



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA
EN SUELOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA UTILIZANDO
LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

VÍCTOR HUGO MEDRANO RIVERA

TUTOR:

M.I. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO

2009





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**ESTIMACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA EN SUELOS DE LA CIUDAD DE PUEBLA
UTILIZANDO LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS**

INTRODUCCIÓN	1
I. RED DE ACELERÓGRAFOS EN LA CIUDAD DE PUEBLA	7
I.1 Características del subsuelo de la Ciudad de Puebla	11
II.2 Distribución de estaciones	20
III.3 Equipo de monitoreo sísmico y registros obtenidos	30
II. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS	37
II.1 Selección de la información	38
II.2 Cálculo de las funciones de transferencia	41
III. ESPECTROS DE RESPUESTA	51
III.1 Cálculo mediante la ecuación diferencial de movimiento	52
III.2 Cálculo utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias	60
III.3 Análisis de resultados	69
IV. CONCLUSIONES	72
REFERENCIAS	75

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Reseña Histórica. La región donde se ubica el Estado de Puebla era conocida por los antiguos pobladores de México como *Cuetlaxcoapan*, que significa "donde las serpientes cambian de piel".

Desde la época prehispánica el destino de Puebla ha estado cercanamente atado a los imperios que controlaban la meseta central de nuestro país. La región de Puebla es una de las primeras áreas ocupadas en el México antiguo, pues cada civilización precolombina importante tenía algún contacto con la zona, debido principalmente a las importantes rutas de comercio de la región.

La fundación de la ciudad se debe al oidor Juan de Salmerón, al obispo Fray Julián Garcés y Fray Toribio Paredes de Benavente. Con previa autorización de la Reina Isabel de Portugal, esposa de Carlos V de España, el 16 de abril de 1531 se procedió a trazar la nueva localidad que recibió el nombre de *La Puebla de los Ángeles*, sin embargo, después de la muerte de don Ignacio Zaragoza, acaecida el 8 de septiembre de 1862, se le llamó *Puebla de Zaragoza* y la denominación legal y justa que ahora ostenta: *Heroica Puebla de Zaragoza*, data del 4 de agosto de 1950 (ref. 1).

Durante la época colonial, la Ciudad de Puebla llegó a ser la segunda ciudad en importancia de la Nueva España, gracias a su ubicación estratégica entre la Ciudad de México y el puerto de Veracruz.

Puebla es una ciudad antigua con más de 450 años de existencia; actualmente la ciudad no se limita al centro histórico, sino que se ha extendido hacia todos los puntos cardinales, creándose nuevas colonias, parques, amplias avenidas y grandes centros comerciales que, conjuntamente con su crecimiento industrial, la han convertido en una de las ciudades más grandes e importantes del país (ref. 2).

Localización. El estado de Puebla se ubica en la región central de México, al sureste del altiplano y al oriente de la capital del país; está limitado al norte y este con Veracruz, al sur con Oaxaca y Guerrero y al oeste con Morelos, estado de México, Tlaxcala e Hidalgo (figura1).

La mayor parte de su territorio se encuentra localizado en el Eje Neovolcánico Transversal, entre la Sierra Nevada y al oeste de la Sierra Madre Oriental (ref. 3).



Figura 1. Localización del Estado de Puebla

Sismicidad. Debido a su ubicación geográfica, ciertas regiones del territorio poblano se encuentran en franjas de alta sismicidad debido a la actividad tectónica de las placas de Cocos y Norteamericana. Como establece la teoría de la tectónica de placas (ref. 4), la superficie de la Tierra se encuentra formada por una especie de cascarón llamado *Litosfera*, el cual se encuentra formado por diversas placas que están en constante movimiento sobre el manto terrestre. A los límites de estas placas se les denomina *fallas*, sin embargo, es posible la existencia fallas locales dentro de la propia estructura de la placa, esto es, no necesariamente en la frontera entre una y otra.

El lento e incontenible movimiento de las placas tectónicas en distintas direcciones, produce enormes rozamientos y tensiones que se localizan en las zonas de contacto y que se liberan en forma de vibraciones llamadas sismos. Debido a esto, la presencia de estas fallas puede traducirse en una alta actividad sísmica en las regiones cercanas a ellas. La figura 2 muestra las principales fallas que atraviesan el territorio del estado y que son en gran medida responsables del latente peligro sísmico existente.

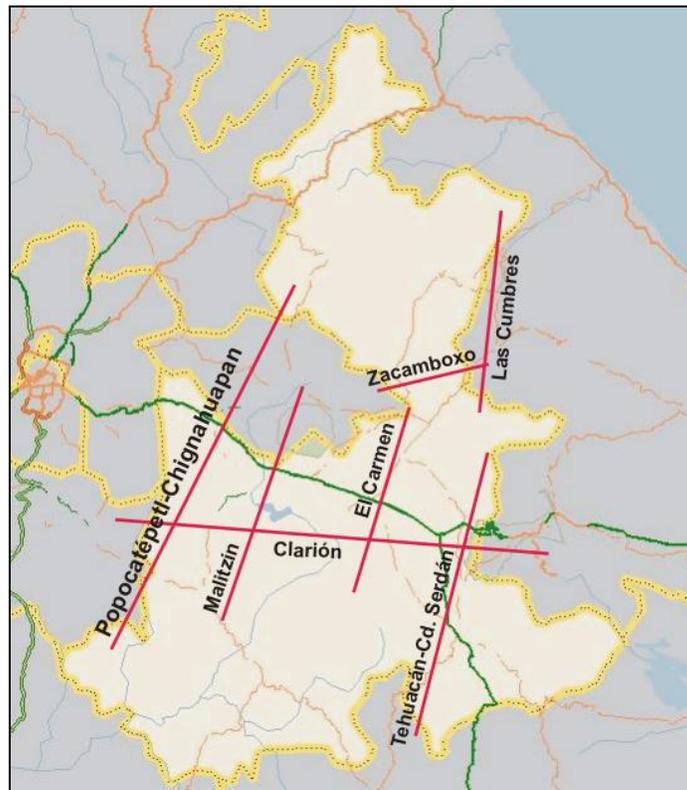


Figura 2. Fallas en el estado de Puebla

El Estado de Puebla por su ubicación y a través de su historia ha mostrado su vulnerabilidad ante la ocurrencia de sismos fuertes, tales como el ocurrido en Orizaba el 28 de agosto de 1973 de magnitud 7.0, el de Huajuapán de León de magnitud 6.5 ocurrido el 24 de octubre de 1980 y el de Tehuacán ocurrido el 15 de junio de 1999 de magnitud 7.0; los cuales, ocasionaron daños estructurales importantes en edificios habitacionales, históricos y obra civil. Además es esencial señalar que estos eventos dejaron heridos y causaron la muerte de un gran número de habitantes en los estados de Puebla y Veracruz.

El conocimiento de la actividad sísmica, la evaluación del peligro, así como del riesgo que se genera cuando ocurren temblores fuertes, constituyen una fuente de información fundamental para la prevención de desastres; de igual manera, esta actividad genera líneas de investigación que pueden contribuir a la elaboración de planes de contingencia para desalojar zonas que se ubican en las partes de mayor riesgo sísmico en el Estado. La obtención de datos reales por una red sismológica contribuye al estudio de la fuente sísmica, esto permite conocer las regiones más susceptibles a sufrir desastres, evitando así, graves consecuencias sociales y económicas (ref. 5).

Objetivo.

Estimar espectros de respuesta de eventos sísmicos no registrados por la estación Paseo Nicolás Bravo a partir de registros obtenidos en la estación Sismex Puebla de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias.

Contenido.

El primer capítulo describe la geología del estado de Puebla, así como la configuración estatigráfica de su capital y las diversas unidades geológicas que la componen. De igual manera, se presenta una semblanza de la red acelerográfica instalada para monitorear la actividad sísmica en la región, la ubicación de las estaciones que la componen, los equipos de registro utilizados así como sus principales características y el historial de registros acelerográficos que se han obtenido.

Los registros acelerográficos son de gran utilidad en diversos campos de la ingeniería sísmica, por ejemplo, pueden ser empleados para conocer los efectos que producen los movimientos sísmicos en sitios diversos, y es por ello, que en el capítulo II se presenta la utilidad de las funciones de transferencia para estimar los llamados efectos de sitio.

Posteriormente, en el tercer capítulo se proporciona la información elemental para el cálculo de espectros de respuesta, que junto con la teoría de vibraciones aleatorias constituyen una de las herramientas de análisis para estimar los efectos de sismos en regiones donde no se ha contado con una instrumentación, además se utiliza esta teoría para estimar los espectros de respuesta en un sitio específico de la Ciudad de Puebla, el jardín público conocido como Paseo Bravo en el centro histórico de la ciudad. De igual manera, se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente se incluyen las conclusiones así como algunas recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I
RED DE ACELERÓGRAFOS
EN LA
CIUDAD DE PUEBLA

I. RED DE ACELERÓGRAFOS EN LA CIUDAD DE PUEBLA

A finales del siglo XIX y a principios del XX, se establecieron estaciones sísmicas con el objetivo de registrar la actividad sísmica en el mundo. En México, la instrumentación para el registro de sismos se remonta a la última década del siglo XIX; posteriormente en 1910 se establece el Servicio Sismológico Nacional (SSN).

Los sismos ocurridos en nuestro país a partir de 1957 hicieron evidente la falta de instrumentos para registrar eventos de gran magnitud. Seguido de lo anterior, la instrumentación sísmica se incrementó debido al impacto que este tipo de eventos causó en la sociedad.

Para hacer posible el registro del movimiento del terreno, es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio, sin embargo, si se quisiera referirlo a un punto anclado al suelo, sería imposible obtener un registro puesto que el punto se movería junto con el suelo mismo. Para resolver este problema se recurre al principio de inercia, el cual establece que todos los cuerpos tienen una resistencia a cambiar su estado de reposo o de movimiento. De esta manera, se hace posible medir el movimiento del suelo con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo algunos instantes (ref. 6).

Basados en este principio, los sismógrafos son aparatos que registran la velocidad del movimiento del suelo causado por el paso de una onda sísmica, fueron ideados a finales del siglo antepasado, y actualmente han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico.

El arreglo usualmente usado en estos aparatos, consiste en una masa suspendida de un resorte conectado a un soporte anclado al suelo. El mecanismo se sacude bajo la influencia de las ondas sísmicas, sin embargo, la masa permanece en reposo por un instante gracias a su inercia, aunque posteriormente tiende a oscilar (figura I.1).

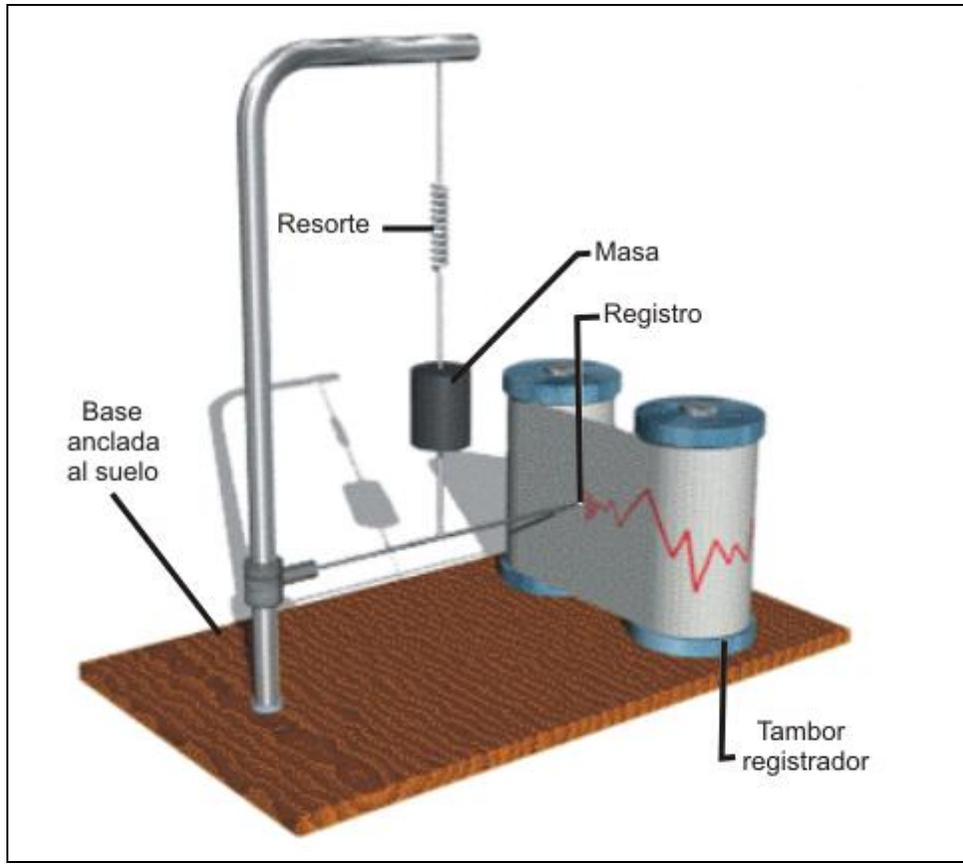


Figura I.1. Elementos básicos de un sismógrafo

Es necesario indicar que la oscilación producida, no refleja el verdadero movimiento del suelo, por lo que se hace necesario amortiguarla. En la actualidad, es común el empleo de bobinas o imanes que ejercen fuerzas para lograr el amortiguamiento necesario. Los sismógrafos más avanzados son los denominados de banda ancha, los cuales hacen posible obtener un registro digital de los movimientos, y son capaces de captar cualquier movimiento que ocurra.

Además de los sismógrafos existe otro tipo de instrumentos para el registro de eventos sísmicos, tales aparatos son los denominados acelerógrafos (figura I.2). Su principio de operación es muy similar al utilizado por los sismógrafos, sin embargo, su diseño es tal, que son más sensibles a los cambios de aceleración del terreno más que a su desplazamiento o velocidad. Son capaces de registrar los movimientos más intensos debido a que poseen una menor amplificación, y aunque operan las 24 horas del día, únicamente almacenan la información registrada hasta que se ha alcanzado el umbral

de disparo calibrado previamente en el equipo, lo cual sucede cuando el movimiento ha alcanzado cierta amplitud.

Desde el punto de vista de la ingeniería, los registros obtenidos por los acelerógrafos (acelerogramas) son de gran utilidad, ya que a partir de ellos es posible obtener información muy valiosa acerca del comportamiento sísmico del terreno en el que se generó el registro.



Figura 1.2. Acelerógrafos del Instituto de Ingeniería

I.1 Características del subsuelo de la ciudad de Puebla

El estado de Puebla, se ubica en una región de la más variada fisiografía, en la cual es posible apreciar la presencia de actividad orogénica significativa; muestra de ello la constituyen las grandes elevaciones, plegamientos, depresiones, fracturas, y demás accidentes geológicos que hacen evidente, además, la importante sismicidad de la región.

Situación geográfica. El estado de Puebla cuenta con un área total de 33 997 km², y se encuentra localizado entre los paralelos 17.866° y 20.866° norte y entre los meridianos 96.733° y 99.066° oeste de Greenwich (ref. 7). Se encuentra limitado al norte y al este por el estado de Veracruz, al sur por Guerrero y Oaxaca, y al oeste por los estados de México, Morelos, Tlaxcala e Hidalgo (figura I.3).

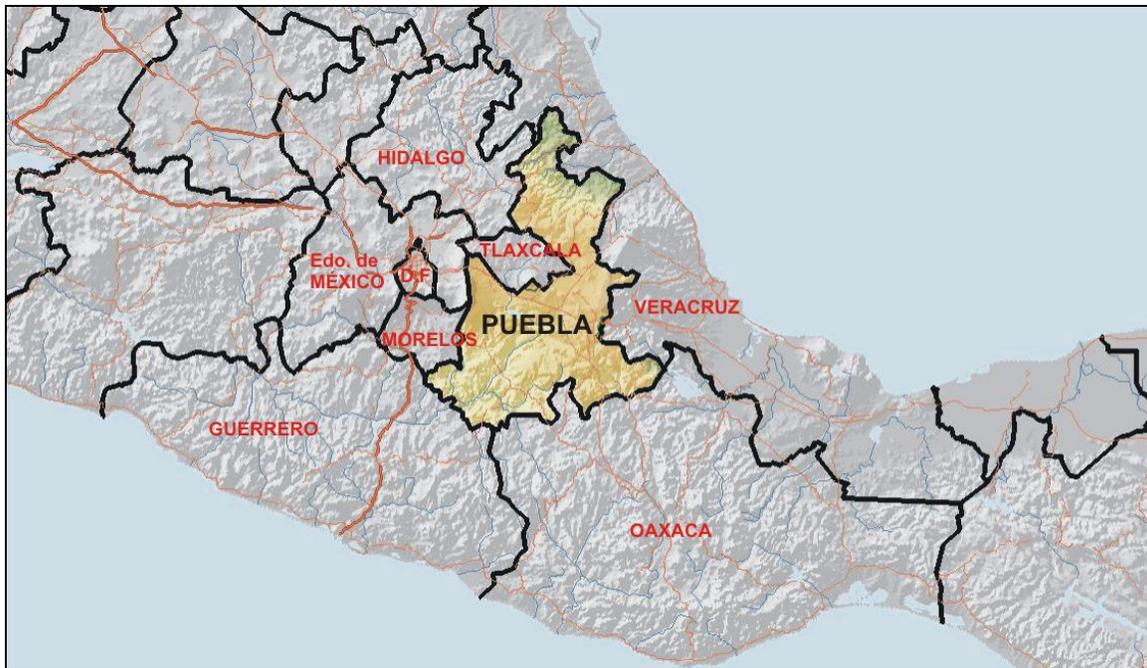


Figura I.3 Ubicación geográfica del Estado de Puebla

Las características orográficas del estado son diversas. Al noroeste se ubica la Sierra Norte de Puebla, derivada de prolongaciones de la Sierra Madre Oriental y la cordillera Neovolcánica, en la cual se levantan el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba que con sus 5,700 m de altura sobre el nivel del mar, constituye la elevación más alta de México; al sur del territorio se encuentran formaciones derivadas de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Occidental, entre las que se encuentran la Sierra de las Mixtecas, la Sierra de Tehuacán y la Sierra Negra; finalmente al oeste el territorio poblano se encuentra limitado por la Sierra Nevada en la cual destacan majestuosos los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl (figura I.4).

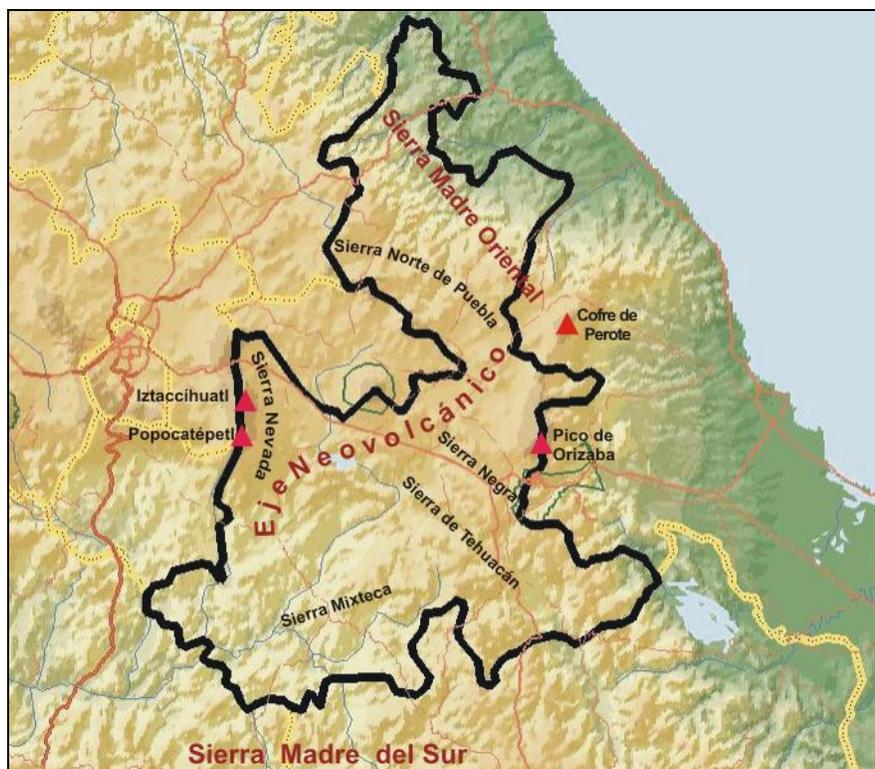


Figura I.4. Orografía de Puebla

La carta sísmica del Estado de Puebla (ref. 8) muestra que esta entidad se encuentra comprendida dentro de las siguientes tres regiones (figura I.5):

- La región sur del Estado se localiza dentro de la zona 1, donde los movimientos sísmicos son frecuentes.

- La región central se encuentra comprendida dentro de la zona 2 donde los movimientos son menos frecuentes.
- Finalmente, la región norte de la entidad, se encuentra dentro de la zona 3, en la cual los movimientos son raros.

