



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

INSTITUTO DE INGENIERIA

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO SISMICO
EN UNA ZONA DE SUELOS BLANDOS DEL
VALLE DE OAXACA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA
(GEOTECNIA)**

P R E S E N T A:

VICTOR HUGO MEDRANO RIVERA

TUTOR:

M. I. LEONARDO ALCANTARA NOLASCO

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Alberto Jaime Paredes

Secretario: Dr. Efraín Ovando Shelley

Vocal: M. I. Leonardo Alcántara Nolasco

1^{er} Suplente: M. I. Agustín Deméneghi Colina

2^{do} Suplente: Dr. Osvaldo Flores Castrellón

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERIA, CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

M. I. LEONARDO ALCANTARA NOLASCO

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad y las facilidades para conseguir una formación académica y humana invaluable.

A los profesores del programa de maestría y doctorado de la Facultad de Ingeniería, por proporcionarme los conocimientos y herramientas para desempeñarme en el ámbito profesional, y por convertirse en ejemplos a seguir; especialmente al Dr. Alberto Jaime, Dr. Efraín Ovando, Dr. Osvaldo Flores, Dr. Abraham Díaz y M.I. Agustín Deméneghi.

Al Instituto de Ingeniería, en particular a la Coordinación de Instrumentación Sísmica, por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo de becarios y por todo los años de experiencia, aprendizaje y convivencia que compartí con su personal. Un agradecimiento especial:

Al M.I. Leonardo Alcántara Nolasco y al M.I. Marco Antonio Macías Castillo, por las jornadas de trabajo que dedicaron a la realización de este proyecto, por su confianza, apoyo y amistad.

A los ingenieros Alejandro Mora, Mauricio Ayala, Israel Molina y David Almora, por su apoyo en las labores necesarias para la implementación de la estación acelerográfica utilizada en esta investigación.

A los ingenieros Ricardo Vázquez, Miguel Torres, Juan M. Velasco y Luis A. Aguilar, por compartir sus conocimientos en invaluable asesorías.

Al personal de área de proceso, las ingenieras Ana Laura Ruiz, Citlali Pérez y Rosario Delgado, así como a Miguel Soto, por el apoyo y la confianza que me brindaron durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A Karla Martínez por brindarme su amor, compañía, confianza y apoyo.

A mis amigos Luis, Jenaro, Miguel, Jorge, Gonzalo, Christian y Rafael, por sus amistad y apoyo, y por todos estos años juntos.

A los ingenieros Karen Ayala y Abel Sánchez, por las horas de estudio y los buenos momentos dentro y fuera de las aulas, así como por su apoyo en la realización de pruebas para esta investigación.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN UNA ZONA DE SUELOS BLANDOS DEL VALLE DE OAXACA

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
I.1. Antecedentes	7
I.2. Actividad sísmica en Oaxaca	10
I.3. Geología de Oaxaca	17
II. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN OAXACA	26
II.1. Red de acelerógrafos de Oaxaca	27
II.2. Equipo de monitoreo y registros obtenidos	32
II.3. Cobertura y demandas actuales de instrumentación	36
III. INSTALACIÓN DE UNA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA EN UNA ZONA DE SUELOS BLANDOS	37
III.1. Zonificación sísmica local	38
III.2. Selección del sitio	43
III.3. Características de la estación	50
IV. RESPUESTA SÍSMICA DEL SITIO	62
IV.1. Antecedentes teóricos	63
IV.2. Funciones de transferencia empíricas	68
IV.3. Estimación de espectros de respuesta utilizando la Teoría de Vibraciones Aleatorias	72
IV.4. Resultados obtenidos	75
V. CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS	83

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La actividad sísmica ha estado presente en el planeta desde su formación. La importancia de este fenómeno para la humanidad es tal que siempre ha existido interés por su estudio desde épocas remotas. Los datos más antiguos sobre temblores de los que se tiene conocimiento corresponden a registros de más de 3000 años, hallados en China.

A pesar del temprano interés que las civilizaciones han mostrado por la sismicidad, la experiencia de la humanidad en el estudio de los temblores es reducida, en comparación con los millones de años durante los cuales han ocurrido estos eventos.

En la actualidad existen diferentes disciplinas encargadas del análisis de diversos aspectos de la actividad sísmica; entre ellas se encuentra la Ingeniería Sísmica, cuyo objetivo es el estudio de la influencia de los sismos en la sociedad y su medio, y el desarrollo de métodos para reducir sus efectos negativos.

Aunque los sismos son un fenómeno complejo, se ha podido obtener conocimiento sobre sus mecanismos de generación y tasas aproximadas de ocurrencia en diversas regiones. Mundialmente existen grandes extensiones geográficas conocidas como *placas tectónicas*, las cuales se encuentran en constante movimiento y su interacción es causante del mayor porcentaje de la actividad sísmica del planeta. En México, una considerable fracción de los sismos ocurridos en el país tienen su origen en la zona de subducción y son producto de la interacción de las placas Norteamericana, Cocos, Riviera y del Pacífico.

Al ocurrir un sismo se producen diversos tipos de ondas que se clasifican en ondas de cuerpo y de superficie; las primeras se propagan en el interior del planeta y se dividen en primarias (P), que se caracterizan por viajar paralelamente a la trayectoria de propagación mediante procesos de compresión y dilatación longitudinal; y secundarias (S), que se transmiten perpendicularmente a dicha trayectoria (figura 1). Debido a los mecanismos de propagación, la velocidad de las ondas P es superior a la de las ondas S.

Por su parte, las ondas superficiales son resultado de la interacción entre las ondas de cuerpo y la superficie terrestre, constituyendo ésta su medio de propagación. Existen diversos tipos, aunque para propósitos ingenieriles las más importantes son las ondas Rayleigh y Love (figura 1). Las ondas Rayleigh son producto de la interacción de las ondas P y las componentes verticales de las ondas S con la superficie terrestre, mientras que las Love se deben a la interacción de ésta con las componentes horizontales de las ondas S.

La mayor parte del recorrido de las ondas sísmicas desde la fuente hasta un sitio particular se produce a través de cientos de kilómetros de materiales rocosos; sin embargo, es común que el trayecto final hacia la superficie se realice a través de depósitos de suelo de espesor variable y de rigidez diferente a la de la roca, que pueden producir modificaciones en el movimiento superficial.

Durante su propagación, las ondas son sometidas a procesos de refracción y reflexión en las fronteras entre los diferentes materiales geológicos. Estos procesos, junto con otros factores, son responsables de la alteración de las características del movimiento sísmico. Las modificaciones de mayor relevancia tienen lugar en la parte final de la travesía, por lo que los depósitos de suelo tienen un papel importante en la determinación de las características del movimiento superficial.

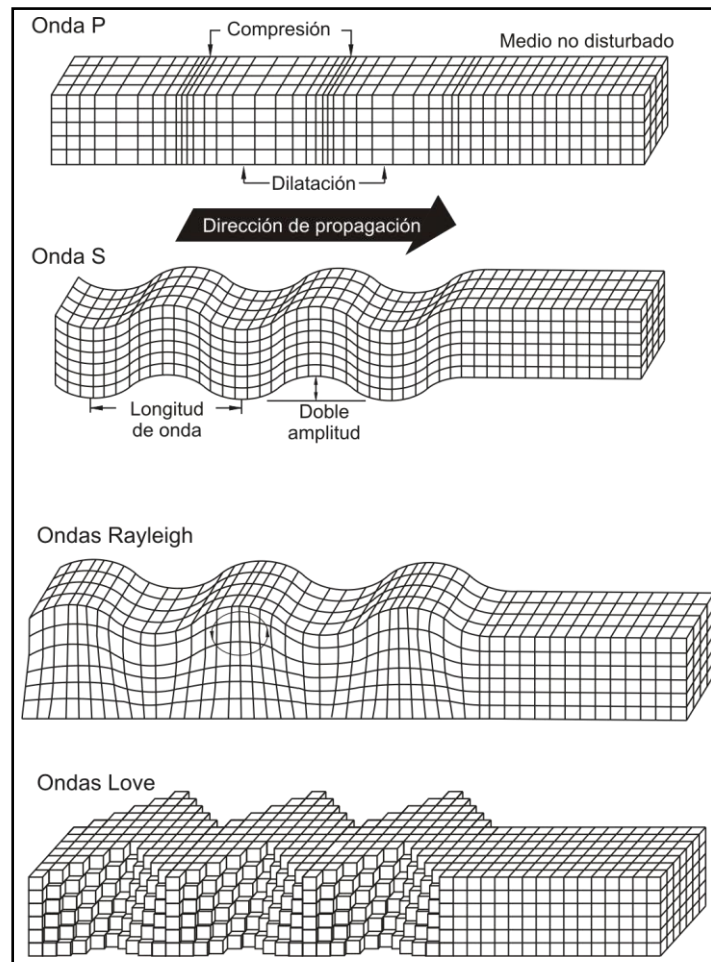


Figura 1. Ondas de cuerpo y superficie (ref. 1)

La modificación de la respuesta dinámica superficial se debe a diversos factores, entre los cuales se destacan los siguientes:

- Basamento rocoso. Define las características del movimiento previas a la propagación a través de la masa de suelo.
- Espesor del depósito. Influye en diversos parámetros del movimiento como la velocidad y tiempo de propagación desde el basamento hasta la superficie.
- Topografía y morfología. La forma y dimensiones tanto del depósito como de la cuenca basal determinan efectos importantes de reflexión y concentración de energía. Adicionalmente, la existencia de mesetas, cerros, cañadas y otras formaciones puede dar lugar a efectos locales que se manifiestan en la modificación de la respuesta superficial.
- Estratigrafía y nivel freático. Producen fenómenos de refracción y reflexión de ondas; así mismo, inciden en la distribución e inversión de esfuerzos durante las sollicitaciones dinámicas ocasionadas por los sismos.
- Propiedades dinámicas del suelo. Controlan la respuesta dinámica a través de las características de compresibilidad y rigidez del medio, lo cual modifica los valores de velocidad de propagación de ondas P y S y la capacidad para dispersar energía.

La influencia de los depósitos en la respuesta sísmica del terreno ha sido reconocida desde hace tiempo. La experiencia indica que el suelo como medio de propagación es responsable en gran medida de las alteraciones que provocan el aumento de la intensidad del movimiento y de los daños asociados a él.

La naturaleza y distribución de los daños provocados por el movimiento del terreno están fuertemente influenciadas por la respuesta del suelo ante sollicitaciones cíclicas, las cuales, en el caso de los sismos, se caracterizan por ser cargas de magnitudes altas aplicadas en intervalos de tiempo muy breves.

El conocimiento de las propiedades dinámicas es imprescindible para el tratamiento adecuado de una gran variedad de problemas de suelos sometidos a cargas cíclicas; sin embargo, en el caso del fenómeno sísmico, éste induce grandes niveles de deformación y esfuerzo que muchas veces escapan al tratamiento de algunas metodologías tradicionales de la mecánica de suelos.

Una de las mejores herramientas para el estudio de este problema son los registros de la oscilación del terreno durante la ocurrencia de un temblor. La descripción del movimiento puede ser complicada, sin embargo, en la práctica basta con la especificación de la vibración a partir de tres componentes de traslación ortogonales entre sí.

En Ingeniería, los registros consisten frecuentemente en historias tiempo-aceleración del movimiento conocidas como acelerogramas, los cuales contienen una gran cantidad de información que permite conocer el comportamiento del terreno ante sollicitaciones sísmicas.

Los registros acelerográficos son la base para la aplicación de metodologías teóricas y empíricas para la caracterización del comportamiento sísmico de los depósitos de suelo, cuya determinación es uno de los problemas más importantes de la Ingeniería Geotécnica.

El estudio de la respuesta sísmica del terreno tiene como fin estimar los parámetros del movimiento superficial (desplazamiento, velocidad, aceleración, período natural de vibración, entre otros) para el desarrollo de espectros de respuesta y diseño que permitan evaluar los esfuerzos y deformaciones dinámicos que tienen influencia en diversos problemas geotécnicos, como capacidad de carga de cimentaciones, estabilidad de estructuras de retención y licuación de arenas, entre otros.

Objetivo

La finalidad de este estudio es estimar la respuesta sísmica en la zona sur del valle de Oaxaca, en la cual se ha identificado la existencia de depósitos de suelo capaces de producir efectos de amplificación del movimiento sísmico.

Alcances

El tratamiento de los problemas en Ingeniería requiere de la recolección e investigación de la información existente para su análisis, a fin de identificar los factores que puedan influir en la solución, por ello, el primer capítulo de este trabajo exhibe los datos recopilados sobre las características de la zona de estudio.

El tema de esta investigación está ligado a la actividad sísmica en Oaxaca, por lo que, en el capítulo II se presenta una reseña sobre la ocurrencia e importancia de los temblores en la región, así como la historia de la instrumentación y monitoreo de este fenómeno.

Posteriormente, en el capítulo III se explica el proceso de selección del sitio e instalación de la estación acelerográfica de campo libre en la zona de suelos blandos de Oaxaca, mencionándose algunas impresiones preliminares de las características del depósito.

El capítulo IV muestra los antecedentes teóricos utilizados para el análisis de la respuesta dinámica del sitio, así como los resultados de su aplicación a los registros para la estimación de los espectros de respuesta de sismos históricos.

Finalmente, las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos son presentadas en capítulo V.

CAPÍTULO I

Características de la zona de estudio

I. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

I.1 Antecedentes

Riesgo sísmico

Un sismo es un movimiento vibratorio del suelo que modifica su estado de reposo relativo así como el de los cuerpos que se apoyan directamente en él. Las causas que los originan son diversas, entre ellas se encuentran las explosiones naturales o causadas por el hombre, impacto de meteoritos, eventos volcánicos, colapso de estructuras geológicas y, principalmente, los procesos tectónicos (ref. 2).

Se llama *riesgo sísmico* a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de un sismo que cause en un lugar cierto efecto definido como pérdidas o daños determinados. Es requisito esencial para su determinación el conocimiento científico de los mecanismos de generación de los temblores, así como de las características que pueden tener consecuencias desastrosas para las poblaciones humanas.

El estudio sistemático de los temblores en ingeniería es reciente, su mayor desarrollo se ha llevado a cabo en los últimos 40 a 50 años. Uno de los principales objetivos del análisis de estos eventos es conocer los efectos nocivos de los sismos sobre la sociedad y su entorno, así como determinar las medidas necesarias para su mitigación. La comprensión del fenómeno sísmico es de importancia, debido a que el día de hoy millones de personas en todo el mundo están sujetas a un gran riesgo sísmico que amenaza sus vidas y posesiones, así como la infraestructura y economía de localidades, regiones y aún de naciones enteras.

Respuesta sísmica y efectos de sitio

Durante la ocurrencia de un temblor, las ondas sísmicas se irradian desde la fuente, viajando a través de la corteza terrestre; al alcanzar la superficie producen movimientos del terreno que pueden durar desde segundos hasta minutos. El movimiento del terreno es un parámetro importante, ya que las características asociadas a él (intensidad, duración, aceleración, velocidad, desplazamiento, entre otros) que dependen de la magnitud y localización del sismo, así como de las características del sitio, son imprescindibles para evaluar el riesgo y la respuesta sísmica de una región

Aunque las ondas sísmicas realizan la mayor parte de su travesía desde la fuente hasta la superficie en medios rocosos, la porción final del viaje suele llevarse a cabo a través de depósitos de suelo, y por ello, las propiedades de éstos tienen una gran influencia en el movimiento superficial. Los depósitos actúan como filtros de las ondas, atenuando o amplificando la respuesta sísmica del terreno en determinadas frecuencias.

Es habitual una variación importante de las condiciones de suelo en distancias cortas, y por ello, el movimiento de la superficie puede ser distinto aún en regiones pequeñas. El estudio de la acción de las condiciones locales en la respuesta sísmica de una región es uno de los fenómenos más importantes en la dinámica de suelos. La influencia de estos efectos de sitio en la intensidad del movimiento del terreno (así como los daños asociados a él) ha sido conocida desde hace tiempo; gracias a la observación temprana se han identificado cualitativamente estos efectos, más recientemente, con el desarrollo de instrumentos para el monitoreo de la actividad sísmica, ha sido posible realizar una evaluación cuantitativa del fenómeno.

Las condiciones locales afectan profundamente las características de la respuesta sísmica del terreno (amplitud, contenido de frecuencias y duración); su influencia dependerá de la naturaleza, geometría y propiedades de los materiales de la masa de suelo, así como de la topografía, geología y la naturaleza misma del sismo, entre otros. Los efectos de sitio tienen un papel trascendente en el comportamiento dinámico del terreno, debido a su naturaleza y variación, deben ser investigados caso por caso en búsqueda del diseño sísmico resistente óptimo.

A pesar de su identificación, la influencia de las condiciones locales en la respuesta sísmica del terreno no fue plenamente reconocida en los reglamentos de construcción sino hasta la década de 1970 (ref. 3). En México su importancia es ampliamente conocida, ya que la capital del país representa uno de los casos más estudiados a nivel mundial debido a lo ocurrido durante el sismo del 19 de Septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$), en el cual, los daños en regiones ubicadas en la vecindad del epicentro fueron moderados en comparación con los observados en la Ciudad de México, 350 km más lejos, la cual sufrió una gran devastación (ref. 4).

En el caso de la Ciudad de México la modificación de la respuesta sísmica por las condiciones locales se hace evidente al observar los registros de las estaciones acelerográficas ubicadas en la SCT y Ciudad Universitaria (figura I.1); en la primera se alcanzó una aceleración pico de 161.63 cm/s^2 mientras que en la segunda el valor máximo fue de 32.54 cm/s^2 , esto es, 18% y 4% de la gravedad respectivamente (ref. 5). Casos históricos como éste ilustran la importancia de los efectos de sitio en la respuesta sísmica del terreno.

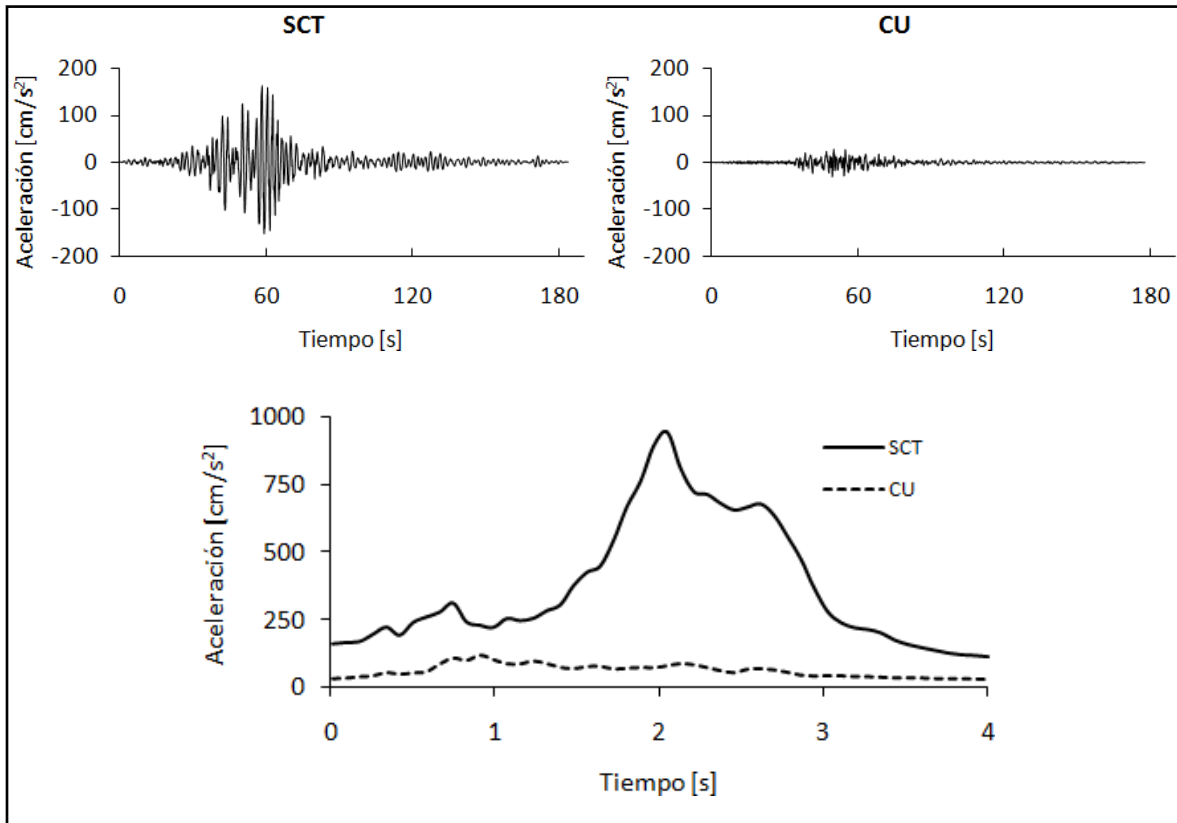


Figura I.1. Acelerogramas y espectros de respuesta del sismo del 19/09/1985 componente EW en SCT y CU

Las aceleraciones pico en la superficie pueden ser mayores cuando la roca basal experimenta niveles de aceleración pequeños, por otra parte, cuando el basamento experimenta altos niveles de aceleración, la baja resistencia y el comportamiento no lineal de los materiales del suelo pueden prevenir el desarrollo de grandes aceleraciones superficiales (ref. 6). Los depósitos no sólo modifican los niveles de aceleración, también alteran el contenido de frecuencias del movimiento y en consecuencia los espectros de respuesta.

Algunos autores han realizado investigaciones en diferentes condiciones de suelo para estudiar la variación de la respuesta dinámica debida a los efectos locales y la influencia que ejercen en los espectros de respuesta (figura I.2). Al observar los resultados obtenidos se puede apreciar que la amplificación del movimiento del suelo es mayor para bajas aceleraciones en la roca, por otra parte, para períodos dominantes menores a 5 segundos, las amplificaciones son mayores en sitios de suelo que en roca. A períodos mayores, la amplificación aumenta al disminuir la rigidez del suelo.

