



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

EFFECTOS DE SITIO OBSERVADOS EN ESTACIONES
ACELEROGRÁFICAS DE LA CIUDAD DE PUEBLA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

LUIS ANTONIO TORRES GONZÁLEZ

TUTOR:

M.I. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi padre

Por ser un ejemplo de vida para mi, gracias por todas las enseñanzas, el apoyo que me diste, siempre estarás presente en cada etapa de mi vida

A mi madre

Por todo el esfuerzo, la paciencia y el soporte que me brindaste, este triunfo también es tuyo y siempre estaré en deuda contigo

A mi hermana

Por tu compañía, cariño y apoyo durante todos estos años

A mis profesores

Por su tiempo, dedicación y enseñanza

A mis amigos y compañeros

Por su ayuda y compartir tantos momentos

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por la oportunidad de pertenecer a esta comunidad universitaria, de lo cual me siento orgulloso.

Al Instituto de Ingeniería, en especial al M. en I. Leonardo Alcántara Nolasco por el tiempo y el apoyo proporcionados para la elaboración de este trabajo, al M. en I. Marco Antonio Macías Castillo por sus valiosos conocimientos, consejos y comentarios aportados durante la elaboración de esta tesis, a la Ing. Ana Laura Ruíz Gordillo por los datos y consejos brindados, al Ing. Víctor Hugo Medrano Rivera por las aportaciones realizadas, y en general a toda la coordinación de instrumentación sísmica por las facilidades dadas durante mi estancia en el Instituto.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería por su vocación y apoyo.

A los profesores que he tenido a lo largo de toda mi vida académica, sin duda cada uno de ellos me ha dejado muchas enseñanzas.

A mis padres, por todo el tiempo, trabajo y esfuerzo que me han dedicado, por darme buenos hábitos y estar conmigo en todo momento.

A mi hermana por la ayuda, paciencia y compañía a lo largo de mi vida.

A mi familia, abuelos, tíos y primos que me han acompañado, apoyado y aconsejado a lo largo de mi existencia.

A Irene por ser una parte muy importante en mi vida, que me ayudó mucho en la realización de este trabajo y durante gran parte de mis estudios en la Facultad, que me ha dado su compañía y apoyo durante todo este tiempo.

A mi amigo Mario por su ayuda y consejos.

A mis amigos Omar y Josefina por compartir muchos momentos juntos y permitirme formar parte de sus vidas.

A todos mis amigos y compañeros que hicieron posible y más agradable la realización de mis estudios.

Índice

	Página
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo.....	7
Contenido.....	7
CAPÍTULO I	8
I. CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL VALLE DE PUEBLA.....	9
I.1 Descripción geológica	9
I.2 Información geotécnica	16
CAPÍTULO II	21
II. INFORMACIÓN SÍSMICA OBTENIDA EN LA RED DE ACELERÓGRAFOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA	22
II.1 Equipo de registro sísmico	22
II.2 Localización de estaciones.....	26
II.3 Registros obtenidos.....	31
CAPITULO III	36
III.1 Marco teórico	37
III.2 Funciones de Transferencia	43
III.3 Espectros de respuesta.....	47
III.4 Análisis de los efectos de sitio.....	54
CONCLUSIONES.....	69
REFERENCIAS.....	72

INTRODUCCIÓN

Introducción

El estado de Puebla es una de las 32 entidades federativas que existen en México, está localizado en la región central del país, al oriente de la capital, colinda al norte y al este con Veracruz, al sur con los estados de Oaxaca y Guerrero, al oeste con Morelos, estado de México, Tlaxcala e Hidalgo, como se ilustra en la figura 1. En esta entidad viven más de cinco millones de habitantes, lo cual la convierte en la quinta entidad más poblada del país y al contar con una superficie de 34 251 kilómetros cuadrados ocupa el puesto número 21 entre las entidades federativas (ref 1).

El relieve del estado se encuentra lleno de contrastes ya que las cañadas y serranías son comunes en gran parte del territorio, lo cual es evidencia de una actividad tectónica importante en la zona. En el centro del estado se localiza el valle de Puebla el cual es muy antiguo geológicamente y se extiende hasta el estado de Tlaxcala. Al poniente del valle de Puebla se localiza la Sierra Nevada (ref 2), en donde destacan los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, que señalan los límites entre el valle poblano y los estados de México y Morelos.

Al sureste de la Sierra Nevada, en el Eje Neovolcánico, se encuentran numerosos valles cuya altitud va disminuyendo mientras se encuentran más hacia el sur. El valle de Atlixco, compuesto de suelos de origen volcánico, está localizado al suroeste del valle poblano, al sur se encuentra la mixteca poblana que posee un relieve bastante irregular y formado por numerosas cordilleras. Otros valles que destacan en la Mixteca poblana son los de Chiautla y Acatlán (ref 3).

Al este de la Mixteca poblana está el valle de Tehuacán, compuesto por una planicie alargada que se extiende desde el valle de Tepeaca hasta el sureste del estado. En el límite con Oaxaca se encuentra la cañada de Cuicatlán, que es producto de fallas originadas por el plegamiento del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur. El valle de Tehuacán está separado de la Mixteca por la sierra de Zapotitlán, de mayor altura que la sierra Mixteca. Al norte del valle de Ciudad Serdán se encuentra el Pico de Orizaba, el volcán más alto de México y que se encuentra en el límite entre Puebla y Veracruz. Al poniente del Citlaltépetl se encuentra el volcán Sierra

Negra, el declive de este volcán y el pico de Orizaba forma los llanos de San Andrés que descienden progresivamente hasta el valle de Tepeaca y los llanos de San Juan que constituyen la zona de transición entre el Eje Neovolcánico y la sección meridional de la Sierra Madre Oriental, que en Puebla es llamada Sierra Norte de Puebla la cual también ocupa regiones de los estados de Hidalgo y Tlaxcala.



Figura 1. Localización del estado de Puebla (ref 4)

Sismicidad en el estado de Puebla. En el estado de Puebla y en algunos de sus estados colindantes, los eventos sísmicos son habituales debido a su situación geográfica, principalmente atribuidos al Eje Neovolcánico y al movimiento relativo entre las placas de Norteamérica y Cocos. Sin embargo, el registro y estudio de eventos sísmicos en la zona es relativamente reciente.

En el año de 1973 se registró un sismo de 7.1 en Orizaba el cual causó pérdidas humanas en Ciudad Serdán y otras localidades de Puebla y Veracruz, otros eventos

importantes son los de Huajuapán de León con magnitud 6.5 ocurrido el 24 de octubre de 1980 y el de Tehuacán del 15 de junio de 1999 con magnitud 7.

El sismo ocurrido en Huajuapán de León, que produjo graves daños en ese sitio y en la zona mixteca, tuvo características similares con el de 1999 dado que ambos están asociados como eventos de profundidad intermedia en la placa de Cocos subducida bajo la de Norteamérica.

El conocimiento del historial sísmico de la zona es un apoyo para la identificación de regiones vulnerables, lo cual es fundamental para prevenir pérdidas humanas y materiales.

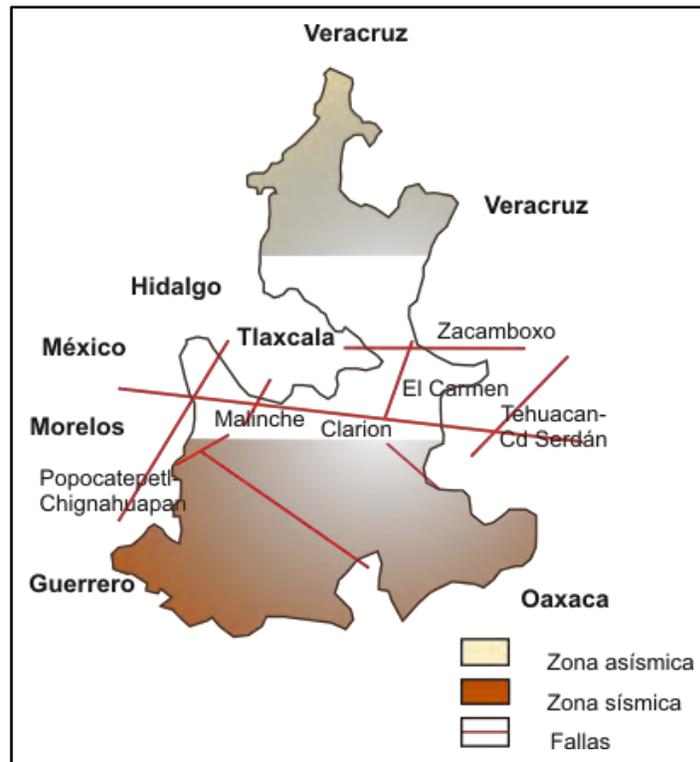


Figura 2. Fallas geológicas en el Estado de Puebla (ref 5)

Efecto de sismos. Uno de los sismos que causó daños en el estado de Puebla fue el llamado temblor de Tehuacán, ocurrido el 15 de junio de 1999 cuyo epicentro se localizó a 20 kilómetros aproximadamente al sur-sureste de Tehuacán (ref 6).

El sismo de Tehuacán provocó daños en algunas estructuras ubicadas en la zona epicentral. Los inmuebles más afectados fueron edificios antiguos, debido a una configuración estructural inadecuada, baja resistencia de los materiales componentes, deterioro por intemperismo, inadecuado mantenimiento, daños anteriores debidos a temblores e insuficiencia de las reparaciones después de estos. Como ejemplo se puede señalar la iglesia de la Compañía que se ilustra en la figura 3.



Figura 3. Daños en la iglesia de la Compañía (ref 7)

Las construcciones coloniales, templos y monumentos presentaron la mayor cantidad de daños, en su mayoría las torres y cúpulas de las iglesias; además de que muchos ornamentos en estas construcciones se desprendieron y cayeron. Con relación a la Catedral de la ciudad de Puebla se puede señalar la presencia de grietas y desprendimientos de elementos de ornato en la cúpula de la nave principal y torres. Otras estructuras afectadas fueron: la iglesia de la Compañía, la iglesia de San Agustín, el templo de la Concepción, el edificio Carolino, el Museo Universitario (casa de los muñecos), el Palacio Municipal, el seminario Palafoxiano, la iglesia de la Soledad y la iglesia de San Jerónimo, entre otras. En la ciudad de Cholula: la iglesia de Nuestra

Señora de los Remedios, la parroquia de San Andrés (construida en 1620) y el convento de San Gabriel, entre otras.



Figuras 4 y 5. Daños ocasionados durante el sismo de Tehuacán en el edificio Carolino (ref 8)

En la ciudad de Puebla se presentó el colapso de dos edificios de 3 niveles más planta baja, ubicados en la calle 3 oriente. El edificio de la Facultad de Medicina de la BUAP y una unidad habitacional en la colonia Amalucan también tuvieron afectación estructural grave y debieron ser demolidos.

Algunas de las líneas vitales se interrumpieron durante las primeras horas posteriores al sismo, no hubo suministro de energía eléctrica alrededor de 2 horas, se interrumpió temporalmente el suministro de agua potable en la ciudad de Puebla debido a la falta de energía eléctrica, mientras que el servicio telefónico funcionó con lentitud debido a la saturación de las líneas.

En edificios del sector salud, se presentaron algunos daños en elementos no estructurales e instalaciones. Los hospitales del IMSS en San Alejandro y el de Traumatología y Ortopedia en la ciudad de Puebla tuvieron que ser evacuados.

Aunque en algunas carreteras se reportaron derrumbes y en algunos puentes grietas en elementos estructurales y/o pavimentos, en general no se vio interrumpida la circulación. En el centro histórico de la ciudad de Puebla se decidió cerrar calles donde a juicio de las

autoridades existía la probabilidad de que vibraciones ambientales generaran daños adicionales en las construcciones o en donde se ponía en riesgo la integridad de las personas por construcciones inestables (ref 9).

Objetivo.

Determinar los efectos de sitio en las estaciones acelerográficas Paseo Nicolás Bravo y Lomas del Mármol ubicadas en la Ciudad de Puebla. Para ello se hará uso de funciones de transferencia empíricas.

Contenido.

En el primer capítulo se describe muy generalmente la composición geológica del estado de Puebla, también se presenta el arreglo estratigráfico, así como los principales afloramientos en la zona junto con resultados de estudios geotécnicos realizados en lugares de interés.

En el capítulo dos se presenta la red acelerográfica de la Ciudad de Puebla con algunos aspectos relevantes de su operación, características de los equipos y estadísticas históricas en la red. Se incluyen en este capítulo los registros de los sismos utilizados para determinar los efectos de sitio.

Posteriormente en el tercer capítulo se hace una descripción de los efectos de sitio y su importancia en el análisis sísmico. Se incluye un marco teórico de las funciones de transferencia; así como de los espectros de Fourier y de Respuesta.

Por último se presentan los efectos de sitio observados y las conclusiones obtenidas con dichos resultados.

CAPÍTULO I

CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL VALLE DE PUEBLA

I. CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL VALLE DE PUEBLA

El arreglo geológico del estado de Puebla es muy variado y complejo, particularmente en la zona sur, ya que en este lugar se localizan materiales metamórficos con edades que van desde el Precámbrico hasta el Mesozoico y que se encuentran limitados por extensas zonas de falla. Muy probablemente el mayor cambio geológico se produjo durante el periodo Terciario, representado por grandes elevaciones, plegamientos, depresiones, fracturas y dislocaciones; que hasta la fecha siguen manifestando la inestabilidad del lugar y teniendo como consecuencia una sismicidad importante de origen tectónico (ref 10), volcánica y aún de movimientos superficiales. Las rocas que componen estos territorios han sido afectadas por diversas fases de metamorfismo y deformaciones en el tiempo geológico, y no se cuenta con información detallada que proporcione un modelo evolutivo completamente satisfactorio que describa eficientemente todas las peculiaridades que se encuentran en el sur de México. El más amplio de estos terrenos en el estado pertenece al Paleozoico Inferior, conocido con el nombre de complejo Acatlán, aflora ampliamente en toda el área de la mixteca poblana. Sobre este basamento metamórfico se encuentra una variada secuencia sedimentaria marina, que data de la era Mesozoica, y que es prueba de la invasión del océano en varios puntos de la entidad. A finales de esta era y a principios de la Cenozoica, las rocas sedimentarias que se formaron en fondos marinos fueron modificadas, fracturadas y plegadas. Posteriormente a la etapa compresiva se producen emisiones de materiales volcánicos a partir de fracturas en la corteza terrestre, esto se atestigua por los grandes volúmenes de lava y piroclastos que forman la provincia de la Faja Volcánica Mexicana o Eje Neovolcánico (ref 11).

I.1 Descripción geológica

El basamento metamórfico existente en el estado aflora únicamente en su parte sur y se ubica en la zona limítrofe con el de Oaxaca; en él se puede apreciar la existencia de metamorfismo y deformaciones en diferentes grados (ref 12). Por otra parte, el sector centro-meridional del territorio estatal constituye una de las localidades fosilíferas cretácicas más importantes de América del Norte; y se localiza aproximadamente a 60 km al SE de la Ciudad de Puebla, en terrenos de la Mixteca alta.

Geología histórica. Esta puede abarcar desde el Cretáceo, periodo durante el cual se tiene una noción de la sedimentación de materiales calcáreos y que debido a movimientos de tipo orogénico produjo su posterior emersión. Después de esta etapa, durante el periodo Terciario y a principios del Cuaternario, se tienen emisiones de lava que dan paso a la formación de rocas basálticas y diversos depósitos de tobas arenosas producto de los últimos procesos volcánicos. Estas tobas sobreyacen a las rocas basálticas preexistentes y cubren la zona donde actualmente se ubica la ciudad, dando paso a la estratificación con sedimentos fluviolacustres. Los estratos formados más recientemente son depósitos de travertino producto de aguas termales que provienen de una falla en la zona y depósitos de tipo aluvial aportados por el Río Atoyac y sus diversas ramificaciones.

Estratigrafía. La estratigrafía en el Estado de Puebla es muy variada, debido a la antigüedad geológica en la zona, se han estudiado características del suelo en lugares del estado logrando obtener propiedades detalladas; las formaciones que se observan actualmente son resultado de un proceso continuo de transformaciones que han durado millones de años, a continuación se presentan algunos rasgos peculiares a lo largo de las diferentes eras geológicas.

- a) Precámbrico. En la parte sureste del estado existen pequeños cuerpos de rocas metamórficas que pertenecen al Complejo Oaxaqueño, estudios radiométricos consignan edades variables entre 1100 y 900 millones de años, estos afloran en el municipio de Caltepec en forma de ventanas geológicas de poca extensión. Las relaciones entre este complejo y los terrenos adyacentes son de tipo tectónico, y su mayor extensión se tiene hacia el estado de Oaxaca; junto con el Complejo Acatlán, constituyen el basamento sobre el cual se desarrollaron todas las secuencias litológicas posteriores.
- b) Paleozoico. Las rocas paleozoicas que afloran en el estado de Puebla se localizan principalmente en el sector sudoccidental de la entidad, en la colindancia con los estados de Oaxaca y Guerrero. De estas se distinguen dos tipos principales: una metasedimentaria y otra de origen magmático, rocas con una antigüedad de 350 millones de años se encuentran enmarcadas por las

localidades de Chiautla, Izúcar de Matamoros, Huehuetlán, Santa Inés y Ahuatempan.

- c) Mesozoico. Las rocas mesozoicas más antiguas dentro del estado, pertenecen al periodo Triásico y están representadas por una potente secuencia de sedimentos continentales (lechos rojos) pertenecientes a la formación Huizachal. La secuencia consta de arenisca, conglomerado y algunas capas de lutita arenosa, que forman estratos masivos y delgados. Se localiza al oeste de Huauchinango, a lo largo de una gran estructura de plegamiento con orientación noroeste-sureste conocida como el Anticlinorio de Huayacocotla, en la Sierra Madre Oriental.
- d) Cenozoico. En la zona norte del estado, las rocas sedimentarias son todas de tipo clástico. Fueron depositadas de manera progradante en franjas paralelas a la costa del Golfo de México; de tal forma que afloran depósitos del Paleoceno, Eoceno y Oligoceno, formados por una interstratificación de lutitas y areniscas. Presentan huellas de pistas de organismos y sobreyace en concordancia a las unidades de caliza y lutita del Cretácico Superior. Pertenecen a la formación Chicontepepec y se sitúan entre las partes bajas de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo Norte, en los extremos norte y sureste de la entidad. Asimismo, existen afloramientos de esta unidad hacia el extremo sureste del estado.