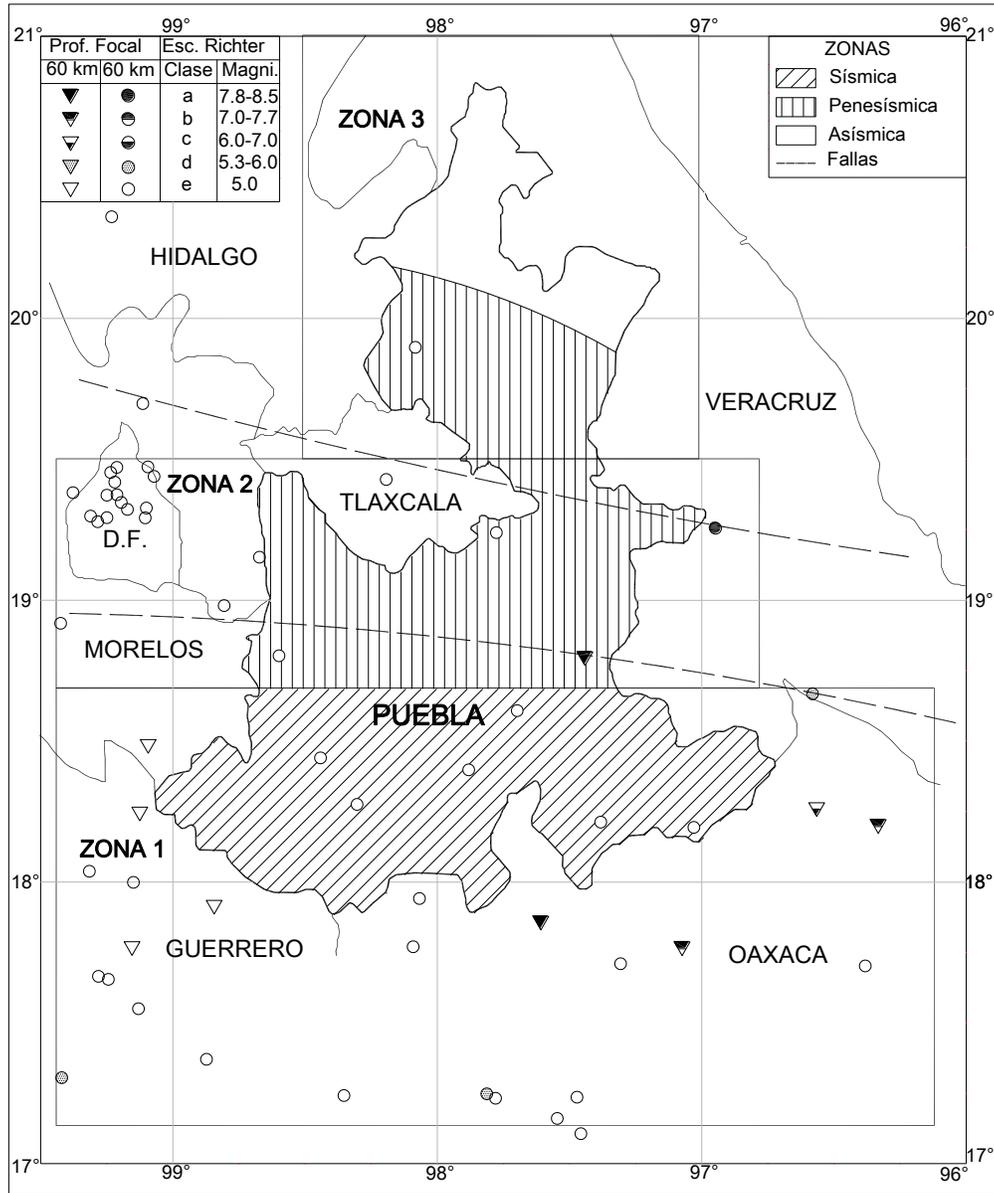


Figura I.5. Carta sísmica del Estado de Puebla

En la carta se aprecian los epicentros de sismos localizados dentro del Estado o cercanos a sus límites y que por su cercanía lo han afectado.

Geología histórica. La historia geológica de la región se remonta al cretáceo, período en el cual se estima que se llevó a cabo la sedimentación de materiales calcáreos que a fines del mismo período se vieron sometidos a movimientos orogénicos que provocaron su emersión. Posteriormente, en el período terciario y a principios del cuaternario se presentaron emisiones lávicas que culminaron con la formación de rocas basálticas y el depósito de tobas arenosas producto de las últimas manifestaciones volcánicas. Al depositarse, estas tobas cubrieron tanto las rocas basálticas como la zona que actualmente ocupa la ciudad, provocando su interstratificación con sedimentos fluvio-lacustres. Los últimos acontecimientos geológicos han consistido en la formación de travertinos depositados por aguas termales, que afloran a lo largo de una falla, y la sedimentación de depósitos aluviales a lo largo del río Atoyac y de sus afluentes.

Principales afloramientos en la zona. La geología de la ciudad de Puebla se encuentra constituida por rocas formadas en los períodos cretácico, terciario y cuaternario. Las rocas más antiguas son las calizas que afloran al oeste de la ciudad; las más recientes son los depósitos de relleno y los materiales volcánicos. La descripción de estos materiales se presenta a continuación (ref. 9).

- a) Calizas. Esta formación aflora en el límite occidental de la ciudad, la roca tiene una coloración gris oscura, se presenta en estratos de 20 a 30 cm de espesor y se encuentra muy fracturada. Estas calizas, se consideran conformadas en el Cretáceo. Es interesante notar que al norte de la zona de afloramientos de calizas existe un cerro aislado en el que aparece una roca de color gris claro en la que se observan pequeños cristales alargados de coloración oscura.
- b) Basaltos y tobas limosas. En los lomeríos que se encuentran al sur y al oeste de la ciudad y en las lomas de Loreto y del Cinco de Mayo, aparecen lavas basálticas recubiertas por tobas limo-arenosas y arenosas de color amarillento. Las lavas de color gris oscuro presentan algunos cristales grandes de color verde (posiblemente olivino) en una matriz afanítica.

- c) Escorias basálticas. Se encuentran en el cerro de la Paz, ubicado en la porción oriental de la ciudad, el cual es un cono volcánico formado por escorias basálticas de color rojizo.

- d) Depósitos volcánicos y fluviales. En diversas zonas de la ciudad de Puebla, se encuentran intercalaciones de tobas volcánicas depositadas en agua y de sedimentos fluviales. Las tobas tienen el mismo origen y las mismas características granulométricas que las que se observan sobre los basaltos, con la diferencia, en este caso, de que están interestratificadas con depósitos de origen fluvio-lacustre que van desde las arcillas hasta cantos rodados. Es importante hacer notar, que bajo una gran parte de la ciudad se encuentra una capa de arcilla plástica que en ocasiones aflora y en otras se localiza a una profundidad entre 3 y 4 m. La capa de arcilla no aparece en la porción nororiental de la ciudad donde los arroyos entran a la zona del valle y por lo tanto arrastran materiales más gruesos.

- e) Depósitos de travertino. En la ciudad existen tres principales afloramientos de aguas sulfurosas templadas; el primero se ubica en la zona conocida como Rancho Colorado, el segundo en la proximidad del cerro de la Paz y el último en Agua Azul. Estas aguas, cargadas de carbonato de calcio, originaron la sedimentación de travertino, el cual es un material calcáreo que se forma alrededor de manantiales y géiseres y que se origina por la precipitación de los materiales disueltos, principalmente carbonatos de calcio, que contiene el agua subterránea, lo cual puede ser causado por un incremento de temperatura, una disminución de la presión, por evaporación o por la acción combinada de estos factores. Los travertinos son duros, algo porosos, contienen un poco de arena y presentan una coloración amarillenta.

- f) Depósitos aluviales. En la porción suroriental cerca de la Ciudad Universitaria, existen importantes depósitos aluviales constituidos por arenas y arenas limosas. Depósitos semejantes existen a lo largo de todos los ríos, algunos de ellos entubados, que atraviesan la ciudad.

A manera de resumen, se presenta a continuación junto con la figura I.6, la localización de las principales unidades geológicas en la ciudad (ref. 10).

- Caliza (Ks). La unidad geológica más antigua localizada principalmente al sureste de la ciudad.

- Vulcanitas (Qiv, Qivc, Qvc, Qvd).
 - Al norte de la ciudad, en el cerro de El Conde, representado por los símbolos Qiv y Qivc, vulcanitas que van de andesitas a basaltos.
 - Al oriente se localiza el cerro de Amalucan y al oeste el cerro de San Juan, representados por el símbolo Qvc, los cuales son conos de composición básica e intermedia de andesitas y basaltos.
 - Al noreste se localiza un domo volcánico de composición básica e intermedia identificado a través del símbolo Qvd.

- Abanicos volcánicos (T). Constituidos por flujos piroclásticos de composición ácida, capas de pómez, depósitos fluviales y paleosuelos; estos materiales cubren la parte este, sur y noreste de la ciudad de Puebla.

- Depósitos de travertino (Qtr). Estos depósitos ocupan una gran extensión en la ciudad de Puebla, ya que afloran desde la parte central hasta la zona noreste.

- Depósitos de aluviales antiguos (Qial) y depósitos aluviales (Qal). Los primeros están constituidos por una alternancia de gravas, arenas y tobas de color café claro, con un bajo grado de consolidación; estos materiales ocupan una gran extensión y se encuentran al oeste de la ciudad; por su parte, los segundos corresponden a materiales semiconsolidados que varían desde arenas hasta limos y arcillas, incluyendo una pequeña porción de tobas y derrames basálticos; estos materiales se encuentran en la parte central, al noroeste y al este de la ciudad.

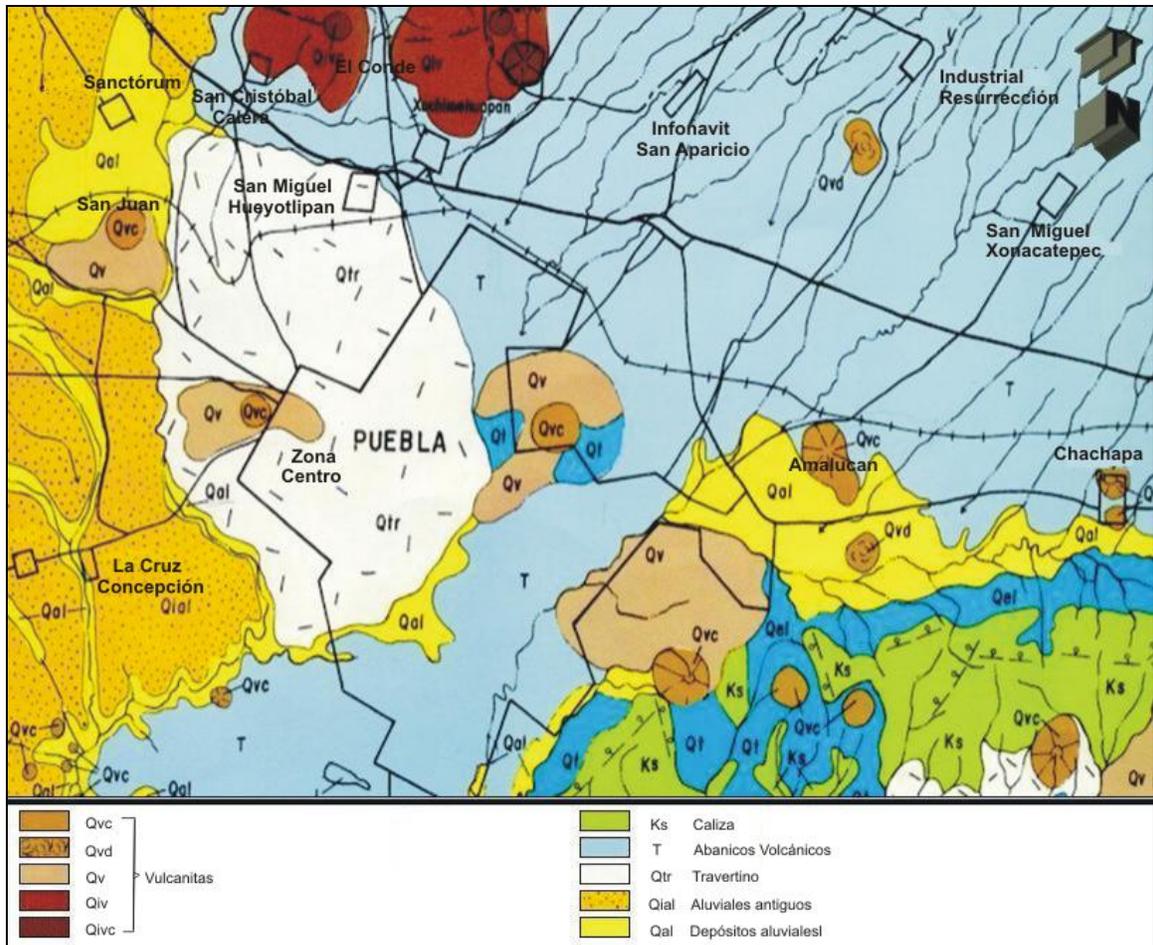


Figura I.6. Geología general de la Ciudad de Puebla

Zonificación preliminar. Como es posible apreciar, el subsuelo de la ciudad de Puebla presenta una gran variabilidad de un sitio a otro, por lo que se ha propuesto una zonificación simplificando al extremo la compleja configuración estratigráfica (figura I.7), la cual se presenta a continuación.

- Zona I, compresible. Es la más crítica desde el punto de vista del desplante de estructuras, se localiza al norte de la ciudad e incluye una extensa superficie localizada alrededor y sobre todo al norte de la avenida diagonal defensores de la República y en una parte de las zonas industriales norte y oriente. La presencia de depósitos orgánicos y eólicos sueltos hace que en esta zona la capacidad de carga sea baja y la compresibilidad alta.
- Zona II, de tobas. Es la más extensa, cubre áreas importantes al norte (Lomas de Loreto y del cinco de Mayo, parte extrema norte de la ciudad) y sobre todo al sur (Ciudad Universitaria, fraccionamientos Villa San Pablo, San Manuel, Mayorazgo, Bugambilias, etc.).
- Zona III, de depósitos termales. Esta zona coincide con el centro de la ciudad y se caracteriza por la presencia de estratos de travertino intercalados con materiales de compresibilidad media.

Superponiéndose a esta zonificación general, existen además áreas de características locales muy particulares siendo las principales las de depósitos aluviales a lo largo de los principales ríos que cruzan la ciudad, las de escorias y rocas basálticas y calcáreas y las de rellenos artificiales.

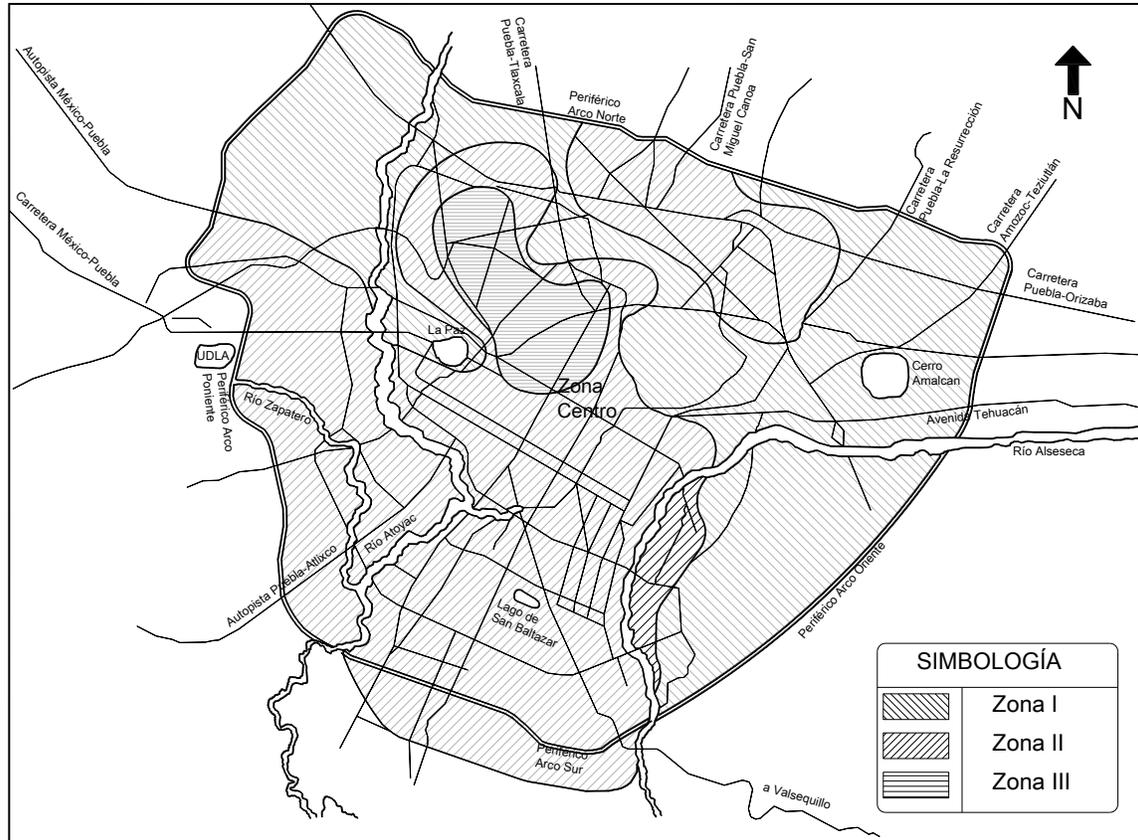


Figura I.7. Zonificación sísmica en la ciudad de Puebla (ref. 11).

I.2 Distribución de estaciones

La Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Puebla (RACP), es un proyecto conjunto entre el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) y la Facultad de Ingeniería Civil de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FI-BUAP), cuyo objetivo fundamental es la mitigación de los efectos sísmicos tanto en seres humanos como en estructuras.

La historia de la RACP se remonta a 1972, año en el cual fue instalada la estación SXPU como parte del sistema telemétrico SISMEX. Posteriormente a la ocurrencia de los sismos de 1985, se inició el ambicioso proyecto de instalar una red acelerográfica en la ciudad para poder contar con un mejor monitoreo de la actividad sísmica de la región.

De esta manera, a través de los años, el número de estaciones que integran la RACP aumentó poco a poco hasta que finalmente en el año 2001 quedó constituida por 11 estaciones de registro acelerográfico de tres componentes ortogonales (ref. 12), sin embargo en la actualidad la estación CAPP ha sido cancelada.

En la tabla 1 se incluye información relevante relacionada con la localización y equipos instalados en las estaciones que conforman la RACP, de igual manera, una visión general de la ubicación de las estaciones acelerográficas se presenta en la figura I.8.

Tabla 1. Estaciones de la RACP

NOMBRE	CLAVE	LOCALIZACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		TIPO DE SUELO	EQUIPO
			LAT N	LONG W		
Barranca Honda	BHPP	Antigua zona de minas, entre El Paraíso y San José la Cañada, zona noroeste	19.109	98.227	Roca basáltica	GSR-12/326
Central de Abasto (fuera de operación)	CAPP	Jardín central de la central de abastos, entronque autopista Puebla-Orizaba y carretera Tlaxcala-Santa Ana Chiautempac, zona norte	19.089	98.188	Ceniza volcánica	DCA 333/115
Lomas del Mármol	LMPP	Fraccionamiento Lomas del Mármol, zona sur	19.001	98.182	Roca	ETNA/1329
Paseo Nicolás Bravo	PBPP	Paseo Nicolás Bravo, entre 11 sur y 3 poniente, zona centro	19.046	98.208	Depósito de travertino	ETNA/1533
Parque Habana	PHPU	Parque Habana, entre 38 norte y Panamá, y 14 y 16 Oriente, zona oriente	19.04	98.167	Ceniza volcánica	ETNA/1532
La Paz	PZPU	Cerro de San Juan colonia La Paz junto a la casa de la junta de colonos, entre el monumento a la bandera e iglesia, zona oeste	19.055	98.227	Roca	DCA 333R/100
Río San Francisco	RFPP	Avenida San Francisco, zona centro	19.05	98.19	Estructura	GSR-12/328
San Alejandro	SAPP	San Alejandro Hospital del IMSS "San Alejandro", zona centro	19.06	98.21	Depósitos lacustres	IDS-3602/373
San Ramón	SRPU	Municipio de San Ramón Castillota, 3a sección, entre Anturios y Camelias; área deportiva, zona suroeste	18.965	98.26	Arcilla	DCA 333R/258
Sismex	SXPU	Estacionamiento posterior del edificio de oficinas de CFE calle 27 poniente, entre 15 y 17 sur, zona centro	19.04	98.215	Suelo	DCA 333R/207
Escuela de Ingeniería Civil	UAPP	Ciudad Universitaria, BUAP, Facultad de Ingeniería Civil, zona sur	19.002	98.202	Arcilla	DCA 333/375

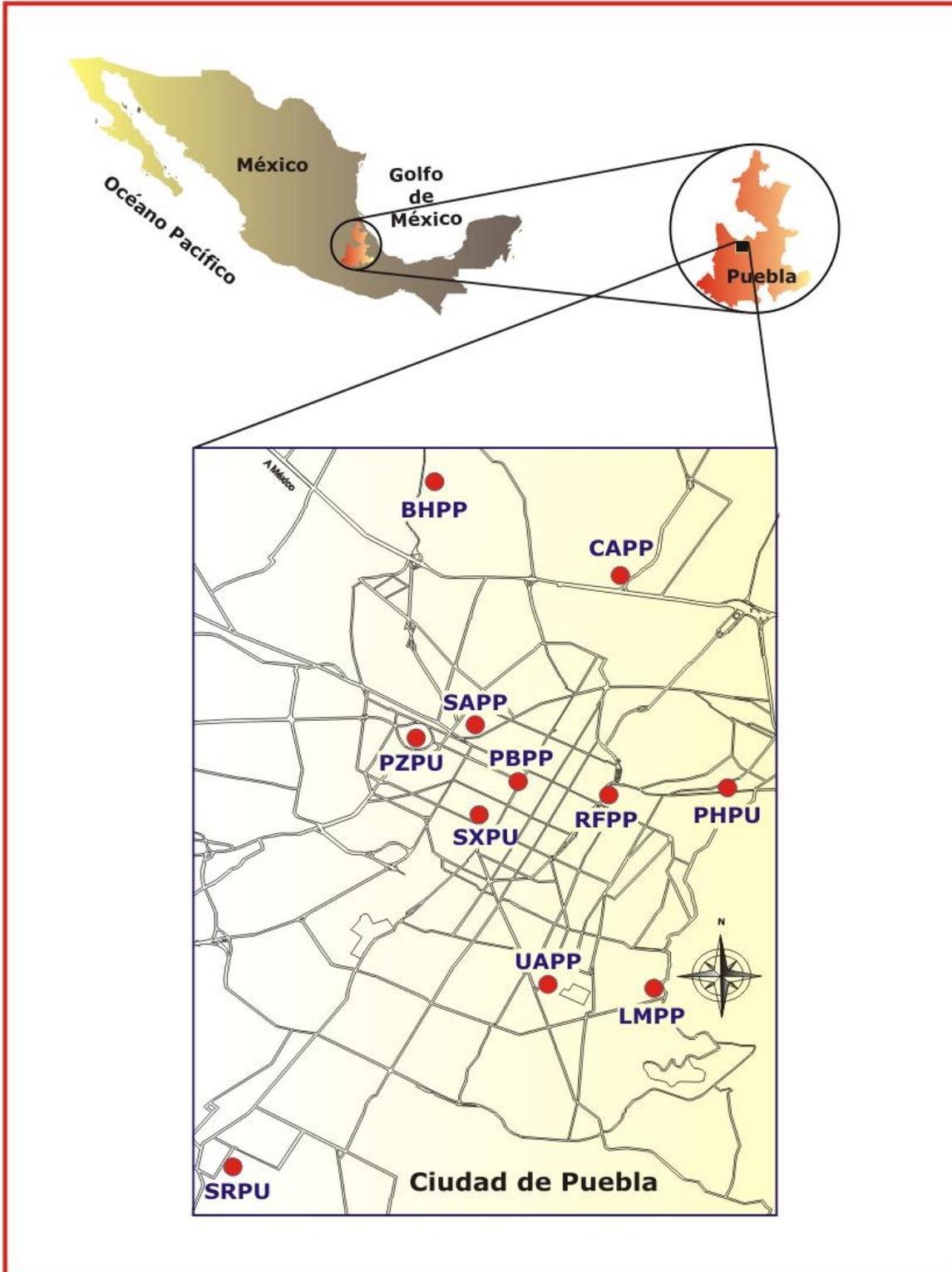


Figura I.8 Ubicación de las estaciones acelerográficas de la RACP

La distribución de las estaciones de la RACP se determinó bajo la consideración de los siguientes criterios:

- Alcanzar una cobertura general de la zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad, de acuerdo a la microzonificación preliminar.
- Determinar la respuesta sísmica en cada uno de los sitios con condiciones diferentes del subsuelo.
- Contar con una referencia en roca, para lograr establecer los efectos de amplificación de la señal sísmica a lo largo y ancho de la ciudad.

