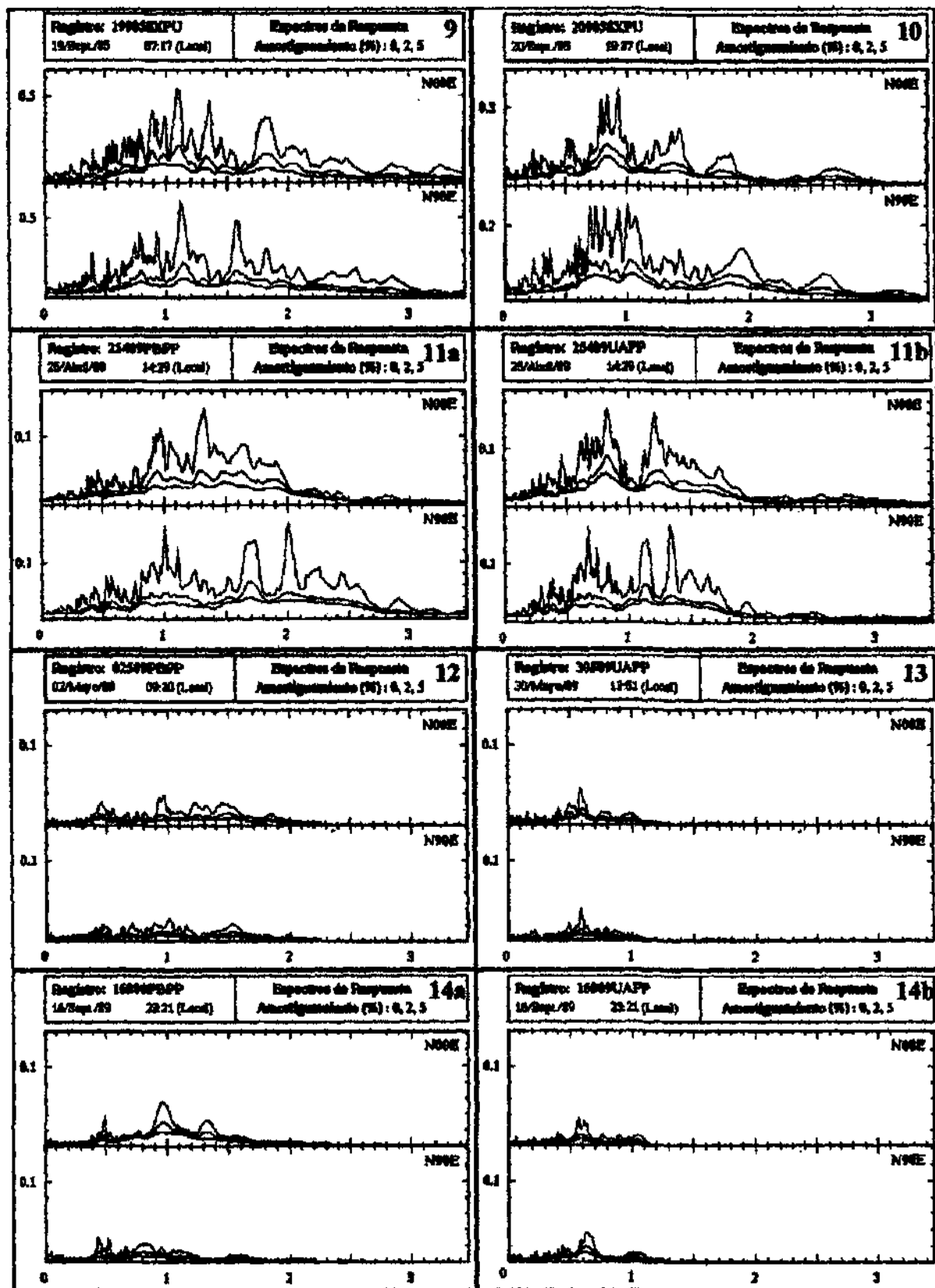


Fig. 3.7.- Espectros de respuesta elásticos para 0, 2 y 5% de amortiguamiento (cont.).

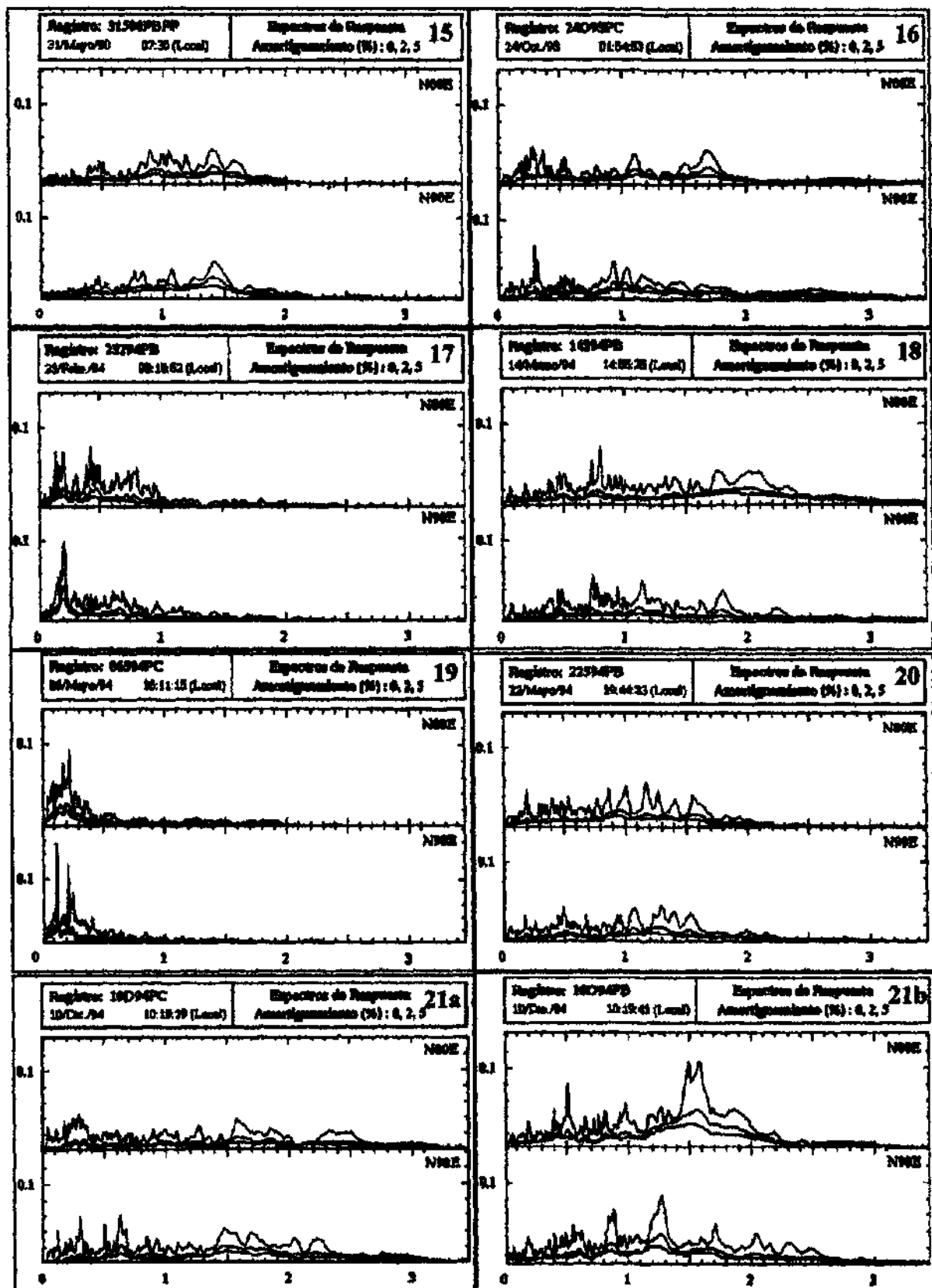


Fig. 3.7.- Espectros de respuesta elásticos para 0, 2 y 5% de amortiguamiento (cont.).

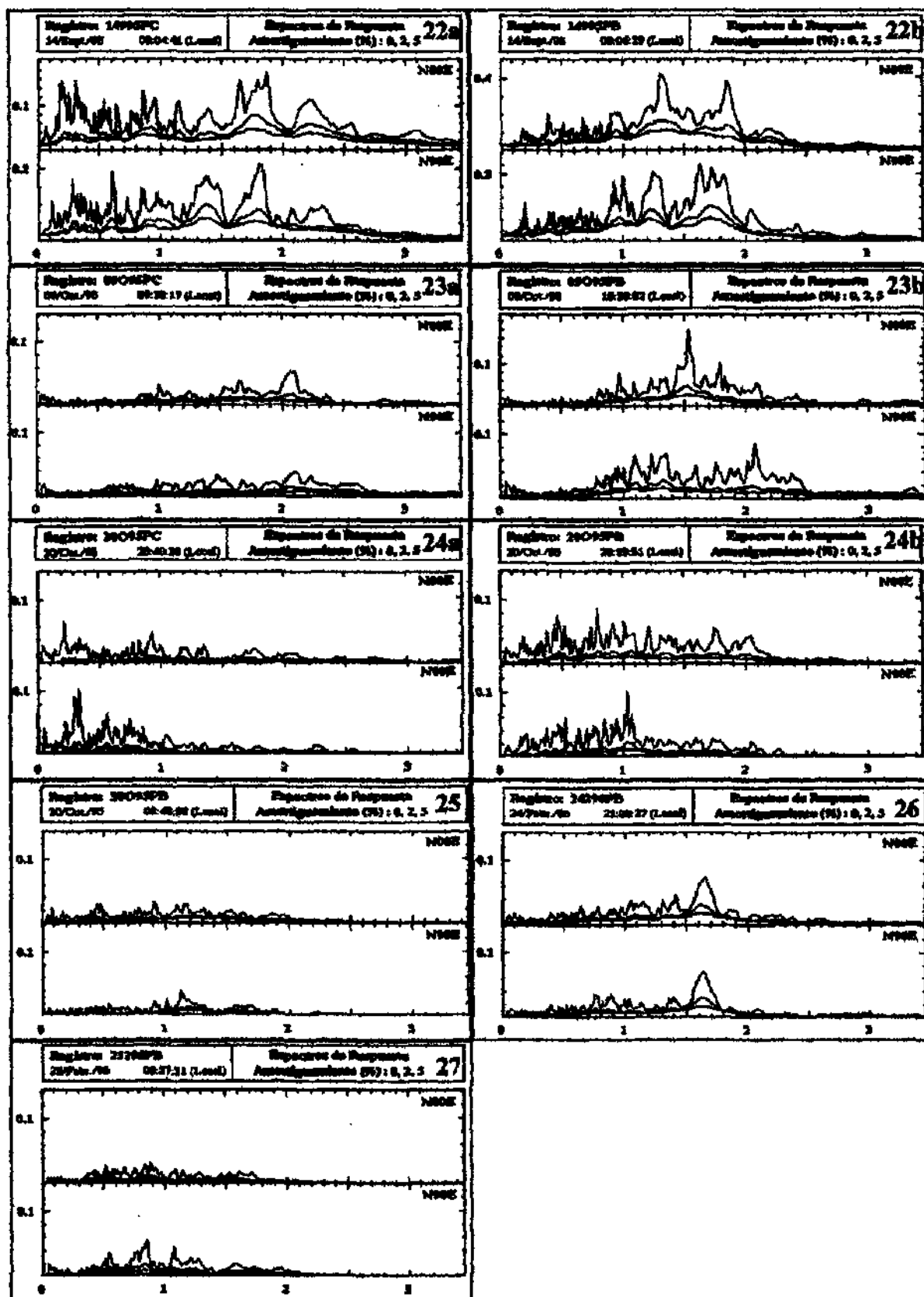


Fig. 3.7.- Espectros de respuesta elásticos para 0, 2 y 5% de amortiguamiento (cont.).

Una vez calculados todos los espectros de respuesta de los 33 registros, éstos se estudiaron para analizar las características de la respuesta estructural esperadas en la ciudad de Puebla en la zona de transición. Cabe mencionar que sólo se estudiaron los espectros de respuesta con 5% de amortiguamiento y para los canales norte-sur y este-oeste.

Primero se graficó la respuesta espectral de los registros por estaciones, para observar las características y la variación de los espectros en cada una y se pudo notar que existen algunas variaciones morfológicas entre ellos (Figs. 3.8 a 3.12).

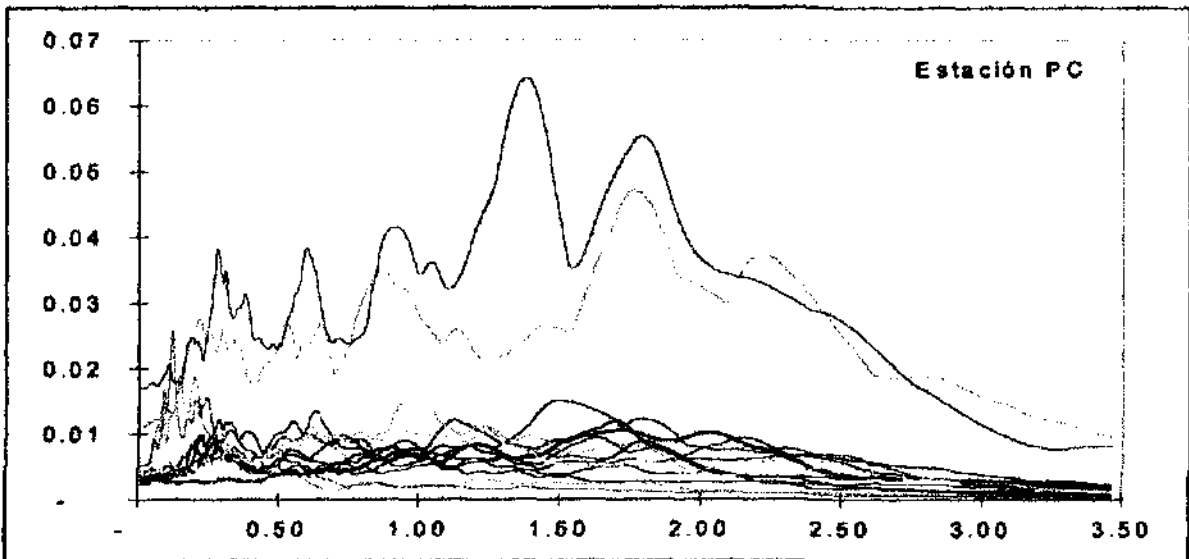


Fig. 3.8.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas grabados en la estación PC y corresponden a los registros 16, 19, 21a, 22a, 23a y 24a.

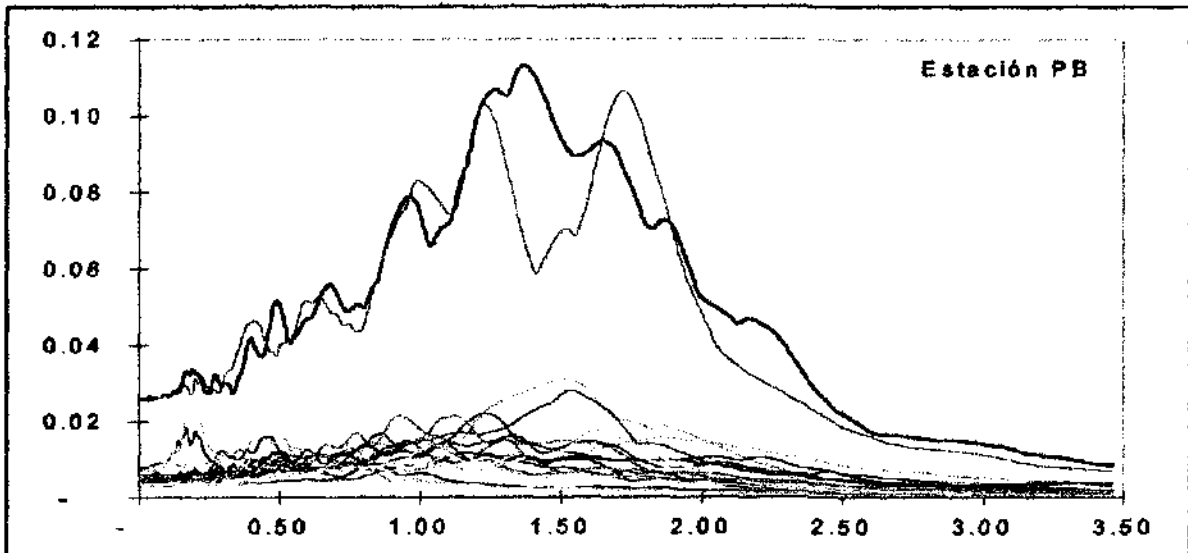


Fig. 3.9.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Los espectros son calculados a partir de los acelerogramas grabados en la estación PB y corresponden a los registros 17, 18, 20, 21b, 22b, 23b, 24b, 25, 26 y 27.

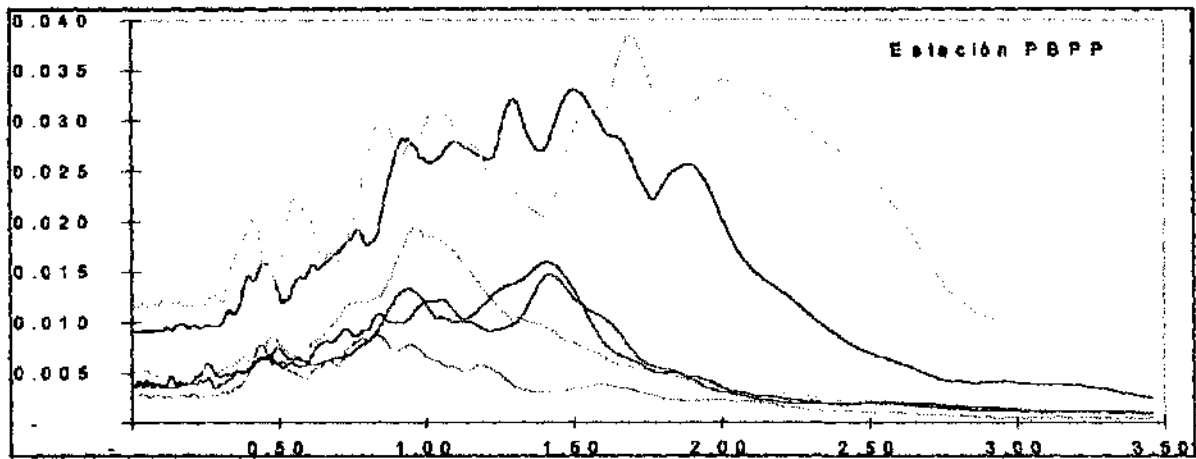


Fig. 3.10.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas grabados en la estación PBPP y corresponden a los registros número 11a, 12, 14a y 15.

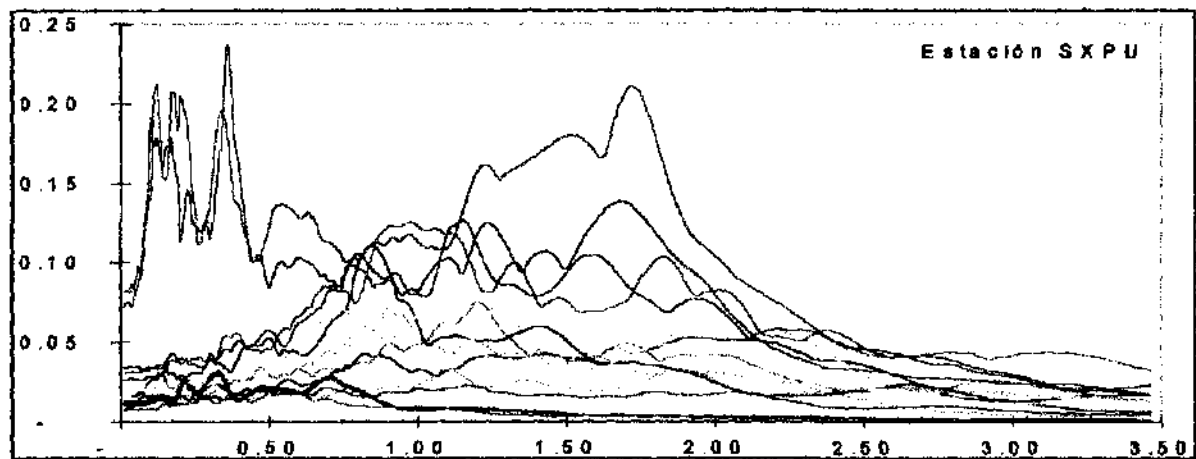


Fig. 3.11.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas grabados en la estación SXPU y corresponden a los registros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

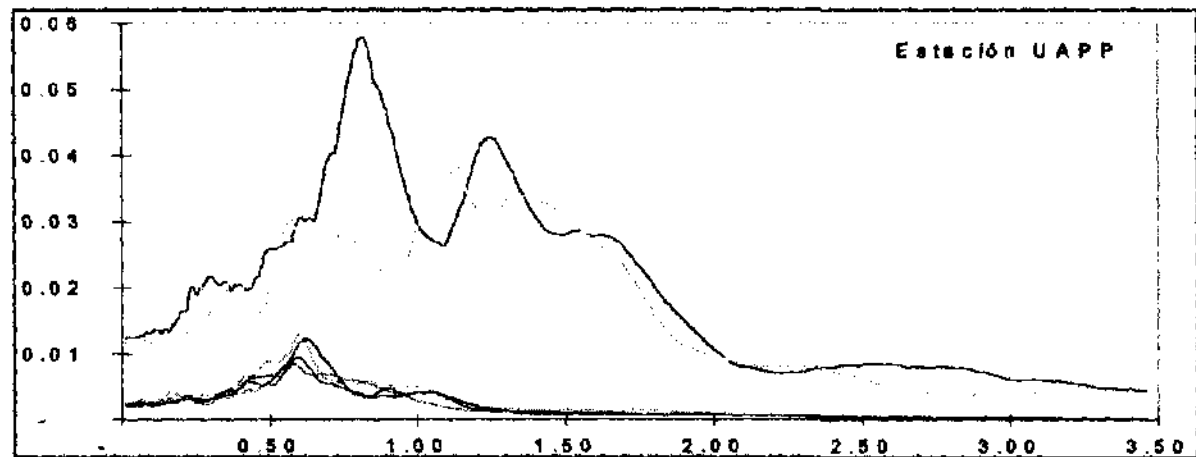


Fig. 3.12.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas grabados en la estación UAPP y corresponden a los registros número 11b, 13 y 14b.

En seguida se grafican los espectros de respuesta para diferentes intervalos de magnitud del sismo, sin importar en que estación se grabó el registro. En este caso fue muy notable la variación en la forma de respuestas espectrales en el intervalo de magnitudes entre 4.5 y 6.8 (Fig. 3.13); no así el intervalo para magnitudes de 6.9 a 8.1 (Fig. 3.14), en el que todos los espectros están asociados a los acelerogramas de sismos cuyos epicentros están ubicados dentro de las zonas 2 y 3, las cuales son de un mecanismo similar.

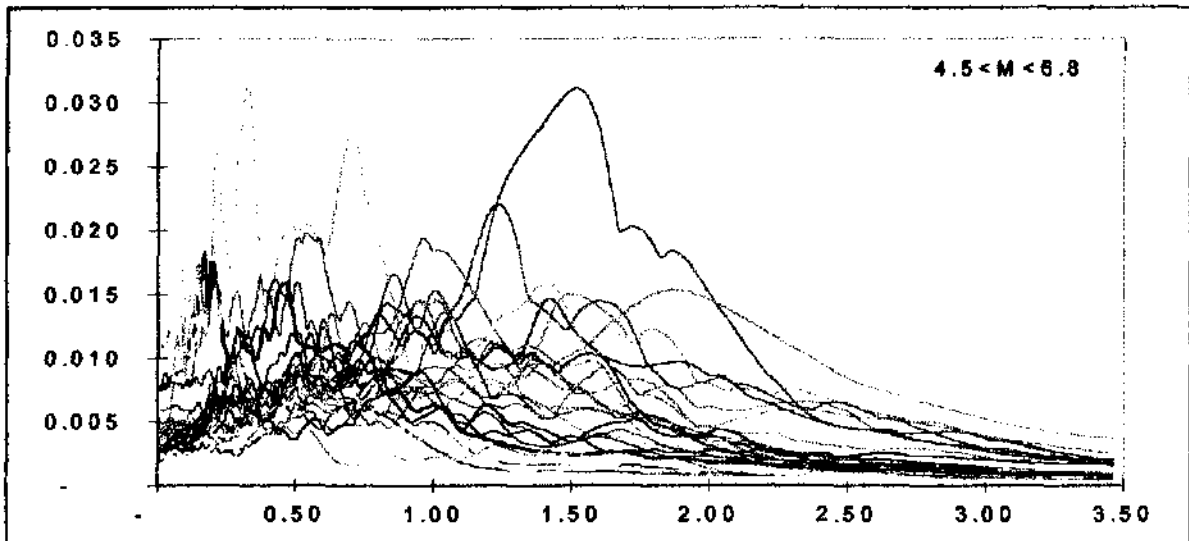


Fig. 3.13.- Espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuya magnitud (M') estuvo entre 4.5 a 6.8 grados. Estos sismos son los que corresponden a los registros número 2, 3, 7, 8, 12, 13, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21a, 21b, 24a, 24b, 25 y 27.

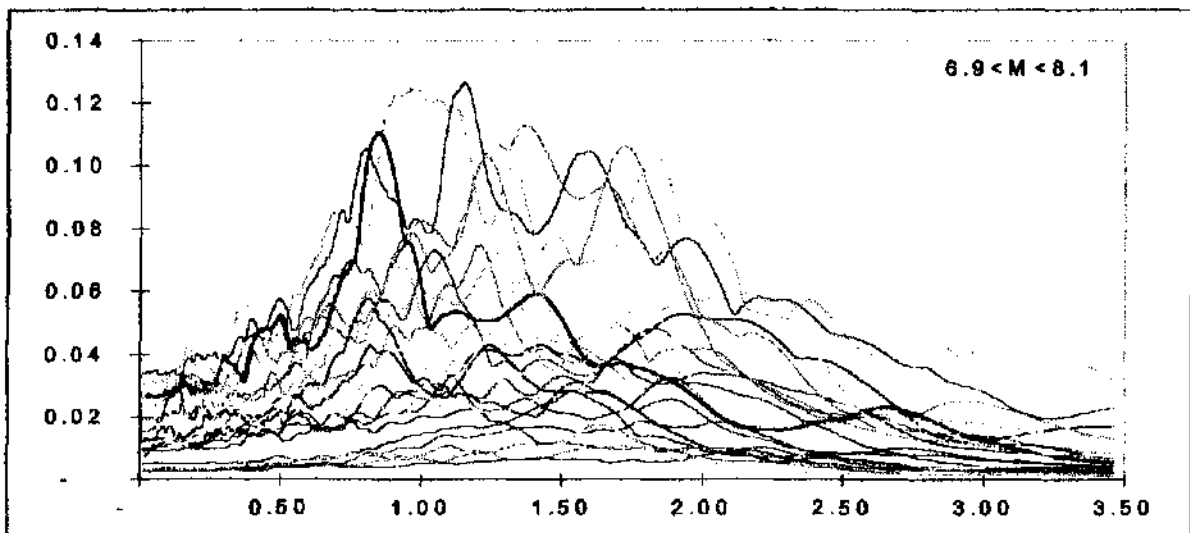


Fig. 3.14.- Espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuya magnitud (M') estuvo entre 6.9 a 8.1 grados. Estos sismos son los que corresponden a los registros número 1, 4, 6, 9, 10, 11a, 11b, 22a, 22b, 23a, 23b y 26.

Finalmente se grafican las respuestas espectrales para las diferentes zonas sismogénicas consideradas (Fig. 3.6). Se puede ver en este caso una mayor similitud en las amplitudes espectrales, y aunque se siguen observando variaciones apreciables entre espectros, su forma es más similar que en los otros tipos de gráficos (Figs. 3.15 a 3.18).

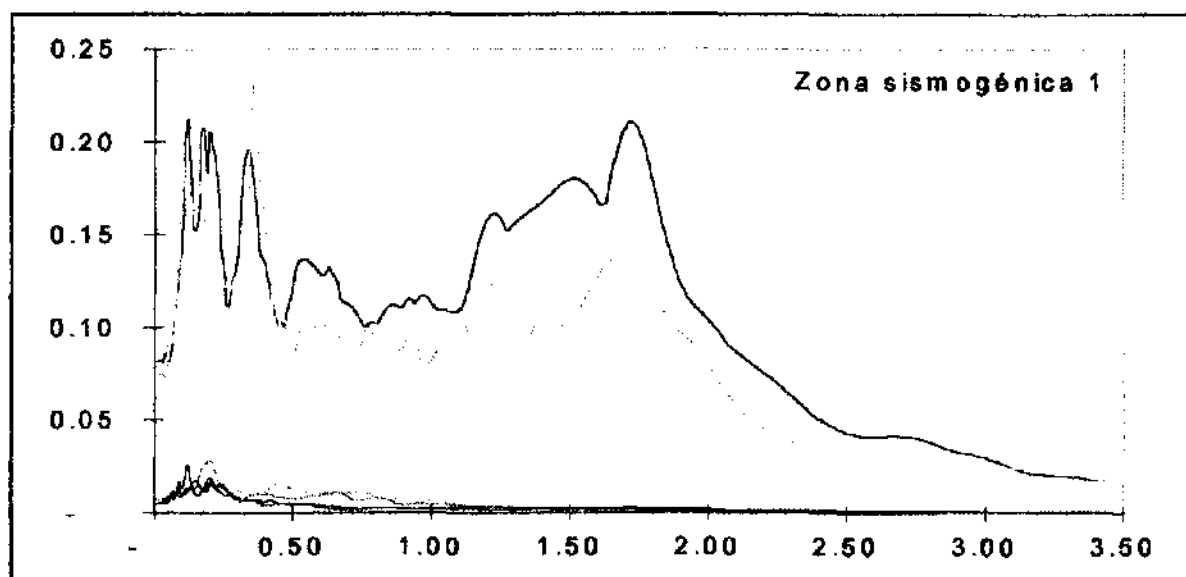


Fig. 3.15.- Espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuyo epicentro estuvo dentro de la zona sismogénica 1, es decir, para los sismos que se presentan a una distancia menor de 170 km. de Puebla. Estos corresponden a los registros número 5, 17 y 19.

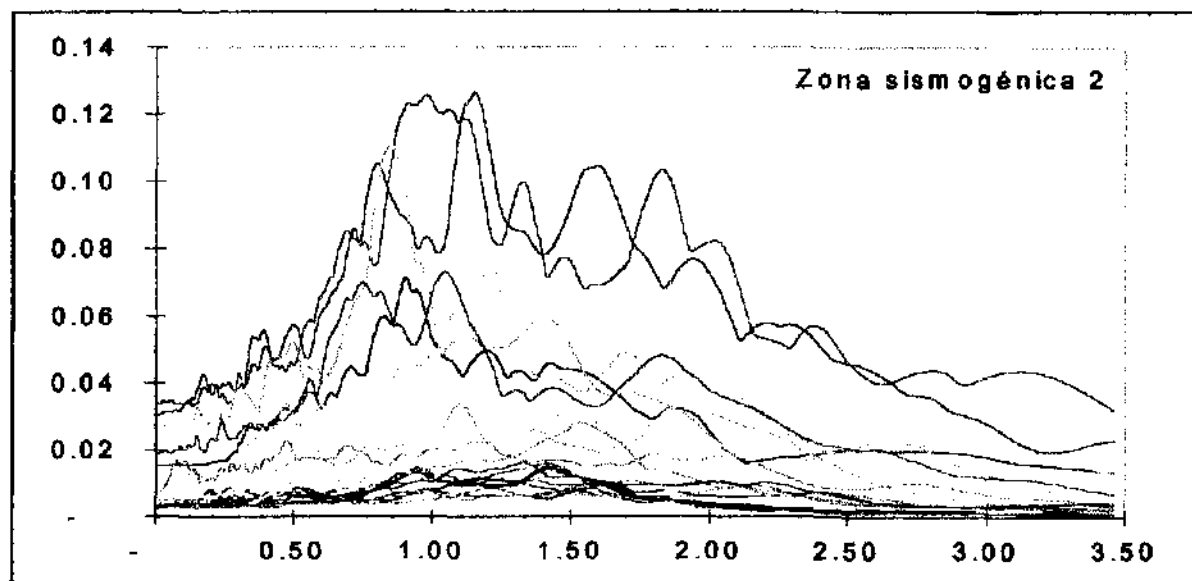


Fig. 3.16.- Espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuyo epicentro estuvo dentro de la zona sismogénica 2, es decir, para los sismos que se presentan en las brechas de Colima, Michoacán y Petatlán. Estos corresponden a los registros número 4, 6, 9, 10, 15, 20, 21a, 21b, 23a y 23b.

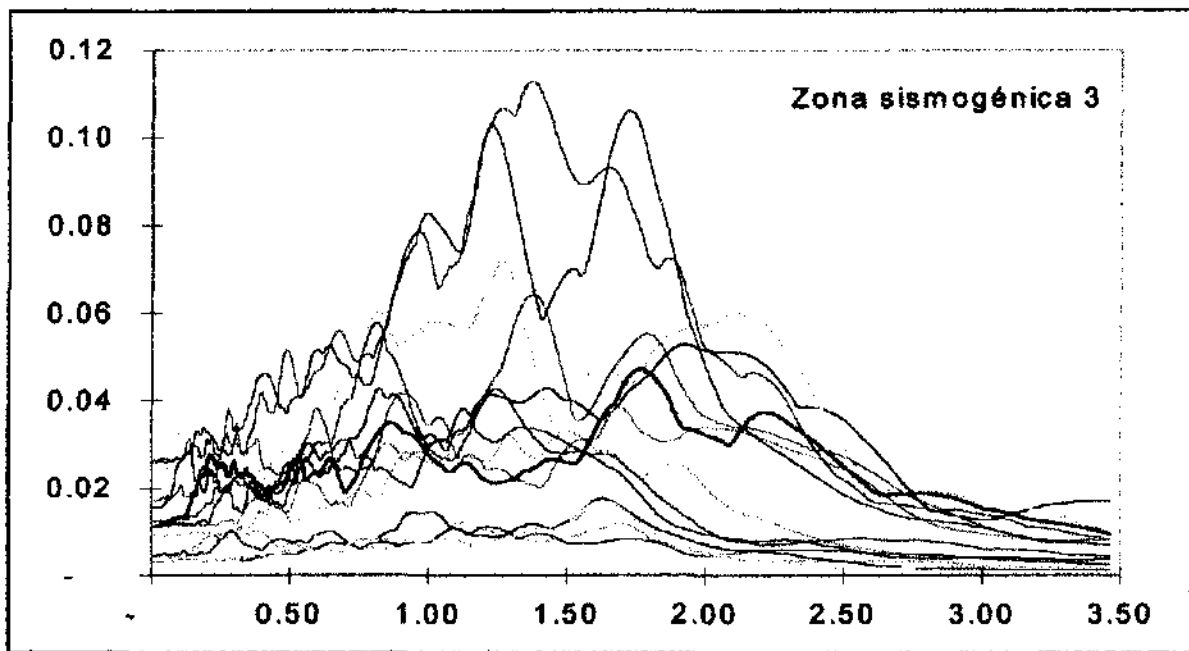


Fig. 3.17.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuyo epicentro estuvo dentro de la zona sismogénica 3, es decir, para los sismos que se presentan por las brechas de San Marcos, Ometepec, Oaxaca este y Oaxaca central. Estos corresponden a los registros número 1, 2, 3, 7, 11a, 11b, 12, 16, 22a, 22b, 25, 26 y 27.

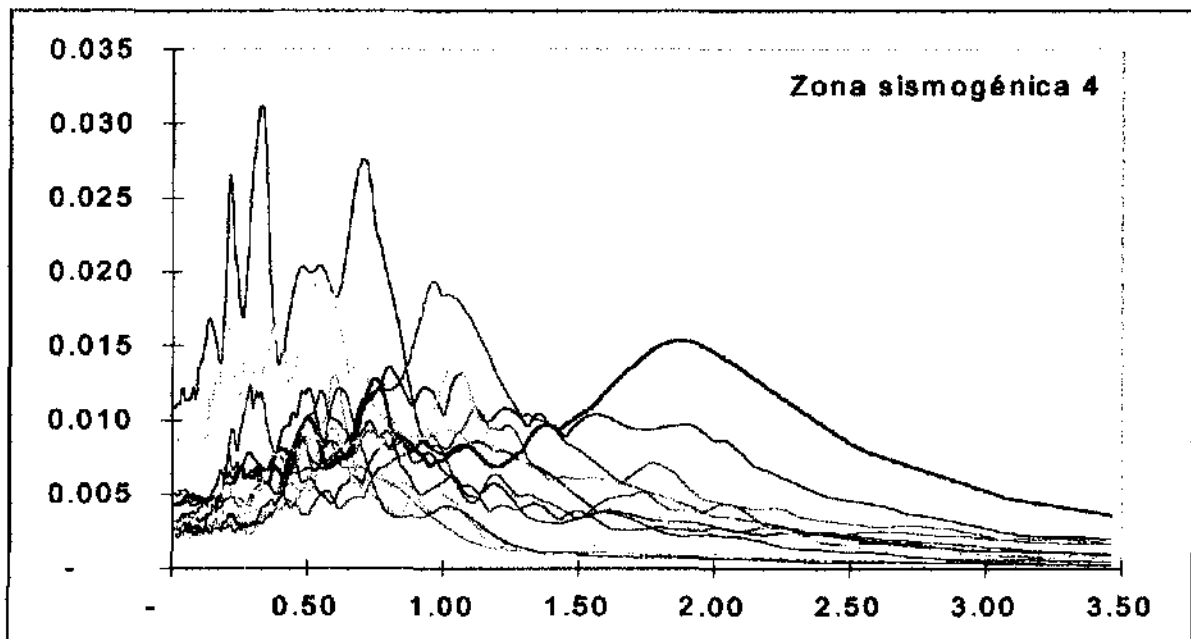


Fig. 3.18.- Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleraciones con 5% de amortiguamiento. Todos los espectros son los calculados a partir de los acelerogramas asociados a los sismos cuyo epicentro estuvo dentro de la zona sismogénica 4, es decir, para los sismos que se presentan por las brechas de Oaxaca este y Tehuantepec. Estos corresponden a los registros número 8, 13, 14a, 14b, 18, 24a y 24b.

Debido al comportamiento espectral observado, se propuso la obtención de las leyes de atenuación por separado para las zonas sismogénicas 1, 2, 3 y 4, así como también de las leyes de atenuación de las zonas 2 y 3 considerándolas juntas, por ser ambas zonas de mecanismo similar, cubriendo las brechas desde Colima hasta Oaxaca central.

La máxima intensidad espectral en la ciudad de Puebla asociada a registros de sismos, ha sido de 0.24g., la cual corresponde al sismo de Huajuapán (24/Oct/80) cuyo epicentro se ubica dentro de la zona sismogénica 1 (Fig. 3.15). Estudios de sismicidad histórica realizados por Figueroa (1974) muestran que los mayores daños en la ciudad provocados por sismos se han presentado dentro de esta zona.

Ordenadas espectrales similares se han presentado por registros de sismos provenientes de las zonas 2 y 3 (Figs. 3.16 y 3.17), en donde las máximas intensidades corresponden a los sismos de Michoacán (19/Sept/1985) y de Ometepec (14/Sept/1995) respectivamente. Estudios de sismicidad histórica realizados (Figueroa, 1974) muestran pocos daños producidos en la ciudad de Puebla por sismos originados en esta zona de mecanismo similar.

Como se observa en la figura 3.18, la máxima ordenada espectral en la ciudad de Puebla asociada a registros de sismos de la zona 4 ha sido de 0.032g.; no obstante que se incluyen los asociados al sismo de Villaflores (20/Oct/95) en el que la estación XC de la RIIS de Tuxtla Gutiérrez registró una aceleración máxima de 442 gales, mientras que en Puebla ésta fue de 4.2 gales en la estación PB y de 3.4 gales en la estación PC (Sordo et. al, 1996). Por su parte, estudios de sismicidad histórica (Figueroa, 1974) señalan la ausencia de sismos históricos de la zona que hayan generado daños en la ciudad de Puebla.

Por lo anterior, el peligro sísmico para la ciudad de Puebla, tanto por las ordenadas espectrales observadas como por los estudios de sismicidad histórica, proviene principalmente de la zona sismogénica 1, seguido en cuanto a peligro de las zonas 2 y 3. Por su parte, el peligro sísmico de la zona sismogénica 4, con la información conocida hasta el momento, indica que es poco significativo para la ciudad de Puebla.

4. LEYES DE ATENUACIÓN PARA LA CIUDAD DE PUEBLA

4.1 INTRODUCCIÓN

Es evidente que sismos con diferentes magnitudes producen diferentes aceleraciones en un mismo sitio; así también, terremotos con iguales magnitudes pueden producir diferentes aceleraciones a diferentes distancias. Sin embargo, las aceleraciones no sólo son afectadas por la magnitud y la distancia, sino también por otros factores como el contenido energético de cada evento, las propiedades del medio por donde se propagan las ondas sísmicas, las propiedades locales del suelo en el sitio y la topografía. Práctica común para predecir intensidades, sigue siendo aún utilizar curvas de atenuación promedio obtenidas del análisis estadístico de los catálogos de eventos disponibles, aún cuando sean de regiones alejadas al punto de interés. Lo anterior es justificable cuando no existe, o es escasa, la información de registros intensos en la zona de estudio.

En este capítulo se presentan los resultados del cálculo de leyes de atenuación propias para la ciudad de Puebla, con base en 33 espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones asociados a los acelerogramas disponibles, registrados en la ciudad.

Las leyes de atenuación son modelos matemáticos, los cuales pueden estimar la intensidad que produce un sismo en un lugar determinado, asociada a una zona sismogénica específica, si se conoce la magnitud y la localización del evento sísmico. Esta intensidad puede ser la ordenada espectral de pseudoaceleraciones, pseudovelocidades, aceleraciones, velocidades, desplazamientos, intensidad de Mercalli, o bien valores máximos de ellas. Las leyes de atenuación permiten calcular la intensidad esperada y predecir movimientos fuertes del terreno para diversos escenarios.

4.2 LEYES DE ATENUACIÓN EXISTENTES

En la mayoría de los estudios de riesgo sísmico hechos en México, se han utilizado leyes de atenuación derivadas de catálogos de registros que no siempre corresponden al sitio de estudio. Algunos se limitan a describir sólo la atenuación de la aceleración máxima del terreno, que por sí sola carece de correlación significativa con el comportamiento estructural. Otros más, usan leyes de atenuación de otros sitios y las adoptan como leyes de atenuación generales. Las anteriores consideraciones pueden conducir a resultados poco confiables para la predicción de los efectos de un sismo. Un resumen de algunas de las relaciones de leyes de atenuación recopiladas y actualizadas (B. Mohraz y F. E. Elghadamsi, 1989) son mostradas en la tabla 4.1.

Un primer intento en México para generar leyes de atenuación para una localidad específica, basadas en espectros de respuesta de sismos fuertes registrados en el sitio de estudio, fue llevado a cabo recientemente por Carballo (1994). La metodología que se usa en esta referencia se basa en el ajuste, mediante la regresión estadística de los espectros obtenidos de cinco registros locales, a un modelo matemático ampliamente utilizado en trabajos previos (Campbell, 1985; EERI, 1989; McGuire, 1976; Trigos, 1988 y Esteva, 1970).

En este trabajo, se calculan leyes de atenuación propias para la ciudad de Puebla, utilizando esencialmente la metodología seguida por Carballo (1994), con algunas modificaciones. Estas leyes de atenuación están basadas en los espectros de respuesta elásticos asociados a registros obtenidos en suelo moderadamente blando de la ciudad de Puebla.

Tabla 4.1.- Leyes de atenuación propuestas por varios autores (B. Mohraz y F. E. Elghadamsi, 1989).

FUENTE	LEY DE ATENUACION	AUTOR
Sismo de San Fernando 9/Feb/1971	$a = \frac{190}{R^{1.83}}$	Donovan
Sismos de California	$a = \frac{Y_0}{1 + \left(\frac{R'}{h}\right)^2}$ $Y_0 = -(b + 3) + 0.81M - 0.027M^2$ b = factor de sitio	Blume
Sismos de Japón y California	$a = \frac{0.0051}{\sqrt{T_g}} 10^{(0.61M - P \log R + Q)}$ $P = 1.66 + \frac{3.60}{R}$ $Q = 0.167 - \frac{1.83}{R}$ T _g = Periodo fundamental del suelo.	Kanai
Cloud (1963)	$a = \frac{0.0069e^{1.64M}}{1.1e^{1.1M} + R^2}$	Milne y Davenport
Cloud (1963)	$a = 1.254e^{0.8M} / (R + 25)^2$	L. Esteva
U.S.C. & G.S.	$\text{Log}(a) = \frac{65 - 2\text{Log}(R' + 80)}{981}$	Cloud y Pérez
303 valores instrumentales	$a = \frac{1.325e^{0.67M}}{(R + 25)^{1.6}}$	Donovan
Registros del oeste de USA.	$a = \frac{0.0193e^{0.8M}}{(R^2 + 400)}$	Donovan
USA, Japón, etc.	$a = \frac{1.35e^{0.36M}}{(R + 25)^{1.52}}$	Donovan
Registros del oeste de USA, de Rusia e Irán.	$\text{Ln}(a) = 3.99 + 1.28M - 1.75\text{Ln}(R + 0.147e^{0.772M})$ M=Ms para magnitudes > 6 M=Mb para magnitudes < 6	Campbell
Registros de USA y de otras partes del mundo.	$\text{Log}(a) = -1.02 + 0.249M - \text{Log}(R^2 + 73^2)^{1/2} - 0.00255(R^2 + 73^2)^{1/2}$ M=Mw (magnitud momento)	Joyner and Boore
Registros del oeste de USA.	$\text{Ln}(a) = \text{Ln}\alpha(M) - \beta(M)\text{Ln}(R + 20)$ M=Ms para magnitudes > 6 M=Mb para magnitudes < 6 R = más cercana a la ruptura si M > 6 R = hipocentral si M < 6 $\alpha(M), \beta(M)$ Coeficientes que dependen de M	Idriss
Grabaciones de Italia	$\text{Log}(a) = -1.562 + 0.306M - \text{Log}(R^2 + 5.8^2)^{1/2} + 0.169S$ S=1 para sitios muy blandos S=0 para roca.	Sabetta y Pugliese
* Chilpancingo, Gro., México.	$\text{Ln}(a) = c1 + c2M + c3\text{Ln}(R + 25)$ c1, c2, c3 = f (periodo estructural)	J. Carballo

* Dato agregado por el autor.

Donde:

a = aceleraciones en unidades de gravedad "g".

R = distancia epicentral en kilómetros.

R' = distancia epicentral en millas

h = profundidad local en millas.

M = magnitud.

4.3 MODELO MATEMÁTICO SELECCIONADO

Como ya se mencionó, las leyes de atenuación permiten estimar la intensidad de un sismo asociada a los parámetros de la fuente. A continuación se presentan los modelos matemáticos comúnmente usados para el cálculo de leyes de atenuación: (M. K. Yegian, 1979)

Ley de atenuación para pseudoaceleraciones espectrales:

$$Pa = a_1 e^{a_2 M} (R + 25)^{-a_3} \tag{4-1}$$

Ley de atenuación para intensidades:

$$I_{sitio} = c_1 + c_2 I_0 - c_3 \ln \Delta \tag{4-2}$$

Ley de atenuación para velocidades espectrales:

$$Sv = a 10^{bM} (R + 25)^{-c} \tag{4-3}$$

Ley de atenuación para espectros de Fourier:

$$Fs = e^{(b_1 + b_2 M + b_3 Y_s)} R^{b_4} \tag{4-4}$$

Ley de atenuación para la duración:

$$d = d_{50} + 0.15(50 - R) \tag{4-5}$$

a > 0.05 g., R = 50 km.