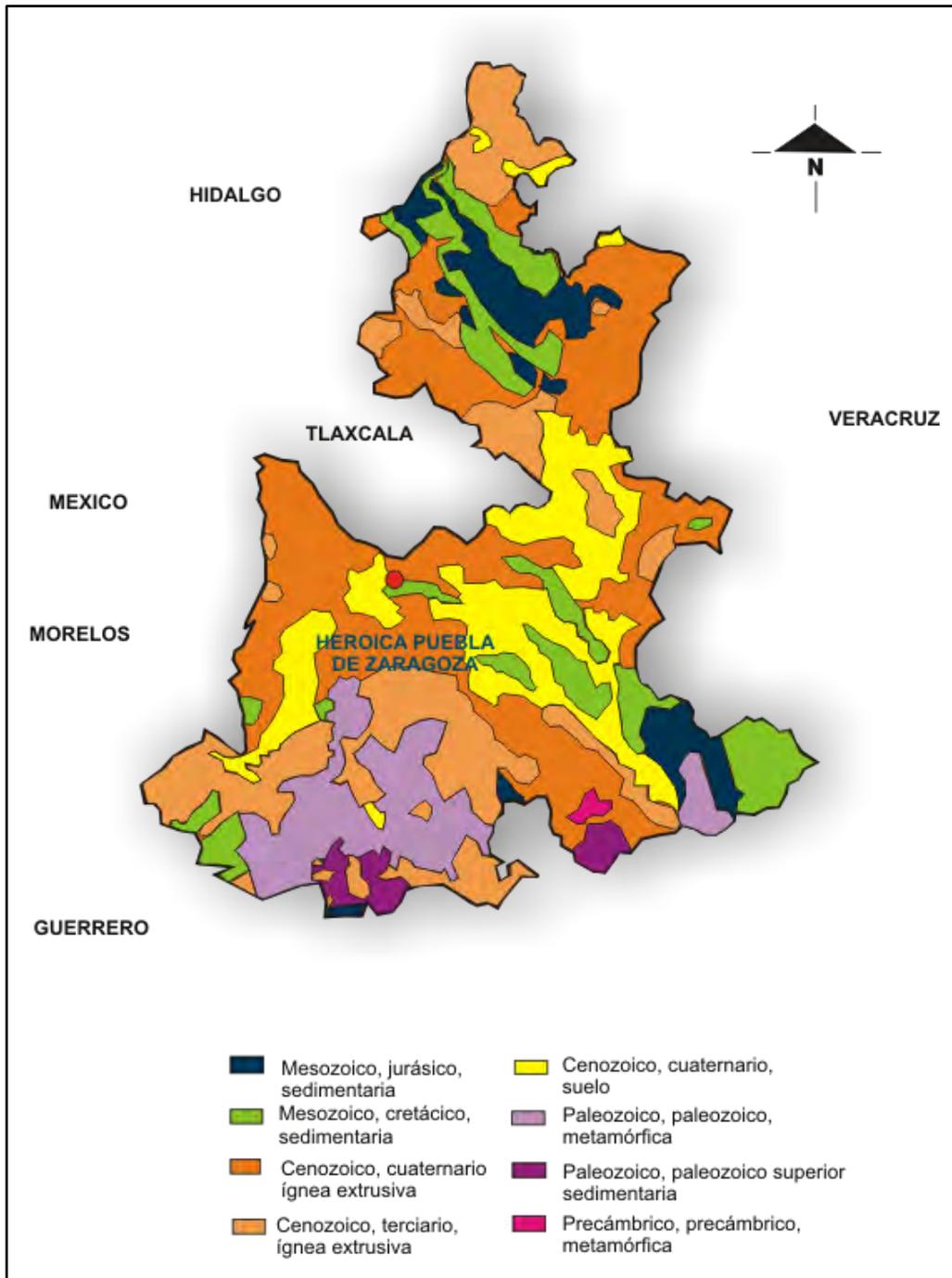


Figura I.1 Geología general del estado de Puebla (ref 13)

Principales afloramientos. Cerca de la Ciudad de Puebla existen afloramientos de rocas cretáceas y otras que se formaron a fines del periodo Terciario y en el Cuaternario. Las de mayor antigüedad son las calizas que afloran al oeste de la ciudad; las capas más

recientes son depósitos de relleno y materiales volcánicos. Una descripción de estos materiales se presenta a continuación (ref 14).

- a) Calizas. Esta formación se encuentra expuesta en el territorio occidental del estado, este material se ha ocupado para la fabricación de ladrillos silicocálcicos. La roca tiene un color gris oscuro, se presenta en estratos de 20 a 30 cm de espesor y se encuentra fracturada. Las calizas en las que aun no existe un desarrollo urbano se les considera del Cretáceo. Es importante apuntar que al norte de la zona de afloramientos de calizas se localiza un cerro apartado en el que hay una roca de color gris claro muy recristalizada que contiene pequeños cristales alargados de coloración oscura. Aparentemente este material es una caliza recristalizada y metamorfozada. Los materiales mencionados anteriormente no tienen mucha importancia para la mecánica de suelos porque su área de afloramiento es muy limitada, aunque es relevante para la geología estructural ya que existe la posibilidad de encontrar en el sitio una falla importante.

- b) Basaltos y tobas limosas. En los sitios que se encuentran al sur y al oeste de la ciudad, en Lomas de Loreto y Cinco de Mayo, aparece lava basáltica, la cual se encuentra recubierta por tobas limo-arenosas y arenosas de un color amarillento. Algunas lavas son de color grisáceo obscuro y presentan cristales grandes de color verde que probablemente sea olivino. Esto puede ser prueba de que se trata del frente de una colada. Recubren discordantemente a las rocas basálticas, tobas arenosas, limo-arenosas de color amarillento y generalmente compacto, estas formaciones son las últimas evidencias volcánicas que se tienen registradas en la región y se estima que estos materiales se produjeron en el Cuaternario.

- c) Escorias basálticas. En la zona oriental de la ciudad se encuentra el cerro de la Paz que es un cono volcánico formado con escorias basálticas de color rojizo, en este lugar existe desarrollo urbano y este material ha sido utilizado como base y revestimiento de carreteras.

- d) Depósitos volcánicos y fluviales. Casi en la totalidad de la ciudad de Puebla existen intercalaciones de tobas volcánicas que se encuentran depositadas en agua y sedimentos fluviales. Estas poseen las mismas características granulométricas y el mismo origen que las observadas sobre los basaltos, con la única diferencia que en este caso se encuentran interestratificadas con depósitos de origen fluvial y lacustre como arcillas o cantos rodados. Las tobas contienen minerales como plagioclasa, hornblenda, cuarzo, óxidos de hierro y micas, y son parecidas al material conocido como “tepetate” en el valle de México.

Es relevante destacar que en zonas cercanas a la Ciudad de Puebla se localiza un depósito de arcilla plástica que a veces aflora y en otras ocasiones se encuentra a una profundidad de entre 3 y 4 m. El depósito de arcilla no aparece en la parte nororiental de la ciudad donde los arroyos ingresan al valle y como consecuencia arrastran materiales más gruesos.

En las formaciones producidas a causa de ríos y arroyos se pueden apreciar algunos cortes de grava empacada en material limo-arenoso, estas capas tienen una longitud limitada para después convertirse en materiales más finos. Se estima que estos depósitos se formaron en el Cuaternario, al mismo tiempo que otras emisiones volcánicas.

- e) Depósitos de travertino. Existen tres afloramientos de aguas sulfurosas templadas que se ubican, el primero en la zona denominada Rancho Colorado, el segundo cercano al cerro de la Paz y el último en el lugar llamado Agua Azul. Estos afloramientos con altos contenidos de carbonato de calcio propiciaron la sedimentación de travertino en el lugar.

El travertino es un material de origen calcáreo que usualmente tiene su formación alrededor de manantiales y géiseres y que se produce por la precipitación de materiales que se encuentran disueltos, el componente principal es el carbonato de calcio que lo contienen aguas subterráneas, este compuesto puede ser originado por un aumento en la temperatura,

disminución de presión, evaporación y por la combinación de estos factores. Este material puede localizarse en diversas zonas de la ciudad, principalmente en el centro, aunque la profundidad a la que se encuentra es muy variada al igual que sus espesores. Los travertinos son de composición dura, pero son algo porosos, con algún contenido de arena y una coloración amarillenta.

- f) Depósitos aluviales. Estos depósitos se localizan en la zona sureste de la ciudad, en los alrededores del río Alseseca, cerca de la Ciudad Universitaria, se encuentran materiales constituidos por arenas y arenas limosas, sobre los cuales se ha desarrollado una colonia popular, materiales muy similares se encuentran en la mayoría de los ríos, algunos de los cuales han sido entubados.

Geología estructural. Hacia la parte norte del estado se pueden encontrar estructuras en la corteza terrestre con pliegues convexos hacia arriba o abajo, que se localizan recostados hacia el noreste. Estos pliegues forman parte de una megaestructura en la zona de Huayacocotla que se extiende desde los estados colindantes como son Hidalgo y Veracruz, se encuentran orientados desde el noreste hacia el sureste y se propagan hasta intersectarse con el Eje Neovolcánico. Existen formaciones intrusivas que interrumpen la secuencia del Mesozoico que fueron inyectadas durante el periodo más activo a fines del Cretácico hasta mediados de la era Terciaria. Las fallas y fracturas de tipo normal afectan tanto a las rocas del Mesozoico como a las del Terciario, que se extienden hasta la planicie costera del Golfo del Norte, lo que dio lugar a un aspecto escalonado.

La Faja Volcánica Mexicana o Eje Neovolcánico, se formó a lo largo de una serie de fallas de tensión en diversas direcciones que dieron lugar a grandes fosas tectónicas y sistemas volcánicos. En esta región se encuentran grandes estructuras que han dividido al territorio poblano en varios cientos de kilómetros. Los principales volcanes que la entidad comparte con estados cercanos tienen grandes dimensiones como son el caso del Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Pico de Orizaba y la Malinche. Los dos primeros se encuentran alineados notoriamente en dirección norte-sur, el mismo caso se presenta con el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote, estas grandes estructuras fueron formadas por materiales piroclásticos

y derrames lávicos. También existe evidencia de emisiones fisurales y numerosos conos que han tenido formación en las laderas de los grandes volcanes. Una zona que muestra actividad reciente es la llamada Caldera de los Humeros, que es otra gran estructura volcánica con cerca de 21 km de diámetro; tiene derrames lávicos, zonas de colapso y emisiones piroclásticas a gran escala. Otras estructuras relevantes son los conos cineríticos que se encuentran dispersos en toda la provincia y algunos cráteres de explosiones en la cuenca Oriental y que en un caso llega a tener un kilómetro de diámetro.

La porción sur del estado es la que presenta mayor complejidad estructural y donde se presenta diversa actividad tectónica, las rocas más antiguas presentan varias etapas de deformación, intrusión y metamorfismo, así como evidencias de plegamientos, fallas normales e inversas, los sistemas de fracturamiento generalmente se alinean en dirección noreste-sureste (ref 15).

I.2 Información geotécnica

Durante varios años se han realizado diversos estudios de mecánica de suelos, que han dado una idea general de las características geotécnicas en el valle de Puebla, dicha zona está ubicada en un lugar de mucha antigüedad geológica, lo que ha dado como resultado una composición geotécnica variada, a pesar de los estudios realizados hasta ahora aun quedan algunas interrogantes acerca del subsuelo en esta área, los depósitos que se han encontrado con frecuencia en la ciudad de Puebla podrían resumirse en los siguientes apartados (ref 16).

- a) Depósitos termales. El más característico es el travertino y se localiza en muchas regiones de la ciudad incluyendo el centro histórico, el espesor de dichos estratos varía desde unos cuantos centímetros hasta más de 10 m de espesor, algunas veces se encuentra como cementante de otros depósitos granulares, en otras ocasiones se presentan depósitos a gran profundidad en las partes centro, norte y noroeste de la ciudad. Es una constante en la zona que los depósitos de travertino se encuentren intercalados con limos y arcillas

arenosas que pueden ser de compresibilidad muy variable. Es importante señalar que en ocasiones se piensa que este material es muy competente, sin embargo en su resistencia deben considerarse diversos factores, como pueden ser la porosidad y el grado de contaminación en el suelo, es por esto que su reconocimiento requiere de un cuidado especial. El mayor peligro que existe al localizar estos depósitos de travertino, sería asumir como aceptable el material para desplantar una cimentación cuando no ha sido evaluado correctamente el espesor del estrato, por esto sería muy recomendable realizar estudios con la suficiente profundidad para obtener un perfil completo ya que los esfuerzos se verían incrementados considerablemente con el desplante de la cimentación correspondiente. Debido a que se presentan depósitos de travertino intercalados con suelos deformables, las fórmulas usuales de capacidad de carga serían un tanto dudosas por el tipo de falla que podría llegar a ocurrir llevando al extremo los factores de seguridad. Debido a la presencia de suelos compresibles el parámetro principal a considerar sería tener asentamientos en un rango aceptable, la mala consideración de estratos compresibles por debajo de los depósitos de travertino puede ocasionar problemas serios en cualquier tipo de cimentación.

- b) Depósitos arcillosos. Debido a la existencia de ríos, lagunas, pantanos y escurrimientos en años anteriores, y que algunos aun se encuentran en la actualidad, se ha propiciado la formación de estratos arcillosos de color gris oscuro o negro, que contienen mucha materia orgánica. Estos generalmente tienen poco espesor, superficiales o a poca profundidad, estas características se observan principalmente en la parte sur de la ciudad. Estos materiales arcillosos se encuentran interestratificados por depósitos aluviales granulares, depósitos eólicos de origen volcánico y depósitos termales. Los materiales arcillosos localizados por debajo del nivel freático tienen como característica general, baja resistencia y una alta compresibilidad, son fáciles de identificar por su olor y textura debido a la materia orgánica que contienen, los contenidos de agua de estos materiales generalmente son mayores al 50 por ciento e inclusive en algunos casos mayores al 100 por ciento.

- c) Depósitos eólicos de origen volcánico. Dado que el valle de Puebla está ubicado en una zona muy cercana a los volcanes de la Sierra Nevada, hay presencia de depósitos de origen volcánico en gran parte de la ciudad. Los suelos producto de erupciones volcánicas son generalmente de un color café, sin materiales orgánicos, se pueden clasificar como materiales limo-arenosos y areno-limosos. En algunas ocasiones estos depósitos son los constituyentes únicos del subsuelo y a veces se encuentran interestratificados con componentes de otro tipo de materiales, pero también se pueden encontrar combinados con suelos arcillosos y blandos, cuando esto ocurre el suelo resultante es igualmente blando y compresible, si se encuentran mezclados con depósitos termales la mezcla es resistente, poco compresible y en algunas ocasiones se encuentra fuertemente cementada.

Los materiales volcánicos tienen contenidos de agua que varían del 30 al 60 por ciento con una baja resistencia a la penetración estándar, variando los resultados de 5 a 15 golpes. Los materiales que se encuentran en seco dependen principalmente de su estado de compactación y de su alteración, estos materiales en general se encuentran por arriba del nivel freático con un contenido de agua entre el 15 y el 30 por ciento. En los lugares que se encuentren con poco grado de alteración y en estado compacto y cementado, como en el caso de los tepetates, generalmente sus propiedades son muy buenas, siendo la limitación principal los asentamientos diferenciales que no permiten aprovechar totalmente estas características mecánicas, por otro lado es importante considerar pequeños estratos que se encuentren entre el material con baja compacidad intercalados con materiales más resistentes, con lo que se reduce mucho la capacidad de carga.

Cuando los materiales volcánicos se encuentran alterados el contenido de arcilla es mayor, observándose una disminución considerable de las propiedades mecánicas siendo su resistencia a la penetración estándar de 5 a 20 golpes, considerada como una resistencia de baja a media, variando con la profundidad y con el contenido de arenas y gravas que contengan dichos materiales.

- d) Depósitos granulares de origen aluvial. Estos depósitos son producto de los diversos arroyos que atraviesan la ciudad, en algunos casos se han formado barrancas profundas, en las cuales se han depositado materiales de tamaños muy variables, desde arcillas hasta boleos, donde predominan los materiales granulares, estos depósitos se pueden encontrar en lugares donde existen ríos que actualmente están entubados. Una constante en estos estratos es su heterogeneidad y pueden estar constituidos por arcillas orgánicas, rellenos artificiales y depósitos termales.
- e) Rellenos artificiales. Han sido colocados a lo largo del tiempo, algunos de ellos desde principios del siglo pasado y otros de forma más reciente, estos depósitos varían de uno a varios metros de espesor en algunos casos, en sitios como en la parte central de la ciudad se explotaron arcillas y posteriormente se rellenaron estos lugares, obviamente estos estratos se localizan superficialmente, y en ciertos casos se tienen materiales aluviales u orgánicos sobreyaciendolos.

Propiedades dinámicas del subsuelo en el lugar Paseo Bravo. El sismo ocurrido el 15 de junio de 1999 con magnitud 7, y cuyo epicentro se localizó cerca de Tehuacán causó serios daños en varias estructuras de la Ciudad de Puebla, lo cual motivó a realizar una serie de exploraciones con el objetivo de conocer algunas características del subsuelo mediante pruebas realizadas en sitios de interés. Aunque en apariencia podría considerarse que se tiene una gran cantidad de información sobre el subsuelo de la ciudad aun quedan muchas zonas donde los estudios realizados son muy superficiales y se tienen incógnitas sobre la composición geotécnica de diversas zonas en el valle de Puebla

Un parámetro muy importante para el campo de la ingeniería sísmica es la distribución de velocidades de ondas de cortante, que está relacionado con otras características del material como son su masa específica y el módulo de rigidez a cortante.

En la estación de registro sísmico PBPP, ubicada en el jardín del Paseo Bravo, cerca del centro histórico se realizó un estudio que alcanzó una profundidad de 14 m. Los

resultados indicaron que se encontraban 3 estratos definidos, el primero de ellos desde la superficie hasta 3.5 m de profundidad compuesto por rellenos limo arenosos; en el segundo se localizó un travertino de muy buena calidad la cual decrece hacia su parte inferior; y finalmente, desde los 6.5 metros de profundidad y hasta el fin del sondeo se encontró un estrato de arcilla de alta plasticidad de origen lacustre, sin embargo para fines de conocer la respuesta sísmica del suelo es importante definir el espesor de dicho depósito de arcilla (ref 17).

CAPÍTULO II

*Información sísmica obtenida en la red de
acelerógrafos de la Ciudad de Puebla*

II. INFORMACIÓN SÍSMICA OBTENIDA EN LA RED DE ACELERÓGRAFOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA

Los sismos que han ocurrido en México durante los últimos años son prueba de la necesidad de instrumentar el territorio nacional para conocer el comportamiento que tiene una zona y determinar los potenciales daños que causaría un temblor. Los datos obtenidos son de gran utilidad y contribuyen a mitigar los efectos sísmicos.

II.1 Equipo de registro sísmico

El instrumento esencial para estudiar un evento sísmico es el sismógrafo. Este es un aparato que registra velocidades en el suelo causadas por una onda sísmica. En la actualidad estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico empleado no ha cambiado.

Para registrar el movimiento del suelo es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio; si se quisiera referir a un punto anclado al mismo suelo sería imposible obtener un registro dado que el punto también se movería con el suelo al que está anclado. Para salvar esta dificultad, se recurre al principio de inercia, el cual establece que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad. Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo. El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo, cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio. Posteriormente la masa sale del reposo y tiende a oscilar (ref 18); sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla. En la figura II.1 se representa un aparato donde el amortiguamiento se logra por medio de una lámina sumergida en un líquido, generalmente aceite. Este era el método utilizado en aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen fuerzas amortiguadoras en la oscilación libre de la masa.

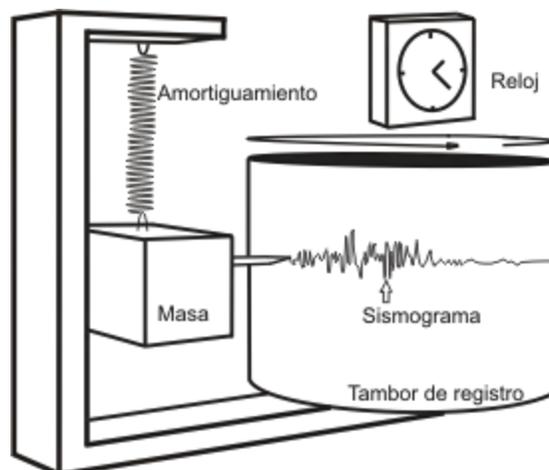


Figura II.1 Elementos básicos de un sismógrafo

Si se sujeta un lápiz a la masa suspendida, para que pueda escribir en un papel sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se registrará una componente del movimiento en el suelo conocida como sismograma.

Los sismógrafos emplean un sistema de amplificación para producir registros que puedan ser analizados a simple vista. Antiguamente la amplificación se realizaba por medio de un sistema mecánico, en la actualidad la amplificación se realiza electrónicamente (ref 19).

Los sismógrafos que se emplean actualmente, en general, tienen masas que pueden ser de unos gramos hasta 100 kg, mientras que los sismógrafos antiguos de amplificación mecánica solían tener grandes masas con el fin de obtener mayor inercia y poder vencer las fuerzas de rozamiento que se originan entre las partes móviles del sistema, actualmente existen sismógrafos que detectan el movimiento de la masa electrónicamente y se almacena digitalmente.