Los objetivos específicos con los que fue creada la RACP son los siguientes:

- Obtener registros de la respuesta local de suelo ante eventos sísmicos de mediana y gran intensidad.
- Determinar los efectos de sitio inherentes a las características locales del terreno.
- Recabar información para aportarse a trabajos futuros de zonificación sísmica de la ciudad.

Dado que los trabajos preventivos y correctivos de conservación de los equipos y estaciones fueron planeados para operar por tiempo indefinido, en la selección de los sitios se han buscado localidades apropiadas que brinden seguridad a las instalaciones. Lugares relativamente aislados y que ofrezcan libre acceso para la recolección de datos.

También debe procurarse la mejor protección contra la intemperie y el fácil acceso a una fuente de corriente eléctrica. Por lo anterior se han preferido áreas dentro de algún parque, escuela u oficina que brinden las ventajas antes descritas. En las figuras I.9 a I.19 se presenta la localización de cada una de las estaciones (ref. 13).

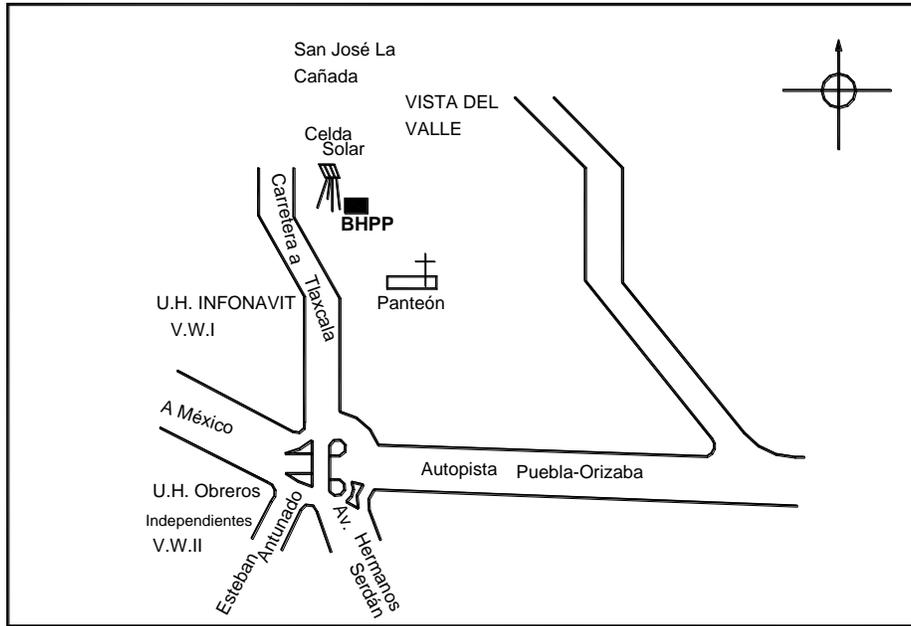


Figura I.9 Estación Barranca Honda (BHPP)

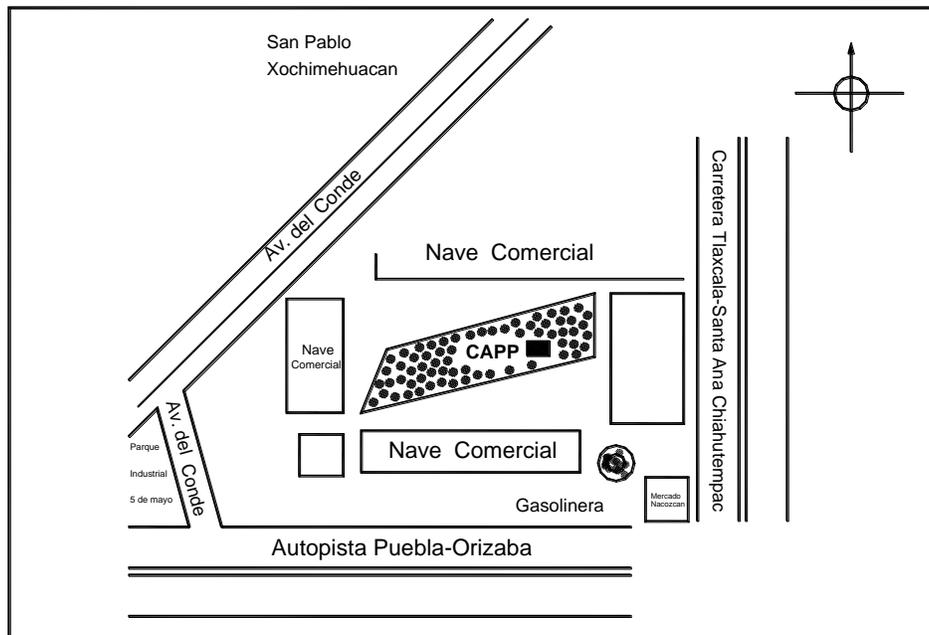


Figura I.10 Estación Central de Abastos (CAPP)

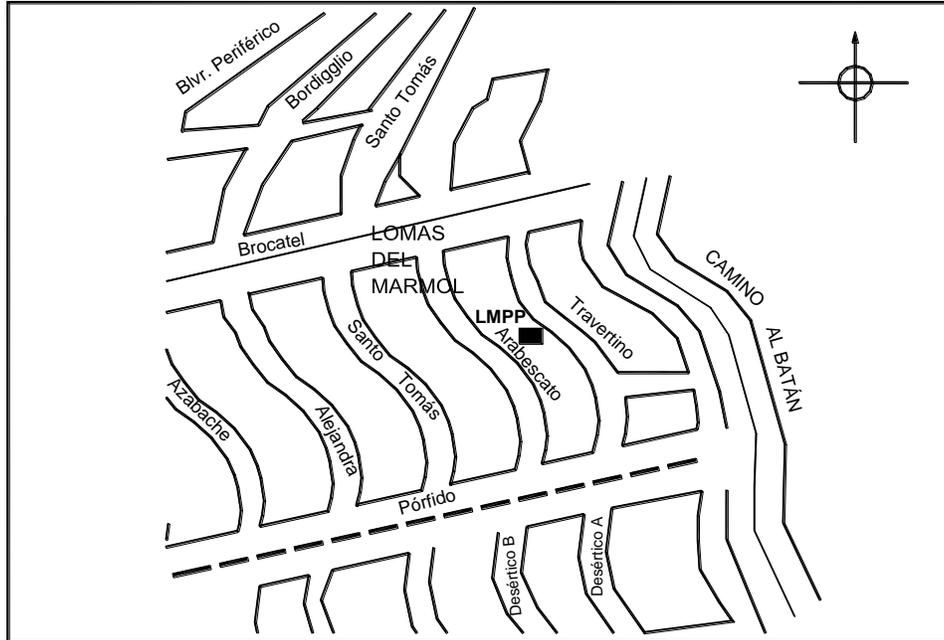


Figura I.11 Estación Lomas del Mármol (LMPP)

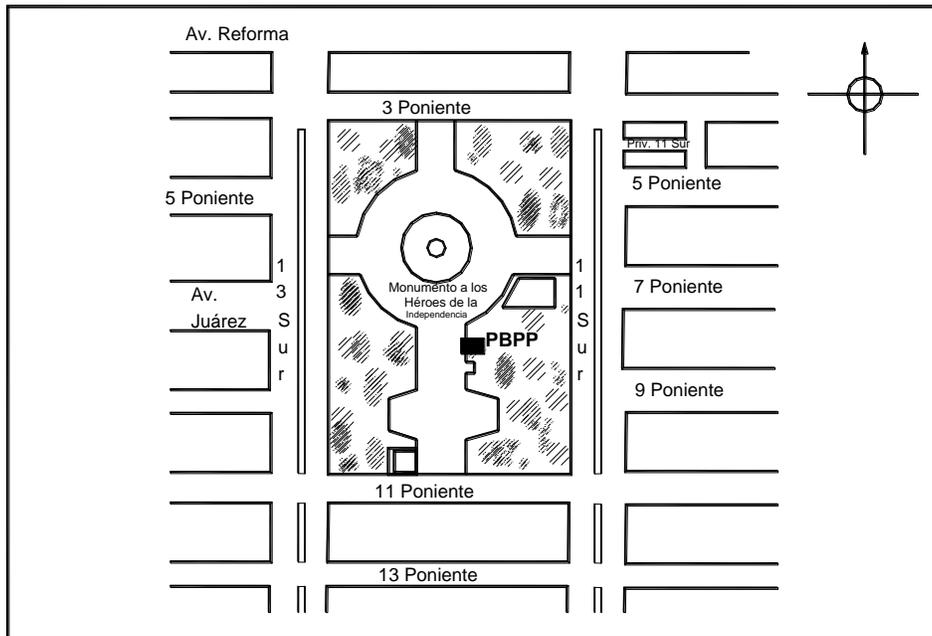


Figura I.12 Estación Paseo Bravo (PBPP)

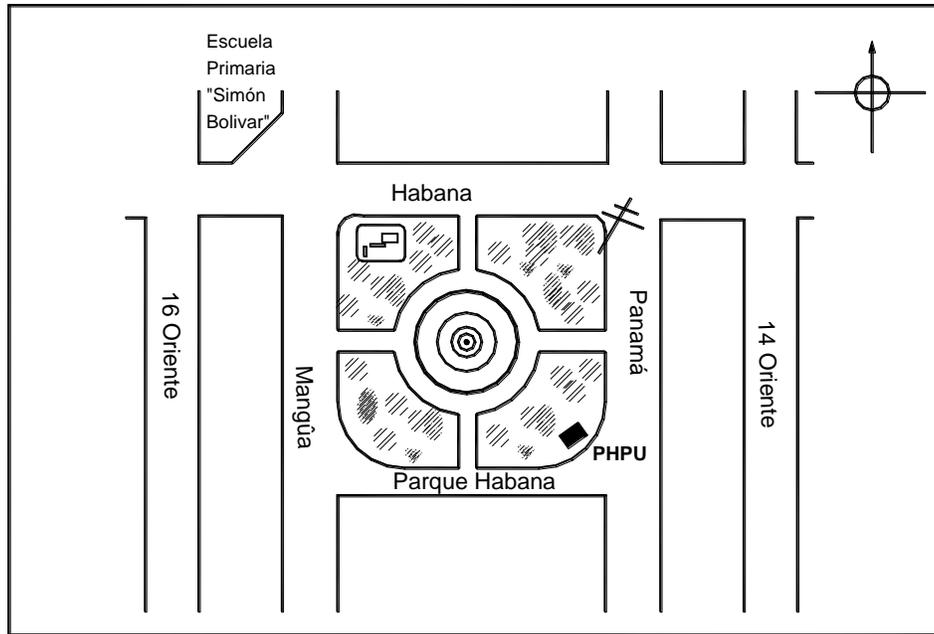


Figura I.13 Estación Parque Habana (PHPU)

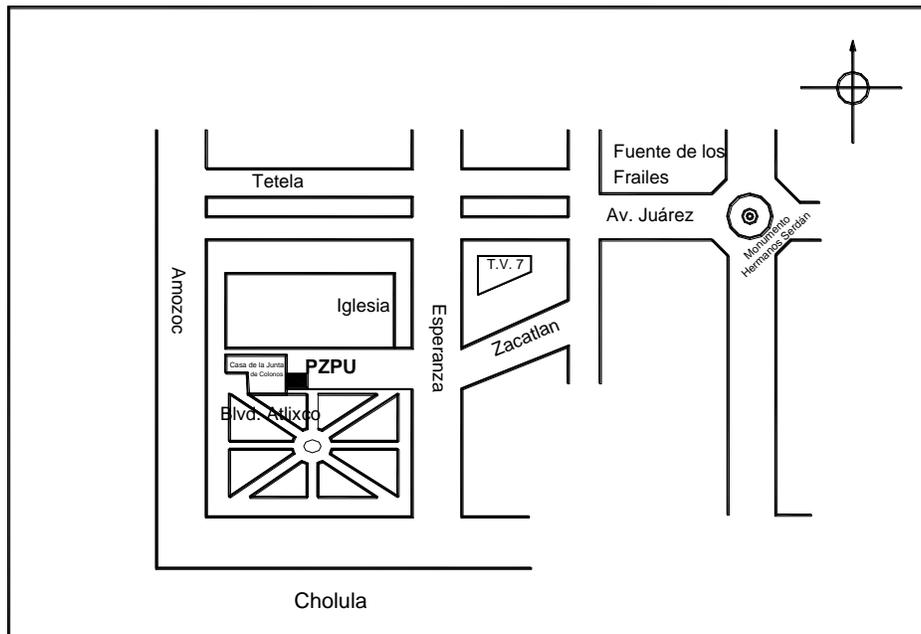


Figura I.14 Estación la Paz (PZPU)

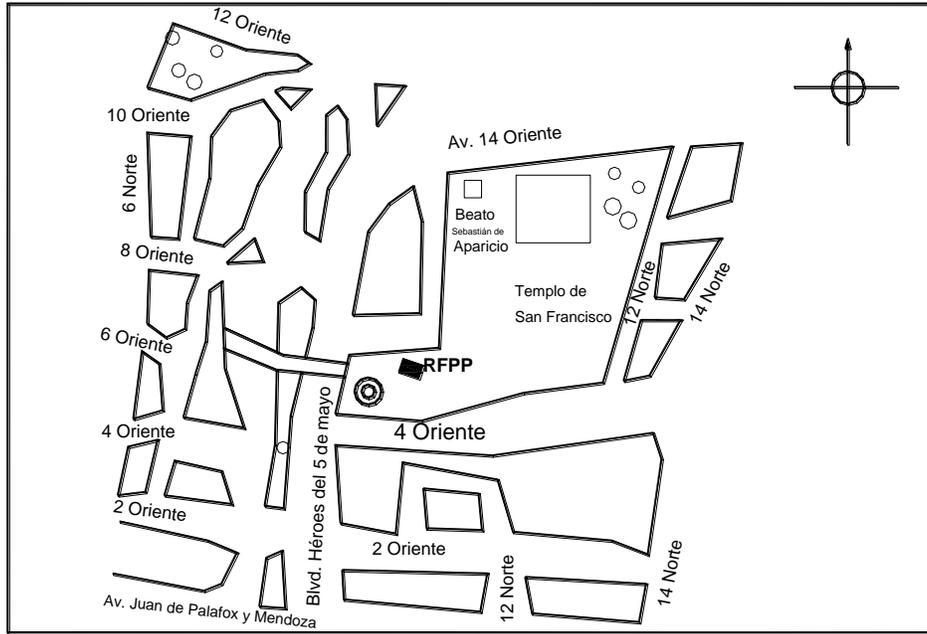


Figura I.15 Estación Río San Francisco (RFPP)

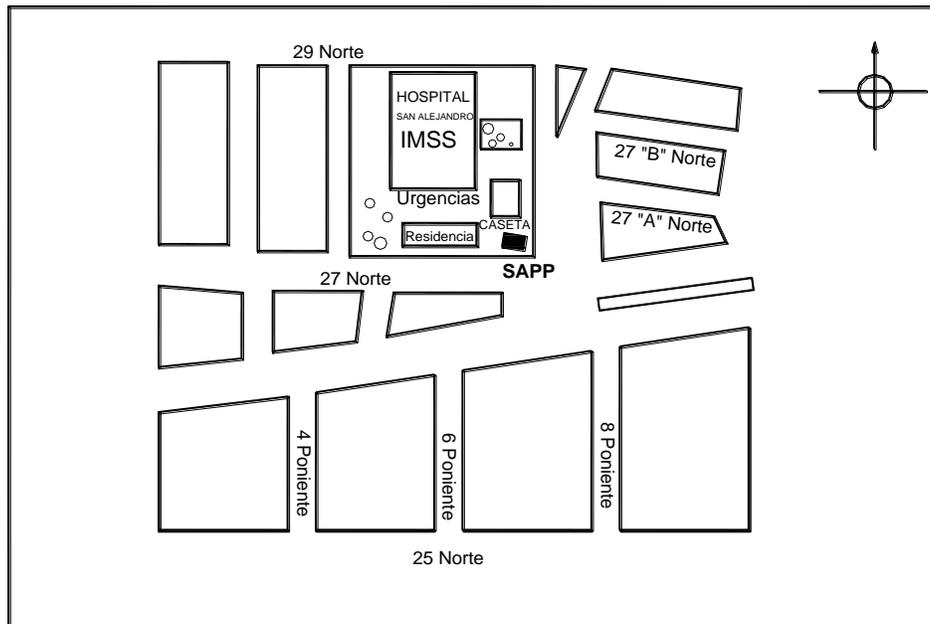


Figura I.16 Estación San Alejandro (SAPP)

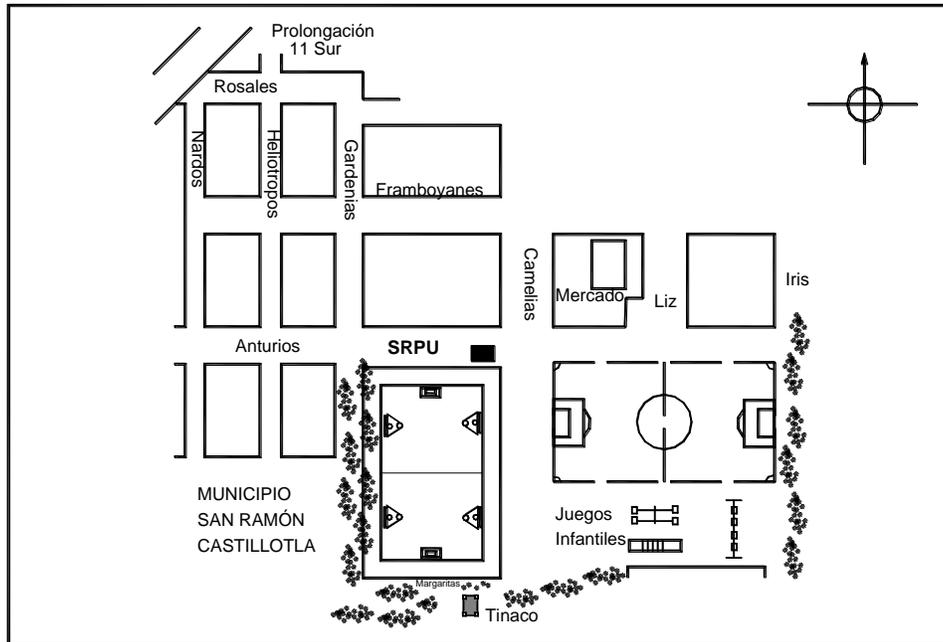


Figura I.17 Estación San Ramón (SRPU)