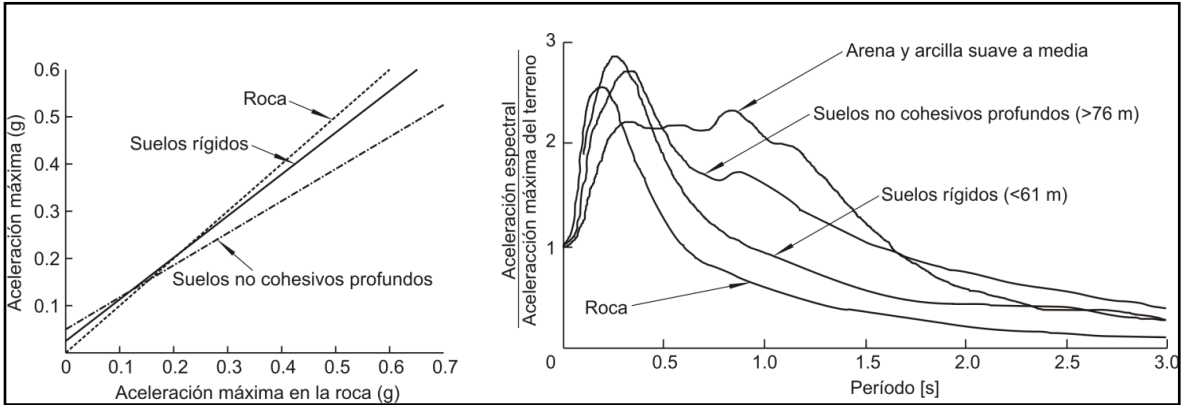


Figura 1.2. Relaciones entre aceleraciones y espectros de respuesta para diferentes suelos (ref. 7)

Respuesta sísmica de valles aluviales

Una gran cantidad de ciudades en el mundo se encuentran localizadas en valles aluviales, por lo que la respuesta sísmica de estos sitios es de gran interés. El movimiento del terreno en estas regiones puede experimentar amplificaciones considerables debido a las características de los depósitos de suelo presentes en ellas, ya que generalmente se componen de una porción importante de materiales blandos, resultado de los procesos naturales de sedimentación.

El efecto local de amplificación se debe a que cuando una onda sísmica pasa de un medio a otro diferente, se ve sometida a procesos en la frontera que la dividen en ondas reflejadas y refractadas cuya amplitud es función del ángulo de incidencia y la diferencia entre las propiedades elásticas de los materiales. Al pasar a un medio de menor rigidez, éste se deforma más fácilmente, por lo cual, se producen con la misma energía ondas de mayor amplitud (ref. 8).

Por otra parte, la curvatura típica del basamento en las cuencas puede ocasionar un efecto de *lente* que retiene las ondas de cuerpo, provocando que algunas se propaguen a través de los materiales aluviales concentrando gran cantidad de energía, lo cual modifica la naturaleza de las ondas superficiales, las cuales pueden amplificar la duración e intensidad del movimiento del terreno (ref. 9 y 10).

El potencial de amplificación de la respuesta sísmica en valles aluviales con presencia y confinamiento de materiales blandos es alto, ya que la duración de los eventos es susceptible de ser aumentada, con lo cual las ondas de período similar al del depósito de suelo puede dar lugar al fenómeno de resonancia (ref. 11). Tal como se mencionó previamente, la Ciudad de México representa uno de los casos más conocidos de modificación de la respuesta sísmica del terreno, sin embargo, no es el único, ya que existen en el país otras poblaciones sujetas a este tipo de amenaza.

La Ciudad de Oaxaca presenta otro caso de interés, ya que reúne diversas características que le confieren significativa vulnerabilidad, las cuales, sumadas al crecimiento demográfico experimentado en los últimos años han puesto en evidencia la necesidad de ampliar el conocimiento existente del riesgo sísmico en la región; por lo cual, representa el caso de estudio de este trabajo.

I.2 Actividad sísmica en Oaxaca

Marco tectónico

La teoría de la tectónica de placas y la deriva continental establece que la corteza terrestre se encuentra dividida en 17 grandes piezas y otras menores denominadas *placas tectónicas* (figura I.3), las cuales se encuentran en constante movimiento debido a los procesos de equilibrio termo mecánico del interior del planeta. Las placas componen el rompecabezas de la superficie terrestre y los límites entre ellas son las zonas sísmicas más activas del mundo.

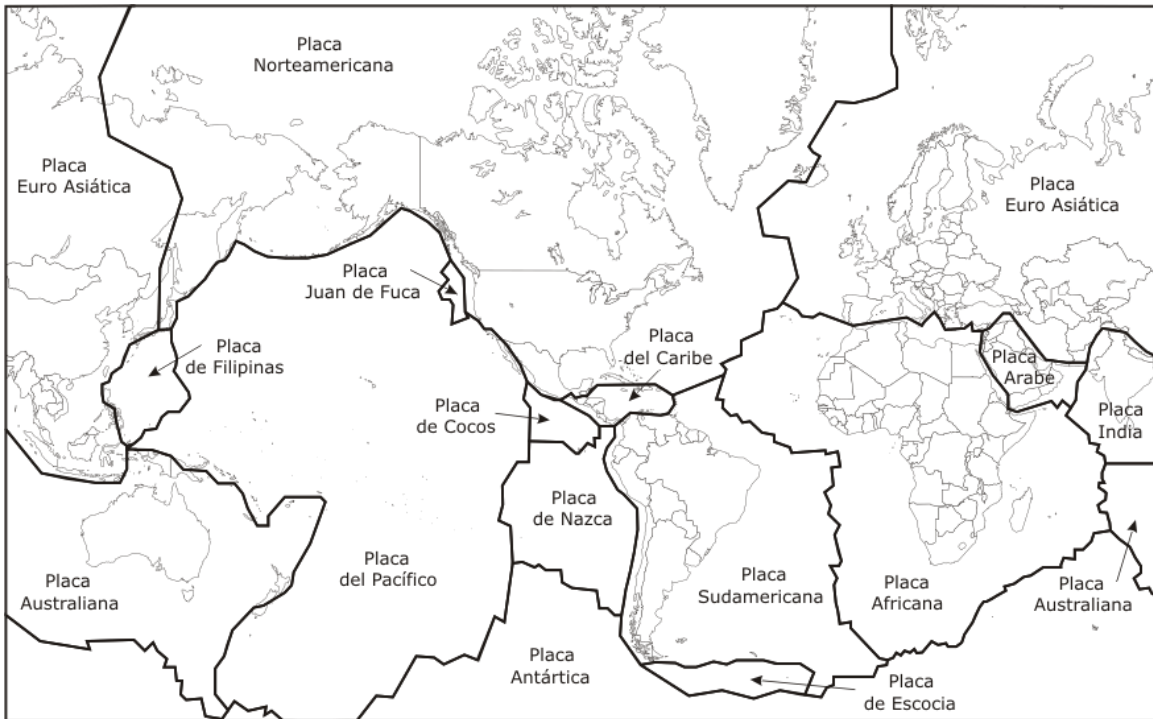


Figura I.3. Placas tectónicas del mundo

Las discontinuidades geológicas presentes en el borde las placas o en su interior se denominan *fallas*, los movimientos asociados a ellas dependen del tipo de interacción, la cual determina también la naturaleza de los sismos producto de los esfuerzos actuantes; existen tres tipos básicos de fallas: las normales o de deslizamiento se deben a las fuerzas de tensión generadas entre las superficies en contacto, las inversas o de cabalgadura son producto de la compresión y, finalmente, las fallas transcurrentes son aquellas en las que existe cortante sin componente vertical y por tanto el corrimiento es horizontal. Puede presentarse la combinación de esfuerzos de tensión, compresión y cortante, dando origen a fallas de tipo mixto (figura I.4).

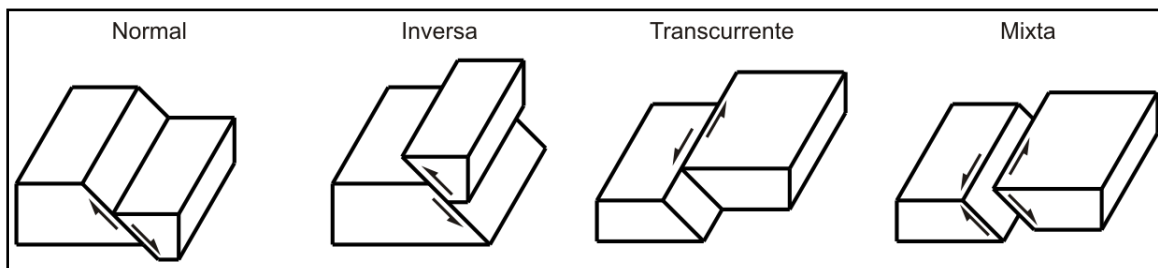


Figura I.4. Tipos de fallas

La generación de los temblores más importantes en México se debe a dos tipos de movimiento, el primero de ellos se produce a lo largo de la costa del Pacífico, donde las placas de Rivera y Cocos penetran por debajo de la Norteamericana, ocasionando el fenómeno de *subducción*; el segundo se debe al desplazamiento lateral entre la placa del Pacífico y la Norteamericana (figura I.5).

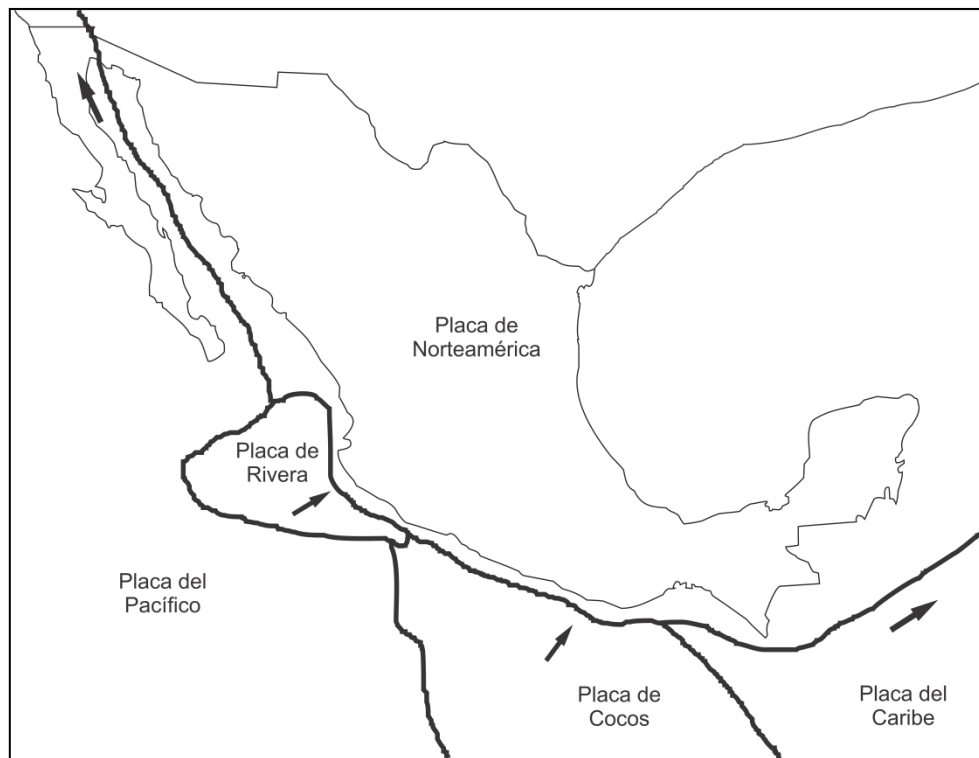


Figura I.5. Interacción entre placas tectónicas

Menos frecuentes que los sismos por contacto entre placas son los generados en el interior de ellas, lejos de sus bordes, aun en zonas donde se ha llegado a suponer un nivel nulo de sismicidad. Los ejemplos más importantes de este tipo son los sismos ocurridos en Bavispe, Sonora el 03/05/1887 ($M > 7.0$), Acambay, Estado de México el 19/11/1912 ($M = 7.0$) y Oaxaca el 15/01/1931 ($M = 7.8$) (ref. 12).

La interacción entre placas da origen a diferentes procesos tectónicos, el más significativo en nuestro país es el de subducción, el cual ocurre cuando una placa oceánica densa entra en contacto con una continental de menor densidad, deslizándose por debajo de ella ocasionando la desaparición de parte de la litósfera que se transforma en magma en el interior de la Tierra. A este fenómeno se debe la mayor parte del total de la energía sísmica que se produce en el planeta.

El modelo tectónico actual del sur de México muestra un margen convergente entre las placas de Cocos, Rivera y Norteamérica, el cual ha estado activo desde la era Mesozoica (ref. 13). La historia sísmica de nuestro país indica que la ocurrencia de sismos de magnitud $M \geq 7.0$ en territorio nacional es elevada. A lo largo del siglo pasado se produjeron por lo menos ocho sismos de magnitud $M \geq 8$, los cuales afectaron regiones densamente pobladas al centro y sur del país (ref. 14). Esta situación se explica debido a que México se encuentra enclavado en el denominado *Cinturón de Fuego del Pacífico*, el cual es la región de la Tierra donde se genera la mayor actividad sísmica, la consecuencia de esto es que en nuestro país se libera cerca del 3% de la energía sísmica mundial (ref. 15)

Sismicidad en Oaxaca

El Estado de Oaxaca a través del tiempo ha sufrido el embate de las manifestaciones de la actividad sísmica, esto ha provocado la pérdida de vidas humanas y en mayor o menor grado, daños materiales a la infraestructura y al entorno ecológico.

El territorio oaxaqueño se localiza entre los 15.00° y los 18.50° de latitud Norte y los 94.50° y 98.75° de longitud Oeste, lo que le confiere una posición estratégica en una de las zonas con más alta sismicidad en México. Del año 1974 a 1996, el Servicio Sismológico Nacional registró 27, 533 sismos de magnitud mayor a 2.5; de estos sismos, 8030 ocurrieron dentro de la entidad (figura. I.6), esto es, aproximadamente el 30% de los sismos localizados en el país (ref. 16).

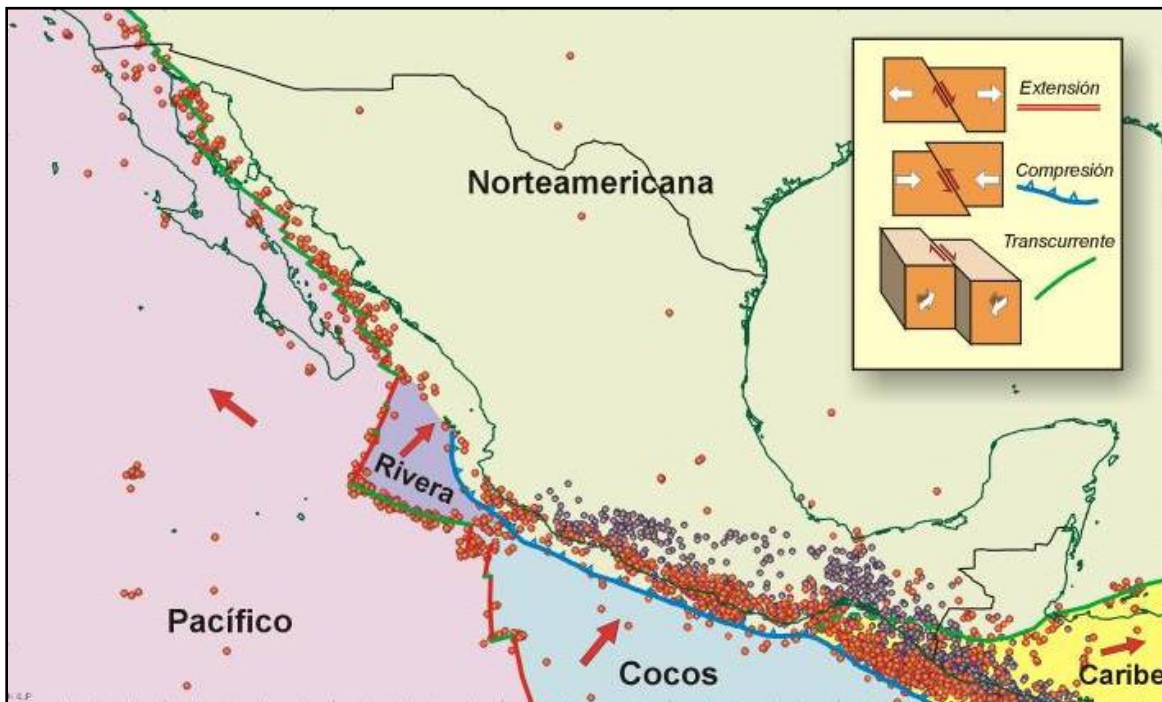


Figura I.6. Distribución de placas tectónicas en México (ref. 17)

La actividad sísmica en Oaxaca es considerable, la corteza continental se encuentra afectada por esfuerzos de deformación y ruptura por cizalla, producto de la interacción de las placas de Cocos y Norteamérica que ocurre a lo largo de la fosa mesoamericana por el proceso de subducción. La placa de Cocos se desplaza hacia el este, ocasionando la destrucción de la corteza oceánica en la *zona de decreción* de la fosa, mientras que una parte menor de ella se suma a la corteza continental en la *zona de acreción* en el talud continental (figura I.7). Este límite tectónico así definido es una franja de aproximadamente 200 km de ancho y 1500 km de largo donde se localizan del 85 al 90 % de los sismos que ocurren en México.

Tomando en cuenta sus características, se ha establecido que en la región de Oaxaca se pueden distinguir tres tipos de actividad sísmica (figura I.8), los cuales se describen a continuación (ref. 18):

- a) Superficial. Generada en la zona de subducción donde la velocidad de penetración de la placa de Cocos es de aproximadamente 7.8 cm por año. Los eventos tienen un mecanismo focal de falla inversa de bajo ángulo, con epicentros en la costa y de profundidad entre los 15 y 20 km. Los sismos más importantes son: Huatulco 23/08/1965 (M=7.5), Pinotepa 02/08/1968 (M=7.3), Pochutla 29/11/1978 (M=7.6), y Ometepec 07/06/1982 (M=7.0) y 1995 (M=7).

- b) Intermedia. Producto del proceso gravitacional asociado con la ruptura de la placa de Cocos, con epicentros al sur de la Ciudad de Oaxaca y de profundidades comprendidas entre los 25 y 40 km. Estos sismos han alcanzado magnitudes considerables como los ocurridos el 15/01/1931 (M=7.8) y el 30/09/1999 (M=7.5).
- c) Profunda. Tiene lugar en la placa subducente, sismos de falla normal, con epicentros en el interior del continente al norte de la Ciudad de Oaxaca y a profundidades entre 65 a 115 km. Algunos de los eventos de este tipo son los ocurridos el: 10/02/1928 (M=6.7), 26/07/1937 (M=7.3), 11/10/1945 (M=6.5), 25/05/1959 (M=6.8), 28/08/1973 (M=7.3), 24/10/1980 (M=7.1) y 15/06/1999 (M=7.0).

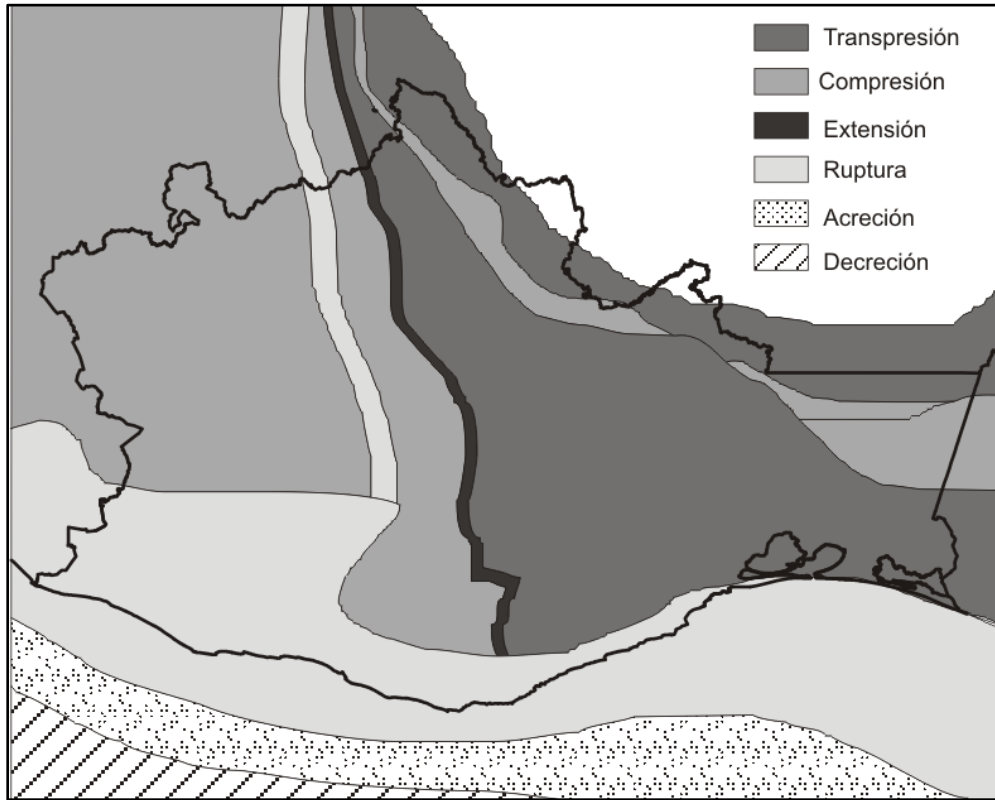


Figura I.7. Procesos tectónicos en Oaxaca (ref. 19)

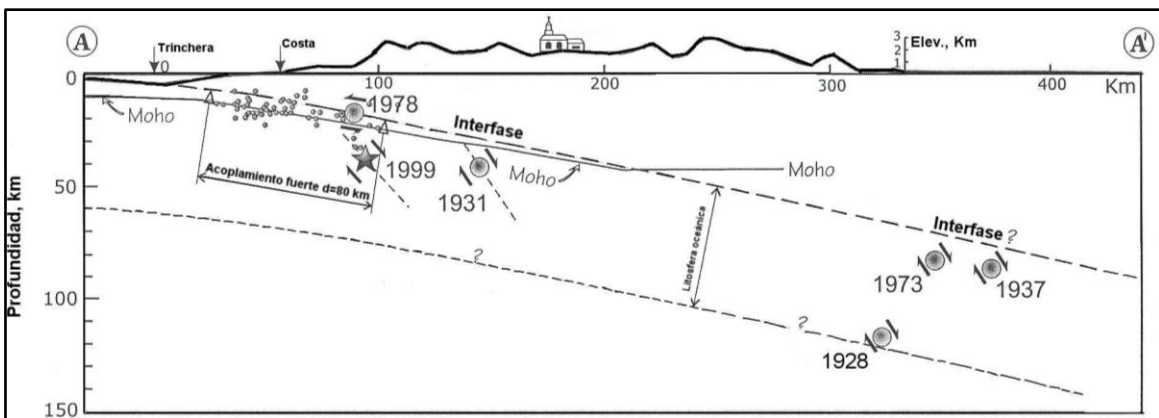


Figura I.8. Zona de subducción en Oaxaca (ref. 20)