Ley de atenuación para el índice potencial de licuefacción:

$$LPI = a_1 e^{a_2 M} (R + 25)^{-a_3} \tag{4-6}$$

El primer paso en la elaboración de leyes de atenuación para predecir movimientos fuertes del terreno es la determinación de los parámetros que intervienen en ellas, tanto los que definen las variables dependientes como las independientes.

En cuanto a los parámetros a predecir (parámetros independientes), los más comúnmente usados en estudios previos son la aceleración y velocidad máxima del terreno, pero estas intensidades por sí solas tiene una correlación débil sobre el comportamiento estructural. Proponer parámetros de diseño sísmico con base en estas intensidades, se justifican cuando no existe o es poca la información de registros acelerográficos en la zona de estudio. Una intensidad que se ajusta mejor al verdadero comportamiento estructural es el espectro de respuesta, por ello, los parámetros independientes a predecir son las ordenadas de pseudoaceleración espectral (4-1),

Las variables independientes consideradas son la distancia epicentral y la magnitud, que son los datos más accesibles de un sismo.

En este estudio se usó para el cálculo de las leyes de atenuación el modelo para pseudoaceleraciones espectrales (4-1), mismo que se ha usado en trabajos previos para la obtención de leyes de atenuación (Campbell, 1985; EERI, 1989; McGuire, 1976; Trigos, 1988; Esteva, 1970 y Carballo, 1994). Este modelo matemático es sencillo ya que la forma funcional se representa con pocos parámetros y tiene su base geofísica en los modelos de fuente teóricos, como lo es el modelo ω^2 o de fuente puntual (Aki K., 1967; Brune J.N., 1979).

En la expresión 4-1, Pa es la variable independiente a predecir, M y R son los parámetros de la fuente del sismo (magnitud y distancia epicentral) y a_i son los parámetros de la ley de atenuación.

Sacando el logaritmo natural de la expresión 4-1, para simplificar el modelo, tenemos:

$$\text{Ln}[Pa] = \text{Ln}(a_1) + a_2 M - a_3 \text{Ln}(R + 25) \tag{4-7}$$

y considerando que:

$$b1 = \text{Ln}(a_1) \qquad b2 = a_2 \qquad b3 = -a_3$$

tenemos el modelo matemático logarítmico siguiente:

$$\text{Ln}[Pa] = b1 + b2 M + b3 \text{Ln}(R + 25) \tag{4-8}$$

El valor de 25 representa el radio mínimo y es introducido al modelo teórico por conveniencia para controlar las amplitudes a distancias pequeñas, y podemos verlo en leyes de atenuación anteriormente desarrolladas (Esteva, 1970; Carballo, 1994). Para comparar con parámetros de otras leyes se sugiere consultar la tabla 4.1.

Recordando que se obtendrán leyes de atenuación asociadas a intensidades espectrales de pseudoaceleración para cada periodo estructural, podemos escribir que:

$$\text{Ln}[Pa(T)] = b1(T) + b2(T) M + b3(T) \text{Ln}(R + 25) \tag{4-9}$$

De esta expresión se generan una serie de constantes {b} para cada periodo estructural (T), las cuales se obtienen a través del método de mínimos cuadrados, en el que se pretende obtener esta serie de constantes {b} tales que minimicen la suma del error al cuadrado para cada ley.

La ecuación 4-8 o 4-9 por ajustar se puede expresar en términos matriciales como:

$$\{Y\} = [X]\{b\} = [X]\{\beta\} + \{\epsilon\} \tag{4-10}$$

Donde:

{Y} = Vector de logaritmos naturales de pseudoaceleraciones asociadas a los registros.

{X} = Matriz de parámetros de la fuente sísmica.

{b} = Vector de coeficientes de atenuación sísmica.

{β} = Vector de estimadores de {b}.

{ε} = Vector de residuales.

Para ajustar por mínimos cuadrados, se minimiza el producto $\{\epsilon\}\{\epsilon\}^T$ (4-11) derivando la expresión resultante con respecto a $\{\beta\}$ e igualando a cero (4-12).

$$\{\epsilon\}\{\epsilon\}^T = \{ \{Y\} - [X]\{\beta\} \}^T \{ \{Y\} - [X]\{\beta\} \} \quad (4-11)$$

$$\frac{d\{\epsilon\}\{\epsilon\}^T}{d\{\beta\}} = 0 \quad (4-12)$$

Tras desarrollar resulta finalmente que la expresión para determinar el vector $\{\beta\}$ es: (N. Draper y H. Smith, 1981)

$$\{\beta\} = [[X]^T [X]]^{-1} [X]^T \{Y\} \quad (4-13)$$

Los valores ajustados resultan entonces de:

$$\{\hat{Y}\} = [X]\{\beta\} \quad (4-14)$$

Donde \hat{Y} es el vector de logaritmos naturales de pseudoaceleraciones obtenido usando las leyes de atenuación.

El cálculo de la dispersión de las leyes de atenuación está dado por la desviaciones estándar de los residuales $\{\epsilon\}$, y se calcula con la expresión 4-15 (N. Draper y H. Smith, 1981).

$$S = \sqrt{\frac{\{Y\}^T \{Y\} - \{\beta\}^T [X]^T \{Y\}}{v}} \quad (4-15)$$

Donde v es el número de grados de libertad, y es igual al número de datos utilizados (n) menos el número de coeficientes $\{\beta\}$.

Los intervalos de confianza, para el promedio de "q" observaciones futuras para un vector de datos determinado $\{X_o\}$, se determinan con la expresión 4-16 (N. Draper y H. Smith, 1981).

$$\hat{Y} \pm t\left(v, 1 - \frac{1}{2}\alpha\right) S \sqrt{\frac{1}{q} + \{X_o\}^T [[X]^T [X]]^{-1} \{X_o\}} \quad (4-16)$$

Donde \hat{Y} es la predicción del logaritmo de la pseudoaceleración espectral $\{Y\}$ para el escenario $\{X_o\}$, tal que exista un porcentaje "100(1- α)%" de confianza de que el promedio de dichos valores "q" estén en dicho intervalo.

NOTA: Con el propósito de simplificar la notación en el resto del trabajo, para los estimadores $\{\beta\}$ se utilizará la nomenclatura de los coeficientes estimados $\{b\}$.

4.4 CRITERIOS EMPLEADOS

Las leyes de atenuación para la ciudad de Puebla fueron calculadas con base en dos criterios. El primero de éstos, es el considerar a las dos componentes horizontales ortogonales (N-S y E-O) del movimiento del terreno como dos registros independientes, criterio usado en el cálculo de las leyes de atenuación para Chilpancingo (Carballo, 1994). El segundo criterio es tomar el máximo valor de la pseudoaceleración registrada en ambos canales, es decir, la envolvente espectral de las dos direcciones ortogonales (N-S y E-O). El autor considera más razonable el último criterio para obtener intensidades máximas esperadas.

Un criterio alternativo, es el de calcular las leyes de atenuación con base en la resultante de los espectros de respuesta en la dirección del sismo, con las dos componentes ortogonales (N-S y E-O) que registran los acelerógrafos.

Con el primer criterio explicado, la matriz de parámetros de la fuente [X] y los vectores de ordenadas espectrales {Y} y de coeficientes de atenuación {b} son:

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & \text{Ln}(R_1 + 25) \\ 1 & M_1 & \text{Ln}(R_1 + 25) \\ 1 & M_2 & \text{Ln}(R_2 + 25) \\ 1 & M_2 & \text{Ln}(R_2 + 25) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & M_n & \text{Ln}(R_n + 25) \\ 1 & M_n & \text{Ln}(R_n + 25) \end{bmatrix} \quad \{Y\} = \begin{Bmatrix} \text{Ln}(Pa_1^{N-S}) \\ \text{Ln}(Pa_1^{E-O}) \\ \text{Ln}(Pa_2^{N-S}) \\ \text{Ln}(Pa_2^{E-O}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \text{Ln}(Pa_n^{N-S}) \\ \text{Ln}(Pa_n^{E-O}) \end{Bmatrix} \quad \{b\} = \begin{Bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \end{Bmatrix}$$

Con el segundo criterio explicado, la matriz de parámetros de la fuente [X] y los vectores de ordenadas espectrales {Y} y de coeficientes de atenuación {b} son:

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & \text{Ln}(R_1 + 25) \\ 1 & M_2 & \text{Ln}(R_2 + 25) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & M_n & \text{Ln}(R_n + 25) \end{bmatrix} \quad \{Y\} = \begin{Bmatrix} \text{Ln}(Pa_1^{\text{Max}}) \\ \text{Ln}(Pa_2^{\text{Max}}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \text{Ln}(Pa_n^{\text{Max}}) \end{Bmatrix} \quad \{b\} = \begin{Bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \end{Bmatrix}$$

4.5 OBTENCIÓN DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN

Una vez establecido el modelo matemático y los criterios a seguir se calcularon las leyes de atenuación propuestas para las diferentes zonas sismogénicas. Se consideró que el intervalo de periodos de interés para las construcciones de la ciudad de Puebla es de 0.1 a 3.5 segundos.

Los datos que dan origen a las leyes de atenuación están asociados a las intensidades espectrales correspondientes a 195 periodos estructurales entre 0.1 y 3.5 seg., con incrementos de 0.01 ($0 < T < 1$), 0.02 ($1 < T < 2.5$) y 0.05 ($2.5 < T < 3.5$) segundos.

Entre las condiciones importantes que exige el modelo seleccionado (4-8) son:

- El coeficiente b_2 asociado al parámetro fuente de magnitud (M') exige ser positivo, lo que asegura que las intensidades aumentan (sin llegar a saturarse) con el tamaño del sismo.
- El coeficiente b_3 asociado al parámetro fuente de distancia epicentral " $\ln(R+25)$ " necesita ser negativo, lo que garantiza que las intensidades disminuyen con la lejanía al foco del sismo.

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de las leyes de atenuación sísmica para la ciudad de Puebla, y éstos se discuten.

4.5.1 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 1

4.5.1.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 5, 17 y 19. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.2) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.1 para {b} y 4.2 para {S}. Se puede observar en la figura 4.1, que los parámetros b_2 y b_3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

No obstante a la escasez de registros con los que se contó para esta zona (Fig. 3.6), los coeficientes de atenuación sísmica {b} cumplieron con las condiciones que impone el modelo (Fig. 4.1) y además se ajustaron muy bien a los registros fuente (Fig. 4.3), aunque pudiera ser que por esta escasez no se ajusten a otros escenarios. A medida que se incorporen más registros a la base de datos se podrá conocer mejor el efecto de los sismos provenientes de esta zona.

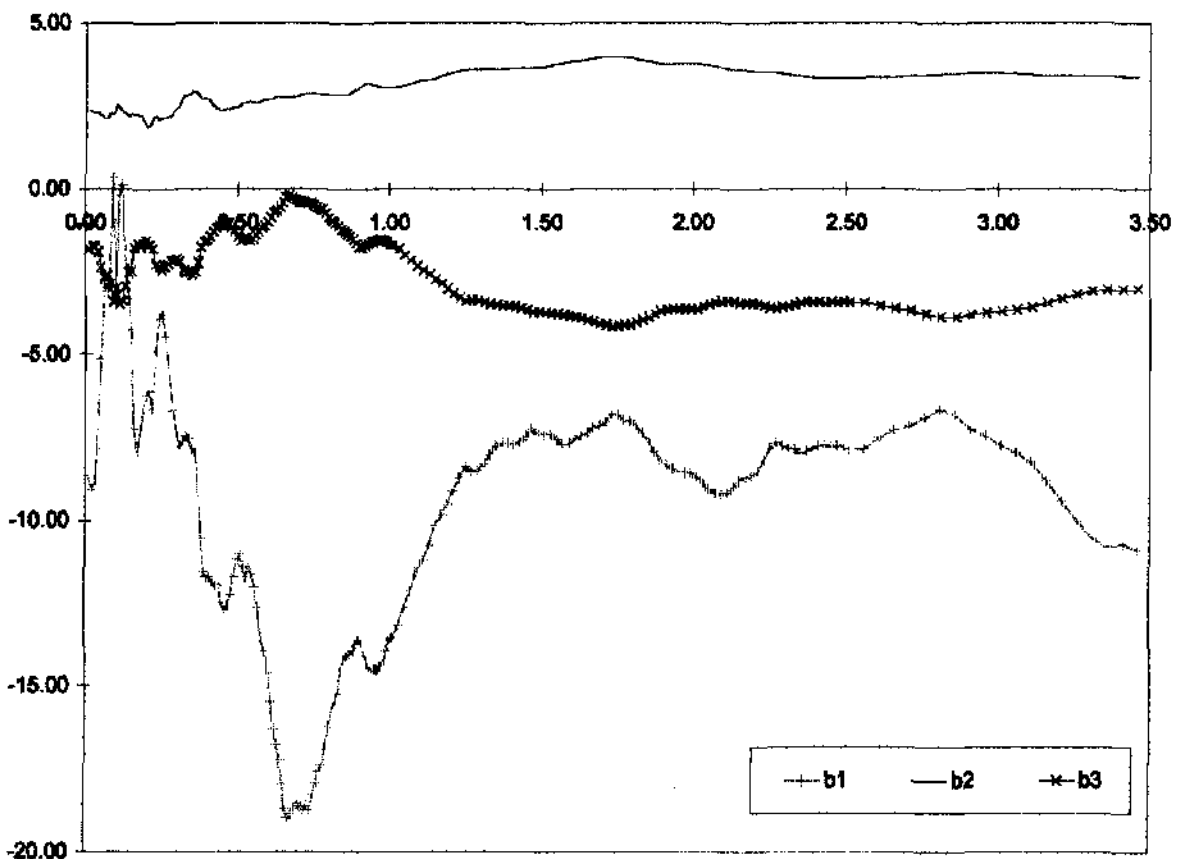


Fig. 4.1.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$

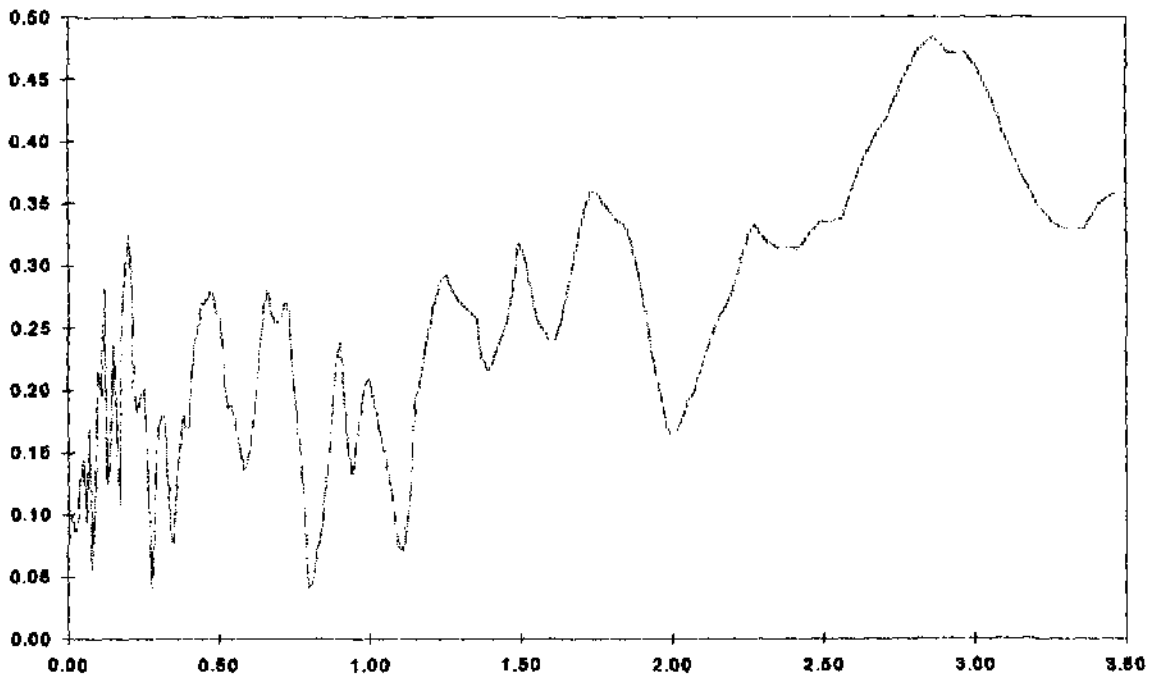


Fig. 4.2.- Desviaciones estándar {S}.

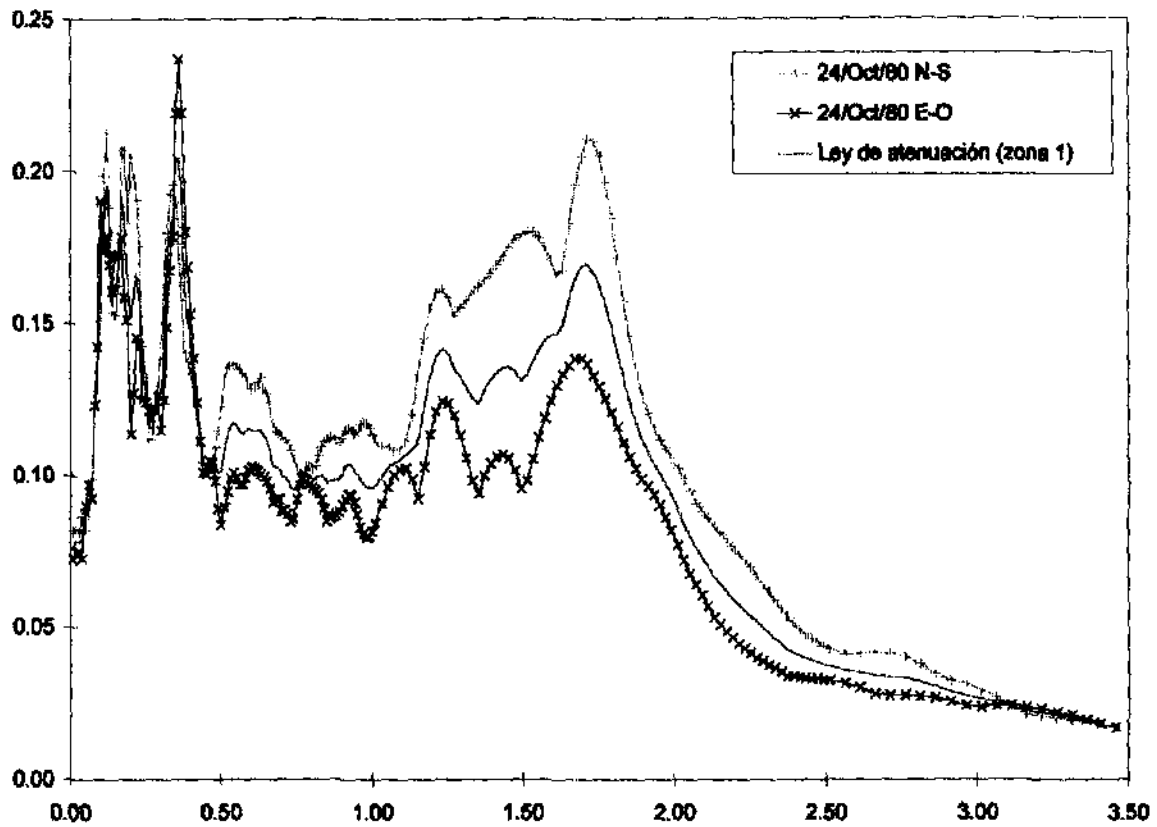


Fig. 4.3.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 24 de octubre de 1980 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=6.4$, $R=112$ km.).

Tabla 4.2.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.

$$\ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 \ln(R+25)$$

Y	b1	b2	b3	S	Y	b1	b2	b3	S	Y	b1	b2	b3	S
0.01	-8.6728	2.3485	-1.8138	0.0988	0.66	-18.6861	2.7785	-0.2674	0.2803	1.61	-7.5503	3.8484	-3.8818	0.2401
0.02	-9.0898	2.3314	-1.7066	0.0670	0.67	-18.9799	2.7601	-0.1938	0.2828	1.63	-7.4555	3.8671	-3.8013	0.2549
0.03	-9.7879	2.3068	-1.7332	0.0902	0.68	-19.8631	2.7754	-0.2355	0.2561	1.65	-7.3793	3.9130	-3.9055	0.2799
0.04	-7.8858	2.2877	-1.8885	0.1267	0.69	-18.6829	2.8085	-0.3192	0.2546	1.67	-7.2314	3.9419	-4.0247	0.3013
0.05	-5.1202	2.2204	-2.3466	0.1459	0.70	-18.5435	2.8227	-0.3711	0.2588	1.69	-7.1437	3.9819	-4.0638	0.3251
0.06	-2.8694	2.1322	-2.6717	0.0650	0.71	-18.6686	2.8506	-0.3828	0.2648	1.71	-7.0311	3.9747	-4.1020	0.3454
0.07	-3.1086	2.1413	-2.6311	0.1697	0.72	-18.7450	2.8730	-0.3991	0.2708	1.73	-6.8191	3.9830	-4.1589	0.3608
0.08	-2.8996	2.3079	-2.8435	0.0572	0.73	-18.6160	2.8693	-0.4253	0.2623	1.75	-6.6341	3.9795	-4.1563	0.3569
0.09	0.3312	2.2565	-3.4039	0.1174	0.74	-18.7538	2.8821	-0.4158	0.2307	1.77	-6.9923	3.9685	-4.1149	0.3507
0.10	-3.1686	2.5255	-3.0077	0.2175	0.75	-18.2980	2.8763	-0.4987	0.1961	1.79	-7.0058	3.9475	-4.0975	0.3449
0.11	-0.1995	2.4539	-3.4936	0.1951	0.78	-17.9173	2.8624	-0.5528	0.1712	1.81	-7.1519	3.9125	-4.0342	0.3379
0.12	0.1147	2.3333	-3.3908	0.2613	0.77	-17.6979	2.8539	-0.9038	0.1474	1.83	-7.3745	3.8752	-3.9535	0.3348
0.13	-1.8215	2.2859	-2.9535	0.1221	0.78	-17.3734	2.8437	-0.8352	0.1058	1.85	-7.5834	3.8417	-3.8796	0.3287
0.14	-3.3415	2.1847	-2.5389	0.1403	0.79	-16.6576	2.8409	-0.7167	0.0646	1.87	-7.9357	3.8059	-3.7726	0.3105
0.15	-4.2780	2.2728	-2.4563	0.2428	0.80	-16.2128	2.8383	-0.8871	0.0406	1.89	-8.2076	3.7776	-3.6908	0.2892
0.16	-7.2437	2.2330	-1.7958	0.1851	0.81	-15.8002	2.8407	-0.9535	0.0472	1.91	-8.3402	3.7660	-3.6806	0.2607
0.17	-7.9194	2.2504	-1.8534	0.1081	0.82	-15.5381	2.8525	-1.0207	0.0821	1.93	-8.4482	3.7704	-3.6479	0.2328
0.18	-7.3777	2.2187	-1.7338	0.2759	0.83	-15.2345	2.8632	-1.0958	0.0789	1.95	-8.5269	3.7768	-3.6470	0.2078
0.19	-6.8736	2.0681	-1.8549	0.2985	0.84	-14.5665	2.8584	-1.2248	0.0924	1.97	-8.5679	3.7837	-3.6550	0.1836
0.20	-6.2637	1.8709	-1.5428	0.3250	0.85	-14.2338	2.8503	-1.2878	0.1194	1.99	-8.5890	3.7893	-3.6861	0.1652
0.21	-6.1248	1.9506	-1.6668	0.2770	0.86	-14.1175	2.8620	-1.3613	0.1375	2.01	-8.6917	3.7754	-3.6365	0.1651
0.22	-6.6512	2.1394	-1.7954	0.1977	0.87	-14.0377	2.9215	-1.4164	0.1669	2.03	-8.8976	3.7508	-3.5730	0.1762
0.23	-4.9169	2.2110	-2.2518	0.1822	0.88	-13.9502	2.9710	-1.5004	0.1984	2.05	-9.0650	3.7205	-3.5102	0.1824
0.24	-3.9288	2.1157	-2.3630	0.1947	0.89	-13.7195	3.0267	-1.6190	0.2247	2.07	-9.1955	3.6871	-3.4506	0.1984
0.25	-3.8137	2.1459	-2.4339	0.2017	0.90	-13.5915	3.0834	-1.7281	0.2383	2.09	-9.2162	3.6613	-3.4218	0.2154
0.26	-4.4620	2.1655	-2.3469	0.1680	0.91	-13.7725	3.1487	-1.7583	0.2128	2.11	-9.1587	3.6328	-3.4053	0.2291
0.27	-5.1508	2.1919	-2.2430	0.0614	0.92	-14.1112	3.1729	-1.7189	0.1716	2.13	-8.9982	3.6082	-3.4157	0.2443
0.28	-5.9103	2.2517	-2.1538	0.0404	0.93	-14.4588	3.1727	-1.6498	0.1485	2.15	-8.7922	3.5971	-3.4505	0.2593
0.29	-6.7024	2.3731	-2.1425	0.1254	0.94	-14.6462	3.1522	-1.6087	0.1323	2.17	-8.7134	3.5852	-3.4586	0.2661
0.30	-7.2642	2.4349	-2.1111	0.1727	0.95	-14.6348	3.1189	-1.5702	0.1461	2.19	-8.8593	3.5735	-3.4618	0.2749
0.31	-7.7332	2.5848	-2.1884	0.1793	0.96	-14.5316	3.0855	-1.5313	0.1708	2.21	-8.5189	3.5583	-3.4778	0.2900
0.32	-7.6339	2.7846	-2.4387	0.1791	0.97	-14.4219	3.0689	-1.5344	0.1864	2.23	-8.1802	3.5397	-3.5295	0.3063
0.33	-7.4632	2.8298	-2.5130	0.1294	0.98	-14.2889	3.0565	-1.5472	0.2008	2.25	-7.8438	3.5258	-3.5869	0.3250
0.34	-7.5388	2.8481	-2.5107	0.0794	0.99	-13.9334	3.0503	-1.6121	0.2080	2.27	-7.6691	3.5029	-3.5988	0.3328
0.35	-7.8617	2.9572	-2.5720	0.0780	1.00	-13.6242	3.0559	-1.6819	0.2097	2.29	-7.7630	3.4799	-3.5581	0.3267
0.36	-7.9522	2.9241	-2.5102	0.1279	1.01	-13.5570	3.0596	-1.6992	0.1948	2.31	-7.8107	3.4538	-3.5219	0.3199
0.37	-8.8231	2.8180	-2.2141	0.1526	1.03	-13.1786	3.0828	-1.8010	0.1688	2.33	-7.8596	3.4314	-3.4910	0.3172
0.38	-10.5555	2.7091	-1.7516	0.1808	1.05	-12.8479	3.1334	-1.9679	0.1481	2.35	-7.9931	3.4045	-3.4370	0.3138
0.39	-11.5368	2.7289	-1.5875	0.1691	1.07	-12.1404	3.1947	-2.1481	0.1191	2.37	-7.9108	3.3744	-3.4228	0.3158
0.40	-11.7194	2.7143	-1.5441	0.1715	1.08	-11.5892	3.2437	-2.3217	0.0768	2.39	-7.8352	3.3571	-3.4211	0.3152
0.41	-11.7011	2.6030	-1.4208	0.2123	1.11	-11.2041	3.2751	-2.4377	0.0719	2.41	-7.7525	3.3441	-3.4258	0.3133
0.42	-11.8438	2.4971	-1.2713	0.2405	1.13	-10.7703	3.3054	-2.5614	0.1131	2.43	-7.7216	3.3412	-3.4322	0.3188
0.43	-11.9633	2.4226	-1.1649	0.2507	1.15	-10.1613	3.3358	-2.7228	0.1918	2.45	-7.7808	3.3381	-3.4173	0.3248
0.44	-11.9774	2.3652	-1.1049	0.2705	1.17	-9.8460	3.4100	-2.8618	0.2133	2.47	-7.7398	3.3360	-3.4295	0.3304
0.45	-12.4840	2.3727	-1.0198	0.2898	1.19	-9.5786	3.4734	-2.8944	0.2443	2.49	-7.8102	3.3394	-3.4223	0.3359
0.46	-12.7181	2.4139	-1.0152	0.2747	1.21	-9.1110	3.5242	-3.1333	0.2700	2.51	-7.8777	3.3361	-3.4078	0.3347
0.47	-12.5602	2.4071	-1.0405	0.2795	1.23	-8.7253	3.5713	-3.2862	0.2870	2.56	-7.8378	3.3478	-3.4378	0.3360
0.48	-12.2360	2.4291	-1.1338	0.2751	1.25	-8.3918	3.6047	-3.3829	0.2928	2.61	-7.6176	3.3625	-3.5272	0.3736
0.49	-11.7301	2.4480	-1.2635	0.2833	1.27	-8.6478	3.6015	-3.3543	0.2797	2.66	-7.2886	3.3764	-3.5978	0.4003
0.50	-11.1679	2.4891	-1.4354	0.2584	1.29	-8.5084	3.6118	-3.3786	0.2726	2.71	-7.1516	3.4132	-3.6758	0.4193
0.51	-11.0320	2.5719	-1.5543	0.2406	1.31	-8.3002	3.6188	-3.4360	0.2676	2.76	-6.9070	3.4591	-3.7881	0.4481
0.52	-11.3998	2.5954	-1.5017	0.2035	1.33	-8.0333	3.6086	-3.4833	0.2623	2.81	-6.6687	3.4816	-3.8728	0.4743
0.53	-11.7351	2.6303	-1.4738	0.1655	1.35	-7.7722	3.5914	-3.6169	0.2570	2.86	-6.8272	3.4897	-3.8820	0.4648
0.54	-11.4319	2.6443	-1.6515	0.1887	1.37	-7.6702	3.6181	-3.5626	0.2257	2.91	-7.2354	3.4946	-3.7980	0.4710
0.55	-11.6094	2.6328	-1.5019	0.1780	1.39	-7.6748	3.6199	-3.5613	0.2149	2.96	-7.4531	3.4887	-3.7520	0.4717
0.56	-12.0124	2.6034	-1.3863	0.1617	1.41	-7.7176	3.6293	-3.5611	0.2265	3.01	-7.7413	3.4838	-3.6975	0.4579
0.57	-12.6617	2.6173	-1.2727	0.1537	1.43	-7.8514	3.6455	-3.5931	0.2417	3.06	-7.9680	3.4807	-3.6550	0.4300
0.58	-13.5291	2.6646	-1.1567	0.1388	1.45	-7.4587	3.6648	-3.6570	0.2545	3.11	-8.2480	3.4522	-3.5716	0.3966
0.59	-13.9392	2.6885	-1.1033	0.1381	1.47	-7.2141	3.6889	-3.7378	0.2609	3.16	-8.8043	3.4190	-3.4284	0.3704
0.60	-14.6203	2.7082	-0.9910	0.1497	1.49	-7.3849	3.6879	-3.7094	0.3172	3.21	-9.4229	3.4200	-3.3101	0.3481
0.61	-15.4854	2.7325	-0.8511	0.1692	1.51	-7.4178	3.7109	-3.7294	0.3078	3.26	-9.9917	3.4186	-3.2004	0.3335
0.62	-16.3294	2.7617	-0.7129	0.1865	1.53	-7.3847	3.7528	-3.7837	0.2792	3.31	-10.5039	3.4132	-3.0984	0.3281
0.63	-16.7787	2.7741	-0.6381	0.2175	1.55	-7.5503	3.7879	-3.7901	0.2581	3.36	-10.7958	3.4034	-3.0368	0.3297
0.64	-17.2189	2.7982	-0.5411	0.2302	1.57	-7.7054	3.8249	-3.8028	0.2492	3.41	-10.7104	3.3955	-3.0551	0.3497
0.65	-17.9858	2.7889	-0.3958	0.2721	1.59	-7.6944	3.8411	-3.8238	0.2408	3.46	-10.8689	3.3843	-3.0210	0.3581

4.5.1.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las respuestas espectrales máximas de las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 5, 17 y 19. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados (Tabla 4.3) son graficados con respecto al periodo estructural en la figura 4.4, en la que se observa el cumplimiento de los parámetros b_2 y b_3 con el modelo matemático seleccionado.

Para el cálculo de estas leyes de atenuación se tuvo el mismo número de datos que de incógnitas, por ello, el ajuste a los registros fuente es exacto (Fig. 4.5), más no se garantiza que lo sea para otros escenarios.

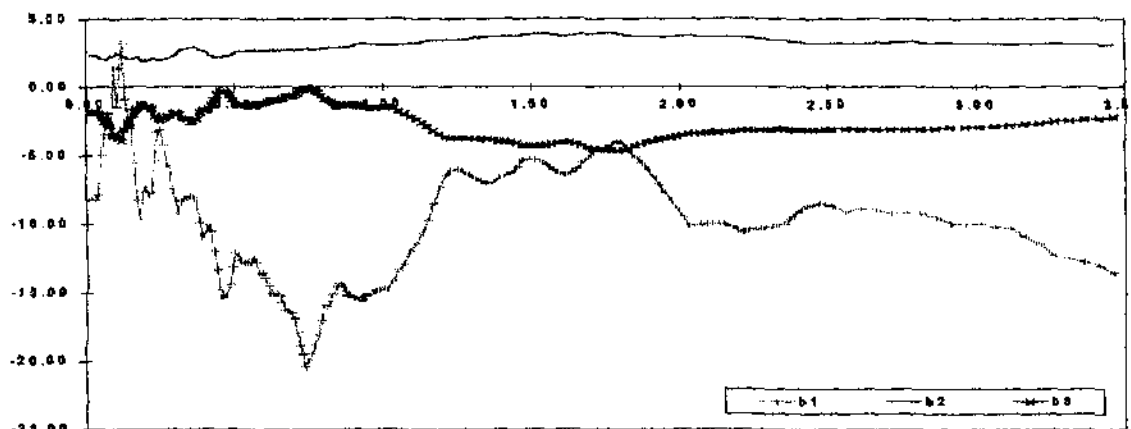


Fig. 4.4.- Coeficientes de atenuación sísmica $\{b\}$.

$$\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$$

Para estas leyes no se pudo calcular el vector de desviaciones estándar $\{S\}$, debido a que el número de grados de libertad (ν) de la expresión 4-15 es igual a cero, lo que provoca que las desviaciones estándar sean indeterminadas.

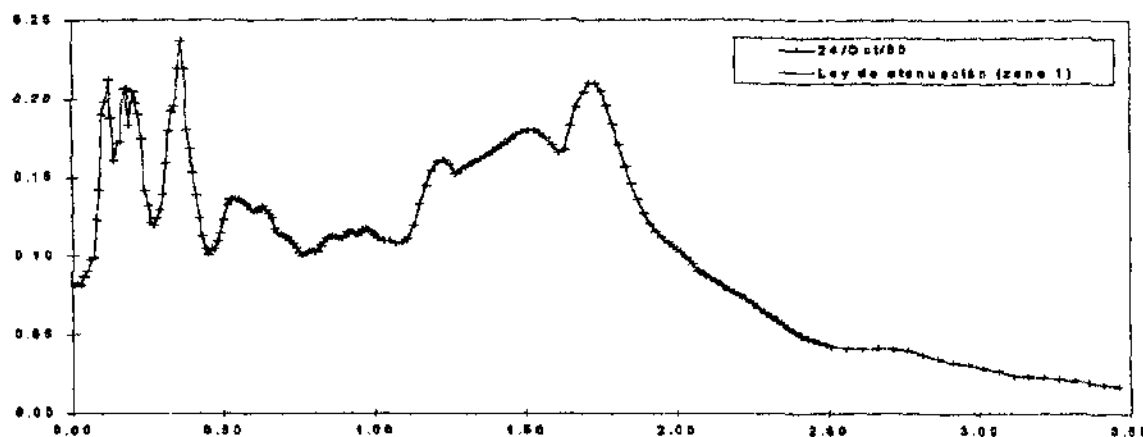


Fig. 4.5.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 24 de octubre de 1980 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=6.4$, $R=112$ km.).

Tabla 4.3.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	T	b1	b2	b3	T	b1	b2	b3
0.01	-8.2485	2.3372	-1.6733	0.66	-15.7491	2.7463	-0.7956	1.61	-6.3835	3.7957	-4.0051
0.02	-8.1999	2.3317	-1.8738	0.67	-16.2894	2.7308	-0.6770	1.63	-6.2826	3.7897	-4.0159
0.03	-8.2052	2.2646	-1.8141	0.68	-16.3687	2.7230	-0.6566	1.65	-6.0019	3.8584	-4.1418
0.04	-7.8689	2.2854	-1.8711	0.69	-16.4800	2.7446	-0.6624	1.67	-5.5553	3.9008	-4.2770
0.05	-4.9721	2.1555	-2.2622	0.70	-16.0241	2.7615	-0.5857	1.69	-5.0934	3.9343	-4.4048
0.06	-3.4825	2.1278	-2.5340	0.71	-17.9474	2.7632	-0.3921	1.71	-4.7467	3.9579	-4.5007
0.07	-1.8793	2.0495	-2.7548	0.72	-18.8666	2.7810	-0.2309	1.73	-4.5054	3.9894	-4.5850
0.08	-2.8276	2.2861	-2.8275	0.73	-19.5390	2.7993	-0.1222	1.75	-4.3628	3.9731	-4.6035
0.09	1.4658	2.2047	-3.5621	0.74	-20.4550	2.8364	0.0104	1.77	-4.2466	3.9690	-4.6295
0.10	-1.4036	2.5335	-3.3475	0.75	-19.9925	2.8023	-0.0460	1.79	-3.9656	3.9489	-4.6744
0.11	1.3949	2.3857	-3.7153	0.76	-19.4469	2.7743	-0.1238	1.81	-4.1990	3.8957	-4.5731
0.12	3.2606	2.2551	-3.9111	0.77	-18.8628	2.7748	-0.2400	1.83	-4.6419	3.8293	-4.4136
0.13	-0.8763	2.2531	-3.0925	0.78	-18.1383	2.7939	-0.4105	1.85	-5.0946	3.7737	-4.2649
0.14	-2.7399	2.0986	-2.5445	0.79	-17.0402	2.8220	-0.6693	1.87	-5.5281	3.7335	-4.1391
0.15	-1.8082	2.1880	-2.8766	0.80	-15.9774	2.8441	-0.9160	1.89	-6.0303	3.7031	-4.0106
0.16	-5.4781	2.1416	-2.0295	0.81	-16.0256	2.8569	-0.9203	1.91	-6.5394	3.6948	-3.9074
0.17	-8.2043	2.2506	-1.5805	0.82	-15.6574	2.8829	-1.0229	1.93	-7.1055	3.7053	-3.8144
0.18	-9.5590	2.1812	-1.2148	0.83	-15.1236	2.9129	-1.1656	1.95	-7.6903	3.7269	-3.7329
0.19	-7.6345	1.9334	-1.3082	0.84	-14.5757	2.9536	-1.3261	1.97	-8.3030	3.7637	-3.6995
0.20	-7.2682	1.9757	-1.4158	0.85	-14.3641	2.9502	-1.3629	1.99	-8.6362	3.8053	-3.6106
0.21	-7.7972	2.0150	-1.3658	0.86	-14.5771	2.9446	-1.3119	2.01	-9.5130	3.8244	-3.5045
0.22	-7.6920	2.1479	-1.5677	0.87	-14.8195	2.9507	-1.2509	2.03	-10.1074	3.8258	-3.3928
0.23	-5.3838	2.1813	-2.0973	0.88	-15.2131	2.9686	-1.2157	2.05	-10.0301	3.7846	-3.3632
0.24	-3.2997	2.0282	-2.3641	0.89	-15.2903	2.9967	-1.2375	2.07	-9.9875	3.7454	-3.3302
0.25	-3.0923	2.0196	-2.4098	0.90	-15.3548	3.0539	-1.2956	2.09	-9.9425	3.7229	-3.3158
0.26	-4.2804	2.0741	-2.2568	0.91	-15.4077	3.1269	-1.3756	2.11	-9.9306	3.7071	-3.3032
0.27	-5.6818	2.1703	-2.1002	0.92	-15.5308	3.1932	-1.4224	2.13	-9.9524	3.6973	-3.2918
0.28	-5.8324	2.2283	-2.1372	0.93	-15.6060	3.1960	-1.4256	2.15	-10.0605	3.6918	-3.2684
0.29	-7.4145	2.2961	-1.8851	0.94	-15.2365	3.1935	-1.4871	2.17	-10.2103	3.6937	-3.2462
0.30	-8.2848	2.4153	-1.8569	0.95	-15.1400	3.1794	-1.4980	2.19	-10.4217	3.6936	-3.2089
0.31	-9.2162	2.6097	-1.8949	0.96	-15.1039	3.1710	-1.4914	2.21	-10.5801	3.6786	-3.1673
0.32	-8.4093	2.7523	-2.2199	0.97	-14.9167	3.1623	-1.5171	2.23	-10.4161	3.6482	-3.1634
0.33	-8.0702	2.8082	-2.3479	0.98	-14.8470	3.1397	-1.5028	2.25	-10.3125	3.6228	-3.1584
0.34	-8.1164	2.8420	-2.3798	0.99	-14.7558	3.1161	-1.4930	2.27	-10.3569	3.5962	-3.1225
0.35	-7.9603	2.9827	-2.5705	1.00	-14.7420	3.0960	-1.4735	2.29	-10.2521	3.5650	-3.1114
0.36	-8.0321	3.0287	-2.5998	1.01	-14.7741	3.0795	-1.4498	2.31	-10.1461	3.5312	-3.0979
0.37	-8.4037	2.9104	-2.3864	1.03	-14.2001	3.0661	-1.5519	2.33	-10.0389	3.4956	-3.0827
0.38	-9.8937	2.7066	-1.8582	1.05	-13.4319	3.0938	-1.7439	2.35	-9.9875	3.4565	-3.0518
0.39	-10.9651	2.7076	-1.6554	1.07	-12.9118	3.1513	-1.9271	2.37	-9.5976	3.4078	-3.0768
0.40	-10.5850	2.6595	-1.6894	1.09	-11.9663	3.2214	-2.2095	2.39	-9.2140	3.3612	-3.1031
0.41	-10.0911	2.5047	-1.6091	1.11	-11.3793	3.2648	-2.3803	2.41	-8.9234	3.3229	-3.1203
0.42	-10.5625	2.3440	-1.3265	1.13	-10.6730	3.3300	-2.5934	2.43	-8.7205	3.2927	-3.1295
0.43	-11.9689	2.2339	-0.9171	1.15	-9.7101	3.4075	-2.8688	2.45	-8.5771	3.2635	-3.1269
0.44	-13.3600	2.1835	-0.5848	1.17	-8.4999	3.4544	-3.1581	2.47	-8.4583	3.2445	-3.1321
0.45	-14.7842	2.2072	-0.3322	1.19	-7.3115	3.4835	-3.4248	2.49	-8.5737	3.2329	-3.0988
0.46	-15.4004	2.2640	-0.2732	1.21	-6.4559	3.5016	-3.6153	2.51	-8.6919	3.2218	-3.0654
0.47	-15.1376	2.2543	-0.3147	1.23	-6.0629	3.5169	-3.7134	2.53	-9.0910	3.2348	-3.0084
0.48	-14.3818	2.3017	-0.5210	1.25	-6.0035	3.5292	-3.7449	2.54	-8.8307	3.2451	-3.0754
0.49	-13.1704	2.3918	-0.8743	1.27	-6.2260	3.5328	-3.7125	2.56	-8.9516	3.2902	-3.1067
0.50	-12.1224	2.5146	-1.2336	1.29	-6.4261	3.5885	-3.7407	2.57	-9.1878	3.3229	-3.1027
0.51	-12.3816	2.6305	-1.3165	1.31	-6.6800	3.6471	-3.7619	2.59	-9.1531	3.3282	-3.1231
0.52	-12.6933	2.6749	-1.3056	1.33	-6.8810	3.7017	-3.7893	2.61	-9.1936	3.3063	-3.0984
0.53	-12.8205	2.6920	-1.3009	1.35	-7.0120	3.7386	-3.8079	2.63	-9.4758	3.2725	-3.0147
0.54	-12.8216	2.7009	-1.3117	1.37	-6.9663	3.7676	-3.8482	2.64	-9.9593	3.2798	-2.9386
0.55	-12.8587	2.7085	-1.3144	1.39	-6.5872	3.7765	-3.9381	2.66	-10.0304	3.2797	-2.9323
0.56	-12.5103	2.6880	-1.3609	1.41	-6.4864	3.7807	-3.9348	3.01	-9.9658	3.2527	-2.9235
0.57	-12.8045	2.7008	-1.3198	1.43	-6.2586	3.7845	-3.9828	3.08	-10.1937	3.2212	-2.8539
0.58	-13.8442	2.7409	-1.2031	1.45	-5.8785	3.7985	-4.1010	3.11	-10.2684	3.1685	-2.7879
0.59	-13.5490	2.7259	-1.2064	1.47	-5.3451	3.8396	-4.2588	3.18	-10.9158	3.2053	-2.7109
0.60	-13.9240	2.7178	-1.1227	1.49	-5.2455	3.8618	-4.3086	3.21	-11.4331	3.2247	-2.6368
0.61	-14.4625	2.7319	-1.0312	1.51	-5.2905	3.8791	-4.3190	3.26	-12.3136	3.2402	-2.4863
0.62	-15.0997	2.7666	-0.9435	1.53	-5.3764	3.8919	-4.3187	3.31	-12.5319	3.2229	-2.4305
0.63	-15.1492	2.7716	-0.9378	1.55	-5.6908	3.8869	-4.2523	3.36	-12.7855	3.1962	-2.3637
0.64	-14.9762	2.7384	-0.9343	1.57	-5.9779	3.8684	-4.1714	3.41	-13.0180	3.1684	-2.2884
0.65	-15.2120	2.7350	-0.8855	1.59	-6.2941	3.8344	-4.0678	3.46	-13.5376	3.1503	-2.1736

4.5.2 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 2

4.5.2.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 4, 6, 9, 10, 15, 20, 21a, 21b, 23a y 23b. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.4) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.6 para {b} y 4.7 para {S}. Se puede observar en la figura 4.6, que los parámetros b_2 y b_3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Cabe hacer notar que los espectros obtenidos por estas leyes de atenuación se ajustan bien a los espectros de sismos de actividad de fondo de esta zona sísmogénica (Fig. 4.9), más no así los temblores característicos (Fig. 4.8). Para estos últimos se recomienda el uso de las leyes calculadas en el inciso 4.5.4.1.