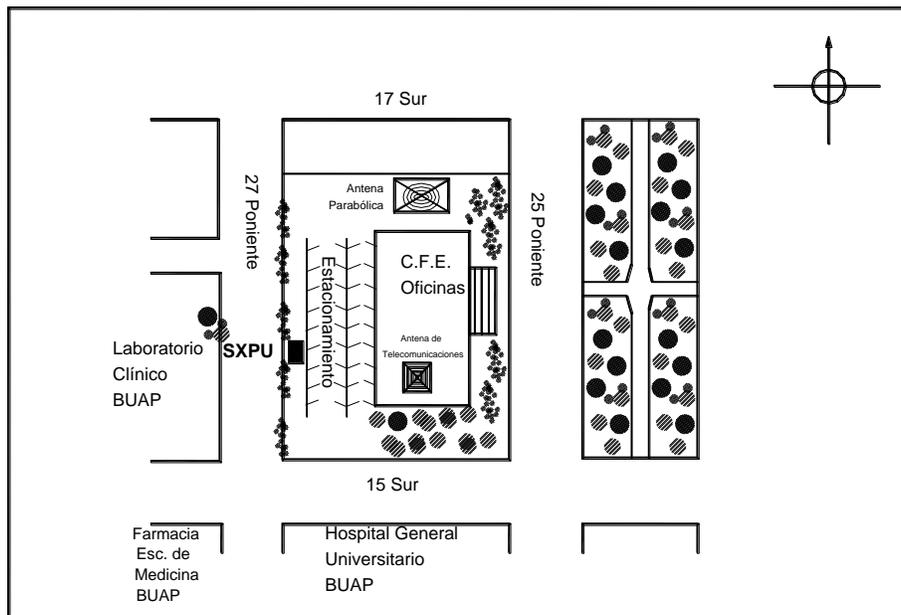


Figura I.18 Estación Sismex (SXPU)

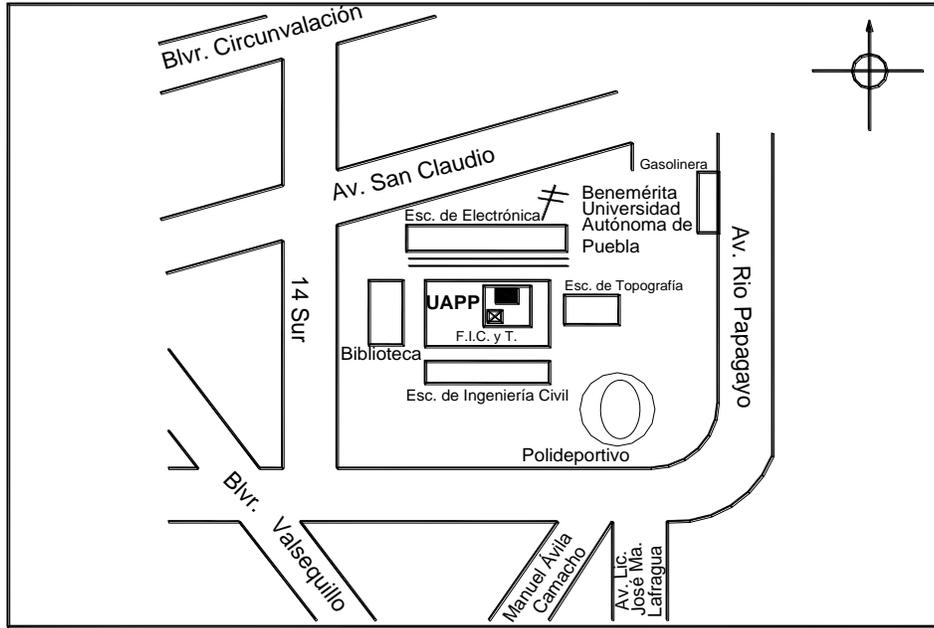


Figura I.19 Estación Universidad Autónoma de Puebla (UAPP)

I.3 Equipo de monitoreo sísmico y registros obtenidos

Las dos partes principales que componen un acelerógrafo son los sensores y el registrador; los primeros están constituidos por acelerómetros cuyo número y arreglo dependerán de la aplicación en particular, siendo la disposición triaxial la más empleada, esto es, tres acelerómetros en posición mutuamente ortogonales.

El registrador a su vez se divide en tres partes, la primera la integra una unidad de conversión análogo-digital, la segunda una de control 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 un umbral de disparo programado, se inicia el almacenamiento hasta que se deja de cumplir la condición dada.

Es posible establecer una configuración preliminar para el umbral de disparo que permita activar el equipo únicamente cuando el movimiento excede ciertos límites. En los equipos de registro la señal de entrada es continuamente evaluada, si los datos están debajo de un determinado nivel son desechados después de unos cuantos segundos; por el contrario, al excederse dicho nivel la información es almacenada.

Los medios de almacenamiento empleados pueden ser cinta magnética, memoria *RAM*, de estado sólido o en dispositivos tipo *flash*. Cada aparato posee un sistema de control de tiempo que permite conocer la fecha y hora de ocurrencia del evento, lo que facilita la identificación de los registros obtenidos. El suministro de energía se realiza mediante baterías, las cuales son alimentadas por medio de un sistema de celdas solares o a través de un cargador de corriente alterna.

Equipo de monitoreo sísmico. Debido a que los acelerógrafos son fabricados en número reducido solamente por unas cuantas compañías, no existe uno ideal para todos los casos; en general se busca que funcione continuamente y registre los eventos cuando ocurran, para esto se toma en cuenta su fácil manejo, el margen de grabación de pre-evento, evento y post-evento; así como la compatibilidad de las señales con las herramientas de computación disponibles para su proceso.

La RACP cuenta con instrumentos seleccionados que toman en cuenta tanto factores técnicos como económicos, son de marca Terra Technology, modelos digitales DCA-333, IDS-3602, GSR-12 y de marca Kinematics modelo ETNA. En la tabla 2 se describen los principales parámetros de operación de estos equipos.

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			
Escala de registro[G ¹]	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	20-90	35	8 minutos por Mb a 200 muestras por segundo
Tasa de muestreo [Muestras/seg]	100	250	200 ó 400	100, 200 ó 250
Longitud de palabra [bit]	12	16	12	18
Rango dinámico [dB]	72	96	72	108
Control de tiempo	Interno	Interno	Interno y GPS	Interno y GPS
Alimentación [volt CD]	+12	+12	+12	+12

Aunque de distinta marca y tipo, todos operan de manera similar muestreando continuamente las señales analógicas de los sensores y convirtiéndolas en muestras digitales.

¹ G = 981 cm/s²

Registros obtenidos. Los datos de aceleración son almacenados por cada equipo en diferentes medios de registro, la información almacenada en ellos es recolectada en visitas de campo o bien por medio de interrogación remota, ya sea vía telefónica, satelital o por internet.

Es necesario corroborar que los eventos registrados se encuentren asociados con algún sismo confirmado por el SSN, pues no todos los disparos de los acelerógrafos se deben a movimientos sísmicos, ya que los niveles de activación pueden ser alcanzados por vibraciones producidas por otras fuentes, tales como tránsito de vehículos pesados en las cercanías de la estación, golpes fortuitos, etc.

El contenido de las cintas o memorias se reporta en hojas de lectura, como archivos nativos, los cuales se encuentran en lenguaje binario. Mediante el uso de programas especializados se transforman a un formato ASCII denominado ASA2.0 (ref. 14). Los archivos en este formato consisten en 8 bloques de datos los cuales son: encabezado, archivo estándar de aceleración, datos de la estación, acelerógrafo, información del sismo, datos del registro, comentarios y series tiempo-aceleración.

Los datos de aceleración contenidos en los archivos ASA2.0 se pueden utilizar para generar el gráfico correspondiente al acelerograma del registro, un ejemplo de este es el acelerograma del sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$) obtenido en la estación SXPY y cuya aceleración máxima fue de $32.6 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ (figura I.20).

Las estaciones sísmicas que integran la RACP, han producido una gran cantidad de registros de aceleración, los cuales fueron generados por sismos ocurridos en las regiones que influyen en el estado de Puebla y cuya intensidad ha sido suficiente para alcanzar los niveles de activación predeterminados en al menos una de las estaciones.

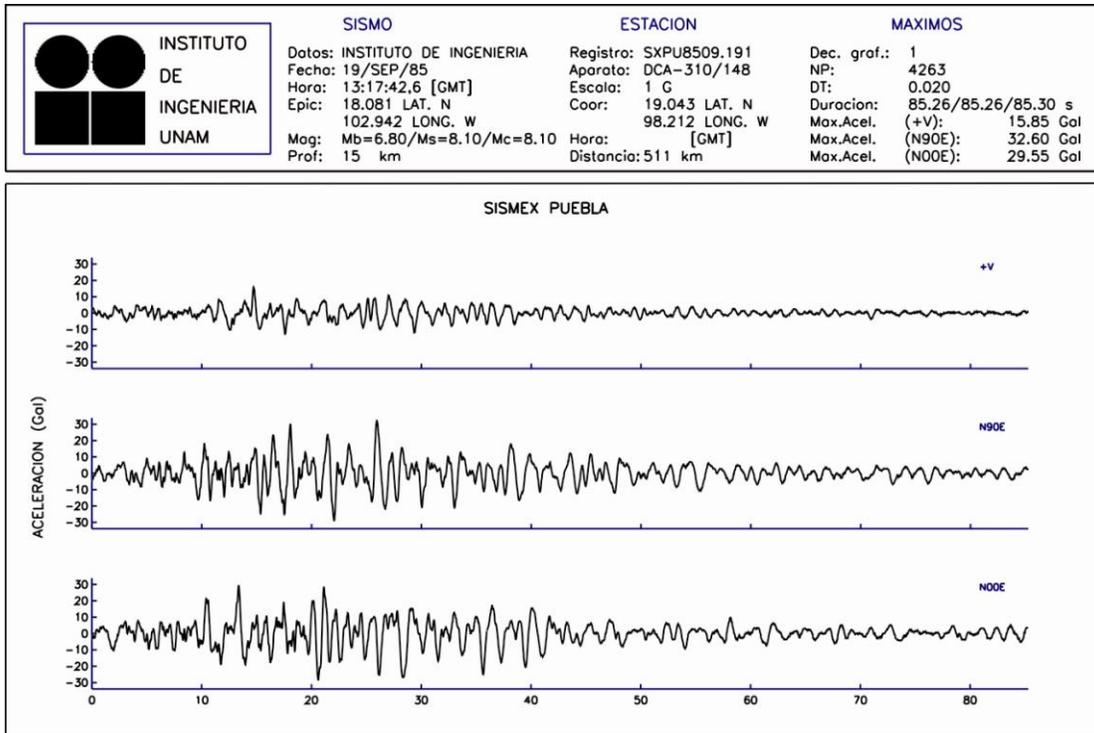


Figura I.20 Acelerograma generado a partir de un archivo ASA2.0

En la tabla 3 se presentan los registros obtenidos desde el 29 de Noviembre de 1978 hasta Febrero de 2009 en las estaciones de la RACP (ref. 15). Los datos son presentados en columnas que contienen la información en el orden siguiente:

- Número asignado a cada sismo
- Fecha de ocurrencia del evento en el formato AAAAMMDD.E
- Magnitud del sismo
- Coordenadas geográficas epicentrales
- Profundidad del foco
- Clave de la estación que registró el sismo
- Distancia epicentral
- Aceleración máxima registrada

Tabla 3. Registros obtenidos en la RACP

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
1	19781129.1	7.8	16.00	96.69	19	SXPU	374	20.1
2	19781129.2	5.3	15.74	96.83	33	SXPU	394	2.3
3	19781129.3	4.5	15.74	96.18	33	SXPU	425	3.9
4	19790314.1	7.4	17.49	101.26	28	SXPU	365	14.8
5	19801024.1	7.1	18.03	98.29	70	SXPU	112	81.6
6	19811025.1	7.3	17.88	102.15	14	SXPU	435	9.6
7	19840702.1	6.1	15.84	99.03	33	SXPU	365	7.7
8	19850211.1	5.2	16.24	95.10	74	SXPU	453	10.1
9	19850919.1	8.1	18.08	102.94	15	SXPU	510	32.6
10	19850921.1	7.6	18.02	101.48	15	SXPU	363	24.6
11	19890425.1	6.9	16.50	99.50	15	CAPP,PBPP,UAPP	319, 313, 309	15.1, 8.9, 12
12	19950914.1	7.3	16.31	98.88	22	CAPP,PBPP,PZPU, SRPU,SXPU,UAPP	316, 311, 312, 301, 311, 307	21.9, 22.2, 28.3, 13.8, 24.5, 15.3
13	19950916.1	4.9	16.46	98.49	10	PBPP	318	0.6
14	19951009.1	8	18.74	104.67	5	PBPP,SRPU,SXPU	682, 676, 681	3.3, 3.0, 3.0
15	19951009.2	7.5	18.74	104.67	5	SXPU	681	2.3
16	19951012.1	6.1	19.04	103.70	11	PBPP	578	1.0
17	19951021.1	7.2	16.92	93.62	98	CAPP,PBPP,PZPU, SXPU,UAPP	540, 540, 542, 540, 537	2.8, 0.9, 4.2, 4.9, 3.0
18	19951021.2	6.5	16.92	93.62	98	PBPP	540	3.3
19	19951030.1	5.6	16.35	98.51	27	CAPP,PBPP,PZPU, SXPU,UAPP	305, 300, 301, 299, 295	2.2, 1.9, 3.4, 5.1, 1.4
20	19960225.1	7.1	16.13	98.27	8	PBPP,SRPU, SXPU,UAPP	323, 351, 322, 318	2.8, 3.4, 6.3, 2.7
21	19960225.2	5.2	15.79	98.28	5	PBPP,SXPU,UAPP	361, 360, 356	0.7, 4.1, 2.2
22	19960225.3	4.8	15.42	98.16	13	PBPP,UAPP	401, 396	1.0, 1.2
23	19960225.4	5.4	15.44	98.07	8	PBPP	399	1.1
24	19960225.5	5.2	15.79	98.28	5	PBPP,SRPU	361, 351	2.5, 3.4
25	19960225.6	5	15.60	97.89	0	PBPP	383	0.9
26	19960225.7	4.5	16.08	97.68	33	PBPP	331	1.1
27	19960226.1	5.7	15.77	98.13	19	PBPP	363	0.6
28	19960313.1	5.3	16.49	99.19	35	PBPP	302	0.9
29	19960319.1	6	15.48	97.55	31	PBPP	401	1.0
30	19960327.1	5.4	16.24	98.25	10	PZPU,SRPU,UAPP	312, 302, 306	2.8, 3.3, 1.8
31	19960715.1	6.6	17.48	101.14	16	CAPP,PBPP,PHPU, SRPU,SXPU,UAPP	359, 355, 358, 346, 355, 353	3.8, 3.9, 4.5, 3.8, 7.8, 3.2
32	19960715.2	6.5	17.40	101.10	20	PBPP	356	1.0
33	19960718.1	4.8	17.52	101.30	6	PBPP	368	0.9
34	19960906.1	4	19.10	98.36	10	PBPP,BHPP	17,14	0.7, 3.3
35	19970111.1	7.3	18.09	102.86	17	CAPP,PBPP,PZPU, SRPU,SXPU,UAPP	505, 502, 501, 495, 501, 502	5.7, 5.5, 7.3, 6.2, 5.9, 7.1
36	19970121.1	5.6	16.24	98.29	5	PBPP,SRPU, SXPU,UAPP	311, 301, 310, 306	2.2, 2.3, 2.4, 1.9

Tabla 3 (continuación)

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
37	19970403.1	4.7	17.98	98.38	49	BHPP,CAPP, PBPP,UAPP	126, 125, 119, 115	1.7, 2.6, 2.4,3.3
38	19970508.1	5.1	17.26	100.38	14	PBPP	303	0.7
39	19970522.1	5.9	18.43	101.79	61	PBPP,UAPP	384, 384	1.4, 1.6
40	19970719.1	6.3	16.00	98.23	9	PBPP,UAPP	337, 332	1.6, 1.4
41	19970722.1	5.1	15.02	98.42	5	PBPP	446	0.6
42	19970915.1	5.2	15.55	98.75	23	PBPP	391	0.6
43	19971216.1	5.9	15.86	99.16	10	PBPP,UAPP	367, 362	1.9, 1.6
44	19971222.1	5.6	17.25	100.90	10	PBPP	347	1.1
45	19980110.1	6.3	14.29	91.82	80	PBPP	861	1.6
46	19980203.1	6.4	15.69	96.37	33	BHPP,CAPP,PBPP, PHPU,PZPU,SRPU, SXPU,UAPP	418, 414, 420, 409, 422, 406, 419, 407	2.1, 3.1, 3.5, 5.6, 4.8, 4.1, 4.9, 3.8
47	19980303.1	5	15.71	96.47	12	PBPP	413	0.6
48	19980305.1	5.3	16.05	98.43	5	PBPP	333	1.2
49	19980420.1	5.9	18.37	101.21	66	PBPP,SRPU,SXPU	325, 318, 324	1.8, 2.7, 1.8
50	19980516.1	5.1	17.25	101.35	14	PBPP	387	0.7
51	19980607.1	6.2	15.82	94.07	16	PBPP,SXPU,UAPP	567, 566, 563	1.5, 1.7, 1.3
52	19980620.1	4.8	16.96	95.21	115	PBPP	393	0.7
53	19980711.1	4.9	17.25	101.54	5	PBPP	405	1.1
54	19980712.1	5.1	16.83	100.44	4	PBPP	341	0.9
55	19980717.1	4.6	16.98	100.16	27	PBPP	308	0.9
56	19990615.1	7	18.18	97.51	69	BHPP,CAPP,PBPP, PHPU,SRPU,UAPP	128, 124, 121, 119, 119, 118	58.9, 103.2, 123.2, 279, 216.8, 108.8
57	19990620.1	4	19.31	98.48	3	BHPP,PBPP	34, 41	3, 0.9
58	19990621.1	6.2	17.99	101.72	54	PBPP,SRPU	389, 384	2.6, 3.2
59	19990712.1	4.8	15.92	98.63	17	PBPP	349	0.7
60	19990930.1	7.5	15.95	97.03	16	BHPP,CAPP,PBPP, PZPU,SXPU,UAPP	372, 375, 365, 366, 364, 366	10.8, 12.9, 17.5, 9.2, 22.6, 15.9
61	19991214.1	4.8	17.96	98.54	36	PBPP,SRPU	125, 115	1.5, 3.7
62	19991229.1	5.9	18.10	101.68	20	PBPP	381	0.9
63	20000312.1	5.9	14.59	92.97	35	PBPP	745	1.1
64	20000318.1	4.8	17.08	99.31	31	PBPP	247	0.8
65	200007.211	5.9	18.09	98.97	47	BHPP,CAPP,PZPU, SRPU,SXPU	137, 138, 133, 123, 132	5.9, 9.0, 11.6, 14.4, 11.8
66	200008.091	7	17.99	102.66	16	PBPP	484	2.6
67	200012.011	5.4	17.94	102.58	14	PBPP	478	0.6
68	20011008.1	6.1	17.01	100.10	16	BHPP	305	2.4
69	20010113.1	7.6	13.15	89.94	10	PBPP	1099	1.3
70	20010126.1	5	16.01	97.96	20	PBPP	337	1.3
71	20020607.1	5.6	15.92	96.96	8	PBPP	370	1.0
72	20020619.1	5.5	16.21	98.08	10	PBPP	314	1.0
73	20020925.1	5.3	16.85	100.13	10	PBPP	317	0.7
74	20020927.1	4.9	17.16	100.59	36	PBPP,PHPU	327, 330	0.9, 1.2

Tabla 3 (continuación)

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof. (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
75	20021106.1	4.6	15.61	99.46	20	PBPP	403	0.5
76	20021108.1	5.2	16.27	98.17	10	PBPP	307	0.7
77	20031119.1	4.9	17.83	99.49	48	PBPP	191	0.8
78	20040101.1	6.3	17.39	101.37	10	PBPP,UAPP	381, 380	2.6, 1.9
79	20040101.2	5.8	16.97	101.84	10	PBPP	448	1.2
80	20040113.1	5.1	16.01	97.30	3	PBPP,PHPU	350, 368	0.6, 1.9
81	20040113.2	5.5	15.90	97.03	16	PBPP	370	1.5
82	20040614.1	5.8	16.03	97.84	10	PBPP,PHPU, LMPP,SRPU	336, 335, 331, 328	3.9, 5.1, 1.1, 7.3
83	20040807.1	5.3	17.10	95.48	106	PBPP	360	1.2
84	20040818.1	5.7	16.33	95.14	66	PBPP,PHPU,SRPU	443, 440, 441	1.7, 4.1, 5.5
85	20041115.1	5.1	15.98	98.72	25	PBPP	344	1.1
86	20041206.1	4.7	16.00	98.56	10	PBPP	339	0.5
87	20041210.1	5.1	15.14	97.33	16	PBPP	442	0.6
88	20050814.1	5.8	15.94	97.93	9	PBPP,PHPU	345, 344	2.2, 3.2
89	20050924.1	4.7	17.88	97.03	104	PBPP,PHPU	179, 176	1.4, 1.8
90	20060220.1	5	18.16	100.75	41	LMPP	287	0.8
91	20070413.1	6.3	17.09	100.44	41	PHPU, PBPP	323	4.6, 4.4
92	20070413.2	5.4	17.27	100.27	51	PBPP	293	1.3
93	20070428.1	5	16.94	99.82	9	PBPP	288	0.6
94	20070706.1	6.2	16.90	94.10	100	PBPP	495	2.4

Durante el periodo de 1978 a 2008 el número de acelerogramas generados en la RACP es de 176, los cuales han sido producto de 94 sismos cuyas magnitudes varían en el intervalo 3.3 a 8.1. La aceleración máxima registrada en la historia de la red ha sido de 279 cm/s² en la dirección norte-sur de la estación PHPU durante el sismo del 15 de junio de 1999 (M=7.0). La estación PBPP cuenta con 78 registros, SXPU con 25, UAPP con 20, SRPU con 15, CAPP con 11, PZPU con 8, PHPU con 10, BPHU con 7 y LMPP con 2.