Zonificación sísmica del Estado de Oaxaca

Para su estudio, el Estado de Oaxaca ha sido dividido en 8 zonas sísmicas o unidades sismogénicas mayores (figura I.9), las cuales se describen a continuación (ref. 21):

- 1) Mixteca Media. Los temblores en esta zona afectan a la frontera de los estados de Guerrero y Oaxaca, sintiéndose con menor intensidad en la costa, Huajuapán de León, el valle central de Oaxaca y las zonas de Tlapa y Chilapa en Guerrero. En algunos casos se presentan intensidades más fuertes al oeste de la zona como se observó durante el sismo de 1894 ($M=7.4$) que causó graves daños en la Ciudad de Oaxaca. En otras ocasiones, se han generado mayores intensidades al este, por ejemplo, en el temblor de 1854 ($M=7.7$) que afectó principalmente la Mixteca, Cañada y Valle, en especial las poblaciones de Jamiltepec, Juquila, Huaxolotitlán, Amatenango, Tlaxiaco y Juxtlahuaca, también fue sentido en la Ciudad de México.
- 2) Huajuapán. Los temblores de esta zona afectan primordialmente el sur de Puebla, el noroeste de Oaxaca y el noreste de Guerrero. Esta región se caracteriza porque en relación con el epicentro, la intensidad es más fuerte en la dirección sur que en la dirección norte. Dentro de esta área se destacan dos temblores: el del 19 de julio de 1882, sentido en gran parte del país y el del 24 de octubre de 1980 ($M=7$), producto de un mecanismo de falla normal y con una profundidad de 65 km, se sintió en las ciudades de Oaxaca, Huajuapán de León, Tamazulapán e Ixtlahuaca.
- 3) Norte y Cañada. Se caracteriza porque los sismos en relación con su epicentro son más intensos hacia el norte que hacia el sur, afectando principalmente las ciudades de Tehuacán, Orizaba, Córdoba, Veracruz y Puebla. Al igual que en la zona 1, algunos temblores se sienten más intensos en el este y otros en el oeste. Esta zona es la más extensa y bordea el Eje Volcánico Mexicano, algunos sismos importantes son: 1928 ($M=7.7$), 1937 ($M=7.6$), 1945 ($M=6.5$) y 1973 ($M=6.8$), todos ellos tuvieron un mecanismo de falla normal y profundidades que oscilaron entre los 82 y 95 km.
- 4) Istmo. Es un área ubicada dentro del territorio oaxaqueño y limita al este con el Istmo de Tehuantepec y al oeste con las zonas 5, 6 y 7. Existen sólo cinco eventos de $M \geq 6.5$ reportados en los últimos 200 años, dentro de los que destaca el del 27 de agosto de 1911 ($M=6.7$) que fue sentido en el Istmo y alcanzó el grado VI en la escala de intensidades de Mercalli modificada.
- 5) Mixe. Los temblores de esta zona han causado destrucción importante en la Ciudad de Oaxaca y el área Mixe. Un evento característico es el ocurrido el 17 de abril de 1928 ($M=7.7$), que presentó un mecanismo de falla normal, una profundidad de 115 km y fue sentido en la capital del estado causando graves daños en Villa Alta, Oaxaca.
- 6) Valle. Los sismos en esta zona han producido daños en la Ciudad de Oaxaca, sin embargo, sus mayores efectos ocurren en la parte sur del valle de la capital. El temblor del 15 de enero de 1931 ($M=7.8$) presentó un mecanismo focal de falla normal y una profundidad de 25 km, causó grandes daños en toda la región, resultando gravemente dañado el poblado de Miahuatlán.
- 7) Puerto Escondido-Huatulco. Las localidades más afectadas históricamente por los sismos generados en esta zona son Puerto Escondido, Pochutla, Puerto Ángel, Huatulco y Loxicha. Un temblor característico aconteció el 10 de marzo de 1727, el cual dejó a la Ciudad de Oaxaca en ruinas; ocho días después ocurrió otro reportado como más fuerte que el anterior. Posteriormente, en un evento en 1870 ($M=7.9$) Miahuatlán y Pochutla fueron devastadas, se formaron grietas en los campos y hubo derrumbes en los cerros reportándose además un fuerte calentamiento del suelo; este sismo fue sentido con gran intensidad en Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

En el sismo del 22/03/1928 (M=7.7) se reportaron ruidos subterráneos en Tehuantepec e invasiones del mar en Puerto Ángel. Por otra parte, el 17 de junio del mismo año se presentó un sismo (M=8) que produjo un tsunami ocasionando fuertes daños en Chacahua, Huatulco, Pochutla y Puerto Ángel.

- 8) Pinotepa Nacional-Jamiltepec. Para los temblores ocurridos en esta zona son frecuentes los reportes de las localidades de la costa de Guerrero, mientras que casi nunca hay reportes de Tehuantepec. Las regiones más afectadas son Chacahua, Jamiltepec, Pinotepa Nacional y Ometepec. En esta área es importante mencionar el temblor de San Sixto (28 de marzo 1787) que por los reportes de daños y el área afectada se infiere que tuvo una magnitud superior a 8, siendo el más grande de todos los sucedidos en la región en los últimos 400 años; este gran terremoto fue seguido de 141 años de ausencia de sismicidad de gran magnitud en la zona.

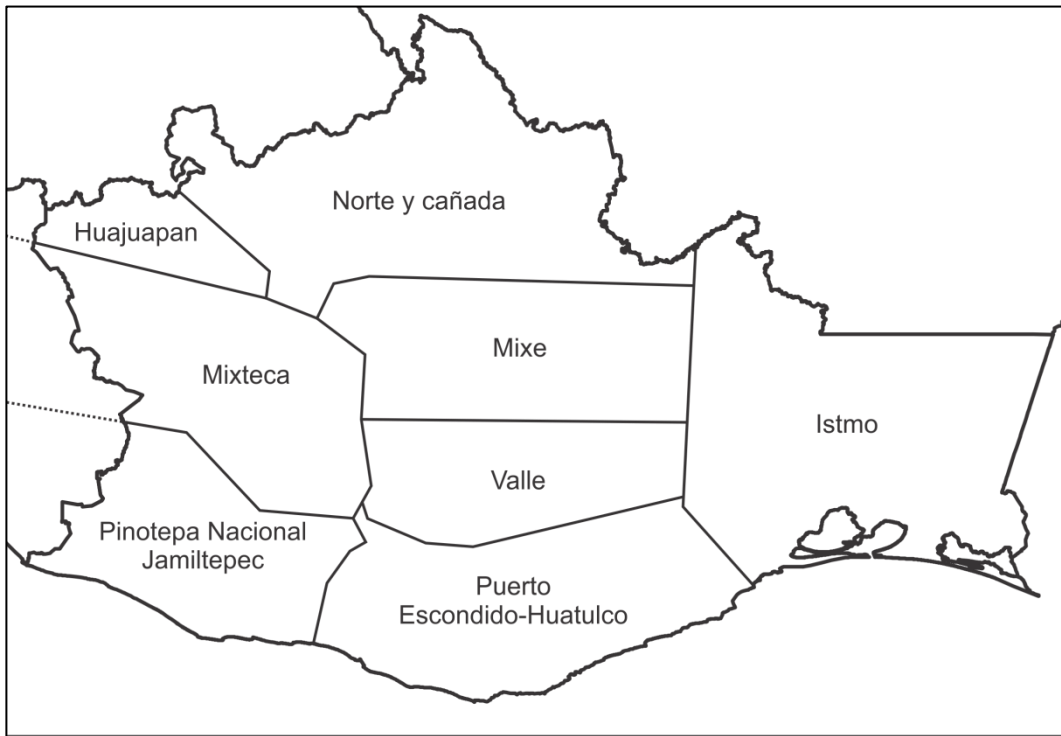


Figura I.9. Zonas sísmicas de Oaxaca (ref. 22)

La tabla I.1 presenta un listado de 30 sismos representativos de las ocho zonas sísmicas del estado, ocurridos desde 1727 hasta 2008 y cuya es $M \geq 6.5$.

Tabla I.1 Sismos representativos Oaxaca (ref. 23)

Fecha (dd/mm/aa)	Hora	Zona	M	Epicentro	
				Lat. N	Long. W
10/03/1727	--	7	$7.5 \geq M_s \leq 8.0$	--	--
			$7.0 \geq m_b \leq 8.0$		
18/03/1727	--	7	$7.5 \geq M_s \leq 8.0$	--	--
			$7.0 \geq m_b \leq 8.0$		
28/03/1787	11:30	8	$M_s > 8.0$	--	--
			$m_b > 8.0$		
05/05/1854	09:15	1	$M = 7.7$	--	--
03/10/1864	02:00	3	$M = 7.3$	18.7	97.4
11/05/1870	23:30	7	$M = 7.9$	--	--
27/03/1872	07:52	7	$7.5 \geq M_s \leq 8.0$	--	--
			$7.0 \geq m_b \leq 8.0$		
19/07/1882	14:20	2	$7.5 \geq M_s \leq 8.0$	--	--
			$7.0 \geq m_b \leq 8.0$		
02/11/1894	18:35	1	$7.0 \geq M_s \leq 7.5$	--	--
			$6.5 \geq m_b \leq 7.0$		
27/08/1911	10:59:18	4	$M = 6.7$	16.77	95.9
10/02/1928	04:38:32	3	$M = 6.5$	18.26	97.99
22/03/1928	04:18	7	$M = 7.7$	--	--
17/04/1928	03:25:25	5	$M = 7.7$	--	--
17/06/1928	03:20	7	$M = 8$	--	--
04/08/1928	18:27	8	$M = 7.4$	16.4	97.8
15/01/1931	01:51	6	$M = 7.8$	16.34	96.87
26/07/1937	03:47:04	3	$M = 7.3$	18.48	96.08
02/01/1938	22:28	1	$M = 6.5$	--	--
11/10/1945	16:52:56	3	$M = 6.5$	18.32	97.65
24/05/1959	19:17:37	1	$M = 6.8$	17.72	97.72
28/08/1973	09:50:40	3	$M = 7.1$	18.3	96.53
24/10/1980	14:53:32	2	$M = 7$	18.03	98.27
07/06/1982	06:52:33	8	$M = 6.9$	16.42	98.25
24/01/1983	08:17:40	4	$M = 6.8$	16.17	95.21
24/10/1993	07:52:19	8	$M = 6.6$	16.17	98.77
14/09/1995	14:04:33	8	$M = 7.3$	16.75	98.67
25/02/1996	03:08:19	8	$M = 7.1$	15.88	97.98
19/07/1997	14:22:09	8	$M = 6.7$	15.86	98.26
15/06/1999	20:42:04	3	$M = 7.0$	18.13	97.54
30/09/1999	16:31:13	7	$M = 7.5$	16.03	97
12/02/2008	12:50:18	4	$M = 6.6$	16.19	94.54

I.3 Geología de Oaxaca

El estudio de la sismicidad implica la identificación de cualquier fuente potencial de generación de sismos. La geología de una región puede mostrar evidencia de la ocurrencia de temblores mediante discontinuidades o desplazamientos relativos entre los materiales; por tanto, el análisis de la configuración geológica es vital para el entendimiento de este fenómeno.

El sur de México es uno de los territorios geológicos más complicados del mundo, su construcción se atribuye a los regímenes Grenvilliano, Apalachiano y Cordillerano. Se considera que la geología de Oaxaca es la más compleja del país debido a los diferentes eventos tectónicos superpuestos, así como a la variedad de tipos litológicos aflorantes de la región (figura I. 10).

Geología histórica

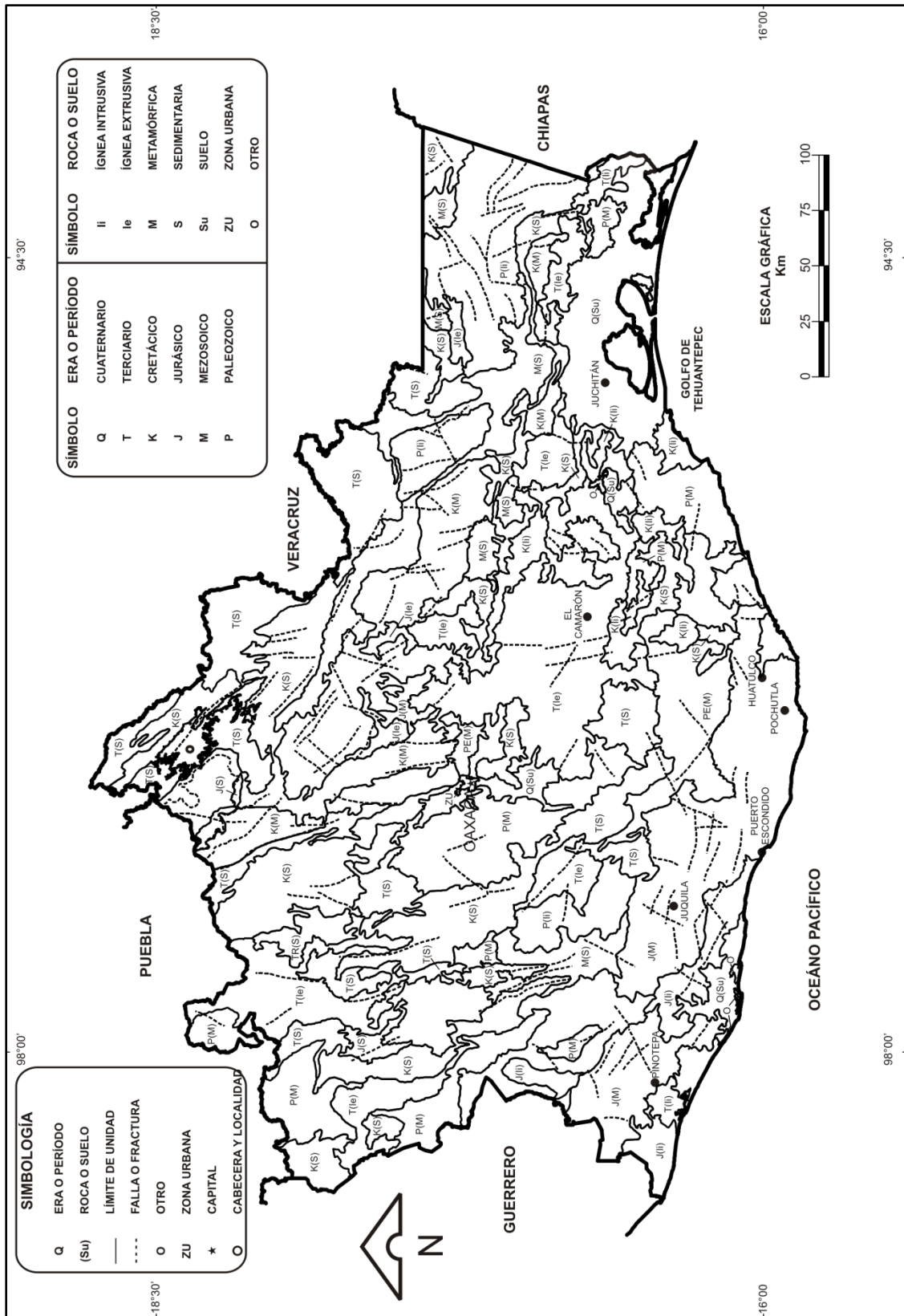
El territorio muestra evidencia de actividad importante (ref. 24). Durante el Proterozoico tardío se propició la formación de un *cratón* desde una secuencia sedimentaria arcillo calcárea sometida a condiciones de metamorfismo. Posteriormente, en el Paleozoico temprano, en una etapa de distensión que dio lugar a la formación de una cuenca, se depositaron sedimentos que cubrieron parcialmente el borde, los cuales fueron afectados por metamorfismo regional durante el paleozoico tardío, originando una serie de esquistos que se integraron al cratón precámbrico.

En el triásico, la región fue afectada por una etapa distensiva formando depresiones en las que se depositaron sedimentos continentales del Triásico-Jurásico. A partir de entonces, permaneció emergida hasta fines del Jurásico, cuando se inició la trasgresión marina mesozoica, la cual alcanzó su máximo avance en el Cretácico, con lo que los mares cubrieron la región a excepción de la porción occidental, donde permanecía emergido el cratón que aportó material terrígeno. En esta etapa se depositaron carbonatos de mares profundos en la parte central y oriental.

A partir del Cretácico tardío se produjo un levantamiento general debido a la orogenia Laramide, terminando con la sedimentación marina debida a la regresión de los mares. En el Terciario temprano, los efectos laramídicos se manifiestan con mayor intensidad, comprimiendo, levantando y metamorfoseando gran parte de la columna sedimentaria; posteriormente, se lleva a cabo una intensa erosión, dando como resultado los depósitos de materiales clásticos.

En resumen, la historia geológica de Oaxaca sucedió en el Paleozoico con la formación de rocas que posteriormente fueron metamorfizadas a consecuencia de un movimiento orogénico ocurrido en el mismo periodo. Posteriormente, el mar invadió estos terrenos desde el Triásico hasta el principio del Terciario, depositando una serie de rocas como conglomerados, areniscas, lutitas y calizas que posteriormente fueron metamorfizadas durante otro levantamiento orogénico que se verificó en el Terciario.

Los únicos depósitos que no presentan evidencia de metamorfismo son las areniscas y lutitas que se encuentran en la porción norte de la Ciudad de Oaxaca, depositadas a fines del Cretácico y principios del Terciario; en este último, a causa del levantamiento orogénico, termina la sedimentación marina y se forman rocas volcánicas como tobas andesíticas y los depósitos clásticos continentales descargados por los ríos como consecuencia de la intensa erosión que se verificó en la región. Los últimos acontecimientos geológicos son la sedimentación de los depósitos aluviales cuaternarios en la porción ocupada por los valles.



Complejos basales

Las rocas que integran el basamento metamórfico de Oaxaca se subdividen en los complejos Oaxaqueño, Acatlán y Xolapa (figura. I.11). Las características principales de estas unidades se presentan a continuación (ref. 26 y 27).

- **Complejo Oaxaqueño.** Es el más antiguo del sur del país, se extiende con una orientación noroeste atravesando la región central del estado en una franja de 50 a 100 km de ancho que se desarrolla desde el sureste de Puebla hasta 25 km continente adentro al norte de Puerto Ángel. Tuvo su origen en el evento tectónico más antiguo del Proterozoico tardío. Se compone de dos unidades principales, un basamento de anortosita y una secuencia superior de gneiss y granulitas calcáreas y pélticas.
- **Complejo Acatlán.** La actividad tectónica del Paleozoico tardío dio origen a este terreno cristalino que se prolonga hasta 200 km al oeste del complejo oaxaqueño y hacia el sur del cinturón volcánico mexicano. La secuencia de sedimentos arcillo arenosos depositados en el basamento precámbrico fue afectada por un metamorfismo regional que varió desde facies de esquistos verdes hasta facies de eclogita, los cuales fueron fallados e intrusionados. Se compone de una variedad de rocas de 15 km de espesor que consisten de arreglos petrográficos contrastantes que varían de pizarra a megmatita, de granito a ultramilonita y de gabro a eclogita.
- **Complejo Xolapa.** A pesar del ser el cinturón más extenso del sur del país es el menos conocido. Con una longitud de 600 km y un ancho de 50 a 150 km corre paralelo a la costa del Pacífico; su origen se considera dentro del Precámbrico-Terciario o Mesozoico. Formado por rocas metasedimentarias y metaplutónicas así como granitoides no deformados. Las unidades predominantes son anfibolitas, migmatitas, gneiss y esquistos. Las características estructurales son foliaciones de gneiss cuya dirección regional es paralela a la costa.

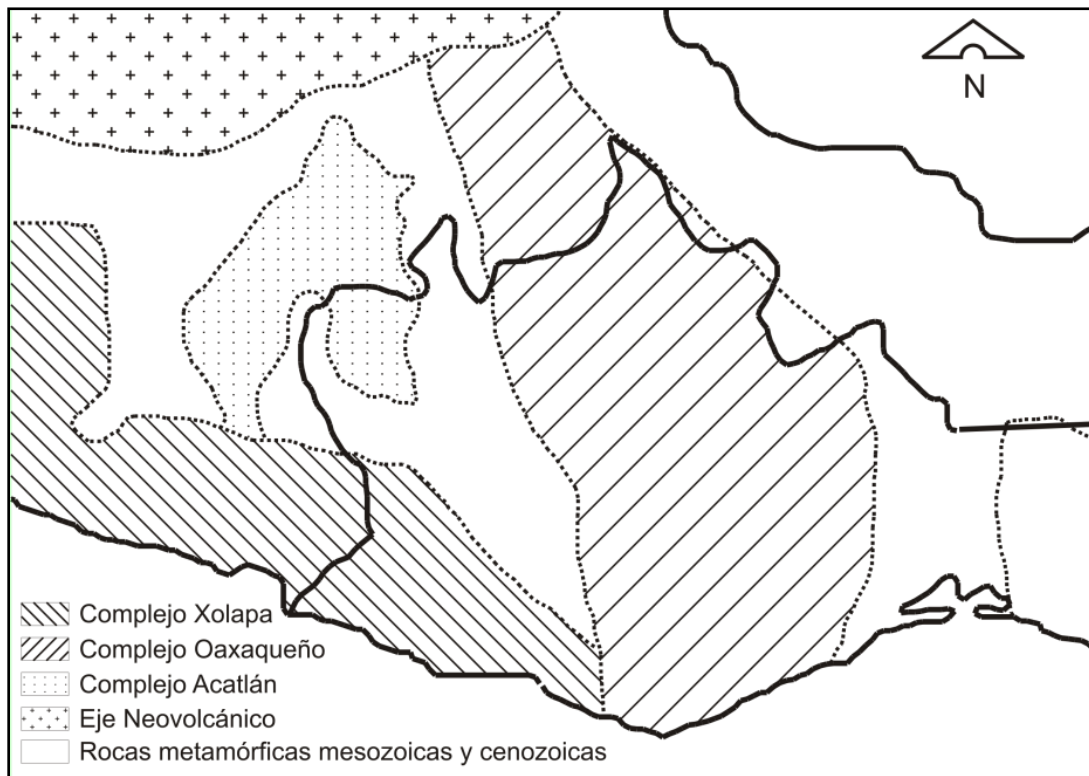


Figura I.11. Complejos basales de Oaxaca (ref. 28)

Estructuras geológicas del Estado de Oaxaca

El territorio oaxaqueño se subdivide en 8 provincias geológicas (figura. I.12), las cuales se caracterizan por las rocas, las estructuras geológicas y la secuencia de eventos que definen una historia y una evolución geológica. Estas provincias son las siguientes.