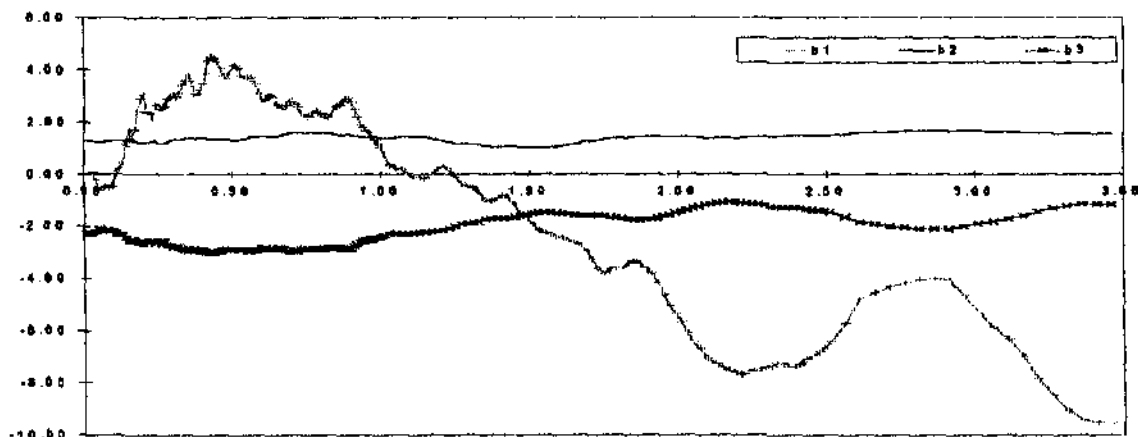


Fig. 4.6.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $Ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 Ln(R+25)$

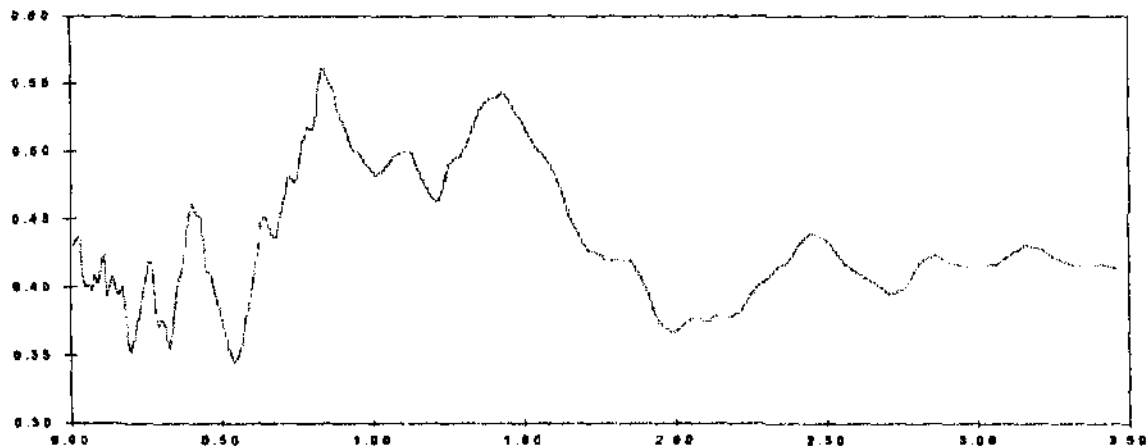


Fig. 4.7.- Desviaciones estándar {S}.

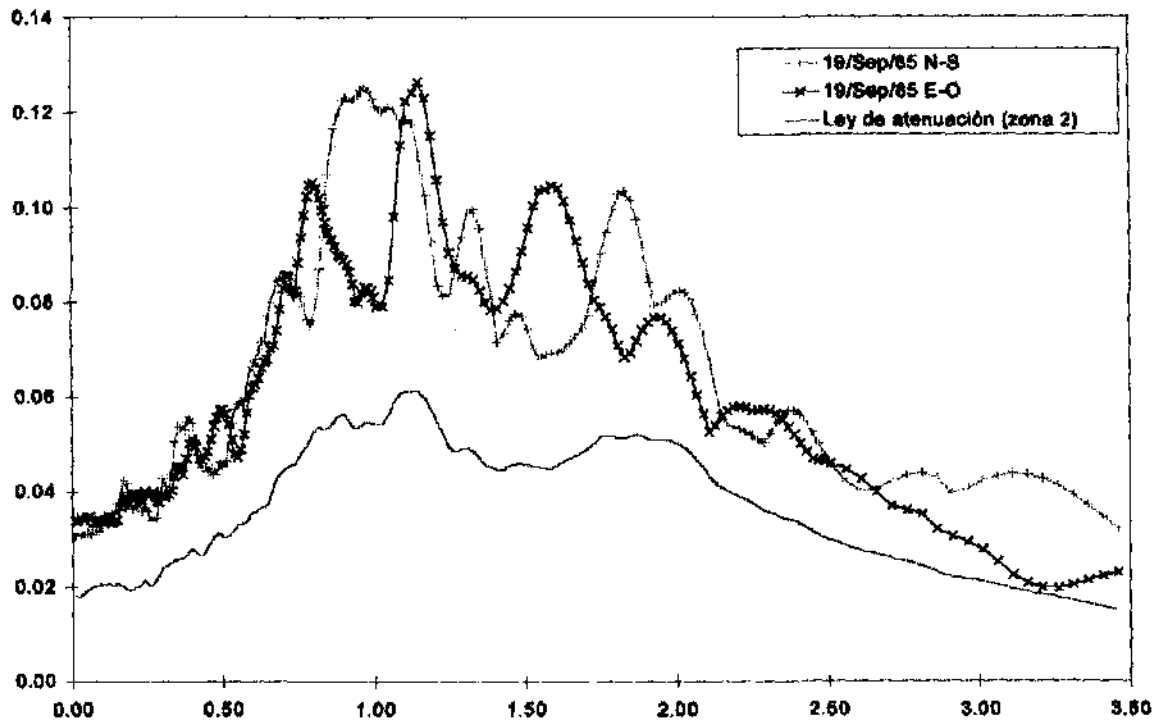


Fig. 4.8.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=8.1$, $R=533$ km.).

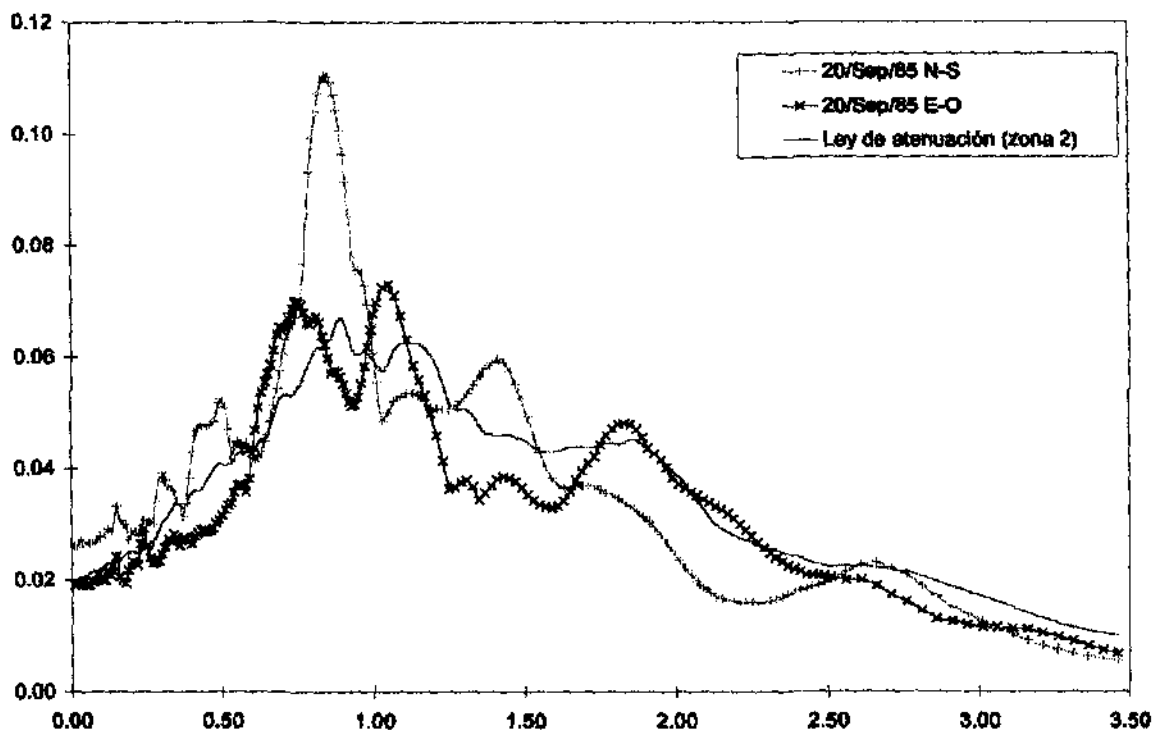


Fig. 4.9.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 20 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.6$, $R=378$ km.).

Tabla 4.4.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.

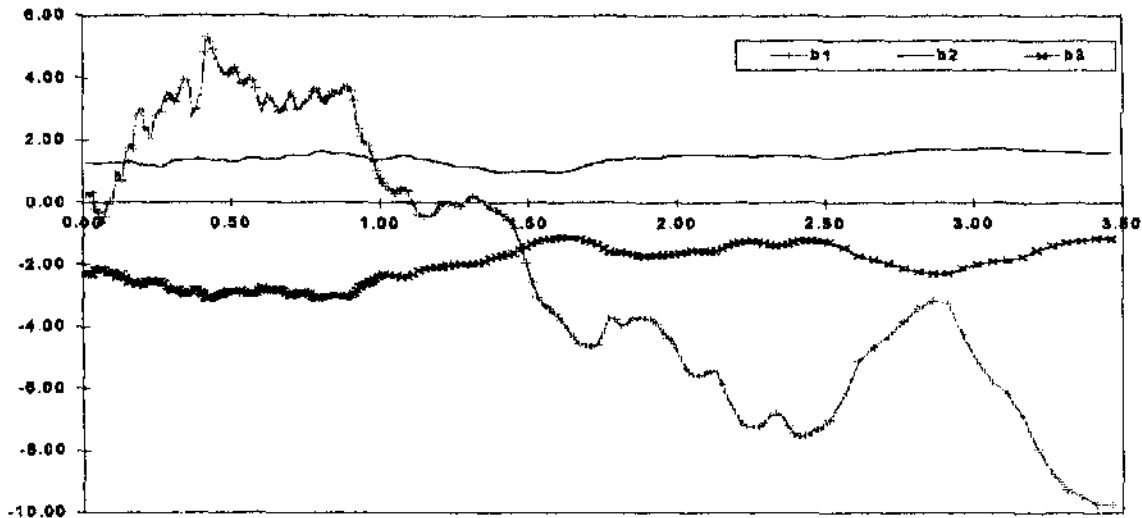
$$Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	0.0082	1.2788	-2.2738	0.4300	0.66	2.5733	1.4883	-2.8236	0.4436	1.61	-2.4392	1.0918	-1.5007	0.4782
0.02	0.0240	1.2650	-2.2593	0.4362	0.67	2.5675	1.5193	-2.8541	0.4377	1.63	-2.5369	1.1251	-1.5256	0.4659
0.03	0.0529	1.2654	-2.2612	0.4379	0.68	2.6390	1.5530	-2.9038	0.4368	1.65	-2.6131	1.1643	-1.5611	0.4530
0.04	-0.2282	1.2581	-2.2026	0.4069	0.69	2.7800	1.5727	-2.9478	0.4468	1.67	-2.7009	1.2073	-1.6002	0.4440
0.05	-0.9000	1.2287	-2.1033	0.4013	0.70	2.7949	1.5836	-2.9824	0.4596	1.69	-2.9261	1.2393	-1.6032	0.4354
0.06	-0.5479	1.2344	-2.1142	0.4021	0.71	2.7225	1.5890	-2.9557	0.4707	1.71	-3.2478	1.2747	-1.5962	0.4273
0.07	-0.4601	1.2534	-2.1507	0.3985	0.72	2.6783	1.5896	-2.9328	0.4837	1.73	-3.6223	1.3141	-1.5824	0.4260
0.08	-0.5659	1.2589	-2.1400	0.4090	0.73	2.3419	1.5732	-2.8732	0.4790	1.75	-3.7959	1.3521	-1.5999	0.4247
0.09	-0.4285	1.2815	-2.1890	0.4031	0.74	2.2689	1.5878	-2.8522	0.4787	1.77	-3.6491	1.3721	-1.6484	0.4195
0.10	-0.5178	1.2940	-2.1880	0.4125	0.75	2.2268	1.5793	-2.8563	0.4825	1.79	-3.5971	1.3792	-1.6660	0.4197
0.11	0.1202	1.2980	-2.2964	0.4240	0.76	2.1955	1.5771	-2.8467	0.4865	1.81	-3.5947	1.3796	-1.6683	0.4209
0.12	0.2342	1.2970	-2.3098	0.3940	0.77	2.3478	1.5859	-2.8787	0.5084	1.83	-3.4177	1.3950	-1.7158	0.4194
0.13	0.4389	1.2891	-2.3117	0.4016	0.78	2.4534	1.5820	-2.8877	0.5183	1.85	-3.3202	1.4142	-1.7546	0.4197
0.14	1.0934	1.2798	-2.4284	0.4082	0.79	2.3687	1.5766	-2.8617	0.5188	1.87	-3.4399	1.4297	-1.7547	0.4137
0.15	1.7019	1.3230	-2.5750	0.3987	0.80	2.2676	1.5789	-2.8487	0.5165	1.89	-3.6154	1.4399	-1.7408	0.4051
0.16	1.3652	1.2858	-2.4790	0.3958	0.81	2.2526	1.5778	-2.6394	0.5261	1.91	-3.6025	1.4436	-1.7175	0.3962
0.17	1.7095	1.2898	-2.5147	0.4012	0.82	2.2199	1.5874	-2.8207	0.5474	1.93	-4.1825	1.4474	-1.6664	0.3810
0.18	2.4187	1.2485	-2.6025	0.3901	0.83	2.2620	1.5468	-2.9054	0.5612	1.95	-4.8465	1.4568	-1.6001	0.3727
0.19	2.9049	1.2029	-2.6242	0.3693	0.84	2.4813	1.5325	-2.8157	0.5616	1.97	-5.0232	1.4577	-1.5435	0.3698
0.20	3.0708	1.2152	-2.6637	0.3528	0.85	2.8009	1.5221	-2.8236	0.5547	1.99	-5.3512	1.4563	-1.4908	0.3670
0.21	2.4008	1.2329	-2.5778	0.3624	0.86	2.8320	1.5158	-2.8186	0.5503	2.01	-5.6676	1.4532	-1.4390	0.3691
0.22	2.3448	1.2311	-2.5667	0.3727	0.87	2.7838	1.5250	-2.8517	0.5482	2.03	-6.0818	1.4487	-1.3699	0.3732
0.23	2.1772	1.2503	-2.5599	0.3809	0.88	2.9000	1.5274	-2.8708	0.5349	2.05	-6.4347	1.4324	-1.2974	0.3770
0.24	2.6707	1.2826	-2.6476	0.3987	0.89	2.9013	1.5252	-2.8668	0.5285	2.07	-6.8888	1.4191	-1.2430	0.3779
0.25	2.7178	1.2152	-2.6005	0.4097	0.90	2.7413	1.5143	-2.8272	0.5208	2.09	-6.9951	1.4039	-1.1824	0.3763
0.26	2.5017	1.1895	-2.5361	0.4195	0.91	2.4710	1.4935	-2.7594	0.5163	2.11	-7.1566	1.3859	-1.1405	0.3751
0.27	2.6095	1.2027	-2.5652	0.4171	0.92	2.1920	1.4630	-2.6794	0.5091	2.13	-7.3054	1.3804	-1.1150	0.3798
0.28	2.8923	1.2552	-2.6701	0.3878	0.93	1.9284	1.4352	-2.6051	0.5027	2.15	-7.4361	1.3730	-1.0897	0.3775
0.29	2.9878	1.2903	-2.7235	0.3710	0.94	1.7807	1.4181	-2.5809	0.5001	2.17	-7.5263	1.3771	-1.0818	0.3775
0.30	3.0777	1.3373	-2.7895	0.3757	0.95	1.6757	1.4086	-2.5316	0.5000	2.19	-7.5996	1.3879	-1.0962	0.3784
0.31	2.9878	1.3413	-2.7774	0.3746	0.96	1.6850	1.4056	-2.5121	0.4965	2.21	-7.6659	1.3995	-1.0829	0.3812
0.32	3.1403	1.3313	-2.7872	0.3603	0.97	1.4372	1.4025	-2.4829	0.4927	2.23	-7.6343	1.4107	-1.1163	0.3877
0.33	3.4167	1.3483	-2.8489	0.3553	0.98	1.2739	1.3983	-2.4513	0.4895	2.25	-7.5373	1.4213	-1.1473	0.3849
0.34	3.6148	1.3765	-2.9125	0.3750	0.99	1.1366	1.3959	-2.4269	0.4869	2.27	-7.5126	1.4312	-1.1687	0.4005
0.35	3.8178	1.3858	-2.9321	0.3954	1.00	0.9938	1.3909	-2.3987	0.4852	2.29	-7.4276	1.4368	-1.1933	0.4033
0.36	3.5988	1.3712	-2.9032	0.4076	1.01	0.7552	1.3807	-2.3489	0.4824	2.31	-7.3296	1.4549	-1.2322	0.4081
0.37	3.1047	1.3924	-2.8507	0.4135	1.03	0.3397	1.3816	-2.2834	0.4856	2.33	-7.2582	1.4705	-1.2656	0.4127
0.38	3.0772	1.4168	-2.8726	0.4276	1.05	0.2142	1.3903	-2.2695	0.4905	2.35	-7.2634	1.4809	-1.2802	0.4162
0.39	3.2859	1.4280	-2.9128	0.4479	1.07	0.2034	1.4211	-2.2995	0.4962	2.37	-7.3448	1.4916	-1.2822	0.4181
0.40	3.4941	1.4085	-2.9227	0.4628	1.09	0.0234	1.4371	-2.2671	0.4985	2.39	-7.3725	1.4976	-1.2876	0.4244
0.41	3.8990	1.3978	-2.9741	0.4564	1.11	-0.1155	1.4318	-2.2570	0.5002	2.41	-7.2747	1.4985	-1.3077	0.4319
0.42	4.3421	1.3879	-3.0118	0.4538	1.13	-0.1186	1.4231	-2.2453	0.4989	2.43	-7.0788	1.4997	-1.3444	0.4372
0.43	4.5089	1.3558	-3.0217	0.4525	1.15	-0.1569	1.4079	-2.2200	0.4961	2.45	-6.9716	1.4883	-1.3631	0.4403
0.44	4.4655	1.3499	-3.0043	0.4340	1.17	0.0167	1.3714	-2.2047	0.4760	2.47	-6.8248	1.4918	-1.3817	0.4381
0.45	4.3093	1.3478	-2.9718	0.4122	1.19	0.2055	1.3301	-2.1876	0.4675	2.49	-6.6835	1.4918	-1.4104	0.4357
0.46	4.0505	1.3594	-2.9384	0.4108	1.21	0.2996	1.2845	-2.1520	0.4631	2.51	-6.4383	1.5021	-1.4620	0.4322
0.47	3.8065	1.3600	-2.8954	0.4041	1.23	0.1848	1.2356	-2.0794	0.4725	2.53	-5.7075	1.5380	-1.6297	0.4169
0.48	3.6925	1.3510	-2.8619	0.3933	1.25	-0.0856	1.1907	-1.9877	0.4901	2.61	-4.7896	1.5810	-1.8361	0.4097
0.49	3.9064	1.3288	-2.8672	0.3856	1.27	-0.3595	1.1689	-1.9188	0.4951	2.68	-4.5474	1.6054	-1.9093	0.4029
0.50	4.1415	1.3052	-2.8780	0.3780	1.29	-0.4672	1.1692	-1.8955	0.4961	2.71	-4.3079	1.6334	-1.9885	0.3951
0.51	4.1867	1.3118	-2.8938	0.3678	1.31	-0.5316	1.1594	-1.8773	0.5045	2.78	-4.1644	1.6587	-2.0476	0.3991
0.52	4.0631	1.3295	-2.8950	0.3568	1.33	-0.7141	1.1416	-1.8275	0.5170	2.81	-4.0469	1.6734	-2.0909	0.4190
0.53	3.7862	1.3448	-2.8682	0.3504	1.35	-0.9851	1.1018	-1.7388	0.5298	2.86	-4.0198	1.6896	-2.0987	0.4242
0.54	3.7289	1.3827	-2.9028	0.3450	1.37	-1.0408	1.0696	-1.6920	0.5381	2.91	-4.0787	1.6882	-2.0956	0.4173
0.55	3.7568	1.4057	-2.9330	0.3493	1.39	-0.9591	1.0556	-1.6602	0.5397	2.96	-4.6513	1.6715	-2.0121	0.4150
0.56	3.7334	1.4127	-2.9367	0.3545	1.41	-0.8217	1.0475	-1.7039	0.5401	3.01	-5.2748	1.6882	-1.9132	0.4157
0.57	3.5991	1.4100	-2.9114	0.3608	1.43	-0.9373	1.0537	-1.6917	0.5447	3.06	-5.8718	1.6567	-1.8078	0.4170
0.58	3.4467	1.4311	-2.9125	0.3785	1.45	-1.1869	1.0542	-1.6508	0.5378	3.11	-6.3401	1.6425	-1.7233	0.4245
0.59	3.1258	1.4459	-2.8758	0.3866	1.47	-1.4777	1.0525	-1.6017	0.5293	3.16	-6.9820	1.6219	-1.6016	0.4311
0.60	2.8242	1.4453	-2.8248	0.3996	1.49	-1.6972	1.0476	-1.5602	0.5233	3.21	-7.8358	1.5978	-1.4408	0.4281
0.61	2.8566	1.4468	-2.8310	0.4135	1.51	-1.8224	1.0385	-1.5109	0.5138	3.26	-8.4863	1.5721	-1.3106	0.4205
0.62	3.0242	1.4528	-2.8627	0.4293	1.53	-2.1418	1.0284	-1.4671	0.5051	3.31	-9.0378	1.5568	-1.2090	0.4181
0.63	3.0355	1.4606	-2.8728	0.4482	1.55	-2.2450	1.0312	-1.4557	0.5005	3.36	-9.3884	1.5510	-1.1524	0.4152
0.64	2.9280	1.4572	-2.8608	0.4528	1.57	-2.3261	1.0457	-1.4618	0.4962	3.41	-9.5034	1.5541	-1.1458	0.4165
0.65	2.6987	1.4600	-2.8147	0.4502	1.59	-2.4090	1.0659	-1.4737	0.4884	3.46	-9.4982	1.5892	-1.1728	0.4138

4.5.2.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las respuestas espectrales máximas de las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 4, 6, 9, 10, 15, 20, 21a, 21b, 23a y 23b. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.5) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.10 para {b} y 4.11 para {S}. Se puede observar en la figura 4.10, que los parámetros b2 y b3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Nuevamente, los espectros obtenidos por estas leyes se ajustaron bien a los espectros de sismos de la actividad de fondo (Fig. 4.13), más no así a los temblores característicos (Fig. 4.12). Para estos últimos se recomienda el uso de las leyes calculadas en el inciso 4.5.4.2.



*Fig. 4.10.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$*

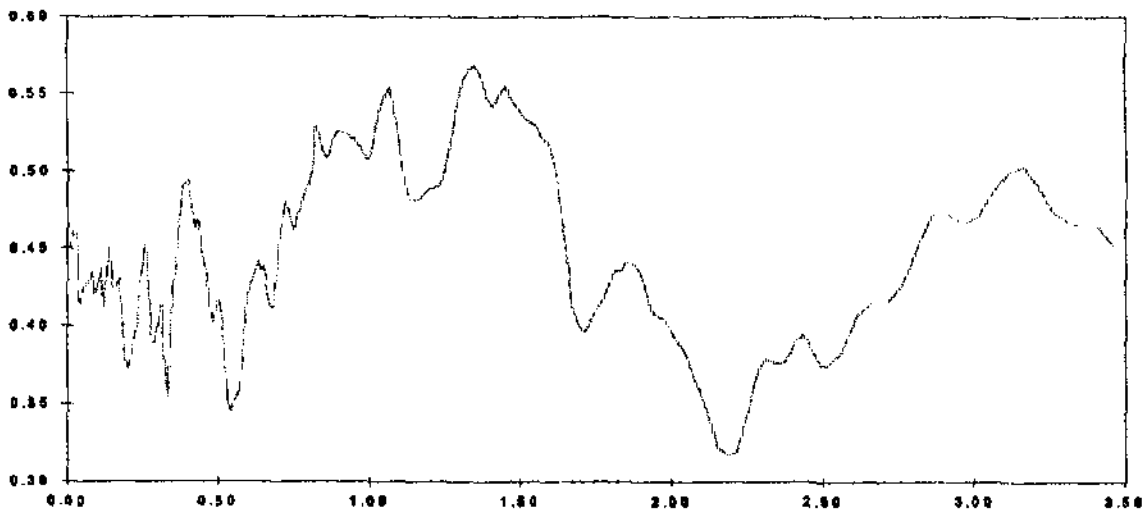


Fig. 4.11.- Desviaciones estándar {S}.

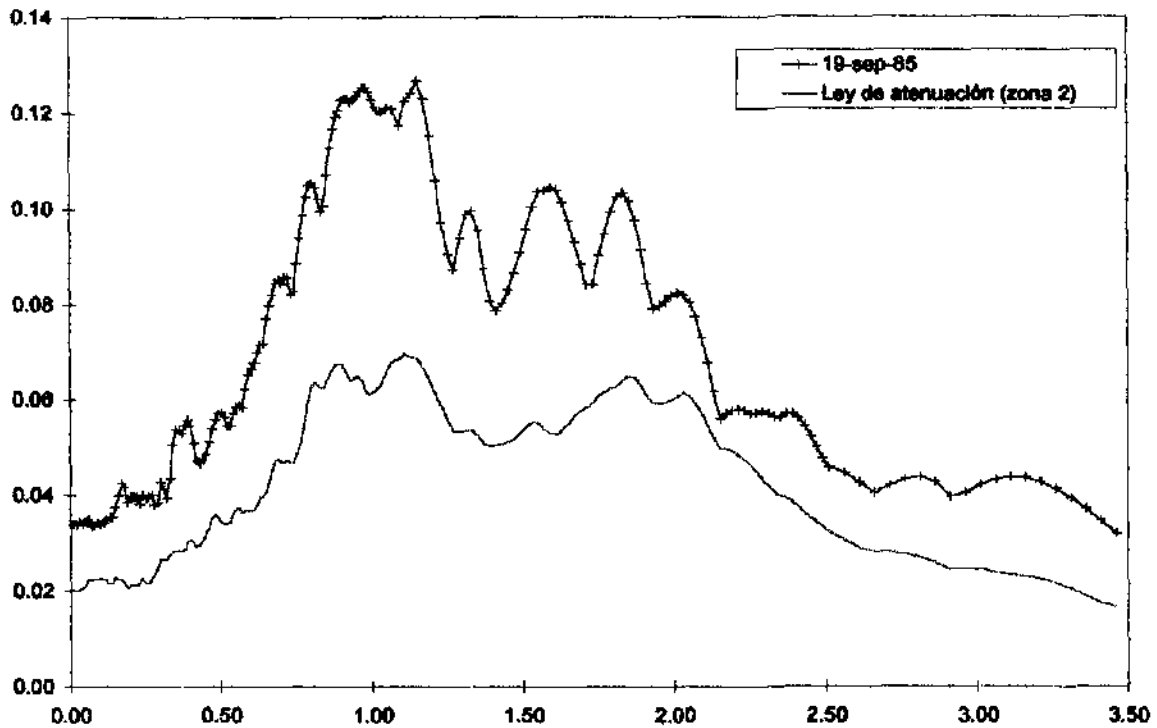


Fig. 4.12.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=8.1$, $R=533$ km.).

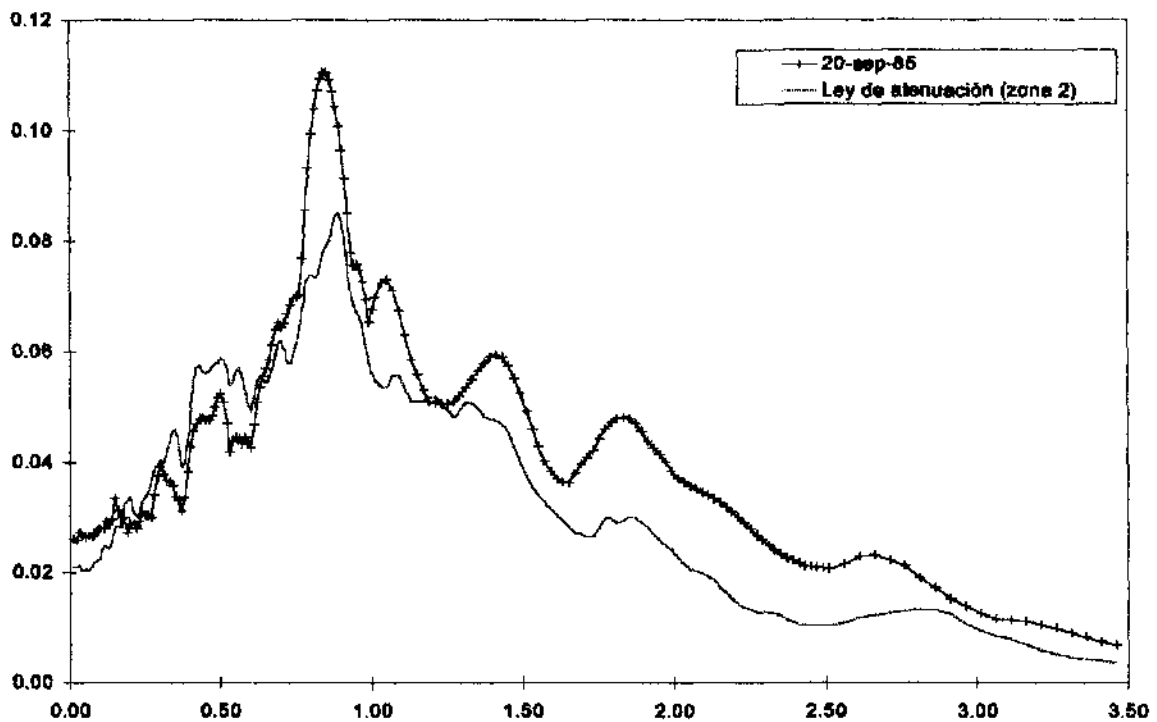


Fig. 4.13.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 20 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.6$, $R=378$ km.).

Tabla 4.5.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	0.2384	1.2688	-2.3052	0.4518	0.06	2.9163	1.4228	-2.7612	0.4253	1.61	-3.7852	0.9785	-1.1188	0.5058
0.02	0.2426	1.2654	-2.2777	0.4606	0.67	2.9512	1.4622	-2.8306	0.4128	1.63	-4.0336	1.0146	-1.1238	0.4794
0.03	0.3213	1.2778	-2.3025	0.4601	0.68	3.1198	1.5095	-2.9095	0.4117	1.65	-4.3178	1.0683	-1.1314	0.4488
0.04	-0.2042	1.2434	-2.1736	0.4139	0.69	3.3791	1.5289	-2.9735	0.4284	1.67	-4.5635	1.1165	-1.1625	0.4133
0.05	-0.2796	1.2327	-2.1443	0.4218	0.70	3.5384	1.5318	-3.0050	0.4500	1.69	-4.5970	1.1659	-1.2174	0.4005
0.06	-0.6590	1.2619	-2.1115	0.4280	0.71	3.3448	1.5326	-2.9748	0.4690	1.71	-4.6505	1.2145	-1.2698	0.3960
0.07	-0.4585	1.2601	-2.1420	0.4272	0.72	3.0010	1.5251	-2.9103	0.4808	1.73	-4.5909	1.2627	-1.3383	0.4034
0.08	-0.0680	1.2889	-2.2389	0.4362	0.73	2.9857	1.4988	-2.8775	0.4747	1.75	-4.2048	1.3160	-1.4631	0.4109
0.09	0.0599	1.2999	-2.2737	0.4208	0.74	3.1447	1.4919	-2.8920	0.4666	1.77	-3.7072	1.3551	-1.5903	0.4160
0.10	0.0292	1.2879	-2.2516	0.4253	0.75	3.2276	1.5135	-2.9274	0.4622	1.79	-3.7392	1.3727	-1.6055	0.4253
0.11	0.8974	1.2997	-2.4078	0.4376	0.76	3.3116	1.5223	-2.9478	0.4720	1.81	-3.9649	1.3791	-1.5771	0.4359
0.12	0.8779	1.2921	-2.3949	0.4131	0.77	3.5525	1.5676	-3.0332	0.4764	1.83	-3.8522	1.4105	-1.6268	0.4364
0.13	0.6916	1.2447	-2.3096	0.4395	0.78	3.6514	1.6006	-3.0807	0.4838	1.85	-3.7482	1.4349	-1.6778	0.4418
0.14	1.2740	1.2629	-2.4259	0.4508	0.79	3.5328	1.6252	-3.0846	0.4887	1.87	-3.6947	1.4518	-1.7085	0.4414
0.16	1.7468	1.3343	-2.5823	0.4250	0.80	3.3730	1.6437	-3.0768	0.4928	1.89	-3.7088	1.4581	-1.7158	0.4358
0.18	1.8150	1.3094	-2.5640	0.4251	0.81	3.2583	1.6442	-3.0588	0.5046	1.91	-3.7441	1.4449	-1.7017	0.4262
0.17	1.6982	1.3015	-2.5342	0.4307	0.82	3.2277	1.6245	-3.0279	0.5295	1.93	-3.8807	1.4430	-1.6818	0.4107
0.18	2.7705	1.2819	-2.6589	0.4132	0.83	3.4218	1.5927	-3.0197	0.5254	1.95	-4.1889	1.4859	-1.6853	0.4059
0.19	2.9779	1.1932	-2.6122	0.3797	0.84	3.5759	1.5727	-3.0188	0.5160	1.97	-4.3469	1.4876	-1.6640	0.4057
0.20	3.0340	1.2127	-2.6418	0.3729	0.85	3.5400	1.5683	-3.0040	0.5107	1.99	-4.5832	1.5050	-1.6490	0.3999
0.21	2.4022	1.2173	-2.5459	0.3903	0.86	3.4822	1.5719	-2.9952	0.5085	2.01	-4.9838	1.5261	-1.6094	0.3923
0.22	2.3544	1.2050	-2.5252	0.3919	0.87	3.5888	1.5751	-3.0131	0.5152	2.03	-5.3475	1.5508	-1.5820	0.3878
0.23	2.0531	1.2231	-2.4951	0.3989	0.88	3.6835	1.5771	-3.0290	0.5218	2.05	-5.5838	1.5502	-1.5487	0.3805
0.24	2.4930	1.2258	-2.5623	0.4277	0.89	3.7202	1.5745	-3.0312	0.5249	2.07	-6.6102	1.5468	-1.5362	0.3683
0.25	2.8082	1.1547	-2.5292	0.4450	0.90	3.5617	1.6881	-2.9986	0.5286	2.09	-5.5506	1.5401	-1.5473	0.3581
0.26	2.9138	1.1428	-2.5308	0.4527	0.91	3.2603	1.5421	-2.9238	0.5280	2.11	-5.4130	1.5328	-1.5673	0.3483
0.27	3.2428	1.1667	-2.6068	0.4207	0.92	2.8482	1.5047	-2.8100	0.5253	2.13	-5.4848	1.5183	-1.5448	0.3373
0.28	3.5179	1.2344	-2.7300	0.3902	0.93	2.3922	1.4754	-2.7028	0.5238	2.15	-6.6440	1.4822	-1.4484	0.3233
0.29	3.4566	1.2788	-2.7705	0.3900	0.94	2.1319	1.4663	-2.8487	0.5218	2.17	-6.3228	1.4780	-1.3677	0.3192
0.30	3.3326	1.3490	-2.8270	0.4026	0.95	1.9402	1.4619	-2.6115	0.5224	2.19	-6.7211	1.4778	-1.3060	0.3178
0.31	3.2431	1.3450	-2.8082	0.4142	0.96	1.8337	1.4465	-2.5758	0.5175	2.21	-7.0442	1.4818	-1.2620	0.3192
0.32	3.4492	1.3278	-2.8199	0.3837	0.97	1.6434	1.4252	-2.5209	0.5153	2.23	-7.2081	1.4836	-1.2420	0.3293
0.33	3.6629	1.3520	-2.8809	0.3553	0.98	1.3373	1.4007	-2.4444	0.5123	2.25	-7.2394	1.4840	-1.2423	0.3458
0.34	3.9338	1.3720	-2.9421	0.3879	0.99	1.0026	1.3804	-2.3688	0.5075	2.27	-7.2316	1.4923	-1.2585	0.3632
0.35	3.9333	1.3624	-2.9302	0.4236	1.00	0.7887	1.3641	-2.3383	0.5091	2.29	-7.0861	1.5012	-1.2979	0.3730
0.36	3.6079	1.3631	-2.8789	0.4368	1.01	0.6174	1.3887	-2.3163	0.5170	2.31	-6.8863	1.5120	-1.3520	0.3789
0.37	2.8205	1.3771	-2.7730	0.4669	1.03	0.4432	1.4233	-2.3297	0.5381	2.33	-6.7994	1.5194	-1.3789	0.3778
0.38	2.9995	1.4002	-2.8283	0.4898	1.05	0.2823	1.4604	-2.3449	0.5480	2.35	-6.8751	1.5157	-1.3646	0.3763
0.39	3.3213	1.4247	-2.9021	0.4925	1.07	0.4602	1.4911	-2.4073	0.5543	2.37	-7.2014	1.5148	-1.3129	0.3770
0.40	3.9982	1.4052	-2.9661	0.4945	1.09	0.3750	1.4892	-2.3901	0.5303	2.39	-7.4598	1.4989	-1.2848	0.3833
0.41	4.8313	1.3928	-3.0887	0.4778	1.11	-0.0467	1.4683	-2.2944	0.4989	2.41	-7.5545	1.4777	-1.2173	0.3916
0.42	5.2804	1.3542	-3.1274	0.4633	1.13	-0.3892	1.4268	-2.1891	0.4620	2.43	-7.5175	1.4541	-1.2108	0.3943
0.43	6.1776	1.3418	-3.0933	0.4701	1.15	-0.4767	1.3988	-2.1408	0.4509	2.45	-7.4167	1.4554	-1.2198	0.3908
0.44	4.8933	1.3589	-3.0626	0.4602	1.17	-0.4148	1.3565	-2.1028	0.4834	2.47	-7.3207	1.4422	-1.2225	0.3818
0.45	4.6073	1.3513	-3.0045	0.4420	1.19	-0.2370	1.3218	-2.0889	0.4878	2.49	-7.1788	1.4332	-1.2384	0.3754
0.46	4.3536	1.3661	-2.9738	0.4322	1.21	-0.0464	1.2863	-2.0918	0.4897	2.51	-7.0088	1.4303	-1.2664	0.3748
0.47	4.1602	1.3770	-2.9491	0.4169	1.23	-0.0577	1.2427	-2.0313	0.4909	2.53	-6.2484	1.4643	-1.4387	0.3835
0.48	4.0680	1.3673	-2.9104	0.4019	1.25	-0.0721	1.1994	-1.9815	0.5039	2.61	-5.0831	1.5222	-1.7059	0.4073
0.49	4.1045	1.3157	-2.8821	0.4084	1.27	-0.1137	1.1705	-1.9443	0.5221	2.68	-4.6637	1.5588	-1.8225	0.4149
0.50	4.2430	1.2942	-2.8590	0.4159	1.29	0.0668	1.1647	-1.9657	0.5423	2.71	-4.2955	1.6118	-1.9494	0.4153
0.51	4.3166	1.2985	-2.8800	0.4095	1.31	0.2187	1.1601	-1.9826	0.5587	2.76	-3.8178	1.6682	-2.1014	0.4285
0.52	4.1653	1.3133	-2.8748	0.3774	1.33	0.1523	1.1399	-1.9465	0.5661	2.81	-3.3929	1.7043	-2.2173	0.4506
0.53	3.8299	1.3255	-2.8364	0.3514	1.35	0.0286	1.1003	-1.8791	0.5884	2.86	-3.1850	1.7168	-2.2751	0.4720
0.54	3.7885	1.3638	-2.8970	0.3459	1.37	-0.1572	1.0473	-1.7875	0.5810	2.91	-3.2263	1.7130	-2.2696	0.4719
0.55	3.9162	1.4111	-2.9488	0.3527	1.39	-0.2345	1.0139	-1.7348	0.5474	2.96	-4.2630	1.7182	-2.1108	0.4684
0.56	3.9747	1.4168	-2.9627	0.3585	1.41	-0.3529	0.9994	-1.6986	0.5424	3.01	-5.1463	1.7268	-1.9836	0.4706
0.57	3.9147	1.4079	-2.9458	0.3601	1.43	-0.5274	0.9925	-1.6590	0.5498	3.06	-5.7808	1.7332	-1.8967	0.4678
0.58	3.6477	1.4241	-2.9233	0.3819	1.45	-0.7945	0.9866	-1.6084	0.5560	3.11	-6.1347	1.7399	-1.8512	0.4991
0.59	3.2693	1.4112	-2.8488	0.4109	1.47	-1.2905	0.9782	-1.5173	0.5474	3.16	-6.8971	1.7272	-1.7175	0.5033
0.60	2.9390	1.3828	-2.7584	0.4198	1.49	-1.9338	0.9743	-1.4062	0.5408	3.21	-7.9485	1.6992	-1.5189	0.4901
0.61	3.1702	1.3896	-2.7767	0.4304	1.51	-2.6518	0.9758	-1.3081	0.5355	3.26	-8.7083	1.6682	-1.3660	0.4738
0.62	3.4259	1.3815	-2.8289	0.4357	1.53	-3.0307	0.9823	-1.2364	0.5321	3.31	-9.2311	1.6423	-1.2596	0.4674
0.63	3.3520	1.3951	-2.8277	0.4417	1.55	-3.2622	0.9760	-1.1895	0.5284	3.38	-9.4550	1.6254	-1.2139	0.4645
0.64	3.2618	1.3828	-2.8099	0.4357	1.57	-3.4083	0.9681	-1.1627	0.5224	3.41	-9.6990	1.6017	-1.1571	0.4648
0.65	3.0353	1.3982	-2.7757	0.4388	1.59	-3.5725	0.9657	-1.1367	0.5189	3.46	-9.7457	1.6007	-1.1586	0.4521

4.5.3 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 3

4.5.3.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 1, 11a, 11b, 16, 22a, 22b, y 26. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.6) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.14 para {b} y 4.15 para {S}. Se puede observar en la figura 4.14, que los parámetros b2 y b3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Para estas leyes se emplearon 7 de los 13 registros disponibles. Las leyes obtenidas con los 13 registros no cumplían las condiciones que fija el modelo matemático seleccionado, por ello fue necesario excluir los registros más pequeños, porque se consideró que éstos no se ajustaban, y calcular las nuevas leyes (proceso iterativo) hasta que éstas llegaran a obedecer dichas condiciones. Los registros excluidos fueron los número 2, 3, 7, 12, 25 y 27.

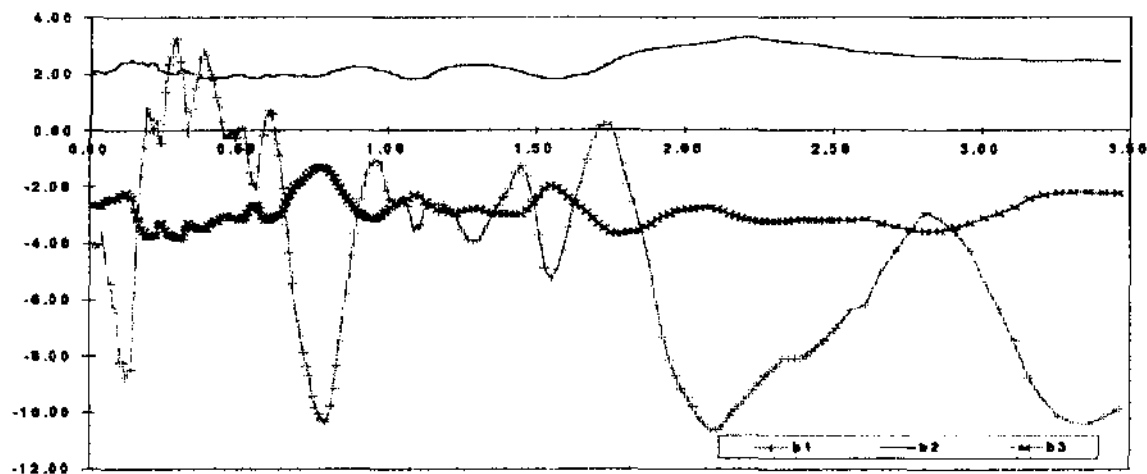


Fig. 4.14.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.

$$\ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 \ln(R+25)$$

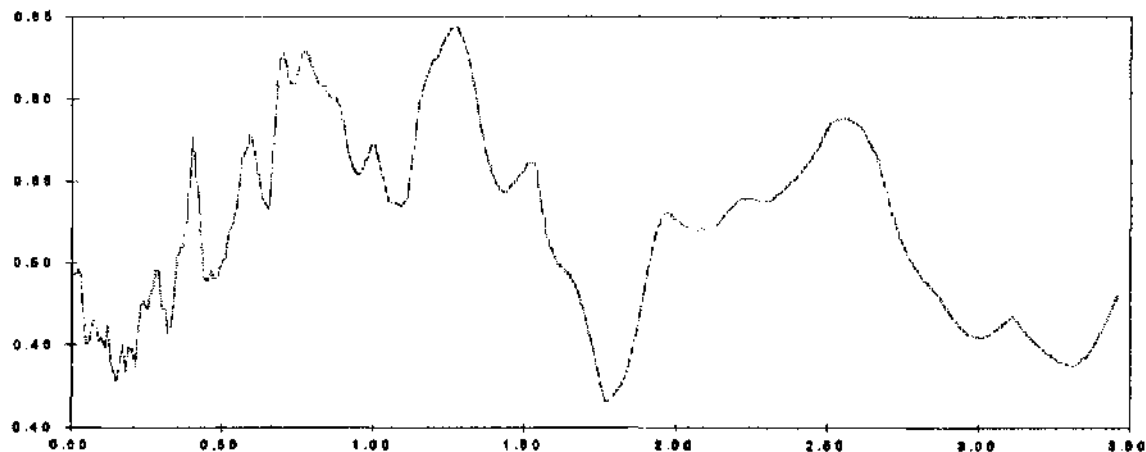


Fig. 4.15.- Desviaciones estándar {S}.

Se observa que existe un buen ajuste en la comparación de los espectros de respuesta de los sismos registrados con el obtenido usando estas leyes de atenuación (Figs. 4.17 y 4.18).

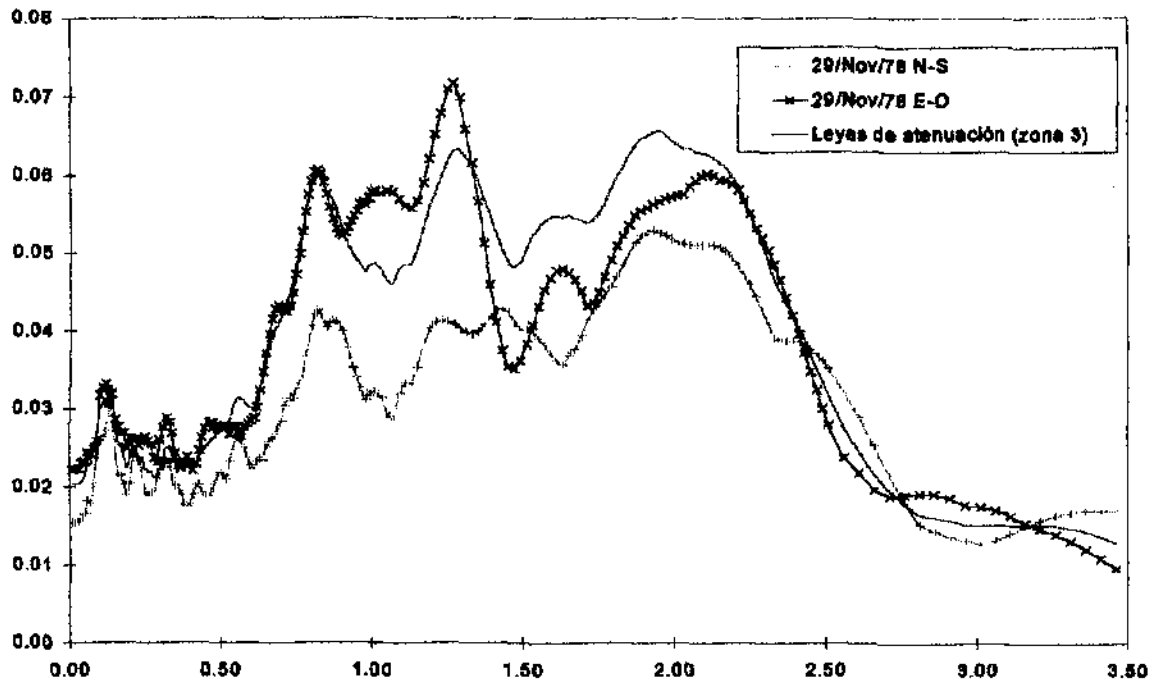


Fig. 4.16.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 29 de noviembre de 1978 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.7$, $R=373$ km.).