CAPÍTULO II

FUNCIONES DE

TRANSFERENCIA EMPÍRICAS

II. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS

II.1 Selección de la información

Durante los 36 años de operación de la RACP se ha generado un vasto catálogo de registros de aceleración obtenidos de 94 temblores provenientes de diferentes zonas sismogénicas. Sin embargo, el objetivo planteado en este trabajo consiste determinar espectros de respuesta para determinados eventos sísmicos que no fueron registrados en la estación PBPP, pero para los cuales existe el correspondiente acelerograma en la estación SXP. Considerando lo anterior, la primer etapa de selección de registros sísmicos consiste en identificar aquellos eventos registrados en ambas estaciones de manera simultánea, resultando un total de 13 eventos, los cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Eventos con registro simultáneo en PBPP y SXP

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof. (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
12	19950914	7.3	16.31	98.88	22	PBPP, SXP	311, 311	22.2, 24.5
14	19951009	8	18.74	104.67	5	PBPP,SXP	682, 681	3.3, 3.0
17	19951021	7.2	16.92	93.62	98	PBPP, SXP	540, 540	0.9, 4.9
19	19951030	5.6	16.35	98.51	27	PBPP, SXP	300, 299	1.9, 5.1
20	19960225	7.1	16.13	98.27	8	PBPP, SXP	323, 322	2.8, 6.3
21	19960225	5.2	15.79	98.28	5	PBPP,SXP	361, 360	0.7, 4.1
31	19960715	6.6	17.48	101.14	16	PBPP, S XPU	355, 355	3.9, 7.8
35	19970111	7.3	18.09	102.86	17	PBPP, SXP	502, 501	5.5, 5.9
36	19970121	5.6	16.24	98.29	5	PBPP, SXP	311, 310	2.2, 2.4
46	19980203	6.4	15.69	96.37	33	PBPP, SXP	420, 419	4.8, 4.9
49	19980420	5.9	18.37	101.21	66	PBPP, SXP	325, 324	1.8, 1.8
51	19980607	6.2	15.82	94.07	16	PBPP,SXP	567, 566	1.5, 1.7
60	19990930	7.5	15.95	97.03	16	PBPP, SXP	365, 364	17.5, 22.6

La siguiente etapa de selección consiste en examinar la calidad de los acelerogramas elegidos, pues en ciertas ocasiones, debido a la naturaleza del equipo de registro, su configuración o las características de los movimientos, algunos de ellos no reúnen las propiedades necesarias para el análisis. Por ejemplo, los equipos más antiguos, están limitados en su capacidad de almacenamiento a palabras de 12 bits únicamente, por lo

cual, la resolución de los registros resulta deficiente (figura II.1a); en otras ocasiones, la elección inadecuada del rango para el registro de valores de aceleración proporcionará registros de mala calidad (figura II.1b). Registros como estos fueron desechados, pues no son útiles para su análisis.

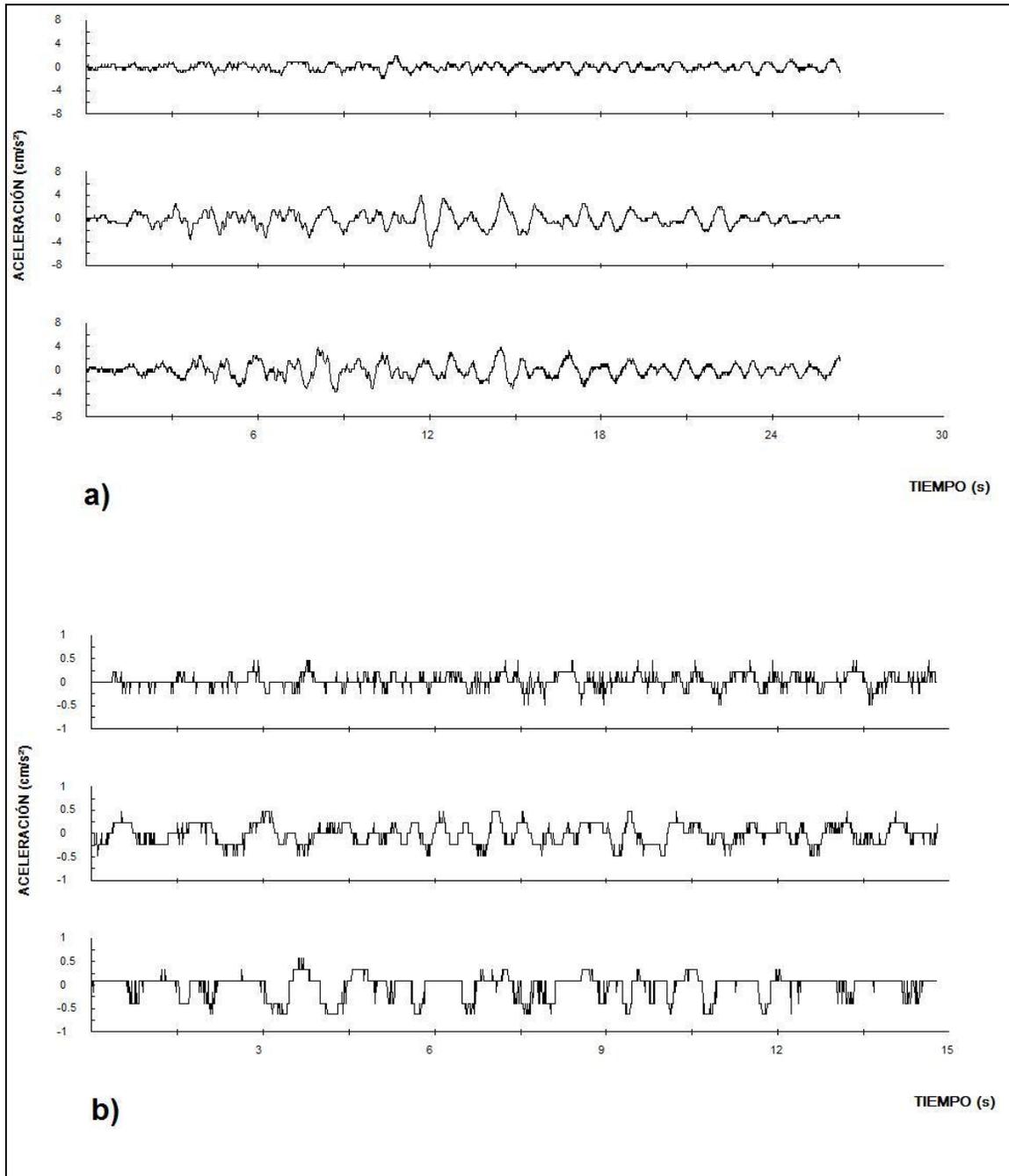


Figura II.1. Registros acelerográficos de mala calidad

Finalmente, en la tabla 5 se incluyen los registros utilizados para la estimación de las Funciones de Transferencia Empíricas (FTE).

Tabla 5. Eventos simultáneos usados en el cálculo de FTE

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof. (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
12	19950914	7.3	16.31	98.88	22	PBPP, SXPU	311, 311	22.2, 24.5
14	19951009	8	18.74	104.67	5	PBPP, SXPU	682, 681	3.3, 3.0
31	19960715	6.6	17.48	101.14	16	PBPP, S XPU	355, 355	3.9, 7.8
35	19970111	7.3	18.09	102.86	17	PBPP, SXPU	502, 501	5.5, 5.9
46	19980203	6.4	15.69	96.37	33	PBPP, SXPU	420, 419	4.8, 4.9

Una vez hecha la selección de los registros, se clasificaron de acuerdo al tipo de evento que los generó en profundos y superficiales. Para ello, se tomó en cuenta la localización epicentral y la profundidad del sismo (ref. 16). Todos los eventos fueron clasificados como superficiales, en la figura II.2 se presenta la localización epicentral de cada uno.

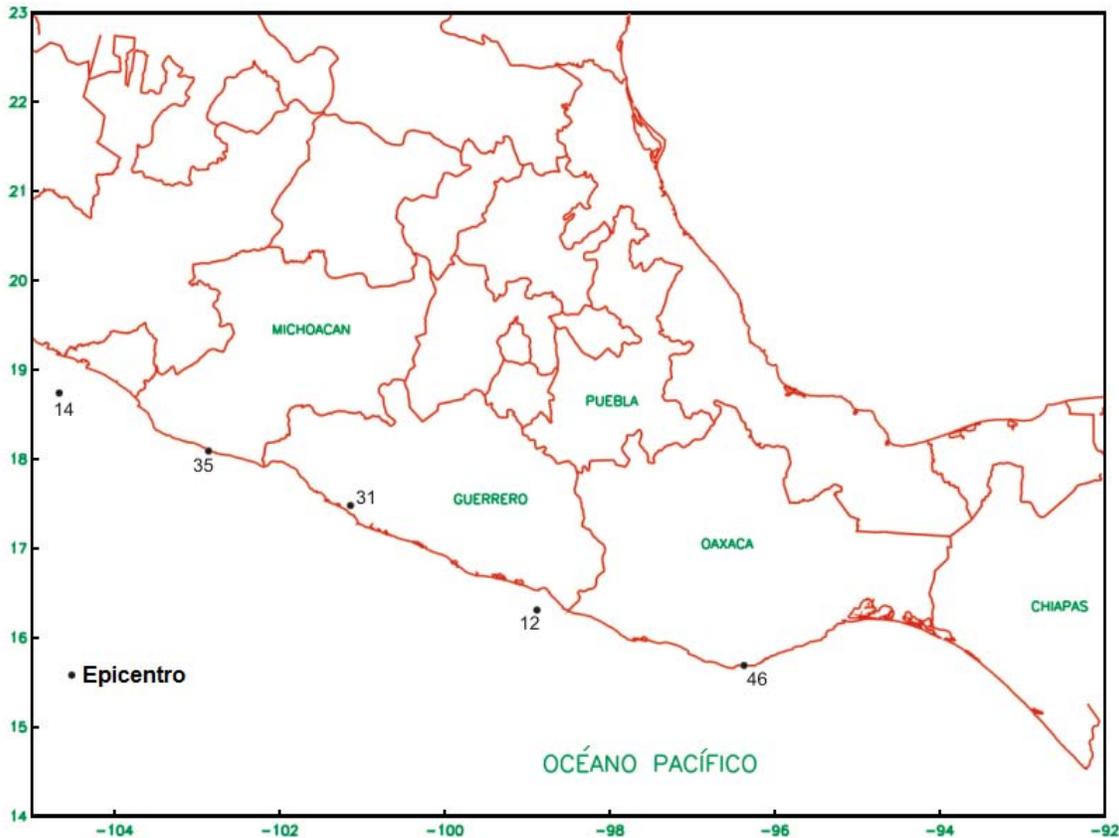


Figura II.2. Localización de los eventos cuyos registros se utilizaron en el estudio.

II.2 Cálculo de Funciones de Transferencia

Análisis de Fourier. Una herramienta matemática muy útil para el análisis de señales son las llamadas *transformadas lineales*, las cuales permiten transformar los datos originales en el dominio del tiempo al de la frecuencia. En especial, las transformadas de Fourier tienen un amplio uso en diversos campos de la ciencia gracias al teorema desarrollado por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y completado por el alemán Dirichlet, quienes demostraron que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período, 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 la frecuencia (ref. 17).

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.

La siguiente expresión define la transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

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

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

$j^2 = -1$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

ω : frecuencia en Hz

T : período en segundos

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. 18). 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 más 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. El Espectro de Fourier (EF) de un acelerograma es una herramienta que permite analizar el contenido de frecuencias de los movimientos del terreno, producidas por la propagación de las ondas sísmicas a través de él, y relacionándolas con su correspondiente valor de amplitud; para calcular el EF de un acelerograma es necesario aplicar la TRF al registro de la señal, posteriormente el EF 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:

$$|F(\omega)| = \left[R(\omega)^2 + jX(\omega)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \text{sen}(\omega t) dt \quad (2.5)$$

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

$R(\omega)$: parte real

$X(\omega)$: parte imaginaria

Antes de dar inicio al cálculo de los EF es necesario realizar dos operaciones a cualquier registro acelerográfico, tales operaciones son la corrección de línea base y el filtrado. Lo anterior se debe a que los registros de los movimientos del suelo producidos por un temblor, muchas veces incluyen vibraciones ajenas al propio evento sísmico, como aquellas producidas por el tránsito local, paso de algún vehículo, etc. En la figura II.3 se aprecia un acelerograma y su correspondiente EF de aceleración.

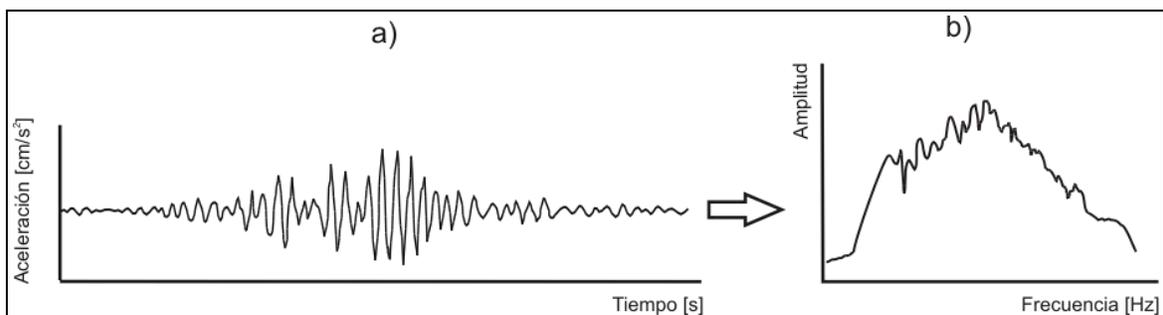


Figura II.3 a) Acelerograma; b) Espectro de Fourier

Funciones de Transferencia. A partir de los espectros de Fourier conocidos en dos sitios distintos (E_1 , E_2), es posible realizar un cociente espectral entre ellos con lo que se obtiene una función resultante denominada Función de Transferencia (FT), tal como se observa en la figura II.4.

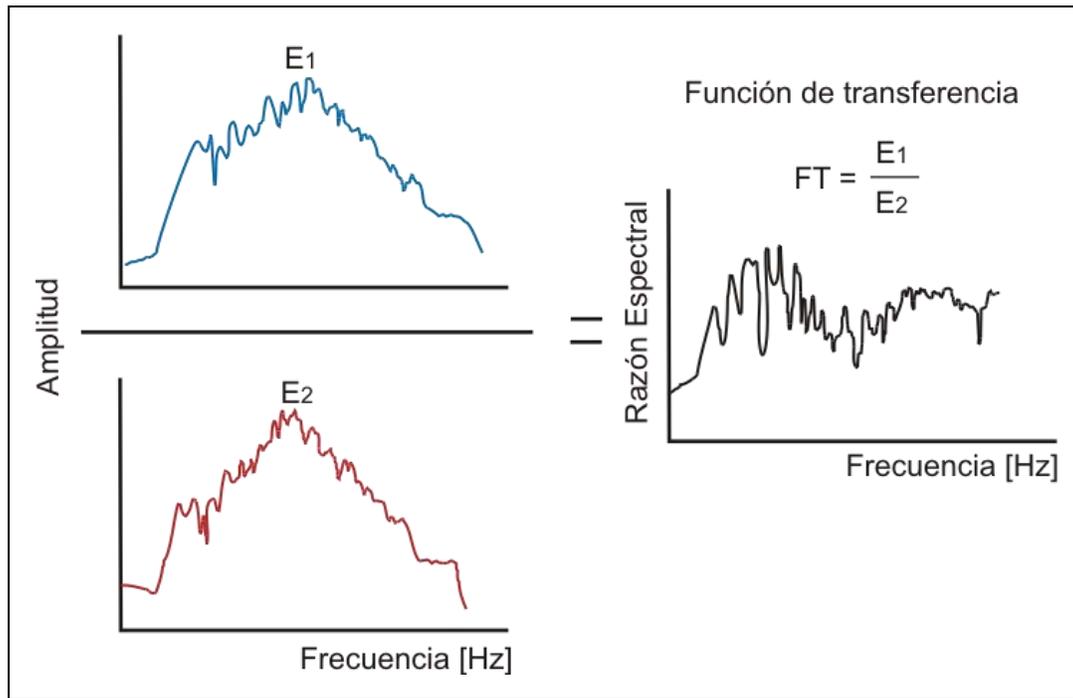


Figura II.4 Cálculo de la FT

Las funciones de transferencia son de gran utilidad, pues a partir de ellas es posible estimar la variación del movimiento sísmico de un lugar respecto con a otro, lo que permite establecer los factores de amplificación o atenuación con respecto a un sitio determinado.

En el caso particular de la ciudad de Puebla, se decidió realizar la función de transferencia en la estación Paseo Nicolás Bravo (PBPP) con respecto al sitio en el que se ubica la estación Sismex Puebla (SXPU), y es por ello que han sido utilizados para la obtención de las FT, acelerogramas de sismos cuyo registro se realizó simultáneamente en ambas estaciones.

En el presente trabajo se desea inferir los espectros de respuesta para determinados sismos no registrados en la estación PBPP a partir de registros obtenidos en SXPU, por lo que el cociente a realizar para obtener la FT es PBPP/SXPU.

Las funciones de transferencia se generaron a través del programa DEGTRA A4 (XP) (ref. 19), el cual utiliza como archivos de entrada, los registros de aceleración de cada evento a analizar. El procedimiento para su obtención es el siguiente:

- Se ejecuta el programa y se abre una ventana por cada una de las componentes de aceleración (vertical, longitudinal o transversal).
- En cada una de las ventanas anteriores se lee el archivo de aceleración correspondiente a cada estación para el sismo y componente respectiva.
- A cada registro se le aplica la corrección de línea base y filtro pasabanda.
- Posteriormente se calcula el EF considerando un factor de suavizado de 10 y un *taper* del 5%.
- Finalmente, una vez que se han generado los EF para la misma componente en cada estación se realiza el cociente espectral de los mismos para obtener su FT.

A manera de ejemplo, en la figura II.5 se presentan los EF y FT calculados para el sismo del 14 septiembre de 1995 ($M_s = 7.2$), utilizando la metodología presentada.

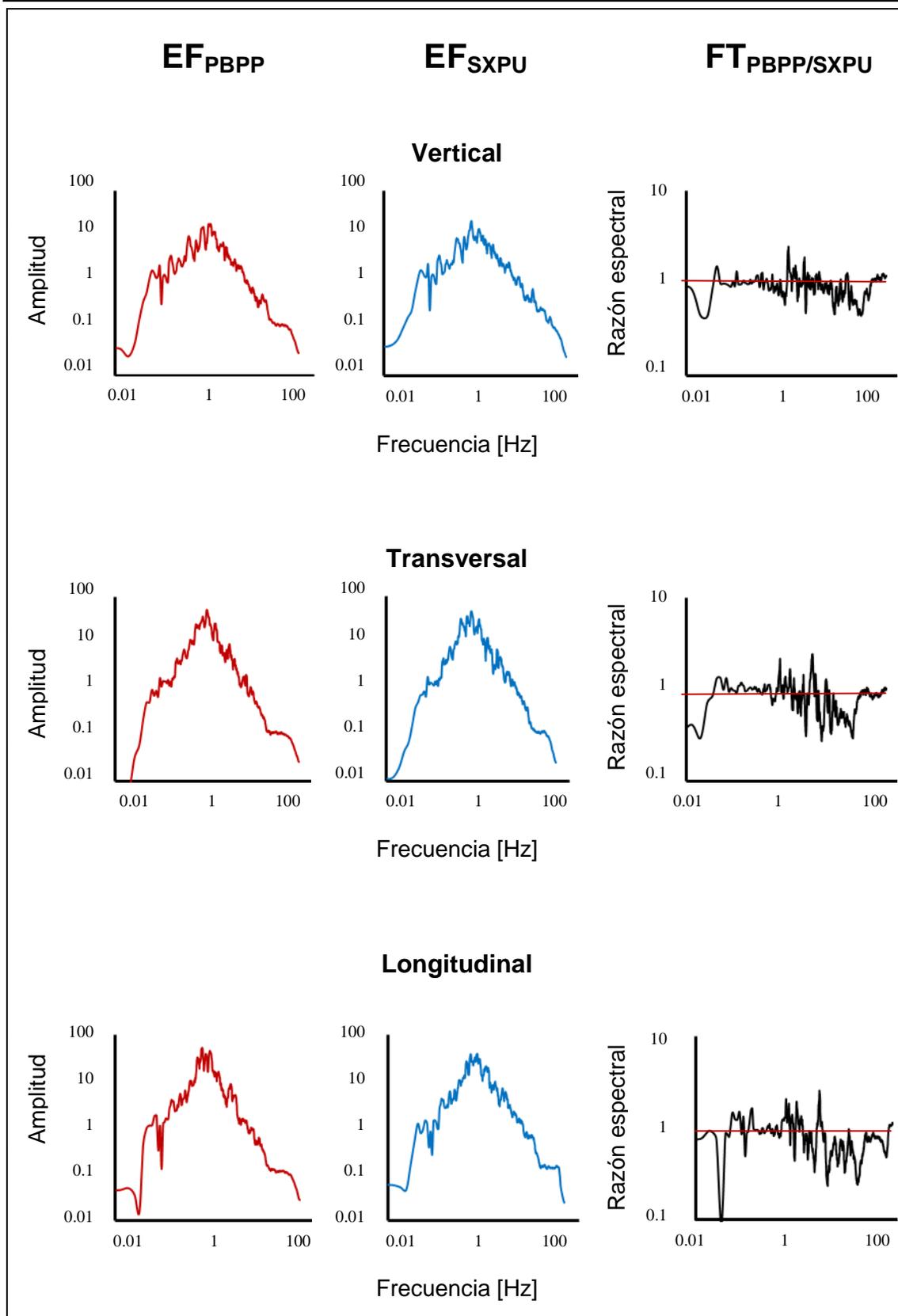


Figura II.5. EF y FT para el sismo del 14/Septiembre/1995

La FT calculada es una función que indica la variación existente del comportamiento sísmico de un sitio con respecto a otro, esto es, se pueden presentar situaciones de amplificación o atenuación de la respuesta del terreno, fenómeno conocido como *efecto de sitio*.