Debido a que los sismógrafos tienen una alta sensibilidad, en sismos de gran magnitud tienden a saturarse sin tener un registro completo del evento, como se ilustra en la figura II.2.

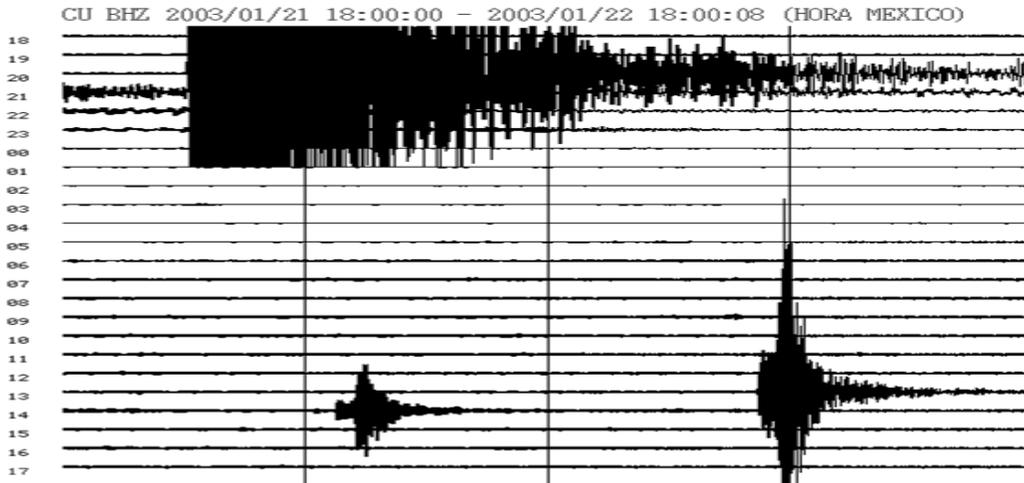


Figura II.2. Sismograma registrado en la estación de Ciudad Universitaria (ref 20)

Los acelerógrafos son equipos que comparten muchas características en común con los sismógrafos, siendo la principal diferencia que el instrumento se encuentra configurado para obtener datos de aceleración, al ser estos menos sensibles y con una relación masa-rigidez mayor permiten el registro completo de eventos de gran magnitud.

A continuación se presentan algunas definiciones que son de utilidad para comprender el funcionamiento de un acelerógrafo:

- Umbral de activación. Es un valor de aceleración predeterminado, el cual una vez alcanzado permite que el equipo almacene información.
- Memoria de preevento: Es la cantidad de almacenamiento disponible destinado a guardar valores anteriores al umbral de activación.
- Memoria de posevento: Es la cantidad de almacenamiento configurada de tal manera que se sigan almacenando datos cierto tiempo después que se ha dejado de cumplir con el umbral de activación, esto ayuda a tener un registro completo del temblor.

Un acelerógrafo está compuesto de dos partes principales, los sensores y el registrador, los primeros se componen de acelerómetros, siendo el arreglo "triaxial" el más utilizado y consta de tres acelerómetros dispuestos en forma ortogonal.

El registrador tiene tres componentes, la primera es la que realiza la conversión analógica-digital, la segunda se encarga del control de datos y finalmente una de almacenamiento. Su operación consiste en convertir continuamente las señales analógicas de los sensores a muestras digitales, las cuales son comparadas en la unidad de control y mediante un algoritmo especial de activación se verifica cada una de ellas, si se satisface el umbral de activación programado se inicia el almacenamiento.

Todos los aparatos deben contar con un sistema de control de tiempo que debe estar correctamente ajustado y que es universal para las estaciones, lo cual permite conocer con exactitud fecha, hora y duración del evento, lo cual facilita en gran medida la identificación de los registros obtenidos.

Los acelerógrafos no son aparatos que sean fabricados en forma masiva y que se encuentren con facilidad, ya que solo un número reducido de compañías se encarga de producirlos, es por esto que de acuerdo a las necesidades específicas de cada proyecto se ubica el equipo más adecuado para dichos fines. El instrumento tiene que cumplir que no se tenga ningún tipo de interrupciones en el registro, y que efectivamente se registre el evento en el momento adecuado. Debido a esto, al adquirir un aparato se toma en cuenta la facilidad para su manejo, el margen de grabación con el que es capaz de almacenar datos y por último revisar si son compatibles los registros con otras herramientas de computación existentes para su respectivo procesamiento, análisis y estudio.

Los instrumentos utilizados en la RACP, son de marca *Terra Technology* modelos digitales DCA-333, IDS-3602, GSR-12 y de marca *Kinematics* modelo ETNA.

En la tabla 2 se mencionan algunas especificaciones para los acelerógrafos que operan en la Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla.

Tabla 2. Especificaciones generales de los acelerógrafos de la RACP

CARACTERÍSTICAS	EQUIPO			
	DCA-333	IDS-3602	GSR-12	ETNA
Fabricante	Terra Technology	Terra Technology	Terra Technology	Kinematics
Tipo	Digital	Digital	Digital	Digital
Medio de registro	Casete digital o Ramdeck	Tarjeta "flash" PCMCIA o RAM	RAM	Tarjeta "flash" PCMCIA
Transductores (3)	Internos por balance de fuerzas			
Rango [G*]	0.25-1	1-2	1	1-2
Frecuencia natural [Hz]	30	50	50	50
Amortiguamiento	0.7	0.7	0.7	0.7
Tiempo de registro [min]	14	20-90	35	40
Tasa de muestreo [Muestras/seg]	100	250	200 ó 400	100 ó 200
Longitud de palabra [bits]	12	16	12	18
Rango dinámico [dB]	72	96	72	108
Reloj	Interno	Interno	Interno	Interno
Alimentación [volts CD]	+12	+12	+12	+12

*G= 981 cm/s²

II.2 Localización de estaciones

La Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Puebla es un proyecto realizado en conjunto por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) y la Facultad de Ingeniería Civil y Tecnológica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FI-BUAP), y su objetivo principal es estudiar la respuesta del suelo ante la acción de temblores fuertes.

En el año de 1972 se instaló en las oficinas de la Comisión Federal de Electricidad de la ciudad de Puebla una estación llamada SXPU que era parte del sistema sismotelemétrico SISMEX, siguiendo su operación como acelerómetro hasta marzo de 1984, en esta fecha fue sustituido por un acelerógrafo digital autónomo. Después de los sismos de septiembre de 1985, se estableció la necesidad de instalar una red acelerográfica local para estudiar mejor los efectos causados por sismos, debido a esto la FI-BUAP instaló 3 acelerógrafos digitales, en diferentes tipos de suelo, atendiendo a la zonificación preliminar realizada en 1976 (ref 21). Los sitios elegidos para localizar estas estaciones fueron Ciudad Universitaria de la FI-BUAP (UAPP), el jardín Paseo Nicolás Bravo (PBPP) y Central de Abastos (CAPP). De esta forma la red de acelerógrafos de la ciudad de Puebla comenzó sus operaciones en noviembre de 1987.

En el año de 1993 el II-UNAM como la FI-BUAP acordaron la operación de manera conjunta de la red, de esta manera la estación Sismex Puebla pasó a formar parte de la RACP. Posteriormente, en 1996 se instalaron tres estaciones más, la primera en el municipio de San Ramón Castillota (SRPU), ubicada al sur de la ciudad, la segunda en la colonia La Paz (PZPU) localizada en el cerro volcánico de San Juan, y al este de la ciudad se colocó la estación ubicada en la colonia Parque Habana (PHPU).

Como una siguiente etapa se instalaron cuatro estaciones, una en Barranca Honda (BHPP), y debido al sismo ocurrido el día 15 de junio de 1999 una estación en la avenida Río san Francisco (RFPP) localizada en la zona centro, la siguiente en el hospital del IMSS San Alejandro (SAPP) que se encuentra ubicada sobre depósitos lacustres y por último en 2001 se instaló la estación Lomas del Mármol que se encuentra anclada en roca. De esta forma quedó constituida la RACP con 11 estaciones (tabla 1) compuestas cada una por 3 componentes ortogonales (ref 22). Es importante señalar que las estaciones UAPP y CAPP han sido retiradas de operación.

Tabla 1. Estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla

Estación (Clave)	Localización		Ubicación	Equipo	Dirección
	LAT. N	LONG. W			
Sismex (SXPU)	19.03	-98.21	Suelo	DCA 333R/207	Estacionamiento del edificio de oficinas de CFE calle 27 poniente, zona centro
Paseo Nicolás Bravo (PBPP)	19.04	-98.20	Suelo	ETNA/1533	Paseo Nicolás Bravo. Entre 11 sur y 3 poniente, zona centro
La Paz (PZPU)	19.05	-98.22	Roca	DCA 333R/100	Cerro de San Juan colonia La Paz, entre el monumento a la bandera e iglesia, zona oeste
San Ramón (SRPU)	18.96	-98.25	Suelo	DCA 333R/258	Municipio de San Ramón Castillotla, 3a sección, zona suroeste
Parque Habana (PHPU)	19.04	-98.16	Suelo	ETNA/1532	Parque Habana , entre 38 norte y Panamá y 14 y 16 Oriente, zona oriente
Barranca Honda (BHPP)	19.10	-98.22	Roca	GSR-12/326	Barranca Honda Antigua zona de minas, zona noroeste
San Alejandro (SAPP)	19.05	-98.21	Suelo	IDS-3602/373	Hospital del IMSS "San Alejandro", zona centro
Río San Francisco (RFPP)	19.04	-98.19	Estructura	GSR-12/328	Avenida Río San Francisco, zona centro
Lomas del Mármol (LMPP)	19.00	-98.18	Roca	ETNA/1329	Fraccionamiento Lomas del Mármol, zona sur

La ubicación de las estaciones en la RACP se realizó de acuerdo a los siguientes criterios:

- Contar con cobertura instrumental en la zona centro de la ciudad
- Considerar condiciones diferentes del subsuelo de acuerdo a la microzonificación existente
- Contar con una estación de referencia en roca

Debido a que los equipos requieren un mantenimiento constante, tanto preventivo como correctivo para que las estaciones se conserven en condiciones óptimas de funcionamiento y operación, fue necesario, aparte de las condiciones del suelo, localizar zonas que proporcionaran cierta seguridad a la estación. Se buscaron lugares que no fueran muy concurridos, pero a los que se pudiera acceder fácilmente para recolectar datos. Otro aspecto que se cuidó al momento de instalar las estaciones fue que en el lugar se tuviera acceso a energía eléctrica y que estuviera protegido en cierta forma contra la intemperie. Es por esto que varias de las estaciones se encuentran en oficinas, escuelas o parques ya que estos lugares brindaban las ventajas antes mencionadas. En la figura II.2 se muestra una vista general de la distribución de estaciones acelerográficas en el estado de Puebla.

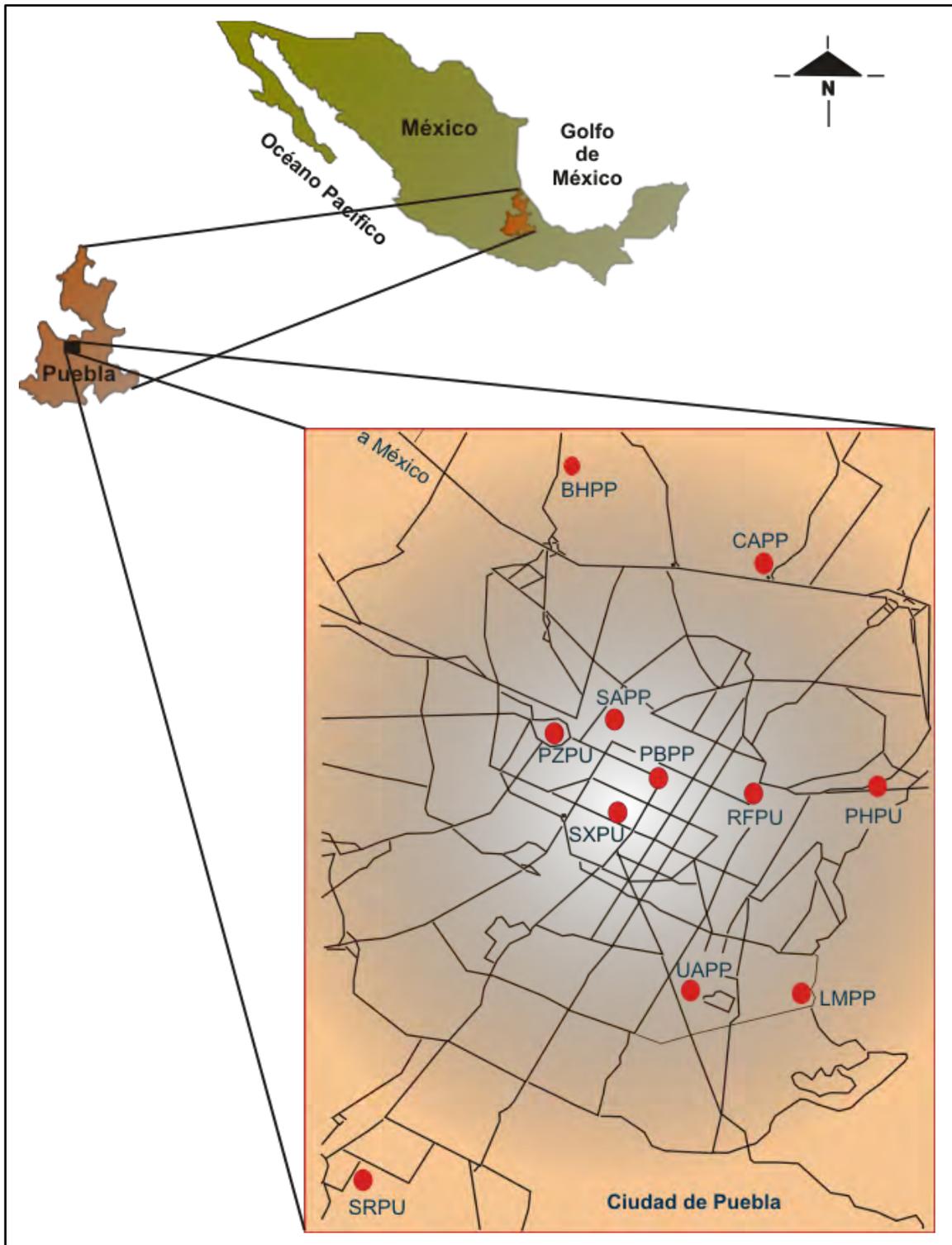


Figura II.2 Ubicación de las estaciones acelerográficas de la RACP (ref 23)

II.3 Registros obtenidos

Una vez decidido el sitio donde será colocado el instrumento de medición es preciso realizar pruebas de ruido sísmico para localizar posibles fuentes de vibraciones que originen disparos que no son debidos a movimientos sísmicos, los cuales pueden producir alteraciones importantes en los datos de aceleración. Para estos fines es necesario que se instale un equipo acelerográfico en el sitio seleccionado y operarlo con diferentes valores de activación. Los datos obtenidos son analizados y si las perturbaciones producidas son excesivas (generalmente mayores a 4 gal) el lugar sería descartado, en el caso de que no se produzcan este tipo de parámetros se instrumenta el sitio.

Los datos generados por el instrumento son almacenados en memoria *RAM*, de estado sólido o en dispositivos tipo *Flash*. Los datos generados en estos tipos de almacenamiento son recopilados en visitas realizadas al sitio o por medio de interrogación remota, como vía teléfono celular, satelital o internet. Después de tener una colección de datos deben revisarse dichos eventos con sucesos corroborados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Los datos guardados en la memoria son reportados en hojas de lectura como archivos nativos que se encuentran en formato binario, en una etapa posterior, mediante el uso de programas auxiliares son transformados en formato ASA (ASCII Estándar de Aceleración) que es un tipo de archivo unificado (ref 24), quedando el registro en tres canales, dependiendo del aparato. Un archivo ASA está compuesto por 2 bloques: uno conformado por datos que identifican al sismo y el otro por las series tiempo-aceleración.

Durante el periodo de 1978 a 2008 el número de acelerogramas generados por la RACP fue de 176, dichos registros fueron producidos por 91 sismos cuyas magnitudes están en un intervalo de 3.3 a 8.1. La aceleración máxima que ha sido registrada por la red es de 279 cm/s^2 que se presentó en la dirección norte-sur de la estación PHPU en el sismo del 15 de junio de 1999 ($M=7$)

Selección de información. Para conocer la relación existente entre dos lugares se ocuparon las estaciones Lomas del Mármol y Paseo Bravo, la primera se localiza en roca,

mientras que la estación PBPP se encuentra ubicada en un terreno con una estratigrafía compuesta de tres estratos principales: el primero conformado por rellenos limo arenosos, el segundo por travertino y finalmente arcilla de alta plasticidad.

Es preciso señalar que la información disponible en la estación LMPP es limitada ya que fue instalada en 1999 (posterior al sismo del 15 de junio de ese año) y solo ha registrado en forma simultánea con la estación PBPP 3 sismos, como se ilustra en la tabla 3. Dichos registros fueron seleccionados para el análisis que se realiza en este trabajo. En las figuras II.2 a II.7 se presentan los acelerogramas correspondientes y que fueron obtenidos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes (ref 25).