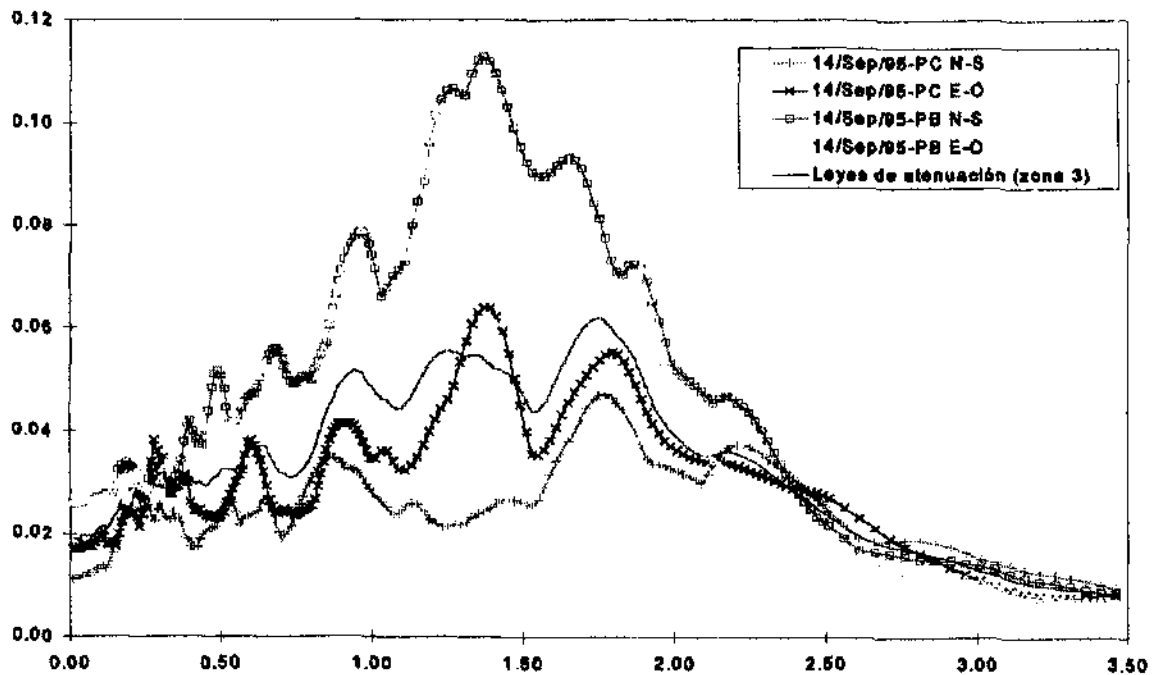


Fig. 4.17.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 14 de septiembre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación. ($M'=7.2$, $R=251$ km.).

Tabla 4.6.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.

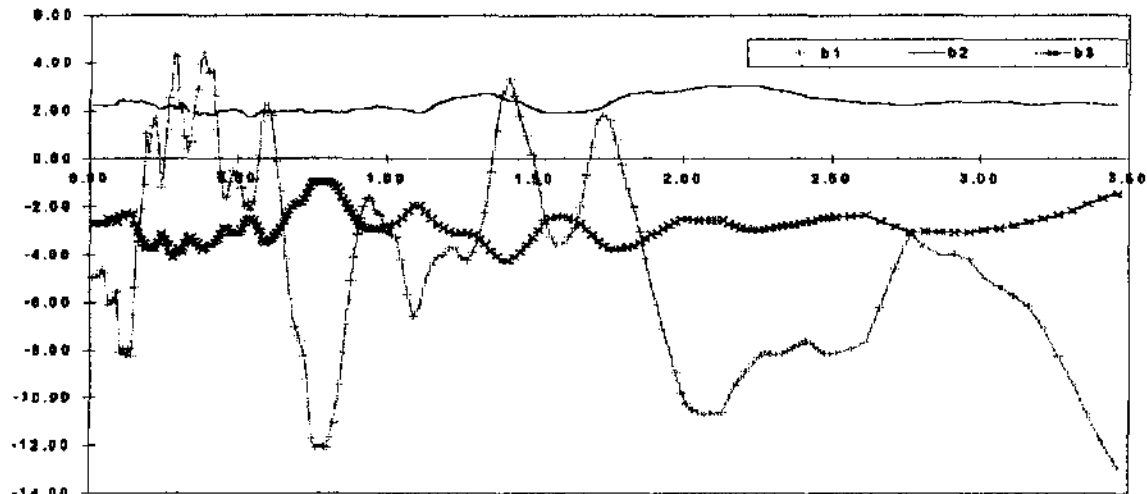
$$Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-4.1432	2.1008	-2.6608	0.4928	0.66	-3.3208	1.9798	-2.5382	0.5505	1.61	-3.4178	1.9078	-2.3681	0.4089
0.02	-4.1493	2.0896	-2.6452	0.4966	0.67	-4.3580	1.9545	-2.3283	0.5795	1.63	-2.5210	1.9417	-2.6623	0.4063
0.03	-4.0389	2.0648	-2.6570	0.4925	0.68	-5.4482	1.9417	-2.1245	0.6077	1.65	-1.8380	1.9613	-2.7262	0.4917
0.04	-3.6491	2.0653	-2.6655	0.4693	0.69	-6.2243	1.9317	-1.9784	0.6239	1.67	-1.0382	2.0212	-2.9126	0.4647
0.05	-4.3798	2.0412	-2.6372	0.4508	0.70	-6.7475	1.9237	-1.8763	0.6290	1.69	-0.3817	2.0910	-3.1126	0.4724
0.06	-5.4247	2.1241	-2.4565	0.4635	0.71	-7.2967	1.9438	-1.8069	0.6201	1.71	0.1394	2.1749	-3.3068	0.4567
0.07	-5.4494	2.1312	-2.4619	0.4642	0.72	-7.8761	1.9425	-1.7045	0.6106	1.73	0.2681	2.2805	-3.4631	0.4419
0.08	-6.2420	2.1920	-2.3956	0.4650	0.73	-8.3673	1.9108	-1.5761	0.6066	1.75	0.1701	2.3974	-3.5963	0.4258
0.09	-6.4868	2.2738	-2.4484	0.4522	0.74	-8.7242	1.9085	-1.5107	0.6102	1.77	-0.3001	2.5106	-3.6591	0.4156
0.10	-6.2544	2.3650	-2.2864	0.4549	0.75	-9.4355	1.9191	-1.3963	0.6197	1.79	-1.1370	2.5972	-3.6255	0.4196
0.11	-6.2588	2.3937	-2.2805	0.4492	0.76	-9.6400	1.9345	-1.3413	0.6283	1.81	-1.9178	2.6773	-3.5938	0.4240
0.12	-6.7684	2.3910	-2.1899	0.4627	0.77	-10.0843	1.9467	-1.3132	0.6292	1.83	-2.5682	2.7479	-3.5726	0.4314
0.13	-8.5522	2.4404	-2.2871	0.4394	0.78	-10.2473	1.9761	-1.3137	0.6263	1.85	-3.9101	2.8141	-3.5298	0.4442
0.14	-8.4652	2.4969	-2.3673	0.4341	0.79	-10.3238	2.0052	-1.3333	0.6215	1.87	-4.2284	2.8638	-3.4370	0.4607
0.15	-5.2799	2.4132	-2.8179	0.4284	0.80	-10.2555	2.0374	-1.3620	0.6164	1.89	-5.2236	2.8970	-3.3114	0.4813
0.16	-3.1308	2.3772	-3.1467	0.4401	0.81	-9.7895	2.0810	-1.5126	0.6111	1.91	-6.3127	2.9199	-3.1538	0.5014
0.17	-1.6514	2.4514	-3.4917	0.4508	0.82	-9.1215	2.1146	-1.6957	0.6089	1.93	-7.3913	2.9437	-3.0170	0.5170
0.18	-0.6562	2.3799	-3.5738	0.4343	0.83	-8.3396	2.1431	-1.8338	0.6078	1.95	-8.1141	2.9818	-2.9346	0.5296
0.19	0.7820	2.3129	-3.7400	0.4484	0.84	-7.4719	2.1640	-2.0084	0.6068	1.97	-8.6748	3.0000	-2.8855	0.5311
0.20	0.4294	2.3995	-3.7817	0.4479	0.85	-6.5882	2.1873	-2.1691	0.6020	1.99	-9.1470	3.0111	-2.8028	0.5275
0.21	-0.0641	2.4199	-3.7163	0.4365	0.86	-5.6173	2.2145	-2.3540	0.6009	2.01	-9.4759	3.0363	-2.7819	0.5247
0.22	0.3595	2.3390	-3.6965	0.4555	0.87	-5.1262	2.2416	-2.5061	0.6014	2.03	-9.7841	3.0651	-2.7687	0.5221
0.23	-0.1958	2.1262	-3.3290	0.4752	0.88	-4.4527	2.2903	-2.6454	0.5976	2.05	-10.1891	3.0972	-2.7426	0.5197
0.24	-0.4533	2.1200	-3.2749	0.4771	0.89	-3.6785	2.2683	-2.7889	0.5938	2.07	-10.4513	3.1242	-2.7342	0.5197
0.25	1.3554	2.0581	-3.5078	0.4720	0.90	-2.9724	2.2541	-2.8932	0.5829	2.09	-10.6567	3.1443	-2.7263	0.5207
0.26	2.3455	2.0342	-3.6471	0.4813	0.91	-2.4591	2.2289	-2.9503	0.5715	2.11	-10.8028	3.1794	-2.7811	0.6207
0.27	2.6053	2.0325	-3.6872	0.4842	0.92	-1.9532	2.2179	-3.0236	0.5635	2.13	-10.4448	3.2143	-2.8534	0.5226
0.28	3.1037	2.0054	-3.7411	0.4958	0.93	-1.5287	2.2149	-3.0936	0.5581	2.15	-10.0990	3.2540	-2.9641	0.5273
0.29	3.2577	2.0360	-3.8049	0.4945	0.94	-1.2469	2.2078	-3.1337	0.5557	2.17	-9.8779	3.2896	-3.0445	0.5326
0.30	2.4335	2.1633	-3.8187	0.4732	0.95	-1.1172	2.1933	-3.1387	0.5539	2.19	-9.6660	3.3085	-3.1063	0.5361
0.31	2.0375	2.1760	-3.7630	0.4716	0.96	-1.0885	2.1797	-3.1272	0.5672	2.21	-9.4481	3.3122	-3.1558	0.5390
0.32	0.6908	2.1372	-3.4788	0.4571	0.97	-1.1041	2.1521	-3.0908	0.5620	2.23	-9.2148	3.3035	-3.1883	0.5398
0.33	-0.1704	2.0796	-3.2620	0.4630	0.98	-1.2300	2.1241	-3.0355	0.5650	2.25	-8.9598	3.2836	-3.2112	0.5393
0.34	0.7885	2.0333	-3.3663	0.4822	0.99	-1.7891	2.0964	-2.9080	0.5716	2.27	-8.7095	3.2552	-3.2229	0.5383
0.35	1.5132	1.9794	-3.4269	0.4999	1.00	-2.1349	2.0621	-2.8265	0.5730	2.29	-8.5474	3.2273	-3.2204	0.5383
0.36	1.9659	1.9522	-3.4987	0.5097	1.01	-2.4434	2.0459	-2.7280	0.5673	2.31	-8.3533	3.1928	-3.2157	0.5388
0.37	2.5384	1.8939	-3.4942	0.5083	1.03	-2.7054	1.9664	-2.6844	0.5504	2.33	-8.0947	3.1588	-3.2230	0.5419
0.38	2.8372	1.8518	-3.4911	0.5295	1.05	-2.4077	1.8897	-2.5407	0.5367	2.35	-8.0621	3.1367	-3.2058	0.5449
0.39	2.6733	1.8655	-3.4786	0.5468	1.07	-2.6895	1.8255	-2.4132	0.5378	2.37	-8.0708	3.1173	-3.1849	0.5488
0.40	2.1156	1.8337	-3.3485	0.5774	1.09	-3.5264	1.8249	-2.2858	0.5345	2.39	-8.0783	3.0928	-3.1580	0.5518
0.41	1.9100	1.8139	-3.2879	0.5572	1.11	-3.3635	1.8515	-2.3253	0.5400	2.41	-7.9849	3.0735	-3.1587	0.5558
0.42	1.1961	1.8427	-3.1994	0.5353	1.13	-2.6472	1.9125	-2.5232	0.5706	2.43	-7.7919	3.0577	-3.1744	0.5608
0.43	0.8380	1.8987	-3.2055	0.5114	1.15	-2.6041	2.0417	-2.6891	0.5988	2.45	-7.5998	3.0356	-3.1860	0.5661
0.44	0.3034	1.8923	-3.1049	0.4910	1.17	-2.6321	2.1601	-2.8152	0.6117	2.47	-7.4339	3.0040	-3.1812	0.5715
0.45	-0.1701	1.8961	-3.0268	0.4888	1.19	-2.6578	2.2063	-2.8755	0.6218	2.49	-7.1963	2.9704	-3.1862	0.5805
0.46	-0.2753	1.9270	-3.0453	0.4952	1.21	-2.7539	2.2642	-2.9279	0.6266	2.51	-6.9732	2.9328	-3.1839	0.5864
0.47	-0.1423	1.9608	-3.1078	0.4918	1.23	-3.0316	2.2865	-2.9204	0.6356	2.56	-6.3653	2.8371	-3.1852	0.5889
0.48	-0.0903	1.9803	-3.1390	0.4913	1.25	-3.5048	2.3122	-2.8531	0.6432	2.61	-6.1568	2.7548	-3.1336	0.5822
0.49	-0.2887	1.9867	-3.0657	0.4968	1.27	-3.8581	2.3184	-2.7988	0.6439	2.66	-4.9977	2.7286	-3.3164	0.5852
0.50	0.0004	1.8928	-3.1637	0.5003	1.29	-3.9386	2.3215	-2.7890	0.6371	2.71	-4.2478	2.6604	-3.4084	0.5296
0.51	0.0974	1.9928	-3.1791	0.5051	1.31	-3.8539	2.3108	-2.7922	0.6262	2.76	-3.5075	2.6550	-3.5018	0.5050
0.52	-0.0198	1.9260	-3.0736	0.5177	1.33	-3.5002	2.3253	-2.8728	0.6095	2.81	-2.9129	2.6234	-3.5738	0.4903
0.53	-0.6869	1.8914	-2.9112	0.5227	1.36	-3.0068	2.3002	-2.9286	0.5849	2.86	-3.1413	2.6261	-3.5456	0.4818
0.54	-1.5083	1.8745	-2.7432	0.5298	1.37	-2.6739	2.2801	-2.9391	0.5666	2.91	-3.5912	2.5938	-3.4304	0.4863
0.55	-1.9100	1.8673	-2.8616	0.5442	1.39	-2.3628	2.2241	-2.9614	0.5536	2.96	-4.2714	2.5815	-3.2801	0.4570
0.56	-2.0164	1.8559	-2.6277	0.5629	1.41	-2.0833	2.1892	-2.9633	0.5480	3.01	-5.3796	2.5547	-3.0676	0.4545
0.57	-1.2650	1.9052	-2.8193	0.5670	1.43	-1.4897	2.1416	-3.0052	0.5432	3.08	-6.3120	2.5502	-2.9258	0.4606
0.58	-0.1817	1.9555	-3.0657	0.5701	1.45	-1.2380	2.0780	-2.9672	0.5478	3.11	-7.4306	2.5302	-2.7132	0.4876
0.59	0.4929	1.9821	-3.1893	0.5778	1.47	-1.6088	1.9940	-2.8030	0.5513	3.16	-8.7608	2.4680	-2.4113	0.4565
0.60	0.7120	1.9414	-3.2012	0.5731	1.49	-2.4155	1.9381	-2.5940	0.5558	3.21	-9.5706	2.4614	-2.2672	0.4473
0.61	0.5995	1.9195	-3.1546	0.5613	1.51	-3.6927	1.9024	-2.3284	0.5618	3.26	-10.1267	2.4719	-2.1888	0.4403
0.62	-0.0520	1.9404	-3.0852	0.5487	1.53	-4.8915	1.8808	-2.0662	0.5613	3.31	-10.3609	2.4912	-2.1782	0.4375
0.63	-0.4755	1.9682	-3.0232	0.5402	1.55	-5.2403	1.8210	-1.9664	0.5373	3.36	-10.3698	2.4888	-2.1763	0.4447
0.64	-0.9027	1.9830	-2.9659	0.5364	1.57	-4.9085	1.8282	-2.0190	0.5172	3.41	-10.1862	2.4650	-2.1889	0.4607
0.65	-2.0472	2.0061	-2.7941	0.5324	1.59	-4.2442	1.8619	-2.1714	0.5065	3.46	-9.8777	2.4490	-2.2274	0.4817

4.5.3.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las respuestas espectrales máximas de las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 1, 11a, 11b, 16, 22a, 22b, y 26. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.7) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.18 para {b} y 4.19 para {S}. Se puede observar en la figura 4.18, que los parámetros b2 y b3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Para estas leyes se emplearon 7 de los 13 registros disponibles. Pues nuevamente las leyes obtenidas con los 13 registros no cumplían las condiciones que fija el modelo, por ello fue necesario excluir también los registros más pequeños y calcular las nuevas leyes (proceso iterativo), hasta que éstas llegaran a obedecer dichas condiciones. Los registros excluidos fueron los número 2, 3, 7, 12, 25 y 27.



*Fig. 4.18.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$*

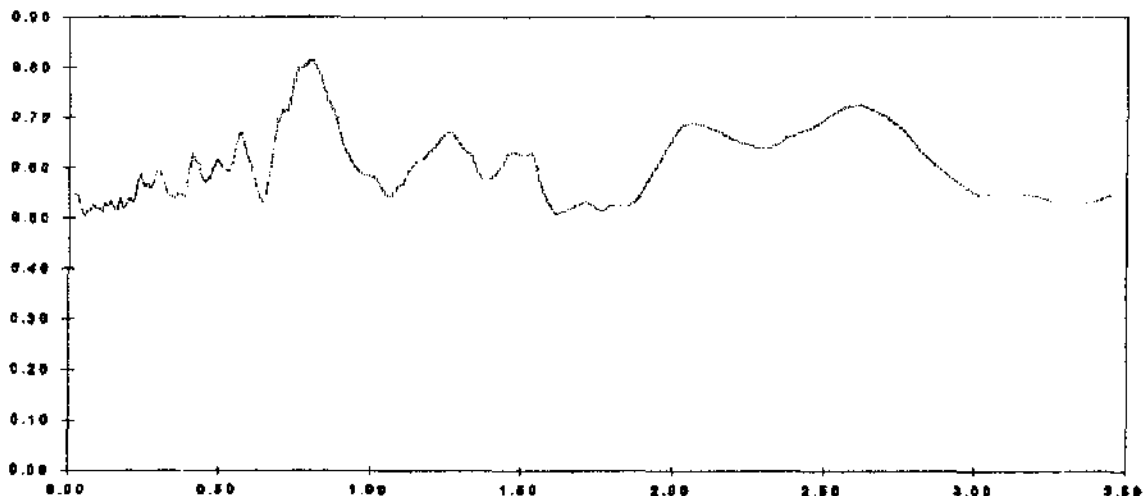


Fig. 4.19.- Desviaciones estándar {S}.

Aquí también, se observa un buen ajuste en la comparación de los espectros de respuesta de los sismos registrados con el obtenido usando estas leyes de atenuación (Figs. 4.20 y 4.21).

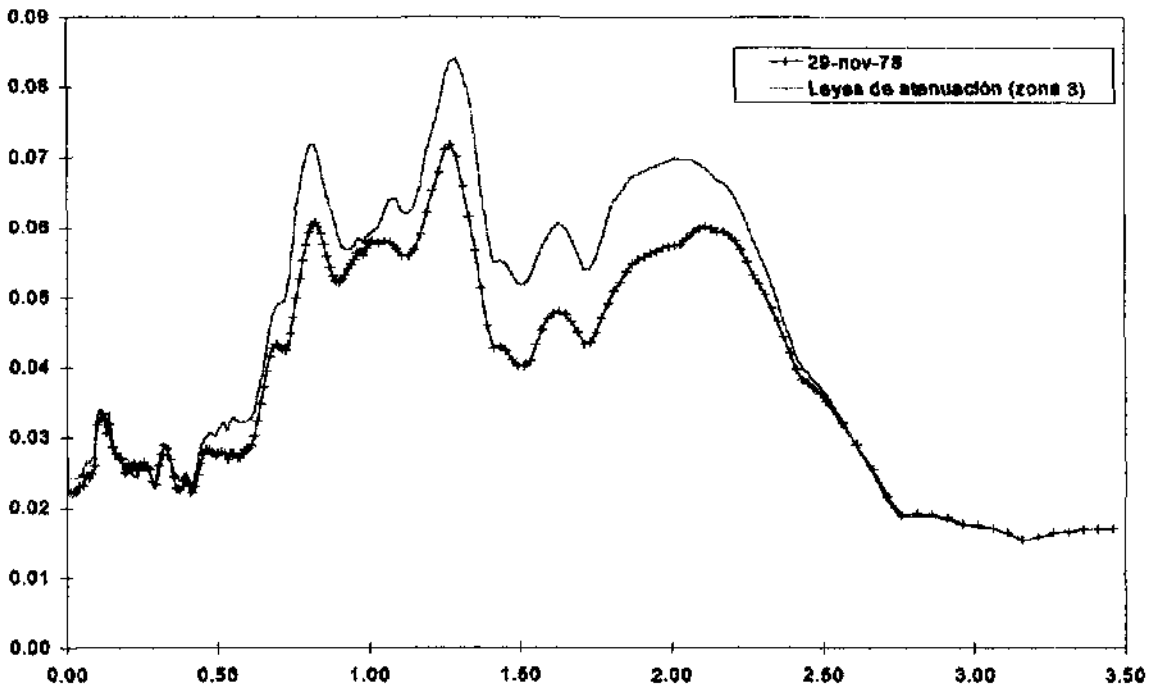


Fig. 4.20.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 29 de noviembre de 1978 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.7$, $R=373$ km.).

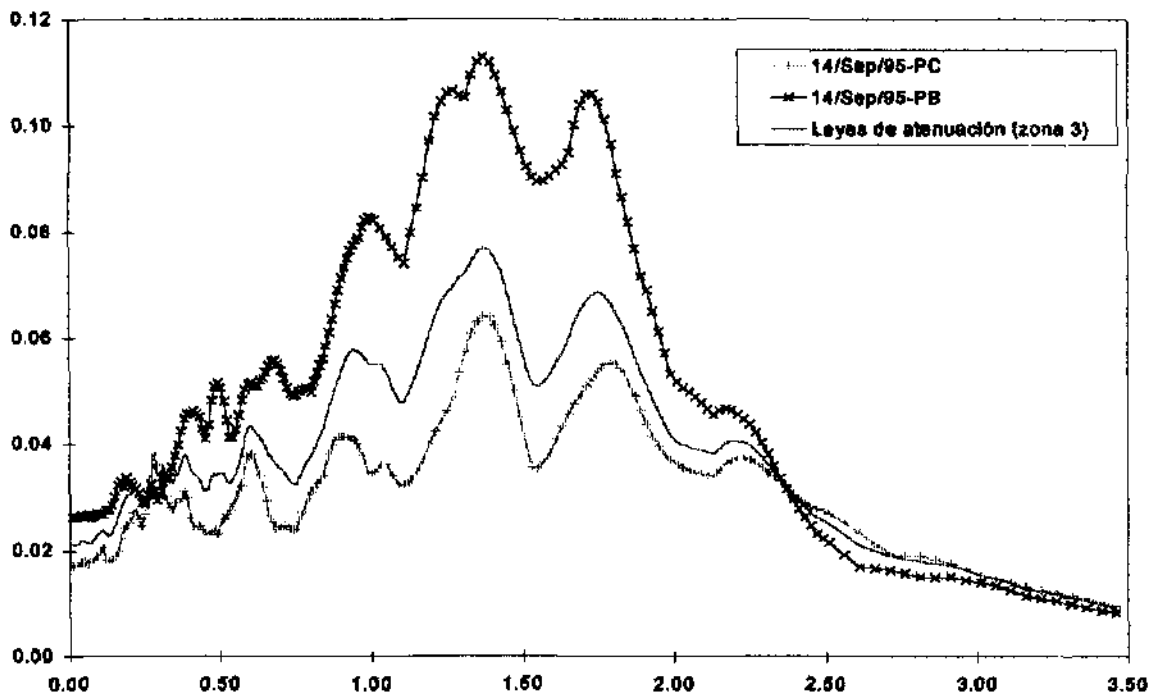


Fig. 4.21.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 14 de septiembre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.2$, $R=251$ km.).

Tabla 4.7.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-4.9495	2.2533	-2.6927	0.5458	0.66	-4.1778	1.9657	-2.3588	0.5678	1.61	-3.2626	1.9587	-2.4473	0.5095
0.02	-4.9601	2.2411	-2.6746	0.5496	0.67	-5.2971	1.9703	-2.1665	0.6126	1.63	-2.6670	1.9683	-2.6184	0.5126
0.03	-4.7746	2.2236	-2.6840	0.5437	0.68	-6.3121	1.9812	-2.0042	0.6562	1.65	-2.0200	1.9644	-2.6593	0.5172
0.04	-4.6183	2.2197	-2.7018	0.5263	0.69	-7.0413	1.9899	-1.8888	0.6983	1.67	-0.6785	1.9890	-2.9186	0.5231
0.05	-4.7697	2.1897	-2.6371	0.5028	0.70	-7.3596	2.0041	-1.8518	0.7064	1.69	0.5103	2.0240	-3.1693	0.5289
0.06	-6.1163	2.2482	-2.4732	0.5135	0.71	-7.6485	2.0017	-1.8007	0.7185	1.71	1.5820	2.0765	-3.4253	0.5330
0.07	-6.0349	2.2607	-2.4637	0.5138	0.72	-8.2629	1.9691	-1.6540	0.7147	1.73	1.8395	2.1894	-3.6100	0.5271
0.08	-5.9170	2.2657	-2.5290	0.5274	0.73	-9.2396	1.9297	-1.4347	0.7318	1.75	1.6177	2.3195	-3.7859	0.5173
0.09	-5.5244	2.3047	-2.6418	0.5192	0.74	-10.4612	1.9048	-1.1690	0.7623	1.77	0.8466	2.4581	-3.7774	0.5158
0.10	-8.0832	2.4380	-2.3537	0.5198	0.75	-11.6856	1.9122	-0.9612	0.7692	1.79	-0.2639	2.5818	-3.7424	0.5268
0.11	-7.9132	2.4542	-2.3997	0.5101	0.76	-12.1129	1.9561	-0.9353	0.8009	1.81	-1.2762	2.6733	-3.6851	0.5273
0.12	-8.1972	2.3693	-2.2712	0.5300	0.77	-12.0469	1.9629	-0.9681	0.7995	1.83	-2.0194	2.7320	-3.6338	0.5248
0.13	-7.9375	2.4060	-2.3434	0.5241	0.78	-12.0209	1.9690	-0.9731	0.8039	1.85	-3.0272	2.7625	-3.5013	0.5263
0.14	-8.2802	2.4269	-2.3053	0.5348	0.79	-12.0569	1.9674	-0.9615	0.8117	1.87	-4.1520	2.7791	-3.3321	0.5323
0.15	-5.3630	2.3575	-2.7252	0.5186	0.80	-12.1026	1.9998	-0.9402	0.8147	1.89	-5.2426	2.7790	-3.1486	0.5452
0.16	-3.4467	2.3453	-3.0384	0.5148	0.81	-11.8408	1.9468	-1.0017	0.8076	1.91	-5.0569	2.7962	-3.0340	0.5680
0.17	-2.1125	2.4225	-3.3631	0.5422	0.82	-11.0443	1.9345	-1.0835	0.7965	1.93	-7.0474	2.6065	-2.6805	0.5907
0.18	-1.0700	2.3919	-3.5023	0.5165	0.83	-10.3190	1.9228	-1.1924	0.7820	1.95	-7.9621	2.8219	-2.7466	0.6135
0.19	1.0247	2.2831	-3.7277	0.5258	0.84	-9.4630	1.9179	-1.3337	0.7648	1.97	-8.8814	2.8387	-2.6138	0.6337
0.20	0.2602	2.3059	-3.6210	0.5432	0.85	-8.0975	1.9810	-1.6226	0.7422	1.99	-9.7478	2.8818	-2.4991	0.6520
0.21	1.3497	2.2705	-3.7624	0.5285	0.86	-6.9172	1.9756	-1.8431	0.7268	2.01	-10.2340	2.9171	-2.4860	0.6725
0.22	1.7003	2.2168	-3.7647	0.5385	0.87	-5.8664	2.0005	-2.0518	0.7170	2.03	-10.4518	2.9707	-2.5200	0.6865
0.23	0.9498	2.0725	-3.4455	0.5749	0.88	-5.0429	2.0413	-2.2485	0.7071	2.05	-10.5848	3.0082	-2.5471	0.6891
0.24	-1.1978	2.1068	-3.1131	0.5872	0.89	-4.1008	2.0828	-2.4378	0.6871	2.07	-10.6440	3.0203	-2.5520	0.6898
0.25	-0.0733	2.1080	-3.3124	0.5605	0.90	-3.1289	2.0704	-2.6153	0.6600	2.09	-10.6204	3.0253	-2.5634	0.6874
0.26	1.1890	2.1167	-3.5360	0.5663	0.91	-2.4758	2.0602	-2.7140	0.6448	2.11	-10.6570	3.0146	-2.5452	0.6833
0.27	2.5159	2.2228	-3.8926	0.5666	0.92	-1.9683	2.0736	-2.8142	0.6309	2.13	-10.5941	3.0027	-2.5426	0.6780
0.28	4.3048	2.1600	-4.1234	0.5673	0.93	-1.7097	2.1043	-2.8999	0.6173	2.15	-9.9226	3.0301	-2.6922	0.6728
0.29	4.2383	2.0428	-3.9894	0.5907	0.94	-1.6512	2.1302	-2.9424	0.6082	2.17	-9.4806	3.0572	-2.6016	0.6685
0.30	2.1644	2.1342	-3.7201	0.6952	0.95	-1.7780	2.1580	-2.9560	0.5994	2.19	-9.1277	3.0682	-2.6767	0.6602
0.31	2.1812	2.2629	-3.8789	0.5798	0.96	-2.1516	2.1799	-2.9192	0.5922	2.21	-8.8709	3.0584	-2.9104	0.6642
0.32	0.9140	2.1460	-3.9126	0.5624	0.97	-2.2699	2.1965	-2.9167	0.5880	2.23	-8.5552	3.0443	-2.9496	0.6499
0.33	0.3695	2.0282	-3.2693	0.5434	0.98	-2.3354	2.1899	-2.9012	0.5844	2.25	-8.2712	3.0157	-2.9659	0.6465
0.34	0.7159	1.9453	-3.2284	0.5429	0.99	-2.8070	2.1726	-2.7995	0.5886	2.27	-8.0923	2.9710	-2.9440	0.6413
0.35	1.9629	1.9260	-3.4173	0.5378	1.00	-2.9375	2.1719	-2.7755	0.5807	2.29	-8.1393	2.9298	-2.8893	0.6389
0.36	2.8665	1.8716	-3.5103	0.5479	1.01	-3.0744	2.1503	-2.7238	0.5828	2.31	-8.1746	2.8871	-2.8347	0.6396
0.37	3.9553	1.8439	-3.6569	0.5470	1.03	-3.2297	2.1188	-2.6555	0.5884	2.33	-8.1176	2.8473	-2.8002	0.6441
0.38	4.4241	1.8905	-3.7906	0.5410	1.05	-4.2204	2.0843	-2.4529	0.5468	2.35	-8.0156	2.8053	-2.7717	0.6515
0.39	3.9688	1.9052	-3.7297	0.5593	1.07	-5.8404	2.0642	-2.1592	0.5457	2.37	-7.8482	2.7584	-2.7496	0.6609
0.40	3.5825	1.8346	-3.5811	0.6020	1.09	-6.5427	1.9855	-1.9195	0.5631	2.39	-7.7738	2.6855	-2.8767	0.6654
0.41	3.6595	1.8230	-3.5850	0.6292	1.11	-6.1069	1.9267	-1.9219	0.5898	2.41	-7.6060	2.6134	-2.6223	0.6707
0.42	2.6190	1.8574	-3.4468	0.6106	1.13	-5.0802	2.0078	-2.1986	0.5986	2.43	-7.6841	2.5640	-2.5561	0.6757
0.43	1.1877	1.9894	-3.3393	0.6103	1.15	-4.4284	2.1478	-2.4844	0.6125	2.45	-7.9121	2.5470	-2.4961	0.6805
0.44	-0.5821	2.0227	-3.0990	0.5939	1.17	-4.0701	2.3005	-2.7329	0.6149	2.47	-8.0975	2.5293	-2.4463	0.6850
0.45	-1.5784	1.9832	-2.8762	0.6706	1.19	-4.0030	2.4013	-2.8528	0.6317	2.49	-8.1206	2.5097	-2.4216	0.6948
0.46	-1.5706	2.0049	-2.9014	0.5793	1.21	-3.7160	2.4712	-2.9933	0.6426	2.51	-8.0918	2.4904	-2.4066	0.7039
0.47	-0.9517	2.0381	-3.0448	0.5837	1.23	-3.8943	2.5468	-3.0869	0.6595	2.56	-7.9002	2.4224	-2.3682	0.7216
0.48	-0.5202	2.0328	-3.1108	0.6033	1.25	-4.0665	2.5880	-3.0866	0.6724	2.61	-7.6427	2.3419	-2.3261	0.7280
0.49	-0.6236	2.0157	-3.0722	0.6190	1.27	-4.2355	2.6114	-3.0659	0.6700	2.66	-6.1767	2.3393	-2.5858	0.7153
0.50	-0.7053	2.0189	-3.0589	0.6093	1.29	-3.9037	2.6450	-3.1637	0.6513	2.71	-4.5683	2.2760	-2.8116	0.6987
0.51	-1.2202	1.9898	-2.9056	0.5958	1.31	-3.2748	2.6653	-3.2991	0.6344	2.75	-3.1089	2.2539	-3.0454	0.6767
0.52	-1.9801	1.8709	-2.6500	0.5971	1.33	-2.2522	2.7229	-3.5501	0.6264	2.81	-3.6530	2.2975	-3.0090	0.6360
0.53	-1.6183	1.7507	-2.5285	0.5934	1.35	-0.5369	2.7047	-3.8272	0.5940	2.86	-3.9514	2.3445	-3.0189	0.6099
0.54	-2.1064	1.7453	-2.4667	0.6092	1.37	1.1813	2.6380	-4.0455	0.5750	2.91	-3.9774	2.3788	-3.0830	0.5849
0.55	-1.7864	1.7786	-2.5602	0.6381	1.39	2.6700	2.5641	-4.2040	0.5769	2.96	-4.1373	2.3658	-3.0272	0.5828
0.56	-0.8471	1.8284	-2.7823	0.6643	1.41	3.3157	2.4913	-4.2301	0.5884	3.01	-4.9110	2.3878	-2.9283	0.5458
0.57	0.1476	1.8923	-3.0325	0.6702	1.43	2.6245	2.4493	-4.0728	0.6039	3.06	-5.2938	2.3912	-2.8718	0.5479
0.58	1.5106	1.9817	-3.3757	0.6439	1.45	1.7885	2.3875	-3.9512	0.6274	3.11	-5.6782	2.3524	-2.7645	0.5495
0.59	2.2270	1.9945	-3.5110	0.6278	1.47	0.9582	2.2811	-3.5576	0.6336	3.16	-6.1415	2.2757	-2.5986	0.5482
0.60	2.2244	1.9592	-3.4637	0.6092	1.49	0.1694	2.1248	-3.2554	0.6266	3.21	-7.0979	2.3087	-2.4776	0.5428
0.61	1.7667	1.9282	-3.3460	0.5892	1.51	-1.0123	2.0312	-2.9383	0.6262	3.26	-8.2688	2.3446	-2.3223	0.5332
0.62	0.8953	1.9468	-3.2167	0.5663	1.53	-2.5059	1.9653	-2.6010	0.6310	3.31	-8.3991	2.3605	-2.1508	0.5307
0.63	-0.1018	1.9681	-3.0894	0.5464	1.55	-3.2646	1.9444	-2.4400	0.5908	3.36	-10.6543	2.3218	-1.8865	0.5312
0.64	-1.3478	1.9764	-2.9627	0.5318	1.57	-3.5355	1.9379	-2.3804	0.5534	3.41	-11.8405	2.2867	-1.6438	0.5380
0.65	-2.6776	1.9866	-2.6443	0.5312	1.59	-3.5320	1.9406	-2.3798	0.5256	3.46	-12.8600	2.2688	-1.4474	0.5484

4.5.4 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONAS SISMOGÉNICAS 2 Y 3

4.5.4.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes

Estas leyes de atenuación fueron obtenidas usando las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta calculados con los acelerogramas de los registros número 1, 4, 6, 9, 10, 11a, 11b, 22a, 22b, 23a, 23b y 26. Todos ellos están asociados a sismos fuertes ($M > 6.9$), seleccionados con la intención de predecir movimientos del terreno para escenarios máximos esperados, cuyos focos estuvieran dentro de estas zonas sismogénicas de mecanismo similar. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.8) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.22 para {b} y 4.23 para {S}. Se puede observar en la figura 4.22, que los parámetros b_2 y b_3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

El ajuste del espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 (Fig. 4.24) con el obtenido por estas leyes de zonas combinadas, es mejor que el calculado con las leyes de la zona sismogénica 2 (Fig. 4.8), viceversa a lo que sucede con los sismos del 20 de septiembre de 1985 y del 14 de septiembre de 1995 (Figs. 4.25 y 4.26), en el que usando las leyes de zonas independientes el ajuste es un poco mejor (Figs. 4.9 y 4.17). Por consiguiente, se recomienda el uso de estas leyes para predecir espectros de sismos característicos, y las leyes de zonas independientes (Incisos 4.5.2.1 y 4.5.3.1) para sismos de actividad de fondo.

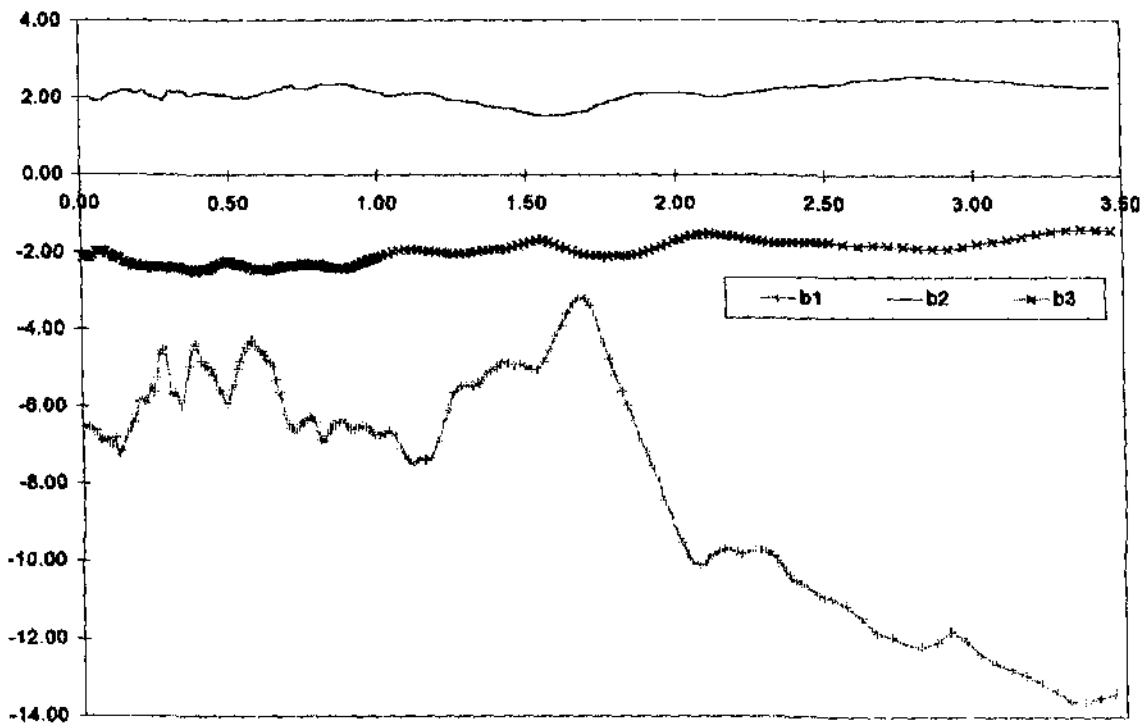


Fig. 4.22.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.

$$\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$$

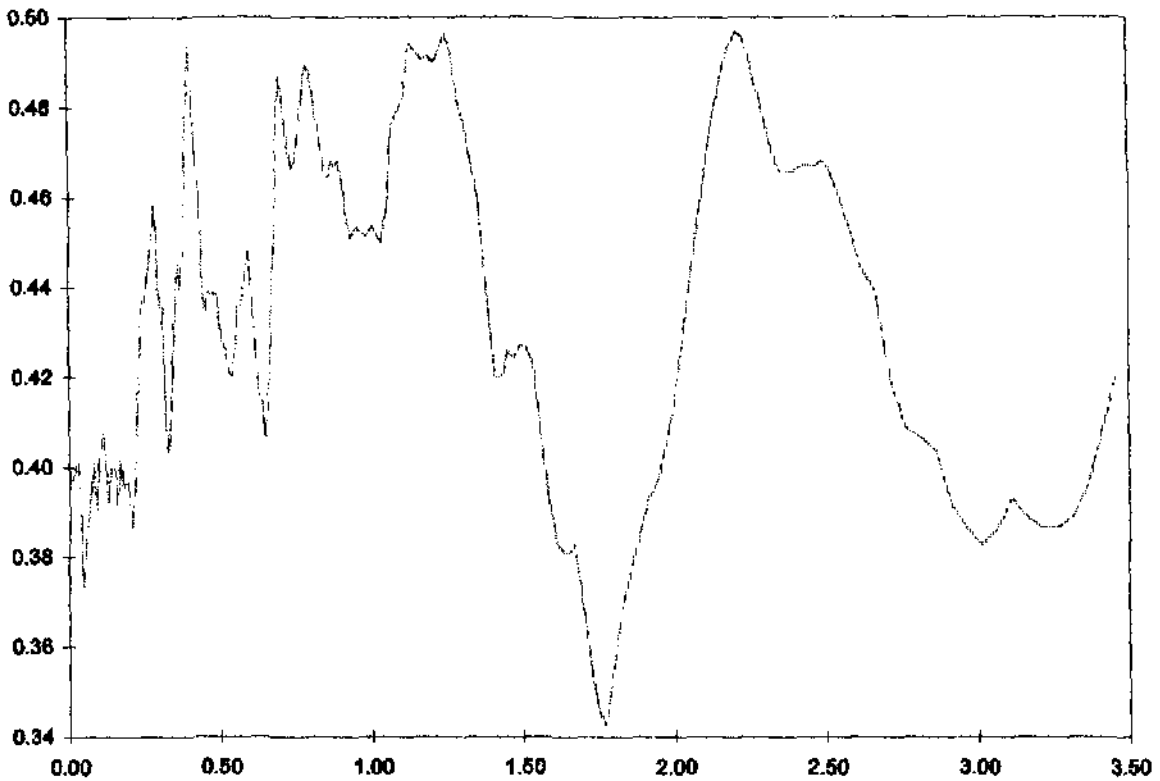


Fig. 4.23.- Desviaciones estándar {S}.

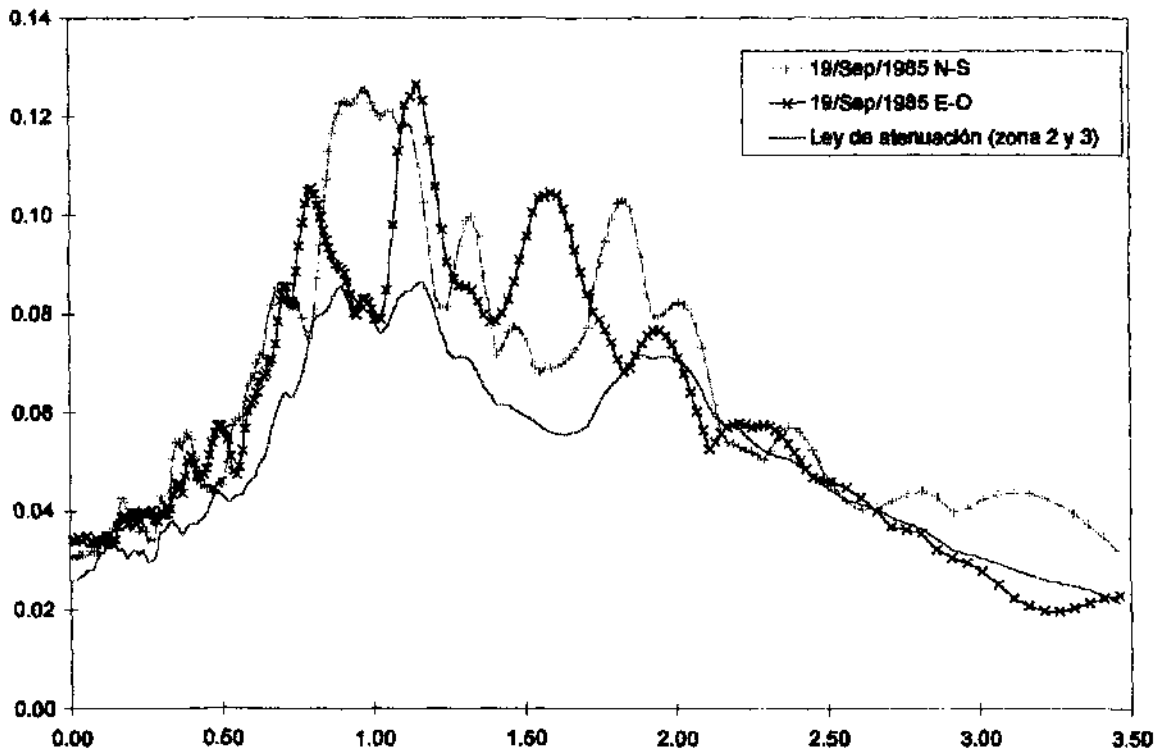


Fig. 4.24.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M' = 8.1$, $R = 533$ km.).

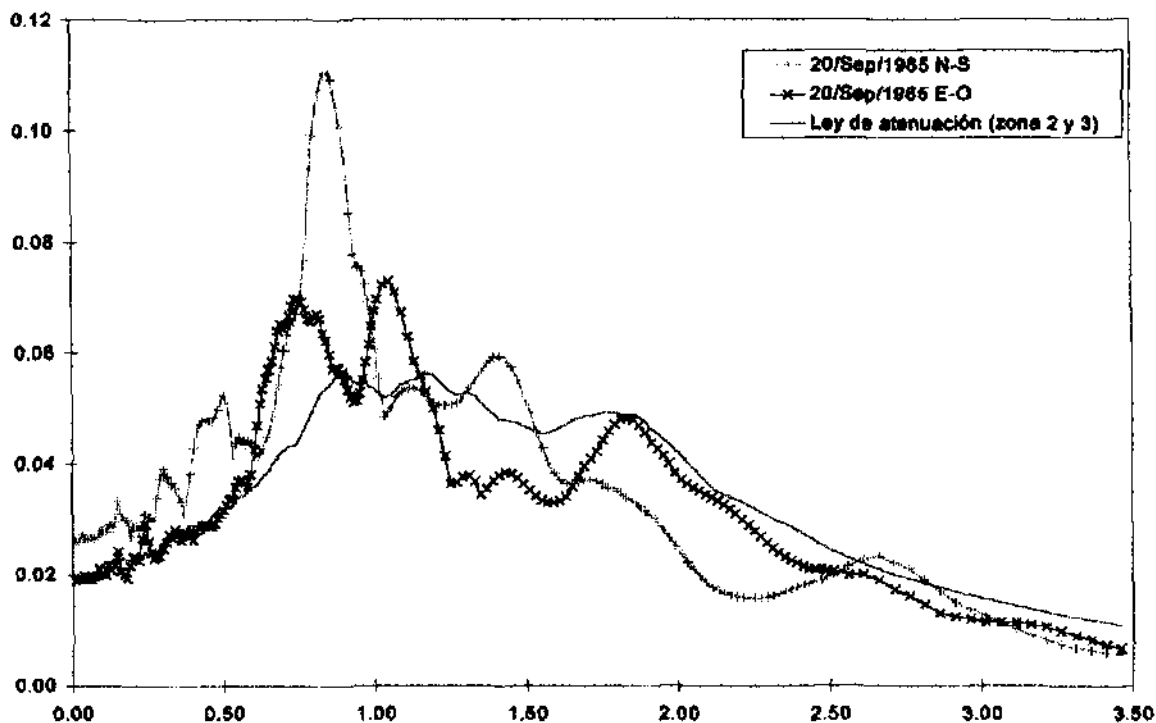


Fig. 4.25.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 20 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.6$, $R=378$ km.).