Esta situación se hace más evidente al analizar una transición roca suelo, pudiendo apreciarse claramente los valores de frecuencia para los cuales se presentan efectos de amplificación o atenuación. Sin embargo, en lo concerniente al cociente espectral realizado para la presente investigación, ambas estaciones (PBPP y SXPU) se encuentran localizadas en suelo, por lo que los efectos de sitios, aunque existen son menos evidentes.

A pesar de esto, es posible apreciar en la FT los valores de frecuencia para los cuales la amplitud de la respuesta es mayor o menor en un sitio respecto de otro. La línea horizontal que cruza al eje de las ordenadas en 1 en la gráfica de la FT, resultaría si las amplitudes del movimiento del primer sitio y del segundo fueran idénticas.

De esta forma, los puntos de la FT ubicados por encima de la línea horizontal representan los valores de frecuencia para los cuales las amplitudes sísmicas del terreno en la estación PBPP son mayores a las de SXPU y viceversa.

Para considerar adecuada la aplicación de las FT es necesario establecer un intervalo de frecuencias para los cuales se considera que la función es válida; el criterio para establecerlo se basa en tomar en cuenta aquellos valores de frecuencia que pueden afectar estructuras ubicadas en los sitios de interés y sus respectivos períodos. En el presente trabajo se ha considerado el intervalo $0.06 \leq f \leq 35$ Hz (figura II.6).

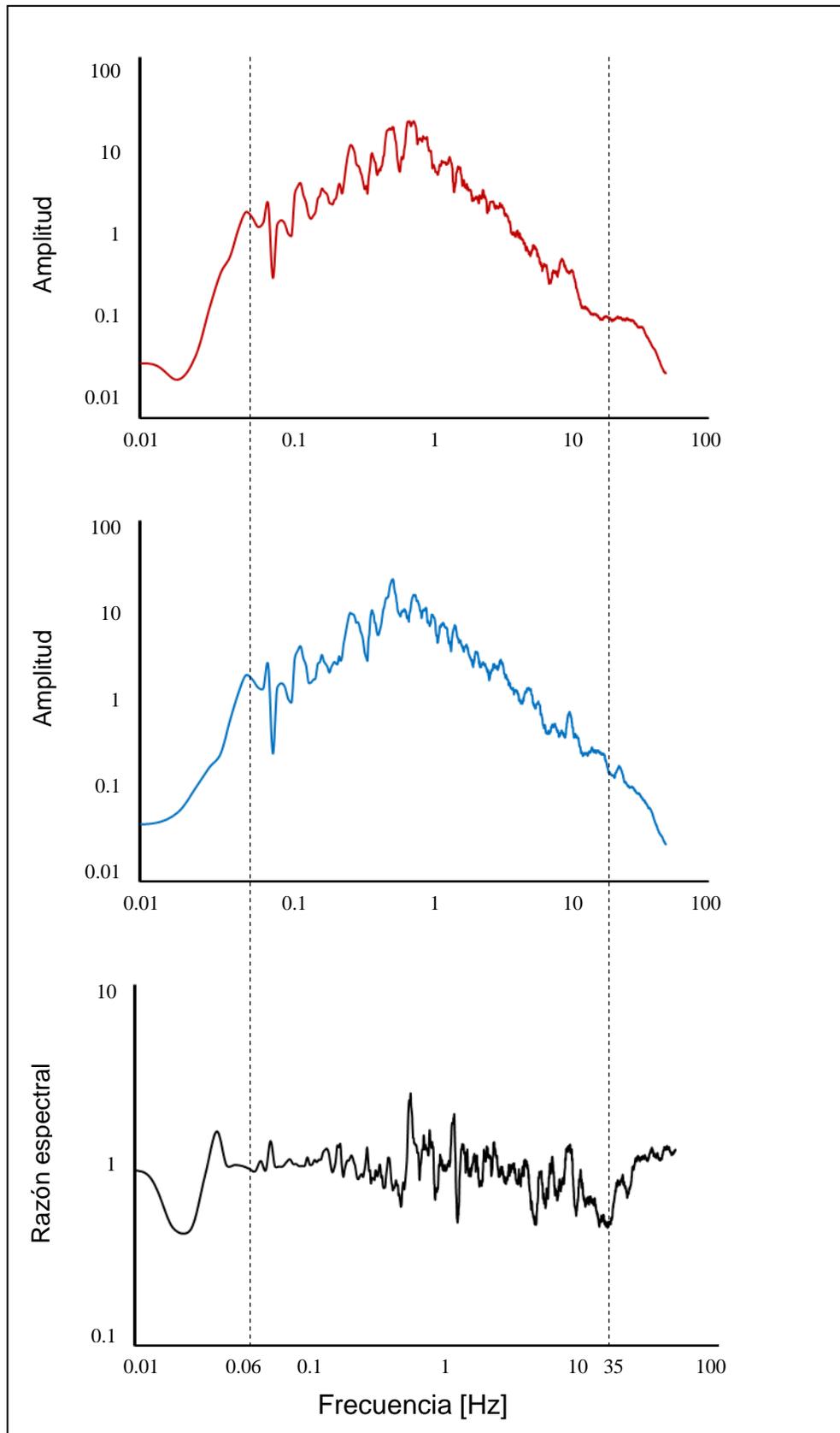


Figura II.6. Intervalo válido de frecuencias

Funciones de Transferencia Promedio. Una vez determinadas las funciones de transferencia para cada evento seleccionado se obtiene un promedio de ellas para cada una de las componentes, determinando de esta manera, una función de transferencia promedio (FTP). En las figuras II.7 a II.9 se presentan las FT y las FTP para cada sismo y sus respectivas componentes. En general, existe una tendencia única de comportamiento para las FT de cada evento, lo que se hace más evidente aún, a través de la función de transferencia promedio.

Finalizadas las FTP por componente, se obtiene un promedio que contempla tanto la componente longitudinal como la transversal, a éste se le llamó Función de Transferencia Promedio Horizontal (FTPH). En el caso de la componente vertical no hay cambios, el promedio sólo se renombra como Función de Transferencia Promedio Vertical (FTPV).

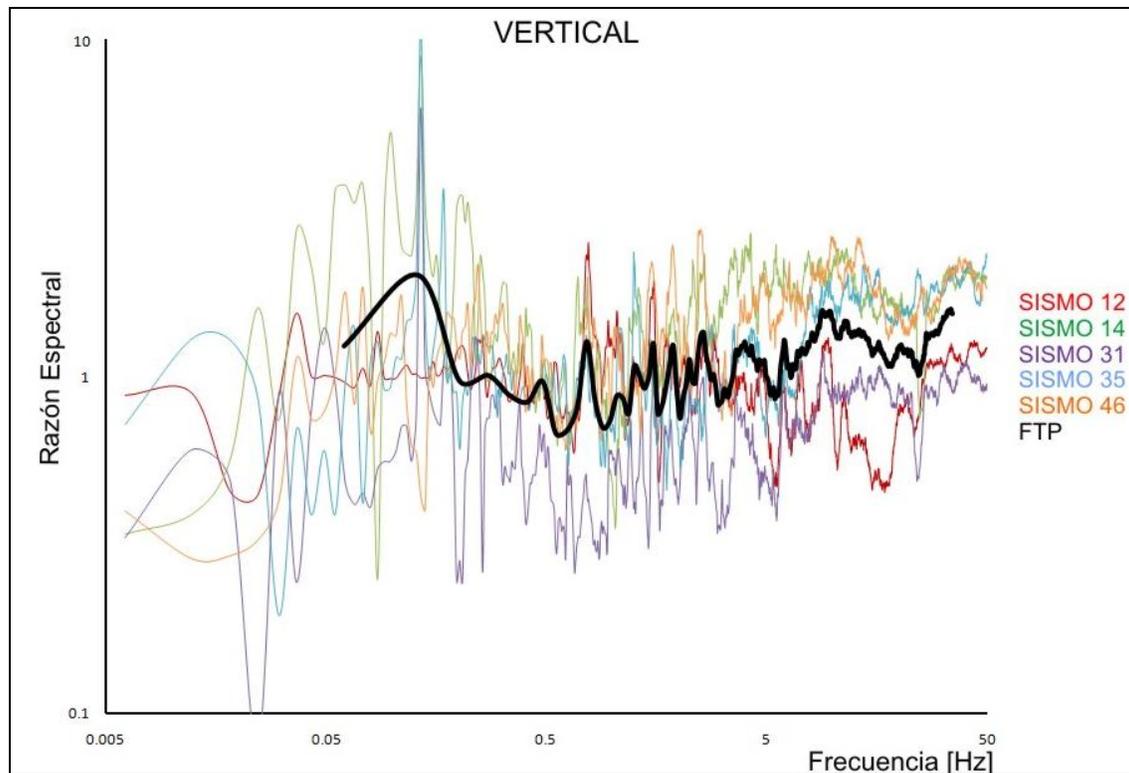


Figura II.7 FT y FTP de SXPU/PBPP componente vertical.

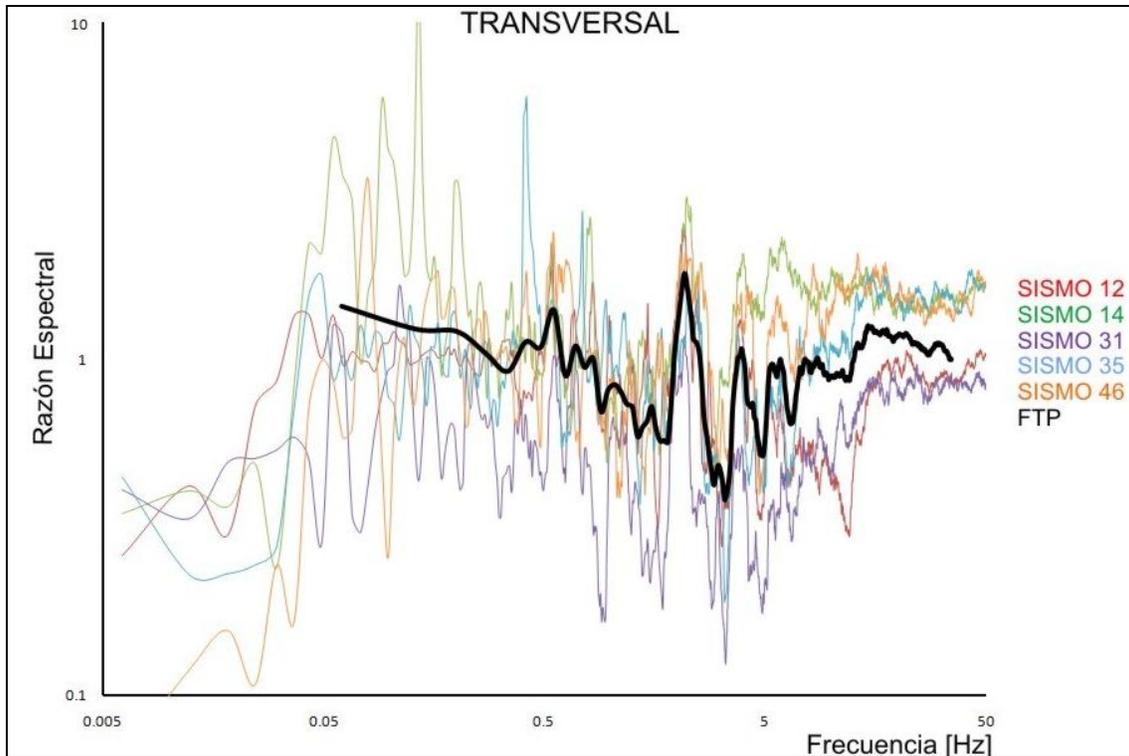


Figura II.8 FT y FTP de SXPBPP componente transversal.

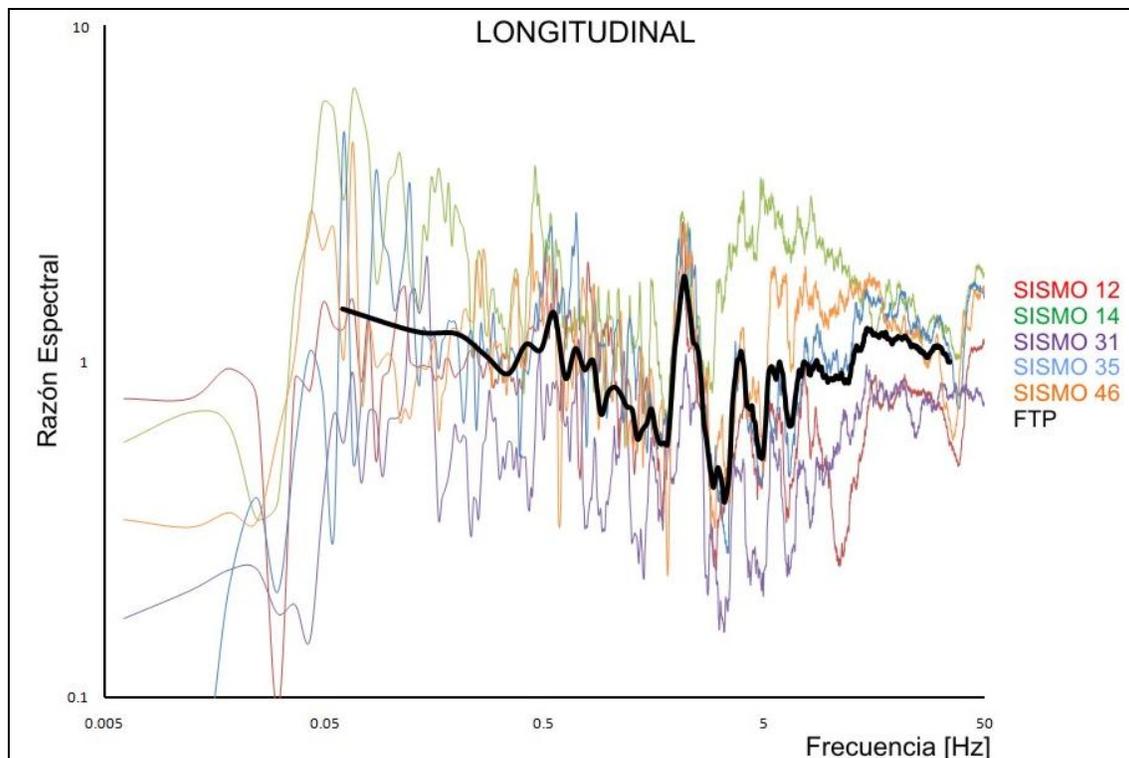


Figura II.9 FT y FTP de SXPBPP componente longitudinal.

CAPÍTULO III
ESPECTROS DE
RESPUESTA

III. ESPECTROS DE RESPUESTA

III.1 Cálculo mediante la ecuación diferencial de movimiento

El movimiento de cualquier cuerpo ubicado libremente en el espacio se puede descomponer en tres rotaciones y tres traslaciones independientes, referidas a un sistema de tres ejes ortogonales entre sí, sin embargo, cuando el cuerpo se encuentra unido mecánicamente a otros cuerpos, algunos de estos movimientos elementales desaparecen. A los movimientos independientes que permanecen se les denomina *grados de libertad*.

Sistemas de un grado de libertad. Existen diversas razones por las cuales es importante conocer la respuesta de los sistemas de un grado de libertad, una de ellas es que a través de éstos puede modelarse la respuesta de una estructura sometida a los movimientos del terreno. La figura III.1 muestra un sistema integrado por una masa concentrada (m) que puede tener un desplazamiento horizontal (u), ligado a una referencia fija mediante un elemento vertical que proporciona rigidez (k) y amortiguamiento (c). El conjunto formado por m , c y k constituye un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento (ref. 20).

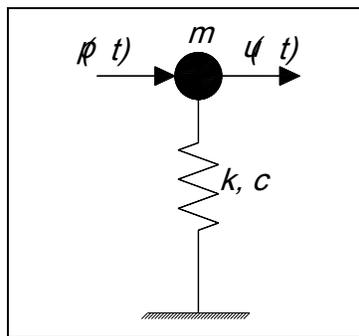


Figura III.1. Sistema de un grado de libertad

Cuando un sistema elástico estáticamente cargado, es movido de alguna manera de su posición original de equilibrio, las fuerzas y momentos internos ya no estarán en balance con las cargas externas y empezaran a ocurrir vibraciones. Para sistemas de un grado de libertad la configuración de un modo de vibración en cualquier instante puede especificarse con una sola coordenada (ref. 21).

La figura III.2 muestra un ejemplo para una fuente de excitación externa debida a un movimiento sísmico $u_g(t)$, el cual tiene asociados desplazamientos originados por la fuerza excitadora (ref. 22).

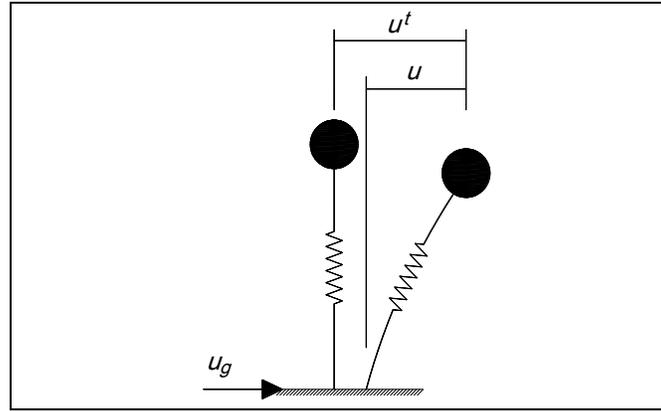


Figura III.2 Fuente de excitación sísmica.

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

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \tag{3.1}$$

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

$u(t)$: desplazamiento generado por la deformación de la estructura

$u_g(t)$: desplazamiento originado por el movimiento sísmico

Analizando el equilibrio dinámico del sistema de la figura III.2 se tiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura III.3:

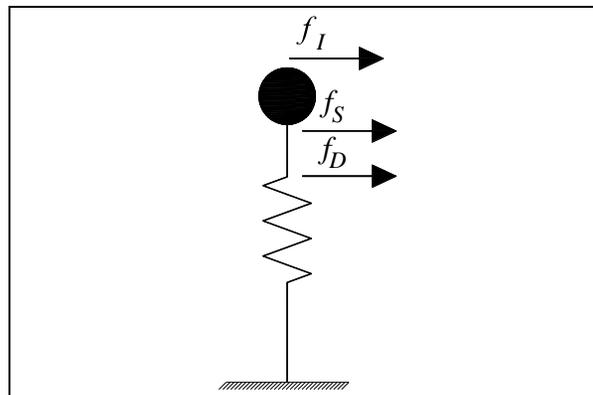


Figura III.3 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Estableciendo el equilibrio se tiene:

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

f_I : fuerza de inercia

f_D : fuerza de amortiguamiento

f_S : fuerza de rigidez

donde

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

sustituyendo en la ecuación 3.2:

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

pero

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

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

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

A la expresión 3.4 se le conoce como *ecuación diferencial de movimiento* para un sistema de un grado de libertad o *ecuación diferencial de equilibrio dinámico*; dividiendo esta ecuación por m se tiene:

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

Tomando en cuenta 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 = período 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:

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

Es posible apreciar en la última ecuación que el desplazamiento $u(t)$ del sistema es función de la frecuencia natural ω_n , y de la relación de amortiguamiento ζ . Por lo que dos sistemas que tengan los mismos valores de T_n y ζ tendrán la misma respuesta al desplazamiento $u(t)$ aún cuando uno de ellos tenga mayor masa o posea mayor rigidez que el otro.

En la figura III.4 se presenta la respuesta de sistemas de un grado de libertad para distintas condiciones de período y relación de amortiguamiento. Es evidente que para valores mayores de período (con una relación de amortiguamiento constante) el desplazamiento es mayor; de igual manera, si se establece un valor constante de T y se aumenta el valor de la relación de amortiguamiento ζ , la respuesta del sistema disminuye.

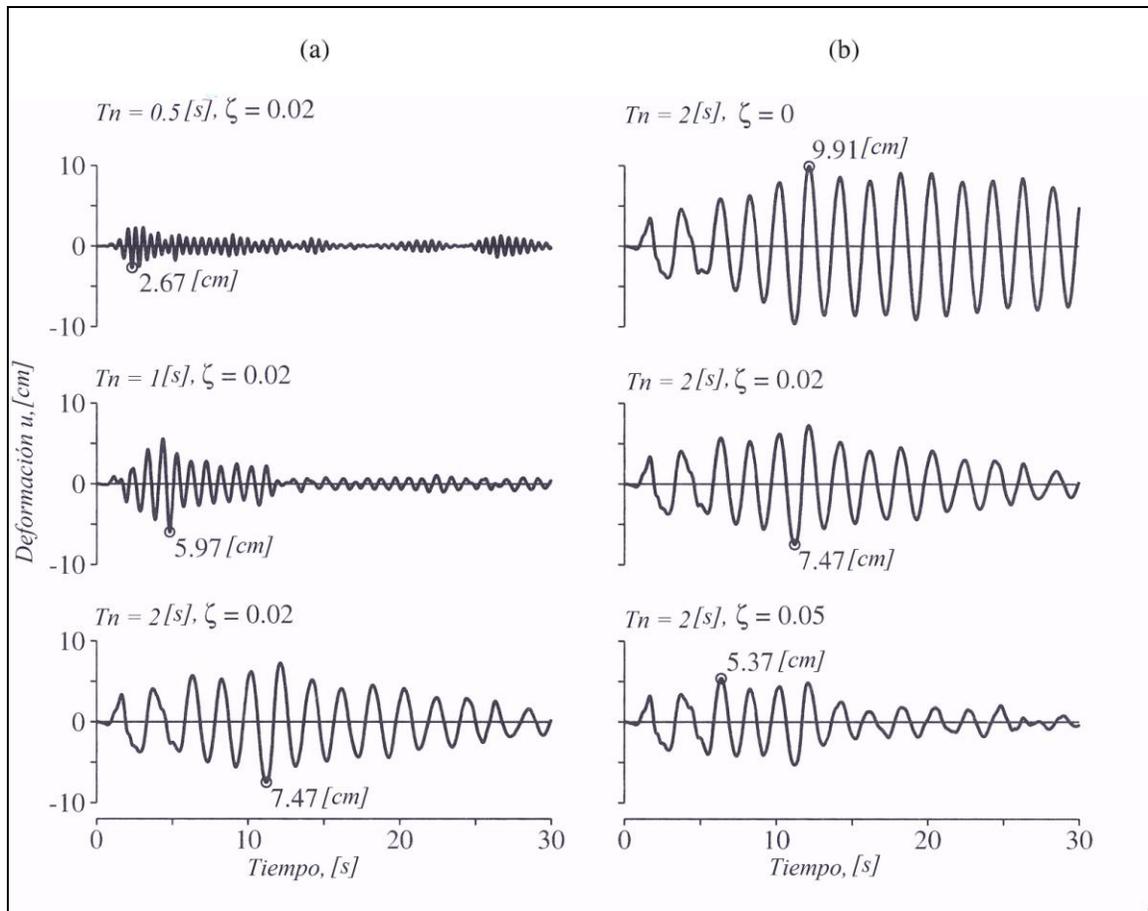


Figura III.4 Respuesta al desplazamiento de sistemas de un grado de libertad (ref. 23)

Espectros de respuesta. El espectro de respuesta (ER) constituye una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sísmico. En forma general, se puede definir como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en un sistema de un grado de libertad para distintas relaciones de amortiguamiento.