Año	Correspondencia	
1999	PBPP9906.151	
	PBPP9909.301	
	PBPP9912.141	
2004	PBPP0406.141	LMPP0406.141
	PBPP0408.071	
	PBPP0408.181	
2005	PBPP0508.141	
	PBPP0509.241	
2007	PBPP0704.131	LMPP0704.131
	PBPP0707.061	LMPP0707.061

Tabla 3. Eventos simultáneos registrados entre los años 1999 a 2007

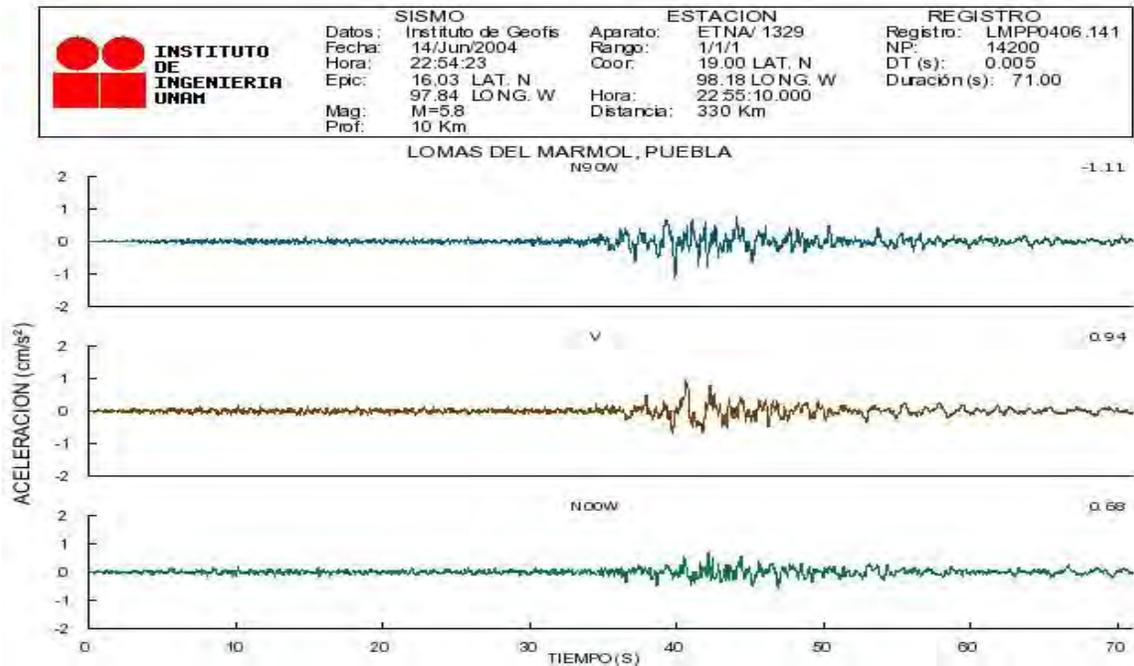


Figura II.2 Acelerograma generado en la estación LMPP el día 14 de junio de 2004

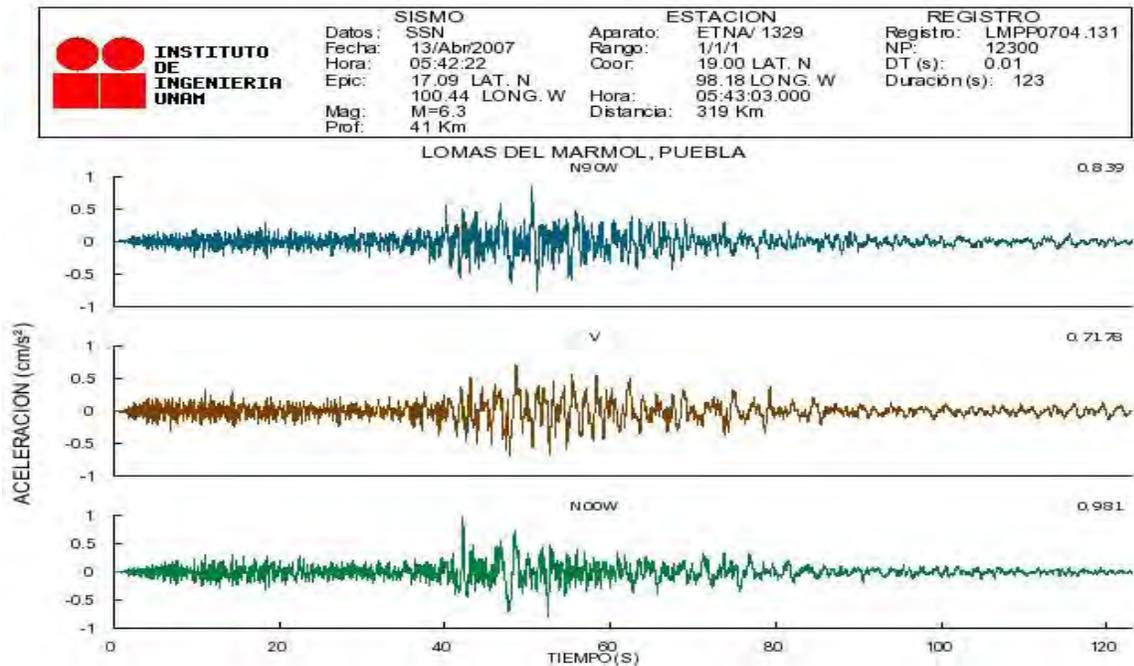


Figura II.3 Acelerograma generado en la estación LMPP el día 13 de abril de 2007

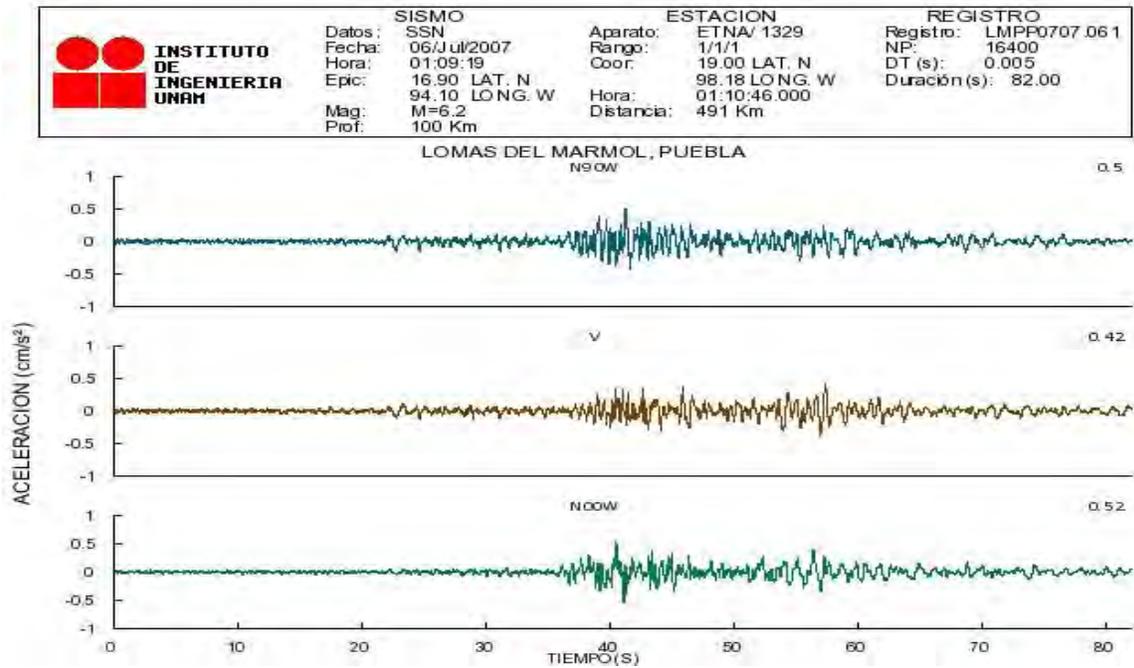


Figura II.4 Acelerograma generado en la estación LMPP el día 6 de julio de 2007

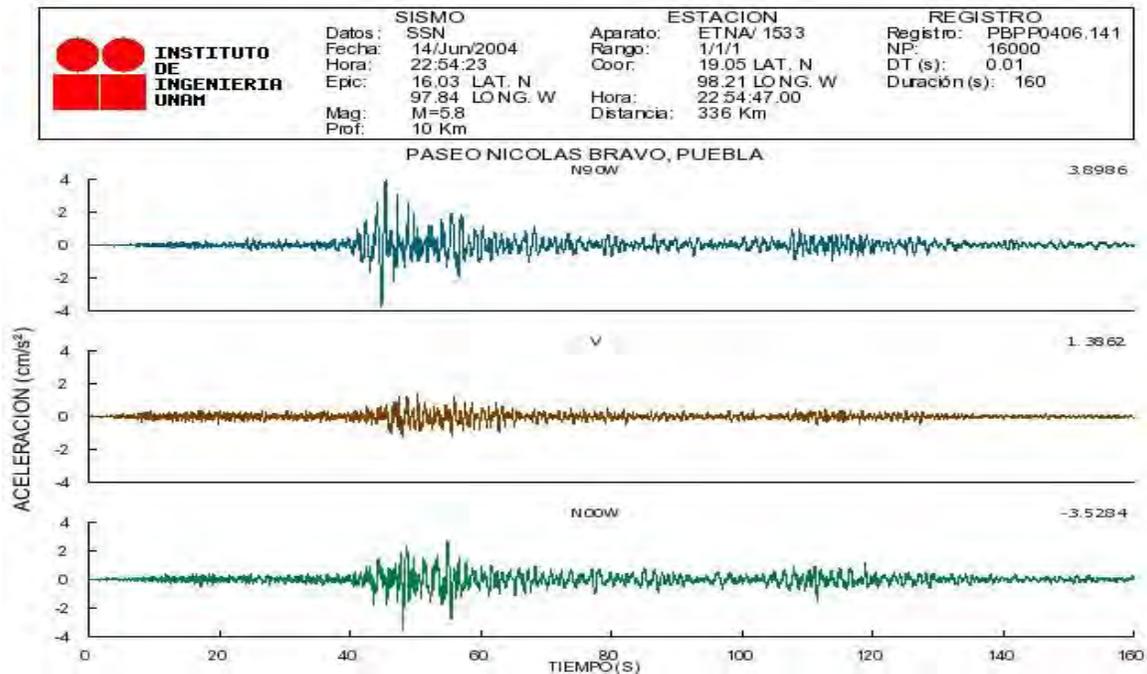


Figura II.5 Acelerograma generado en la estación PBPP el día 14 de junio de 2004

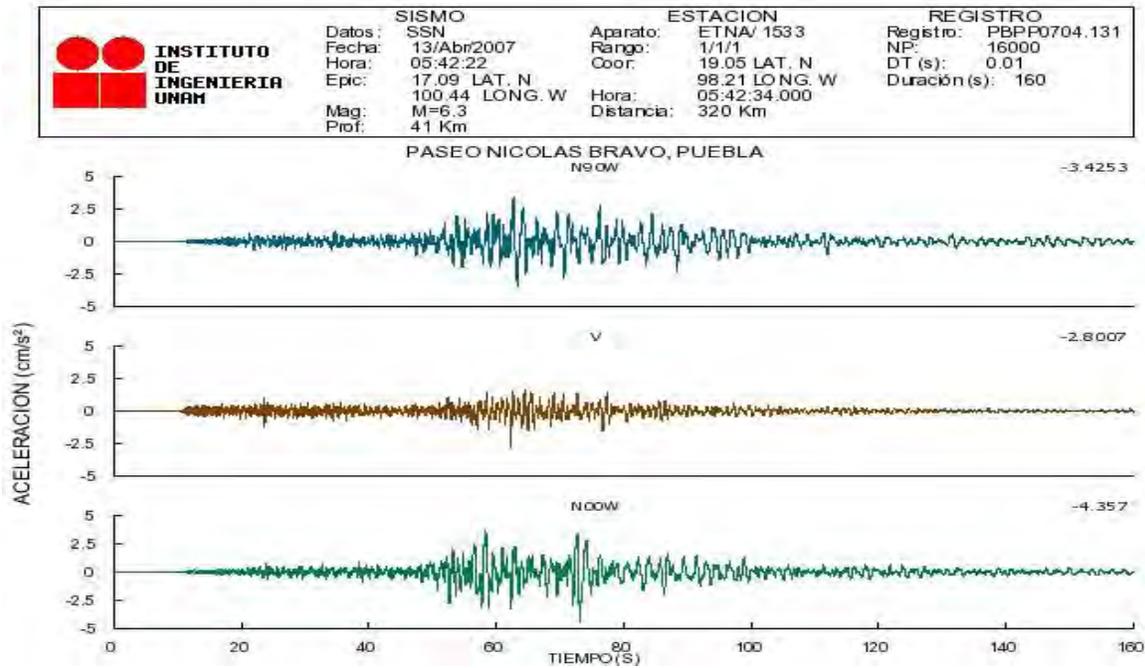


Figura II.6 Acelerograma generado en la estación PBPP el día 13 de abril de 2007

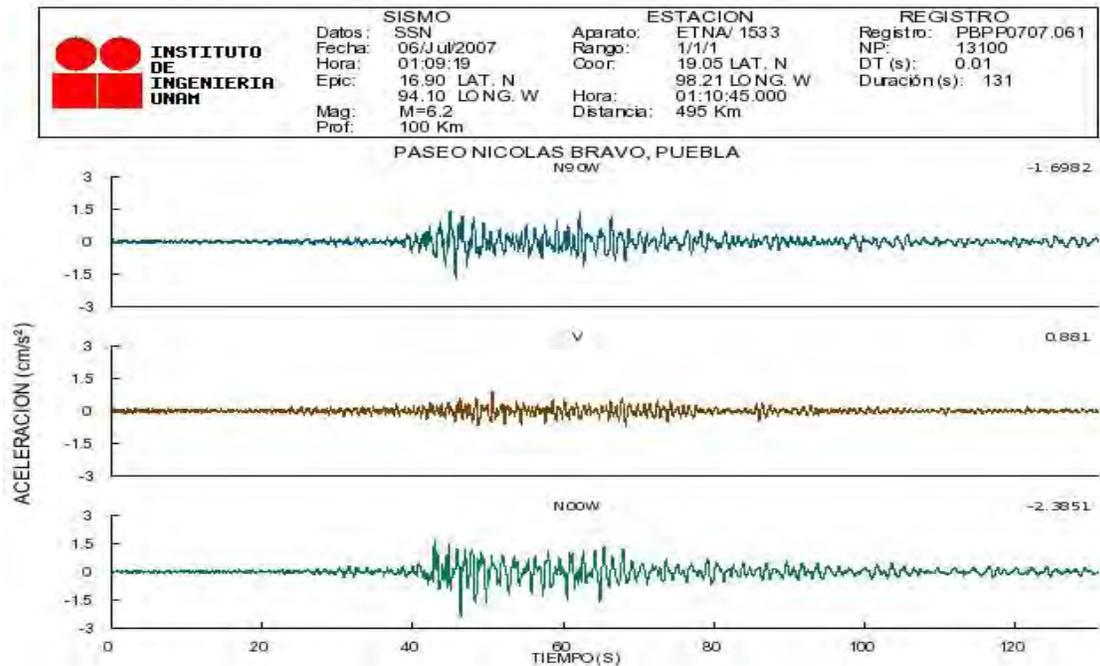


Figura II.7 Acelerograma generado en la estación PBPP el día 6 de julio de 2007

CAPÍTULO III

Determinación de los efectos de sitio

III. DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO

III.1 Marco teórico

En eventos sísmicos con alto índice destructivo existen evidencias de cómo altera la composición geológica del lugar el movimiento. Dependiendo del arreglo estratigráfico, que en la mayoría del territorio nacional son estructuras geológicamente complejas, se modifican drásticamente los movimientos generados por las ondas sísmicas (ref 26). Se puede afirmar que la amplificación del movimiento es producto de los efectos locales o de sitio, por los que el conocimiento de las características geológicas es de vital importancia para disminuir los daños ocasionados por estos fenómenos. Una de las actividades de interés para la sismología es la medición de las amplificaciones causadas por el suelo en áreas densamente pobladas (ref 27).

La amplificación de las ondas sísmicas se ha estudiado con más énfasis durante las últimas cuatro décadas, con diferentes modelos y propuestas para su evaluación, esta necesidad surgió al observar que los mayores daños en un sismo ocurrían en zonas con suelos que compartían ciertas características. Los estudios que se realizan para cuantificar estos efectos pueden llevarse a cabo mediante una comparación entre los registros obtenidos en dos o más estaciones, mientras más datos se tengan, mejor será la aproximación resultante al momento de realizar un modelo. Para conocer el comportamiento de un sitio, se realizan muchas suposiciones, en una situación ideal se deben conocer varios factores, como la estratigrafía del lugar, el tipo de falla que lo ocasionó, entre muchas otras variables, sin embargo, es difícil conocer con exactitud cada uno de los parámetros que describen un sismo, sin embargo, una forma de evaluar la influencia de las condiciones presentes en algún lugar puede obtenerse mediante estaciones de referencia instaladas en roca, que registrarán el movimiento causado por la onda sísmica sin la alteración de otro factor, mientras que una estación localizada en suelo estará influenciada por la estratigrafía del sitio. Es complicado tener las condiciones de estudio ideales, se debe tener un lugar con un afloramiento de roca que se encuentre unido a la corteza terrestre y no esté muy alejado de las otras estaciones con las cuales

se desea realizar la comparación, ya que existiría la necesidad de recurrir a algún modelo que corrija los efectos de atenuación causados por la lejanía entre las estaciones (ref 28).

Un ejemplo de lo que pueden causar los efectos de sitio sucedió en el sismo de 1985, ocasionando graves daños en gran parte de la Ciudad de México, siendo las áreas más afectadas las zonas centro, sur y occidente, lugares donde el tipo de suelo influyó en gran medida a que el comportamiento sísmico fuera muy diferente al de sitios localizados a menor distancia del epicentro, donde no existieron daños de consideración, este fenómeno pudo ser apreciado gracias a la instrumentación sísmica instalada, ya que sin estos recursos no hubiera sido posible observar detalles que resultaron tan importantes en ese momento, y que sin duda volverán a ocurrir cuando se presente un sismo con características similares.

En la figura III.1 se pueden apreciar distintos acelerogramas registrados en estaciones localizadas entre el lugar del epicentro y la Ciudad de México, las estaciones más cercanas al lugar, en donde se produjo el terremoto, están localizadas en roca, es notoria la atenuación que se tiene mientras más alejada se encuentra la estación. En el registro que se tuvo en Ciudad Universitaria, localizada en una zona de terreno firme, dicha atenuación fue importante si se compara con el registro más cercano al epicentro, debido a la gran distancia (aproximadamente 400 kilómetros), en otras estaciones que se encuentran cercanas a Ciudad Universitaria y cuya lejanía resulta despreciable si se compara con la distancia hasta el epicentro. La respuesta del suelo es completamente diferente, en el caso de la estación Viveros, ubicada en una zona con terreno de transición, se observa que existe amplificación del movimiento, pero al momento de compararlos con la estación localizada en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes hay una amplificación en la respuesta muy importante, llegando a un nivel de aceleraciones similares e incluso mayores al lugar donde se produjo el sismo, este fenómeno solo pudo ser causado por las condiciones locales, y en forma general, en los lugares donde se tuvieron daños importantes fue debido al tipo de suelo. En el último registro, obtenido de la estación Tlahuac Bombas no se observan niveles de aceleración tan grandes como los registrados en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, sin embargo al compararlo con los datos de las estaciones Ciudad Universitaria y Viveros es notoria una amplificación y un comportamiento totalmente diferente a los otros registros.

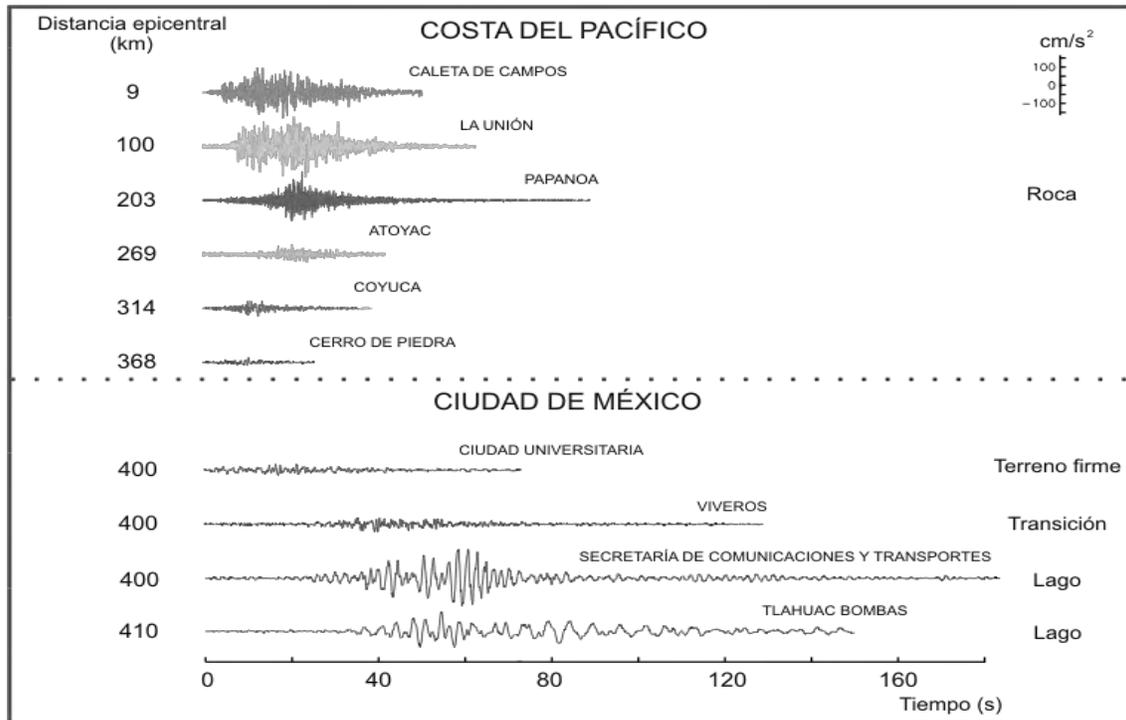


Figura III.1 Acelerogramas registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (ref 29)

En la Ciudad de Puebla, al igual que en la Ciudad de México se presentan efectos de sitio, estos son totalmente diferentes debido a las variantes en las características del suelo, si se conociera exactamente la estratigrafía en cierto lugar y las características del acelerograma en la roca que subyace a un estrato de suelo se podría determinar la respuesta en la superficie, pero debido a que no es sencillo conocer con precisión las propiedades de un lugar, se recurre a modelos para tratar de cuantificar la amplificación de un lugar con respecto a otro.