- Mixteca. Son un conjunto de rocas metamórficas compuestas; evolución compleja de edad correspondiente al Paleozoico.
- Zapoteca. Integrada por rocas metamórficas compuestas; evolución compleja de edad correspondiente al Proterozoico.
- Chatina. Conformada por rocas metamórficas e intrusivas compuestas; evolución compleja de edad correspondiente al Paleozoico-Mesozoico.
- Cuicateca. Integrada por rocas metamórficas; evolución compleja de edad correspondiente al Mesozoico.
- Juchateca. Provincia de rocas volcánicas y sedimentarias; evolución compleja de arco volcánico de edad correspondiente al Paleozoico.
- Cinturón Mexicano de Pliegues y fallas. Se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias de origen marino; evolución compuesta en estructuras de pliegues y fallas de edad correspondiente al Mesozoico.
- Batolito de Chiapas. Constituido por rocas ígneas intrusivas de edad correspondiente al Paleozoico.
- Cuenca de Tehuantepec. Formado por sedimentos marinos de edad correspondiente al Cenozoico.

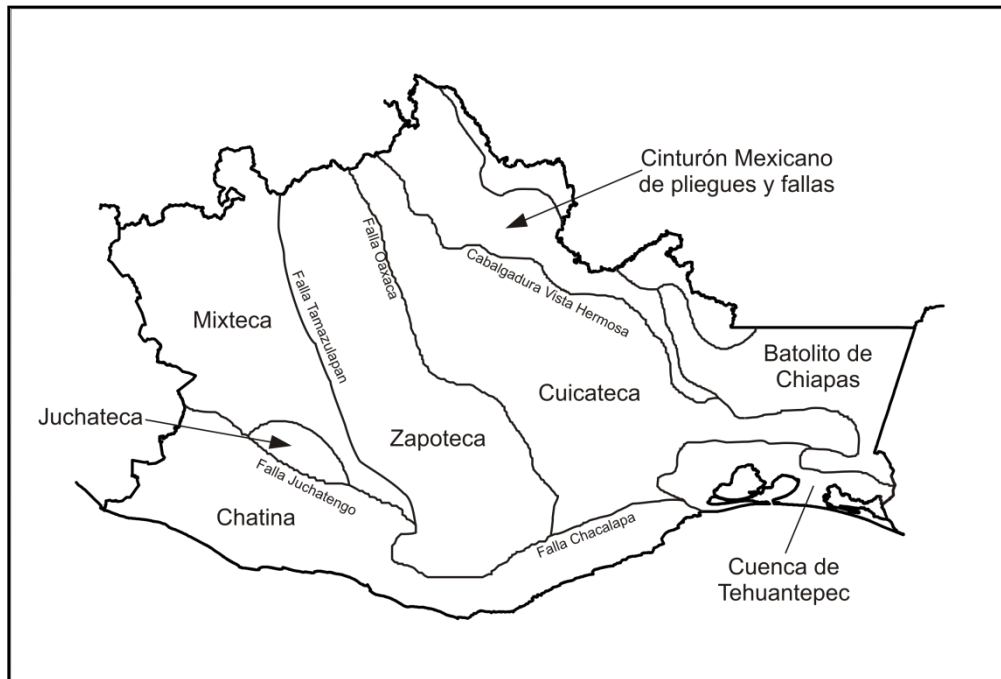


Figura I.12. Provincias geológicas de Oaxaca (ref. 29)

La presencia de fallas puede ser indicativa de una importante actividad sísmica. En Oaxaca, estas estructuras son abundantes y diversas (ref. 30), habiéndose identificado y clasificado al menos 52 de ellas (figura 1.13). Las más importantes se presentan a continuación.

- *Sistema de fallas normales.* Buenos Aires, Tecomavaca, Paraíso y Huautla.
- *Sistema de fallas inversas.* Oaxaca, Etlatongo, Calapa, Texcatitlán, Capulalpan, Aloapan, La aguja, Monteros, El palmar y Luvina.
- *Sistema de fallas laterales derechas.* Tamazulapan, Tomellín, Valle Nacional, Palomares-Cauhtémoc, Chacalapa, Colotepec, Yucuxaco, Tayata, San Juan, Dinicuiti, Huajolotitlán, Tepelmeme-Teotongo, La herradura, Nochixtlán, Etlatongo, Apoala, Santiago, Cuicatlán, Alcalá, Atepec, Carrizal, Albarradas, Usila, Monte Negro, Tehuanepéc.
- *Sistema de fallas de laterales izquierdas.* Mixteca, Petlalcingo-Huajuapán, Huitzo, Piedra Azul, Zaragoza, Mixtepec, Tezoatlán, San Marcos, Apasco, Nodón.
- *Pliege-Falla.* Corresponde a la falla Vista Hermosa ubicada al NE de la entidad. Orientación N20°W a S50°E con echados de 38° a 54° buzando hacia el SW. Tiene una longitud aproximada de 54 km, interrumpida por fallas laterales de orientación NE-SW.
- *Graben o fosa tectónica.* El graben de Miahuatlán corresponde al límite sur de los Valles Centrales. Sus fallas principales no son siempre distinguibles, ya que se encuentran cubiertas por sedimentos clásticos; es responsable de la formación de los Valles Centrales.
- *Anticlinales.* El anticlinal de Soyaltepec-Nativitas se localiza a 18 km al NW de Nochixtlán, en una zona de alta erosión, de topografía fuerte (2470 m), eje mayor de 5.5 km y menor de 3.7 km, rumbo N43°W a S54°E; asimétrico con flancos con una inclinación de 37° a 42°, cierre tipo falla y afecta a las tobas bentoníticas de la formación Huajuapán.

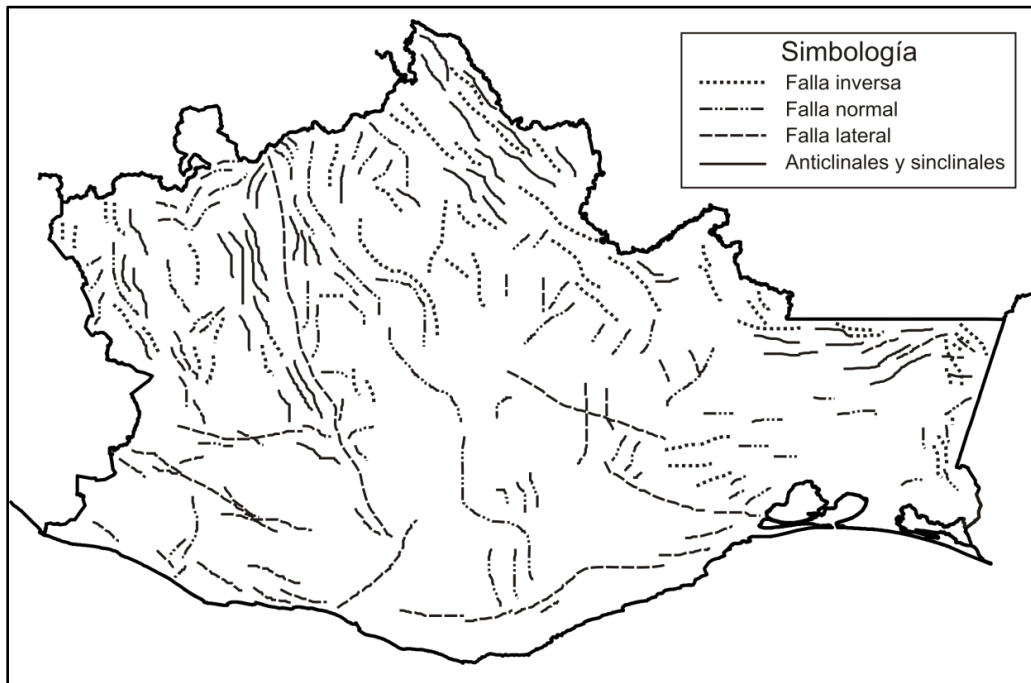


Figura I.13. Fallas en territorio oaxaqueño (ref. 31)

Geología de la Ciudad de Oaxaca

La Ciudad de Oaxaca se ubica en la denominada *Zona Conurbada de la Ciudad de Oaxaca (ZCCO)*, la cual es una superficie de 585 km² conformada por veinte municipios ubicados en la región de los valles centrales (figura I.14). La ZCCO corresponde a la provincia de la Sierra Madre del Sur, se extiende desde el sur del Eje Neovolcánico hasta el Istmo de Tehuantepec. Con una altitud de 1 500 m.s.n.m. es una cuenca drenada por el Río Atoyac, el cual desemboca sus aguas en el Pacífico con el nombre de Río Verde.

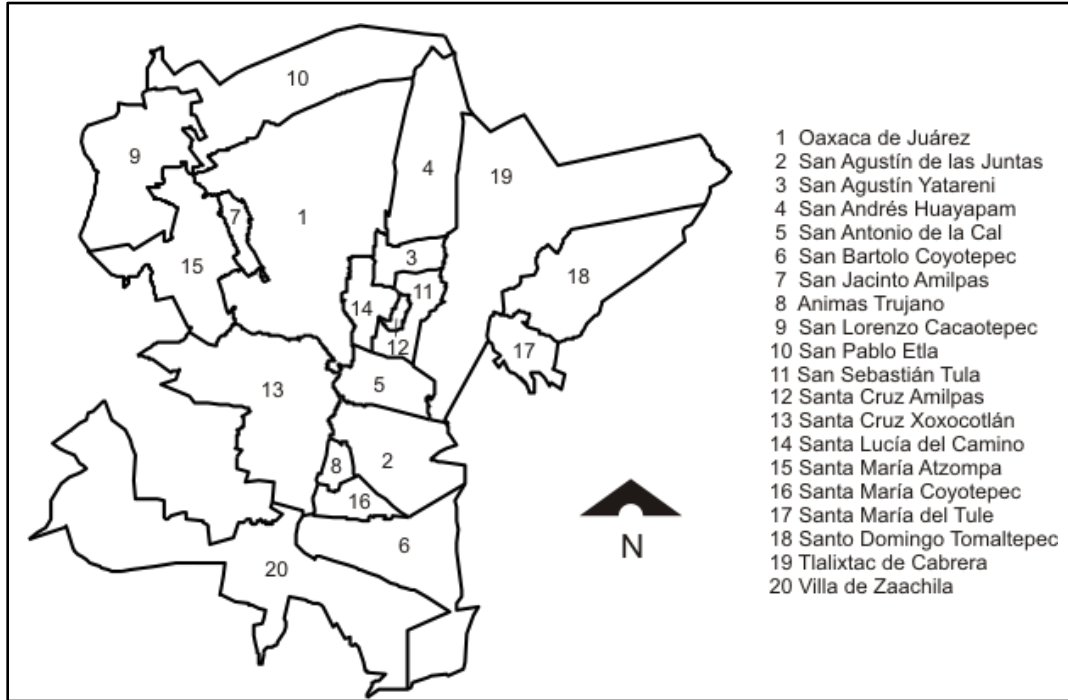


Figura I.14. Municipios de la Zona Conurbada de la Ciudad de Oaxaca (ref. 32)

La configuración geológica de la ciudad es compleja (figura I.15). Las rocas varían en edades que van del Paleozoico al Cuaternario (ref. 33); el primero dio origen a la base de la secuencia estratigráfica representado por rocas metamórficas que forman los Cerros del Fortín al norte y de Monte Albán al oeste; en este basamento sobreyacen rocas sedimentarias metamorfozadas del Mesozoico, calizas, lutitas y areniscas que afloran al sur del Cerro del Fortín y al sureste de la ciudad.

Posteriormente se localiza una sucesión de capas de areniscas y lutitas del Terciario, que en algunas zonas yacen en contacto irregular directamente sobre las rocas paleozoicas. Sigue una secuencia de sedimentos volcánicos, tobas andesíticas, que afloran al noreste de la ciudad y que han sido recubiertos parcialmente por depósitos clásticos continentales, limos arenosos a gravas compactas dentro de una escasa matriz arenosa que datan de fines del Terciario y principios del Cuaternario, sobre los cuales se encuentra la parte colonial de la ciudad.

Finalmente, en la cima de la secuencia estratigráfica se encuentran depósitos aluviales del Cuaternario, representados por limos y arenas sueltas que han sido depositados por los ríos Atoyac, Salado y Jalatlaco; estos depósitos rellenan el valle en una región extensa en la parte sur de la ciudad.

Estructuras geológicas de la Ciudad de Oaxaca

La Ciudad de Oaxaca presenta un número considerable de fallas con diversas extensiones y orientaciones, producto de los esfuerzos tectónicos existentes (figura. I.15). Adicionalmente, se han identificado planos donde se observan las direcciones de los principales ejes anticlinales de la región.

Es posible inferir que la región sufrió dos levantamientos orogénicos, uno que se verificó en el Paleozoico y que causó el metamorfismo de las rocas que se habían formado con anterioridad y otro, en el terciario, que provocó el metamorfismo parcial de las rocas que aparecen en el Cerro del Fortín.

Los principales ejes estructurales de la última orogénesis, correspondientes a los levantamientos, presentan una dirección N20°W, misma que se observa en los estratos de areniscas y lutitas (Knap Ar-Lu) que afloran en la porción norte de la ciudad. Además de estos rasgos se observa que el contacto entre las rocas metamórficas y las areniscas, lutitas, calizas y conglomerados metamorfozados, corresponde a una falla de dirección aproximada EW.

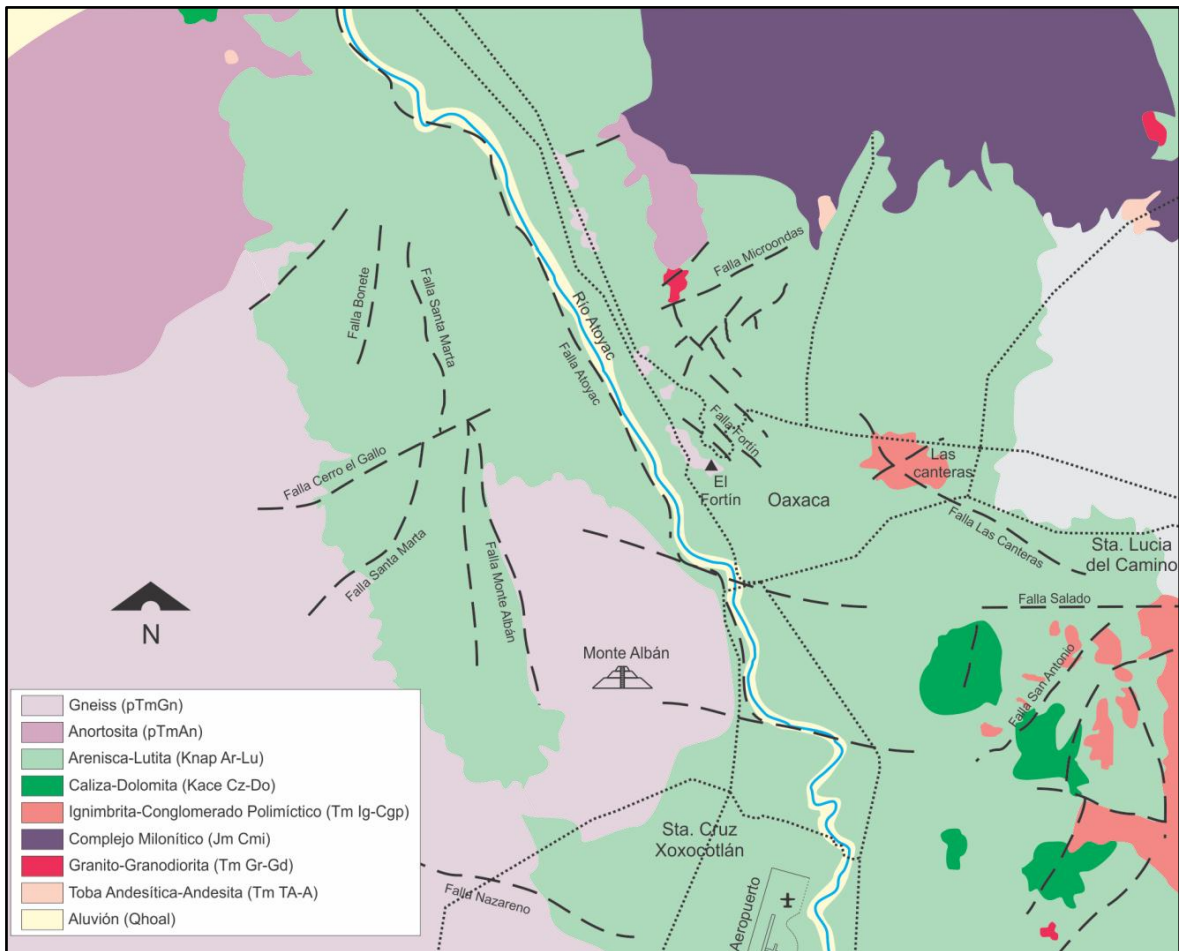


Figura I.15. Geología superficial en la Ciudad de Oaxaca (ref. 34)

Estratigrafía y litología de la Ciudad de Oaxaca

Los afloramientos identificados en la región son de diversa litología (figura I.16); sus edades están comprendidas desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

La litología y sucesión estratigráfica de las diferentes formaciones se describe a continuación (ref. 35).

- Rocas metamórficas (Pm). Formadas en el Paleozoico, afloran en la parte oeste de la ciudad en los cerros de Monte Albán y al pie del Cerro del Fortín. Superficialmente presentan gran intemperización, originando un suelo limo-arenoso de tono amarillento.
- Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfizados (Jm). Estos materiales han originado una serie de rocas metamorfizadas que sobreyacen a las paleozoicas, el contacto entre ambas formaciones está indicado por una falla en la dirección EW.

Predominan los conglomerados de grano fino y fuerte silicificación. La coloración de la formación es variable, observándose en su parte inferior una roca de color blanco en estratos delgados, posiblemente originada a partir de una caliza, mientras que en la parte superior se observa un conglomerado en bancos de 1 m de espesor aproximadamente, de color gris oscuro con intercalaciones de estratos delgados de areniscas y lutitas. A estas rocas se les asigna una edad variable entre el Triásico y el Jurásico.

- Areniscas y lutitas (Tal). Sobreyaciendo la secuencia anterior se encuentra una sucesión de capas de areniscas y lutitas del Terciario de color café amarillento recubiertas parcialmente por una capa de materiales intemperizados del mismo color. Las areniscas se forman en estratos de 0.5 a 1 m de espesor mientras que las lutitas se presentan en capas delgadas. Estas rocas presentan una inclinación entre 30° y 45° hacia el NW, mientras que su dirección es de N20°W, se aprecian algunas variaciones en la dirección de las capas.
- Tobas andesíticas (Tt). En la porción noreste de la ciudad se observa una toba andesítica del terciario de color verde claro, la cual sobreyace las areniscas y lutitas; está parcialmente recubierta por depósitos clásticos continentales (Tc), razón por la cual no siempre es posible definir con exactitud su límite de afloramiento.
- Depósitos Clásticos Continentales (Tc). A fines del Terciario y principios del Cuaternario, se manifestó una fuerte erosión que originó la sedimentación de depósitos clásticos, constituidos en su parte superior por limos arenosos de color café rojizo y a profundidad por grava compactada dentro de una escasa matriz arenosa.
- Depósitos Aluviales (Qal). En la parte baja de la ciudad se encuentran limos y arenas sueltas del Cuaternario que provienen de los aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales que se localizan principalmente a lo largo del río Atoyac presentan un espesor promedio de 30 m. En la zona sureste de la ciudad se observan espesores mayores del aluvión, por lo que se cree que atraviesan los depósitos clásticos continentales anteriormente descritos.
- Depósitos de abanico aluvial (Qaa). En las partes bajas del Cerro del Fortín se observan algunos depósitos de abanico aluvial constituidos por grava subredondeada y angulosa en una matriz limo-arenosa no consolidada.

CAPÍTULO II

Instrumentación Sísmica en Oaxaca

II. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN OAXACA

El estudio de la respuesta sísmica en un sitio requiere de métodos objetivos y cuantitativos para describir el comportamiento del suelo. Los registros del movimiento del terreno durante la ocurrencia de un temblor proveen una herramienta invaluable para la obtención de información esencial en el análisis de este fenómeno, estos registros suelen ser obtenidos a través de la instrumentación directa en campo.

II.1 Red de Acelerógrafos de Oaxaca

Reseña histórica

La importancia del monitoreo de la sismicidad siempre ha sido evidente, por ello, desde finales del siglo XIX se establecieron estaciones con diferentes aparatos para registrar la actividad sísmica en el mundo. En México, la instrumentación comienza en la última década del siglo XIX, fundándose en 1910 el Servicio Sismológico Nacional (SSN). A pesar de este principio alentador, fue hasta la ocurrencia de los sismos de 1957 que se puso de manifiesto la falta de aparatos para registrar eventos de gran magnitud, los cuales constituyen la principal amenaza para el país; de esta manera, la instrumentación se incrementó debido al interés que de este tipo de eventos tiene para la Ingeniería Civil.

El monitoreo sísmico es de tal importancia, que en la actualidad se cuenta con redes de instrumentación en las principales regiones del país, teniendo una mayor concentración en la zona de subducción en Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, así como en la parte norte de la península de Baja California donde se vigila la actividad de la falla de San Andrés (figura II.1). Un número importante de estas estaciones se ubican en las ciudades de Acapulco, México, Oaxaca y Puebla (ref. 37), en trayectorias que van del Pacífico hacia los valles de Oaxaca y México.