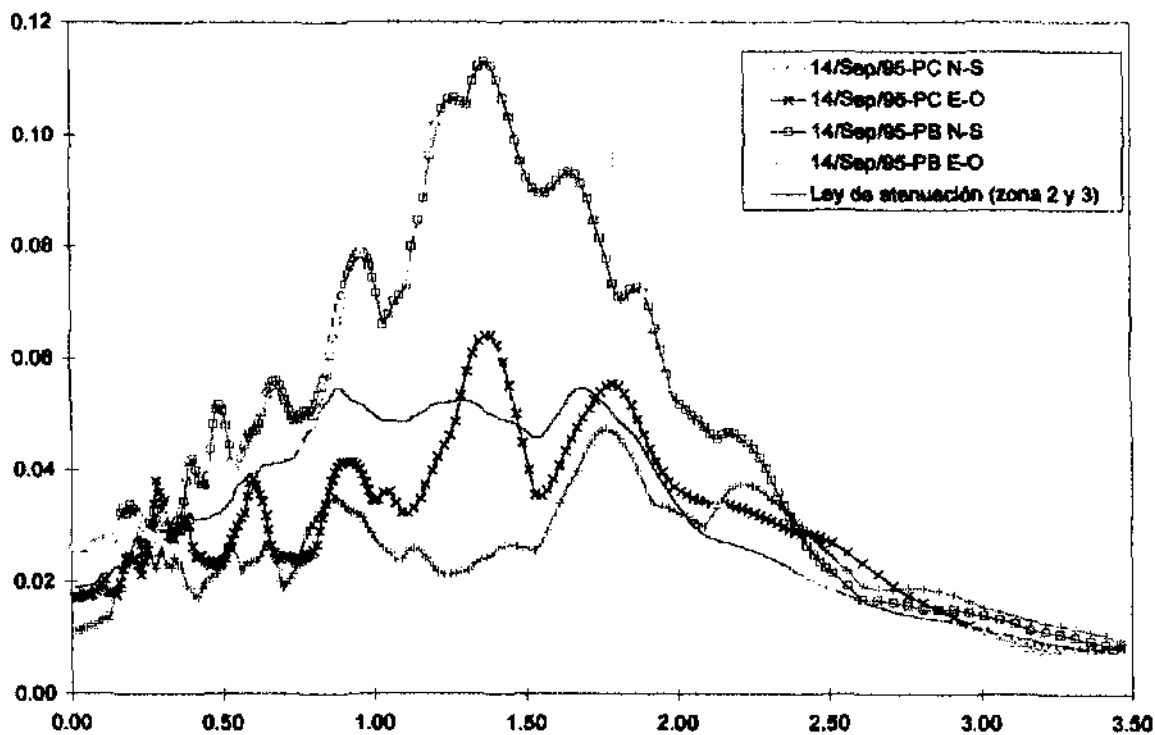


Fig. 4.26.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 14 de septiembre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.2$, $R=251$ km.).

Tabla 4.8.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-6.5422	2.0246	-2.1357	0.3967	0.66	-5.6184	2.2032	-2.3914	0.4157	1.61	-3.8903	1.5604	-1.8395	0.3630
0.02	-6.4955	2.0160	-2.1322	0.3991	0.67	-5.9551	2.2148	-2.3830	0.4358	1.63	-3.5817	1.5660	-1.8961	0.3813
0.03	-6.6123	2.0201	-2.1157	0.4011	0.68	-6.1932	2.2492	-2.3488	0.4597	1.65	-3.3262	1.5850	-1.9604	0.3806
0.04	-6.6179	1.9762	-2.0592	0.3884	0.69	-6.4431	2.2899	-2.3507	0.4791	1.67	-3.1753	1.6155	-2.0228	0.3825
0.05	-6.7889	1.9330	-1.9754	0.3723	0.70	-6.5560	2.3068	-2.3552	0.4870	1.69	-3.2017	1.6453	-2.0582	0.3732
0.06	-6.9180	1.9441	-1.9806	0.3874	0.71	-6.6123	2.3214	-2.3628	0.4811	1.71	-3.3774	1.6841	-2.0748	0.3620
0.07	-6.8359	1.9303	-1.9568	0.3931	0.72	-6.6364	2.3161	-2.3513	0.4790	1.73	-3.6157	1.7483	-2.0819	0.3623
0.08	-6.8541	1.9494	-1.9749	0.4014	0.73	-6.4640	2.2593	-2.3083	0.4893	1.75	-4.3294	1.8219	-2.0682	0.3452
0.09	-6.9181	2.0247	-2.0544	0.3904	0.74	-6.3683	2.2305	-2.2861	0.4682	1.77	-4.7709	1.8911	-2.1020	0.3427
0.10	-7.0455	2.0725	-2.0884	0.3969	0.75	-6.3404	2.2329	-2.2895	0.4665	1.79	-5.1918	1.9355	-2.0888	0.3513
0.11	-6.8075	2.1024	-2.1836	0.4077	0.76	-6.2711	2.2358	-2.3013	0.4723	1.81	-5.5883	1.9748	-2.0736	0.3617
0.12	-7.2601	2.1203	-2.1093	0.4026	0.77	-6.2842	2.2679	-2.3229	0.4789	1.83	-5.9687	2.0259	-2.0750	0.3693
0.13	-7.1401	2.1305	-2.1425	0.3918	0.78	-6.3854	2.2838	-2.3347	0.4889	1.85	-6.3612	2.0749	-2.0715	0.3755
0.14	-6.8709	2.1603	-2.2209	0.3998	0.79	-6.6494	2.3007	-2.3080	0.4890	1.87	-6.7993	2.1070	-2.0405	0.3811
0.15	-6.6754	2.1772	-2.2738	0.3997	0.80	-6.8589	2.3217	-2.2958	0.4882	1.89	-7.1738	2.1230	-2.0014	0.3875
0.16	-6.5898	2.1640	-2.2774	0.3915	0.81	-6.8802	2.3460	-2.3189	0.4834	1.91	-7.5357	2.1273	-1.9507	0.3925
0.17	-6.4128	2.1621	-2.3364	0.4020	0.82	-6.7233	2.3564	-2.3577	0.4783	1.93	-7.9497	2.1243	-1.8820	0.3952
0.18	-6.2306	2.1742	-2.3461	0.3954	0.83	-6.5839	2.3572	-2.3777	0.4748	1.95	-8.4161	2.1334	-1.8188	0.3989
0.19	-5.8731	2.1031	-2.3171	0.3970	0.84	-6.4532	2.3534	-2.3932	0.4703	1.97	-8.8438	2.1394	-1.7587	0.4048
0.20	-5.8471	2.1392	-2.3624	0.3945	0.85	-6.4320	2.3551	-2.3972	0.4644	1.99	-9.2385	2.1397	-1.6972	0.4112
0.21	-5.8994	2.1844	-2.3842	0.3865	0.86	-6.3812	2.3529	-2.4007	0.4651	2.01	-9.5345	2.1398	-1.6520	0.4204
0.22	-5.7303	2.1553	-2.3986	0.3981	0.87	-6.3668	2.3666	-2.4165	0.4682	2.03	-9.7981	2.1317	-1.6022	0.4304
0.23	-5.4442	2.0753	-2.3461	0.4175	0.88	-6.4094	2.3728	-2.4169	0.4668	2.05	-10.0061	2.1209	-1.5585	0.4413
0.24	-5.6071	2.0882	-2.3314	0.4374	0.89	-6.4904	2.3802	-2.4108	0.4681	2.07	-10.0979	2.1088	-1.5326	0.4523
0.25	-5.2453	2.0467	-2.3423	0.4368	0.90	-6.5859	2.3747	-2.3897	0.4655	2.09	-10.0735	2.0810	-1.5070	0.4615
0.26	-4.6644	1.9958	-2.3744	0.4413	0.91	-6.6985	2.3511	-2.3591	0.4598	2.11	-9.8630	2.0514	-1.6097	0.4687
0.27	-4.5213	1.9773	-2.3724	0.4488	0.92	-6.5544	2.3184	-2.3263	0.4541	2.13	-9.7549	2.0475	-1.6268	0.4775
0.28	-4.4840	1.9681	-2.3834	0.4581	0.93	-6.5037	2.2849	-2.2945	0.4507	2.15	-9.6771	2.0469	-1.6415	0.4842
0.29	-5.0078	2.0465	-2.3728	0.4504	0.94	-6.4710	2.2571	-2.2661	0.4525	2.17	-9.7031	2.0644	-1.5811	0.4903
0.30	-5.6729	2.1881	-2.4077	0.4355	0.95	-6.5007	2.2413	-2.2415	0.4534	2.19	-9.7614	2.0884	-1.5836	0.4942
0.31	-5.6559	2.1596	-2.3975	0.4368	0.96	-6.5850	2.2363	-2.2192	0.4523	2.21	-9.8070	2.1083	-1.6036	0.4968
0.32	-5.7240	2.1484	-2.3681	0.4109	0.97	-6.6592	2.2199	-2.1876	0.4521	2.23	-9.7705	2.1243	-1.6328	0.4958
0.33	-6.0054	2.1728	-2.3524	0.4026	0.98	-6.7382	2.2047	-2.1582	0.4514	2.25	-9.7111	2.1378	-1.6628	0.4917
0.34	-5.8053	2.1979	-2.4140	0.4131	0.99	-6.7536	2.1899	-2.1358	0.4522	2.27	-9.7088	2.1503	-1.6826	0.4859
0.35	-5.3395	2.1647	-2.4489	0.4329	1.00	-6.7386	2.1711	-2.1161	0.4539	2.29	-9.7229	2.1657	-1.7034	0.4808
0.36	-4.9405	2.1140	-2.4508	0.4454	1.01	-6.6764	2.1338	-2.0808	0.4522	2.31	-9.8299	2.1699	-1.7279	0.4745
0.37	-4.5397	2.0654	-2.4568	0.4394	1.03	-6.6050	2.0824	-2.0299	0.4509	2.33	-9.9616	2.2269	-1.7469	0.4694
0.38	-4.3823	2.0706	-2.4863	0.4543	1.05	-6.7620	2.0701	-1.9966	0.4584	2.35	-10.1485	2.2537	-1.7529	0.4680
0.39	-4.5081	2.0983	-2.4968	0.4727	1.07	-7.0923	2.0842	-1.9482	0.4761	2.37	-10.3528	2.2699	-1.7420	0.4658
0.40	-4.8234	2.0948	-2.4398	0.4847	1.09	-7.3630	2.1010	-1.9197	0.4788	2.39	-10.5044	2.2798	-1.7324	0.4656
0.41	-4.9761	2.1051	-2.4283	0.4855	1.11	-7.4746	2.1097	-1.9108	0.4821	2.41	-10.5999	2.2898	-1.7334	0.4665
0.42	-4.9143	2.1080	-2.4436	0.4691	1.13	-7.3332	2.1094	-1.9326	0.4841	2.43	-10.6679	2.3044	-1.7447	0.4671
0.43	-5.0156	2.1187	-2.4380	0.4878	1.15	-7.3824	2.1262	-1.9435	0.4928	2.45	-10.7858	2.3112	-1.7429	0.4672
0.44	-5.1787	2.1029	-2.3692	0.4417	1.17	-7.2960	2.1320	-1.9844	0.4908	2.47	-10.8684	2.3141	-1.7321	0.4670
0.45	-5.3471	2.0806	-2.3304	0.4347	1.19	-6.8919	2.0982	-1.9912	0.4913	2.49	-10.9177	2.3177	-1.7323	0.4684
0.46	-5.5623	2.0849	-2.2958	0.4389	1.21	-6.4583	2.0630	-2.0075	0.4901	2.51	-10.8845	2.3299	-1.7401	0.4665
0.47	-5.6725	2.0779	-2.2650	0.4384	1.23	-6.0590	2.0037	-2.0150	0.4928	2.58	-11.1555	2.3745	-1.7770	0.4569
0.48	-5.8713	2.0808	-2.2326	0.4387	1.25	-5.6204	1.9603	-2.0243	0.4984	2.61	-11.4815	2.4504	-1.8269	0.4452
0.49	-5.9167	2.0778	-2.2194	0.4382	1.27	-5.4503	1.9225	-2.0186	0.4917	2.66	-11.8638	2.4870	-1.8171	0.4394
0.50	-5.5792	2.0526	-2.2584	0.4313	1.29	-5.4447	1.9167	-2.0111	0.4821	2.71	-11.9638	2.5081	-1.8328	0.4201
0.51	-5.4056	2.0549	-2.2756	0.4271	1.31	-5.4682	1.9076	-1.9990	0.4762	2.76	-12.1580	2.5403	-1.8497	0.4089
0.52	-5.0060	2.0116	-2.2866	0.4262	1.33	-5.3918	1.8971	-1.9858	0.4890	2.81	-12.2149	2.5671	-1.8806	0.4068
0.53	-4.8257	1.9935	-2.2919	0.4209	1.35	-5.2153	1.8394	-1.9571	0.4597	2.86	-12.0964	2.5603	-1.8990	0.4037
0.54	-4.6340	1.9999	-2.3278	0.4204	1.37	-5.0544	1.7938	-1.9302	0.4483	2.91	-11.7988	2.5209	-1.9083	0.3917
0.55	-4.4524	1.9991	-2.3539	0.4255	1.39	-4.9879	1.7700	-1.9171	0.4319	2.96	-12.0425	2.4941	-1.8385	0.3866
0.56	-4.3646	1.9950	-2.3638	0.4358	1.41	-4.8258	1.7455	-1.9131	0.4200	3.01	-12.3900	2.4801	-1.7697	0.3828
0.57	-4.2855	2.0087	-2.3963	0.4359	1.43	-4.8641	1.7405	-1.9007	0.4203	3.06	-12.8283	2.4577	-1.7084	0.3859
0.58	-4.4008	2.0633	-2.4363	0.4408	1.45	-4.9138	1.7182	-1.8660	0.4257	3.11	-12.7906	2.4354	-1.6802	0.3829
0.59	-4.5115	2.0788	-2.4340	0.4481	1.47	-4.8835	1.6794	-1.8225	0.4242	3.16	-12.9351	2.3913	-1.5880	0.3887
0.60	-4.5683	2.0719	-2.4178	0.4435	1.49	-4.9384	1.6459	-1.7725	0.4270	3.21	-13.1108	2.3491	-1.5118	0.3866
0.61	-4.6536	2.0655	-2.4195	0.4330	1.51	-5.0098	1.6105	-1.7173	0.4267	3.26	-13.3482	2.3221	-1.4442	0.3885
0.62	-4.7929	2.1209	-2.4374	0.4228	1.53	-5.0354	1.5760	-1.6718	0.4238	3.31	-13.5915	2.3114	-1.3960	0.3888
0.63	-4.8487	2.1497	-2.4810	0.4166	1.55	-4.8240	1.5330	-1.6789	0.4117	3.38	-13.8087	2.3009	-1.3859	0.3857
0.64	-4.9390	2.1581	-2.4551	0.4132	1.57	-4.5156	1.5479	-1.7228	0.3990	3.41	-13.5028	2.2974	-1.4061	0.4083
0.65	-5.2889	2.1858	-2.4286	0.4066	1.59	-4.1850	1.5513	-1.7807	0.3896	3.46	-13.4005	2.2889	-1.4322	0.4212

Para esta zona sísmogénica se calcularon las curvas de atenuación (Tabla 4.9, Fig. 4.27) que relacionan a posibles escenarios, conociendo la magnitud y la distancia, con la ordenada espectral máxima del espectro de respuesta generado con estas leyes. Estas curvas también se pueden generar para algún periodo particular, si se quisiera saber cual es la ordenada espectral específica de cualquier escenario para el periodo considerado.

Tabla 4.9.- Pseudoaceleración máxima para diversos escenarios.

R (km)	M A G N I T U D						R (km)	M A G N I T U D					
	6.5	7.0	7.5	8.0	8.2	8.5		6.5	7.0	7.5	8.0	8.2	8.5
200	0.0265	0.0569	0.1828	0.6002	0.9661	1.9730	360	0.0063	0.0183	0.0450	0.1455	0.2342	0.4784
210	0.0243	0.0548	0.1644	0.5404	0.8599	1.7787	390	0.0060	0.0174	0.0429	0.1372	0.2209	0.4511
220	0.0223	0.0503	0.1487	0.4888	0.7858	1.6069	400	0.0076	0.0167	0.0410	0.1256	0.2088	0.4259
230	0.0206	0.0463	0.1350	0.4439	0.7146	1.4591	410	0.0073	0.0159	0.0391	0.1225	0.1972	0.4027
240	0.0190	0.0428	0.1231	0.4046	0.6512	1.3299	420	0.0070	0.0153	0.0374	0.1160	0.1867	0.3812
250	0.0177	0.0396	0.1125	0.3700	0.5956	1.2163	430	0.0067	0.0146	0.0358	0.1100	0.1769	0.3613
260	0.0165	0.0369	0.1033	0.3395	0.5464	1.1160	440	0.0065	0.0141	0.0343	0.1044	0.1679	0.3429
270	0.0154	0.0344	0.0950	0.3124	0.5029	1.0270	450	0.0063	0.0136	0.0329	0.0992	0.1596	0.3257
280	0.0144	0.0321	0.0877	0.2883	0.4640	0.9477	460	0.0060	0.0131	0.0316	0.0944	0.1518	0.3099
290	0.0136	0.0301	0.0811	0.2667	0.4293	0.8768	470	0.0058	0.0127	0.0304	0.0899	0.1446	0.2949
300	0.0128	0.0283	0.0752	0.2473	0.3982	0.8131	480	0.0056	0.0122	0.0292	0.0857	0.1378	0.2810
310	0.0120	0.0266	0.0699	0.2299	0.3701	0.7589	490	0.0055	0.0118	0.0281	0.0818	0.1315	0.2682
320	0.0113	0.0251	0.0652	0.2142	0.3448	0.7041	500	0.0053	0.0115	0.0271	0.0786	0.1258	0.2561
330	0.0107	0.0237	0.0608	0.1999	0.3218	0.6572	510	0.0051	0.0111	0.0261	0.0757	0.1201	0.2446
340	0.0102	0.0224	0.0569	0.1870	0.3010	0.6147	520	0.0050	0.0108	0.0252	0.0730	0.1149	0.2342
350	0.0097	0.0213	0.0533	0.1752	0.2820	0.5759	530	0.0048	0.0104	0.0243	0.0704	0.1100	0.2243
360	0.0092	0.0202	0.0500	0.1644	0.2647	0.5405	540	0.0047	0.0101	0.0236	0.0680	0.1054	0.2149
370	0.0087	0.0192	0.0473	0.1546	0.2488	0.5081	550	0.0046	0.0098	0.0227	0.0657	0.1011	0.2061

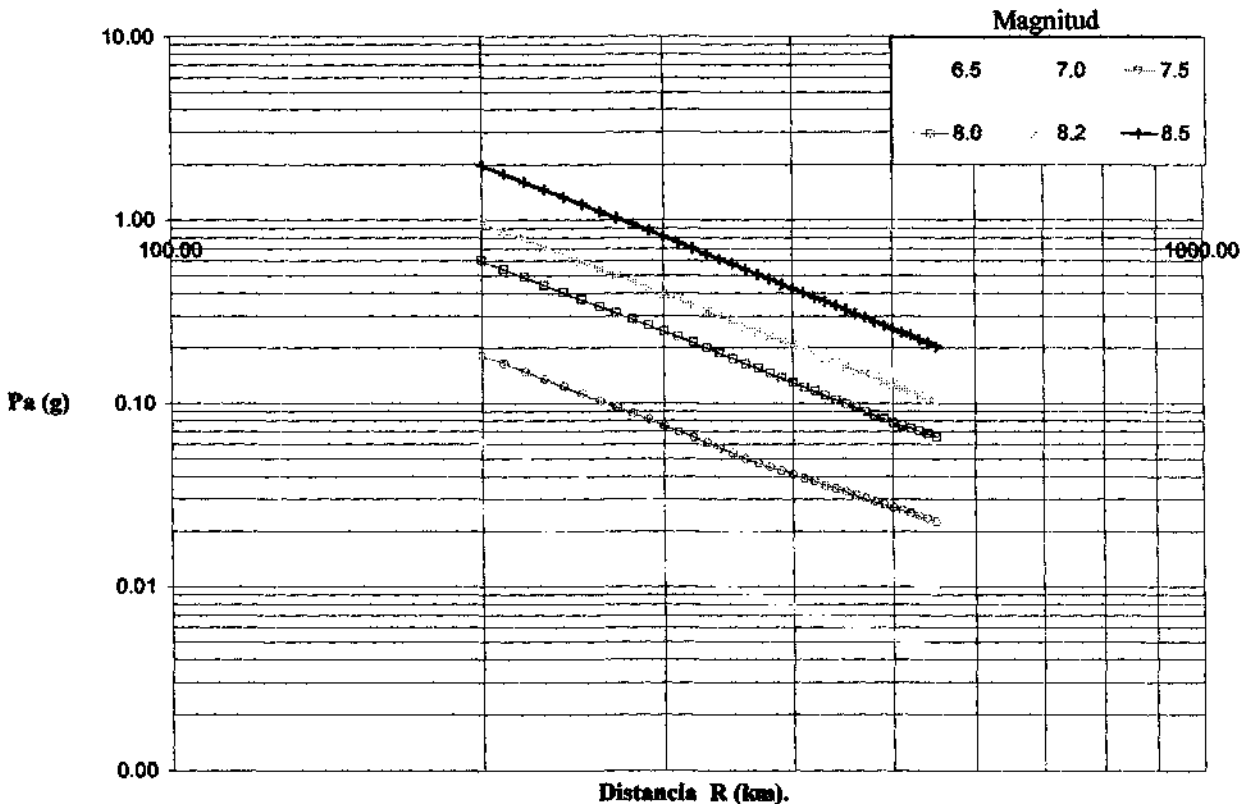


Fig. 4.27.- Curvas de atenuación sísmica para Pa máximas (Escala logarítmica).

4.5.4.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las respuestas espectrales máximas de las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 1, 4, 6, 9, 10, 11a, 11b, 22a, 22b, 23a, 23b y 26. Todos ellos están relacionados con sismos fuertes ($M > 6.9$), seleccionados con la intención de predecir movimientos del terreno para escenarios máximos esperados, cuyos focos estuvieran dentro de estas zonas sismogénicas de mecanismo similar. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.10) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.28 para {b} y 4.29 para {S}. Se puede observar en la figura 4.28, que los parámetros b_2 y b_3 del vector de coeficientes de atenuación cumplen las condiciones que impone el modelo matemático usado. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

El ajuste del espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 (Fig. 4.30) con el obtenido por estas leyes de zonas combinadas, es mejor que el calculado con las leyes de la zona sismogénica 2 (Fig. 4.12), viceversa a lo que sucede con los sismos del 20 de septiembre de 1985 y del 14 de septiembre de 1995 (Figs. 4.31 y 4.32), en el que usando las leyes de zonas independientes el ajuste es un poco mejor (Figs. 4.13 y 4.21). Por ello, se recomienda el uso de estas leyes para predecir espectros de sismos característicos, y las leyes de zonas independientes (Incisos 4.5.2.2 y 4.5.3.2) para sismos de actividad de fondo.

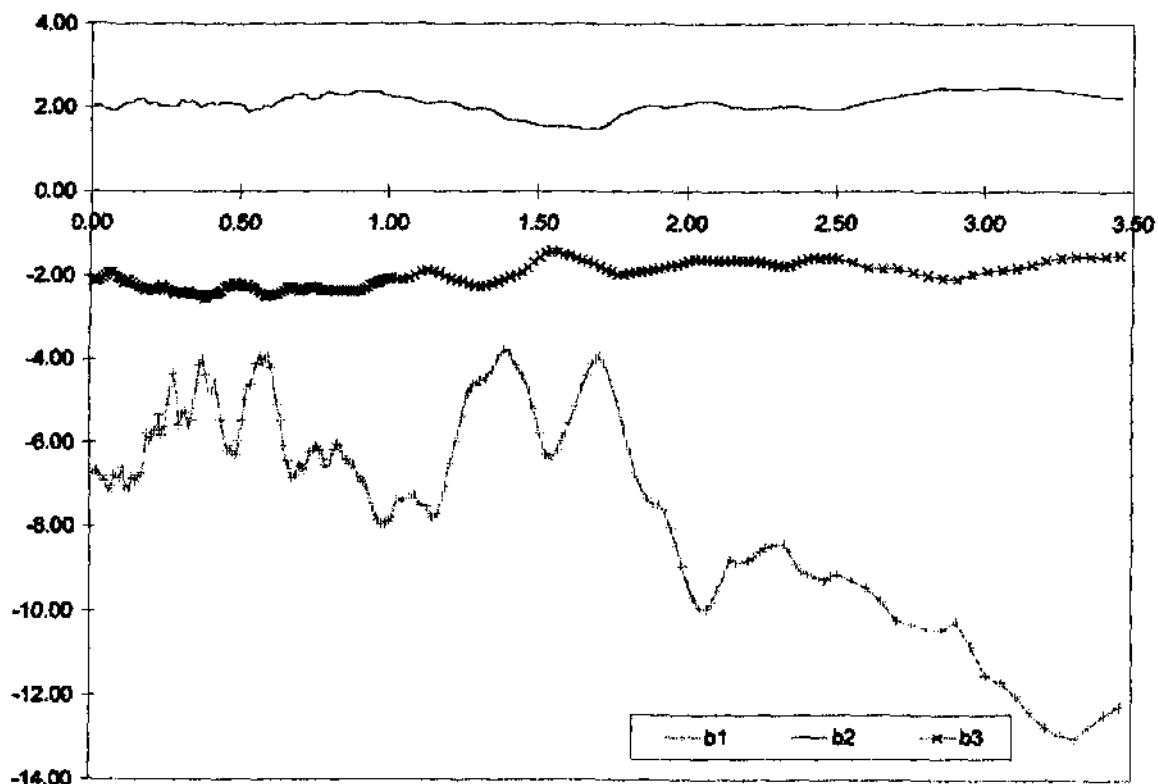


Fig. 4.28.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$

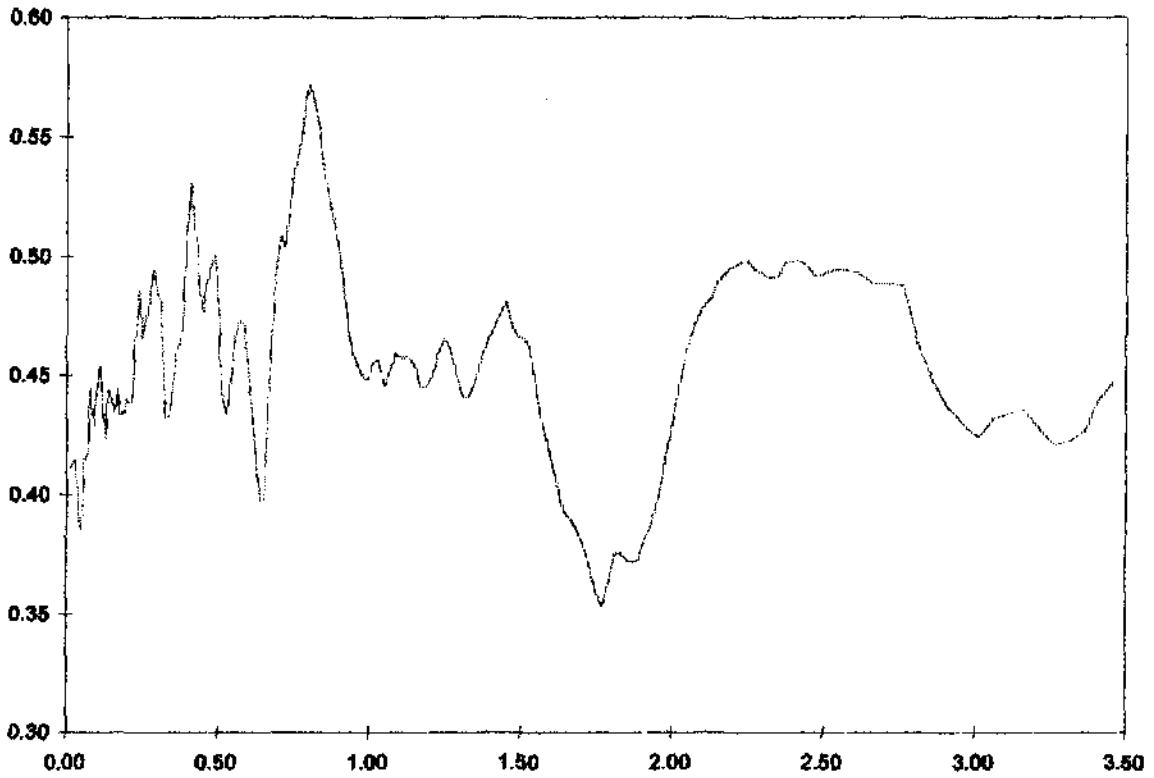


Fig. 4.29.- Desviaciones estándar {S}.

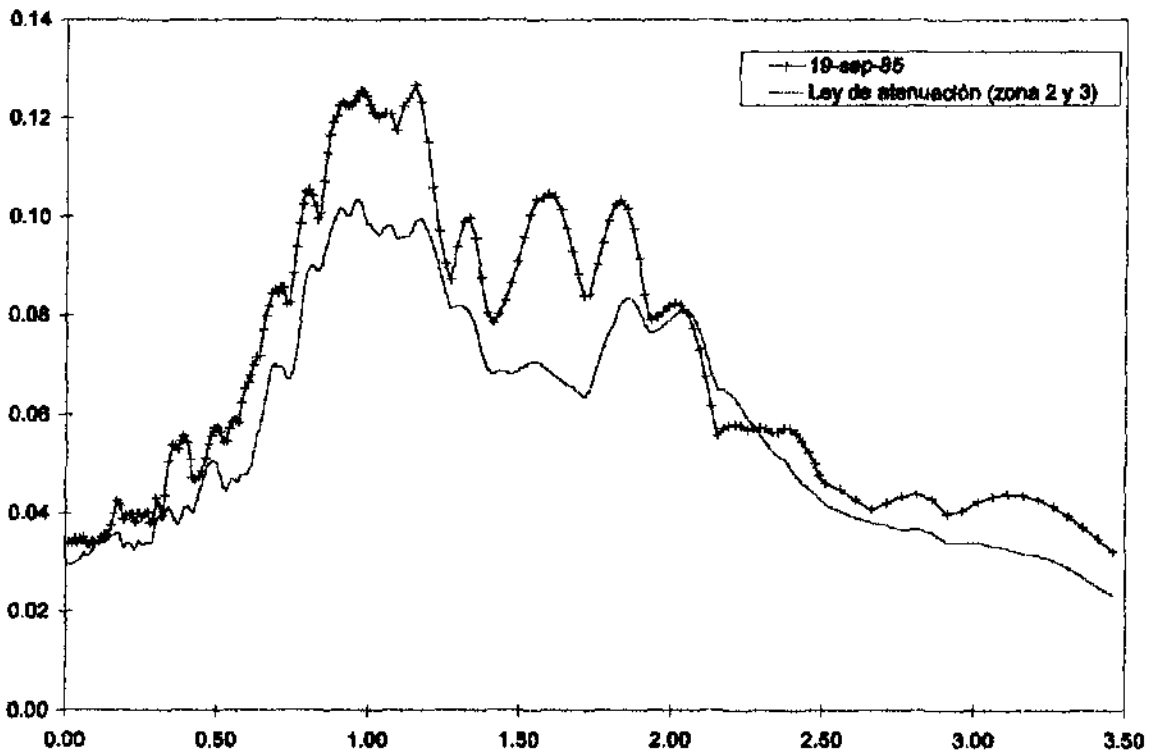


Fig. 4.30.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=8.1$, $R=533$ km.).

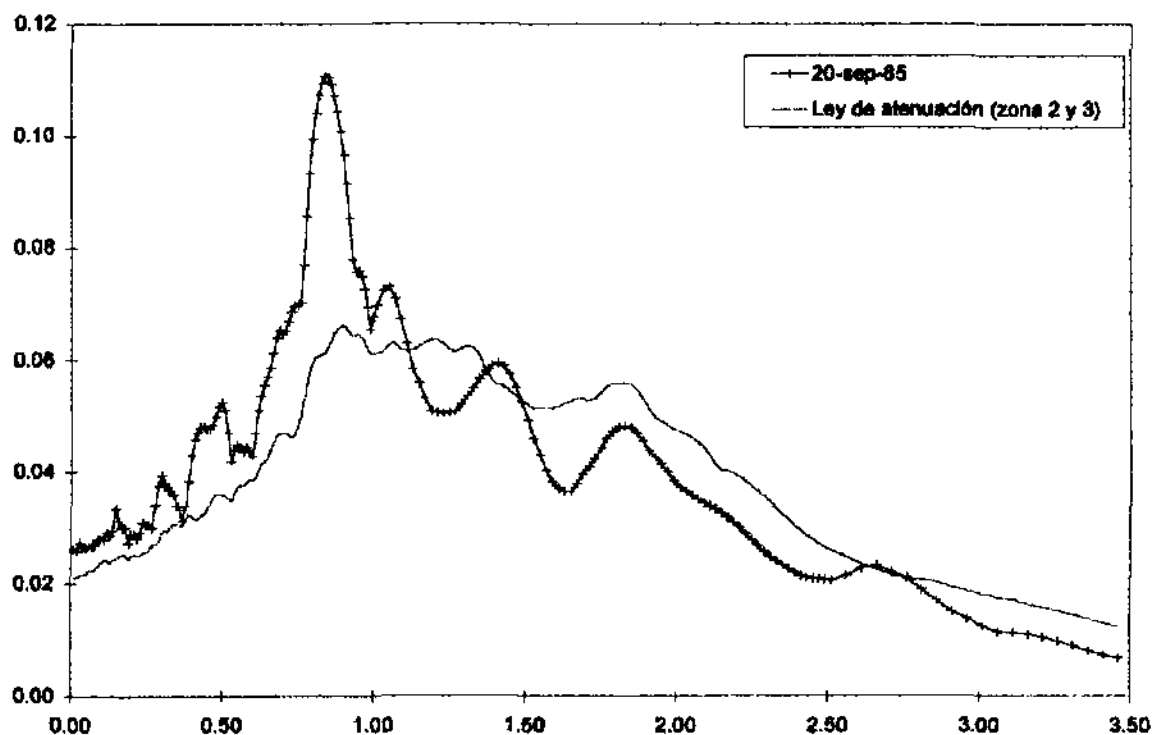


Fig. 4.31.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 20 de septiembre de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.60$, $R=378$ km.).

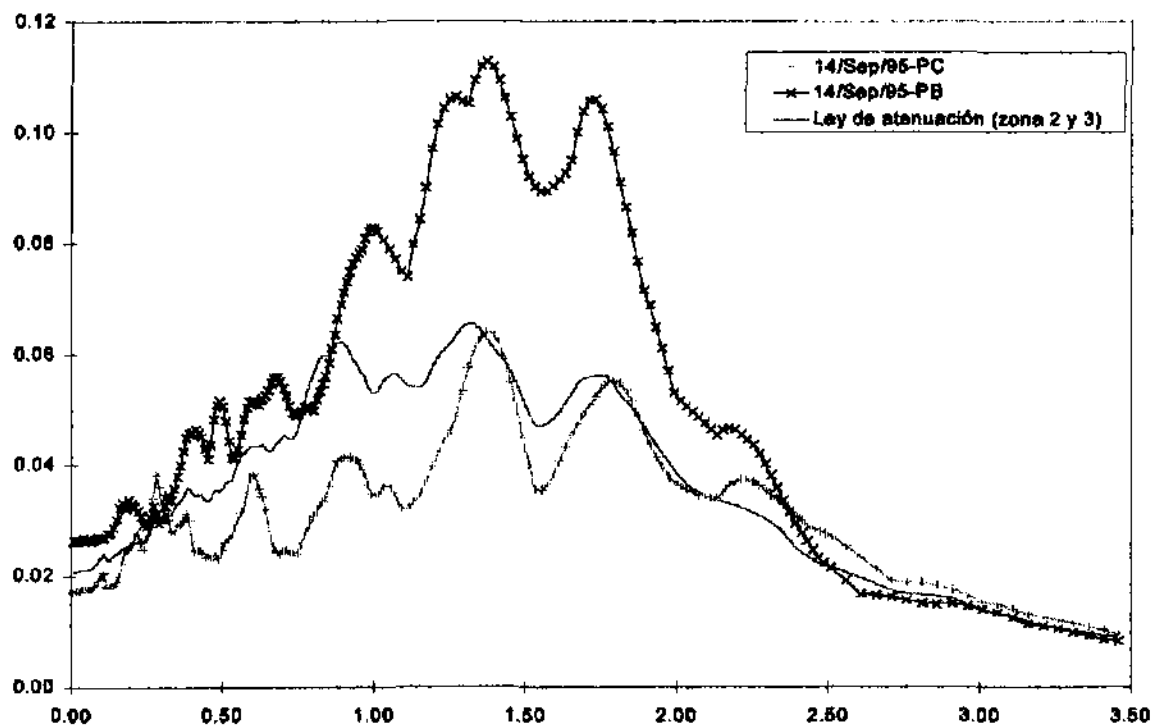


Fig. 4.32.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 14 de septiembre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=7.2$, $R=251$ km.).

Tabla 4.10.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-6.7293	2.0568	-2.1264	0.4109	0.66	-6.4203	2.2408	-2.2698	0.4182	1.61	-5.6225	1.5338	-1.5183	0.4098
0.02	-6.6498	2.0429	-2.1221	0.4128	0.67	-6.6122	2.2594	-2.2782	0.4448	1.63	-5.1255	1.5154	-1.5573	0.3978
0.03	-6.7676	2.0566	-2.1178	0.4145	0.68	-6.8163	2.2981	-2.2869	0.4737	1.65	-4.7011	1.4959	-1.6022	0.3919
0.04	-6.8083	2.0032	-2.0422	0.3889	0.69	-6.7435	2.3175	-2.3218	0.4939	1.67	-4.3510	1.4972	-1.6608	0.3894
0.05	-6.9035	1.9797	-1.9945	0.3657	0.70	-6.5089	2.3194	-2.3636	0.5038	1.69	-4.0846	1.5052	-1.7151	0.3843
0.06	-7.1982	1.9803	-1.9173	0.4150	0.71	-6.5847	2.3198	-2.3512	0.5088	1.71	-3.9012	1.5211	-1.7671	0.3764
0.07	-7.0358	1.9382	-1.9183	0.4173	0.72	-6.6330	2.2905	-2.3070	0.5043	1.73	-4.0730	1.5934	-1.8291	0.3694
0.08	-6.7736	1.9518	-1.9752	0.4451	0.73	-6.4022	2.2318	-2.2724	0.5105	1.75	-4.5725	1.7143	-1.8950	0.3602
0.09	-6.8097	2.0166	-2.0486	0.4289	0.74	-6.2155	2.1981	-2.2598	0.5244	1.77	-4.9932	1.8240	-1.9611	0.3531
0.10	-6.8340	2.0401	-2.0676	0.4416	0.75	-6.1696	2.2001	-2.2660	0.5352	1.79	-5.5504	1.8931	-1.9541	0.3613
0.11	-6.5826	2.0685	-2.1689	0.4542	0.76	-6.0857	2.2204	-2.2988	0.5381	1.81	-6.1355	1.9408	-1.9175	0.3747
0.12	-7.0173	2.1185	-2.1347	0.4398	0.77	-6.1810	2.2749	-2.3423	0.5452	1.83	-6.6741	2.0015	-1.9036	0.3762
0.13	-7.1076	2.1009	-2.1007	0.4235	0.78	-6.3565	2.3199	-2.3614	0.5562	1.85	-7.0365	2.0371	-1.8890	0.3729
0.14	-6.6483	2.1131	-2.1591	0.4442	0.79	-6.5273	2.3440	-2.3587	0.5652	1.87	-7.3009	2.0525	-1.8674	0.3718
0.15	-6.9108	2.1705	-2.2151	0.4389	0.80	-6.5899	2.3509	-2.3607	0.5713	1.89	-7.4443	2.0465	-1.8409	0.3729
0.16	-6.7664	2.1881	-2.2576	0.4337	0.81	-6.3698	2.3404	-2.3677	0.5661	1.91	-7.4413	2.0262	-1.8215	0.3810
0.17	-6.7130	2.2094	-2.2936	0.4443	0.82	-6.1580	2.3241	-2.3844	0.5623	1.93	-7.6062	2.0151	-1.7650	0.3874
0.18	-6.4618	2.2101	-2.3365	0.4333	0.83	-6.0178	2.2973	-2.3736	0.5552	1.95	-8.0112	2.0422	-1.7542	0.3665
0.19	-5.7636	2.0943	-2.3121	0.4346	0.84	-6.0723	2.2898	-2.3545	0.5474	1.97	-8.4383	2.0715	-1.7228	0.4092
0.20	-5.9381	2.1219	-2.3140	0.4402	0.85	-6.3075	2.3123	-2.3410	0.5333	1.99	-8.9070	2.0951	-1.7686	0.4218
0.21	-5.7917	2.1119	-2.3243	0.4383	0.86	-6.3789	2.3180	-2.3331	0.5285	2.01	-9.3270	2.1152	-1.6335	0.4362
0.22	-5.7031	2.1122	-2.3399	0.4419	0.87	-6.4492	2.3392	-2.3450	0.5224	2.03	-9.6709	2.1384	-1.6073	0.4493
0.23	-5.3221	2.0213	-2.2897	0.4679	0.88	-6.5068	2.3629	-2.3633	0.5186	2.05	-9.9175	2.1568	-1.5916	0.4612
0.24	-5.8170	2.0486	-2.2373	0.4854	0.89	-6.5977	2.3857	-2.3759	0.5098	2.07	-9.9398	2.1561	-1.5899	0.4701
0.25	-5.6137	2.0588	-2.2817	0.4655	0.90	-6.8032	2.4078	-2.3692	0.5008	2.09	-9.7934	2.1462	-1.6058	0.4767
0.26	-5.0967	2.0344	-2.3999	0.4732	0.91	-6.6582	2.3962	-2.3461	0.4923	2.11	-9.4979	2.1252	-1.6337	0.4806
0.27	-4.7631	2.0283	-2.3786	0.4779	0.92	-6.9180	2.3726	-2.3088	0.4907	2.13	-9.1681	2.0902	-1.6377	0.4828
0.28	-4.3680	2.0147	-2.4275	0.4682	0.93	-7.0630	2.3562	-2.2618	0.4886	2.15	-8.7813	2.0140	-1.6264	0.4891
0.29	-4.6381	2.0294	-2.3986	0.4849	0.94	-7.3084	2.3533	-2.2202	0.4838	2.17	-8.8116	2.0127	-1.6188	0.4822
0.30	-5.5725	2.1568	-2.3930	0.4865	0.95	-7.5818	2.3587	-2.1859	0.4582	2.19	-8.8189	2.0101	-1.6139	0.4949
0.31	-5.2977	2.1851	-2.4477	0.4815	0.96	-7.7476	2.3628	-2.1594	0.4544	2.21	-8.7815	2.0040	-1.6151	0.4661
0.32	-5.2515	2.1237	-2.4037	0.4538	0.97	-7.8438	2.3550	-2.1358	0.4518	2.23	-8.7057	2.0010	-1.6277	0.4979
0.33	-5.5939	2.1368	-2.3802	0.4325	0.98	-7.9098	2.3315	-2.0983	0.4494	2.25	-8.5579	1.9985	-1.6492	0.4679
0.34	-5.4289	2.1809	-2.4136	0.4323	0.99	-7.8985	2.3009	-2.0645	0.4485	2.27	-8.4691	2.0006	-1.6747	0.4948
0.35	-4.9990	2.1288	-2.4457	0.4431	1.00	-7.9082	2.2910	-2.0503	0.4492	2.29	-8.4281	2.0184	-1.7080	0.4931
0.36	-4.5508	2.0636	-2.4375	0.4568	1.01	-7.7611	2.2716	-2.0502	0.4564	2.31	-8.3958	2.0351	-1.7394	0.4915
0.37	-4.1254	2.0212	-2.4557	0.4610	1.03	-7.3754	2.2624	-2.0687	0.4584	2.33	-8.3918	2.0431	-1.7555	0.4909
0.38	-3.9781	2.0696	-2.5370	0.4653	1.05	-7.3205	2.2436	-2.0834	0.4463	2.35	-8.5723	2.0452	-1.7333	0.4917
0.39	-4.3565	2.1050	-2.5129	0.4872	1.07	-7.3144	2.2214	-2.0555	0.4529	2.37	-8.8982	2.0417	-1.6806	0.4974
0.40	-4.7595	2.1008	-2.4410	0.5162	1.09	-7.2257	2.1516	-1.9844	0.4592	2.39	-9.0432	2.0146	-1.6255	0.4979
0.41	-4.7671	2.1027	-2.4447	0.5322	1.11	-7.4750	2.1126	-1.9944	0.4570	2.41	-9.1168	1.9853	-1.5823	0.4986
0.42	-4.4989	2.0716	-2.4514	0.5129	1.13	-7.5160	2.0982	-1.8871	0.4583	2.43	-9.1515	1.9694	-1.5817	0.4974
0.43	-4.8257	2.0937	-2.4217	0.5082	1.15	-7.7890	2.1379	-1.8758	0.4542	2.45	-9.2178	1.9704	-1.5568	0.4949
0.44	-5.4513	2.1305	-2.3615	0.4830	1.17	-7.6868	2.1619	-1.9214	0.4452	2.47	-9.2707	1.9672	-1.5469	0.4915
0.45	-5.8513	2.1215	-2.2809	0.4771	1.19	-7.0450	2.1439	-2.0007	0.4499	2.49	-9.1682	1.9604	-1.5594	0.4918
0.46	-6.1808	2.1312	-2.2374	0.4861	1.21	-6.4722	2.1251	-2.0729	0.4503	2.51	-9.1070	1.9854	-1.5786	0.4934
0.47	-6.1521	2.1264	-2.2247	0.4910	1.23	-5.9706	2.0825	-2.1040	0.4595	2.53	-9.2580	2.0451	-1.6631	0.4947
0.48	-6.1430	2.1039	-2.1984	0.4980	1.25	-5.3546	2.0278	-2.1395	0.4658	2.55	-9.4287	2.1589	-1.7874	0.4930
0.49	-6.2905	2.0930	-2.1827	0.5007	1.27	-4.7733	1.9837	-2.1828	0.4808	2.61	-9.7437	2.2138	-1.8119	0.4887
0.50	-5.9492	2.0834	-2.2023	0.4809	1.29	-4.5995	2.0009	-2.2313	0.4497	2.71	-10.2138	2.2749	-1.8181	0.4686
0.51	-5.4495	2.0559	-2.2517	0.4528	1.31	-4.5091	2.0004	-2.2448	0.4411	2.78	-10.3114	2.3404	-1.8093	0.4878
0.52	-4.9762	1.9788	-2.2351	0.4378	1.33	-4.4305	1.9785	-2.2308	0.4408	2.81	-10.4108	2.4251	-1.8623	0.4646
0.53	-4.6931	1.9162	-2.2065	0.4336	1.35	-4.2845	1.9253	-2.1916	0.4476	2.86	-10.4287	2.4723	-2.0428	0.4481
0.54	-4.5978	1.9527	-2.2614	0.4424	1.37	-3.9754	1.8315	-2.1308	0.4569	2.91	-10.2367	2.4607	-2.0672	0.4367
0.55	-4.3962	1.9877	-2.3091	0.4847	1.39	-3.7567	1.7900	-2.0697	0.4638	2.96	-10.8466	2.4422	-1.9479	0.4289
0.56	-4.1148	1.9725	-2.3601	0.4676	1.41	-3.8334	1.7116	-2.0110	0.4697	3.01	-11.5274	2.4653	-1.8689	0.4239
0.57	-3.9057	1.9846	-2.4112	0.4732	1.43	-4.1194	1.7130	-1.9659	0.4759	3.08	-11.7110	2.4662	-1.8463	0.4320
0.58	-4.0388	2.0574	-2.4778	0.4714	1.45	-4.3765	1.6956	-1.9032	0.4808	3.11	-12.0102	2.4788	-1.8164	0.4339
0.59	-3.9526	2.0683	-2.4894	0.4704	1.47	-4.6801	1.6475	-1.7850	0.4702	3.18	-12.3930	2.4464	-1.7193	0.4357
0.60	-3.8180	2.0300	-2.4614	0.4537	1.48	-5.1824	1.6015	-1.8565	0.4662	3.21	-12.7519	2.4157	-1.6258	0.4281
0.61	-4.2007	2.0585	-2.4481	0.4387	1.51	-5.7609	1.5733	-1.6258	0.4653	3.26	-12.9510	2.3967	-1.5616	0.4210
0.62	-4.7321	2.1208	-2.4333	0.4260	1.53	-6.2436	1.5582	-1.4281	0.4623	3.31	-13.0127	2.3606	-1.5259	0.4222
0.63	-5.0741	2.1617	-2.4230	0.4098	1.55	-6.3365	1.5580	-1.4120	0.4452	3.36	-12.7267	2.3179	-1.5280	0.4264
0.64	-5.4433	2.1839	-2.3894	0.3974	1.57	-6.1504	1.5492	-1.4322	0.4300	3.41	-12.4453	2.2673	-1.5206	0.4400
0.65	-6.0681	2.2287	-2.3360	0.3978	1.59	-6.8473	1.5423	-1.4736	0.4202	3.46	-12.2848	2.2301	-1.5132	0.4477

Para esta zona sismogénica se calcularon las curvas de atenuación (Tabla 4.11, Fig. 4.33) que relacionan a posibles escenarios, conociendo la magnitud y la distancia, con la ordenada espectral máxima del espectro de respuesta generado con estas leyes. Estas curvas también se pueden generar para algún periodo particular, si se quisiera saber cual es la ordenada espectral específica de cualquier escenario para el periodo considerado.