Un efecto de sitio ocurrirá en cualquier lugar sometido a una excitación sísmica y variará con las propiedades del suelo, dicho fenómeno intensificará o atenuará la respuesta.

En la figura III.2 se ilustra la influencia de un estrato de suelo al registrar un evento sísmico en dos estaciones cercanas.

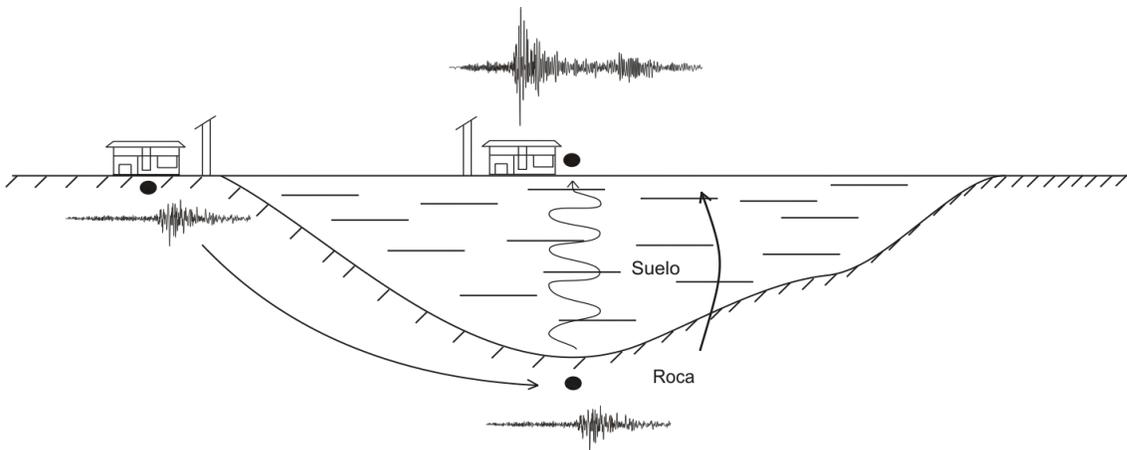


Figura III.2 Simulación de un efecto de sitio

Una aplicación al estudiar los efectos de sitio es conocer la amplificación de un lugar respecto a otro con diferentes características geológicas, un método utilizado son las Funciones de Transferencia, mediante estas se puede conocer el número de veces que se amplifica una onda sísmica y para que intervalo de frecuencias, lo cual es importante para determinar bajo que características se tendría la mayor modificación y por lo tanto el mayor riesgo. Los resultados obtenidos también pueden resultar de utilidad en caso de que las ondas sísmicas se atenúen en cierto intervalo. Resulta importante hacer mención de los Espectros de Fourier que serán la base para realizar el cálculo de Funciones de Transferencia.

Análisis de Fourier. Una herramienta matemática útil para el análisis de señales son las llamadas transformadas lineales, pues permiten reordenar los datos originales tomando en cuenta la frecuencia en lugar del tiempo. En especial las transformadas de Fourier, que son ampliamente utilizadas en diversos campos de la ciencia; gracias al teorema desarrollado por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y complementado por el alemán Dirichlet, es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier periodo, puede desarrollarse en una única serie trigonométrica correspondiente a dicha función, conocida como serie de Fourier.

La extensión de estas series a funciones continuas lleva a expresiones matemáticas integrales como las transformadas de Fourier, mediante las cuales es posible determinar la relación existente entre los dominios del tiempo y frecuencia (ref 30).

La esencia de la Transformada de Fourier de una señal es descomponerla o separarla en una serie de senoides de diferentes frecuencias, las cuales corresponden a la suma de la original.

Mediante la siguiente expresión se define la transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

$F(\omega)$: Señal transformada al dominio de la frecuencia (ω)

$f(t)$: Señal en el dominio del tiempo

$$j^2 = -1$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ω = Frecuencia en Hz

T = Periodo en s

Ya que los registros obtenidos sólo tienen datos de aceleración de tipo discreto, el cálculo numérico realizado por las computadoras digitales requiere ese tipo de muestras, por lo que se desarrolló la transformada discreta de Fourier (TDF), la cual puede ser estimada mediante un algoritmo conocido como transformada rápida de Fourier (TRF)(ref. 31). La ventaja de este algoritmo es que permite reducir el número de cálculos y funciona partiendo la señal completa en un cierto número de subseñales mas cortas y calculando la TDF de cada una de éstas, posteriormente la TRF las combina para obtener la TDF de la señal original.

Espectros de Fourier. Al aplicar la transformada rápida de Fourier a una señal se determina la relación de esta en un dominio de frecuencias asociadas a valores de amplitud. Cuando se grafica el resultado de esta operación se obtiene el espectro de

Fourier, se calcula como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, mediante las siguientes expresiones.

$$|F(\omega)| = \left[R(\omega)^2 + jX(\omega)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

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

$F(\omega)$ = Señal transformada al dominio de la frecuencia (ω)

$R(\omega)$ = Parte real

$X(\omega)$ = Parte imaginaria

Una vez que se tiene el registro de un acelerograma y se requiere obtener su espectro de Fourier es importante realizar dos operaciones denominadas corrección de línea base y filtrado, estas permiten realizar una afinación de los datos, debido a que el registro sísmico puede tener alteraciones producto de vibraciones ajenas al propio evento como podrían ser movimientos producidos por vehículos u otros factores.

La figura III.3 muestra la componente longitudinal del sismo registrado en la estación PBPP el día 15 de junio de 1999 con su Espectro de Fourier correspondiente.

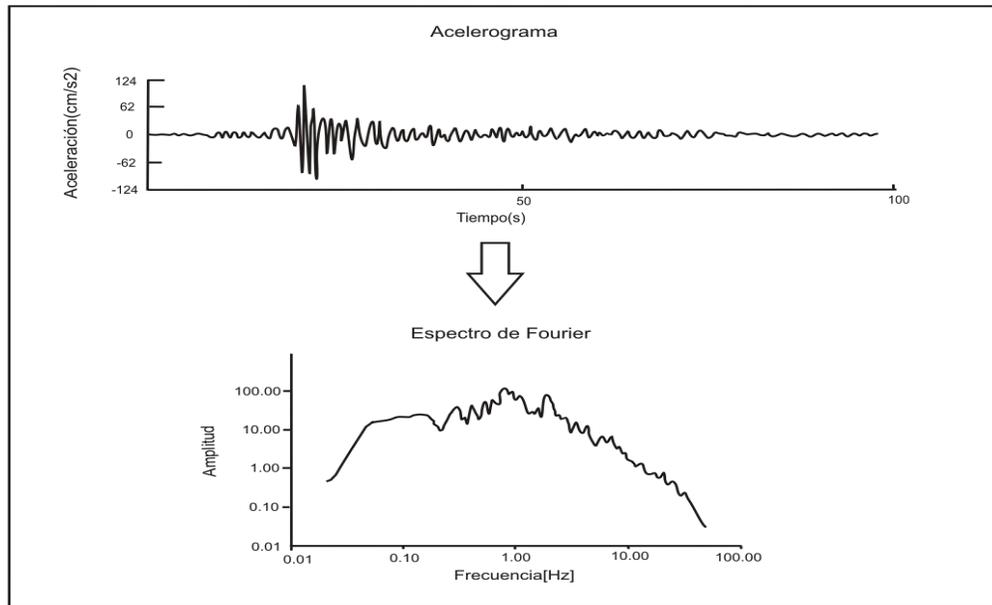


Figura III.3 Acelerograma y Espectro de Fourier

III.2 Funciones de Transferencia

Las Funciones de Transferencia en ingeniería sísmica han sido utilizadas para evaluar los efectos de sitio ya que establecen una relación entre dos sitios mediante un cociente, obteniendo el resultado en un intervalo de frecuencias.

Cálculo de Funciones de Transferencia. Conocidos los espectros de Fourier de dos sitios que se desean comparar (E1, E2) se puede realizar un cociente espectral que da como resultado una Función de Transferencia, en la figura III.4 se observan dos espectros de Fourier y se ejemplifica una Función de Transferencia resultado de la operación realizada.

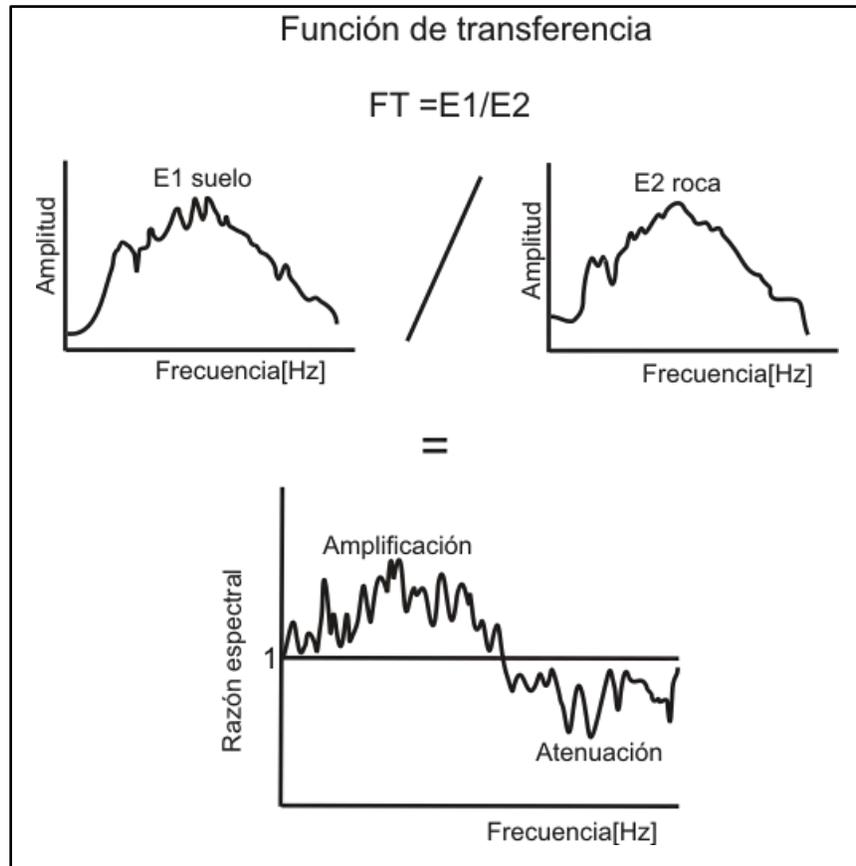


Figura III.4 Cálculo de una Función de Transferencia

Con el uso de las Funciones de Transferencia es posible estimar como variará el movimiento sísmico de un lugar a otro, lo que podrá determinar factores de amplificación o atenuación de la respuesta sísmica.

Después de seleccionar dos estaciones, la primera localizada en el sitio Paseo Nicolás Bravo (PBPP) con un terreno que tiene una estratigrafía compleja compuesto por un profundo estrato donde se encuentran suelos blandos, mientras la segunda estación se encuentra en el lugar Lomas del Mármol (LMPP) la cual fue instalada en un afloramiento rocoso, estos lugares fueron elegidos porque poseen condiciones ideales para observar cómo influye el tipo de suelo en la respuesta sísmica, además que existen registros simultáneos adecuados para realizar el estudio.

Una vez que se han reunido los acelerogramas respectivos se generan las funciones de transferencia a través del programa DEGTRA A4 (XP) (ref 32). Al cual se le debe proporcionar como archivos de entrada los registros de aceleración correspondientes y a continuación se da un resumen general de los pasos a realizar en el programa:

Dentro del programa en el menú principal se abre una ventana para cada componente del registro acelerográfico, en el caso de los registros en estudio se tienen tres componentes: (horizontal, longitudinal y vertical).

- En cada una de las ventanas debe leerse el registro, teniendo la debida precaución para no confundir cada una de las componentes
- Se realizan las instrucciones de corrección de línea base y filtro pasabanda
- El siguiente paso es calcular el Espectro de Fourier para cada una de las componentes de interés
- Una vez que se han calculado los Espectros de Fourier se realiza el respectivo cociente espectral obteniendo la función de transferencia, es importante indicar el numerador y denominador al momento de realizar la operación
- Con el uso de una Función de Transferencia se pueden determinar los cambios en la respuesta sísmica ocasionados por las características inherentes del terreno, gracias a esto se aprecian con claridad los efectos de atenuación o amplificación, lo cual es parte esencial de un efecto de sitio; con el uso de esta función es posible analizar la respuesta del sitio en el intervalo de frecuencias de interés
- El efecto de sitio para las estaciones seleccionadas será evidente debido a que las características del subsuelo son completamente distintas

Para apreciar los efectos de atenuación y amplificación con el uso de una Función de Transferencia, se simula un cociente entre Espectros de Fourier de una misma señal, la razón espectral de esta operación es uno, el resultado sería una línea recta paralela al eje de las abscisas con ordenada ubicada en dicho valor; teniendo esta operación como referencia se realiza el mismo cociente pero esta ocasión las señales serán diferentes, en los intervalos de frecuencia donde la razón espectral es mayor a uno se tendrá una amplificación de la respuesta sísmica, mientras que al ubicarse por debajo del valor uno existirá una atenuación; un indicador de la magnitud con que se amplifica o disminuye la respuesta sísmica es la razón espectral siendo esta igual al número de veces que aumenta o atenúa dicha respuesta, si para determinado valor de frecuencia la razón espectral tiene un valor de dos, la respuesta es del doble.

La Función de Transferencia originada tiene validez en un cierto intervalo de frecuencias, la consideración que se establece para fijar parámetros son valores predeterminados que en base a experiencia son de utilidad, los datos válidos de frecuencias a usar será de $0.05 \leq f \leq 35$ Hz

Funciones de Transferencia Promedio. Una vez realizadas las Funciones de Transferencia para todos los eventos seleccionados es posible obtener un promedio por cada componente, el resultado de esta operación es una Función de Transferencia Promedio (FTP), esta función engloba el intervalo de frecuencias donde se está amplificando la respuesta sísmica y el orden de magnitud que estará aumentando dicha señal.

Para ejemplificar este procedimiento, en la figura III.5 se presenta el resultado de obtener una Función de Transferencia Promedio de dos sismos obtenidos en los años de 1985 y 1989, la función presentada es el producto de registros en las estaciones SCT y CU en la Ciudad de México, la gráfica corresponde a la componente vertical. Estas estaciones están situadas en sitios con características diferentes, mientras que la estación de CU está localizada en una zona con terreno firme la estación SCT se encuentra en suelo blando, como consecuencia se tiene en este lugar una amplificación de la respuesta.

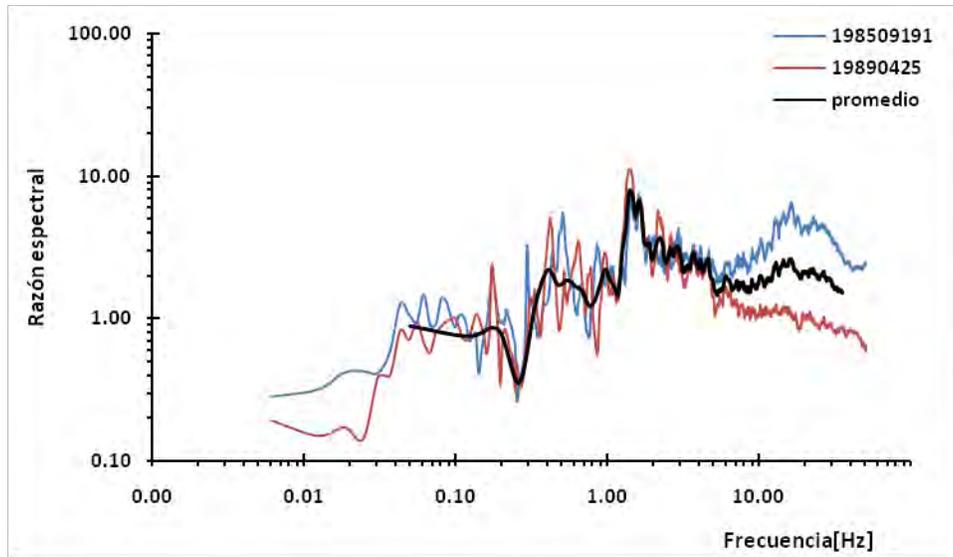


Figura III.5 Cálculo de una Función de Transferencia Promedio

III.3 Espectros de respuesta

Definición de espectro de respuesta. Un espectro de respuesta es una valiosa herramienta en el campo de la dinámica estructural que es muy utilizada en el diseño sísmico. De la manera más general se puede definir como un gráfico de las respuestas máximas (puede estar en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración u otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica correspondiente a todos los sistemas de un grado de libertad comprendidos en un intervalo de periodos y con amortiguamiento determinado.

Sistemas de un grado de libertad. Si se requiere describir el movimiento de un cuerpo en el espacio, es necesario referirlo a un sistema de referencia compuesto por tres ejes ortogonales, los movimientos descritos pueden dividirse en translaciones y rotaciones, sin embargo, si se añade una unión mecánica a este cuerpo varios movimientos quedan restringidos, se les denominan grados de libertad a los desplazamientos independientes que permanecen.

Es posible construir un sistema de un grado de libertad constituido por una masa concentrada (m), unido a una referencia fija mediante un elemento vertical que posee

cierta rigidez (k) y amortiguamiento (c), como se ilustra en la figura III.6. El conjunto integrado por m , c y k constituye un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento (ref 33).

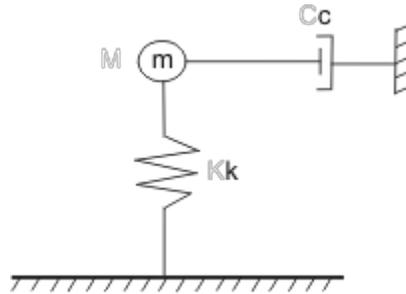


Figura III.6 Sistema de un grado de libertad

Cuando es movido el sistema estáticamente cargado los elementos internos ya no se encontrarán en equilibrio con las fuerzas externas ocasionando vibraciones, en el caso de los sistemas de un grado de libertad los movimientos en cualquier instante pueden expresarse en una sola coordenada.

La figura III.7 y III.8 ejemplifican una fuente de excitación externa debida a un movimiento sísmico, que tiene asociados desplazamientos originados por la fuerza excitadora (ref 34).