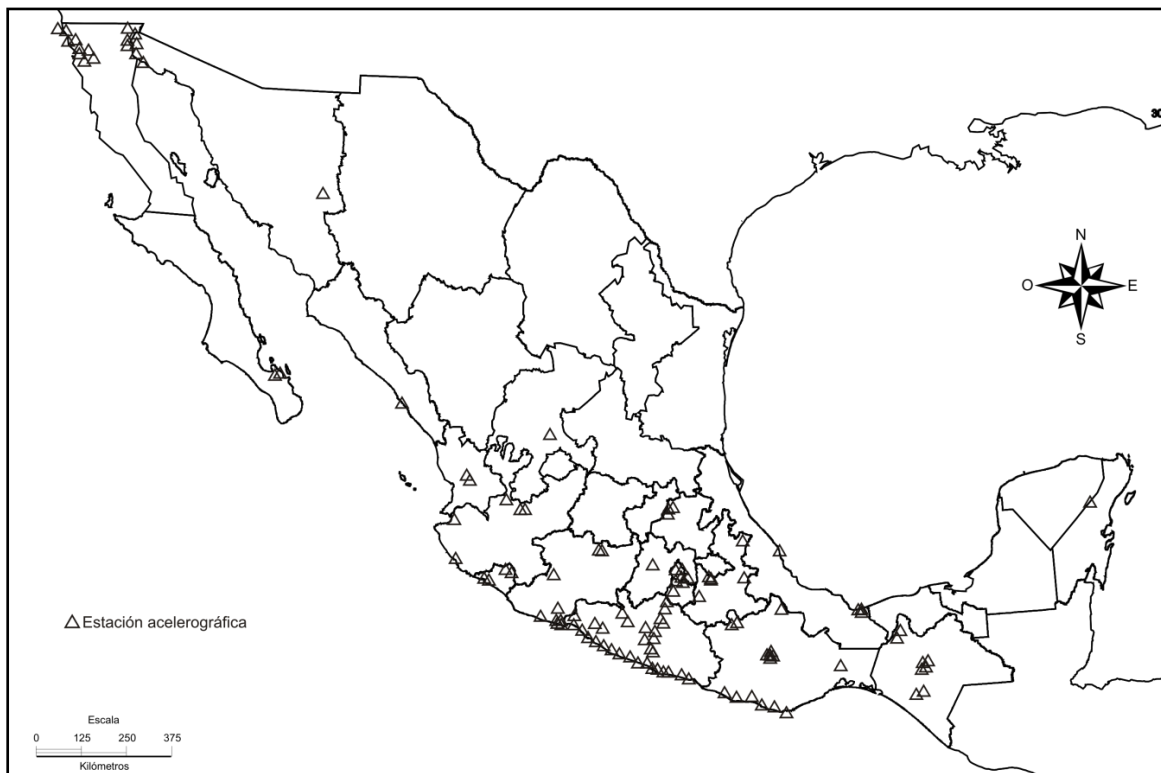


Figura II.1 Instrumentación sísmica en México

Monitoreo de la actividad sísmica

Debido a su ubicación estratégica con respecto a la zona de subducción del Pacífico y la consecuente vulnerabilidad ante la actividad de ésta, la información de la sismicidad en Oaxaca es de gran importancia para la protección civil y la proyección de obras de infraestructura, así como para el estudio del comportamiento del suelo en la región.

El comienzo del monitoreo sísmico en Oaxaca se remonta a la segunda década del siglo XX, cuando entre 1910 y 1923 el SSN lleva a cabo la instalación de 9 estaciones sismológicas en las ciudades de México, Chihuahua, Monterrey, Guadalajara, Veracruz, Mérida, Zacatecas y Oaxaca (ref. 38). Adicionalmente a la labor desempeñada por el SSN, diversas instituciones se han sumado a la tarea de instalar redes de instrumentación, con el objetivo de obtener un mayor entendimiento del fenómeno sísmico en la región; a continuación se presenta una descripción de algunas de ellas (ref. 39).

- Red Regional del Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO). Compuesta por 5 estaciones con sismógrafos *RANGER* alimentados con energía solar. La tabla II.1 presenta sus características.

Tabla II.1 Red Regional del ITO

Localidad	Clave	Coordenadas		Ubicación
		Lat. N	Long. W	
Temascal	TMH	18°13'	96°22'	Instalaciones de la presa Miguel Alemán
Guevea de Humboldt	GVH	16°47'	95°22'	En la comunidad del mismo nombre
Tlaxiaco	TLA	17°15'	97°41'	Santa María Asunción Tlaxiaco
Teotitlán	TEO	18°07'	97°04'	En la comunidad del mismo nombre
Puerto Escondido	PES	15°52'	97°04'	En la comunidad del mismo nombre

- Red Sísmica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para estudiar el potencial sísmico de sitios específicos y caracterizar su respuesta dinámica proporcionando parámetros para el diseño de estructuras civiles, la CFE a través del departamento de Sismo Tectónica de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, ha puesto en operación las 8 estaciones sismológicas presentadas en la tabla II.2.

Tabla II.2 Red Sísmica CFE

Localidad	Clave	Coordenadas	
		Lat. N	Long. W
Huazantlán	HUA	16°14'	95°07'
Aguas Calientes	AGS	16°06'	95°26'
Presa Benito Juárez, CFE	PBJ	16°26'	95°26'
La Cañada	LCD	16°09'	97°1'
Pochutla	PCH	15°44'	96°27'
Ixtlán de Juárez	IXT	17°19'	96°29'
Tlaxiaco	TLA	17°14'	97°41'
Teotitlán	TEO	18°08'	97°04'

- Red Sismológica del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Localizadas en ubicaciones estratégicas, esta dependencia ha instalado 4 estaciones operadas por el SSN cuyas características se presentan en la tabla II.3.

Tabla II.3. Red Sísmica Instituto de Geofísica

Localidad	Clave	Coordenadas		Equipo
		Lat. N	Long. W	
Huatulco	HUIG	15°46'	96°06'	Sismógrafo y acelerógrafo
Oaxaca, Oax	OXIG	17°04'	96°44'	Sismógrafo y acelerógrafo
Oaxaca, Oax	OXX	17°05'	96°44'	Sismógrafo
Pinotepa Nacional	PNIG	16°24'	96°08'	Sismógrafo y acelerógrafo

Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM

El Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) comenzó el monitoreo de la sismicidad en Oaxaca en 1970 al instalar la estación acelerográfica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Oaxaca (OXFM), con la finalidad de registrar movimientos fuertes que no podían ser captados íntegramente por los sismógrafos, ya que la zona centro de Oaxaca tiene una alta probabilidad de sufrir daños por la ocurrencia de sismos de gran intensidad originados en la zona de subducción.

La Red Acelerográfica del II-UNAM está integrada por dos subredes, la *Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca* (RACO) y la *Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca* (RAO).

Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca.

La información existente sobre la actividad sísmica a lo largo de la zona de subducción mexicana y el registro instrumental de los sismos que en ella se generan han permitido identificar diferentes zonas como fuente potencial de generación de temblores de gran intensidad, una de ellas es la correspondiente a Oaxaca. Por esta razón, se decidió realizar la instalación de una red acelerográfica en la entidad, tanto en una franja cuya cobertura se extiende de la zona costera de Huatulco (Oaxaca) a Ometepec (Guerrero), como en una línea de atenuación hacia las ciudades de Oaxaca, Puebla y México (ref.40).

La instrumentación de la franja costera de Oaxaca se inicia en 1979 al instalarse la estación Puerto Escondido (PESC); posteriormente, en 1985 se inicia la operación de la estación Pinotepa Nacional (PNTP); de esta manera, a lo largo de varios años se implementaron cada una de las estaciones que componen la red, hasta alcanzar un total de 12 (ref. 41), cuyas características y ubicación se presentan en la tabla II.4 y en la figura II.2. La selección de los sitios para las estaciones de la RACO se basó en considerar la calidad del material de desplante, la seguridad del sitio y la facilidad de acceso, condiciones necesarias para garantizar un monitoreo permanente.

Tabla II.4 Estaciones de la RACO

Estación	Clave	Coordenadas		Equipo	Material de desplante
		Lat. N	Long. W		
Huamelula	HUAM	16°02'	95°40'	ETNA/1315	Roca
Jamiltepec	JAMI	16°17'	97°49'	ETNA/372	Roca
Las Negras	LANE	15°57'	97°11'	ETNA/372	Roca
Niltepec	NILT	16°34'	94°37'	ETNA/972	Suelo firme
Jalapa del Marqués	OXJM	16°27'	95°27'	ETNA/2224	Roca
Puerto Ángel	PANG	15°40'	96°29'	ETNA/921	Roca
Pinotepa Nacional	PNTP	16°21'	98°04'	ETNA/1917	Limo Arenoso
Río Grande	RIOG	16°01'	97°26'	ETNA/922	Roca
Salina Cruz	SCRU	16°11'	95°13'	ETNA/2223	Roca
San Martín Los Canseco	SMLC	16°39'	96°44'	ETNA/1327	Roca
Tamazulapan	TAMA	16°16'	96°35'	ETNA/1326	Roca
La Galera	GALE	15°59'	96°29'	ETNA/4440	Roca



Figura II.2. Localización de las estaciones de la RAO

Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca

La información sobre la respuesta sísmica del subsuelo de la Ciudad de Oaxaca y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos de la región es escasa, por ello, con la finalidad de investigar estos aspectos se decidió llevar a cabo la instalación de la RAO. Con esta red se pretende además, realizar investigación sobre la propagación de las ondas sísmicas continente adentro y en una línea de atenuación, así como evaluar la amplitud del movimiento en diversos sitios y condiciones de subsuelo y su amplificación con respecto a una referencia en roca.

La ubicación de las estaciones se hizo considerando los siguientes criterios: alcanzar una cobertura general de la zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad de acuerdo a la microzonificación preliminar, instrumentar sitios con diferentes condiciones de subsuelo, contar con una referencia en roca y, finalmente, elegir instalaciones que proporcionen libre acceso, seguridad y protección contra la intemperie.

Como se mencionó previamente, la RAO tuvo su comienzo en 1970 con la implementación de la estación OXFM. Posteriormente, en 1998 se instala una estación en el parque la ciudad de las Canteras, construida sobre un afloramiento de cantera y cuyos registros serían importantes para los estudios de amplificación del suelo, ya que constituye una referencia en roca.

En 1999 se instalaron 5 estaciones en diferentes tipos de suelo, seleccionados considerando la zonificación preliminar establecida para el valle de Oaxaca (ref. 42), en la cual se tomó en cuenta la información geotécnica disponible y un estudio de amplificación relativa de vibración ambiental, lo que permitió definir curvas de isoperíodos, niveles de amplificación relativa y un mapa de microzonificación sísmica. Las estaciones se localizan en la División de Ciencias de la Tierra del Instituto Tecnológico de Oaxaca, la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma Benito Juárez y tres más en la zona histórica de la ciudad, en las escuelas primarias Múgica y Benito Juárez y en la Alameda de León, frente a la Catedral de Oaxaca.

Finalmente, se unieron a la red las estaciones ubicadas en las oficinas de la unidad de Protección Civil de Oaxaca y en las instalaciones del aeropuerto al sur de la ciudad. La tabla II.5 presenta las características de las estaciones que integran la RAO, mientras que en la figura II.3 se indica su ubicación.

Tabla II.5. Estaciones de la RAO

Estación	Clave	Coordenadas		Equipo
		Lat. N	Long. W	
Facultad de Medicina	OAXM	17°05´	96°43´	ETNA/4441
Alameda de León	OXAL	17°04´	96°44´	ETNA/1531
Escuela Benito Juárez	OXBJ	17°04´	96°43´	ETNA/1020
Ciudad Universitaria	OXCU	17°03´	96°43´	ETNA/1022
Primaria Múgica	OXPM	17°04´	96°43´	ETNA/1021
Instituto Tecnológico	OXTO	17°05´	96°45´	ETNA/1918
Las Canteras	OXLC	17°04´	96°42´	ETNA/1328
Aeropuerto	OXAE	17°01´	96°43´	ETNA/4454
Protección Civil	OXPC	17°03´	96°43´	ETNA/4576



Figura II.3. Localización de estaciones RAO

II.2 Equipo de monitoreo y registros obtenidos

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de instrumentos especializados para monitorear la actividad sísmica, los más utilizados son los sismógrafos y los acelerógrafos, los cuales tienen la capacidad de registrar el movimiento del terreno al paso de las ondas sísmicas.

Sismógrafo. Es un instrumento de alta sensibilidad capaz de registrar el movimiento del terreno durante un temblor. Opera con el principio de inercia, el cual señala que los objetos estacionarios se mantienen en reposo a menos que se les aplique una fuerza. Su mecanismo básico de funcionamiento consiste en una masa suspendida de un resorte ligado a un soporte anclado al suelo (figura II.4), cuando éste es sacudido por el paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa la obliga a permanecer un instante en reposo, tras el cual tiende a oscilar. El desplazamiento relativo entre la masa y la base proporciona una medida del movimiento asociado al terreno, el cual se registra triaxialmente en dos componentes horizontales y una vertical.

El sistema fundamental está integrado por un tambor en la base y un marcador sujeto a la masa mediante el cual se generan los registros del desplazamiento relativo (sismogramas), los cuales representan la vibración del suelo ante la excitación. Los sismógrafos modernos son eléctricos y de banda ancha, utilizan un sistema de fuerzas balanceadas o de retroalimentación negativa que consiste en un circuito que ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa inercial para cancelar el movimiento relativo, el cual es convertido mediante un transductor eléctrico en una señal eléctrica que es una estimación de la fuerza de retroalimentación que debe ejercerse para anular la vibración del péndulo, la cual se relaciona con el movimiento del suelo (ref. 43).

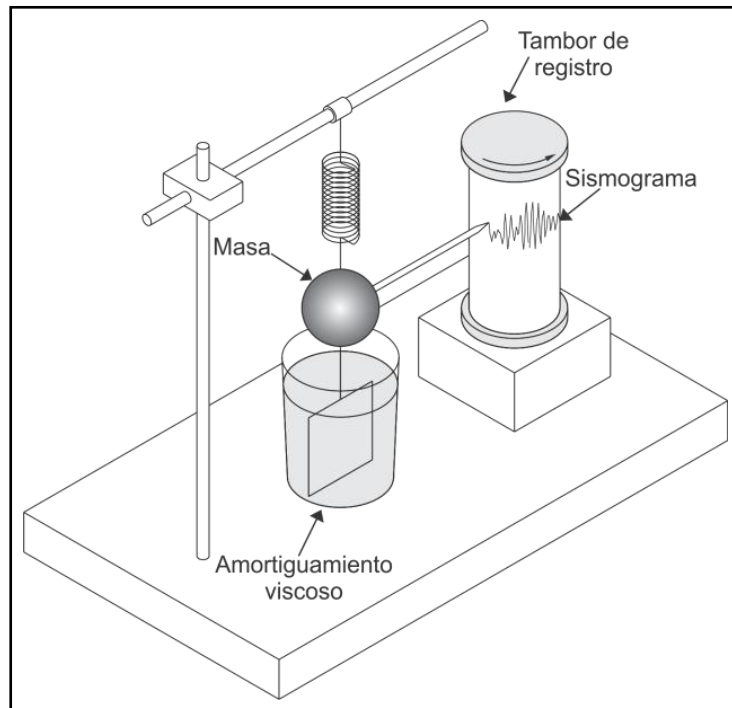


Figura II.4. Esquema de funcionamiento de un sismógrafo

Los sismógrafos están diseñados para ser altamente sensibles a los movimientos del terreno y son capaces de amplificarlos de diez a cientos de miles de veces; esta característica los hace útiles en el monitoreo de sismos cercanos de poca magnitud y lejanos de magnitudes grandes. Sin embargo, cuando a corta distancia ocurre un evento fuerte, el aparato no es capaz de obtener el registro completo, ya que debido a su gran sensibilidad, pueden generar un sismograma en el cual se corten los valores de amplitud del movimiento; este fenómeno se conoce como *registros saturado*, y para evitarlo es necesario emplear acelerógrafos.

Acelerógrafo. En Ingeniería es importante estimar las fuerzas que actúan sobre suelos y estructuras durante un temblor; los acelerógrafos son dispositivos útiles para este fin, ya que son capaces de medir la aceleración que actúa sobre ellos, aun para valores superiores a la magnitud de la gravedad terrestre. Funcionan bajo el mismo principio que los sismógrafos, sin embargo, sus características dinámicas son tales, que son más sensibles a los cambios de aceleración que a los de desplazamiento; otra diferencia es que la masa es constante, por lo que la rigidez del resorte es mayor y por tanto la sensibilidad del aparato se ve disminuida, haciéndolo apto para el registro de eventos fuertes.

Una de las mayores cualidades de los acelerógrafos es que poseen dispositivos de arranque que los activan cuando el movimiento alcanza cierta intensidad, de tal forma que entra en operación sólo cuando se sobrepasa el umbral establecido, evitando el registro ininterrumpido durante las 24 horas del día. El aparato evalúa continuamente el movimiento y la señal analógica adquirida por los sensores es convertida a muestras digitales que, mediante un algoritmo de activación se verifican si se satisfacen el umbral de disparo; cuando éste es rebasado, se comienza el almacenamiento de la información en memoria *RAM* o en dispositivos tipo *flash*. Los instrumentos cuentan con un retardo digital fijo o programable, conocido como *memoria de pre evento* que permite registrar parte de la señal previa al punto de activación.

Los componentes de un acelerógrafo se pueden dividir en dos partes: los sensores y el registrador. Los primeros constan de acelerómetros cuyo número y arreglo dependerá de la aplicación, siendo la disposición triaxial la más empleada. Por su parte, el registrador se divide en tres elementos: la primera de conversión análogo-digital, la segunda de control y la tercera de almacenamiento; su fin es convertir continuamente las señales analógicas de los sensores a muestras digitales, las cuales son comparadas en la unidad de control para verificar si se satisface un umbral de disparo programado para comenzar el almacenamiento hasta que se deja de cumplir la condición dada.

Equipos utilizados en la Red Acelerográfica de Oaxaca del II-UNAM

Los aparatos utilizados en la Red Acelerográfica de Oaxaca del II-UNAM son modelos *ETNA* (figura II.5) de *Kinematics* (ref. 44), son digitales de alta resolución, lo cual facilita el procesamiento de la información mediante el uso de computadoras. Los instrumentos pueden registrar 100, 200 ó 250 muestras por segundo por canal, sus sensores son de tipo *Episensor* o de fuerzas balanceadas.

El equipo amplifica, filtra y convierte las señales generadas a palabras de 18 *bits*, grabando la información en una tarjeta de almacenamiento *Flash Card* intercambiable; su nivel de disparo puede ajustarse con valores diferentes en los tres canales, correspondientes a cada eje. El consumo de corriente del acelerógrafo es bajo, por lo que le energía puede suministrarse a través de celdas solares, baterías en flotación y cuando es posible, un cargador de AC.



Figura II.5. Acelerógrafo digital *ETNA*

Registros obtenidos

Las estaciones acelerográficas que integran la Red Acelerográfica de Oaxaca han producido una gran cantidad de registros generados por sismos ocurridos en las regiones que influyen en la entidad, y cuya intensidad ha sido suficiente para alcanzar los niveles de activación predeterminados en al menos una de las estaciones. En la tabla II.6 se presentan los registros obtenidos en las estaciones de la RAO desde el 28 de septiembre de 1973 hasta el 11 de diciembre de 2011.

Tabla II.6. Sismos registrados en la Ciudad de Oaxaca (ref. 45 y 46)

No.	Fecha	M	OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL	No.	Fecha	M	OXCU	OXLC	OXTO	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL
1	19730828	6.8						x		51	20030122	7.6		x					
2	19781129	7.8						x		52	20030201	5.3			x				
3	19801024	7.0			x			x		53	20030613	4.1			x				
4	19820607	7.0						x		54	20030708	4.6			x				
5	19830124	5.3						x		55	20030925	4.6			x				
6	19940704	5.9						x		56	20031201	4.3	x		x	x			x
7	19940827	5.0						x		57	20040113	5.1	x	x	x	x		x	x
8	19940828	5.2						x		58	20040113	5.5	x	x	x	x		x	x
9	19950914	7.2						x		59	20040114	4.6			x				
10	19960401	5.0						x		60	20040117	4.7	x	x	x	x		x	x
11	19980203	6.2						x		61	20040210	4.4	x		x			x	x
12	19980502	4.4						x		62	20040218	4.3	x	x	x	x		x	x
13	19990615	7.0		x				x		63	20040420	5.4	x		x	x		x	x
14	19990615	4.5		x				x		64	20040506	4.3	x		x				
15	19990930	7.5		x				x		65	20030122	7.6		x					
16	19991007	4.4			x				x	66	20030201	5.3			x				
17	19991025	4.6			x					67	20030613	4.1			x				
18	19991106	4.5		x	x	x		x	x	68	20030708	4.6			x				
19	19991110	4.3			x	x			x	69	20030925	4.6			x				
20	19991129	4.4			x					70	20031201	4.3	x		x	x			x
21	19991217	4.4			x	x				71	20040113	5.1	x	x	x	x		x	x
22	20000119	4.5		x	x	x				72	20040113	5.5	x	x	x	x		x	x
23	20000301	4.7		x	x	x		x		73	20040114	4.6			x				
24	20000312	6.4		x	x					74	20040117	4.7	x	x	x	x		x	x
25	20000510	4.7			x	x		x		75	20040210	4.4	x		x			x	x
26	20000721	5.9			x					76	20040218	4.3	x	x	x	x		x	x
27	20000817	4.4			x					77	20040420	5.4	x		x	x		x	x
28	20000929	4.7		x	x	x				78	20040506	4.3	x		x				
29	20001017	5.4			x					79	20040614	5.8	x		x	x		x	x
30	20010126	5.0			x					80	20040801	4.6			x			x	x
31	20010219	4.8			x					81	20040807	5.3		x	x	x	x	x	x
32	20010220	4.7			x					82	20040818	5.7		x	x	x	x	x	x
33	20010908	4.8		x	x	x			x	83	20041025	4.5	x		x	x		x	x
34	20011003	4.4		x	x	x	x	x	x	84	20041102	4.5	x		x				
35	20011110	6.0			x	x				85	20041115	5.1	x		x				
36	20011128	6.0			x					86	20041115	4.5			x				
37	20020116	6.3		x	x					87	20041210	5.1	x	x	x			x	
38	20020130	5.1		x	x	x	x	x		88	20050814	5.8				x			
39	20020226	5.0			x					89	20050908	4.4		x	x	x		x	x
40	20020511	4.5			x	x				90	20050924	4.7		x	x	x	x	x	
41	20020607	4.7	x		x					91	20051012	4.3			x			x	
42	20020607	5.6	x	x	x	x	x	x	x	92	20051106	4.8			x				
43	20020609	4.4	x							93	20051111	3.5				x			
44	20020611	4.9			x					94	20051121	4.4	x		x			x	x
45	20020618	4.5						x		95	20051202	4.8	x		x			x	
46	20020805	5.3	x	x	x	x		x	x	96	20051209	4.8	x		x			x	
47	20020827	4.9	x	x	x	x	x	x	x	97	20051222	4.2			x			x	
48	20021108	5.2	x		x					98	20060110	3.8				x			
49	20021202	4.7	x		x					99	20060118	4.9			x			x	
50	20021229	4.6	x		x	x		x		100	20060119	4.2	x	x	x			x	x