Para explicar la construcción de un espectro de respuesta se considera una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples con diferentes periodos de vibración T , y con igual factor de amortiguamiento ζ , como las mostradas en la figura III.5. Sometiendo todos estos osciladores a la acción de un mismo sismo (utilizando un registro de aceleraciones, $\ddot{u}_g(t)$), cada uno de ellos exhibirá una respuesta diferente, la cual puede representarse, por ejemplo, a través de la historia de desplazamientos, $u(t)$. Una vez calculada la respuesta de los osciladores es posible determinar el máximo de cada uno de ellos y representarlo en un gráfico en función del periodo de vibración, para obtener así un espectro de respuesta, es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro.

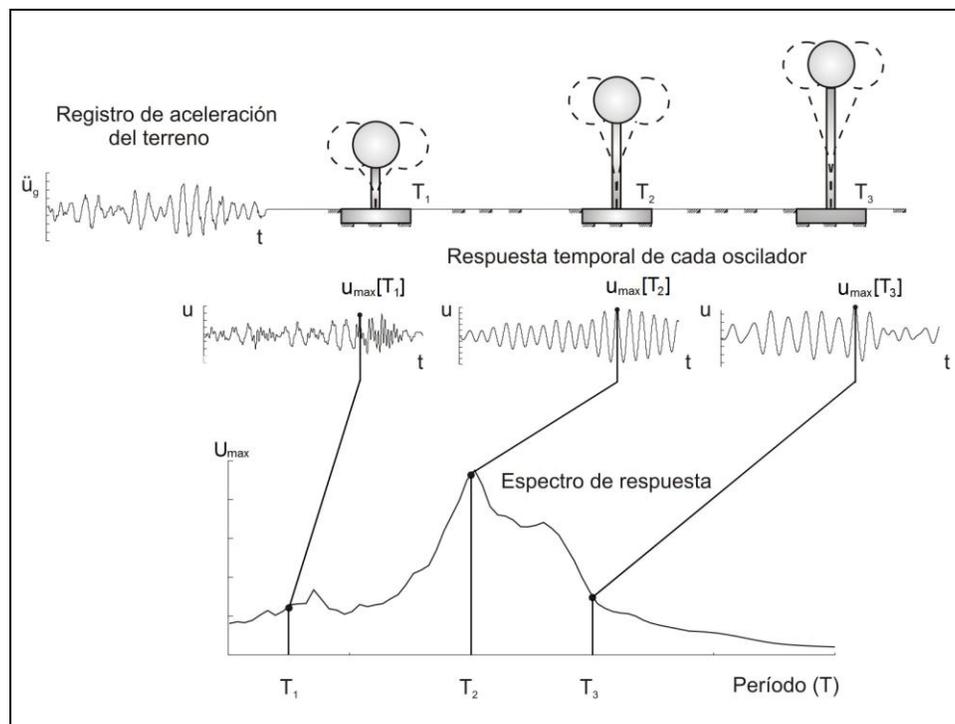


Figura III.5. Determinación de un espectro de respuesta

Existen diversos tipos de espectros de respuesta (ref. 24), siendo algunos de ellos los llamados pseudo-espectros de velocidad y pseudo-espectros de aceleración. El espectro de respuesta de pseudo-velocidad V para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural ω_n y con un desplazamiento $D=U_{max}$ producido por un movimiento sísmico del terreno está dado por:

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

V tiene unidades de velocidad y está relacionado con el valor máximo de la energía de deformación E_{So} almacenada en el sistema durante un temblor mediante:

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

Por otra parte, 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 $D= U_{máx}$ debido a un movimiento sísmico del terreno.

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

Se observa que 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

La figura III.6 muestra los tres tipos de espectros anteriormente descritos.

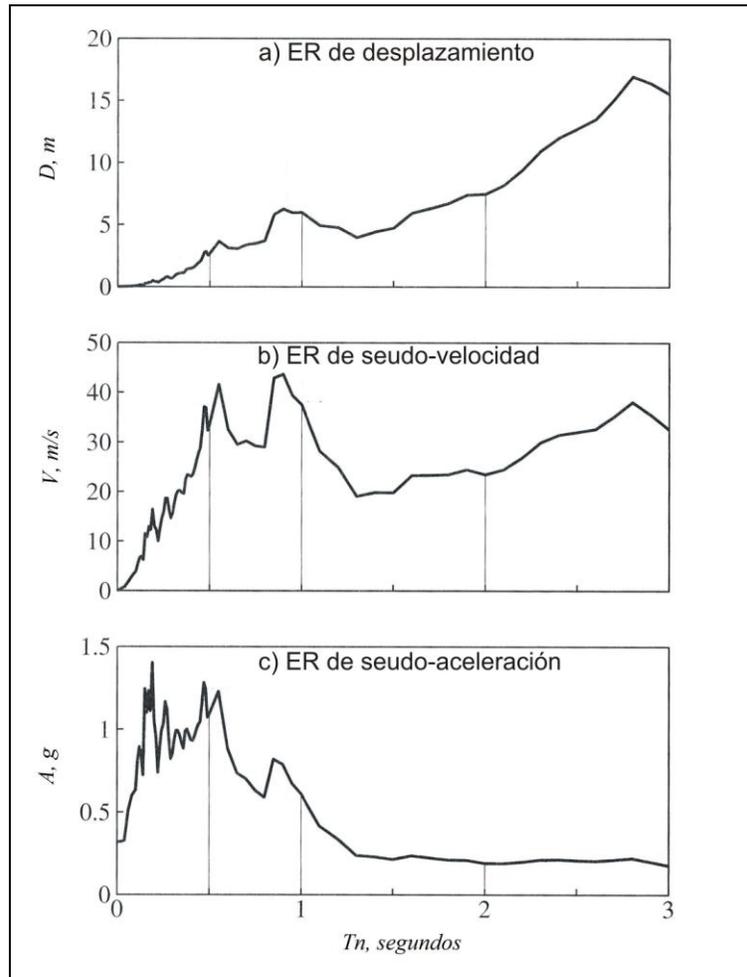


Figura III.6. Espectros de respuesta

III.2 Cálculo utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias

El estudio de problemas que implican vibraciones aleatorias es en realidad, una disciplina muy reciente dentro de la ingeniería, su interés se ha visto aumentado en gran medida por la necesidad del diseño de estructuras y maquinarias capaces de desarrollar un buen comportamiento al ser sometidas a cargas de naturaleza aleatoria. La teoría de vibraciones estudia el movimiento oscilatorio de los sistemas físicos, el cual es un movimiento que aparece por lo general en los sistemas mecánicos sometidos a la acción de fuerzas variables con el tiempo (ref. 25).

Las vibraciones se denominan *deterministas* cuando se conoce el valor o magnitud de las fuerzas excitadoras en cualquier instante, y se llaman *aleatorias* cuando no es posible conocer el valor de las fuerzas excitadoras en cualquier momento, en cuyo caso solamente se conocen valores estadísticos de las excitaciones. En este último caso no es posible calcular la respuesta exacta, y por ello se relacionan los valores estadísticos de la excitación con los de la respuesta (ref. 26).

Se dice que un sistema está vibrando cuando se encuentra agitado, temblando o de alguna manera moviendo de un lado a otro; si este movimiento es impredecible, se dice que se encuentra en *vibración aleatoria*.

El estudio de este fenómeno consiste en averiguar de qué forma las características estadísticas del movimiento de un sistema aleatoriamente excitado dependen de las características estadísticas de la excitación y de las propiedades dinámicas del sistema vibrante. La figura III.7 muestra el registro del desplazamiento x de un elemento sometido a una vibración aleatoria en función del tiempo t .

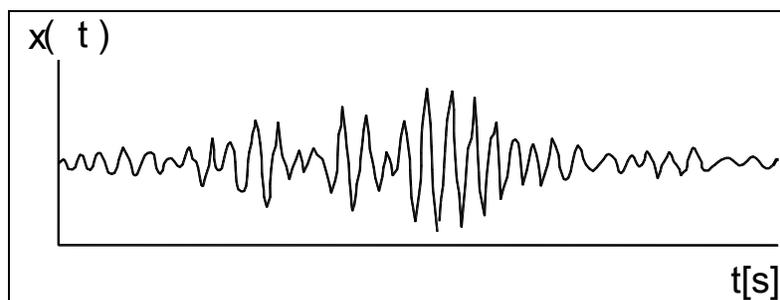


Figura III.7. Sistema sometido a vibración aleatoria

Debido a que el movimiento es aleatorio, no se puede predecir el valor exacto de x para un cierto instante, sin embargo, es posible hallar la probabilidad de que x se encuentre entre ciertos límites para ese valor de tiempo (ref. 27). De esta manera, es posible señalar que el tema de las probabilidades forma parte fundamental de la teoría de vibraciones aleatorias (TVA).

El origen de la TVA se remonta al siglo XX, cuando en 1956 Cartwright y Longuet-Higgins, interesados en el estudio del comportamiento de las ondas marinas obtuvieron la distribución de probabilidades del máximo de una función aleatoria (ref. 28). Tiempo después, estos conceptos fueron aplicados en problemas propios de la ingeniería sísmica al considerar que el movimiento provocado por temblores puede modelarse como un proceso estocástico estacionario y ergódico (ref.29). Un proceso estocástico es estacionario si sus propiedades estadísticas son invariantes en el tiempo, y ergódico si estas propiedades pueden ser determinadas a partir de una sola de sus realizaciones considerando promedios apropiados en el tiempo.

Estrictamente hablando, los acelerogramas son procesos que no cumplen con estas suposiciones, sin embargo, empíricamente se han obtenido buenos resultados al aplicar la TVA en la estimación de los espectros de respuesta con la ayuda de programas desarrollados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ref. 30).

La teoría de vibraciones aleatorias establece que el Espectro de Respuesta Estimado (ERE) estará dado por (ref. 31):

$$ERE = E(A_{m\acute{a}x}) = a_{cm} Fp \quad (3.10)$$

$A_{m\acute{a}x}$: pseudoaceleración máxima

$E()$: esperanza matemática

a_{cm} : aceleración cuadrática media

Fp : factor pico.

El cálculo de a_{cm} se fundamenta en el teorema de Parseval (ref. 32) del cual bajo las hipótesis señaladas se deduce que:

$$a_{cm} = \sqrt{\frac{M_0}{T_{cm}}} \quad (3.11)$$

donde T_{cm} es la duración de la señal y

$$M_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (3.12)$$

En la ecuación 3.12, $Y(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal cuyo máximo desea estimarse. Sea $a(t)$ el acelerograma producido por un sismo en alguna estación y $A(\omega)$ su correspondiente transformada de Fourier; para obtener el espectro de Fourier en la estación en la cual no existe registro se requiere un historial de registros con su correspondiente cociente espectral entre la estación que desea estimarse y la estación de la que se conoce el registro sísmico, dicho historial está dado por la FTP y en la TVA se denota por $H(\omega)$. Por lo tanto $Y(\omega)$ está dada por:

$$Y(\omega) = A(\omega) \cdot H(\omega) \quad (3.13)$$

Para obtener T_{cm} Boore (ref. 33) propone un resultado empírico calibrado para los sismos ocurridos en California:

$$T_{cm} = T_s + \left[\frac{1}{\frac{2\pi\zeta}{T_0}} \right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_s}{T_0} \right)^3}{\left(\frac{T_s}{T_0} \right)^3 + \frac{1}{3}} \right] \quad (3.14)$$

Donde ζ es el amortiguamiento crítico, T_0 es el período natural del oscilador elemental de un grado de libertad y T_s es la duración de la fase intensa del movimiento, la cual, para propósitos de este trabajo fue calculada utilizando el criterio propuesto por Reinoso y Ordaz (ref. 34).

Para obtener el factor pico Fp , se define a N como el número de cruces de la señal por el eje del tiempo y se estima mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{T_s}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{M_2}{M_0}} \quad (3.15)$$

donde:

$$M_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (3.16)$$

De acuerdo con la TVA el valor de Fp esta dado por:

$$Fp = \sqrt{2 \ln N} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln N}} \quad (3.17)$$

γ representa el valor de la constante de Euler, $\gamma = 0.577\dots$

Finalmente con las expresiones 3.10 a 3.17 es posible estimar espectros de respuesta de señales registradas así como de eventos en los cuales sólo se conoce el registro en una estación pero se cuenta con funciones de transferencia empíricas.

El marco teórico presentado con anterioridad, sirve de base para el cálculo de espectros de respuesta partiendo de registros acelerográficos obtenidos en estaciones de registro. Para la aplicación de la ecuación diferencial de movimiento, suele recurrirse a métodos numéricos para su solución, tales como el Método β de Newmark (ref. 35).

En este trabajo se ha utilizado la TVA para estimar espectros de respuesta en la ciudad de Puebla utilizando registros acelerográficos de las estaciones PBPP y SXPU; para ello se utilizó el programa llamado VIBEFES (ref. 36).

Para hacer posible la estimación del ERE es necesario contar con una base de registros compuesta por determinada cantidad de acelerogramas registrados simultáneamente en ambas estaciones. Posteriormente se calculan las FT para las mismas estaciones utilizando todos los registros comunes. Finalmente, se obtiene una FTP para cada componente, misma que será la entrada al sistema VIBEFES, el cual entregará como salida el ERE requerido.

A manera de ejemplo consideremos el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985, de magnitud $M = 8.1$ y cuyo registro acelerográfico se obtuvo en la estación SXPU, para poder obtener el ERE en la estación PBPP usando la TVA se debe proporcionar al programa VIBEFES los siguientes elementos:

- el registro acelerográfico de la estación SXPU por componente para ese sismo
- la FTP calculada (FTPH o FTPV según sea el caso)

Con esta información el programa proporcionará como salida el ERE en PBPP para la componente solicitada. La figura III.8 muestra de manera esquemática el procedimiento descrito.

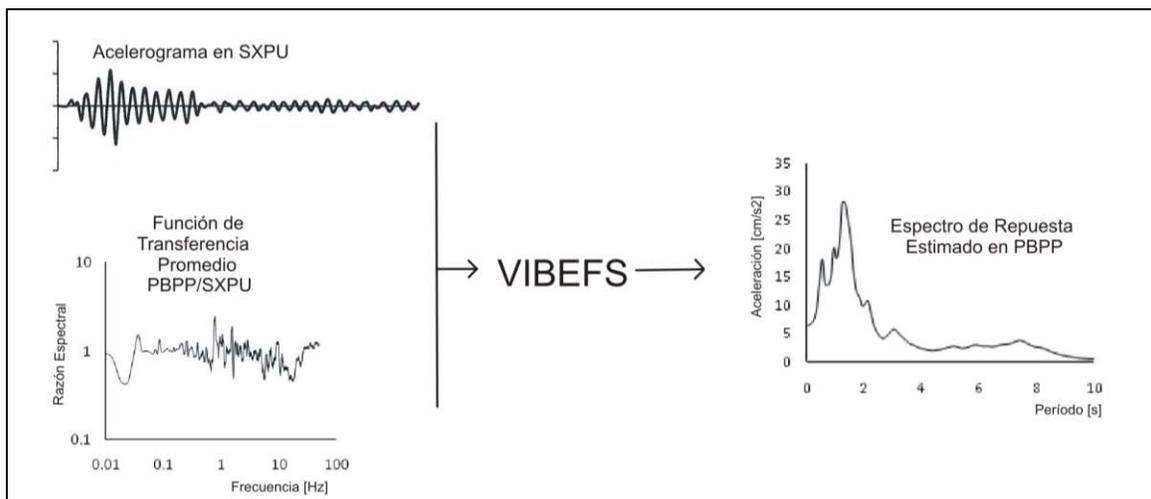


Figura III.8. Cálculo de un ERE

Con esta metodología es posible calcular los ERE en PBPP, sin embargo, es necesario cuestionar la veracidad de los resultados obtenidos por ello se han seleccionados dos sismos (tabla 6), para los cuales, existe un registro real en la estación PBPP, y por lo tanto es posible conocer su Espectro de Respuesta Real (ERR).

Tabla 6. Sismos de comprobación

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof. (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
20	19960225	7.1	16.13	98.27	8	PBPP, SXPU	323, 322	2.8, 6.3
36	19970121	5.6	16.24	98.29	5	PBPP, SXPU	311, 310	2.2, 2.4

Se ha supuesto que el registro acelerográfico de la estación PBPP es inexistente, y consecuentemente se ha calculado el ERE utilizando el procedimiento descrito para comparar los resultados obtenidos a través de la TVA (figuras III.9).

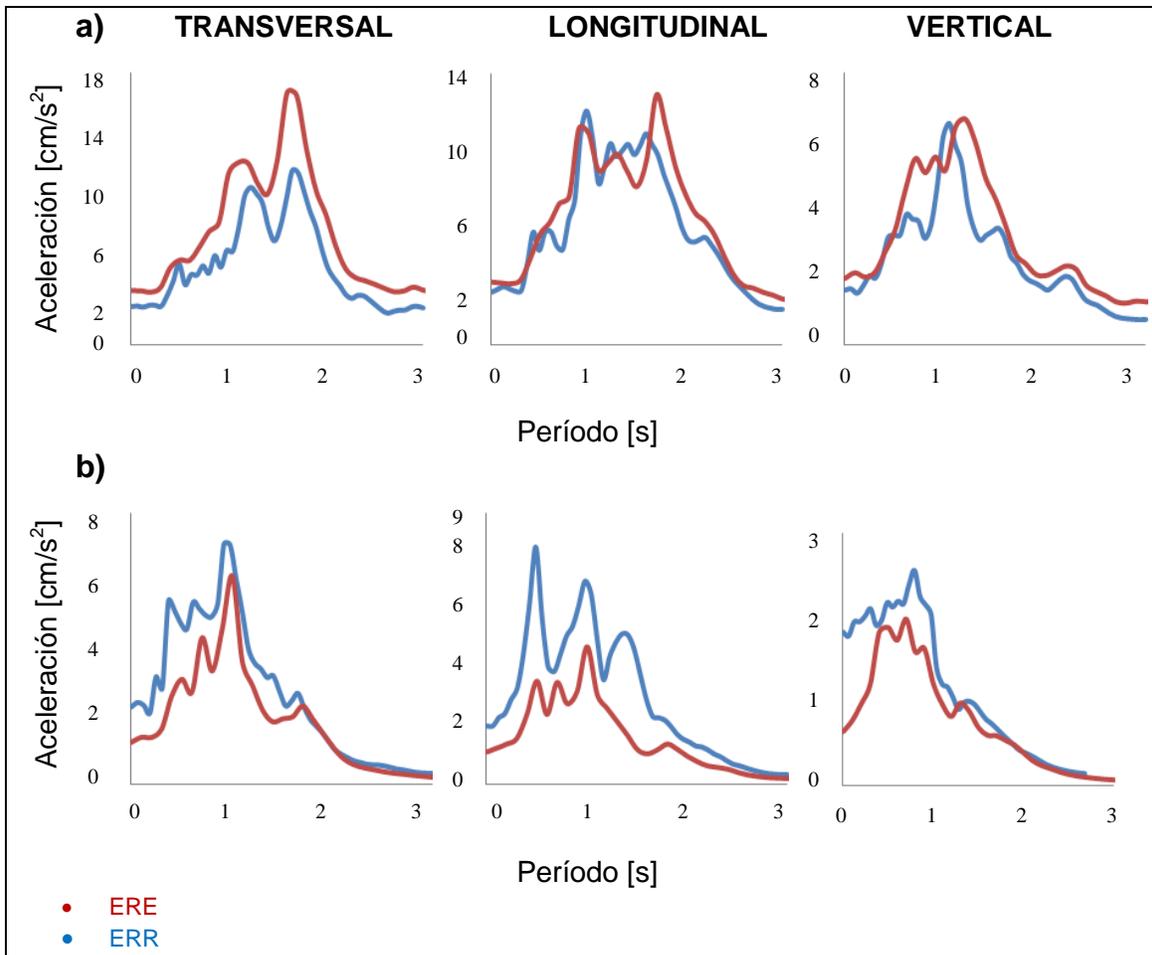


Figura III.9. ERE y ERR para a) sismo 20 y b) sismo 36

En la tabla 3 del capítulo I, se observa que la RACP cuenta con registros acelerográficos que datan de fechas remotas y de eventos tan importantes como los sismos ocurridos en septiembre de 1985. Sin embargo, debido a que en esa época no se contaba con una mayor cantidad de estaciones de registro, tales eventos fueron registrados únicamente por la estación SXPU.