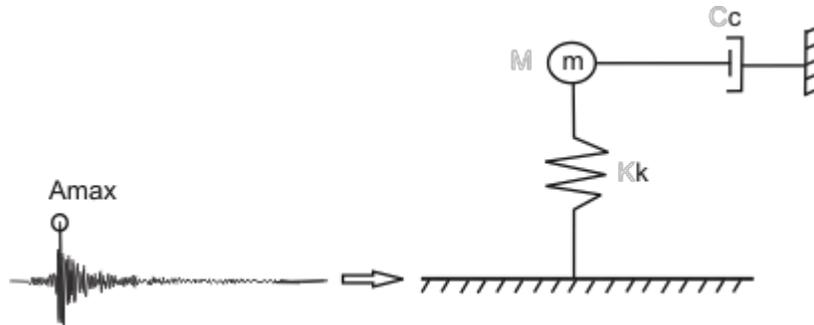


Figura III.7 Fuente de excitación sísmica

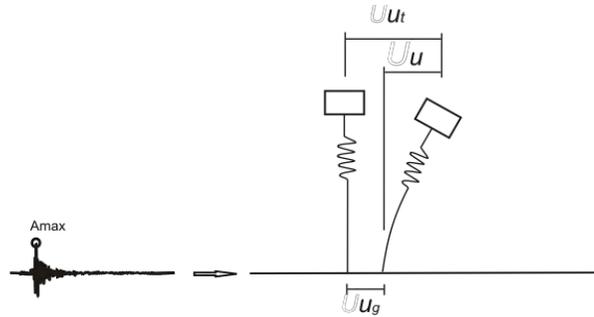


Figura III.8 Desplazamientos en el sistema de un grado de libertad

Según el sistema planteado los desplazamientos en cada instante están relacionados por:

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$u^t(t)$: Desplazamiento total del sistema en función del tiempo

$u(t)$: Desplazamiento generado por la deformación del marco en función del tiempo

$u_g(t)$: Desplazamiento originado por el movimiento sísmico en función del tiempo

Analizando el equilibrio dinámico del sistema de la figura III.8 se obtiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura III.9

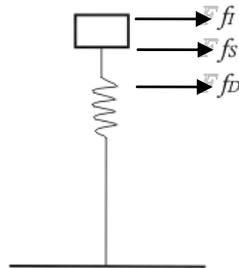


Figura III.9 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Estableciendo el equilibrio se tiene:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (3.2)$$

$f_I \rightarrow$ fuerza de inercia
 $f_D \rightarrow$ fuerza de amortiguamiento
 $f_S \rightarrow$ fuerza de rigidez

Donde:

$$\begin{array}{l}
 f_I = m\ddot{u}^t \\
 f_D = c\dot{u} \\
 f_S = ku
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 m = \text{masa del sistema} \\
 \ddot{u}^t = \text{aceleración total del Sistema} \\
 c = \text{coeficiente de amortiguamiento viscoso} \\
 \dot{u} = \text{velocidad} \\
 k = \text{rigidez lateral} \\
 u = \text{desplazamiento}
 \end{array}
 \right.$$

Sustituyendo en la ecuación 3.2

$$m\ddot{u}^t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.3)$$

pero

$$u^t = u + u_g$$

derivando

$$\dot{u}^t = \dot{u} + \dot{u}_g$$

$$\ddot{u}^t = \ddot{u} + \ddot{u}_g$$

\therefore

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0$$

finalmente

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.4)$$

Finalmente a la expresión 3.4 se le conoce como ecuación diferencial de movimiento para un sistema de un grado de libertad o ecuación de equilibrio dinámico. Si tal ecuación es dividida entre m se tiene:

$$\frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} = -\frac{m\ddot{u}_g(t)}{m}$$

$$\ddot{u} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} = -\ddot{u}_g \quad (3.5)$$

Considerando las siguientes definiciones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2m\omega_n}$$

ω_n = frecuencia circular natural de vibración

k = rigidez lateral del sistema

m = masa del sistema

T_n = periodo natural de vibración

ζ = relación de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

c_r = coeficiente crítico de amortiguamiento, es denominado de esta forma porque es el valor mínimo de c que impide que el sistema oscile al regresar a su posición original después de haber sufrido un desplazamiento.

Sustituyendo en la ecuación 3.4:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.6)$$

Se puede apreciar que en la última ecuación el desplazamiento $u(t)$ del sistema está en función de la frecuencia natural ω_n así como de la relación de amortiguamiento ζ , debido a esto dos sistemas que tengan los mismos valores de T_n y ζ tendrán valores de desplazamiento $u(t)$ idénticos aún cuando alguno de ellos tenga mayor masa o mayor rigidez que otro.

Para las respuestas del sistema de un grado de libertad en distintas condiciones de periodo y relación de amortiguamiento es evidente que para valores de mayor periodo y una relación de amortiguamiento constante el desplazamiento producido es mayor, de igual forma, si se mantiene fijo el valor de T y se aumenta el valor de la relación de amortiguamiento ζ la respuesta del sistema disminuye, este fenómeno se ilustra en la figura III.10.

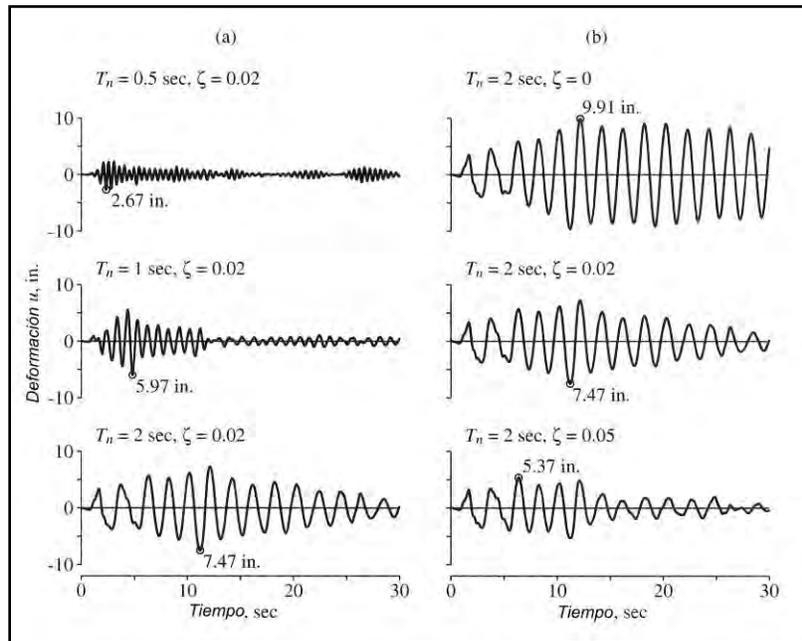


Figura III.10 Respuesta al desplazamiento de sistemas de un grado de libertad (ref 35).

Una forma de explicar el concepto de espectro de respuesta es la consideración de una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples, cada uno con diferente periodo de vibración T , y con igual relación de amortiguamiento ζ . Estos osciladores son sometidos a un mismo sismo, con el uso de un registro de aceleraciones $\ddot{u}_g(t)$, es de esperarse que cada uno tenga una respuesta diferente la cual puede representarse por medio de la historia de desplazamientos $u(t)$. Una vez realizado el cálculo de la respuesta en los osciladores es posible determinar el máximo en cada uno de ellos y expresarlos en un gráfico en función del periodo de vibración, obteniendo así un espectro de respuesta, es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro como se ilustra en la figura III.11.

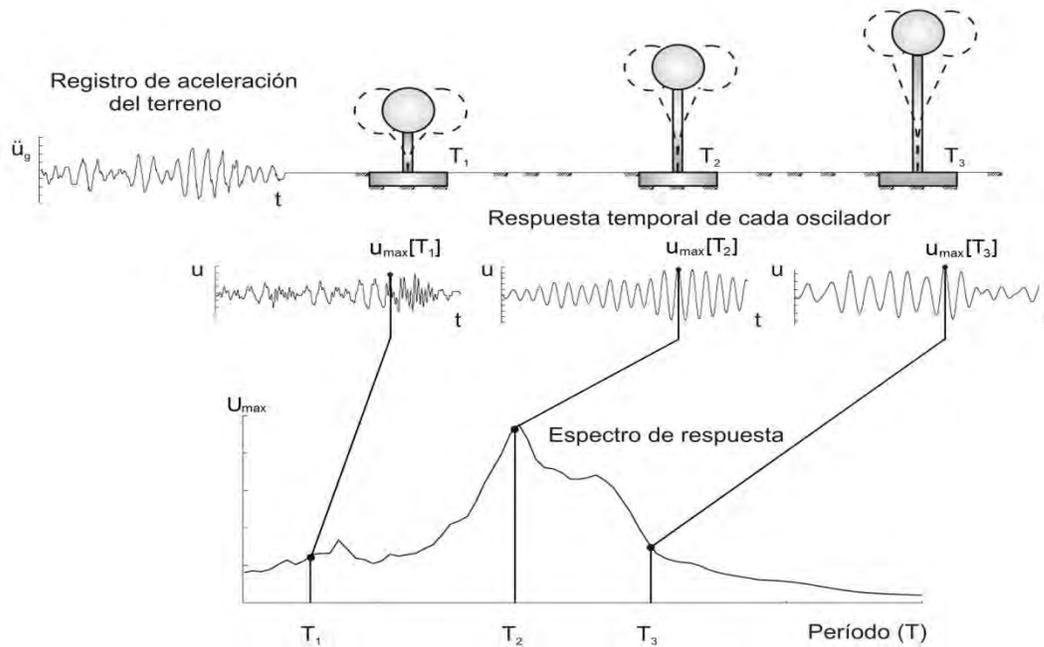


Figura III.11 Determinación de un espectro de respuesta

Existen varios tipos de espectros de respuesta (ref 36), algunos de ellos son los llamados pseudo-espectros tanto de velocidad como de aceleración. El primero V para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n y que tiene un desplazamiento $D = U_{max}$ producto de un movimiento sísmico del terreno está dado por la siguiente expresión:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.7)$$

Donde V tiene unidades de velocidad y se relaciona con el valor máximo de energía de deformación E_{So} , que es almacenada durante el temblor mediante:

$$E_{So} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.8)$$

Por otro lado, el espectro de respuesta de pseudo-aceleración se puede considerar como una cantidad A para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n relacionada con su desplazamiento máximo $D = U_{max}$ debido a un evento sísmico en el terreno.

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.9)$$

Donde A tiene unidades de aceleración y se relaciona con el valor cortante máximo en la base V_{b0}

$$V_{b0} = f_{S0} = mA = \frac{A}{g} W = CW$$

W : peso de la estructura

g : aceleración de la gravedad

$C = \frac{A}{g}$: coeficiente de fuerza cortante

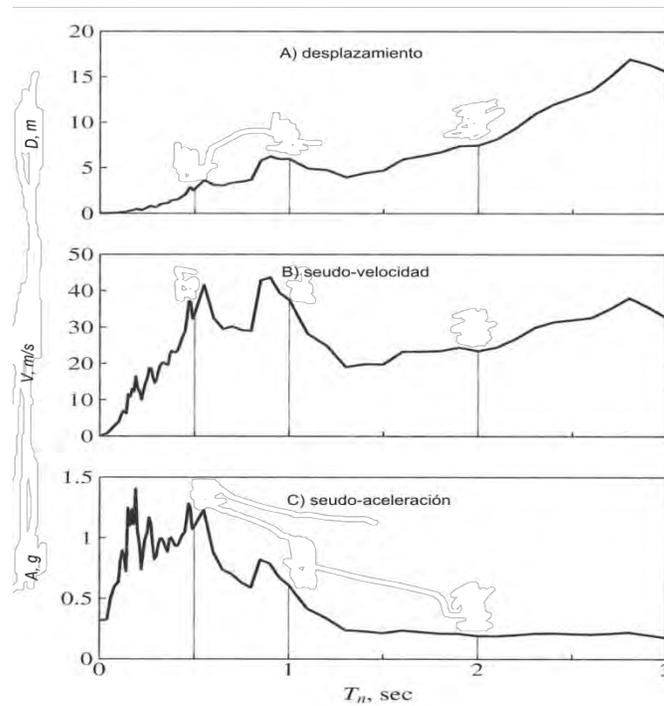


Figura III.12 Espectros de respuesta

III.4 Análisis de los efectos de sitio

Para realizar el análisis de los efectos de sitio, se examinarán los espectros de Fourier, siguiendo con las funciones de transferencia y por último los espectros de respuesta, se

mencionan algunas características observadas que resultan relevantes. En las figuras III.14 a III.16 se muestran los espectros de Fourier obtenidos después de analizar la información disponible, el intervalo de frecuencias considerado válido fue de .05 a 35 [Hz], en el caso de espectros de Fourier se encuentran agrupados los tres sismos utilizados por componente longitudinal, transversal y vertical, estos gráficos permiten conocer el comportamiento de cada evento en el dominio de frecuencias, era de esperar que la forma de los espectros en la misma estación fuera parecido.

En la figura III.14 se observan los espectros de Fourier obtenidos de la estación LMPP, para las tres componentes utilizadas la frecuencia de 1 [Hz] está asociada a la amplitud máxima de aproximadamente 1 [cm/s], este valor de amplitud se obtuvo debido a que la magnitud del sismo fue pequeña, cuando ocurra un sismo de mayor magnitud la amplitud máxima será mayor, mientras que la frecuencia será parecida a la obtenida en estos gráficos. Debido a que los sismos utilizados tienen magnitudes que se pueden catalogar como similares, ya que se encuentran en un intervalo de magnitud de 5.8 a 6.3, los espectros de Fourier obtenidos tienen una amplitud máxima cercana a 1 [cm/s], el espectro de Fourier del registro obtenido el día 13 de abril de 2007 tiene valores de amplitud un poco superiores debido a la magnitud del sismo, en las tres componentes para los espectros de Fourier de la estación LMPP se aprecian valores del mismo orden de amplitud y frecuencia, salvo la componente vertical que tiene una amplitud mayor.

En la figura III.15 se encuentran los gráficos obtenidos con los datos de la estación PBPP, con solo comparar preliminarmente los datos, puede apreciarse una amplificación en los valores, la frecuencia donde se tiene la amplitud máxima es menor a 1 [Hz], lo cual se relaciona con el hecho de que existe un periodo mayor en dicho lugar. La amplitud máxima es parecida en las componentes longitudinal y transversal, donde es de aproximadamente 8 cm/s, mientras que en la componente vertical tiene amplitud de 4 cm/s aproximadamente, es interesante observar como este mismo comportamiento se tuvo para los tres sismos. No es posible precisar únicamente con espectros de Fourier el intervalo de frecuencias donde existe una amplificación y de que orden.

En la figura III.16 se adjunta el espectro de Fourier obtenido con el sismo registrado el día 15 de junio de 1999 en la estación PBPP, este espectro fue agregado a los anteriores

para compararlos con un registro de mayor magnitud, este sismo fue de magnitud 7, sin embargo no fue posible analizarlo en las dos estaciones debido a que en ese entonces aun no estaba instalada la estación LMPP, al momento de comparar dicho espectro con los anteriores se tienen valores de amplitud máxima muy superiores, los valores de amplitud máxima apreciados son de 100 cm/s.

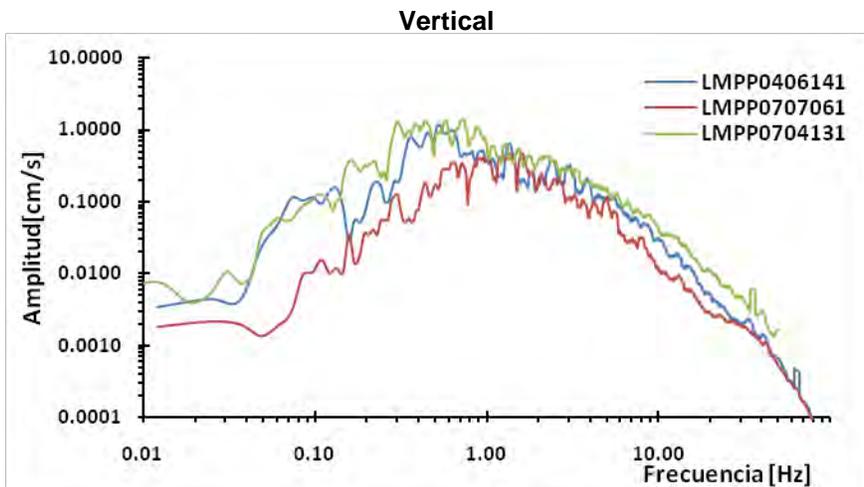
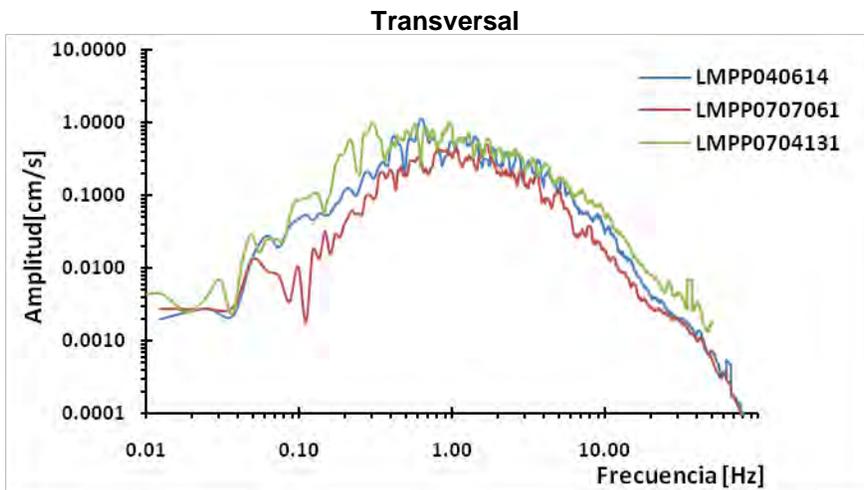
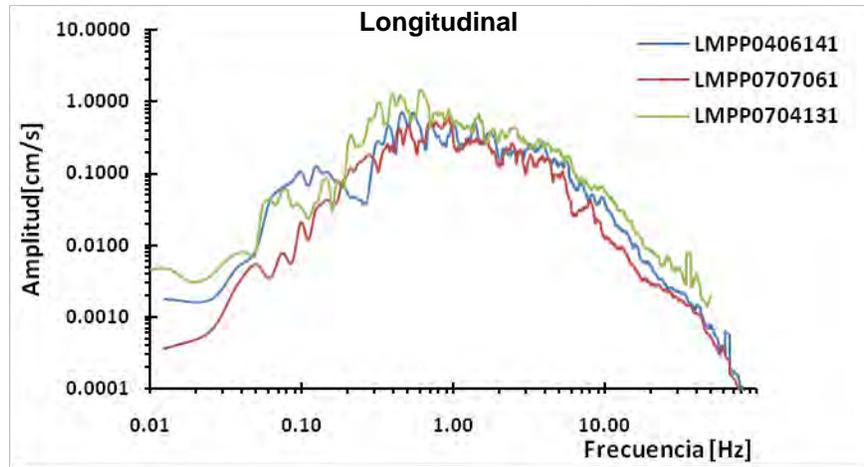