Tabla II.6 (continuación). Sismos registrados en la Ciudad de Oaxaca

No.	Fecha	M	OXCU	OXLC	OXT0	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL	No.	Fecha	M	OXCU	OXLC	OXT0	OXPM	OXBJ	OXFM	OXAL
101	20060209	4.3			x			x		153	20090814	4.4	x	x	x	x	x	x	x
102	20060608	4.2	x	x	x	x		x	x	154	20090819	4.4	x	x	x	x	x		x
103	20060819	5.5	x	x	x	x	x	x	x	155	20090828	4.0		x				x	
104	20061108	5.1	x	x	x	x	x	x	x	156	20090908	5.1	x	x	x	x	x	x	x
105	20070214	4.6	x	x	x		x		x	157	20090915	3.9		x				x	
106	20070315	5.1	x	x	x	x	x	x	x	158	20090918	4.8		x	x		x	x	
107	20070413	6.3		x	x					159	20091008	4.0	x	x	x	x	x	x	x
108	20070504	4.8	x	x	x	x	x	x	x	160	20091029	5.5	x	x	x	x	x	x	x
109	20070602	4.5	x	x	x	x		x	x	161	20091216	4.1	x	x	x	x	x	x	x
110	20070706	6.2	x	x	x	x	x	x		162	20091225	4.2		x	x				
111	20070820	4.5	x	x	x	x		x	x	163	20100108	4.6		x				x	
112	20070915	5.0	x	x	x	x		x	x	164	20100119	4.0	x	x	x	x	x	x	x
113	20071001	4.7	x	x	x	x		x	x	165	20100120	4.7		x	x			x	
114	20071017	3.7		x				x		166	20100123	4.1		x	x			x	
115	20071020	4.5	x	x	x	x	x	x	x	167	20100201	4.3	x	x	x			x	x
116	20071112	4.2	x	x				x	x	168	20100209	5.8	x	x	x	x	x	x	x
117	20071119	4.4	x	x				x		169	20100226	4.4	x	x	x	x	x	x	x
118	20071211	4.6	x	x	x	x		x		170	20100317	4.2	x	x	x	x	x	x	x
119	20071213	4.5	x	x	x	x	x	x	x	171	20100412	4.2	x	x	x	x	x	x	x
120	20080104	4.4	x	x	x			x	x	172	20100416	5.1	x	x	x	x	x	x	x
121	20080109	4.1	x	x	x	x		x		173	20100420	5.0	x	x	x		x	x	x
122	20080118	4.5	x	x	x	x	x	x	x	174	20100513	4.1	x	x	x	x	x	x	x
123	20080211	4.8	x	x	x	x		x		175	20100531	4.4	x	x				x	
124	20080212	6.6	x	x	x	x	x	x	x	176	20100608	4.0	x	x	x		x	x	x
125	20080308	4.5	x	x	x	x		x		177	20100608	4.0		x	x		x	x	
126	20080411	4.3	x	x				x		178	20100609	3.8		x	x			x	
127	20080415	6.5	x	x	x					179	20100625	5.1	x	x	x	x	x	x	x
128	20080428	5.6	x	x	x			x	x	180	20100701	3.9		x	x			x	
129	20080504	4.5	x	x				x		181	20100724	4.4		x	x			x	
130	20080517	4.8	x	x	x	x	x	x	x	182	20100921	5.0	x	x	x	x	x	x	x
131	20080601	4.1	x	x	x	x	x	x	x	183	20101101	5.0	x	x	x	x		x	x
132	20080620	4.0	x	x				x		184	20101126	4.5	x	x	x	x		x	x
133	20080622	4.9	x	x	x	x		x	x	185	20101126	4.5	x	x		x		x	
134	20080718	4.5	x	x		x		x	x	186	20110105	4.5		x	x	x	x	x	
135	20080730	5.1	x	x	x	x	x	x	x	187	20110120	5.1		x	x	x		x	
136	20080910	4.8	x	x				x		188	20110204	4.5	x	x	x	x	x	x	x
137	20081016	6.6	x	x	x			x		189	20110211	4.4	x	x	x	x	x	x	x
138	20081123	4.8		x				x		190	20110225	6.0	x	x	x	x	x	x	x
139	20081204	4.2		x				x		191	20110228	4.2		x	x		x	x	x
140	20081211	4.0		x				x		192	20110326	4.1	x	x	x	x	x	x	x
141	20081215	4.4		x	x	x	x	x	x	193	20110407	6.7	x	x	x	x	x	x	x
142	20081218	4.3		x				x	x	194	20110418	4.4		x	x				
143	20090117	5.2		x	x	x	x	x	x	195	20110426	5.5		x	x				
144	20090121	4.1		x				x		196	20110505	5.5	x	x	x	x	x		x
145	20090202	4.2			x			x		197	20110511	4.5	x	x	x	x	x		x
146	20090218	4.8	x	x	x	x	x	x	x	198	20110603	4.9	x	x	x	x	x		x
147	20090310	4.9		x	x			x		199	20110610	4.9		x	x				
148	20090407	4.8	x	x	x	x	x	x	x	200	20110612	4.8		x	x	x	x		x
149	20090427	5.7	x	x	x		x			201	20110709	5.3	x	x	x	x	x		x
150	20090522	5.7	x	x	x	x	x		x	202	20110710	4.8		x	x				
151	20090526	4.6		x	x					203	20110813	5.7		x	x				
152	20090607	5.0		x	x					204	20111211	6.5		x			x		

II.3 Cobertura y demandas actuales de instrumentación

La actividad sísmica produce movimientos del terreno con diferentes características en puntos distintos de la superficie terrestre, la variación espacial de la respuesta sísmica puede ser importante aún en regiones pequeñas, es por ello que la distribución de las estaciones de monitoreo debe ser tal que satisfaga las demandas de instrumentación local.

El desarrollo urbano experimentado en los últimos años en la Ciudad de Oaxaca ha puesto en evidencia la necesidad de conocer a fondo el fenómeno sísmico, ya que representa un riesgo para la población de la región. La cobertura actual de la instrumentación para el estudio de la actividad sísmica en la traza original de la ciudad ha resultado satisfactoria con la implementación de las diversas redes acelerográficas existentes; sin embargo, en los últimos años se ha desencadenado un gran crecimiento de la mancha urbana fuera de los límites de dicha traza original, en especial hacia el sur del valle de la capital.

La importancia del crecimiento urbano en el marco del fenómeno sísmico radica en que en la zona sur del valle de Oaxaca se han observado amplificaciones considerables de la respuesta dinámica del terreno durante la ocurrencia de un temblor (ref. 47), fenómeno atribuido a la presencia de los depósitos de materiales blandos de origen aluvial de mayor espesor en la ciudad.

El estudio de la respuesta sísmica es de interés debido al riesgo que implica tanto para los habitantes de la región como para la infraestructura local, ya que en el área se ubican vías de comunicación terrestre primarias, así como el propio aeropuerto de la ciudad; sumado a esto, en los últimos años se ha manifestado un gran crecimiento en la construcción de nuevos centros educativos y desarrollos habitacionales de gran magnitud (ref. 48).

Por estos motivos, se ha hecho evidente que la cobertura inicial de instrumentación sísmica en la ciudad debe ser ampliada para satisfacer las demandas actuales y complementar el conocimiento de la respuesta dinámica del terreno en las zonas de mayor vulnerabilidad sujetas al crecimiento urbano.

CAPÍTULO III

Instalación de una estación acelerográfica en una zona de suelos blandos

III. INSTALACIÓN DE UNA ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA EN UNA ZONA DE SUELOS BLANDOS

Con el objeto de ampliar las necesidades de instrumentación en la capital oaxaqueña, y debido a que en la zona sur se han identificado depósitos de materiales blandos susceptibles de experimentar importantes niveles de amplificación del movimiento sísmico, se decidió ampliar la cobertura de la RAO mediante la instalación de una estación acelerográfica, con objeto de estudiar la influencia de las condiciones locales en la respuesta sísmica del terreno esta región de alta vulnerabilidad.

III.1 Zonificación sísmica local

La clasificación del terreno con fines de diseño sísmico debe considerar los efectos de sitio para la proyección de estructuras de acuerdo con los reglamentos de construcción vigentes, los cuales clasifican los terrenos para fines de diseño sísmico en diversas clases, tomando en cuenta principalmente el período dominante del terreno y la velocidad de onda de corte efectiva, entre otros parámetros; sin embargo, esta clasificación es muy general y no satisface las condiciones particulares de muchas ciudades, ya que, en el caso ideal, la consideración del tipo de suelo debe depender de la respuesta sísmica en cada región.

En el caso del territorio oaxaqueño, el *Reglamento de construcción y seguridad estructural para el Estado de Oaxaca* (ref. 49) define tres tipos de terreno a considerar para fines de diseño sísmico:

- Tipo I. Terrenos formados por rocas o suelos generalmente firmes depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena.
- Tipo II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos; zona constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos, intercalados con capas de arcilla lacustre cuyo espesor varía entre decenas de centímetros y pocos metros.
- Tipo III. Lacustre, integrado por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla, las cuales son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

Es importante señalar que la clasificación utilizada en Oaxaca es la misma que se utiliza en la Ciudad de México. Otros investigadores (ref. 50), mediante el análisis de registros de sismos y microtemores, realizaron un estudio con objeto de caracterizar la respuesta del terreno con fines de microzonificación sísmica en la capital oaxaqueña; con los resultados obtenidos, proponen el mapa mostrado en la figura III.1.

Debido a la alta vulnerabilidad de la ciudad, se han realizado estudios para conocer el comportamiento del terreno y los efectos de sitio en diversas zonas (ref. 51, 52 y 53); gracias a estas investigaciones se han identificado variaciones significativas que muestran una tendencia importante en la amplificación de la respuesta del terreno en algunas zonas con respecto a una referencia en roca ubicada en el cerro del Fortín (figura III.2), encontrándose factores de amplificación relativa de magnitudes aún superiores a 17 (ref. 54).

Los resultados identifican dos zonas vulnerables. La primera corresponde a la traza original de la parte colonial de la ciudad (zona II), compuesta por algunos depósitos aluviales y tobas andesíticas, además de calizas, areniscas y conglomerados metamorfizados. Es posible considerar esta región como una zona de transición entre los materiales aluviales y las rocas metamórficas. El principal riesgo se debe a la presencia de edificaciones con alto valor histórico; la estimación de períodos dominantes del suelo se infiere entre 0.25 y 0.5 segundos, así como valores de amplificación relativa entre 3 y 7.

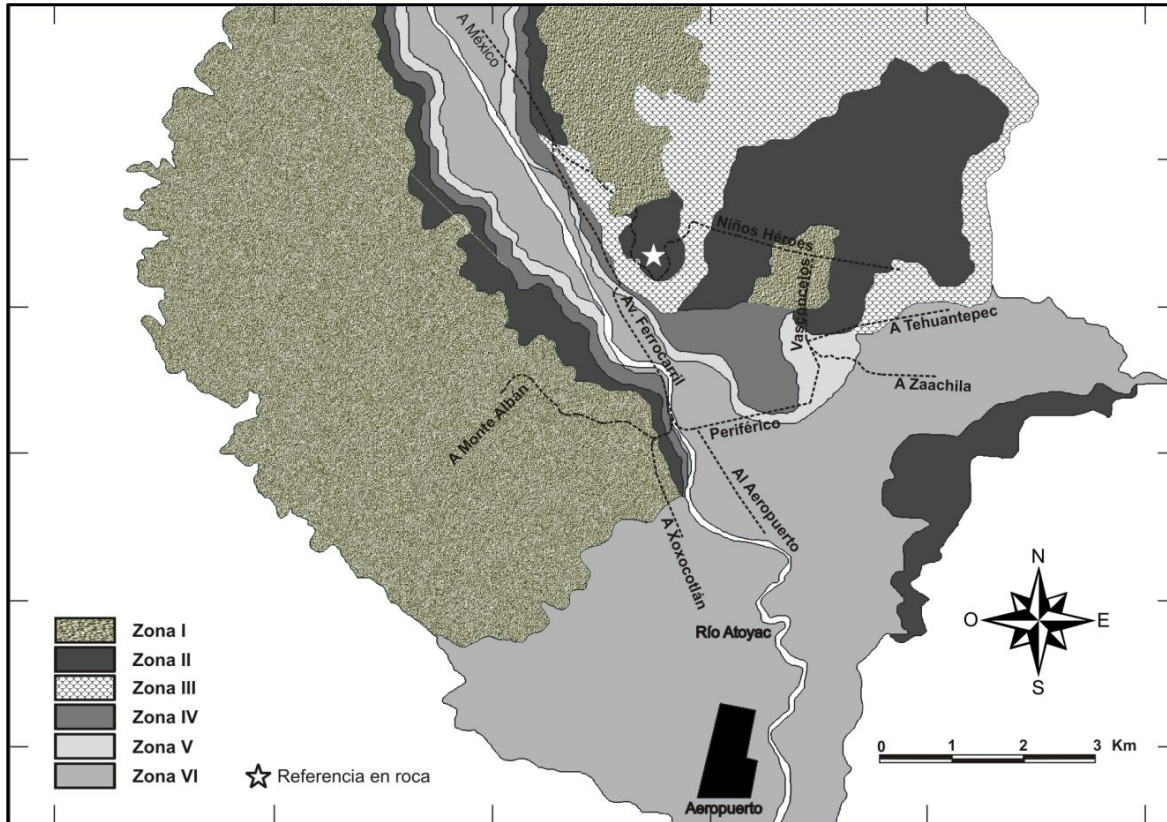


Figura III.1. Mapa de microzonificación sísmica para la zona urbana de la ciudad de Oaxaca (ref. 55).

La segunda región (zona VI) es la más vulnerable, en ella se han estimado valores de amplificación promedio entre 5 y 17, mientras que los períodos dominantes se encuentran entre 0.5 y 0.8 segundos. Los depósitos se componen principalmente de materiales aluviales depositados por el Río Atoyac. Debido al origen de estos suelos se infiere la existencia de estratos intercalados de limos, arcillas y materiales con alto contenido orgánico, tal como lo demuestran los resultados de algunos estudios geotécnicos realizados en la Ciudad de Oaxaca (ref. 56), que se presentan en las figura III.3 y III.4; así mismo, se reportan espesores promedio de los depósitos superiores a 30 m, que tienden a aumentar al desplazarse hacia el sur.

Estos terrenos abundantes en arcillas, arenas y limos sueltos son objeto de explotación de agua subterránea y en algunos casos la profundidad de excavación sugiere que los materiales aluviales atraviesan los depósitos clásticos continentales; por ejemplo, los pozos *La Rabonera*, *María Merguita Rayero*, *Hidalgo* y *Coyotepec* alcanzan profundidades de 55, 61, 45 y 60 m respectivamente. Cabe resaltar que el primero de ellos ha sufrido daños por sismos que han ocasionado el desplazamiento de la base de la bomba (ref. 57).

Como puede observarse, esta zona se caracteriza por la presencia de materiales blandos de espesor importante, así como una topografía accidentada, por lo que el estudio de la modificación de la respuesta sísmica del terreno en la región es de gran interés.

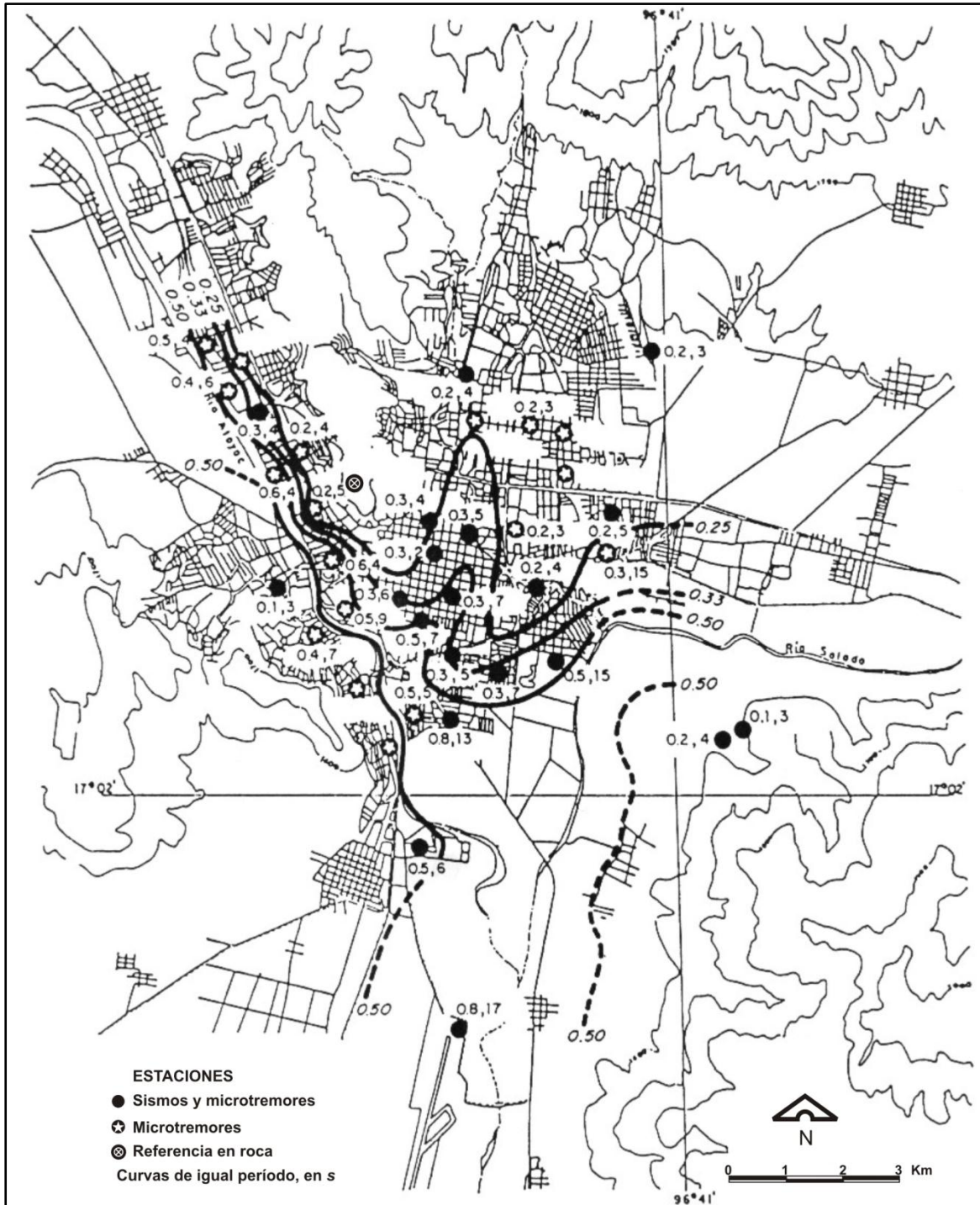


Figura III.2. Mapa de isoperíodos obtenido por Lermo y Chávez-García (ref. 58) para la zona urbana de la Ciudad de Oaxaca. Se muestran junto a cada estación los valores promedio de período dominante en segundos y de amplificación relativa con respecto a la referencia en roca ubicada en el cerro del Fortín.

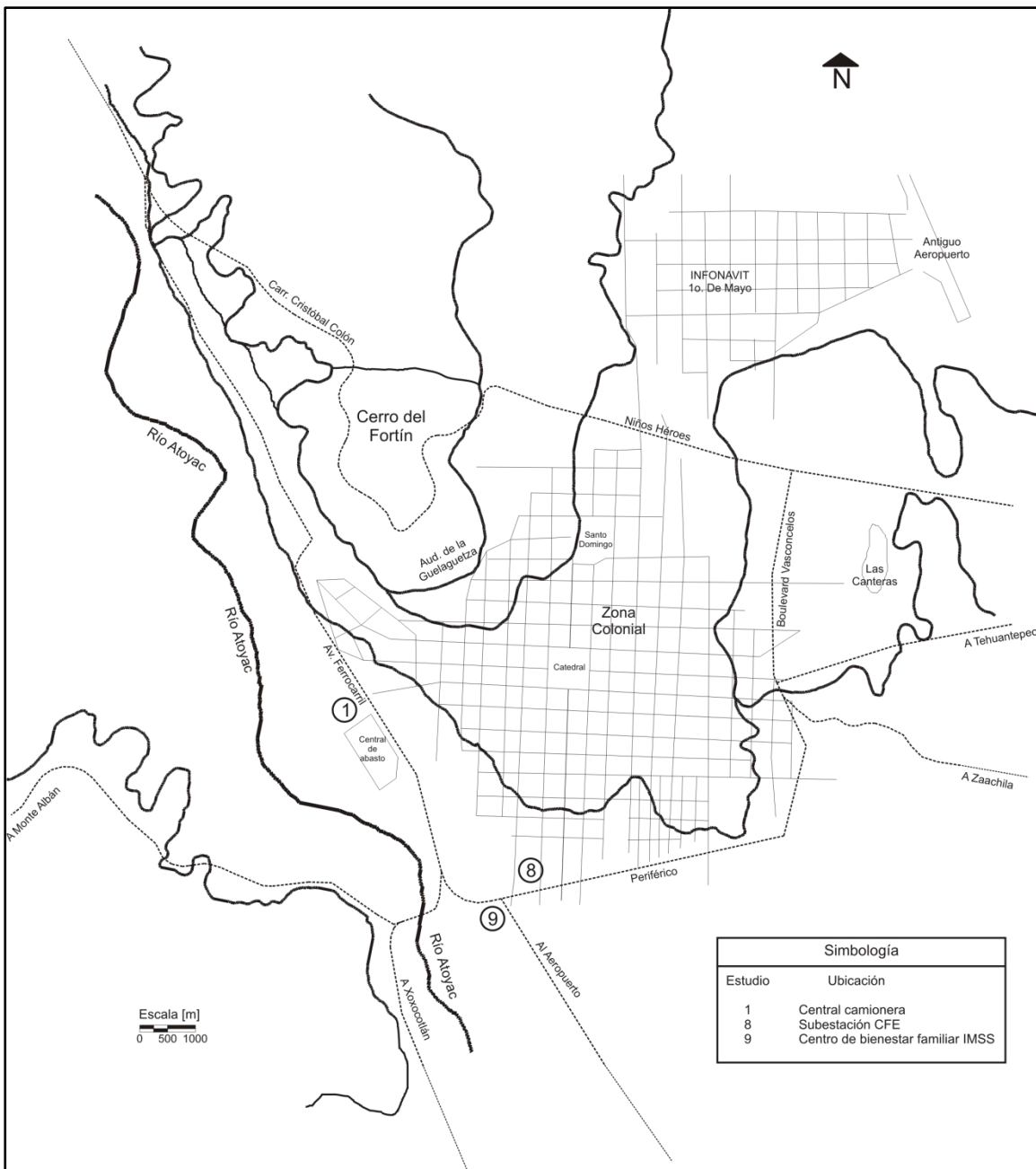


Figura III.3. Ubicación de sondeos (ref. 59)