Tabla 4.11.- Pseudoaceleración espectral máxima para diversos escenarios.

R (km)	MAGNITUD						R (km)	MAGNITUD					
	6.5	7.0	7.5	8.0	8.2	8.5		6.5	7.0	7.5	8.0	8.2	8.5
200	0.0277	0.0687	0.2373	0.6691	1.1154	2.2870	350	0.0102	0.0215	0.0514	0.1712	0.2771	0.5706
210	0.0257	0.0633	0.1870	0.6217	1.0052	2.0721	360	0.0097	0.0206	0.0485	0.1616	0.2616	0.5386
220	0.0239	0.0576	0.1694	0.5832	0.9116	1.8773	370	0.0094	0.0196	0.0462	0.1527	0.2472	0.5091
230	0.0223	0.0527	0.1540	0.5123	0.8292	1.7076	380	0.0090	0.0189	0.0441	0.1446	0.2390	0.4818
240	0.0208	0.0484	0.1405	0.4577	0.7570	1.5588	390	0.0087	0.0184	0.0422	0.1370	0.2217	0.4565
250	0.0196	0.0446	0.1287	0.4204	0.6894	1.4279	400	0.0084	0.0177	0.0403	0.1299	0.2103	0.4331
260	0.0184	0.0411	0.1182	0.3836	0.6371	1.3120	410	0.0081	0.0171	0.0386	0.1234	0.1938	0.4114
270	0.0173	0.0381	0.1089	0.3527	0.5871	1.2051	420	0.0078	0.0165	0.0371	0.1173	0.1869	0.3911
280	0.0164	0.0354	0.1008	0.3262	0.5425	1.1172	430	0.0075	0.0159	0.0357	0.1117	0.1806	0.3723
290	0.0155	0.0330	0.0932	0.3006	0.5026	1.0380	440	0.0073	0.0154	0.0344	0.1064	0.1723	0.3547
300	0.0147	0.0312	0.0865	0.2804	0.4688	0.9612	450	0.0071	0.0149	0.0331	0.1015	0.1643	0.3383
310	0.0139	0.0296	0.0805	0.2634	0.4344	0.8946	460	0.0069	0.0145	0.0319	0.0972	0.1588	0.3230
320	0.0133	0.0281	0.0751	0.2503	0.4062	0.8344	470	0.0066	0.0140	0.0308	0.0933	0.1498	0.3086
330	0.0126	0.0268	0.0702	0.2339	0.3786	0.7797	480	0.0065	0.0136	0.0297	0.0898	0.1437	0.2951
340	0.0121	0.0256	0.0657	0.2190	0.3545	0.7301	490	0.0063	0.0132	0.0288	0.0861	0.1380	0.2824
350	0.0115	0.0244	0.0616	0.2054	0.3325	0.6846	500	0.0061	0.0129	0.0280	0.0827	0.1327	0.2705
360	0.0110	0.0233	0.0579	0.1930	0.3124	0.6434	510	0.0059	0.0125	0.0273	0.0795	0.1277	0.2594
370	0.0106	0.0224	0.0545	0.1817	0.2940	0.6055	520	0.0057	0.0122	0.0267	0.0765	0.1229	0.2468

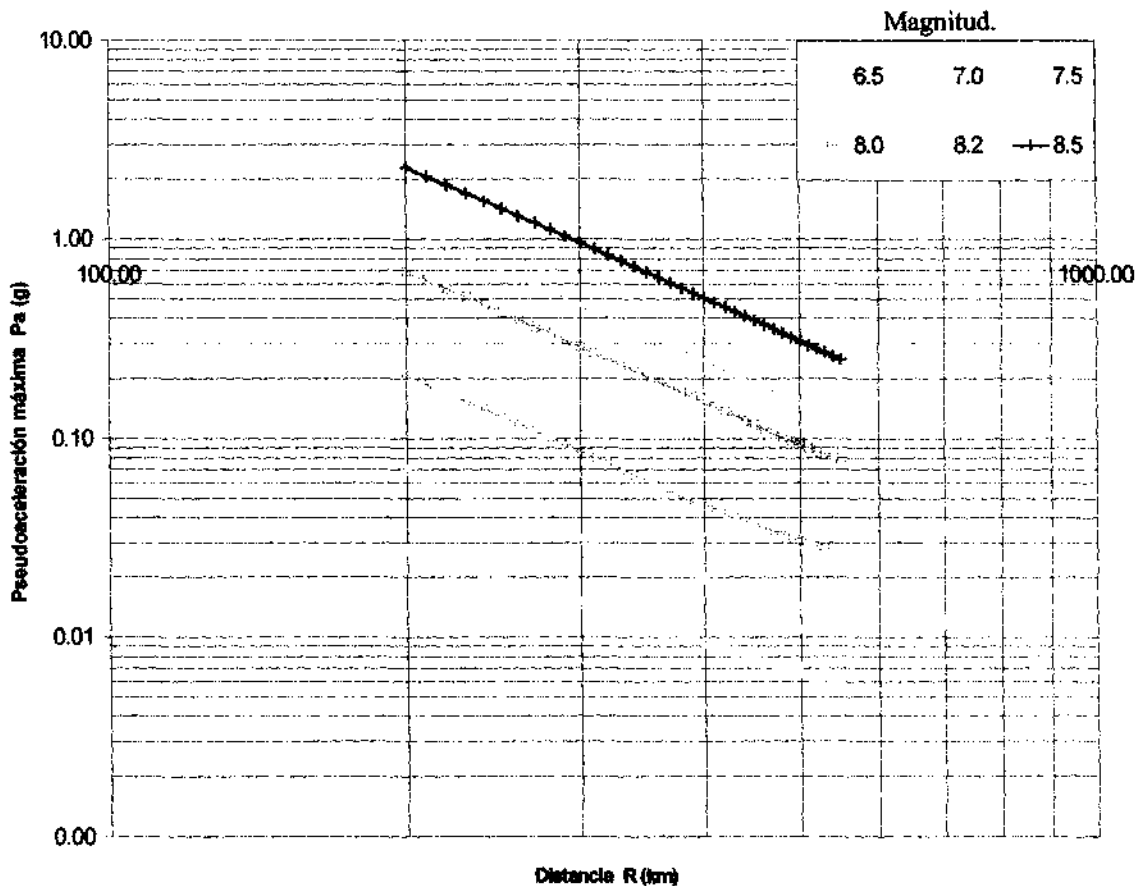


Fig. 4.33.- Curvas de atenuación sísmica para Pa máximas (Escala logarítmica).

4.5.5 LEYES DE ATENUACIÓN PARA LAS ZONA SISMOGÉNICA 4

4.5.5.1 Utilizando los canales N-S y E-O como registros independientes

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta asociados a los acelerogramas de los registros número 8, 13, 14a, 14b, 18, 24a y 24b. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.12) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.34 para {b} y 4.35 para {S}. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Como se puede ver en la figura 4.34, los vectores coeficientes b_2 y b_3 en general no respetan su signo de proporcionalidad con los parámetros de la fuente, consecuencia de que los datos no se ajustan al modelo de regresión. Por lo anterior, la predicción de espectros de respuesta con estas leyes puede conducir a resultados cuestionables, que aunque se ajustan más o menos bien a los registros fuente (Figs. 4.36 y 4.37) no asegura que lo hagan a otros escenarios. No obstante la elección de éstas no tiene sentido tomando en cuenta que la zona en particular no genera peligro sísmico importante a la ciudad de Puebla.

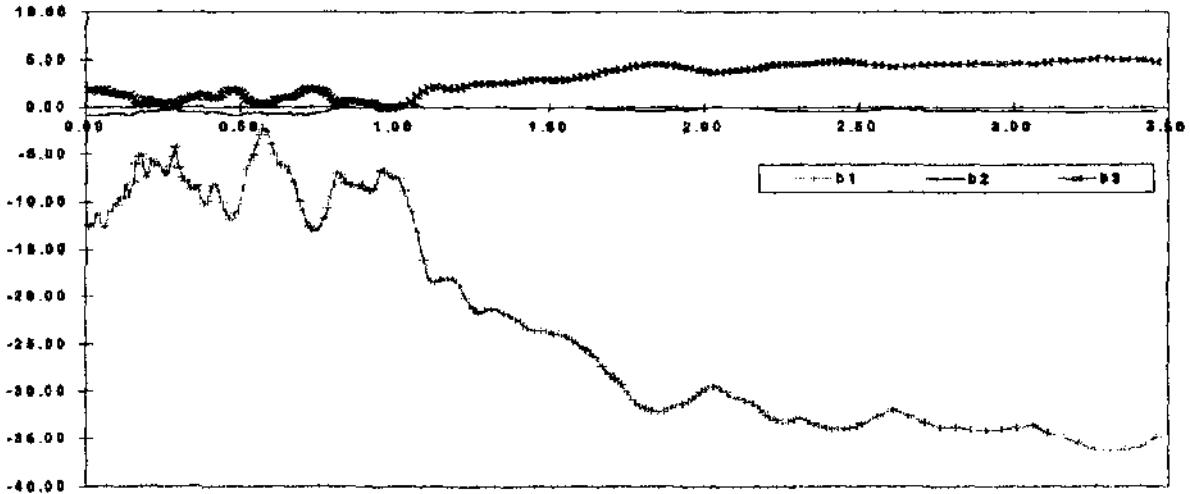


Fig. 4.34.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.
 $\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$

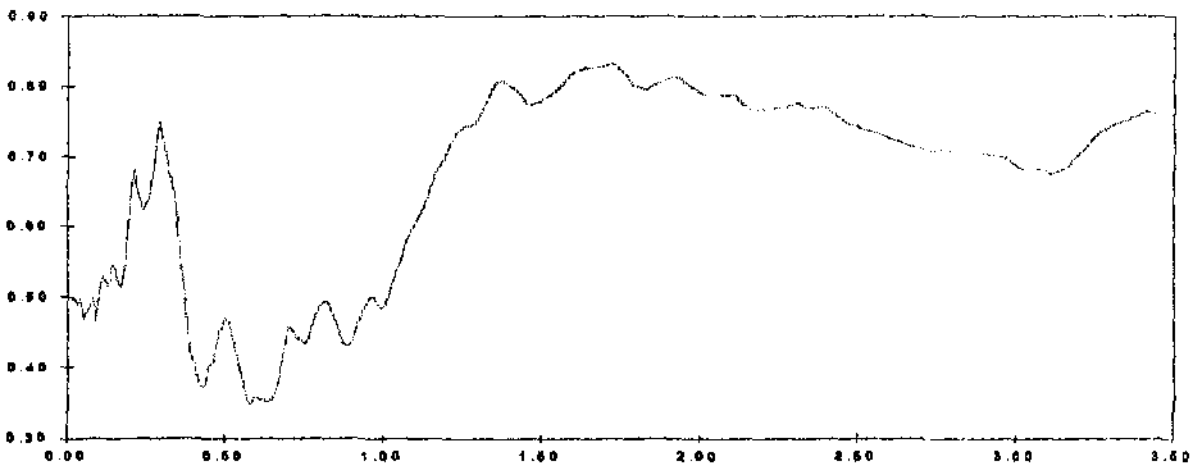


Fig. 4.35.- Desviaciones estándar {S}.

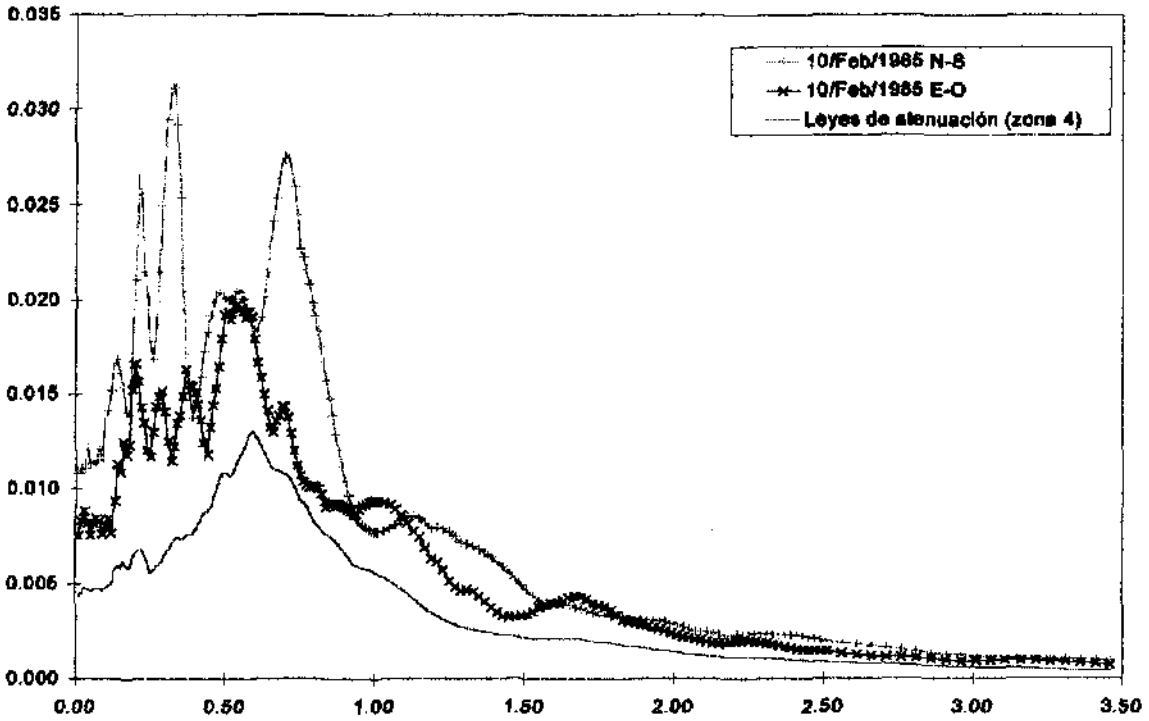


Fig. 4.36.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 10 de febrero de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=5.2$, $R=459$ km.).

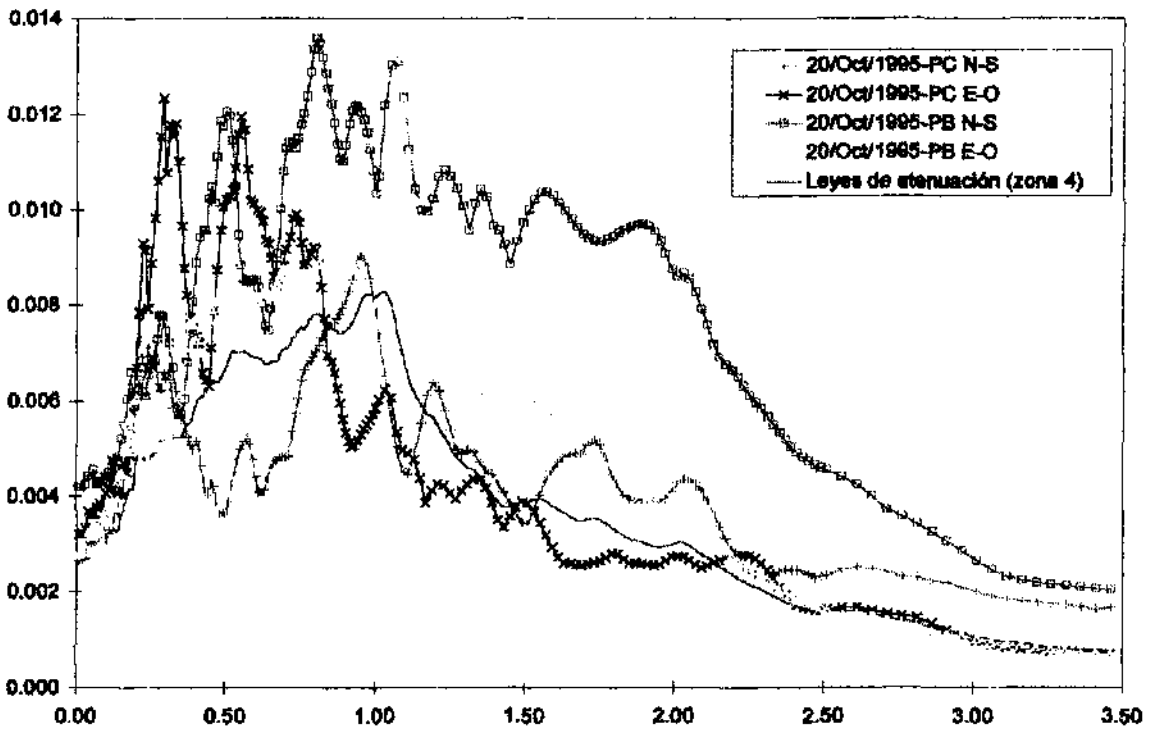


Fig. 4.37.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 20 de octubre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=6.2$, $R=573$ km.).

Tabla 4.12.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.

$$\ln(Pa) = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(R+25)$$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-12.5714	-0.8333	1.8526	0.5014	0.66	-7.0127	-0.6904	0.9861	0.3681	1.61	-25.4476	-0.1013	3.2048	0.8226
0.02	-12.3899	-0.8797	1.8688	0.4971	0.67	-7.8627	-0.7190	1.1472	0.3697	1.63	-25.9371	-0.1444	3.3196	0.8262
0.03	-11.4536	-0.9169	1.7699	0.4894	0.68	-8.7368	-0.7157	1.2844	0.4167	1.65	-26.4332	-0.1989	3.4471	0.8266
0.04	-11.3130	-0.7892	1.6277	0.5002	0.69	-9.9128	-0.7487	1.5020	0.4410	1.67	-27.4215	-0.2739	3.6709	0.8265
0.05	-12.6657	-0.7996	1.8512	0.4682	0.70	-10.9048	-0.7723	1.6806	0.4594	1.69	-28.1776	-0.2968	3.8102	0.8292
0.06	-12.5759	-0.8513	1.8942	0.4784	0.71	-12.0889	-0.8039	1.8976	0.4556	1.71	-28.6878	-0.2733	3.8666	0.8331
0.07	-11.0506	-0.7456	1.5484	0.4872	0.72	-12.5432	-0.7829	1.9325	0.4464	1.73	-29.3125	-0.2549	3.9490	0.8322
0.08	-11.0793	-0.7667	1.5619	0.5000	0.73	-12.9373	-0.7362	1.9685	0.4410	1.75	-30.1406	-0.2763	4.0873	0.8232
0.09	-10.3628	-0.8900	1.3980	0.4659	0.74	-13.0527	-0.6661	1.8213	0.4394	1.77	-30.9196	-0.3131	4.2528	0.8131
0.10	-10.2702	-0.7270	1.4101	0.5081	0.75	-12.7708	-0.6041	1.8186	0.4333	1.79	-31.5590	-0.3542	4.3680	0.8013
0.11	-9.5988	-0.6619	1.2645	0.5264	0.76	-12.2191	-0.5717	1.7002	0.4415	1.81	-31.8269	-0.3630	4.4352	0.7993
0.12	-9.5754	-0.6808	1.2635	0.5228	0.77	-11.6948	-0.5153	1.5648	0.4533	1.83	-32.1086	-0.3640	4.4766	0.7959
0.13	-8.2135	-0.7996	1.1856	0.5151	0.78	-10.8834	-0.4125	1.3054	0.4683	1.85	-32.2874	-0.3731	4.5093	0.8018
0.14	-9.2858	-0.8956	1.4265	0.5473	0.79	-9.4258	-0.3023	1.0080	0.4792	1.87	-32.0819	-0.3508	4.4532	0.8056
0.15	-7.8617	-0.6700	1.0007	0.5404	0.80	-8.0972	-0.1966	0.6979	0.4894	1.89	-31.7677	-0.3198	4.3753	0.8065
0.16	-5.9811	-0.6563	0.8976	0.5192	0.81	-7.0154	-0.1248	0.4596	0.4920	1.91	-31.5114	-0.2847	4.2968	0.8126
0.17	-5.1478	-0.4508	0.3806	0.5155	0.82	-7.1030	-0.1158	0.4833	0.4937	1.93	-31.3640	-0.2532	4.2402	0.8143
0.18	-5.0728	-0.3975	0.3217	0.5377	0.83	-7.5984	-0.1198	0.5389	0.4878	1.95	-30.9798	-0.2214	4.1482	0.8081
0.19	-7.3144	-0.6094	0.8783	0.5792	0.84	-8.0383	-0.1366	0.6262	0.4764	1.97	-30.4794	-0.1569	4.0069	0.8014
0.20	-6.7849	-0.4990	0.7068	0.8422	0.85	-8.1945	-0.1305	0.6438	0.4655	1.99	-30.0033	-0.0902	3.8904	0.7957
0.21	-5.6732	-0.4096	0.4580	0.8818	0.86	-8.2670	-0.1161	0.6405	0.4483	2.01	-29.6877	-0.0177	3.7533	0.7883
0.22	-6.0834	-0.4592	0.5649	0.6616	0.87	-8.2711	-0.0965	0.6213	0.4360	2.03	-29.5130	0.0411	3.6690	0.7894
0.23	-5.9164	-0.4103	0.4875	0.6394	0.88	-8.2498	-0.0730	0.5941	0.4303	2.05	-29.6441	0.0500	3.6780	0.7881
0.24	-6.2278	-0.3486	0.4759	0.6234	0.89	-8.1078	-0.0337	0.5338	0.4321	2.07	-30.1563	0.0230	3.7781	0.7879
0.25	-7.0190	-0.2479	0.5043	0.6344	0.90	-8.3810	0.0001	0.5450	0.4398	2.09	-30.6506	-0.0005	3.8743	0.7886
0.26	-7.0505	-0.2587	0.5220	0.6419	0.91	-8.7498	0.0355	0.5667	0.4523	2.11	-30.7445	-0.0113	3.8954	0.7881
0.27	-6.2483	-0.2760	0.4143	0.6718	0.92	-8.8130	0.0886	0.6298	0.4661	2.13	-30.9461	-0.0324	3.9429	0.7766
0.28	-5.1605	-0.1851	0.1837	0.7196	0.93	-8.5563	0.1632	0.4199	0.4769	2.15	-31.1827	-0.0688	4.0099	0.7712
0.29	-4.2190	-0.1415	-0.0201	0.7494	0.94	-7.8717	0.2260	0.2527	0.4847	2.17	-31.5701	-0.1144	4.1103	0.7685
0.30	-6.3746	-0.3493	0.5116	0.7248	0.95	-8.7392	0.3152	-0.0053	0.4948	2.19	-32.2239	-0.1742	4.2653	0.7664
0.31	-7.3129	-0.3889	0.7004	0.7067	0.96	-8.6120	0.3491	-0.0561	0.5028	2.21	-32.7183	-0.2370	4.3977	0.7669
0.32	-7.7249	-0.4720	0.8444	0.6789	0.97	-8.8539	0.3627	-0.0301	0.4985	2.23	-33.0670	-0.2879	4.4965	0.7684
0.33	-7.9408	-0.5345	0.9390	0.6672	0.98	-7.1281	0.3642	0.0111	0.4910	2.25	-33.2292	-0.3105	4.5394	0.7708
0.34	-8.5857	-0.5664	1.0899	0.6409	0.99	-7.3448	0.3619	0.0468	0.4839	2.27	-33.2047	-0.3293	4.5457	0.7714
0.35	-8.6845	-0.5677	1.0881	0.5979	1.00	-7.6372	0.3621	0.0757	0.4858	2.29	-33.0422	-0.3340	4.5239	0.7739
0.36	-8.2394	-0.5089	0.9662	0.5484	1.01	-7.5519	0.3938	0.0487	0.4984	2.31	-32.8358	-0.3420	4.4944	0.7764
0.37	-9.4654	-0.5702	1.2200	0.5072	1.03	-8.7965	0.3908	0.2472	0.5239	2.33	-33.0870	-0.3754	4.5610	0.7713
0.38	-10.3006	-0.5986	1.3799	0.4607	1.05	-10.9971	0.3035	0.6715	0.5470	2.35	-33.4236	-0.4079	4.6398	0.7695
0.39	-9.9006	-0.5414	1.2677	0.4189	1.07	-13.2842	0.1774	1.1410	0.5760	2.37	-33.6298	-0.4348	4.6925	0.7713
0.40	-9.0268	-0.5018	1.0975	0.4098	1.09	-16.0591	0.0259	1.7096	0.5980	2.39	-33.8848	-0.4515	4.7440	0.7712
0.41	-8.2473	-0.4897	0.9687	0.3839	1.11	-18.0090	-0.0818	2.1078	0.6121	2.41	-34.0321	-0.4620	4.7943	0.7684
0.42	-8.2060	-0.5438	1.0129	0.3734	1.13	-18.5568	-0.0832	2.1855	0.6301	2.43	-33.9486	-0.4499	4.7469	0.7599
0.43	-8.8658	-0.5826	1.1652	0.3734	1.15	-18.2203	-0.0368	2.0836	0.6568	2.45	-33.9555	-0.4492	4.7448	0.7621
0.44	-10.0040	-0.6232	1.3764	0.3905	1.17	-18.0220	0.0178	1.9944	0.6831	2.47	-33.9297	-0.4475	4.7364	0.7469
0.45	-11.0692	-0.6833	1.6048	0.4055	1.19	-18.1373	0.0834	1.9467	0.6966	2.49	-33.8984	-0.4285	4.6900	0.7458
0.46	-11.7109	-0.7638	1.8019	0.4074	1.21	-18.6183	0.0596	2.0694	0.7185	2.51	-33.4430	-0.3974	4.6093	0.7407
0.47	-11.7345	-0.8405	1.8604	0.4345	1.23	-20.1179	0.0399	2.2870	0.7350	2.56	-32.6509	-0.3043	4.3950	0.7336
0.48	-11.1475	-0.8666	1.7856	0.4531	1.25	-21.2015	0.0103	2.4788	0.7431	2.61	-31.9214	-0.2195	4.1990	0.7253
0.49	-10.9277	-0.8700	1.7673	0.4566	1.27	-21.7497	-0.0120	2.5794	0.7454	2.66	-32.5557	-0.2284	4.3013	0.7155
0.50	-9.8276	-0.8093	1.5388	0.4704	1.29	-21.3605	0.0301	2.4742	0.7476	2.71	-33.3054	-0.2842	4.4840	0.7101
0.51	-9.1997	-0.8877	1.1712	0.4841	1.31	-21.3072	0.0240	2.4679	0.7646	2.76	-33.7668	-0.3201	4.5638	0.7096
0.52	-8.6012	-0.5944	0.8334	0.4470	1.33	-21.3856	0.0366	2.4664	0.7844	2.81	-33.8408	-0.3187	4.5672	0.7091
0.53	-5.6226	-0.5931	0.6793	0.4291	1.35	-21.6978	0.0230	2.5236	0.8021	2.86	-34.0472	-0.3342	4.6056	0.7090
0.54	-5.0146	-0.6163	0.6064	0.4075	1.37	-22.0457	-0.0111	2.6047	0.8092	2.91	-34.1655	-0.3430	4.6227	0.7034
0.55	-4.0336	-0.6092	0.4462	0.3884	1.39	-22.3980	-0.0622	2.6995	0.8053	2.96	-34.0118	-0.3856	4.6128	0.7002
0.56	-2.9578	-0.5919	0.2613	0.3706	1.41	-22.6895	-0.0847	2.7633	0.7978	3.01	-33.8224	-0.3922	4.6004	0.6831
0.57	-2.2581	-0.5828	0.1517	0.3527	1.43	-23.3064	-0.1189	2.8961	0.7895	3.06	-33.5855	-0.4237	4.5843	0.6844
0.58	-2.4947	-0.6663	0.2593	0.3484	1.45	-23.6920	-0.1081	2.9387	0.7747	3.11	-34.3912	-0.4759	4.7550	0.6753
0.59	-2.9653	-0.7120	0.3783	0.3592	1.47	-23.5873	-0.0611	2.8793	0.7752	3.16	-34.8650	-0.5184	4.8638	0.6847
0.60	-3.8918	-0.7399	0.5479	0.3598	1.49	-23.6504	-0.0371	2.8671	0.7781	3.21	-35.4249	-0.5444	4.9669	0.7085
0.61	-4.8925	-0.7599	0.7237	0.3654	1.51	-23.8492	-0.0187	2.8819	0.7852	3.26	-36.0574	-0.5678	5.0829	0.7341
0.62	-5.7895	-0.7661	0.8690	0.3569	1.53	-23.9523	0.0120	2.8688	0.7899	3.31	-36.1899	-0.5681	5.0673	0.7458
0.63	-6.2098	-0.7683	0.9347	0.3512	1.55	-24.1954	0.0198	2.8996	0.7967	3.36	-36.1053	-0.5369	5.0912	0.7528
0.64	-6.1899	-0.7249	0.8898	0.3535	1.57	-24.5825	0.0002	2.9748	0.8056	3.41	-35.8701	-0.5007	4.9738	0.7653
0.65	-6.4828	-0.6899	0.9030	0.3563	1.59	-26.0675	-0.0626	3.1139	0.8174	3.46	-34.8442	-0.4182	4.7316	0.7605

4.5.5.2 Utilizando la envolvente espectral de los canales N-S y E-O

Estas leyes de atenuación fueron calculadas usando las respuestas espectrales máximas de las dos componentes ortogonales de los espectros de respuesta, asociados a los acelerogramas de los registros número 8, 13, 14a, 14b, 18, 24a y 24b. Los valores de los coeficientes de atenuación sísmica calculados y de sus desviaciones estándar asociadas (Tabla 4.13) son graficados con respecto al periodo estructural en las figuras 4.38 para {b} y 4.39 para {S}. Las desviaciones de las leyes de atenuación se discuten en el inciso 4.5.6.

Como se puede ver en la figura 4.38, los vectores coeficientes b2 y b3 en general no respetan su signo de proporcionalidad con los parámetros de la fuente, nuevamente consecuencia de que los datos no se ajustan al modelo de regresión. Por lo anterior, la predicción de espectros de respuesta con estas leyes también puede conducir a resultados cuestionables, que aunque se ajustan más o menos bien a los registros fuente (Figs. 4.40 y 4.41) no asegura que lo hagan a otros escenarios. No obstante la elección de éstas no tiene sentido tomando en cuenta que la zona en particular no genera peligro sísmico importante a la ciudad de Puebla.

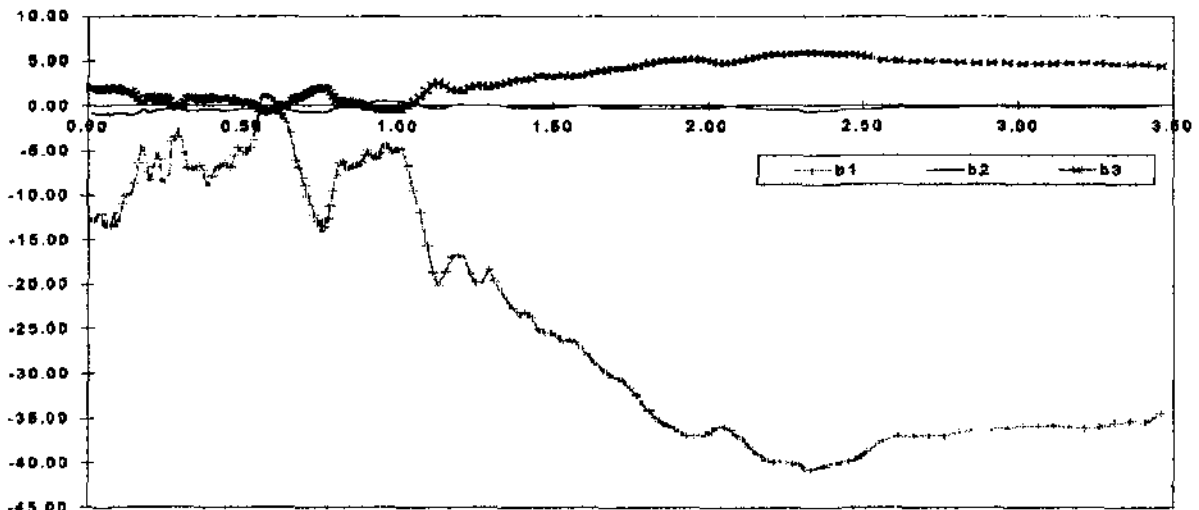


Fig. 4.38.- Coeficientes de atenuación sísmica {b}.

$$\ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 \ln(R+25)$$

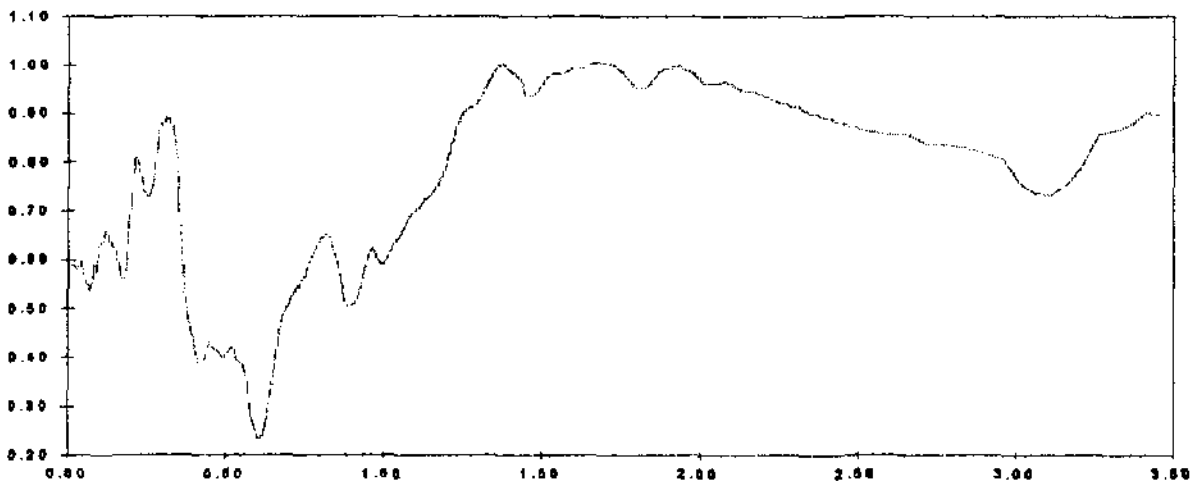


Fig. 4.39.- Desviaciones estándar {S}.

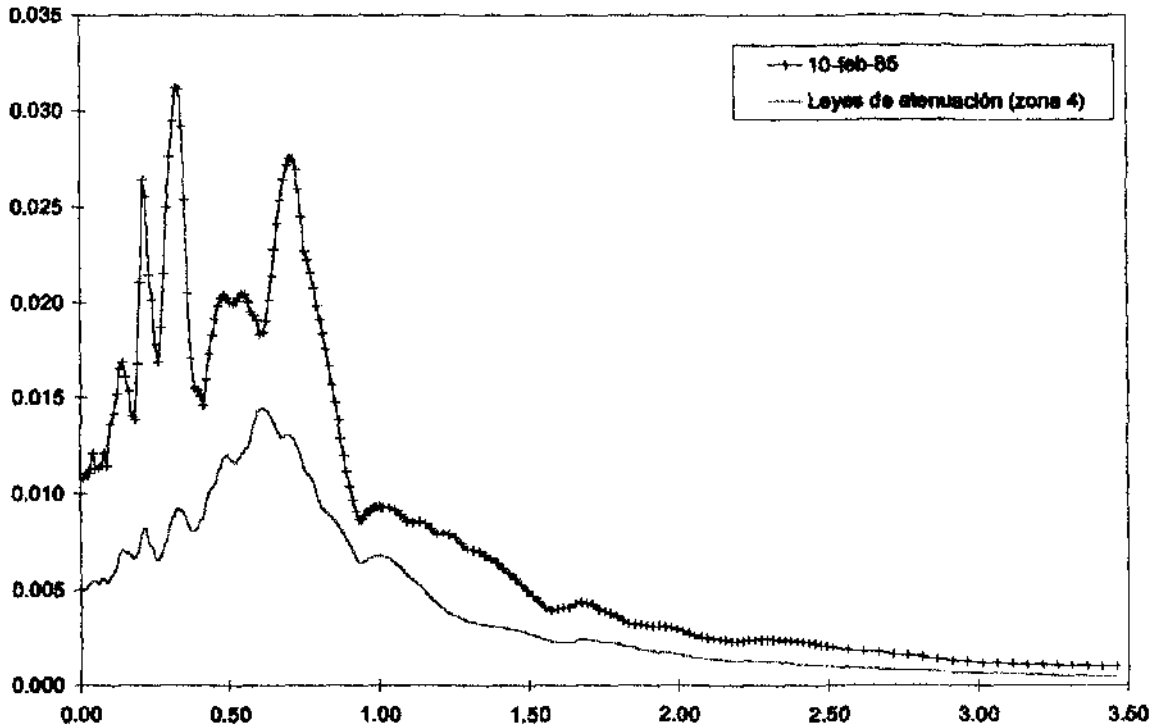


Fig. 4.40.- Comparación del espectro de respuesta del sismo del 10 de febrero de 1985 con el obtenido usando estas leyes de atenuación ($M'=5.2$, $R=459$ km.).

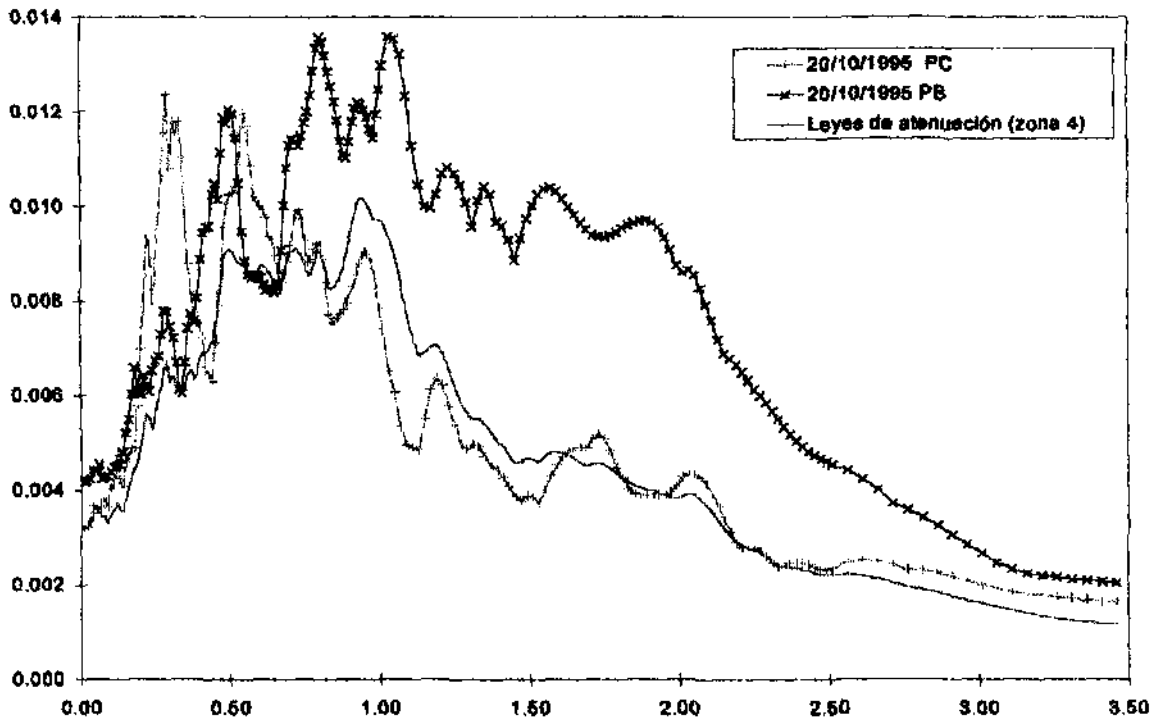


Fig. 4.41.- Comparación de los espectros de respuesta del sismo del 20 de octubre de 1995 con el obtenido usando estas leyes de atenuación. ($M'=6.2$, $R=573$ km.).