Figura III.14 Espectros de Fourier en la estación LMPP

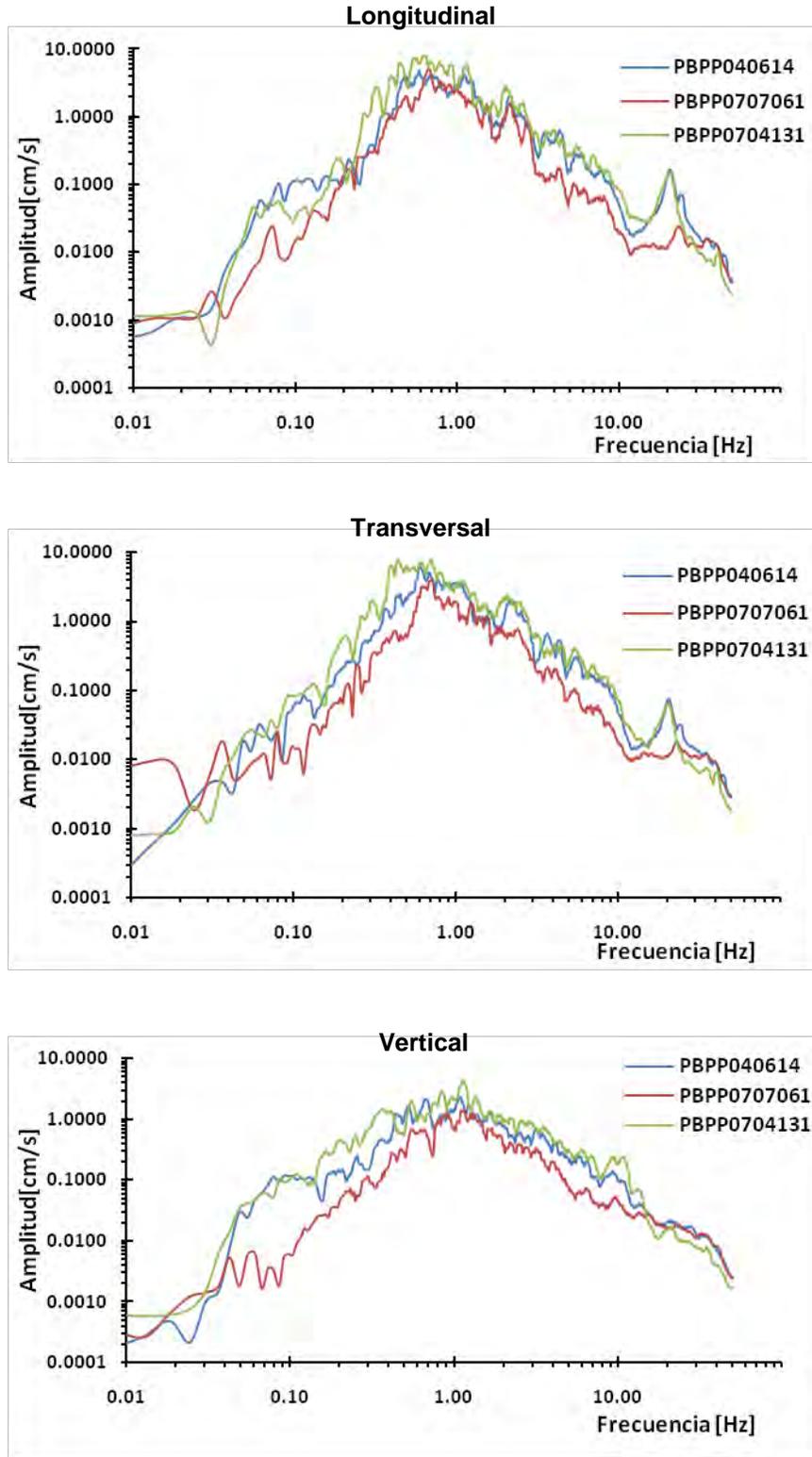


Figura III.15 Espectros de Fourier en la estación PBPP

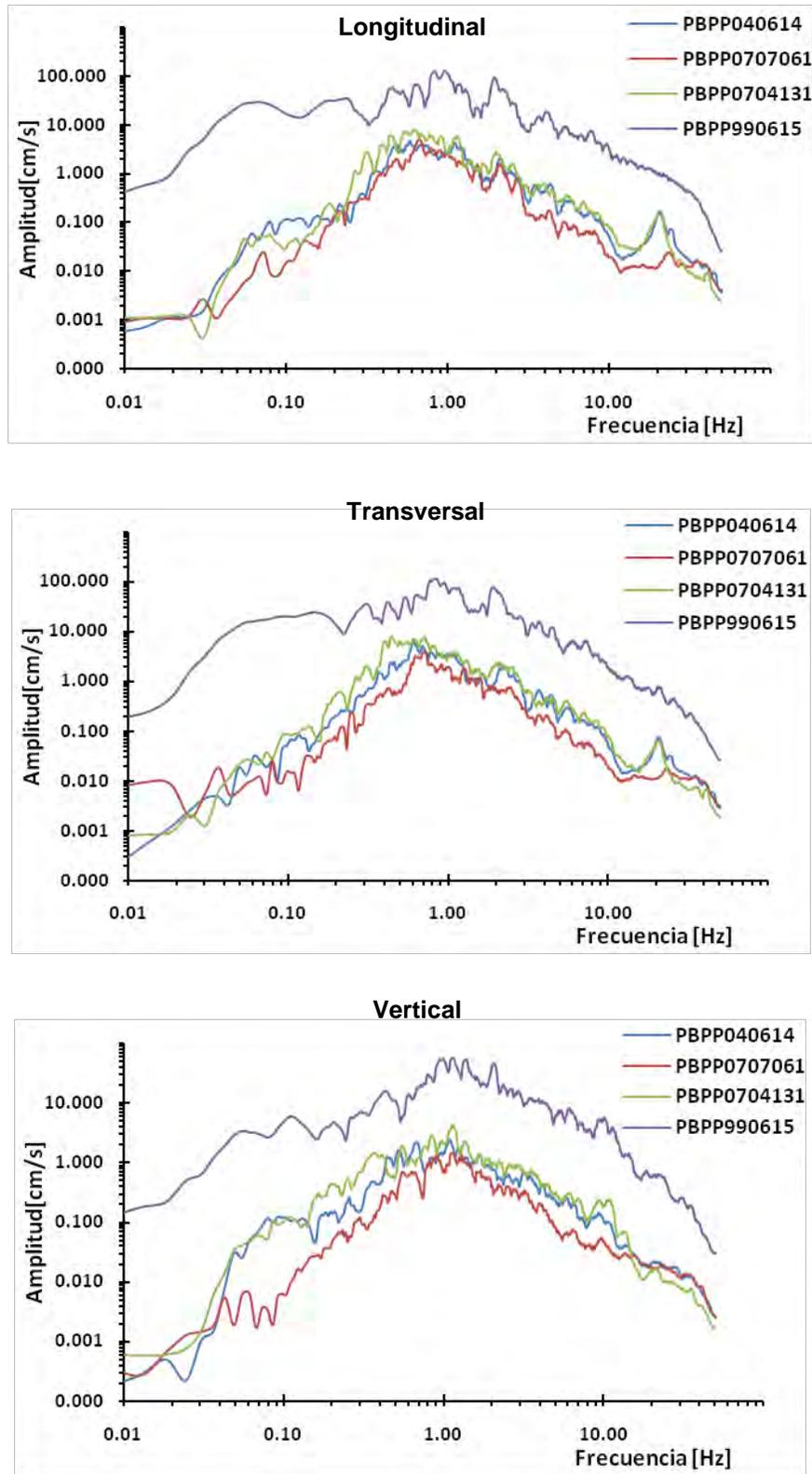


Figura III.16 Comparación entre espectros de Fourier obtenidos en la estación PBPP

Para realizar el análisis de las Funciones de Transferencia se utilizaron los espectros de Fourier simultáneos, se obtuvieron para cada evento y después se calculó la Función de Transferencia Promedio de cada componente; la longitudinal mostrada en la figura III.17, la transversal en la figura III.18, y como complemento la Función de Transferencia horizontal mostrada en la figura III.19, que engloba las seis funciones de transferencia anteriores. Se analizaron primeramente las dos componentes por separado, para observar cuál de ellas influye más en la amplificación de la respuesta sísmica.

En la Función de Transferencia longitudinal el aspecto más importante es que en casi todo el intervalo de frecuencias existe una amplificación en la respuesta, la mayor amplificación se tiene en una frecuencia de 20 [Hz], con un orden de quince veces.

En la Función de Transferencia transversal existe una ligera atenuación en frecuencias bajas, la máxima amplificación se tiene en una frecuencia de 0.8 Hz del orden de nueve veces.

Al evaluar la Función de Transferencia horizontal, el valor de amplificación fue cercano a nueve veces en la frecuencia de 0.8 [Hz] y se tiene una disminución hasta el valor de 10 Hz donde existe una ligera atenuación.

Para la Función de Transferencia vertical mostrada en la figura III.20 se obtuvo una amplificación de aproximadamente 8 veces para una frecuencia cercana a 1 [Hz]. La mayor amplificación se obtuvo en la componente longitudinal con un orden de magnitud 12 veces.

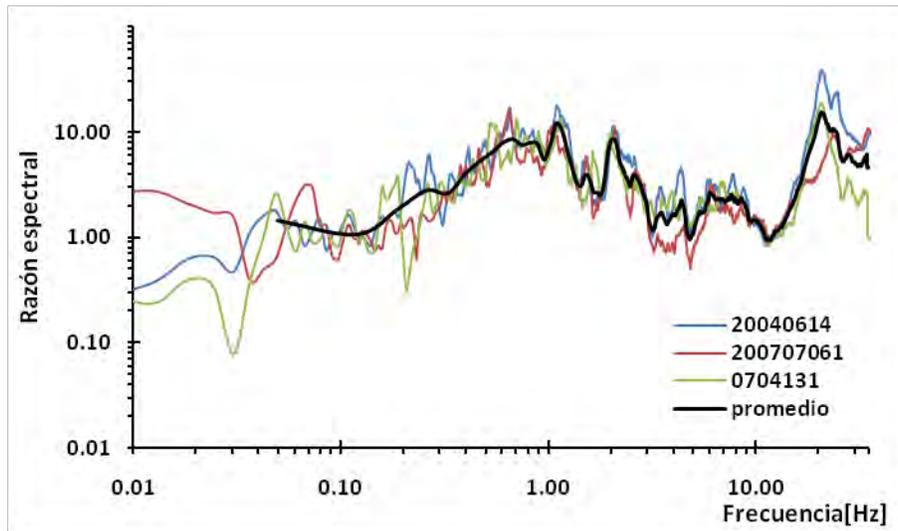


Figura III.17 Función de transferencia longitudinal

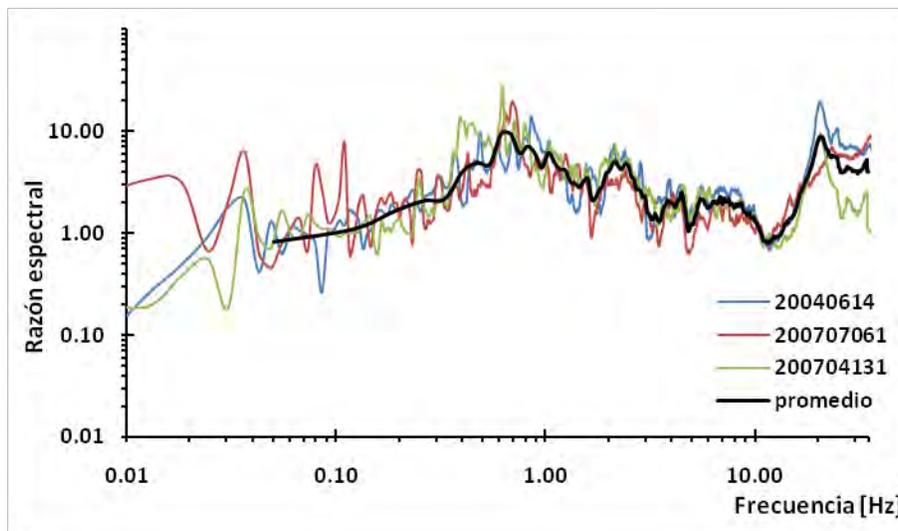


Figura III.18 Función de transferencia transversal

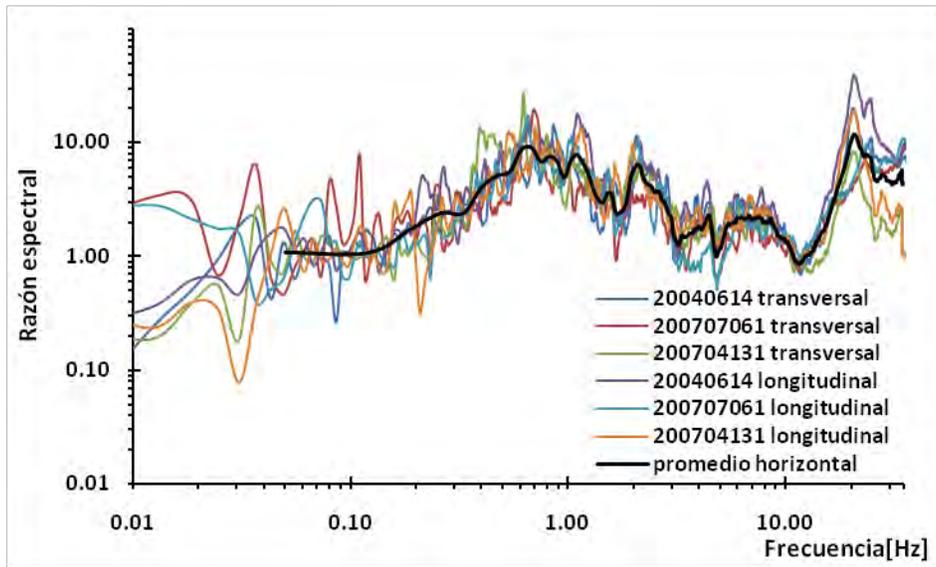


Figura III.19 Función de transferencia horizontal

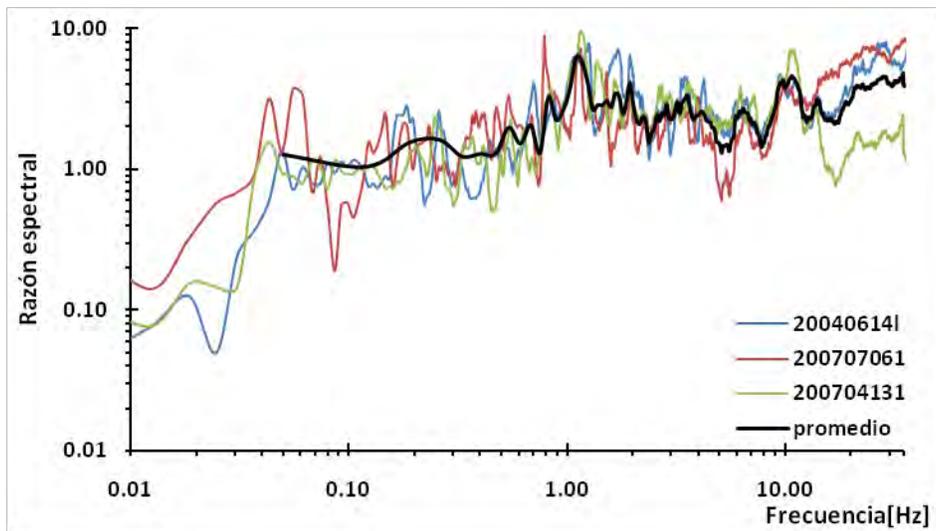


Figura III.20 Función de transferencia vertical

Los espectros de respuesta se encuentran agrupados por componente de tal forma que el espectro correspondiente a la otra estación sirva de referencia, en la figura III.21 se presentan los espectros originados el día 14 de junio de 2004, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se distinguen dos máximos con valores de pseudo-aceleración de aproximadamente 11 y 6 cm/s^2 ubicados en periodos cercanos a 0.8 y 1.8 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol se tiene un valor máximo de aproximadamente 2 cm/s^2 para un periodo de 0.3 segundos. En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observan tres valores de pseudo-aceleración máximos, los primeros dos localizados en 9 cm/s^2 y el tercero en 11 cm/s^2 aproximadamente, asociados a periodos de 0.5, 1 y 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol no se observa claramente un valor máximo de aceleración, existen varios picos cercanos a 2 cm/s^2 . En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 5 cm/s^2 para un periodo de 0.3 segundos, en periodos un poco mayores se observan dos máximos cercanos a 4 cm/s^2 , en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración se tiene en 2 cm/s^2 para un periodo de 0.2 segundos.

En la figura III.23 se presentan los espectros originados el día 6 de julio de 2007, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se tienen dos valores máximos de pseudo-aceleración de aproximadamente 8 y 6 cm/s^2 ubicados en periodos cercanos a 1 y 1.5 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol se tiene un valor máximo de aceleración cercano a 2 cm/s^2 para un periodo de 0.2 segundos. En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observa un solo valor de aceleración máxima ubicada alrededor de 6 cm/s^2 asociada a un periodo de 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol se observa un valor máximo de aceleración cercano a 1.5 cm/s^2 localizado en un periodo de 0.5 segundos. En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 3 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos, en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración se tiene en 3 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos.

En la figura III.24 se presentan los espectros originados el día 13 de abril de 2007, en la componente longitudinal de la estación Paseo Bravo se tienen tres valores máximos de pseudo-aceleración de aproximadamente 15 cm/s^2 comprendidos en periodos que van de

0.8 a 1.5 segundos respectivamente, en la estación Lomas del Mármol no se encuentra un valor máximo de aceleración siendo el valor recurrente cercano a 2 cm/s^2 . En la componente transversal de la estación Paseo Bravo se observa un solo valor de aceleración máxima ubicada alrededor de 12 cm/s^2 asociada a un periodo de 1.5 segundos, para la estación Lomas del Mármol se observan dos valores máximos de aceleración cercanos a 1.5 cm/s^2 localizados en periodos de 0.5 y 1 segundo respectivamente. En la componente vertical de la estación Paseo Bravo el mayor valor de aceleración es de aproximadamente 9 cm/s^2 para un periodo de 0.9 segundos, en la estación Lomas del Mármol el mayor valor de aceleración es muy pequeño, menor a 1 cm/s^2 para un periodo de 0.8 segundos.

Por último en la figura III.24 se presentan los espectros de respuesta obtenidos del sismo ocurrido el día 15 de junio de 1999, dichos espectros son de un orden de magnitud completamente diferente a los anteriores, ocasionando que los otros gráficos casi no se distinguen, esto proporciona un parámetro de comparación con los espectros utilizados en este trabajo.

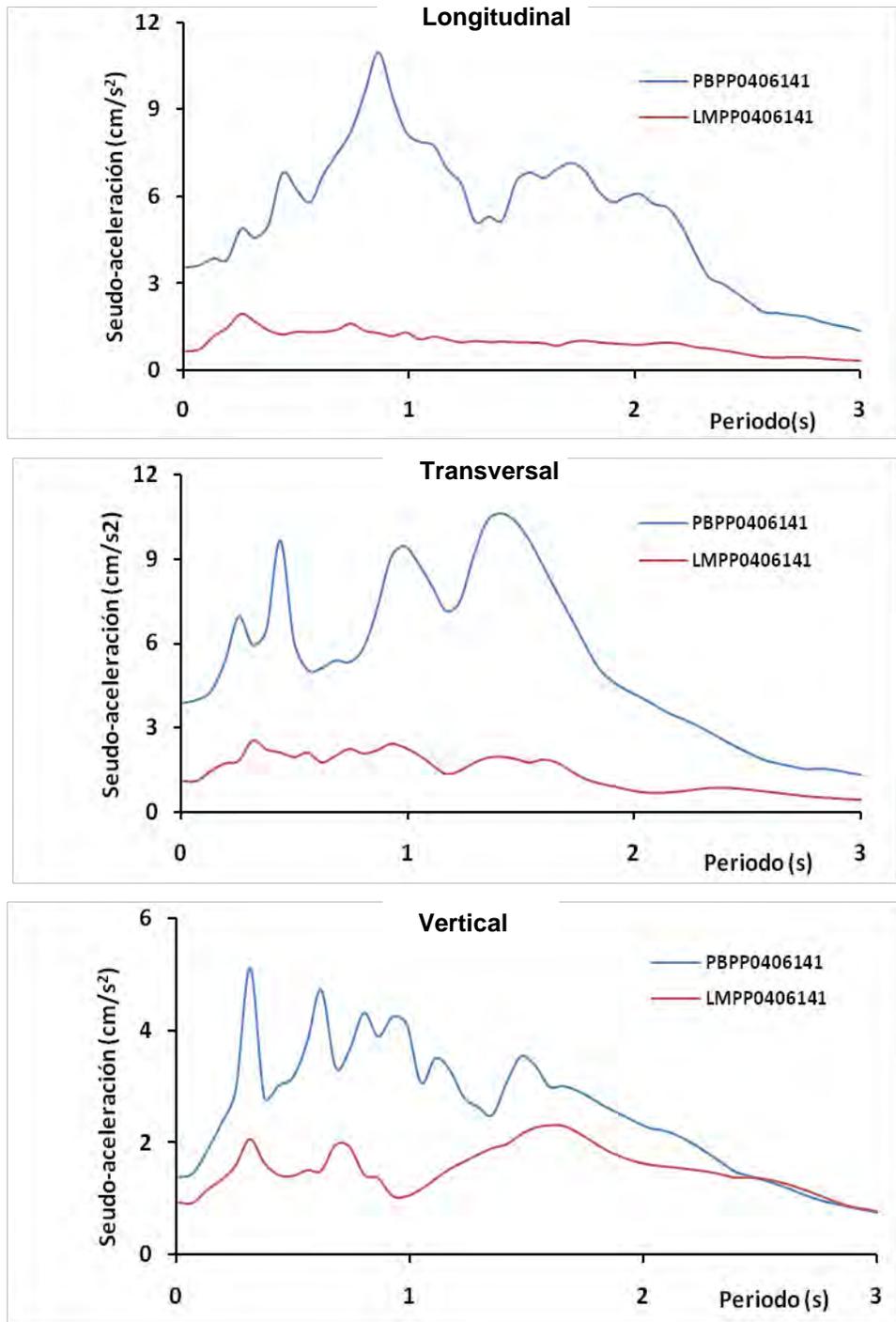


Figura III.21 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 14 de junio de 2004 (M=5.8)