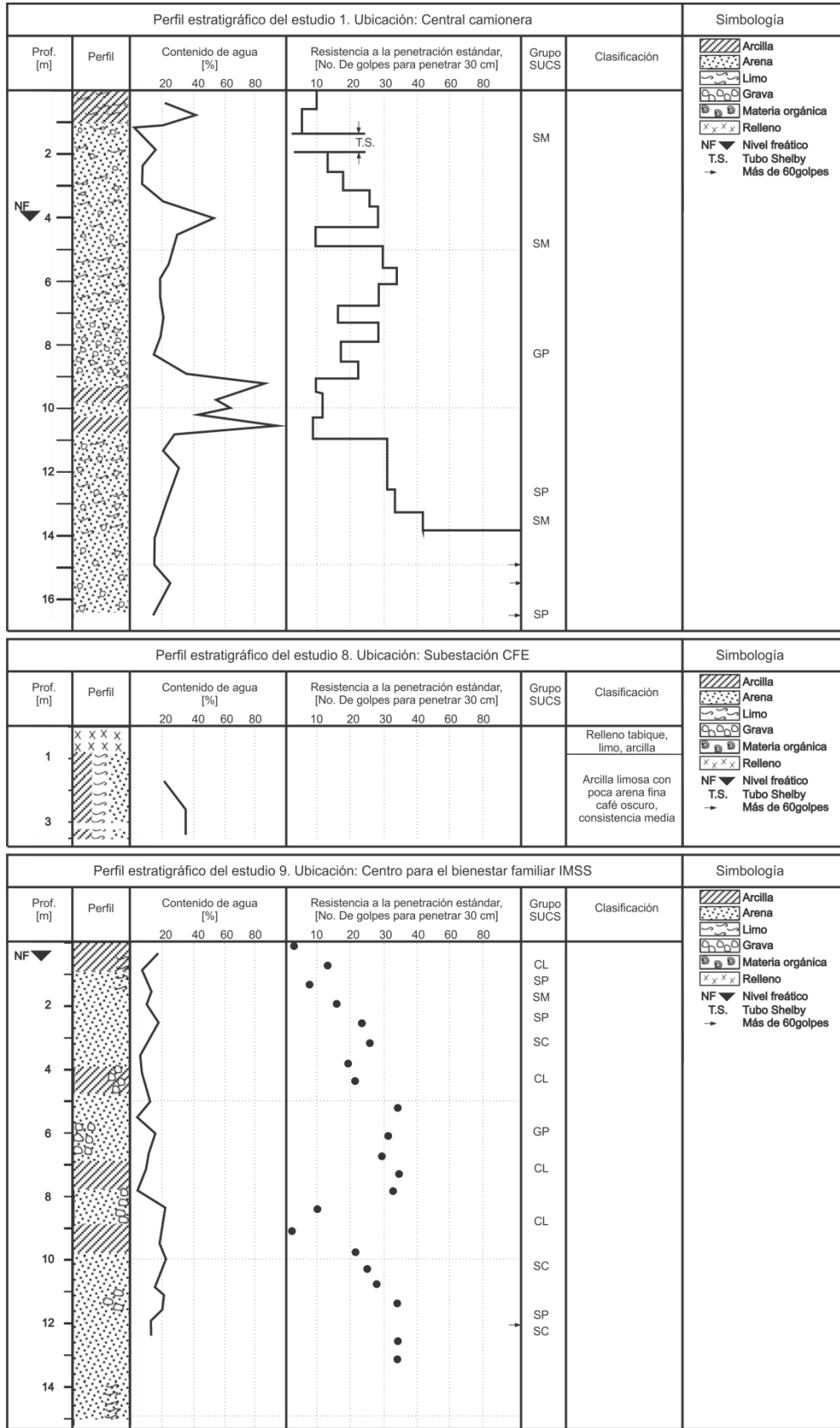


Figura III.4. Perfiles estratigráficos en la zona II (ref. 60)

III.2 Selección del sitio

La Ciudad de Oaxaca ha experimentado un significativo crecimiento en los últimos años, esto ha causado la incorporación a Oaxaca de Juárez de otros municipios que en conjunto conforman la Zona Conurbada de la Ciudad de Oaxaca (ZCCO). Uno de los desarrollos de mayor importancia se ha llevado a cabo al sur de la ciudad, en la denominada zona de suelos blandos correspondiente al municipio de Santa Cruz Xoxocotlán.

Considerando los antecedentes establecidos previamente, se ha hecho evidente la necesidad de conocer la respuesta sísmica del terreno en esta región, ya que, adicionado a las características de vulnerabilidad propias del territorio, se ha originado en los últimos años un importante crecimiento demográfico, consecuencia del desarrollo urbano de la capital, que ha puesto en riesgo a una gran cantidad de personas, y es por ello que se ha elegido este municipio para la instalación de una estación acelerográfica con el fin de estudiar la respuesta sísmica del terreno.

Santa Cruz Xoxocotlán

Entorno territorial. Oaxaca de Juárez limita al sur con el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán (figura III.5); este territorio se localiza en la región de los Valles Centrales entre las coordenadas 96° 43' y 96°48' longitud oeste y 17° 03' y 16°5' latitud norte, a una altura de 1530 m.s.n.m. La superficie del municipio es de 76.55 km² que representa el 1.2% de la total del estado.



Figura III.5. Ubicación del municipio Santa Cruz Xoxocotlán en la ZCCO

Santa Cruz Xoxocotlán presenta un gran flujo de movilidad de sus habitantes, principalmente en actividades de comercio y servicios que éstos desarrollan en la capital; parte de estos movimientos se derivan de la presencia en Xoxocotlán de grandes equipamientos urbanos como el *Aeropuerto Internacional Benito Juárez* y la *Unidad Deportiva El Tequio*, que diariamente abastecen la demanda metropolitana de estos servicios. Por otra parte, el crecimiento de la mancha urbana ha demandado el desarrollo de la infraestructura vial, la cual ha hecho del municipio de Xoxocotlán un paso importante para la conexión de nuevos equipamientos metropolitanos como el Centro de Rehabilitación Infantil Teletón (CRIT), la Universidad Anáhuac y el aeropuerto capitalino.

Aspectos demográficos. La cercanía de la Ciudad de Oaxaca produce una influencia significativa en el desarrollo de Xoxocotlán debido a que su desenvolvimiento económico y urbano no pueden desligarse del de la capital, esto se ha manifestado en el crecimiento de la población del municipio durante la última década, lo que ha originado la instalación de diferentes asentamientos humanos y áreas comerciales, propiciando una continuidad de la ciudad a lo largo de la carretera que une ambas comunidades.

Estas circunstancias han afectado la sustentabilidad municipal debido al aumento desordenado y sin control de la construcción de fraccionamientos, por lo cual, la tasa de crecimiento de Xoxocotlán es superior a la normal de una población establecida o tradicional, identificándose un considerable desarrollo en la vivienda de media y alta densidad (figura III.6). Cada día son más los terrenos que se fraccionan para casas habitación; la mayoría de las veces, las personas que pueblan estas colonias sólo las utilizan como dormitorio, ya que sus actividades productivas las llevan a cabo en la ciudad.

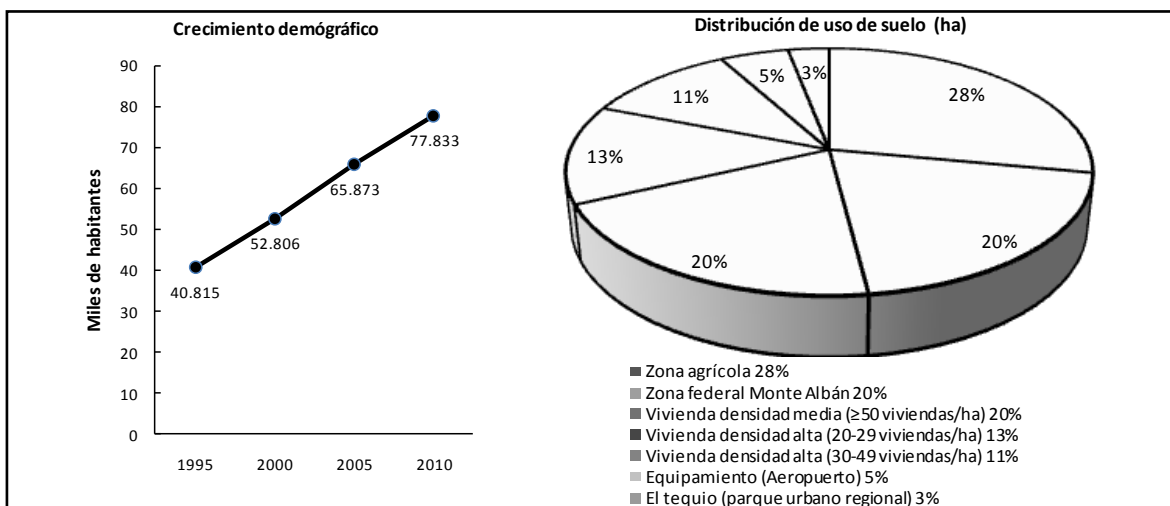


Figura III.6. Uso de suelo en Xoxocotlán (ref. 61)

La demanda de terrenos en la última década ha tenido una importancia tal que aún las zonas correspondientes a los cerros circundantes han sido invadidas; cabe resaltar el caso de Monte Albán, donde el área protegida perteneciente a la reserva arqueológica ha sufrido la invasión de desarrollos habitacionales irregulares. Sin embargo, estos asentamientos son escasos, ya que, al estudiar la topografía de la región se observa que la mayor parte del territorio se encuentra en la continuación del valle de la capital (figura. III.7), y es en esta zona, sobre los depósitos de materiales blandos destinados en el pasado a actividades agropecuarias, en los que se ha desarrollado la infraestructura habitacional y de servicios de Xoxocotlán.

Por otra parte, consecuencia del desarrollo habitacional se ha generado una alta demanda de servicios de enseñanza en la región, ya que, si bien la población económicamente activa lleva a cabo sus actividades productivas en la capital del estado, se ha preferido satisfacer las necesidades educativas de los demás integrantes de la familia dentro del propio municipio. La infraestructura existente no satisface las demandas de los habitantes, por lo cual se han construido en los últimos años una mayor cantidad de planteles de todos los niveles, resultando aún insuficientes, por lo que uno de los objetivos del municipio en este rubro es aumentar la capacidad y el número de centros educativos disponibles en la localidad (ref. 62); otras necesidades como salud, esparcimiento y actividades culturales son satisfechas principalmente en la capital.

Resulta notable que sólo los requerimientos de vivienda y educación hayan casi duplicado la población del municipio en sólo 15 años. La etapa de desarrollo actual, si bien ha puesto en riesgo a un mayor número de personas, ofrece una oportunidad única, ya que es posible, mediante el estudio de la actividad sísmica de la región, proyectar medidas de carácter preventivo más que correctivo en esta área con alta vulnerabilidad, debido a la presencia de suelos blandos.

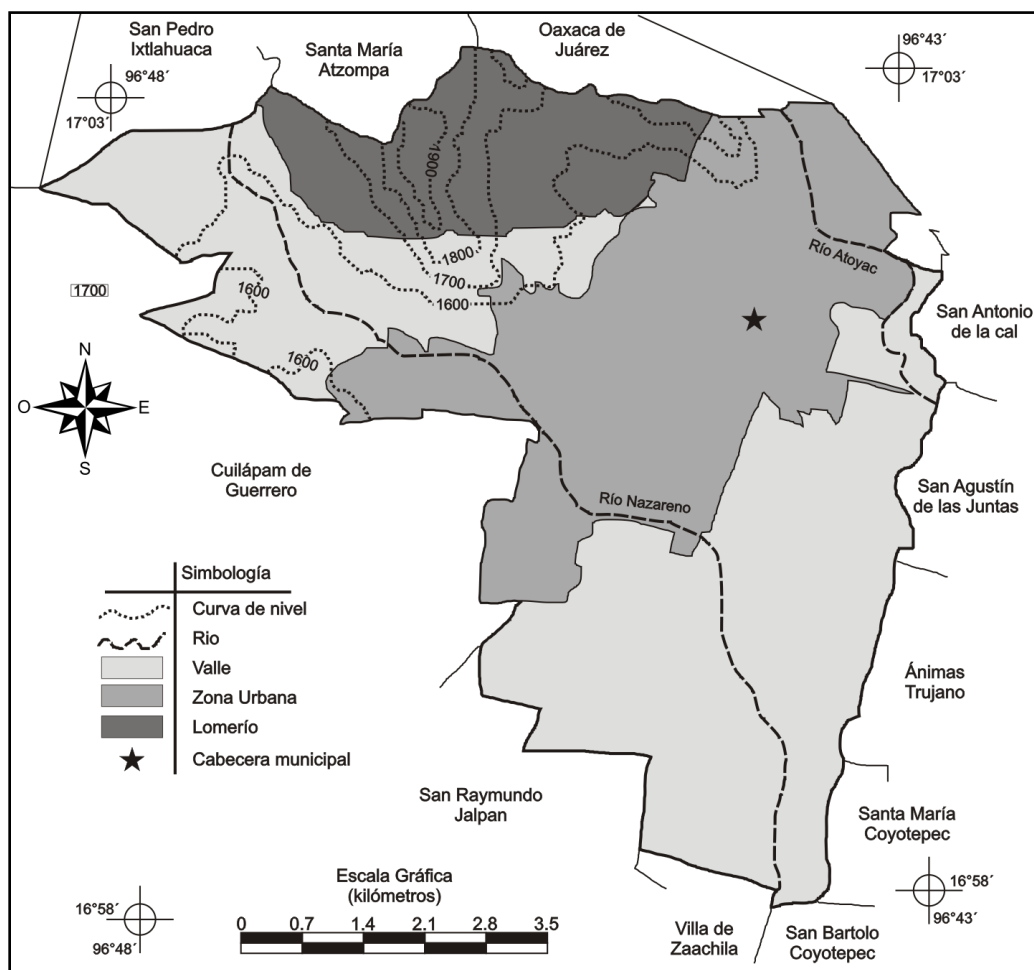


Figura III.7. Configuración topográfica de Xoxocotlán (ref. 63)

Características del suelo. La mayor parte del territorio de Xoxocotlán se localiza en la zona VI de la microzonificación mostrada en la figura III.1. De acuerdo con esta clasificación, la región se caracteriza por la predominancia de materiales blandos de origen aluvial. Información adicional señala que el suelo presente en la demarcación se clasifica, desde el punto de vista edafológico como vertisol pélico (ref. 64), el cual se caracteriza por presentar altos contenidos de arcilla montmorillonita capaz de desarrollar comportamiento expansivo, bajo cambios en su contenido de agua.

Los fenómenos de expansión-contracción de estos depósitos ocasionan movimientos verticales de los materiales, provocando un proceso de mezclado uniforme en las capas superficiales, lo que provoca suelos caracterizados por un horizonte A profundo sin horizonte B (ref. 65). Los vertisoles se forman típicamente de rocas altamente básicas como basalto, en climas estacionalmente húmedos o sujetos a sequías erráticas y a inundación. Dependiendo del material parental y del clima, pueden oscilar del gris o rojizo al más familiar negro. En su estado climático natural están cubiertos de pastos o bosques pastizales, ya que, debido a su textura no favorecen el crecimiento forestal.

El USDA/NRCS (ref. 66) señala que este tipo de suelos se caracteriza por tener una composición de material arcilloso entre el 50 y 70 % con un comportamiento expansivo importante, el cual provoca fisuras profundas que inician en la superficie de los depósitos. El contenido de agua en estos terrenos es muy variable debido a que durante la temporada de lluvias el agua se filtra a través de las grietas formadas en la época de estiaje, ocasionando procesos de remoldeo del material tanto en su superficie como dentro de la masa de suelo.

Visita de campo y selección de sitio para la estación

Con la elección de Xoxocotlán para el emplazamiento y considerando la información recopilada, se programó una visita de campo para la selección del sitio específico para la nueva estación. Las escuelas y oficinas gubernamentales presentan una buena opción para el establecimiento, ya que reúnen diversas características que garantizan, en cierta medida, condiciones de operación adecuadas para los equipos. Entre estas características se debe resaltar la seguridad, ya que algunas estaciones del II-UNAM han sido objeto de actos de vandalismo (en el caso de la RAO, 5 de 9 las estaciones se ubican en planteles escolares, una en las oficinas de protección civil de la capital y una en el aeropuerto de la ciudad).

La investigación preliminar puso de manifiesto la existencia de un gran número de escuelas en el municipio, por lo que se dio prioridad a éstas, preparándose un directorio previo a la visita. En cuanto a la zona de búsqueda, se tuvo preferencia por la zona centro, así como al oriente de la cabecera municipal (figura. III.8). Durante el recorrido se identificó que la zona norte del aeropuerto presentaba una alta concentración de centros educativos, ubicándose algunos colindantes uno con otro. La mayoría de estos planteles son de reciente creación, destacándose la presencia de la Universidad Pedagógica Nacional, la Universidad La Salle y el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIDIR) del IPN; uno de los planteles de esta región fue seleccionado como el emplazamiento de la nueva estación.

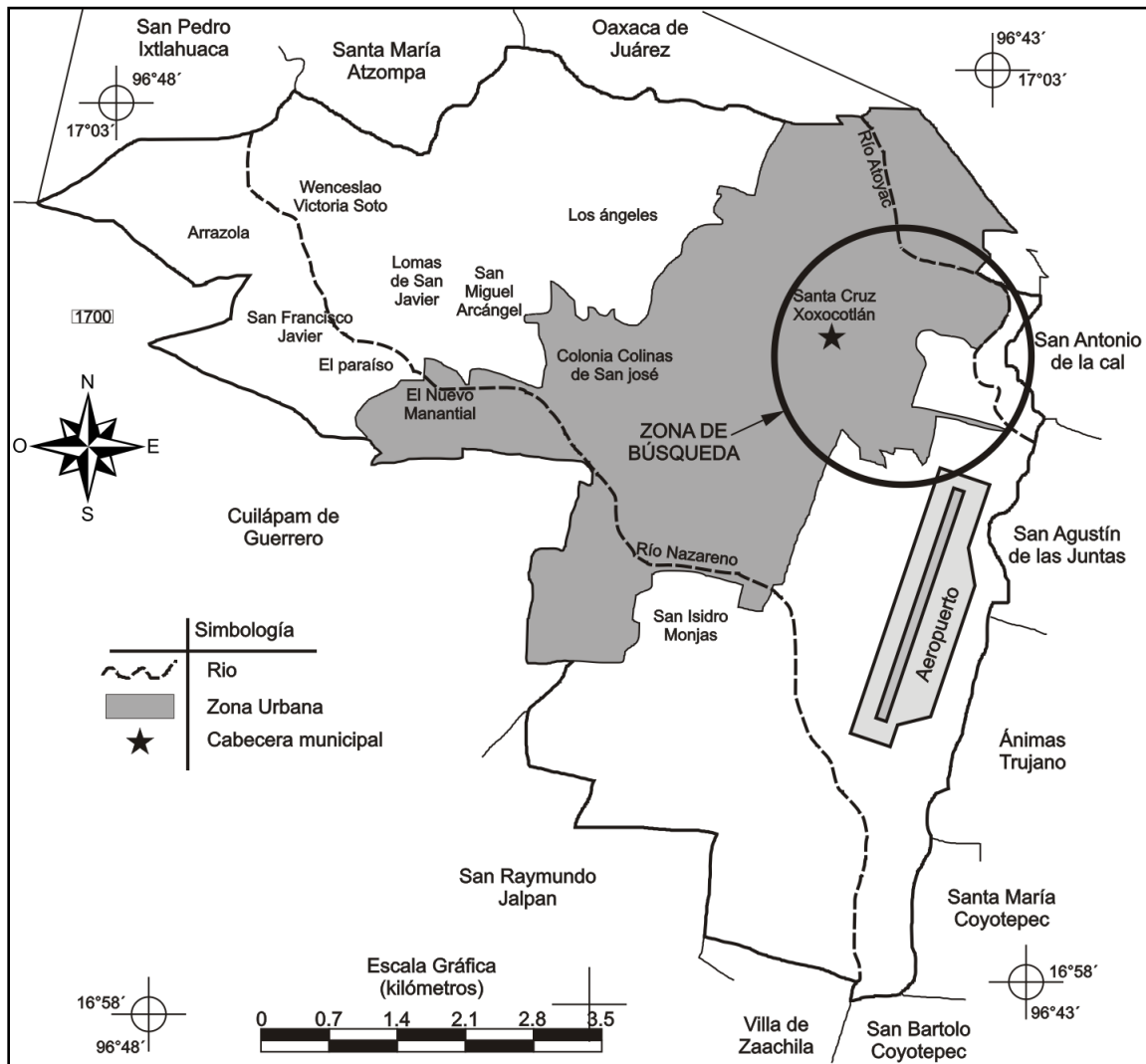


Figura III.8. Zona elegida para la instalación de la estación

Centro de Bachillerato Tecnológico y de Servicios 259

El Centro de Bachillerato Tecnológico y de Servicios (CBTIS) 259 *Manuel García Vigil* fue elegido para la instalación de la estación. Fundado en 1987 y ubicado en Camino antiguo a San Bartolo Coyotepec s/n, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, comenzó operaciones en aulas improvisadas de madera y lámina, dando la oportunidad a jóvenes del municipio de cursar la enseñanza media superior. En la zona en que se ubica el plantel se observa un desarrollo urbano reciente, la mayoría de las escuelas y casas son nuevas, así mismo, en algunas de las tierras de cultivo ubicadas al sur es evidente el cambio de uso de suelo, ya que varias hectáreas están en la primera fase de la construcción de más fraccionamientos habitacionales de alta densidad, mientras que otras se encuentran a la venta para el mismo fin.

La elección del sitio obedeció a diversos factores; en primera instancia, el plantel se ubica en una zona de gran contraste en cuanto al desarrollo urbano; al norte, a unos pocos metros se localizan establecimientos comerciales y algunas colonias y escuelas de nivel básico; al oeste y noroeste, se ubican fraccionamientos habitacionales de nivel medio; por otra parte, en la región noreste, este y sureste se localizan colonias de nivel medio y popular así como diversidad de escuelas; finalmente, la zona que se extiende de suroeste a sureste, se encuentra dominada por tierras de cultivo (figura. III.9).