Tabla 4.13.- Coeficientes de atenuación sísmica {b} y desviaciones estándar {S}.
 $Ln(Pa) = b1 + b2 M + b3 Ln(R+25)$

T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S	T	b1	b2	b3	S
0.01	-12.8713	-0.8755	1.9840	0.5904	0.68	-4.5839	-0.8091	0.5519	0.4171	1.61	-27.9190	0.0004	3.5313	0.9948
0.02	-12.8455	-0.8931	1.9766	0.5850	0.67	-6.0841	-0.8347	0.8154	0.4589	1.63	-28.7623	-0.0417	3.7021	0.9965
0.03	-12.2040	-0.8997	1.8582	0.5818	0.68	-6.9791	-0.8187	0.9468	0.4843	1.65	-29.3111	-0.1225	3.8635	1.0017
0.04	-12.0817	-0.8378	1.8174	0.5975	0.69	-7.9839	-0.8377	1.1284	0.4989	1.67	-29.8240	-0.1917	4.0084	1.0045
0.05	-13.2994	-0.8601	2.0307	0.5823	0.70	-9.0070	-0.8503	1.3027	0.5121	1.69	-30.3550	-0.2385	4.1346	1.0054
0.06	-13.0872	-0.8217	1.9618	0.5487	0.71	-10.2064	-0.8818	1.5217	0.5244	1.71	-30.5395	-0.2191	4.1457	1.0052
0.07	-13.5139	-0.9448	2.1430	0.5370	0.72	-11.1995	-0.6883	1.6842	0.5367	1.73	-30.9295	-0.1978	4.1868	0.9975
0.08	-11.9315	-0.8520	1.8062	0.5938	0.73	-12.2382	-0.7058	1.8618	0.5473	1.75	-31.5782	-0.2236	4.3120	0.9984
0.09	-13.3618	-0.9258	2.0949	0.5783	0.74	-12.9701	-0.6978	1.9671	0.5583	1.77	-32.4041	-0.2639	4.4774	0.9725
0.10	-12.8048	-0.8859	1.9468	0.6319	0.75	-13.4738	-0.6786	2.0247	0.5674	1.79	-33.4330	-0.3047	4.6741	0.9556
0.11	-10.9417	-0.8337	1.8396	0.6367	0.76	-13.6245	-0.7008	2.0855	0.5917	1.81	-34.1282	-0.3028	4.7793	0.9541
0.12	-10.0222	-0.8048	1.4741	0.6599	0.77	-12.7089	-0.6307	1.8554	0.6063	1.83	-34.9201	-0.3132	4.9090	0.9563
0.13	-9.9721	-1.0139	1.6613	0.6380	0.78	-11.2584	-0.4824	1.4982	0.6182	1.85	-35.4833	-0.3274	5.0047	0.9718
0.14	-9.8415	-1.0418	1.6368	0.6318	0.79	-9.5863	-0.3256	1.0785	0.6324	1.87	-35.8487	-0.3182	5.0542	0.9879
0.15	-8.6455	-0.8519	1.3107	0.8224	0.80	-7.7443	-0.1896	0.6594	0.6447	1.89	-36.2287	-0.2896	5.0945	0.9929
0.16	-6.4256	-0.7301	0.8513	0.5847	0.81	-6.3526	-0.1081	0.3605	0.6612	1.91	-36.5554	-0.2742	5.1198	0.9959
0.17	-4.7098	-0.5327	0.4021	0.5571	0.82	-6.2572	-0.1243	0.3581	0.6513	1.93	-36.9541	-0.2645	5.1708	0.9993
0.18	-4.8833	-0.4679	0.3721	0.5659	0.83	-6.6615	-0.1859	0.5037	0.6444	1.95	-37.0282	-0.2724	5.1876	0.9919
0.19	-7.4199	-0.5931	0.8944	0.6413	0.84	-6.9634	-0.1757	0.5091	0.6214	1.97	-36.9712	-0.2648	5.1693	0.9883
0.20	-8.2375	-0.6692	1.1059	0.7235	0.85	-6.8064	-0.1291	0.4405	0.6021	1.99	-36.7928	-0.2301	5.1070	0.9762
0.21	-8.9492	-0.6109	0.8445	0.8123	0.86	-6.6987	-0.0782	0.3747	0.5862	2.01	-36.4016	-0.1540	4.9744	0.9619
0.22	-5.3241	-0.4847	0.4922	0.6067	0.87	-6.5590	-0.0179	0.2991	0.6350	2.03	-35.9735	-0.0722	4.8299	0.9631
0.23	-5.9628	-0.3999	0.5075	0.7708	0.88	-6.2257	0.0803	0.1745	0.5137	2.05	-35.9087	-0.0288	4.7799	0.9595
0.24	-8.3457	-0.5334	1.0025	0.7450	0.88	-5.5575	0.1698	-0.0318	0.6057	2.07	-36.2854	-0.0293	4.8291	0.9671
0.25	-8.5365	-0.3443	0.8598	0.7326	0.90	-4.9103	0.2982	-0.2517	0.5077	2.09	-36.9823	-0.0588	4.9499	0.9828
0.26	-7.3691	-0.2094	0.5537	0.7282	0.91	-5.5517	0.3855	-0.2115	0.5153	2.11	-37.3374	-0.1206	5.0736	0.9564
0.27	-3.9419	-0.0808	-0.0998	0.7651	0.92	-5.8441	0.4424	-0.2363	0.5313	2.13	-38.0284	-0.2078	5.2573	0.9468
0.28	-3.5135	-0.0644	-0.1856	0.8212	0.93	-5.8039	0.5170	-0.3119	0.5695	2.15	-38.8034	-0.2882	5.4481	0.9470
0.29	-2.8817	-0.0942	-0.2407	0.8804	0.94	-5.2795	0.5438	-0.4189	0.5843	2.17	-39.2021	-0.3384	5.5528	0.9452
0.30	-3.6643	-0.3154	0.0856	0.8737	0.95	-4.4480	0.5539	-0.5588	0.6087	2.19	-39.7098	-0.3972	5.8830	0.9398
0.31	-5.2646	-0.4129	0.4368	0.8956	0.96	-4.3573	0.5277	-0.5534	0.6234	2.21	-39.9074	-0.4444	5.7550	0.9354
0.32	-6.9873	-0.5537	0.8338	0.8890	0.97	-4.8121	0.4792	-0.4349	0.6182	2.23	-39.8508	-0.4484	5.7478	0.9305
0.33	-7.0745	-0.5811	0.8765	0.8726	0.98	-5.2015	0.4298	-0.3282	0.6018	2.25	-39.8591	-0.4548	5.7525	0.9240
0.34	-7.1182	-0.5770	0.8783	0.8332	0.99	-5.0282	0.4319	-0.3578	0.5905	2.27	-39.9538	-0.4748	5.7831	0.9204
0.35	-6.8084	-0.5199	0.7743	0.7403	1.00	-4.8810	0.4384	-0.3686	0.5836	2.29	-40.1531	-0.5005	5.8349	0.9148
0.36	-6.5745	-0.4043	0.6318	0.6199	1.01	-4.7806	0.4451	-0.4125	0.6046	2.31	-40.5640	-0.5491	5.9399	0.9148
0.37	-7.3530	-0.3721	0.7243	0.5284	1.03	-6.6518	0.3399	-0.0202	0.6308	2.33	-40.7635	-0.5876	6.0017	0.9068
0.38	-8.7048	-0.4548	1.0109	0.4879	1.05	-9.4795	0.2154	0.5356	0.6489	2.35	-40.5608	-0.5832	5.9483	0.8987
0.39	-8.7986	-0.4852	1.0393	0.4532	1.07	-11.9606	0.0885	1.0370	0.6748	2.37	-40.3497	-0.5370	5.8881	0.8989
0.40	-7.7718	-0.4170	0.8368	0.4226	1.09	-15.6488	-0.0774	1.7624	0.6987	2.38	-40.2198	-0.5181	5.8437	0.8913
0.41	-7.0432	-0.3883	0.7002	0.3893	1.11	-18.6396	-0.2232	2.3613	0.7042	2.41	-40.0919	-0.4910	5.7976	0.8913
0.42	-7.0314	-0.4882	0.7930	0.3879	1.13	-20.0202	-0.2938	2.8362	0.7240	2.43	-39.8995	-0.4759	5.7512	0.8834
0.43	-6.6916	-0.5295	0.7937	0.3966	1.15	-18.6454	-0.1442	2.2780	0.7334	2.45	-39.7936	-0.4698	5.7257	0.8820
0.44	-6.4351	-0.5347	0.7519	0.4248	1.17	-16.9375	0.0484	1.8290	0.7580	2.47	-39.6711	-0.4809	5.6958	0.8740
0.45	-6.7544	-0.5173	0.7924	0.4315	1.19	-16.7775	0.1498	1.7043	0.7842	2.49	-39.2326	-0.4124	5.5796	0.8734
0.46	-6.9802	-0.5457	0.8568	0.4188	1.21	-17.0310	0.1821	1.7090	0.8322	2.51	-38.7200	-0.3547	5.4439	0.8656
0.47	-5.6098	-0.4410	0.5588	0.4168	1.23	-18.8024	0.1180	2.0401	0.8730	2.58	-37.4761	-0.2258	5.1255	0.8609
0.48	-4.7041	-0.3800	0.3470	0.4096	1.25	-19.7916	0.0521	2.2494	0.9031	2.61	-36.9529	-0.1802	4.9843	0.8564
0.49	-5.0648	-0.3744	0.4195	0.3990	1.27	-19.7316	0.0294	2.2538	0.9128	2.66	-36.8860	-0.1538	4.9562	0.8547
0.50	-5.1440	-0.3580	0.4146	0.4098	1.29	-18.4289	0.0962	1.9792	0.9190	2.71	-36.9891	-0.1753	4.9829	0.8380
0.51	-5.1093	-0.3473	0.3995	0.4180	1.31	-19.6503	0.0314	2.2295	0.9387	2.76	-36.9214	-0.1539	4.9488	0.8374
0.52	-4.8885	-0.3422	0.3259	0.4229	1.33	-20.7059	0.0226	2.4038	0.9676	2.81	-36.5474	-0.1185	4.8493	0.8330
0.53	-3.7801	-0.3282	0.1686	0.4028	1.35	-21.7742	-0.0202	2.8089	0.9934	2.86	-36.2149	-0.0775	4.7541	0.8270
0.54	-2.3354	-0.3012	-0.0830	0.3920	1.37	-22.6707	-0.0787	2.8020	1.0051	2.91	-36.1701	-0.0684	4.7318	0.8167
0.55	-0.5714	-0.2590	-0.4098	0.3871	1.39	-23.4382	-0.1421	2.9764	0.9830	2.96	-36.0826	-0.0922	4.7332	0.8058
0.56	1.2718	-0.2122	-0.7364	0.3682	1.41	-23.2704	-0.1345	2.9399	0.9831	3.01	-35.8592	-0.0822	4.6828	0.7568
0.57	1.1143	-0.2688	-0.6807	0.3277	1.43	-23.7484	-0.1759	3.0487	0.9709	3.06	-35.8592	-0.1014	4.6937	0.7382
0.58	1.0360	-0.3593	-0.5590	0.2808	1.45	-25.1553	-0.2713	3.3544	0.9362	3.11	-35.8440	-0.1286	4.7103	0.7328
0.59	0.9842	-0.3869	-0.5138	0.2589	1.47	-25.4567	-0.2298	3.3630	0.9368	3.16	-35.9749	-0.1520	4.7461	0.7539
0.60	0.4784	-0.4138	-0.4149	0.2356	1.49	-25.4732	-0.1572	3.2880	0.9499	3.21	-36.1228	-0.1459	4.7566	0.7960
0.61	-0.2558	-0.4444	-0.2699	0.2329	1.51	-25.8598	-0.1308	3.3315	0.9756	3.26	-35.9337	-0.1393	4.7132	0.8567
0.62	-0.9466	-0.4741	-0.1344	0.2484	1.53	-26.4737	-0.1241	3.4183	0.9827	3.31	-35.6029	-0.1104	4.6300	0.8659
0.63	-1.4788	-0.4824	-0.0358	0.2787	1.55	-26.2202	-0.0178	3.2610	0.9823	3.36	-35.3523	-0.0915	4.5861	0.8749
0.64	-1.8878	-0.4823	0.0272	0.3275	1.57	-26.5432	0.0385	3.2794	0.9857	3.41	-35.4521	-0.0720	4.5591	0.9031
0.65	-2.9880	-0.5444	0.2458	0.3747	1.59	-27.1829	0.0222	3.3956	0.9940	3.46	-34.4975	-0.0041	4.3437	0.8968

4.5.6 DISPERSIÓN DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN OBTENIDAS

El cálculo de la dispersión de las leyes de atenuación está dado por las desviaciones estándar de los residuales $\{\epsilon\}$ de la ecuación 4-10. Se muestran en la figura 4.42 los vectores de desviaciones estándar $\{S\}$ calculados con la expresión 4-15. En esta figura se grafican los vectores $\{S\}$ para todas las leyes, a excepción de las descritas en el inciso 4.5.1.2, para las que los vectores $\{S\}$ fueron indeterminados por el modelo.

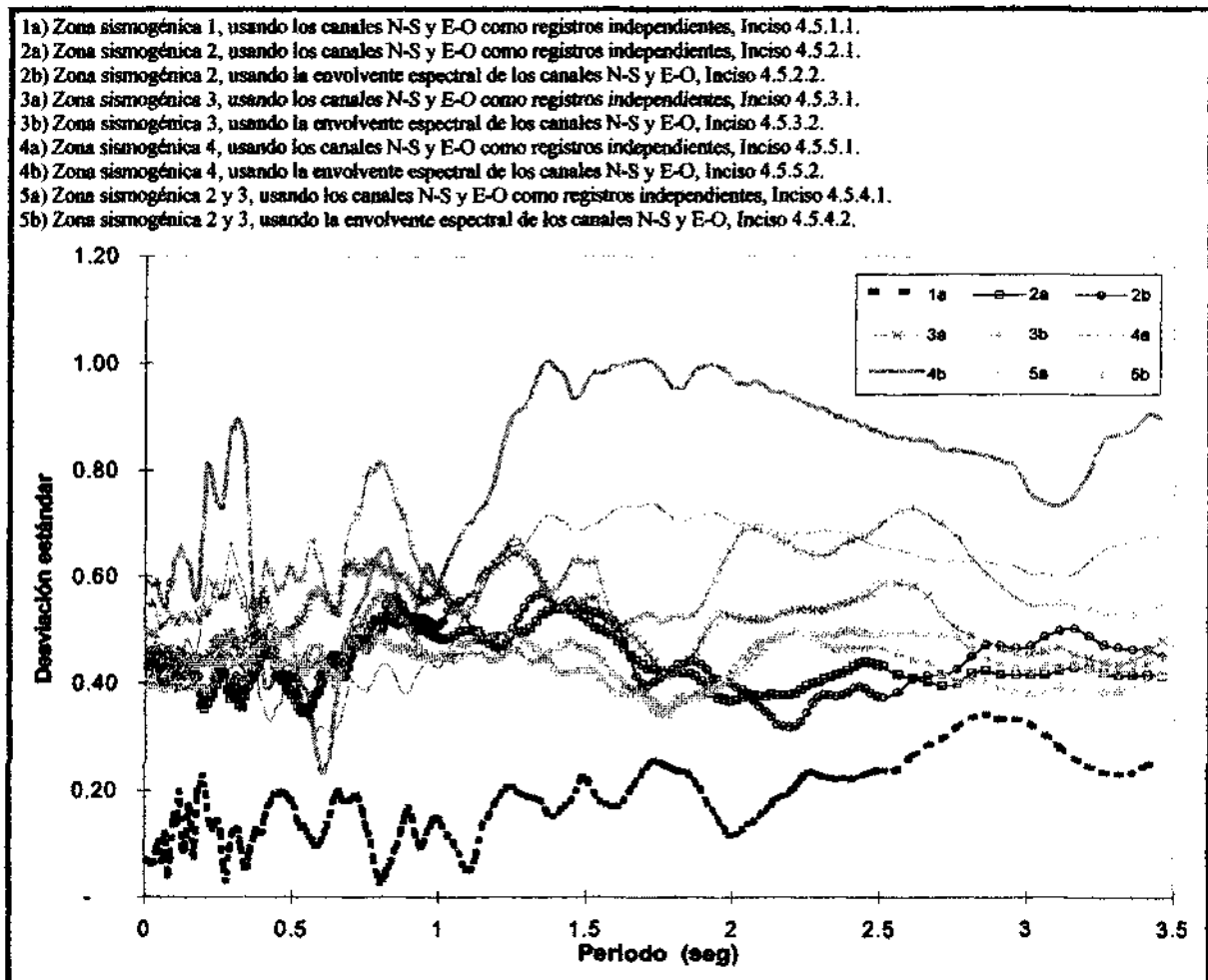


Fig. 4.42.- Vectores de desviación estándar $\{S\}$ de las leyes de atenuación.

En la gráfica anterior, se observa que el vector de desviaciones estándar $\{S\}$ de la zona sismogénica 1 (vector 1a) es el que menos dispersión tiene, que se debe a los pocos grados de libertad los cuales son función de la escasez de registros en la zona. La dispersión más alta corresponde a la zona sismogénica 4 (vectores 4a y 4b), consecuencia de que los datos disponibles no siguen muy bien el modelo de correlación propuesto (ecuación 4.1).

La dispersión de las leyes para las zonas 2 y 3 independientes (vectores 2a, 2b, 3a, 3b) son mayores en general que para la zona 2-3 mixta (vectores 5a y 5b), por lo que se concluye que los datos de esta última, calculada con sismos de magnitud mayor a 6.9 grados, se ajustan mejor al modelo de regresión utilizado (ecuación 4.1).

4.6 SISMO DEL 15 DE JULIO DE 1996

El día 15 de julio de 1996 se presentó un sismo a las 16:23 hora local de verano (21:23 GMT). Dicho evento telúrico tuvo una magnitud (M_s) de 6.5 grados; estuvo localizado en la latitud 17.45° Norte y longitud 100.92° Oeste (Petatlán, Guerrero, México), a una profundidad estimada de 33 km. Estos datos fueron proporcionados por la National Earthquake Information Service (NEIS) del USGS. Cabe hacer mención que por ser tan reciente este evento no fue incluido en la generación de las leyes de atenuación.

La información acelerográfica fue proporcionada por la RIIS de sus dos estaciones localizadas en la ciudad de Puebla (PC y PB). Los acelerogramas de estas estaciones fueron corregidos con un filtro pasabanda de 0.05, 0.10, 20 y 30 Hz., y calculado su espectro de respuesta para amortiguamientos crítico de 5% con el software RIISPROC (E. Sordo y A. Fernández, 1995).

Para comprobar las leyes de atenuación, se comparó la envolvente de la respuesta del sismo con los espectros calculados usando las leyes propuestas para la zona sísmogénica 2 por considerarse el evento como un sismo de actividad de fondo. La envolvente espectral de las dos estaciones (PC y PB) en sus dos canales (N-S y E-O) con amortiguamiento del 5% junto con los espectros obtenidos usando las leyes de atenuación con los criterios expuestos en el inciso 4.5.2, para la zona sísmogénica 2 donde se localizo el epicentro, son graficados en la figura 4.43. Los parámetros de la fuente sísmica considerados en las leyes fueron $M=6.5^\circ$ y $R=347$ km., magnitud del sismo y distancia del foco a la ciudad de Puebla.

Como se puede ver en la figura 4.43, existe una buena semejanza de la envolvente de los espectros registrados con los calculados usando las leyes de atenuación. Este registro y futuros más, permitirán evaluar las leyes obtenidas en este trabajo o actualizarlas con mayor información.

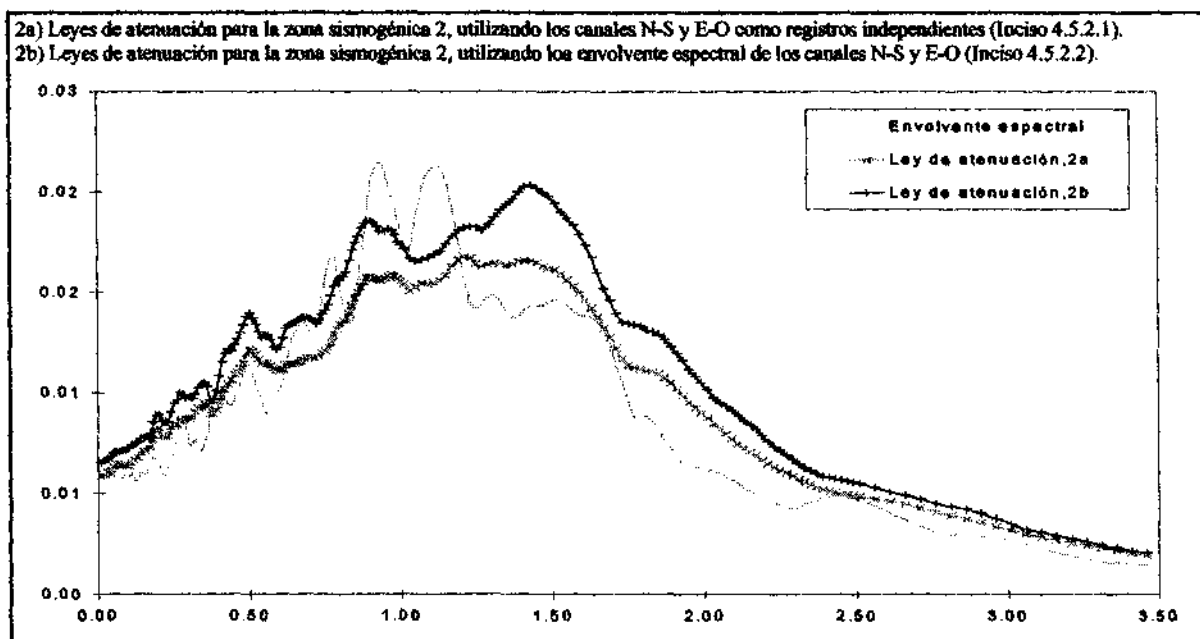


Fig. 4.43.- Comparación de la envolvente espectral del sismo del 15 de julio de 1996 con el espectro obtenido por las leyes de atenuación de la zona sísmogénica 2.

5. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS MÁXIMOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúan varios escenarios máximos, tanto históricos como hipotéticos, que pueden servir como referencia para la estimación del peligro sísmico de la ciudad de Puebla. Para ello, se generan espectros de respuesta con las leyes de atenuación obtenidas, los cuales se comparan con el actual espectro de diseño para zona II del “Reglamento de Construcciones del Municipio de Puebla” (AMP., 1994) y con la propuesta de C. Ruiz et. al. (1994) para la zona B. Los espectros de respuesta se construyen graficando la pseudoaceleración espectral, calculada con las leyes de atenuación, contra el periodo estructural.

Los espectros de diseño del actual reglamento (RCMP-94, Art. 300) para zona de transición (calizas lacustres y travertino, II) y el propuesto por C. Ruiz et. al. (1994) para la misma zona (suelo moderadamente blando, B) son mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Espectros de diseño para zona de transición.

Espectro	c	T1	T2	r
RCMP-94	0.32 g	0 seg.	1 seg.	2/3
C. Ruiz et. al.	0.36 g	0 seg.	1 seg.	2/3

Como se comentó oportunamente, el fin de este trabajo no es el de proponer un espectro de diseño para este tipo de terreno, sino generar leyes de atenuación útiles para predecir espectros de respuesta ante cualquier escenario que involucre peligro sísmico importante para la ciudad, herramientas que permitirán efectuar estudios de riesgo sísmico en el futuro.

El hecho de determinar los peores escenarios potenciales, redondea el acercamiento al problema de determinar parámetros de diseño, sensibilizando a los responsables de su elección. La elección del espectro de diseño es un problema de criterio ingenieril, en el cual resulta útil el empleo de diferentes enfoques (deterministas y probabilistas), complementados con estudios de vulnerabilidad para guiar el juicio. Los resultados de dichos enfoques generan espectros de respuesta, calculados con las leyes de atenuación, que se supone producirán las acciones sísmicas. La selección del espectro de diseño finalmente debe tener también en cuenta la vulnerabilidad de la infraestructura y la capacidad económica de la sociedad afectada.

La selección de los escenarios máximos no sólo debe basarse en la energía liberada de un sismo, sino también en el mecanismo que lo origina, la zona sismogénica y la distancia a la zona de estudio. Para el caso de la ciudad de Puebla, se ha observado que los mecanismos que involucran más peligro son los sismos por fallamiento local, normal y de subducción, provenientes de las que en este estudio se han llamado zona sismogénica 1 (sismos cercanos) y zonas 2 y 3 (sismos en la trinchera mexicana). La zona sismogénica 4 no será evaluada dado que no involucra peligro sísmico trascendente, pues las ordenadas espectrales presentadas en registros y la sismicidad histórica así lo indican.

5.2 SISMOS ORIGINADOS EN LA TRINCHERA MEXICANA

5.2.1 SISMOS HISTÓRICOS INTENSOS

Se calcularon con las leyes de atenuación los espectros de respuesta asociados a la trinchera Mexicana, que probablemente se presentaron en la ocurrencia de 3 sismos históricos intensos, 2 de ellos suscitados cuando no se tenía equipo de registro en Puebla. Dos de estos eventos se seleccionaron de la tabla 2.9 (los sismos más intensos conocidos a la fecha en la ciudad de Puebla). Los escenarios seleccionados son los acaecidos el 19 de julio de 1882 ($M=7.5$, $R=142$ km.), el 15 de abril de 1907 ($M=7.8$, $R=280$ km.), y el 19 de septiembre de 1985. ($M=8.1$, $R=533$ km.).

Las leyes de atenuación usadas para predecir los espectro de respuesta de estos 3 escenarios son las obtenidas en el inciso 4.5.4.2, ya que son las que mejor predicen las intensidades máximas de eventos característicos de subducción. A continuación se grafican los espectros de los escenarios junto con el actual espectro de diseño del reglamento (RCMP-94) y con la propuesta de C. Ruiz et. al. (1994), (Figs. 5.1 a 5.3).

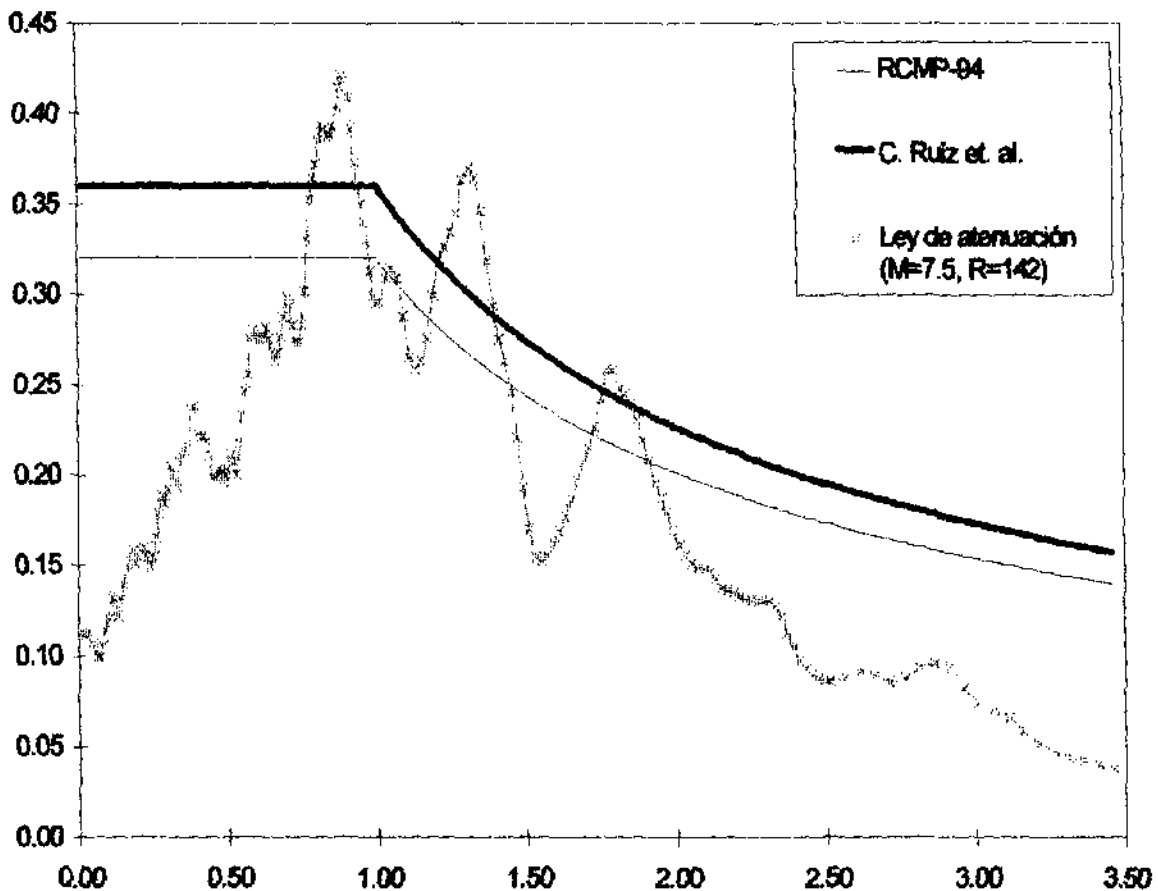


Fig. 5.1.- Espectro de respuesta del escenario: 19 de julio de 1882 (7.5, 142 km.).

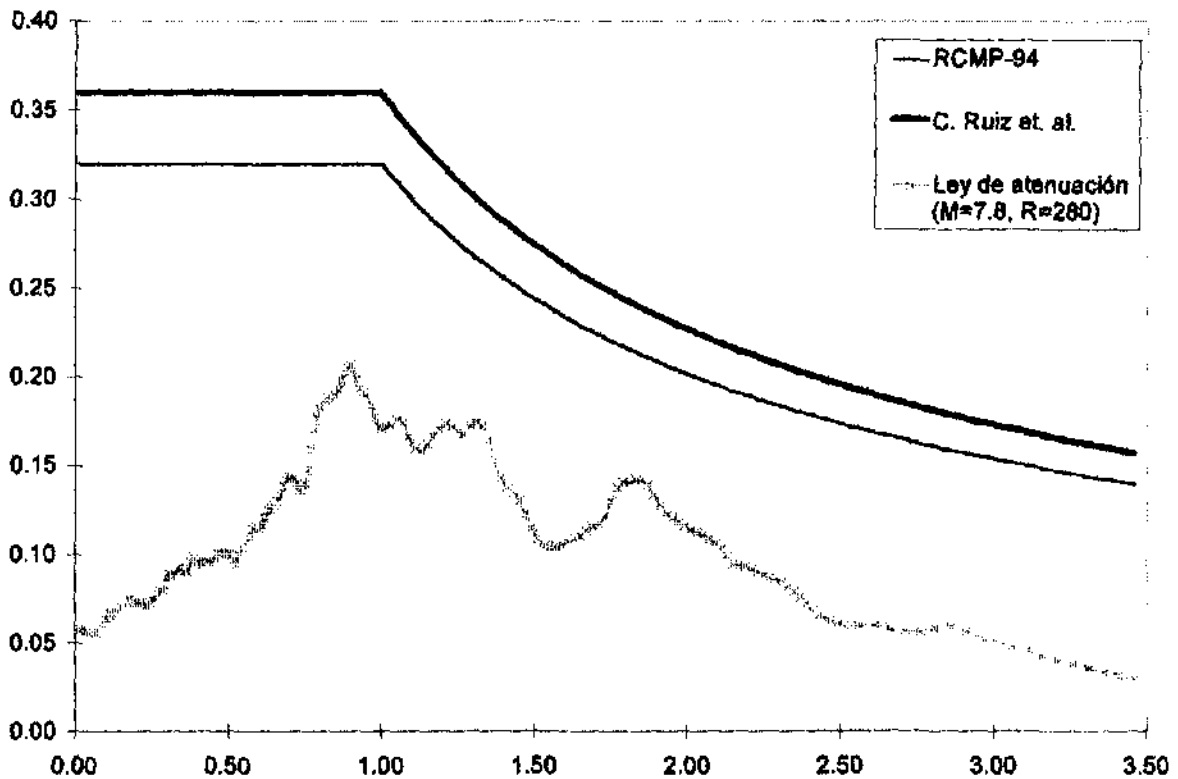


Fig. 5.2.- Espectro de respuesta del escenario: 15 de abril de 1907 ($M=7.8$, $R=280$ km.).

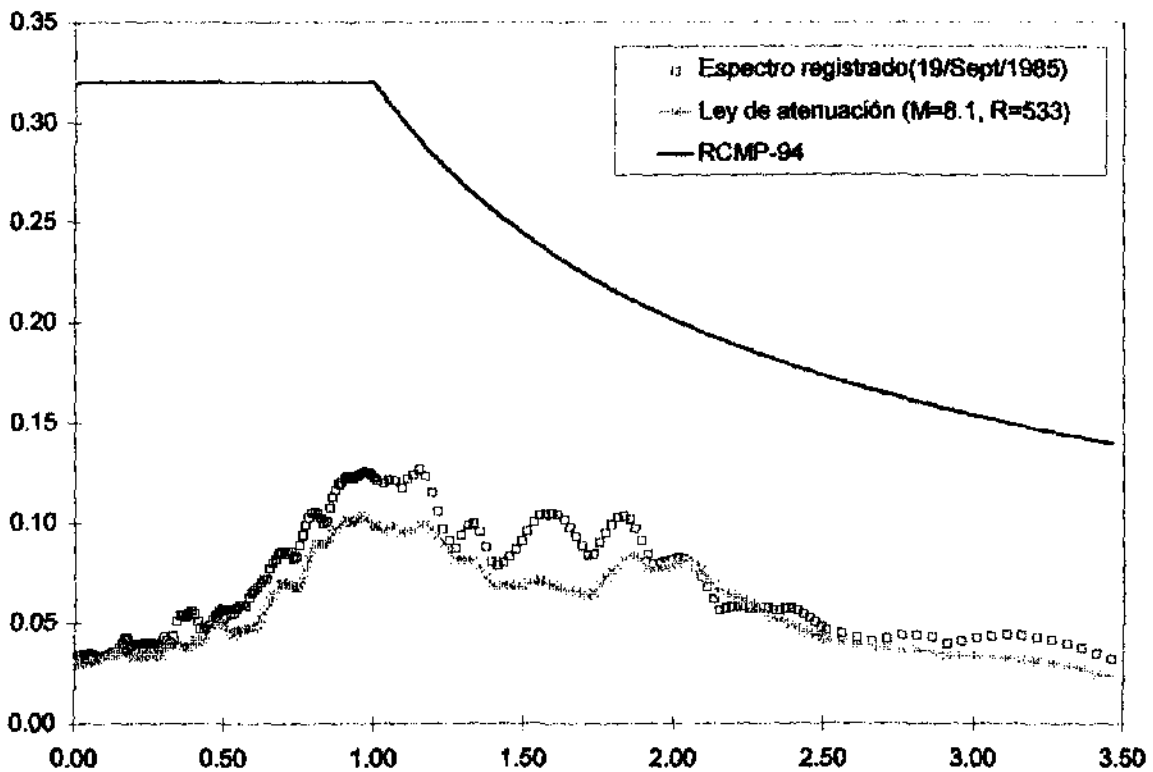


Fig. 5.3.- Espectro de respuesta del escenario: 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$, $R=533$ km.)

5.2.2 BRECHA DE GUERRERO

De gran interés es la predicción de las pseudoaceleraciones espectrales para el caso de un probable rompimiento total en la brecha de Guerrero (Figs. 2.19 y 2.20), el cual produciría alrededor de 6 m. de deformación elástica por los 7 cm/año desde 1911 (Whitney, 1996).

Para la estimación de la magnitud de este evento se han seguido dos criterios. El primero de ellos consiste en calcular la magnitud momento como función del periodo de retorno (Nava, 1987), mientras el segundo estima la magnitud de ondas superficiales como función del área total probable de ruptura (Singh y Ordaz, 1990).

Nava (1987) propone la expresión 5-1 que relaciona el periodo de reposo con el momento sísmico de la falla (M_0), lo que significa que para esta brecha, considerando un periodo de $T_r=86$ años, el momento sísmico sería de $2.0114 E28$ dina-cm.

$$T_r = \frac{1}{3} \text{Log}(M_0) - 7.5 \quad (5-1)$$

El momento sísmico nos permite estimar la magnitud momento (M_w) con la expresión 5-2, la cual resulta ser de 8.17 grados. Esta magnitud momento (M_w) se considera semejante a la magnitud calculada de las ondas superficiales (M_s), ya que es mayor de 6 grados.

$$M_w = \frac{2}{3} \text{Log}(M_0) - 10.7 \quad (5-2)$$

Singh y Ordaz (1990) llegan a resultados similares, y proponen la estimación de la magnitud de ondas superficiales (M_s) a partir de la expresión empírica que la relaciona con el área de ruptura (5-3). Se ha estimado un área de $18,000 \text{ km}^2$ para el caso de un rompimiento total de esta brecha, en cuyo caso el resultado del cálculo de la magnitud (M_s) es de 8.26 grados.

$$M_s = 0.877 \text{Log}(A) + 4.532 \quad (5-3)$$

Siguiendo el criterio de la distancia más cercana a la falla, la separación entre la ciudad de Puebla y la brecha de Guerrero es de 300 km.

El espectro de respuesta esperado del rompimiento de esta brecha fue calculado con los parámetros de la fuente siguientes: magnitudes de 8.2 y 8.3 grados, distancia de 300 kilómetros. Las leyes de atenuación usadas para las predicciones fueron las obtenidas en el inciso 4.5.4.2, pues ambos posibles escenarios representan sismos característicos de subducción. Estos espectros de respuesta se grafican junto con el actual espectro de diseño del reglamento y con la propuesta de C. Ruiz et. al. (Fig. 5.4).

Considerando un 80% de confianza para el promedio de una observación futura (q), se calcularon los intervalos de confianza (expresión 4-16) para los dos escenarios $\{X_0\}$ siguientes.

$$\{X_0\} = \{1, 8.2, \text{Ln}(300+25)\} \quad (\text{Fig. 5.5})$$

$$\{X_0\} = \{1, 8.3, \text{Ln}(300+25)\} \quad (\text{Fig. 5.6})$$

Este intervalo es aquél dentro del cual se espera que se encuentre el espectro asociado de un sismo futuro de las características mencionadas, con un 80% de confianza.

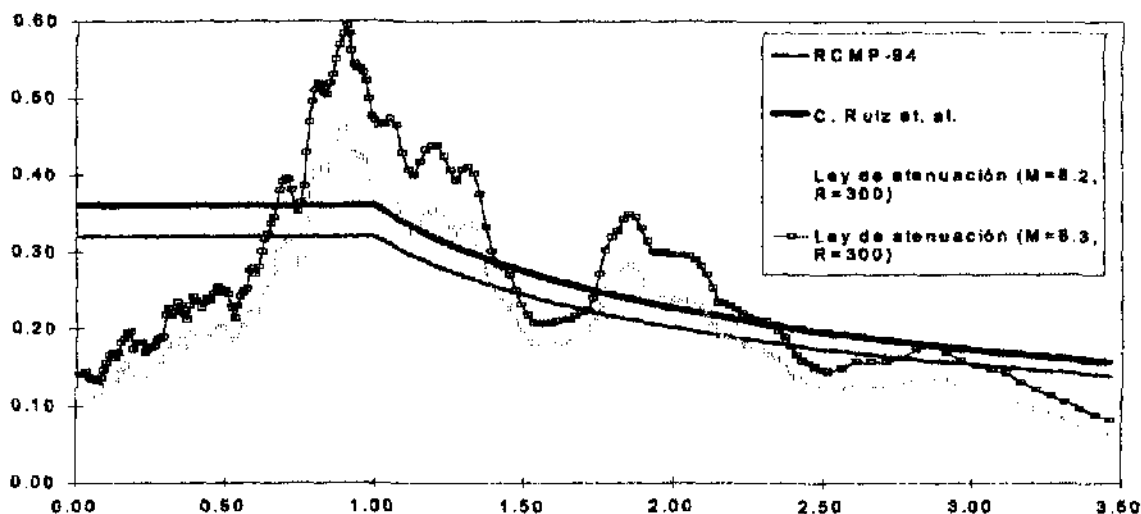


Fig. 5.4.- Espectros de respuesta predichos para un rompimiento total en la brecha de Guerrero. (M=8.2 y 8.3, R=300 km.).

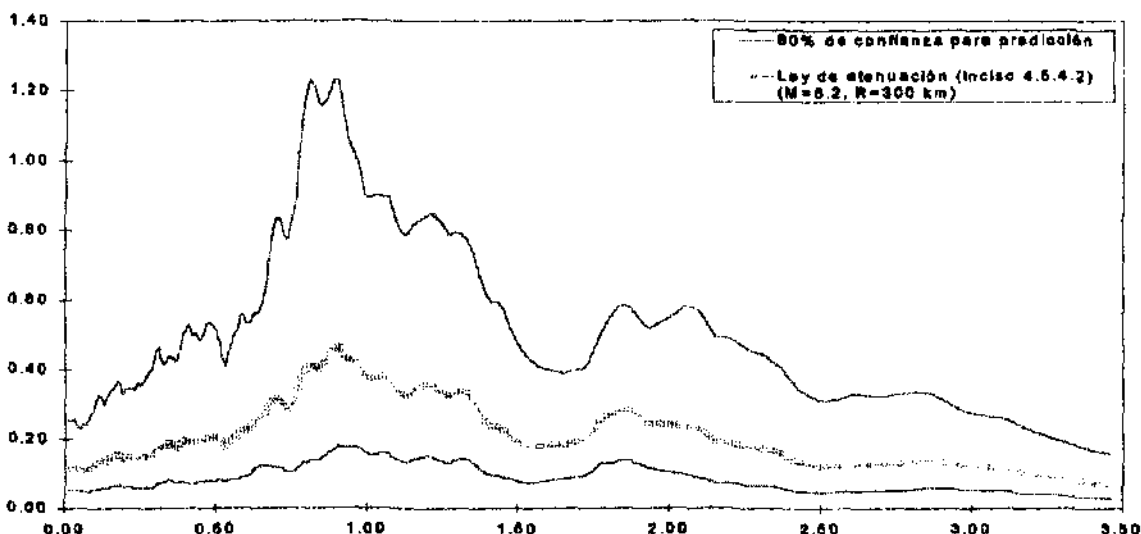


Fig. 5.5.- Espectros con 80% en intervalos de confianza, $q=1$, $\{X_0\}=\{1, 8.2, \ln(300+25)\}$

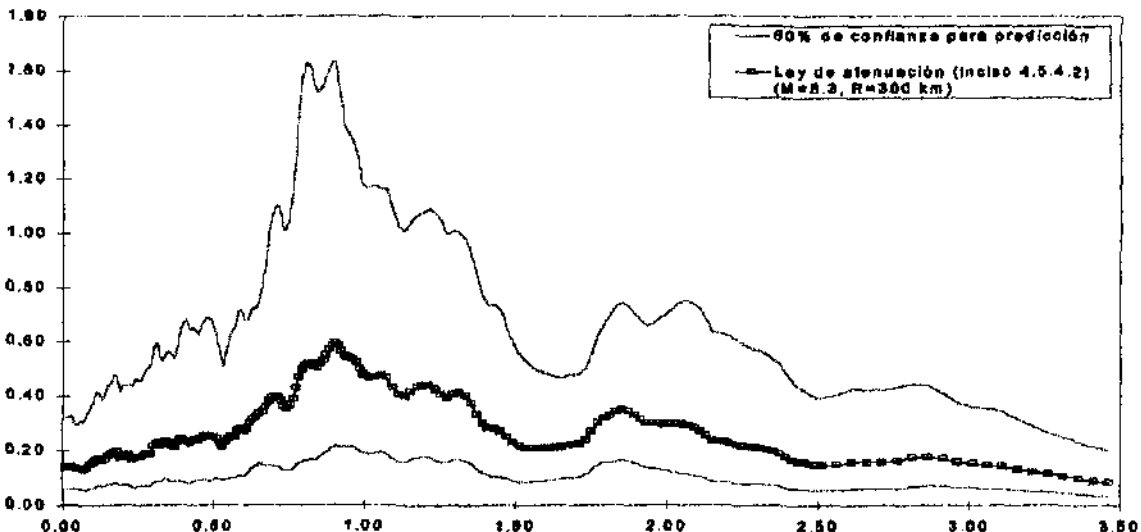


Fig. 5.6.- Espectros con 80% en intervalos de confianza, $q=1$, $\{X_0\}=\{1, 8.3, \ln(300+25)\}$.

Se observa en las figuras 5.5 y 5.6 que los intervalos son grandes para los escenarios considerados. Como ya se explicó, el intervalo de confianza es aquél dentro del cual se espera que se encuentre el espectro asociado a cierto escenario con determinado porcentaje de certeza. Como todas las leyes aquí calculadas son estrictamente aplicables al rango de parámetros fuente que les dieron origen, es de esperarse que los intervalos de confianza del espectro asociado a parámetros que salen de dicho rango sean grandes y no lo sean tanto para los que queden dentro. Para ilustrar lo anterior, se sacaron intervalos de confianza del espectro predicho usando las leyes de atenuación del inciso 4.5.4.2 a los parámetros que tuvo el sismo de Ometepec (14/Sept/95), los cuales se grafican junto a los que se obtuvieron de los registros (Fig. 5.7).

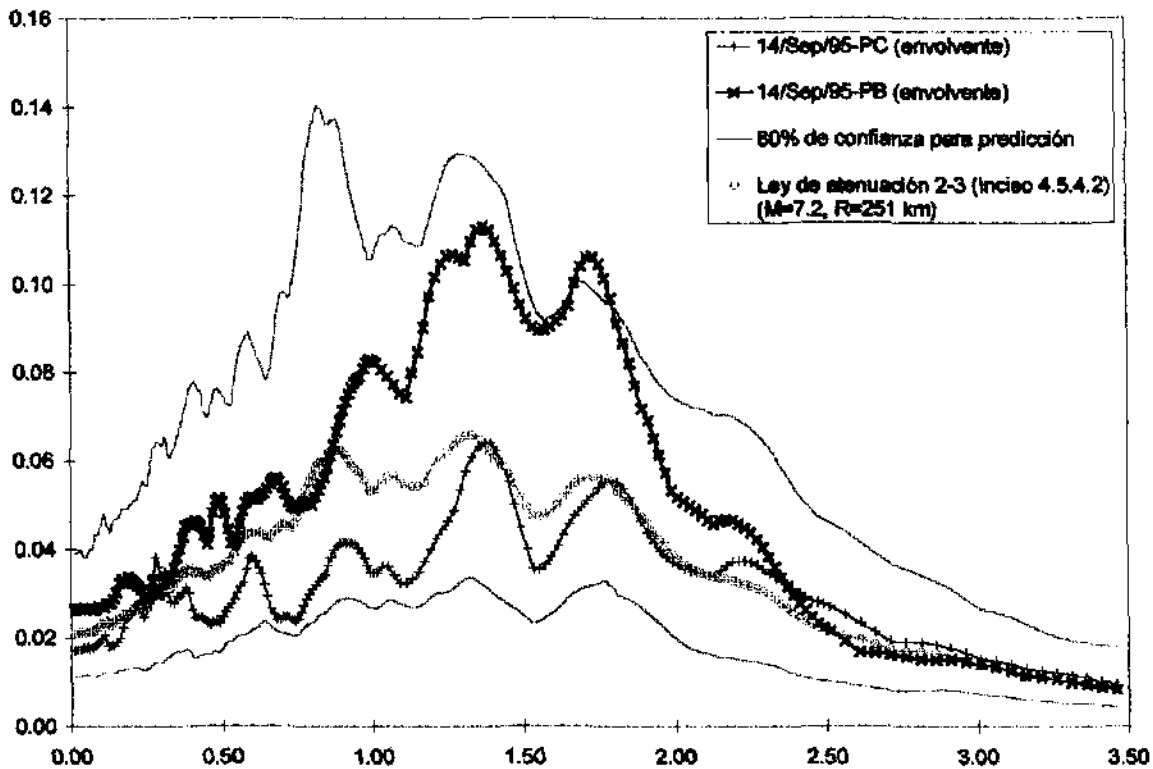


Fig. 5.7.- Espectros con 80% en intervalos de confianza, $q=1$, $\{X_0\}=\{1, 7.2, \ln(251+25)\}$.

5.3 SISMOS CERCANOS AL ESTADO DE PUEBLA

5.3.1 SISMOS HISTÓRICOS INTENSOS

La sismicidad en el estado de Puebla está asociada principalmente a sismos de fallamiento normal y fallas geológicas (Fig. 2.23). Dichos mecanismos, involucran la mayor parte del peligro sísmico a la ciudad de Puebla y se caracterizan por eventos de magnitud moderada a distancias cercanas.

Dos de los eventos más catastróficos para el estado y la ciudad de Puebla fueron los ocurridos cerca de Ciudad Serdán el 3 de octubre de 1864 y el 28 de agosto de 1973 (Tabla 2.9), los cuales produjeron aproximadamente 20 muertes y un gran número de heridos en 1864 y, 500 muertes y 1200 heridos en 1973 (Figueroa, 1974). Dada la importancia del evento, por los daños que se presentaron, se intentó estimar su espectro de respuesta. Cabe mencionar que en este inciso se hablará del sismo de 1973, aunque queda incluido en el análisis el de 1864, ya que ambos tienen los mismos valores de magnitud y distancia según datos calculados y proporcionados por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

El boletín preliminar que expidió el Instituto de Geofísica de la UNAM a la prensa, como consecuencia del sismo en 1973, dice a la letra: "Los sismógrafos de Tacubaya registraron hoy, 28 de Agosto de 1973, a las 03h 51m 24s tiempo local, un macrosismo de magnitud 6 $\frac{1}{4}$ escala Richter, sentido en el Distrito Federal con intensidad media del V grado escala Mercalli. El epicentro se encuentra a 190 km. al sureste, probablemente a los 18.817°N y 97.467°W" (Figueroa, 1974). Mediante el análisis más detenido de sismogramas en 12 estaciones mexicanas, el Instituto de Geofísica calculó una magnitud de 7 en escala Richter (Tabla 5.2). La distancia epicentral a la estación sismológica Tacubaya (TAC) se estimó de 190 Km., con ello se encontró un foco en las coordenadas 18.396°N y 97.788°W, el cual no correspondió a ninguna región previamente identificada, y por ello se asoció a la región sísmica más cercana (región 359 de la carta sísmica de la República Mexicana) cuyas coordenadas son 18.817°N y 97.467°W. (Figueroa, 1974)

El U. S. Department of the Interior Geological Survey publica (Earthquake Data Report, EDR No. 55-73) para el mismo sismo de 1973 una magnitud de 6.8° localizado en las coordenadas 18.267°N y 96.598°W (Tabla 5.2), con base en sismogramas de 37 estaciones distantes al epicentro (Figueroa, 1974).

Tabla 5.2.- Estimación del tamaño y localización del sismo de Ciudad Serdán.

FUENTE	Magnitud (M)	Lat. N.	Long. W.	Prof. (h)	Distancia (R)
Instituto de Geofísica, TAC. (Figueroa, 1973)	7.0	18.817	97.467	100 km.	84 km.
U. S. Department of the Interior Geological Survey (EDR. No. 55-73)	6.8	18.267	96.598	84 km.	195 Km.

Figuroa (1994) reporta que el epicentro según TAC es confirmado por 3 estaciones sismológicas y por el estudio de las intensidades de Mercalli; mientras que el foco según el EDR es confirmado por una estación sismológica mexicana y por el estudio de las intensidades de 6 acelerógrafos. Lo anterior generó dudas en la elección de los parámetros de la fuente, ya que existe una diferencia epicentral (Fig. 5.8) para Puebla de 111 km. (84 km. según TAC y 195 km. según EDR), y de dos décimas de grado en magnitud (Véase Tabla 2.5). Se deduce que los parámetros que tuvo el sismo deberían estar delimitados por ambas fuentes.