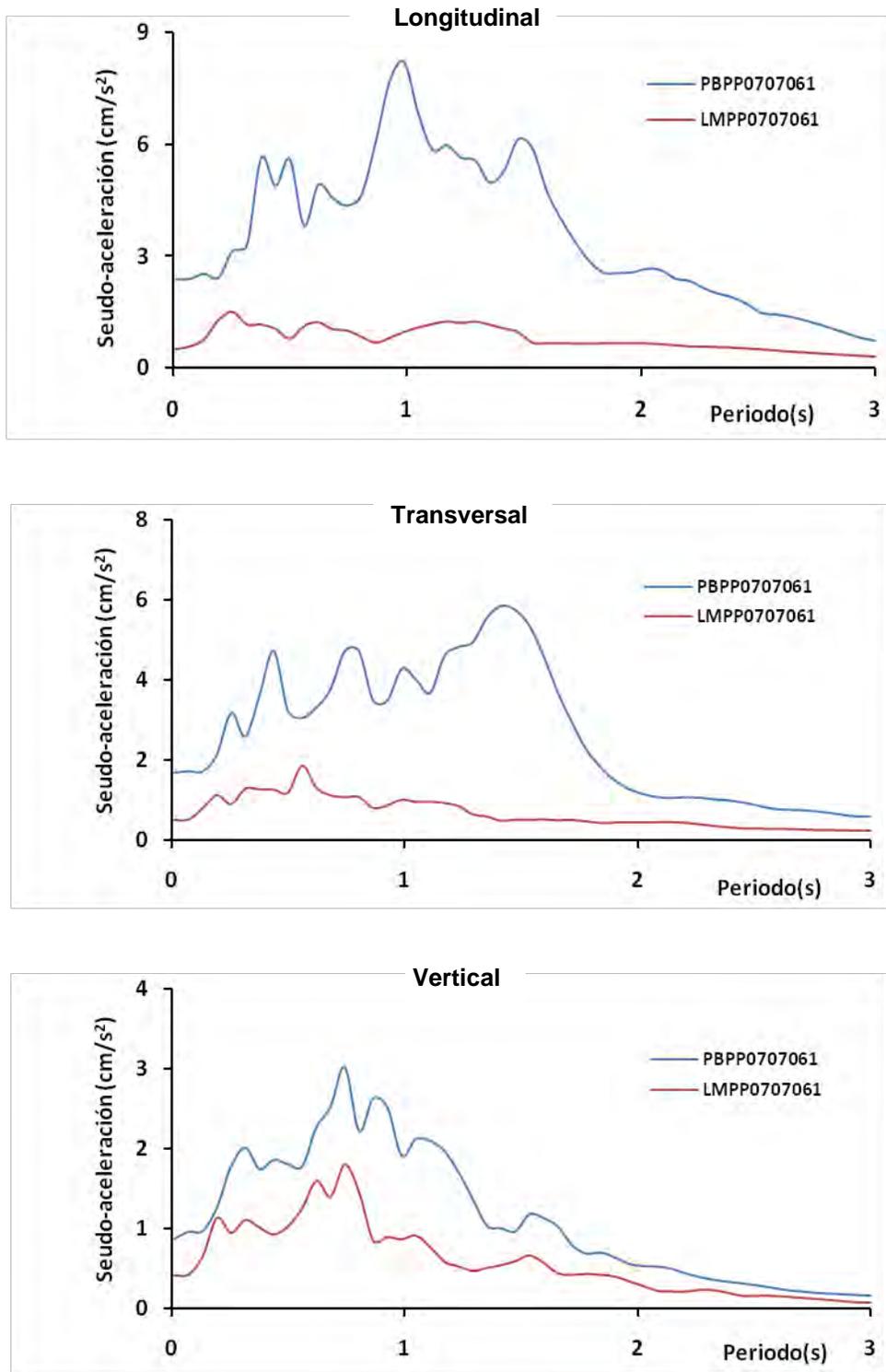


Figura III.22 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 6 de julio de 2007 (M=5.3)

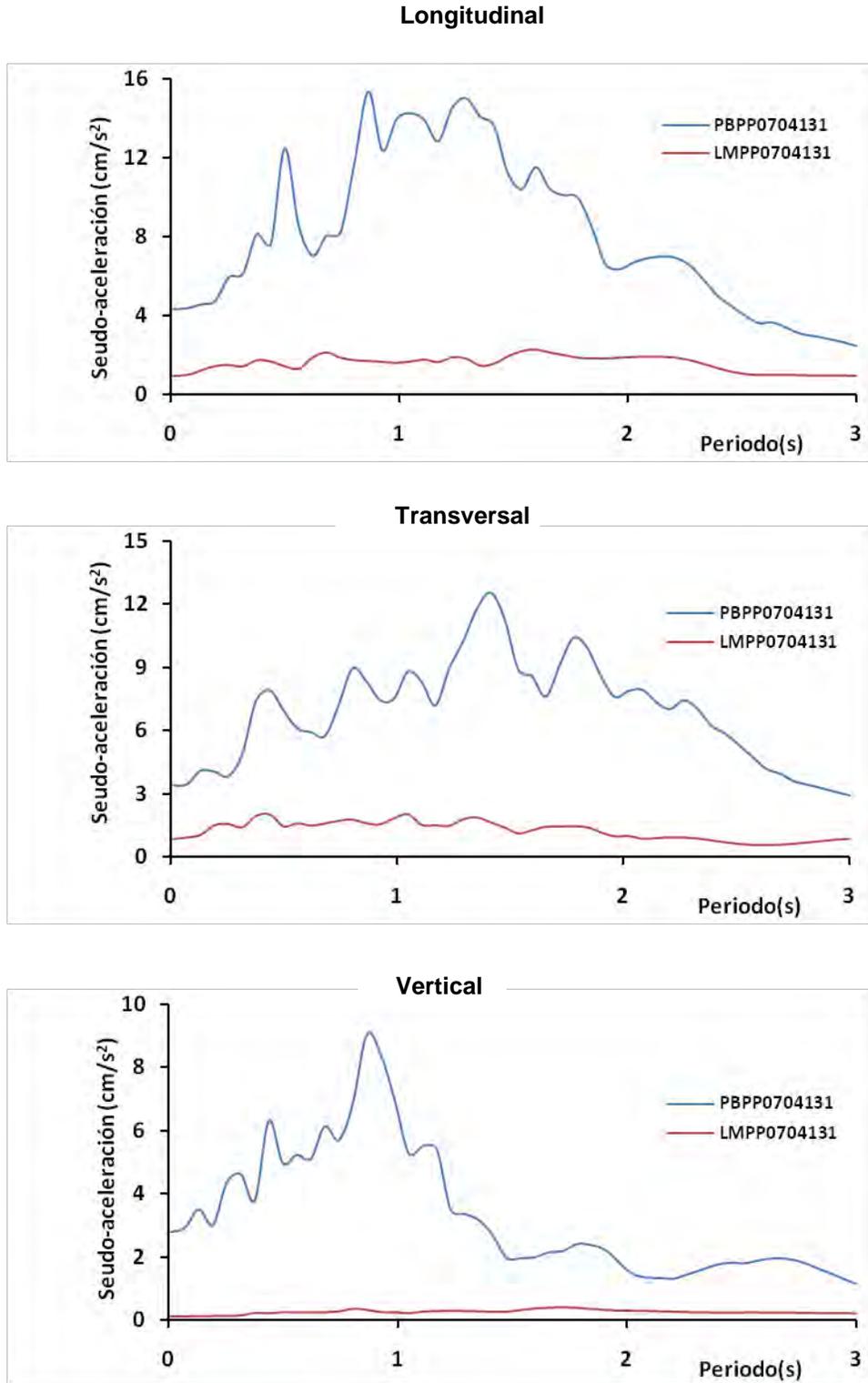


Figura III.23 Comparación de espectros de respuesta para el sismo del 13 de abril de 2007 (M=6.3)

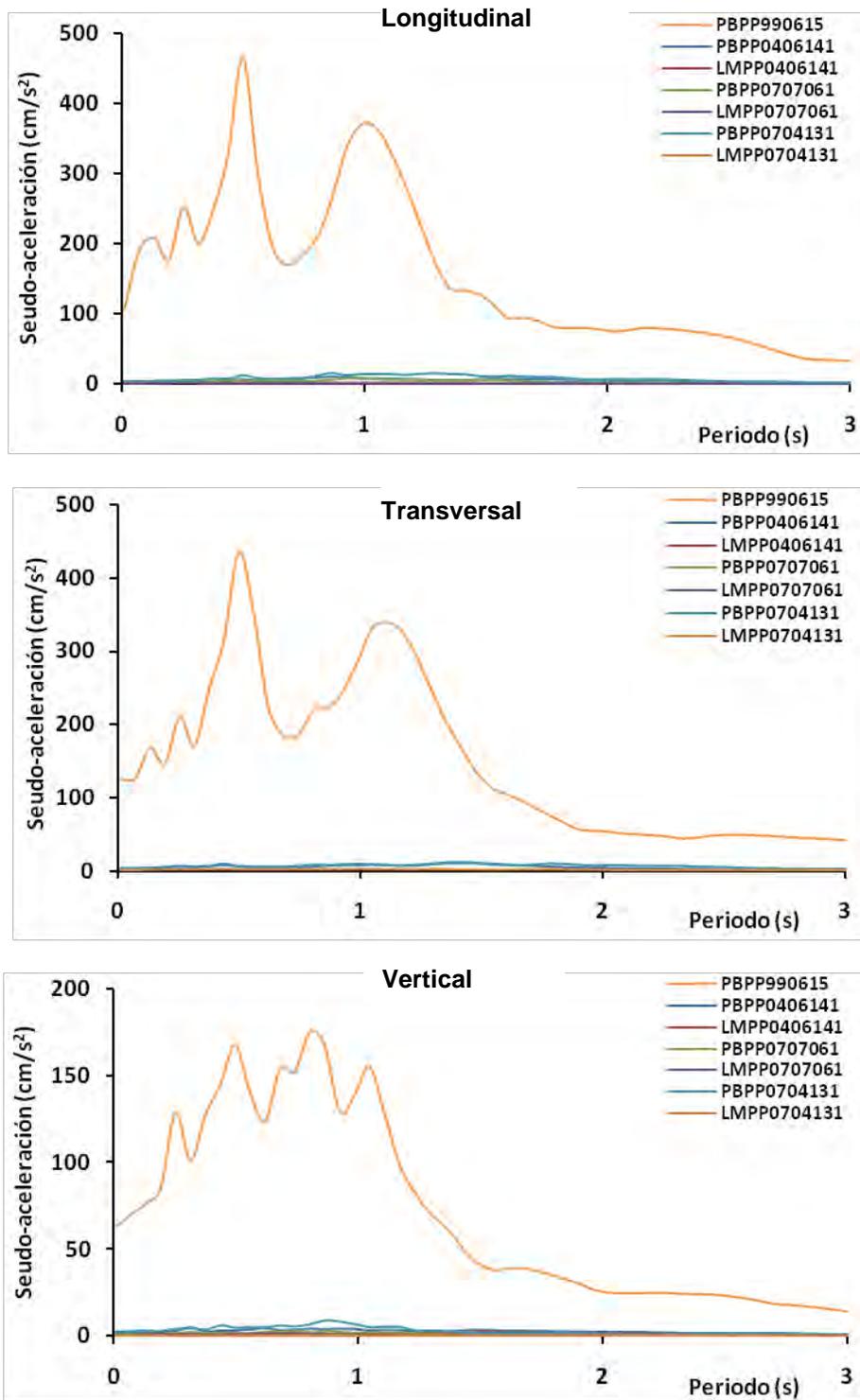


Figura III.24 Comparación entre espectros de respuesta para el sismo del 15 de junio de 1999 (M=7)

CONCLUSIONES

IV. CONCLUSIONES

- El estado de Puebla es altamente vulnerable a ser afectado por eventos sísmicos debido a su localización geográfica, ya que se encuentra en una zona donde existen actividades tectónicas y volcánicas considerables; el arreglo geológico en el estado es muy variado, además de que existen diversas fallas en la región.

Los estudios geotécnicos son escasos comparados con la extensión del territorio poblano, por lo que es importante conocer las características del subsuelo en más regiones para conocer los sitios que estarían expuestos a mayor peligro en caso de un sismo.

Siendo el estado de Puebla uno de los más poblados del país, y que la infraestructura de las ciudades se encuentra en constante crecimiento es relevante el estudio de la sismicidad en la zona, además existe una riqueza cultural y artística en las localidades dada principalmente por edificios e iglesias históricas que son parte esencial de la ciudad y que resulta relevante proteger y conservar.

- Es indispensable la correcta operación y mantenimiento de los equipos en la red acelerográfica de la ciudad de Puebla, debido a que en cualquier momento puede presentarse un sismo de gran magnitud. Entre más registros existan y de mejor calidad será posible hacer nuevos estudios y conocer mejor el comportamiento sísmico en diferentes zonas, es por esto que resulta importante, hasta donde sea posible aumentar el número de aparatos en la red.
- Debido a la complejidad geológica y geotécnica presente en el estado de Puebla, los efectos de sitio están presentes en muchos lugares, en el caso de la estación Paseo Bravo con respecto a Lomas del Mármol se tiene una amplificación de las ondas sísmicas que en algunas ocasiones llega a 10 veces lo cual es evidencia que las características del subsuelo son relevantes en el comportamiento sísmico, los espectros de respuesta analizados también son prueba de que aún tratándose del mismo sismo los gráficos son muy diferentes.

- El estudio de los efectos de sitio es de utilidad ya que puede ayudar a mitigar los daños producidos por un evento de gran magnitud, estableciendo que lugares son más vulnerables en el caso de presentarse un fenómeno de ese tipo, mientras más características se conozcan sobre el suelo en la región y su comportamiento ante eventos sísmicos mayor certidumbre y seguridad existirá en el estado.

REFERENCIAS

Referencias.

1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2005), "Anuario Estadístico, Puebla", México
2. Instituto de Geología, (1989), "Revista Instituto de Geología volúmenes 8-9", UNAM, México.
3. Tolson G, (1998), "La teoría de la tectónica de placas y la deriva continental", Instituto de Geología, UNAM, México.
4. Aguilar A, (2004), "Geografía general", ed *Pearson education*, México
5. Cenapred, (2009), "Atlas nacional de riesgos", México
6. Alcántara L, González G *et. al* (1999). "El Temblor de Tehuacán Puebla del 15 de junio de 1999 (M=6.7), registrado por la Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Puebla (RACP)". Reporte RACP-II/BUAP-04, México
7. Cenapred, (2008), "Documentos públicos, Iglesias en Puebla", México
8. *Ídem.*
9. Colegio de ingenieros civiles del Estado de Puebla (2008), "Sistema digital de daños del sismo de Tehuacán Puebla, 15 de junio de 1999", México
10. Dante J y Morán Z, (1990), "Geología de la República Mexicana", Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México
11. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2009), "Información Geográfica, Puebla", México
12. Instituto Nacional de Antropología e Historia, (1989), "Geología de la Cuenca Oriental: estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala", México
13. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2009), *op. Cit.*

14. Tribam SA de CV, (2007) , “Estudio geofísico de resistividad en el área donde se encuentra la estación acelerográfica Paseo Nicolás Bravo, en la zona centro de la Ciudad de Puebla”, México
15. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación General de Minería, (1995), “Monografía geológica-minera del estado de Puebla”, México
16. Auvinet G (1976), “Estudio preliminar del subsuelo de la Ciudad de Puebla, Pue.”, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
17. Ovando E, Romo M, Alcántara L, Sámano A, Carmona G., González G, Gutiérrez C, Flores R, Posada A, Sandoval H, (2000), “Propiedades y Respuesta Dinámicas del Subsuelo en algunos Sitios de la Ciudad de Puebla”, XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca.
18. Beles A, Ifrim M y García A, (1975), “Elementos de ingeniería sísmica”, Omega, España.
19. Espíndola J M, (1994), “Terremotos y ondas sísmicas”, Instituto de Geofísica, UNAM, México
20. Servicio Sismológico Nacional, (2003), México.
21. Iglesias J, (1994), “Zonificación sísmica de algunas ciudades mexicanas”, Universidad Autónoma Metropolitana, México
22. Alcántara L, González G J, Almora D, Posada A E, Macías M A, Jiménez J, Torres M, Pérez A, Vázquez R, Ayala M, Lima I A y Félix S G, (2002), “La Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla”, Informe de actividades 2001, RACP-II/BUAP-07, Instituto de Ingeniería UNAM y Facultad de Ingeniería BUAP, México
23. Alcántara L, González G J, Almora D, Posada A E, Macías M A, Ruiz A L, Vázquez R, Jiménez J, Torres M, Ayala M, García F, López J M, Morales G, Flores M y Vázquez E, (2008), “La Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla”, Informe de actividades 2004-2007, RACP-II/BUAP-08, Instituto de Ingeniería UNAM y Facultad de Ingeniería BUAP, México.
24. Alcántara L, Quaas R, Pérez C, Javier C, Flores A, Mena E, Espinosa J M, López B, Cuellar A, Camarillo L, González F, Guevara E, Ramírez M, Vidal A, Ayala M, Ramos S y Macías M A, (2001), “La Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Un sistema en CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999”, 2º congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España.

-
25. Alcántara L, Quaas R, Pérez C, Ayala M, Macías M A, Sandoval H (II-UNAM); Javier C, Mena E, Andrade E, González F, Rodríguez E (CFE); Vidal A, Munguía O, Luna M (CICESE); Espinosa J M, Cuellar A, Camarillo L, Ramos S, Sánchez M (CIRES); Quaas R, Guevara E, Flores J A, López B, Ruiz R (CENAPRED); Guevara O, Pacheco J F (SSN); Ramírez M, Aguilar J, Juárez J, Vera R, Gama A, Cruz R, Hurtado F, Martín del Campo R, Vera F (RIIS); Alcántara L (SMIS), (2000), "Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes" CD-ROM vol. 2, SMIS, México.
 26. Kramer S, (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", *Prentice Hall*, EUA.
 27. Sánchez F. *et al.*, "Efectos de sitio en la Ciudad de México a 10 años de los sismos de 1985", México
 28. Kramer S, *op. cit.*
 29. Alcántara L, Quaas R, Pérez C, Ayala M, Macías M A, Sandoval H (II-UNAM); Javier C, Mena E, Andrade E, González F, Rodríguez E (CFE); Vidal A, Munguía O, Luna M (CICESE); Espinosa J M, Cuellar A, Camarillo L, Ramos S, Sánchez M (CIRES); Quaas R, Guevara E, Flores J A, López B, Ruiz R (CENAPRED); Guevara O, Pacheco J F (SSN); Ramírez M, Aguilar J, Juárez J, Vera R, Gama A, Cruz R, Hurtado F, Martín del Campo R, Vera F (RIIS); Alcántara L (SMIS), *op cit.*
 30. Benson H T, (2002), "Principles of vibration" *Oxford University Press*, EUA.
 31. Brigham E O, (1998), "The Fast Fourier Transform and its Applications", *Prentice Hall*, EUA.
 32. Ordaz M, Castellanos F y Zapata A, (2000), "DEGTRA A4 versión 5.2". Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
 33. Hart G y Wong K, (2000), "Structural Dynamics for structural Engineers", *John Wiley and Sons*, EUA.
 34. Thimoshenko S, (1974), "Vibration Problems in engineering", *John Wiley and Sons*, EUA
 35. Chopra A K, (2001), "Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", *Prentice Hall*, EUA.
 36. *Ídem.*