Resulta de gran interés conocer cuáles fueron los efectos provocados por estos eventos en zonas diferentes a aquella en la que se ubica la estación SXPU, y para fines de este trabajo, los espectros de respuesta en el sitio donde se ubica la estación PBPP. Para llevar a cabo la estimación de dichos espectros, se cuenta con un historial de sismos registrados simultáneamente en ambas estaciones.

En la tabla 7 se muestran los sismos que han sido seleccionados para estimar su ERE utilizando la TVA, las figuras III.10 y III.11 muestran los ERE obtenidos

Tabla 7. Sismos seleccionados para obtener ERE en PBPP

No.	Sismo	M	Coordenadas		Prof. (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (Km)	Acel. Máx. (cm/s ²)
			Lat. N	Long. W				
1	19781129.1	7.8	16.00	96.69	19	SXPU	374	20.1
2	19781129.2	5.3	15.74	96.83	33	SXPU	394	2.3
3	19781129.3	4.5	15.74	96.18	33	SXPU	425	3.9
4	19790314.1	7.4	17.49	101.26	28	SXPU	365	14.8
9	19850919.1	8.1	18.08	102.94	15	SXPU	510	32.6
10	19850921.1	7.6	18.02	101.48	15	SXPU	363	24.6

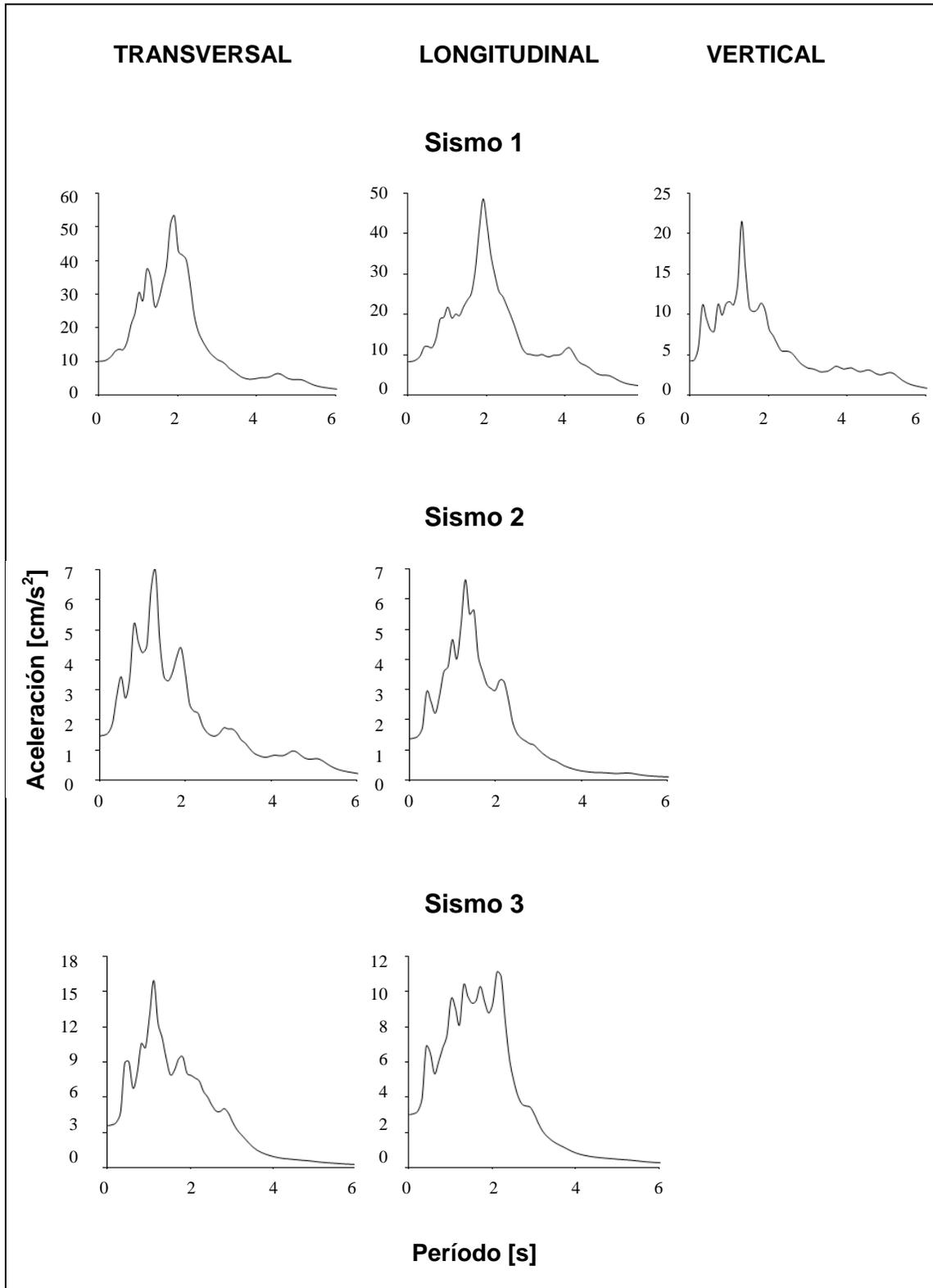


Figura III.10. Espectros de respuesta estimados en PBPP

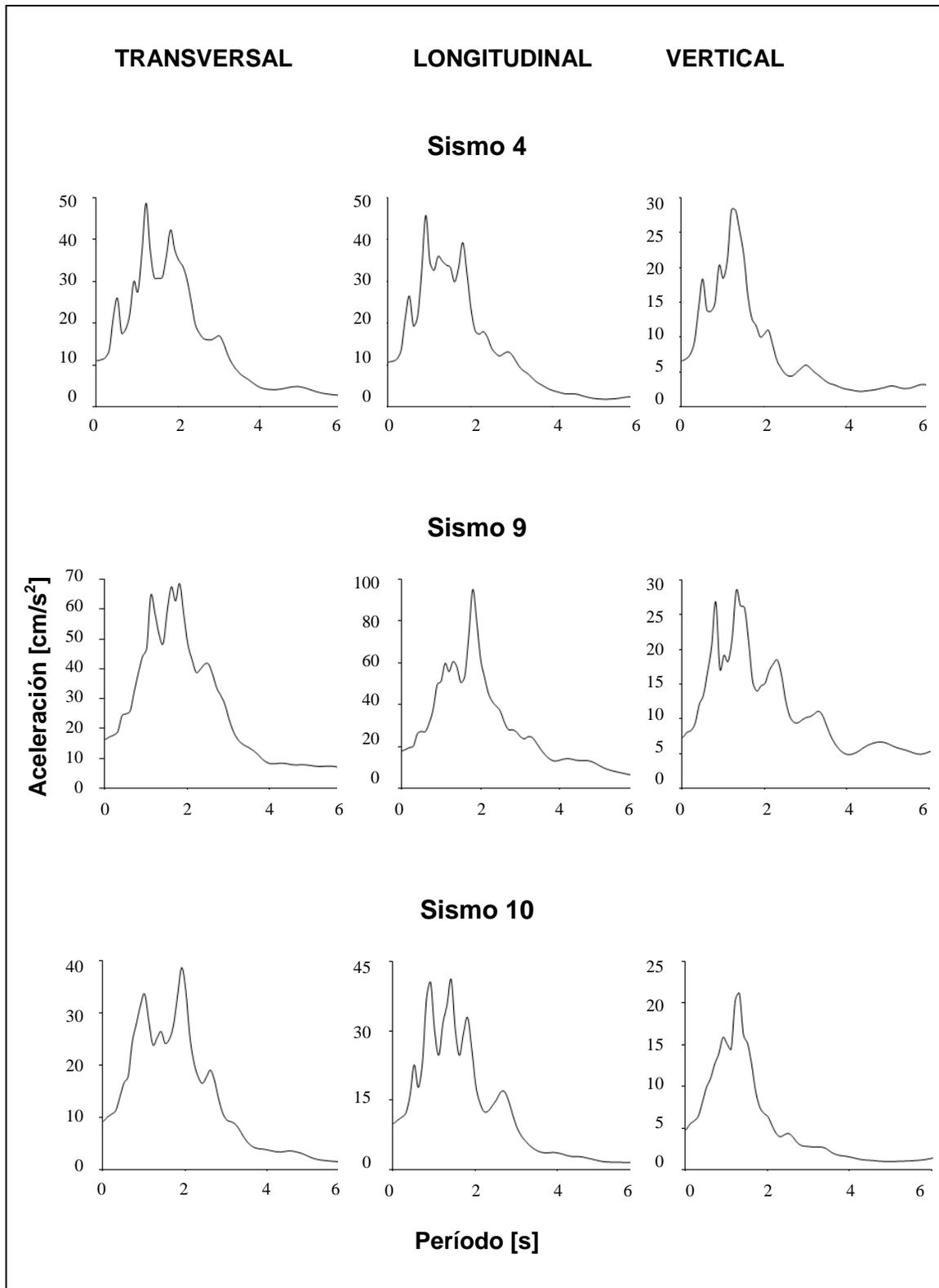


Figura III.11. Espectros de respuesta estimados en PBPP

III.3 Análisis de Resultados

La figura III.9a muestra los espectros de respuesta en la estación PBPP para el sismo del 25 de Febrero de 1996, evento 1, tanto el estimado (ERE) a través de la TVA como el real (ERR), obtenido del registro acelerográfico de la estación. Es posible apreciar que la forma general del ERE es similar al ERR en cada una de las tres componentes del sismo, sin embargo, se aprecian algunos resultados que es conveniente analizar por separado.

- En lo referente a la componente vertical la ordenada espectral máxima para el ERR es de $6.54 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ mientras que para el ERE es de $6.64 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ resultando una diferencia de $0.1 \text{ [cm/s}^2\text{]}$, una diferencia muy aceptable. Sin embargo, existe un desfase en el período en que se presenta este máximo, pues para el ERR se presenta en $T = 1.04 \text{ [s]}$ y para el ERE en $T = 1.20 \text{ [s]}$, aunque una diferencia de 0.16 [s] se considera buena en estos términos.
- La componente transversal, por su parte, presenta la mayor similitud en términos de la forma del espectro para cualquiera de las tres componentes, aunque los valores de las ordenadas son mayores para el caso del ERE. La ordenada espectral máxima para esta componente en el caso del ERR es de $11.56 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ y para el ERE de $16.70 \text{ [cm/s}^2\text{]}$, presentado una diferencia de $5.14 \text{ [cm/s}^2\text{]}$, diferencia por demás aceptable. Por su parte, la ordenada máxima para el caso del ERR se presenta en $T = 1.65 \text{ [s]}$ y para el ERE en $T = 1.60 \text{ [s]}$, presentando una diferencia muy pequeña de solamente 0.05 [s] .
- Finalmente, en los espectros obtenidos para la componente longitudinal, aunque en general se aprecia que la tendencia de la forma del ERE es similar a la del ERR, los picos máximos se encuentran ubicados en extremos opuestos, pues para el caso del ERR, la curva presenta dos máximos representativos, hallándose el mayor de ellos en el que se ubica en el período más pequeño, mientras que para el ERE el máximo se ubica en el de mayor período mayor. La ordenada máxima para el caso del ERR es de $12.10 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ y para el ERE de $12.90 \text{ [cm/s}^2\text{]}$, esto es, una diferencia de $0.8 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ que representa una diferencia mínima, se observa de esta manera, que a pesar de la diferencia

existente entre la ubicación de los máximos absolutos para cada uno de los espectros, los valores de estos máximos son muy cercanos entre sí, por lo que la estimación es muy acertada. En lo referente a los valores del período dominante, en el ERR toma un valor de $T = 0.99$ [s] y para el ERE un valor de $T = 1.70$ [s], lo que representa una diferencia de poco más de medio segundo, exactamente 0.71 [s], diferencia un tanto significativa y que será necesario tomar en cuenta para un posterior uso de la información.

Resumiendo, los valores de las ordenadas espectrales obtenidas a través de la TVA para este sismo resultan mayores a los valores obtenidos del registro acelerográfico, por lo que, estrictamente hablando, dicha teoría proporcionó una sobreestimación de las respuestas para este sismo, sin embargo, los valores de tales diferencia no sobrepasan siquiera los 10 [cm/s^2], y es por ello que podemos concluir que el espectro estimado es muy aceptable. En cuanto al período dominante del sitio, se presentan variaciones dentro del intervalo que va de $T = 0.99$ [s] a $T = 1.70$ [s].

En la misma figura se presentan los espectros de respuesta obtenidos para la estación PBPP para el sismo del 21 de Enero de 1997, evento 1, tanto el ERE calculado utilizando la TVA como el ERR obtenido del acelerograma registrado en la estación. De manera análoga al caso anterior, la tendencia en la forma de los espectros es similar para los ERR y los ERE determinados. A continuación se analizan por separado los resultados obtenidos para cada componente.

- Para el caso de la vertical, la estimación de los valores de las respuestas resulta inferior a los valores reales, teniendo un máximo de 2.98 [cm/s^2] para el ERR y un máximo de 2.31 [cm/s^2], esto es una diferencia de 0.67 [cm/s^2], que representa una diferencia muy pequeña. Las ordenadas máximas espectrales para el ERR y el ERE se ubican respectivamente en $T = 0.80$ [s] y en $T = 0.70$ [s], proporcionando una diferencia de $.01$ [s] muy aceptable.
- Al igual que en la vertical, la componente transversal presenta una subestimación de los valores de las ordenadas espectrales, sin embargo, dichos valores son, de igual manera, despreciables. Para el caso del ERR se tiene una ordenada espectral máxima de 7.11 [cm/s^2] en $T = 0.95$ [s]; y para el ERE se

obtuvo un máximo de $6.16 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ en $T = 1.01 \text{ [s]}$, resultando diferencias de $0.95 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ y 0.06 [s] respectivamente, que, como en el caso de la componente vertical, resultan despreciables.

- Finalmente, en la componente longitudinal, se observa que en ambos espectros se conserva la misma tendencia en cuanto a forma, presentando cada uno tres picos representativos, sin embargo, al igual que en la componente longitudinal del sismo anterior, las ordenadas espectrales máximas se ubican en extremos opuestos, pues en el caso del ERR, el máximo absoluto se encuentra en el último de los tres y para el ERE se ubica en el primero de ellos. Los valores de dichos máximos y sus respectivos períodos son para ERR de $7.87 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ en $T = 0.49 \text{ [s]}$ y para ERE de $4.60 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ en $T = 1$ arrojando $3.27 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ y 0.51 [s] de diferencia.

De manera contraria al sismo anterior, los valores de respuesta calculados a través de la TVA para este caso, han resultado menores a los valores reales obtenidos del registro acelerográfico real del evento, sin embargo, las diferencias no sobrepasan los $10 \text{ [cm/s}^2\text{]}$ al igual que el caso precedente, y por lo tanto, los resultados son satisfactorios.

Se observa que los cambios más significativos en el período de respuesta del sitio se observan en ambos casos, en la componente longitudinal, en ambos casos la variación del período dominante supera 0.5 [s] , por lo que se deberá tener presente este hecho para usos posteriores de los resultados obtenidos.

Basándose en los resultados obtenidos para los dos casos analizados anteriormente se puede concluir que la aplicación de la TVA para estimar espectros de respuesta en la estación PBPP han sido satisfactorios, y por lo tanto, los ERE para los sismos de la tabla 8 y presentados en las figuras III.9 a III.14 reflejan en gran medida, el comportamiento real del sitio.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES

IV. CONCLUSIONES

El interés por conocer la respuesta al movimiento del terreno al ocurrir un evento sísmico surge de la importancia que dicha respuesta tiene en la seguridad de las estructuras y los seres humanos.

En el presente trabajo se ha propuesto utilizar la Teoría de Vibraciones Aleatorias (TVA) como un método alternativo para estimar espectros de respuesta en la zona centro de la ciudad de Puebla, debido principalmente al hecho de tratarse de una de las ciudades más importantes del país y en la que además se cuenta con una red de acelerógrafos operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Estrictamente hablando el uso de la TVA implica contar con una gran cantidad de registros acelerográficos a través de los cuales se hace posible representar en gran medida los efectos de sitio de un lugar respecto a otro, de esta manera se puede tener mayor certeza que la respuesta sísmica estimada tendrá una mejor aproximación al comportamiento real del terreno.

Hasta la fecha, la RACP cuenta con un vasto catálogo compuesto de 176 acelerogramas obtenidos a partir de 94 sismos, sin embargo, muchos de estos registros no cuentan con la calidad adecuada que permita su análisis. En la presente investigación, dicha situación representó un problema importante, el cual pudo ser resuelto, pero que de no haberse presentado hubiera permitido la obtención de mejores resultados.

Cabe señalar que la principal causa de este problema radica en los equipos de monitoreo sísmico, dado que algunos de ellos son viejos y poseen limitaciones tecnológicas considerables comparados con algunos de los equipos más nuevos, lo cual se traducen en registros de mala calidad.

De esta manera, una primera conclusión y recomendación derivada de este trabajo es que, en lo posible, debe realizarse un esfuerzo para modernizar el equipo no solamente de ésta, sino de todas las redes acelerográficas con que cuenta el país, pues la información obtenida de ellas es de gran valor y es necesario darle la importancia que merece.

El subsuelo de la ciudad de Puebla presenta una composición estatigráfica muy diversa, y aún en sitios cercanos puede presentarse una variación importante; es por ello que a pesar de la cercanía de las estaciones SXPU y PBPP no es posible descartar la influencia de este hecho en la estimación de espectros de respuesta.

Al utilizar la TVA se ha comprobado en esta investigación que es posible modelar de manera adecuada una función de transferencia representativa de los efectos de sitio entre ambas estaciones salvando esta dificultad. Los espectros de respuesta estimados a partir de estas funciones poseen una gran semejanza con los espectros de respuesta reales calculados para la estación PBPP obtenidos a partir de registros acelerográficos existentes. Esta semejanza puede apreciarse en la forma general del espectro de respuesta, así como en los valores de respuesta de la aceleración para los sismos analizados, con diferencias mínimas despreciables.

De igual manera, los valores máximos de la respuesta, indicativos del período dominante del sitio, coinciden para los espectros estimados con la TVA y los espectros reales.

Con los resultados obtenidos se puede concluir satisfactoriamente que la TVA ofrece un método alternativo, confiable y eficiente para estimar espectros de respuesta en sitios donde no se tiene registro sísmico, pero que se cuenta con un importante banco de datos que permita estimar funciones de transferencia empíricas que permitan estimar espectros de respuesta utilizando la TVA .

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Gobierno del Estado de Puebla, (2005), "Enciclopedia de los Municipios de México, Puebla", México.
2. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación General de Minería, (1995), "Monografía geológica-minera del estado de Puebla", México.
3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2005), "Anuario Estadístico, Puebla", México.
4. Tolson G, (1998), "La Teoría de la Tectónica de Placas y la Deriva Continental", Instituto de Geología, UNAM, México.
5. Gobierno del Estado de Puebla. Sistema Estatal de Protección Civil, (2000), "Plan Operativo para Emergencias Sísmicas", México.
6. Beles A, Ifrim M y García A, (1975), "Elementos de Ingeniería Sísmica", Omega, España.
7. Figueroa J, (1974), "Sismicidad en Puebla; Macrosismo del 28 de agosto de 1973", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe # 343, México.
8. Mooser F, (1972), "The Mexican Volcanic Belt: Structure and Tectonics", Geofísica Internacional, vol. 12 # 2, México.
9. Auvinet G, "Estudio preliminar del subsuelo de la Ciudad de Puebla, Pue.", Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
10. 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.
11. Iglesias J, (1994), "Zonificación sísmica de algunas ciudades mexicanas", Universidad Autónoma Metropolitana, México (1994).
12. 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.
13. 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.

14. 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", 2° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España.
15. 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, México.
16. Servicio Sismológico Nacional, <<http://ssn.unam.mx>>
17. Benson H T, (2002), "Principles of vibration", *Oxford University Press*, EUA.
18. Brigham E O, (1998), "The Fast Fourier Transform and its Applications", *Prentice-Hall Inc.*, EUA.
19. Ordaz M, Castellanos F y Zapata A, (2000), "DEGTRA A4 versión 5.2", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
20. Hart G y Wong K, (2000), "Structural Dynamics for structural Engineers", *John Wiley and Sons*, EUA.
21. Newland D E, (1983), "Vibraciones aleatorias y análisis espectral", AC Libros Científicos y Técnicos, España.
22. Timoshenko S, (1974), "Vibration problems in engineering", *John Wiley and Sons*, EUA.
23. Chopra A K, (2001), "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", *Prentice Hall*, EUA.
24. *Ídem.*
25. Benson H T, (2002), *op cit.*
26. Palm III W J, (2007), "Mechanical Vibration", *John Wiley and Sons*, EUA.
27. Newland D E, (1983), *op cit.*
28. Cartwright D E y Longuett-Higgins M S, (1956), "The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function", *Proc. Royal Soc. London*, vol. A237. Inglaterra.
29. Papoulis A, (1985), "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes", *McGraw Hill International Book Company*, EUA.

30. Ordaz M y Reinoso E, (1987), "Uso de la Teoría de Vibraciones Aleatorias para la Determinación de Espectros de Diseño del Reglamento para las Construcciones del DF", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.
31. Reinoso E, (1986), "Un Algoritmo para el Cálculo Aproximado de Espectros de Respuesta Sísmica basado en la Teoría de Vibraciones Casuales", Tesis de licenciatura, UNAM, México.
32. Papoulis A, (1985), *op cit.*
33. Boore D M y Joyner W B, (1984), "A note on the use of the random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signal", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 74 # 5, EUA.
34. Reinoso E y Ordaz M, (2001), "Duration of strong ground motion during Mexican Earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period", *Earthquake and Structural Dynamics*, vol. 30 # 5, México.
35. Bazán E y Meli R, (1999), "Diseño Sísmico de Edificios", Limusa Noriega Editores, México.
36. Ordaz M y Singh S K, (2006), "Sistema de cómputo VIBEFs", segunda versión, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.