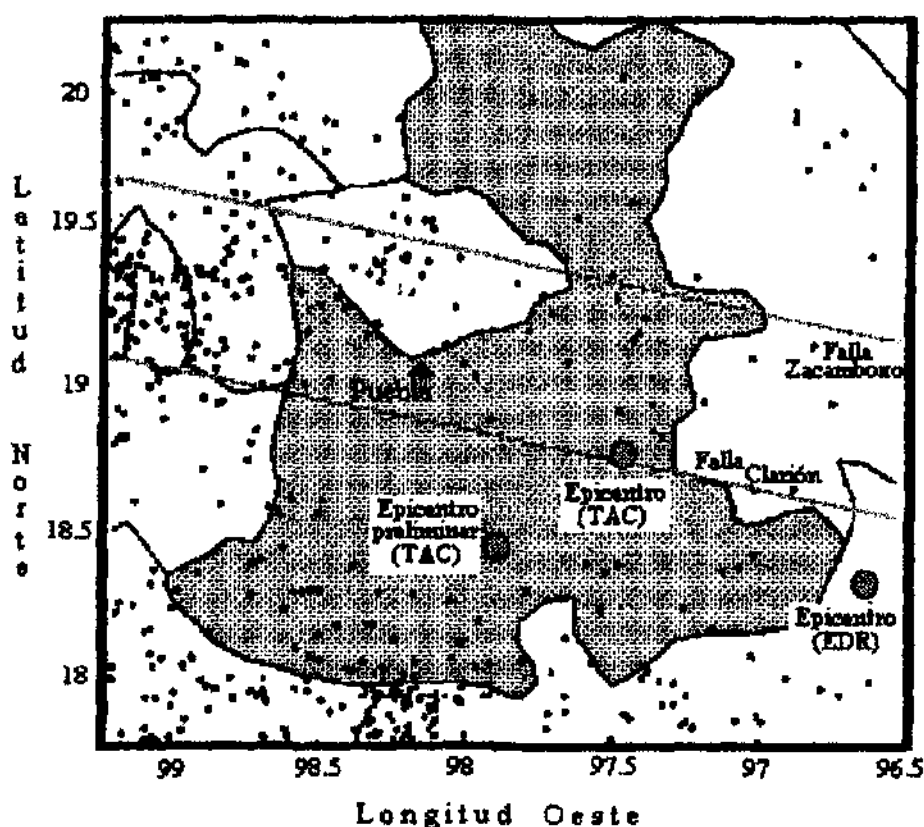


Fig. 5.8.- Localización del sismo de Ciudad Serdán según TAC y EDR.

Pese a las divergencias en la estimación del tamaño y localización para el mismo sismo, se calculan los espectros de respuesta con los parámetros de ambas fuentes (Tabla 5.2), y se grafican junto al actual espectro de diseño y con la propuesta de C. Ruiz et. al. (Figs. 5.9 y 5.10). Las leyes de atenuación usadas son las asociadas a la zona sismogénica 1, obtenidas con las dos componentes ortogonales de 3 registros disponibles en la zona (Inciso 4.5.1.1).

Se observó para estas leyes su gran sensibilidad, no obstante que para ello se introdujo el valor de 25 km. en el modelo. Es importante recalcar que estas leyes fueron construidas con muy pocos registros disponibles. A su vez, en sentido estricto estas leyes son aplicables a escenarios cuyos parámetros estén dentro del rango de sus registros fuente ($5 < M < 6.2$, $80 < R < 115$). Así, las incertidumbres que se tienen en esta zona sismogénica son grandes, por lo que se debe seguir estudiándola para ir despejando todas las dudas que se tienen.

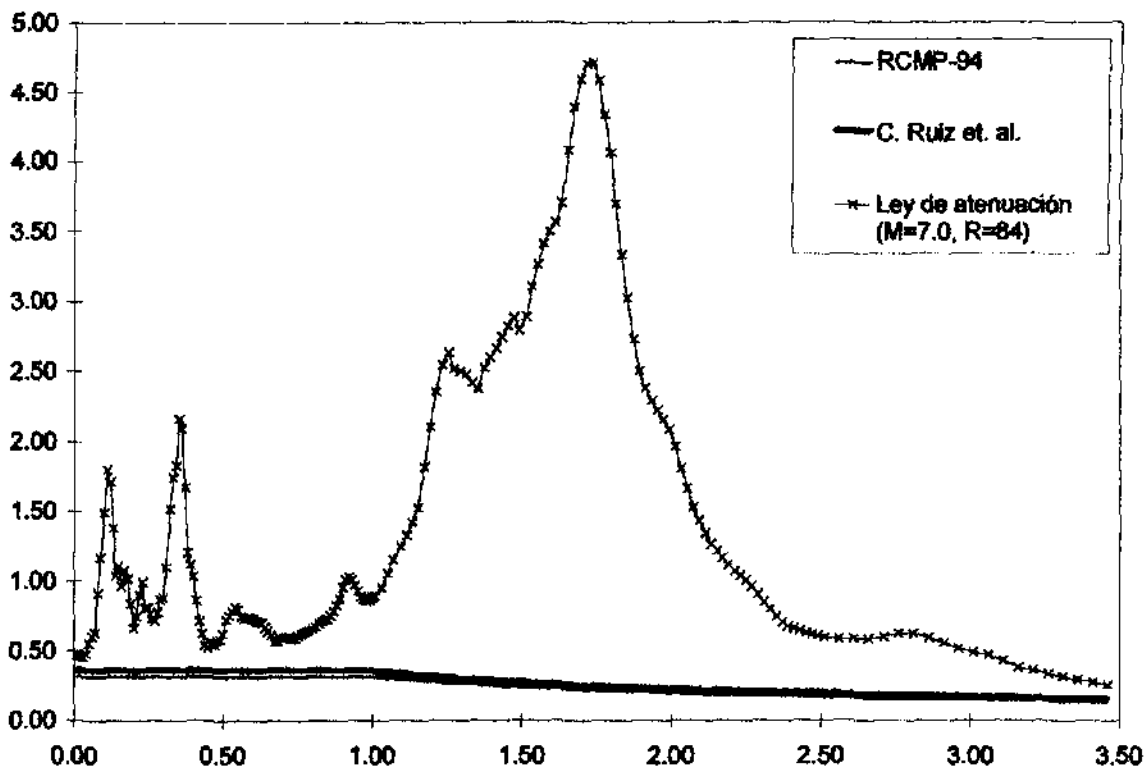


Fig. 5.9.- Espectro de respuesta predicho para el sismo de Ciudad Serdán, con datos del Instituto de Geofísica de la UNAM ($M=7.0$, $R=84$ km.).

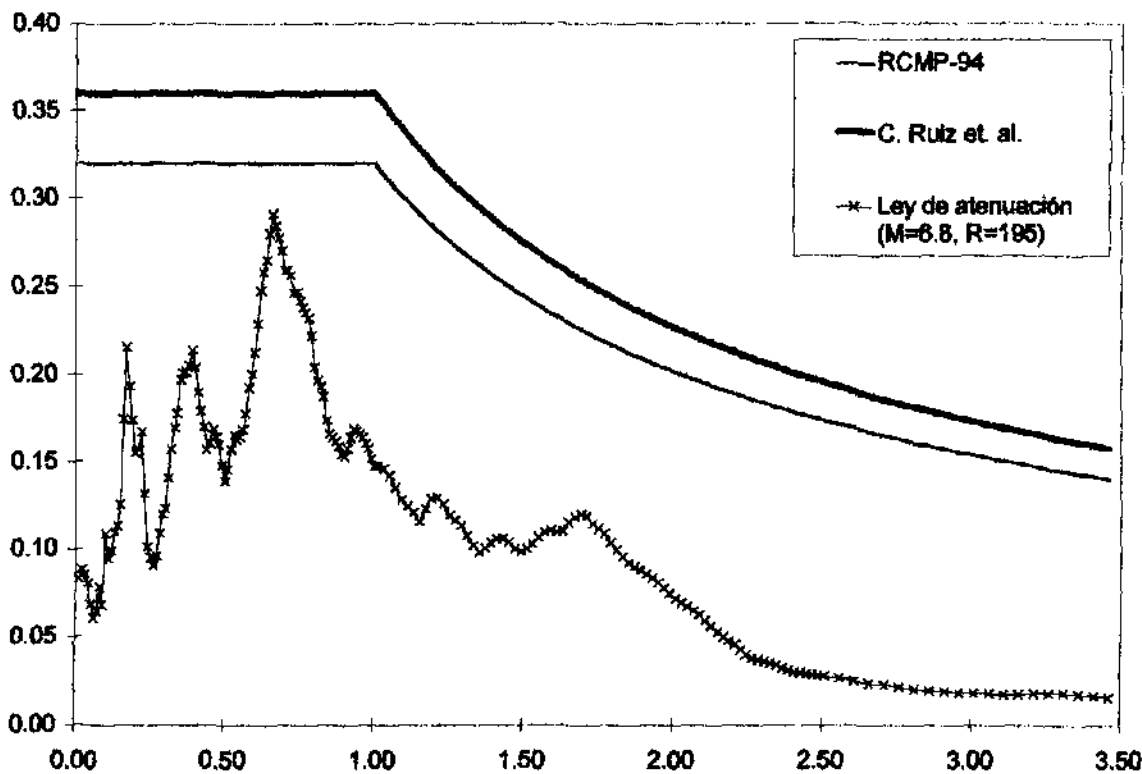


Fig. 5.10.- Espectro de respuesta predicho para el sismo de Ciudad Serdán, con datos del U.S. Department of the Interior Geological Survey ($M=6.8$, $R=195$ km.).

Otro de los eventos intensos dentro del estado (intensidad X en MM), más no así para la ciudad de Puebla (intensidades entre III y IV en MM), fue el ocurrido el 3 de enero de 1920, conocido como el sismo de Jalapa ($M=7.8$, $R=140$ km.; Fig. 2.23).

El espectro de este escenario, obtenido con las leyes de atenuación del inciso 4.5.1.1, fue comparado con el espectro de diseño del reglamento vigente y con la propuesta de C. Ruiz et. al. (Fig. 5.11).

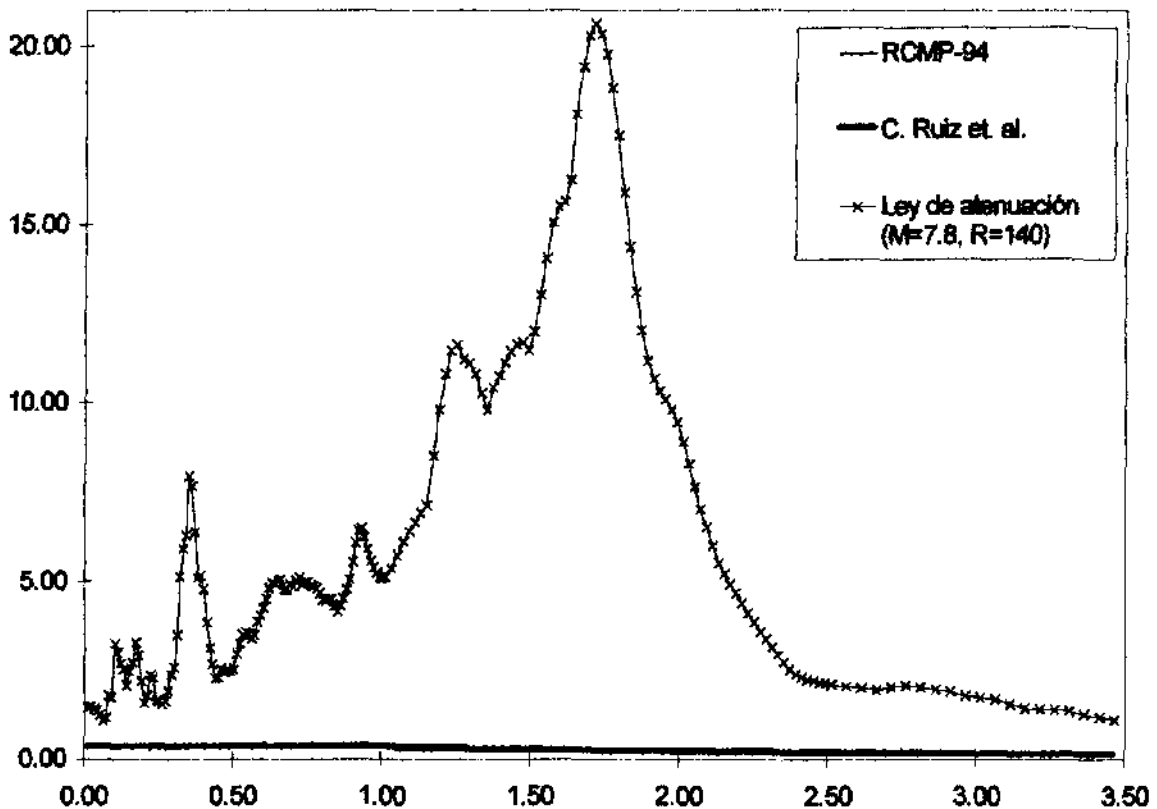


Fig. 5.11.- Espectro de respuesta predicho para el sismo de Jalapa ($M=7.8$, $R=140$ km.).

El espectro predicho para este escenario, de ninguna manera se relaciona con la intensidad presentada en la ciudad de Puebla, la cual estuvo entre III y IV en Mercalli Modificada (ver isosístas en Fig. 2.28). Por lo tanto, son cuestionables las predicciones de espectros de respuesta con estas leyes para eventos procedentes de esta región, la cual esta asociada a otra fuente. La participación al peligro sísmico de los eventos sísmicos provenientes de esta región, serán tomados en cuenta a medida que se tengan registros de la misma.

CONCLUSIONES

El estudio de las características de los temblores que pueden esperarse en un sitio dado es de gran interés para el diseño sísmico de obras civiles. Este estudio es un acercamiento al conocimiento de dichas características para la ciudad de Puebla, y junto con futuros trabajos que se desarrollen en esta área de la ingeniería, ayudará a mitigar probables desastres sísmicos.

En el presente trabajo, se obtuvieron leyes de atenuación propias para la ciudad de Puebla para diversas zonas sismogénicas, con base en 33 espectros de respuesta elásticos (5% de amortiguamiento) asociados a sus acelerogramas registrados por estaciones en la misma ciudad y ubicados en suelo moderadamente blando o zona de transición. Se siguieron dos criterios para el cálculo de las intensidades espectrales, de los cuales, el que considera a la envolvente espectral de los canales ortogonales es el que mejor predice intensidades máximas. El otro criterio, el que considera a los dos canales como registros independientes, se limita a predecir el promedio de las intensidades espectrales.

Para la realización de este trabajo fue necesario estudiar la sismicidad a nivel global y local, a fin de determinar los mecanismos y las fuentes sismogénicas que contribuyen al peligro sísmico y asociar sus parámetros (magnitud y distancia) a las intensidades espectrales registradas en la ciudad. Se consideraron las propiedades dinámicas del suelo para la selección adecuada de los registros a utilizar en el estudio.

Se recopiló información acelerográfica local para poder asociarla a la información sismológica de los eventos que le dieron origen. Dicha información (historia de aceleraciones) fue procesada, y se obtuvieron las intensidades en forma de espectros de respuesta elásticos de pseudoaceleraciones para 5% del amortiguamiento crítico.

Con base en leyes de atenuación previas y los modelos que les dieron origen, se seleccionó un modelo que se juzgó adecuado, el cual se ajustó con la información mencionada para construir leyes de atenuación locales para distintas zonas sismogénicas. Una vez calculadas las leyes de atenuación y sus desviaciones estándar asociadas, se compararon los espectros generados de los registros fuente con sus estimaciones basadas en dichas leyes, y se corrobora su ajuste. En sentido estricto, las leyes calculadas son aplicables a los registros espectrales que les dieron origen. Se construyeron curvas de atenuación sísmica para obtener las pseudoaceleraciones máximas, derivadas de las leyes para la zona 2-3 combinadas, ya que para éstas se tiene mayor respaldo de registros, usándose los más intensos que se traduce en una mayor confiabilidad. Se comenta la dispersión de las leyes obtenidas, con base en los resultados derivados del cálculo de las desviaciones estándar. Asimismo, se tuvo la oportunidad de incluir la comparación del espectro de respuesta del sismo del 15 de julio de 1996 con su estimación basada en las leyes de atenuación, lo que produjo una correlación bastante satisfactoria.

Finalmente, se evaluaron varios escenarios considerados máximos, tanto históricos como hipotéticos, con el propósito de llegar a un acercamiento del peligro sísmico. El espectro predicho de estos escenarios máximos para varias zonas sismogénicas fue comparado con el

actual espectro de diseño para zona II expuesto en el reglamento vigente y con el espectro de diseño propuesto por C. Ruiz et. al. (1994). Por último, se obtuvieron intervalos de confianza para intensidades espectrales de algunos escenarios.

Durante el desarrollo del presente trabajo se observó que los sismos que conllevan un peligro sísmico importante para la ciudad de Puebla son aquellos con un mecanismo de fallamiento normal y fallas geológicas, en las que se generan sismos cuyo epicentro queda muy cerca a la ciudad de Puebla y que, aunque generalmente son eventos de magnitud moderada, producen ordenadas espectrales muy altas. Los eventos que les siguen en cuanto a peligro, son los temblores que se presentan en la zona de subducción de la placa de Cocos en las costas del Pacífico mexicano. Por otro lado, la zona en la que ocurren temblores importantes de subducción profunda que provienen del este de la costa mexicana, junto al estado de Chiapas, representan un peligro sísmico poco significativo para la ciudad de Puebla.

Se observó además que los espectros de respuesta provenientes de las zonas sismogénicas 1, 2 y 3, desarrollan generalmente crestas en diferentes intervalos de periodo, desde 0.1 hasta 2 seg. De esta forma, se hace necesaria la revisión de las características de la meseta del espectro de diseño. Situación similar a ésta detectó Carballo (1994) para la ciudad de Chilpancingo, Gro.

El estudio realizado para los escenarios máximos, es una aproximación al estudio del peligro sísmico, el cual nos ha indicado problemas potenciales serios para sismos originados en la zona 1. Sin embargo, no se pueden sacar conclusiones sobre la validez de los espectros de diseño hasta hacer un estudio más detallado del peligro sísmico de la zona, afinar con futuros datos las leyes de atenuación y, sobre todo, realizar estudios de vulnerabilidad estructural.

Las características intrínsecas de las estructuras se deben tomar en cuenta en los estudios de vulnerabilidad, como la interacción dinámica entre el suelo, subestructura, superestructura y las mismas propiedades de los elementos que los constituyen. Algunas de las muchas propiedades que definen al sistema son: su geometría en planta y en elevación; la resistencia que desarrollará en los rangos elástico y plástico; la calidad de la obra; los detalles constructivos; el costo de construcción; la ductilidad que desarrolla ante acciones a las que estará sujeta; la contribución de la sobrerresistencia de que se provee en el diseño; el comportamiento no lineal del conjunto, de los elementos que lo conforman y de los materiales utilizados; la estructuración que posea; el amortiguamiento que desarrolle ante movimientos; las propiedades de los elementos y de los materiales usados; las propiedades del suelo; imprecisiones en métodos de análisis y diseño; acciones de torsión; efectos de segundo orden; entre otras.

La estrategia fundamental que plantea la ingeniería sísmica a través del desarrollo de los estudios de vulnerabilidad y de la evaluación del riesgo sísmico es el enfrentamiento comparativo entre el valor estimado de la inversión inicial y el valor de pérdidas probables que sufrirían construcciones después de un evento de niveles catastróficos.

RECOMENDACIONES

Se debe poner atención en el futuro en las leyes de atenuación correspondientes a las zonas sismogénicas 1 y 4. En la zona 1, como se comentó oportunamente, la cantidad de registros es escasa, lo que provocó que las leyes obtenidas de ésta tengan la limitación de un reducido respaldo. Dada la importancia que esta zona tiene por involucrar la mayor parte del peligro sísmico a la ciudad de Puebla, se recomienda investigarla con más detalle. Para la zona 4, los vectores coeficientes de atenuación no respetan su signo de proporcionalidad con los parámetros de la fuente, consecuencia de que los datos no se ajustan al modelo de regresión; sin embargo dicha zona no representa peligro sísmico importante para la ciudad de Puebla, por lo que estudios más detallados no se consideran necesarios.

Se recomienda usar las leyes de la zona 2 y 3, considerándolas independientes, para predecir intensidades espectrales de sismos de actividad de fondo; y las asociadas a las zonas 2-3, considerándolas juntas, para temblores característicos. Las leyes asociadas a las zonas sismogénicas 2 y 3, como independientes o mixtas, tienen un mayor respaldo de datos que las demás zonas, aunque ya se ha explicado que todas las leyes aquí obtenidas son estrictamente aplicables a los intervalos donde se encuentran los parámetros de magnitud y distancia epicentral asociados a los registros utilizados.

Se recomienda además, usar las leyes obtenidas con el criterio que considera a la envolvente espectral de los canales ortogonales para predecir intensidades espectrales máximas. Las calculadas con el criterio que considera a los dos canales como registros independientes, se recomiendan aplicables para predecir el promedio de las intensidades espectrales en los sentidos longitudinal y transversal.

Es indispensable la incorporación a las leyes de atenuación los eventos futuros para mejorarlas. Muchas de las incertidumbres que aún existen, sin duda alguna se despejarán a medida que se siga analizando el fenómeno, y mucho ayudaría el contar con mayor número de registros para aumentar la confiabilidad; para ello, se recomienda aumentar la red acelerográfica en la ciudad de Puebla y que además se conjunten esfuerzos de las partes que poseen dicha información. Se destaca la importancia de tener abiertos a revisión pública catálogos y acelerogramas digitalizados existentes. Como muestra, este estudio hubiera podido obtener resultados más firmes si se hubiera contado con registros que existen pero no están disponibles a los investigadores.

Finalmente, se recomienda continuar con estudios más detallados de peligro sísmico y vulnerabilidad estructural, que concluirán en el estudio de riesgo sísmico para la ciudad de Puebla.

GLOSARIO SISMOLÓGICO

(Universidad de Chile, Departamento de Geofísica. <http://www.dgf.uchile.cl/glosario.html>)

Distancia epicentral.- Distancia entre un observador y el epicentro de un sismo, medida sobre la superficie de la Tierra.

Enjambres (swarms).- En algunas regiones se producen una serie de temblores que no están asociados con ningún terremoto mayor. A estas series se les llama "enjambres sísmicos". Éstos son comunes en las regiones volcánicas, pero también suceden en otras regiones no asociadas a la actividad volcánica.

Epicentro.- El punto en la superficie de la Tierra ubicado directamente sobre el foco o hipocentro.

Escala de Mercalli Modificada.- Es una escala subjetiva de 12 grados que mide la intensidad observada en un lugar específico basada en los efectos que el sismo provocó (Ver *Escala de Mercalli Modificada*).

Escala de Richter.- Corresponde a la escala de magnitud de un sismo. Es una escala abierta por ambos lados, sin embargo el terremoto más grande registrado hasta el momento, el de Alaska en 1964, alcanzó una magnitud de 9.2 correspondiendo a una ruptura del orden de 1000 km. de longitud, 200 km. de ancho y con un desplazamiento promedio de 20 m. En el otro extremo de la escala, magnitudes negativas se logran en laboratorios con rupturas milimétricas.

Falla.- Es la superficie de contacto entre dos bloques que se desplazan en forma diferencial uno con respecto al otro. Se pueden extender espacialmente por varios cientos de km. y en forma temporal por varios millones de años. Una falla es considerada activa cuando ha tenido algún desplazamiento relativo en los últimos 2 millones de años, o en la cual se observa actividad sísmica.

Hipocentro o Foco.- Es el punto en el interior de la Tierra, en el cual se da inicio a la ruptura que genera un sismo.

Hora o tiempo origen.- Corresponde al momento en que se produce la relajación súbita de los esfuerzos, es decir, el momento en que se inicia la ruptura en el foco. Esta puede ser referida a la hora local u hora estandarizada universal (UTC), esta última también conocida como hora del meridiano de Greenwich (GMT).

Intensidad.- Es una medida de los efectos producidos por un sismo en personas, estructuras y terreno en un lugar particular. La medida de intensidades más conocida es la escala de Mercalli Modificada, que clasifica los efectos sísmicos con doce niveles ascendentes en severidad. Existen además otras medidas de intensidades como la aceleración máxima, la velocidad máxima o los desplazamientos máximos del terreno, entre otras. La intensidad no sólo depende de la fuerza del sismo (magnitud), sino que también de la distancia epicentral, la geología local, la naturaleza del terreno y el tipo de construcciones del lugar.

Isosistas.- Curvas que unen puntos de la misma intensidad.

Magnitud.- Es una medida que tiene relación con la cantidad de energía liberada en forma de ondas. Se puede considerar como un tamaño relativo de un temblor, y se determina tomando el logaritmo (base 10) de la amplitud máxima de movimiento de algún tipo de onda (de cuerpo, de superficie, etc.), a la cual se le aplica una corrección por distancia epicentral y profundidad focal. En oposición a la intensidad, un sismo posee solamente una medida de magnitud y varias observaciones de intensidad. Los tipos de magnitudes que se utilizan en forma más tradicional son la de Richter o local (MI), las calculadas con las ondas de cuerpo (Mb), con las ondas de superficie (Ms), la de coda (Mc), la magnitud momento (Mw), etc.

Precursores.- En ciertos casos es posible observar algunos temblores pequeños con anterioridad al sismo principal, a éstos se les denomina precursores. Sin embargo, éstos no suceden con la suficiente regularidad como para ser utilizados a modo de predecir terremotos de mayor magnitud.

Réplicas.- Después que se produce un terremoto grande, es posible esperar que ocurran muchos sismos de menor tamaño en la vecindad del hipocentro del sismo principal. A estos pequeños temblores se les denomina réplicas. Algunas series de réplicas duran largo tiempo, incluso superan el lapso correspondiente a un año. La zona que cubre los epicentros de las réplicas se llama "área de réplicas"; y sus dimensiones son una indicación del tamaño de la falla asociada con el terremoto principal.

Sismo.- Corresponde al proceso de generación de ondas y su posterior propagación por el interior de la Tierra. Al llegar a la superficie de la Tierra, estas ondas se dejan sentir tanto por la población como por estructuras, y dependiendo de la amplitud del movimiento (desplazamiento, velocidad y aceleración del suelo) y de su duración, el sismo producirá mayor o menor intensidad.

Tsunamis.- Los terremotos muy grandes, cuyas zonas de ruptura están bajo el mar o en las cercanías de la costa, producen cambios de elevación en la superficie y el fondo oceánico. Estos cambios topográficos generan olas que se propagan a partir del epicentro y que pueden alcanzar alturas de varias decenas de metros sobre el nivel normal del mar. Estas olas se llaman "Tsunamis", término derivado del japonés que significa literalmente ola de bahía. Este término es aceptado internacionalmente para designar marejadas producidas por impulsos en masas de agua y corresponde a lo que en México se denomina maremoto o salida de mar.

ESCALA DE INTENSIDADES DE MERCALLI MODIFICADA

(Universidad de Chile, Departamento de Geofísica. <http://www.dgf.uchile.cl/mercalli.html>)

- I No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
- II Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
- III Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica, por su semejanza con la vibración producida por el paso de un vehículo liviano. Es posible estimar la duración del sismo.
- IV Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios aún durante el día. En el exterior, la percepción no es tan general. Se dejan oír las vibraciones de la vajilla, puertas y ventanas. Se sienten crujir algunos tabiques de madera. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
- V La mayoría de las personas lo perciben aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas personas despiertan. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
- VI Lo perciben todas las personas. Se atemorizan y huyen hacia el exterior. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los juguetes, libros y otros objetos caen de los armarios. Los cuadros suspendidos de las murallas caen. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos. Se hace visible el movimiento de los árboles y arbustos, o bien, se les oye crujir. Se siente el tañido de las campanas de iglesias y escuelas.
- VII Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. El fenómeno es percibido por los conductores de automóviles en marcha. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Se dañan los muebles. Caen trozos de estuco, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Las chimeneas débiles se quiebran al nivel de la techumbre. Se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia. Los terraplenes y taludes de arena o grava experimentan pequeños deslizamientos o hundimientos. Se dañan los canales de hormigón para riego. Tañen todas las campanas.
- VIII Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería especialmente bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves. Caen murallas de albañilería. Caen chimeneas en casas e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Las casas de madera se desplazan y aún se salen totalmente de sus bases. Los tabiques se desprenden. Cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos. Aparecen grietas en el suelo húmedo, especialmente en la superficie de las pendientes escarpadas.
- IX Se produce pánico general. Las estructuras de albañilería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras corrientes de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías subterráneas. Grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
- X Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas se destruyen. Se producen grandes daños en represas y diques. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, etc. sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.
- XI Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.
- XII El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

TABLAS

TABLA 2.1.- SISMOS QUE HAN PROVOCADO MÁS DE 1000 MUERTES.....	16
TABLA 2.2.- SISMOS QUE HAN PROVOCADO MÁS DE 50,000 MUERTES.....	17
TABLA 2.3.- NÚMERO DE SISMOS DE 1985 A 1994 REGISTRADOS POR LA NEIC DEL USGS.....	17
TABLA 2.4.- FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE SISMOS DESDE 1900.....	18
TABLA 2.5.- INCREMENTO EN MAGNITUD CONTRA DESPLAZAMIENTOS Y ENERGÍA.....	18
TABLA 2.6.- TR Y PC% ESTIMADAS DE RUPTURA.....	22
TABLA 2.7.- SISMOS MÁS INTENSOS A LA FECHA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.....	24
TABLA 2.8.- SISMOS MÁS INTENSOS A LA FECHA EN EL ESTADO DE PUEBLA.....	27
TABLA 2.9.- SISMOS MÁS INTENSOS A LA FECHA EN LA CIUDAD DE PUEBLA.....	30
TABLA 2.10.- ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE PUEBLA.....	33
TABLA 3.1.- UBICACIÓN DE LOS ACELERÓGRAFOS EN LA CIUDAD DE PUEBLA.....	37
TABLA 3.2.- MODELO DEL ACELERÓGRAFO E INSTITUCIÓN QUE OPERA LA ESTACIÓN.....	38
TABLA 3.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS ACELERÓGRAFOS UBICADOS EN LA CIUDAD.....	38
TABLA 3.4.- RESUMEN DE LA INFORMACIÓN ACELEROGRÁFICA DISPONIBLE.....	40
TABLA 3.5.- INFORMACIÓN SISMOLÓGICA DE LOS REGISTROS.....	45
TABLA 4.1.- LEYES DE ATENUACIÓN PROPUESTAS POR VARIOS AUTORES.....	61
TABLA 4.2.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	69
TABLA 4.3.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	71
TABLA 4.4.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	74
TABLA 4.5.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	77
TABLA 4.6.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	80
TABLA 4.7.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	83
TABLA 4.8.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	87
TABLA 4.9.- PSEUDOACELERACIÓN MÁXIMA PARA DIVERSOS ESCENARIOS.....	88
TABLA 4.10.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	92
TABLA 4.11.- PSEUDOACELERACIÓN MÁXIMA PARA DIVERSOS ESCENARIOS.....	93
TABLA 4.12.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	96
TABLA 4.13.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN {B} Y DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}.....	99
TABLA 5.1.- ESPECTROS DE DISEÑO PARA ZONA DE TRANSICIÓN.....	102
TABLA 5.2.- TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DEL SISMO DE CIUDAD SERDÁN.....	108

FIGURAS

FIG. 2.1.- LOCALIZACIÓN DE UN SISMO Y LA PROPAGACIÓN DE SUS ONDAS	9
FIG. 2.2.- EFECTOS DE UN SISMO EN LAS CONSTRUCCIONES	9
FIG. 2.3.- CORTE DEL PLANETA	10
FIG. 2.4.- PLACAS TECTÓNICAS EN EL MUNDO	11
FIG. 2.5.- FALLA DE SAN ANDRÉS	11
FIG. 2.6.- SUBDUCCIÓN DE PLACAS TECTÓNICAS	12
FIG. 2.7.- SISMOS POR FALLAMIENTO NORMAL	12
FIG. 2.8.- SISMÓGRAFO	13
FIG. 2.9.- REGISTRO DE LOS SISMOGRAMAS	13
FIG. 2.10.- ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA	14
FIG. 2.11.- CINTURONES CIRCUNPACÍFICO Y ALPINO	15
FIG. 2.12.- SISMO DE 1964. ALASKA, USA. $M=9.2$	18
FIG. 2.13.- SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE, 1985. MÉXICO, D.F.	19
FIG. 2.14.- SISMO DE OCTUBRE DE 1989. LOMA PRIETA, USA	19
FIG. 2.15.- SISMO DEL 17 DE ENERO DE 1995. KOBE (HYOGO-KEN NANBU), JAPÓN	19
FIG. 2.16.- SISMO DEL 9 DE OCTUBRE DE 1995. MANZANILLO, MÉXICO	19
FIG. 2.17.- SISMICIDAD DE MÉXICO DE 1911 A 1994; $M>4.5$	20
FIG. 2.18.- PLACAS TECTÓNICAS QUE LLEGAN A LA REPÚBLICA MEXICANA	21
FIG. 2.19.- MAPA DE PC% (1986-1996) EN LA TRINCHERA MEXICANA	22
FIG. 2.20.- ÁREAS DE RUPTURA RECIENTES EN LA TRINCHERA MEXICANA	23
FIG. 2.21.- CARTA SÍSMICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA	23
FIG. 2.22.- EL ESTADO DE PUEBLA Y LAS ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS EN SUS LÍMITES.	25
FIG. 2.23.- MAPA DE SISMICIDAD DEL ESTADO DE PUEBLA (1974-1992)	26
FIG. 2.24.- CARTA SÍSMICA DEL ESTADO DE PUEBLA	26
FIG. 2.25.- MAPA DE ISOSÍSTAS DEL SISMO DEL 7 DE ABRIL DE 1845	27
FIG. 2.26.- MAPA DE ISOSÍSTAS DEL SISMO DEL 3 DE OCTUBRE DE 1864	28
FIG. 2.27.- MAPA DE ISOSÍSTAS DEL SISMO DEL 19 DE JULIO DE 1882	28
FIG. 2.28.- MAPA DE ISOSÍSTAS DEL SISMO DEL 3 DE ENERO DE 1920	29
FIG. 2.29.- MAPA DE ISOSÍSTAS DEL SISMO DEL 28 DE AGOSTO DE 1973	29
FIG. 2.30.- TECTÓNICA DEL VALLE DE PUEBLA	30
FIG. 2.31.- MAPA GEOLÓGICO DE LA CIUDAD DE PUEBLA	32
FIG. 2.32.- MAPA DE ISOPERIODOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA	34
FIG. 2.33.- MAPA DE ZONIFICACIÓN PARA LA CIUDAD DE PUEBLA	35
FIG. 3.1.- LOCALIZACIÓN DE LOS ACELERÓGRAFOS EN LA CIUDAD DE PUEBLA	36
FIG. 3.2.- ACELERÓGRAFO DCA-310 (TERRA TECHNOLOGY)	37
FIG. 3.3.- ACELERÓGRAFO DCA-333 (TERRA TECHNOLOGY)	37
FIG. 3.4.- ACELERÓGRAFO SSA-2 (KINEMATRICS)	37
FIG. 3.5.- ACELEROGRAMAS DISPONIBLES, REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE PUEBLA	41
FIG. 3.6.- LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS DE LOS ACELEROGRAMAS DISPONIBLES	47
FIG. 3.7.- ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS	50
FIG. 3.8.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA ESTACIÓN PC	54
FIG. 3.9.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA ESTACIÓN PB	54
FIG. 3.10.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA ESTACIÓN PBPP	55
FIG. 3.11.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA ESTACIÓN SXPU	55
FIG. 3.12.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA ESTACIÓN UAPP	55
FIG. 3.13.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE SISMOS CON M' ENTRE 4.5 A 6.8	56
FIG. 3.14.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE SISMOS CON M' ENTRE 6.9 A 8.1	56
FIG. 3.15.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA ZONA SISMOGÉNICA 1	57
FIG. 3.16.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA ZONA SISMOGÉNICA 2	57
FIG. 3.17.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA ZONA SISMOGÉNICA 3	58
FIG. 3.18.- ESPECTROS DE RESPUESTA DE LA ZONA SISMOGÉNICA 4	58
FIG. 4.1.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA $\{B\}$	67
FIG. 4.2.- DESVIACIONES ESTÁNDAR $\{S\}$	68

FIG. 4.3.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 24 DE OCTUBRE DE 1980	68
FIG. 4.4.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	70
FIG. 4.5.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 24 DE OCTUBRE DE 1980	70
FIG. 4.6.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	72
FIG. 4.7.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	72
FIG. 4.8.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985	73
FIG. 4.9.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985	73
FIG. 4.10.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	75
FIG. 4.11.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	75
FIG. 4.12.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985	76
FIG. 4.13.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985	76
FIG. 4.14.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	78
FIG. 4.15.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	78
FIG. 4.16.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 29 DE NOVIEMBRE DE 1978	79
FIG. 4.17.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995	79
FIG. 4.18.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	81
FIG. 4.19.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	81
FIG. 4.20.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 29 DE NOVIEMBRE DE 1978	82
FIG. 4.21.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995	82
FIG. 4.22.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	84
FIG. 4.23.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	85
FIG. 4.24.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985	85
FIG. 4.25.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985	86
FIG. 4.26.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995	86
FIG. 4.27.- CURVAS DE ATENUACIÓN SÍSMICA PARA PA MÁXIMAS	88
FIG. 4.28.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	89
FIG. 4.29.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	90
FIG. 4.30.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985	90
FIG. 4.31.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985	91
FIG. 4.32.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1995	91
FIG. 4.33.- CURVAS DE ATENUACIÓN SÍSMICA PARA PA MÁXIMAS	93
FIG. 4.34.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	94
FIG. 4.35.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	94
FIG. 4.36.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 10 DE FEBRERO DE 1985	95
FIG. 4.37.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE OCTUBRE DE 1995	95
FIG. 4.38.- COEFICIENTES DE ATENUACIÓN SÍSMICA {B}	97
FIG. 4.39.- DESVIACIONES ESTÁNDAR {S}	97
FIG. 4.40.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 10 DE FEBRERO DE 1985	98
FIG. 4.41.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 20 DE OCTUBRE DE 1995	98
FIG. 4.42.- VECTORES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR {S} DE LAS LEYES DE ATENUACIÓN.	100
FIG. 4.43.- COMPARACIÓN CON EL SISMO DEL 15 DE JULIO DE 1996	101
FIG. 5.1.- ESPECTRO DE RESPUESTA DEL ESCENARIO: 19 DE JULIO DE 1882	103
FIG. 5.2.- ESPECTRO DE RESPUESTA DEL ESCENARIO: 15 DE ABRIL DE 1907	104
FIG. 5.3.- ESPECTRO DE RESPUESTA DEL ESCENARIO: 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985	104
FIG. 5.4.- ESPECTROS DE RESPUESTA PREDICHOS LA BRECHA DE GUERRERO	106
FIG. 5.5.- INTERVALOS DE CONFIANZA, $Q=1$, $\{X_0\}=\{1, 8.2, \text{LN}(300+25)\}$	106
FIG. 5.6.- INTERVALOS DE CONFIANZA, $Q=1$, $\{X_0\}=\{1, 8.3, \text{LN}(300+25)\}$	106
FIG. 5.7.- INTERVALOS DE CONFIANZA, $Q=1$, $\{X_0\}=\{1, 7.2, \text{LN}(251+25)\}$	107
FIG. 5.8.- LOCALIZACIÓN DEL SISMO DE CIUDAD SERDÁN SEGÚN TAC Y EDR	109
FIG. 5.9.- ESPECTRO DE RESPUESTA PREDICHO PARA CIUDAD SERDÁN (TAC)	110
FIG. 5.10.- ESPECTRO DE RESPUESTA PREDICHO PARA CIUDAD SERDÁN (EDR)	110
FIG. 5.11.- ESPECTRO DE RESPUESTA PREDICHO PARA JALAPA ($M=7.8$, $R=140$ KM.)	111

REFERENCIAS

- AMP (Ayuntamiento del Municipio de Puebla). (1987). *"Reglamento de construcciones para el municipio de Puebla"*. Periódico oficial del Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Pue.
- AMP (Ayuntamiento del Municipio de Puebla). (1994). *"Reglamento de construcciones para el municipio de Puebla"*. Periódico oficial del Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Pue.
- Aki, K. (1967). *"Scaling laws of seismic spectrum"*. J. Geophys. Res 72: 1217-1231.
- Auvinet, G. (1976). *"Estudio de mecánica de suelos para la ciudad de Puebla"*. Memorias del VIII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, No. 13. Guanajuato, Gto.
- Brune, J. N. (1979). *"Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes"*. J. Geophys. Res. 75: 4997-5009.
- Campbell, K. W. (1985). *"Strong motion attenuation relations: A ten-year perspective"*. Earthquake Spectra, VI, n4.
- Carballo, J. (1994). *"Estudio de riesgo sísmico para Chilpancingo"*. Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM. México.
- CICPAC (Colegio de Ingenieros Civiles de Puebla, A. C.). (1984). *"Proyecto de reglamento de construcciones para el municipio de Puebla"*. Presentada al Municipio de Puebla. Puebla, Pue.
- IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) (1969). *"Capítulo de diseño por sismo"*. Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad. México D.F.
- IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) (1981). *"Capítulo de diseño por sismo"*. Manual de Diseño de Obras Civiles. C-1-3. Comisión Federal de Electricidad. México D.F.
- IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) (1993). *"Capítulo de diseño por sismo"*. Manual de diseño de obras civiles. C-1-3. Comisión Federal de Electricidad. México D.F.
- DDF (Departamento del Distrito Federal) (1962). *"Reglamento de Construcciones para el D.F."*. Diario Oficial de la Federación. México D.F.
- DDF (Departamento del Distrito Federal) (1976). *"Reglamento de Construcciones para el D.F."*. Diario Oficial de la Federación. México D.F.
- DDF (Departamento del Distrito Federal) (1987). *"Reglamento de Construcciones para el D.F."*. Diario Oficial de la Federación. México D.F.
- Draper, N. y Smith, H. (1981). *"Applied regression analysis"*. Ed. John Wiley & Sons, 2a. Edición. USA.
- EERI (Earthquake Engineering Research Institute) Committee on seismic risk (1989). *"Seismic design criteria for nuclear reactor facilities"*. IV World Conference on Earthquake Engineering, Chile.
- ELSP (Estado Libre y Soberano de Puebla). (1935). *"Reglamento de Construcciones para el Estado de Puebla"*. Periódico oficial del Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Pue.
- ELSP (Estado Libre y Soberano de Puebla). (1952). *"Reglamento de Construcciones para el Estado de Puebla"*. Periódico oficial del Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Pue.

- Esteva, L. (1970). "Regionalización Sísmica de México para fines de Ingeniería". Informe 246, Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- Esteva, L. (1988). "The México Earthquake of September 19, 1985; Consequences, Lessons, and Impact on Research and Practice". Earthquake Spectra, Vol. 4, Num 3: Pags 413-426
- Figueras, J. (1974). "Sísmicidad en Puebla. Macrosismo del 28 de agosto de 1973". Informe 343, Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- Fundación ICA (1987). "Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985". Editorial Limusa. México D.F.
- G. González Pomposo. (1996). *Comunicación personal*.
- Hallam, A. (1975). "Alfred Wegener and the hypothesis of continental drift". Continents adrift and continents aground. Editorial Freeman. USA.
- Iglesias, J., et. al. (1995). "Zonificación Sísmica de Ciudades en México". Memorias del IV Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica. Oaxaca, Oax.
- Jara, M., et. al. (1992). "Seismic vulnerability of Mexico City buildings". Memorias de la Décima Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica. Madrid, España.
- Juárez, J. y Perea, T. (1996). "Catalogo de acelerogramas de sismos registrados de la red acelerográfica en la UPAEP 1993-1996". Facultad de Ingeniería Civil, U.P.A.E.P. Puebla, Pue.
- McGuire, R.K. (1976). "Evaluation of sites for Earthquake risk". United States Department of the Interior, Geological Survey, Open file report 76-67.
- Meli, R. (1995). "Diseño Sísmorresistente". Diseño Estructural. Editorial Limusa. México, D.F.
- Mohraz, B. y Elghadamsi F.E.(1989). "Earthquake ground motion and response spectra". The seismic design handbook, Van Nostrand Reinhold, pp 32-80. USA.
- Nava, A. (1987). "Terremotos. La ciencia de México". Fondo de Cultura Económica. Mexico.
- Newmark, N. y Rosenblueth, E. (1976). "Fundamentos de Ingeniería Sísmica". Editorial Diana, México, D.F.
- Nishenko S.P., Singh S.K., 1987, "Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along Mexican subduction zone"; Bulletin of Seismological Society of América, v. 77, n. 6, pp. 2095-2114.
- Ruiz, C. et. al. (1994). "Zonificación Sísmica de la Ciudad de Puebla". Memorias del I Seminario Interuniversitario de Zonificación Sísmica. Chilpancingo, Gro., Mex.
- Rosenblueth, E. (1992). "Características de los Sismos". Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos. IMCYC. México, D.F.
- Singh, S. K. y Ordaz, M. (1990). "Sísmicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual". CENAPRED. México.

- Sordo, E. et al. (1994). "Sismo del 22 de mayo de 1994". RIIS-01, Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- Sordo, E. et al. (1995). "Sismo del 10 de diciembre de 1994". RIIS-02, Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- Sordo, E. et al. (1996). "Sismo del 14 de septiembre de 1995". RIIS-03, Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- Sordo, E. et al. (1996). "Sismo del 9 de octubre de 1995". RIIS-04, Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- Sordo, E. et al. (1996). "Sismo del 20 de octubre de 1994". RIIS-05, Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- Sordo, E. y Fernández, A. (1995). "RIISPROC, Programa para el procesamiento y graficación de registros acelerométricos". Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica. México.
- SMIS (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica) (1993). "Catálogo de Estaciones Acelerográficas 1960-1992". Base Nacional de Sismos Fuertes. México D.F.
- SMIS (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica) (1996). "Actualización de los catálogos de estaciones a 1995 y acelerogramas a 1994. Catálogo de los registros de los temblores del 14 de septiembre, 9 y 21 de octubre de 1995". Base Nacional de Sismos Fuertes. México D.F.
- Trigos, J.L. (1988). "Riesgo sísmico de construcciones y reglamentos en México". III Simposio Nacional sobre Ingeniería Sísmica. Guadalajara, Jal., México.
- Velázquez, J. R. (1995). "Estudio experimental de las bases acelerográficas UPAEP-UAM". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, UPAEP. Puebla, Pue, Mex.
- Vera, A. (1996). *Comunicación personal*.
- Whitney, R. A. (1996). "Sismicidad de la trinchera mexicana, sus fallas secundarias y otras fuentes de sismicidades en el sur de México". Memorias del II Seminario Interuniversitario de Zonificación Sísmica. Toluca, Mex.
- Wyllie, P. J. (1975). "The earth's mantle". Continents adrift and continents aground. Editorial Freeman. USA.
- Yegian, M. K. (1979). "Probabilistic seismic hazard analysis". Department of Civil Engineering, Northeastern University, Boston, Mass., USA.
- Zeevaert, L. (1988). "Sismo geodinámica de la superficie del suelo", Editorial e Impresora Int., México.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.

Encarta (1994). "Encarta, *The Complete Multimedia Encyclopedia*". Microsoft. USA.

EQE. "The January 17, 1995 Kobe Earthquake. An EQE Summary Report. April 1995".
<http://www.eqe.com/publications/kobe/kobe.html>

GIIS (Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica) "GIIS y RIIS Web Page"
<http://www.pue.upaep.mx/carrs/GIIS/riis.html>

GIIS (Grupo Interuniversitario de Instrumentación Sísmica) "October 9, 1995, Manzanillo, Earthquake"
<http://www.pue.upaep.mx/carrs/GIIS/manzanillo.html>

Seekins, L., et. al. (1992). "Digitized Strong-Motion Acelerograms of North and Central American Earthquakes 1933-1986". USGS DDS-7 (U. S. Geological Survey Digital Data Series). USA.

Universidad de Chile, Departamento de Geofísica. "Glosario Sismológico".
<http://www.dgf.uchile.cl/glosario.html>

Universidad de Chile, Departamento de Geofísica. "Escala de Intensidades de Mercalli Modificada"
<http://www.dgf.uchile.cl/mercalli.html>

USGS (United States Geological Survey). "National Earthquake Information Center Earthquake Lists".
<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqlists.html>

USGS (United States Geological Survey). "Earthquakes with 1,000 or More Deaths in the World".
<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmajr.lis>

USGS (United States Geological Survey). "Most Destructive Earthquakes in the World".
<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqsmosdc.lis>

USGS (United States Geological Survey). "Earthquake Facts and Statistics".
<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.lis>

Zúñiga, R. "Departamento de Sismología. Home-Page".
<http://tlacael.igeofcu.unam.mx/Sismo.html>