Un segundo factor es la disponibilidad de espacio, ya que, si bien las autoridades refieren que existen planes de ampliación de las instalaciones del plantel, se cuenta con áreas amplias aptas para la ubicación de la estación en las cuales se observa la presencia del terreno natural sin alteración superficial aparente; así mismo, estas zonas se encuentran alejadas del tránsito vehicular y de edificaciones importantes. Finalmente, el emplazamiento en el interior del centro educativo garantizará la seguridad de la estación, facilitando así mismo el suministro de energía eléctrica y la posibilidad en el futuro de transmisión en tiempo real a través de internet, debido a la existencia de la infraestructura para este servicio.

El terreno sobre el que se ubica el CBTIS era destinado anteriormente a actividades agropecuarias; se ubica aproximadamente a 500m de la ribera del Río Atoyac, por lo que es una región en la cual se han llegado a presentar (aunque muy raramente) inundaciones. Durante la visita se realizó un reconocimiento del material de depósito en la zona, fue posible analizarlo tanto a nivel superficial como a una profundidad aproximada de 3 m debido a la existencia de algunos pozos a cielo abierto ubicados a 30 m del plantel en unos lotes en que se realizaban actividades de construcción de un nuevo fraccionamiento.

Al analizar las paredes de las excavaciones se apreció un suelo homogéneo, de granulometría muy fina sin estratificaciones aparentes hasta la profundidad observada. El depósito presentaba una coloración café clara uniforme sin brillo ni olor. El contenido de agua era bajo, hallándose la capa superficial en estado seco, esto se asocia a la exposición del material a la radiación solar ya que los pozos llevaban tiempos abiertos y la visita se realizó en época de estiaje. Así mismo, el material de las paredes exhibía buena cementación, presentándose en la zona más cercana a la superficie secciones pequeñas en estado seco y suelto con algunos terrones de material (de 2 a 7 cm de diámetro promedio) fuertemente cementados.

En el interior del plantel, el área elegida para el emplazamiento de la estación corresponde a la destinada a las actividades deportivas, en la cual se aprecia menor alteración del terreno natural. Las colindancias del CBTIS en el área consisten en un terreno amplio al norte, destinado a la cría de aves, la Universidad Pedagógica al este y un camino rural de escaso tránsito al sur. En la esquina noreste de la zona se ubica un pozo de bombeo, por lo cual, con el fin de obtener un dato aproximado del espesor del depósito de suelo se interrogó al subdirector sobre la profundidad de dicha instalación, refiriendo que desconocía el dato. Sin embargo, se obtuvo información de otro pozo que abastece a los fraccionamientos cercanos al plantel, el cual tiene una profundidad de perforación de 38.40 m y un diámetro de ademe de 20.32 cm (ref. 67).



Figura III.9. Alrededores del CBTIS 259 (ref. 68)

En la zona elegida para establecer la estación se localizaba una excavación de 2 m de diámetro y 1 m de profundidad, por lo cual se realizó una inspección del material de fondo y superficial, el cual conservaba la coloración identificada en los pozos a cielo abierto, de granulometría muy fina, sin identificación de tamaño de partícula al tacto o a la vista y de textura jabonosa. El contenido de agua era bajo cercano al estado seco. El material suelto se presentaba en terrones de diámetro variable (desde 1 mm hasta 10 cm) con una fuerte cementación y con presencia de materia orgánica, compuesta por raíces y fibras vegetales pequeñas.

Los terrones se pulverizaron para apreciar las partículas en su tamaño más fino, identificándose una consistencia natural blanda y de baja permeabilidad. En el remoldeo el material exhibió una plasticidad media y ligera tenacidad cerca del límite plástico, desmoronándose pronto la muestra labrada en forma de rollo al rebasar dicho límite. El suelo mostró una dilatancia lenta así como una alta sensación de contracción en la piel, dificultándose el retiro de los restos secos. Finalmente, se determinó una alta rigidez del material, ya que una muestra cubicada labrada y secada completamente exhibió una alta resistencia en estado seco.

De acuerdo con la información recabada antes de la visita, se esperaba observar la presencia de las típicas fisuras superficiales de los vertisoles (los cuales se habían reconocido como los suelos predominantes en la región) sin embargo, éstas no fueron encontradas, su ausencia se asocia, por una parte, a que el depósito puede ubicarse en un suborden identificado por el USDA/NRCS (ref. 69), el cual se caracteriza por mostrar poca o nula evidencia de agrietamiento superficial, pero que tiene un potencial de desarrollarlo en caso de poseer un alto coeficiente de expansión lineal (entre 0.07 y 0.2). Por otra parte, la región se encuentra influenciada por dos ríos importantes, el Atoyac y el Nazareno, lo cual puede tener influencia en los cambios de contenido de agua, evitando el desarrollo de los procesos expansivos de los materiales arcillosos.

Pruebas realizadas posteriormente con muestras alteradas de material, identificaron al suelo como una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL), con un porcentaje en la fracción fina superior al 80 % y límites de consistencia $w_L = 36.15\%$, $w_p = 20.45\%$ e $PI = 15.41\%$ (figura III.10). Con los resultados obtenidos de la visita de campo se comprueba la predominancia de materiales aluviales en la región, fundamentalmente arcillas inorgánicas, con lo cual se verifica la elección adecuada del sitio para la ubicación de la estación.

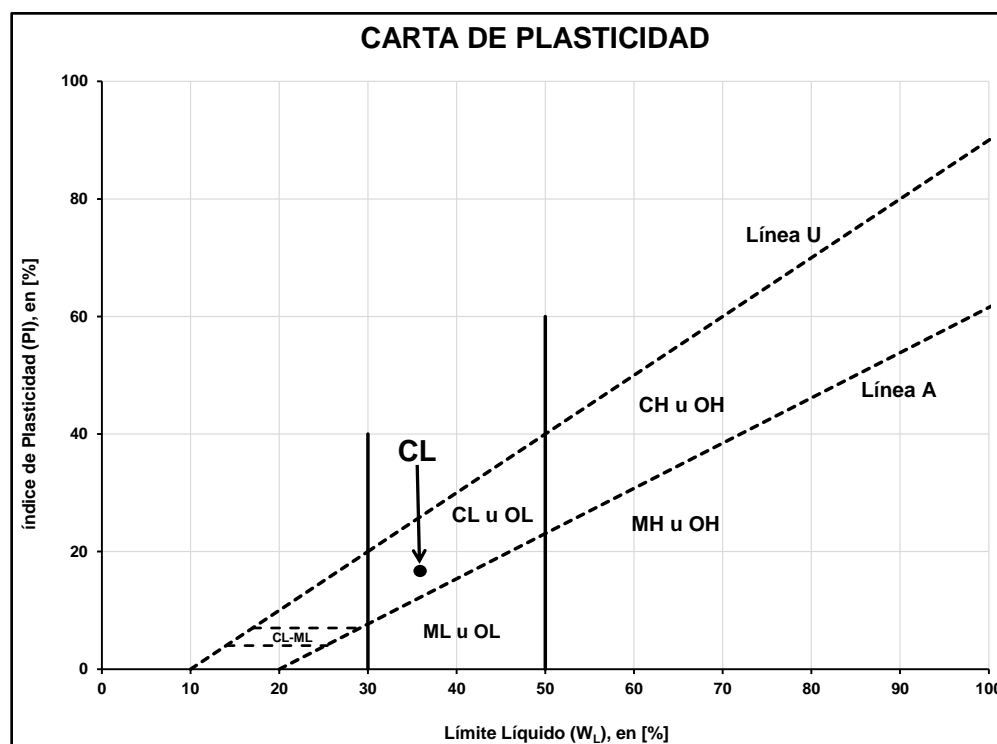


Figura III.10. Clasificación del suelo presente en el CBTIS de Xoxocotlán

III.3 Características de la estación

Las estaciones acelerográficas de campo libre utilizadas en las redes operadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM están constituidas por dos componentes: una caja metálica empotrada en una base de concreto (desplantada en suelo o roca) y una torre metálica (figura III.11). La caja resguarda esencialmente el acelerógrafo, el cargador de celdas solares, el regulador de corriente y las baterías que abastecen de energía al equipo; este contenido puede variar según las especificaciones de cada estación, con la posibilidad de incluir elementos adicionales como *modems* o sensores externos, entre otros. Por su parte, la torre sirve de emplazamiento para el sistema de posicionamiento global (GPS) y las celdas solares, los cuales se conectan al acelerógrafo y cargador para suministrar información y energía eléctrica, respectivamente.

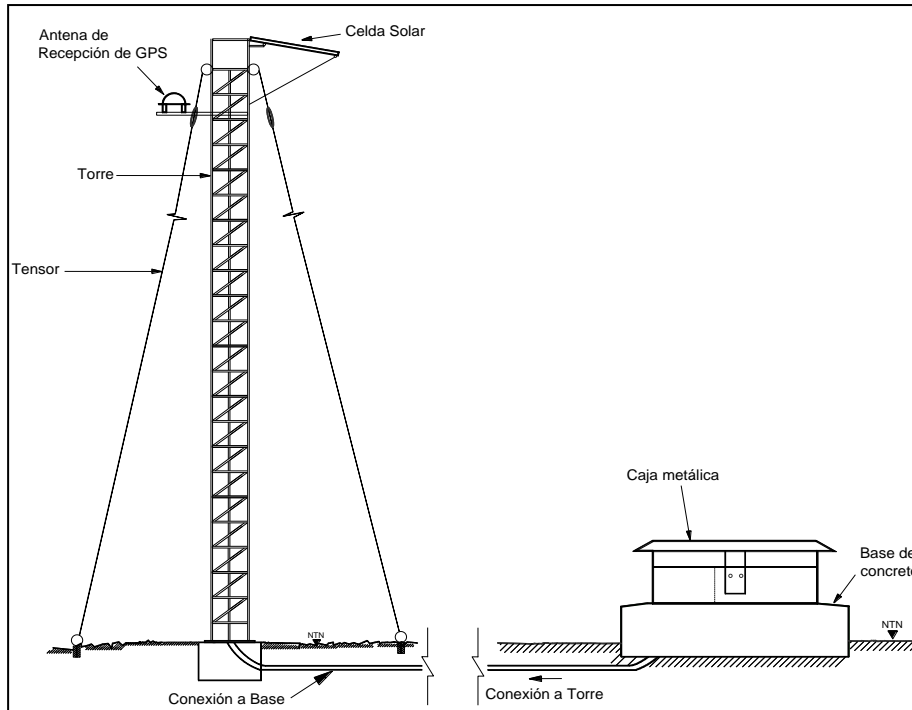


Figura III.11. Componentes de una estación acelerográfica de campo libre del II-UNAM

De esta manera, el sitio de emplazamiento, además de cumplir las condiciones para obtener información de calidad y garantizar la operación continua, debe contar con espacio suficiente para albergar estos componentes, si bien, en ocasiones puede evitarse la utilización de la torre al instalar las celdas solares y el GPS en la azotea de alguna edificación cercana. El buen desempeño a través de los años ha evidenciado la funcionalidad de este diseño, por lo cual, la estación de Xoxocotlán siguió esta misma filosofía.

Requisitos para la instalación

Independientemente de los objetivos de la instrumentación del sitio, la instalación de una estación acelerográfica típica de campo libre debe cumplir con los siguientes requerimientos.

Lugar de desplante. Las estaciones pueden ubicarse en roca o suelo; las primeras son útiles para estudios sísmológicos así como para determinar los principales parámetros de un sismo (magnitud, profundidad, localización epicentral, entre otros). En el caso de Xoxocotlán el material de desplante es suelo, el cual resulta más apropiado para la investigación del comportamiento del terreno, su influencia en las estructuras adyacentes y los efectos de sitio. Estas estaciones se localizan principalmente en ciudades o asentamientos donde se estima que la actividad sísmica puede causar pérdidas materiales y/o humanas.

El sitio elegido para emplazar la estación se ubica en el espacio comprendido entre la cancha de basquetbol y los antiguos salones de lámina provisionales (figura. III.12) el cual resulta adecuado por encontrarse en una zona que permanecerá libre, además de hallarse alejada del tránsito peatonal, así como de edificios importantes.



Figura III.12. Ubicación de la estación en el CBTIS (ref. 70)

Seguridad. La experiencia señala que las instalaciones a cargo del gobierno municipal, estatal o federal (escuelas, deportivos, oficinas, estaciones de bomberos, entre otros) resultan sitios adecuados para las estaciones. En primer lugar, estos sitios cuentan con empleados encargados de mantener su integridad, por lo cual, al establecer una estación, se tiene la tendencia a considerarla parte de la infraestructura, por lo que el resguardo se extiende a ella. En caso de no contar con personal de seguridad, la colocación en el interior de las instalaciones garantiza en cierta medida la protección de la estación, ya que la mantiene alejada de influencia del público en general; el CBTIS cuenta con personal encargado del resguardo de las instalaciones, por lo que esta situación fue considerada al elegirlo para el emplazamiento.

Disponibilidad de acceso a servicios e instalaciones. Aunque no es un requisito indispensable, es deseable elegir sitios que cuenten con suministro de energía eléctrica y, en caso de ser necesario, servicios de teléfono e internet. Así mismo, debido a que la construcción y puesta en marcha implica actividades a las que deben dedicarse varios días, es necesario que el acceso a las instalaciones quede garantizado. Por otra parte, la operación futura implicará posteriores visitas periódicas para interrogación y recuperación de información, así como para brindar mantenimiento preventivo y correctivo a la estación, por lo cual, es necesario que el sitio permita el acceso los 365 días del año en amplio horario.

Los requisitos planteados en este punto quedan plenamente satisfechos por el CBTIS, ya que posee servicio eléctrico, de telefonía e internet; por otra parte, cuenta con ambos turnos de actividades (matutino y vespertino), por lo que las labores académicas se extienden a un horario de 7 a 22 horas de lunes a viernes; así mismo, los días sábado opera en horario matutino (7 a 13 horas) ya que se realizan actividades de educación abierta, con lo cual se garantiza el acceso a la estación la mayor parte del año.

Permiso para la instalación. Finalmente, este requisito es esencial para la implementación de una estación, ya que, si bien el espacio necesario es pequeño, es necesario contar con la aprobación de las autoridades (o propietarios) para evitar problemas futuros.

Componentes de la estación y proceso constructivo

Anteriormente se mencionaron los principales componentes de una estación típica de campo libre, sin embargo, en lo sucesivo se realizará una descripción detallada de los elementos que integran la ubicada en Xoxocotlán, así como de las actividades requeridas para su construcción e instalación.

Base acelerográfica. Es un prisma de concreto reforzado de dimensiones en planta de 120x85 cm, y una altura de 30 cm. En su elaboración se utilizó concreto hidráulico con $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ y acero de refuerzo con $f'y=4200 \text{ kg/cm}^2$. Debido a que el registro del movimiento sísmico se realiza en 3 direcciones ortogonales entre sí, es necesario proporcionar una orientación a la base, la cual corresponde a EW en el sentido longitudinal y NS en el transversal (figura III. 13).

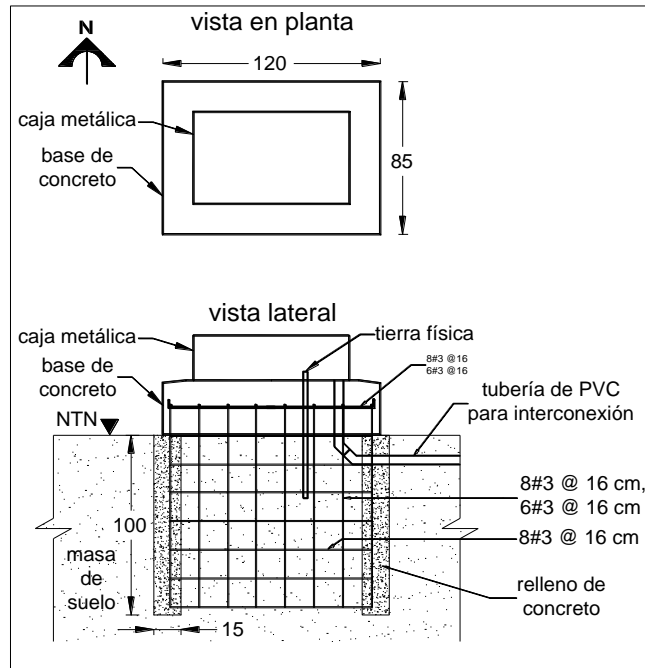


Figura III.13. Base de concreto

Previo a la construcción se realizó una limpieza superficial para eliminar contaminantes ajenos al terreno (hierba, basura, material suelto entre otros). Por otra parte, con el fin de garantizar el anclaje a la masa de suelo se realizó una excavación perimetral de 1m de profundidad y 15 cm de espesor, dentro de la cual se colocó una malla de acero de refuerzo unida al armado propio de la base, de forma tal que dentro de esta estructura metálica se conserva un núcleo de terreno natural con el menor grado de alteración.

Debido a los requerimientos de interconexión de los distintos elementos, fue necesario preparar conductos que servirían para alimentar posteriormente las diferentes líneas de trasmisión (eléctrica, GPS, entre otras), para lo cual se utilizaron ductos de PVC de 2" que quedaron ahogados dentro del concreto. Para proteger la continuación de las tuberías fuera del dado de concreto se excavaron canales para enterrarlas entre 10 y 15 cm por debajo de la superficie del terreno (figura. III.14 a).

El colado se realizó directamente sobre el terreno y dentro de la excavación, a fin de garantizar la completa adherencia entre el concreto y el suelo (figura III.14 b). En la última etapa se ahogó un contramarco de acero en la superficie del dado (cuya función es sujetar la caja metálica), una varilla de cobre como tierra física y, finalmente, debido a que en esta estación se decidió utilizar un sensor externo, una varilla roscada que serviría de anclaje para el sensor (figura III14 c y d). Todas las actividades se realizaron con gran cuidado para reducir al mínimo la alteración de la masa de suelo.

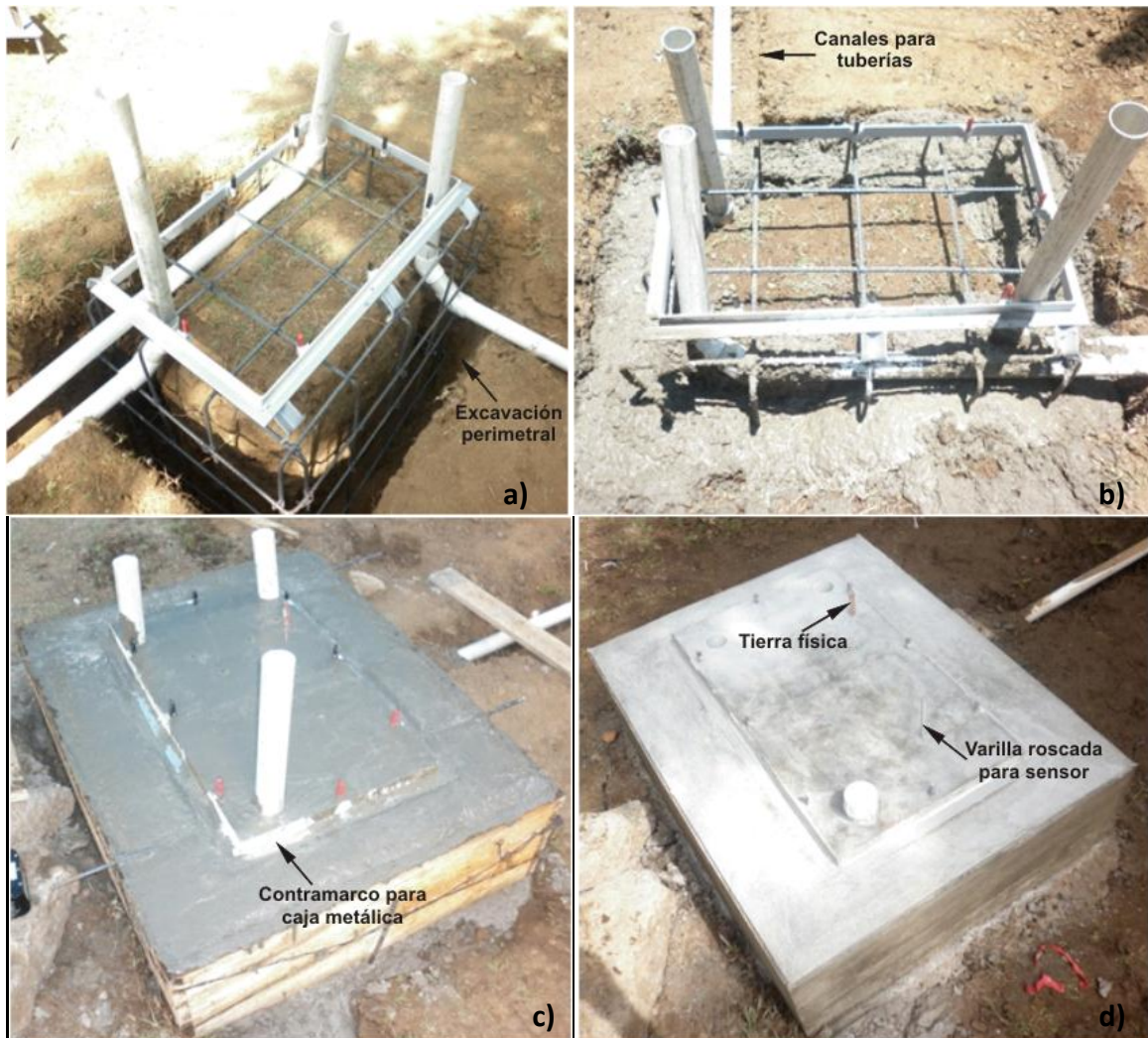


Figura III.14. Proceso constructivo de la base concreto

Caja metálica

Se trata del elemento de protección que contiene el acelerógrafo y demás componentes localizados sobre la base de concreto. Está fabricada con placa de acero galvanizado de 0.64 cm de espesor y sus dimensiones son 52x86 cm de base y 36 cm de altura. Está compuesto por varias partes (figura III.15): el contramarco, que sirve de anclaje al dado y que debe quedar ahogado durante el colado; la base, que contiene a los diversos componentes de la estación; la tapa y la sombrilla cuya función es mantener cerrada la caja así como resguardarla del clima y la intervención humana y, finalmente, el cubre candados, especialmente diseñado para impedir la apertura a personal no autorizado.

Para la colocación y ensamble de la caja metálica se recortó el excedente de tubería en la base de concreto ya endurecido; la fijación al dado se realizó utilizando los tornillos integrados al contramarco ahogado previamente, así mismo, se utilizó silicón para conseguir un sellado hermético para impedir el ingreso de agua, animales y basura al interior (figura III. 16 a y b). Por otra parte, se unió la tapa mediante bisagras, limitando la amplitud de su apertura con una cadena, finalmente, se realizó el ensamble de la sombrilla (figura III.16 c y d).

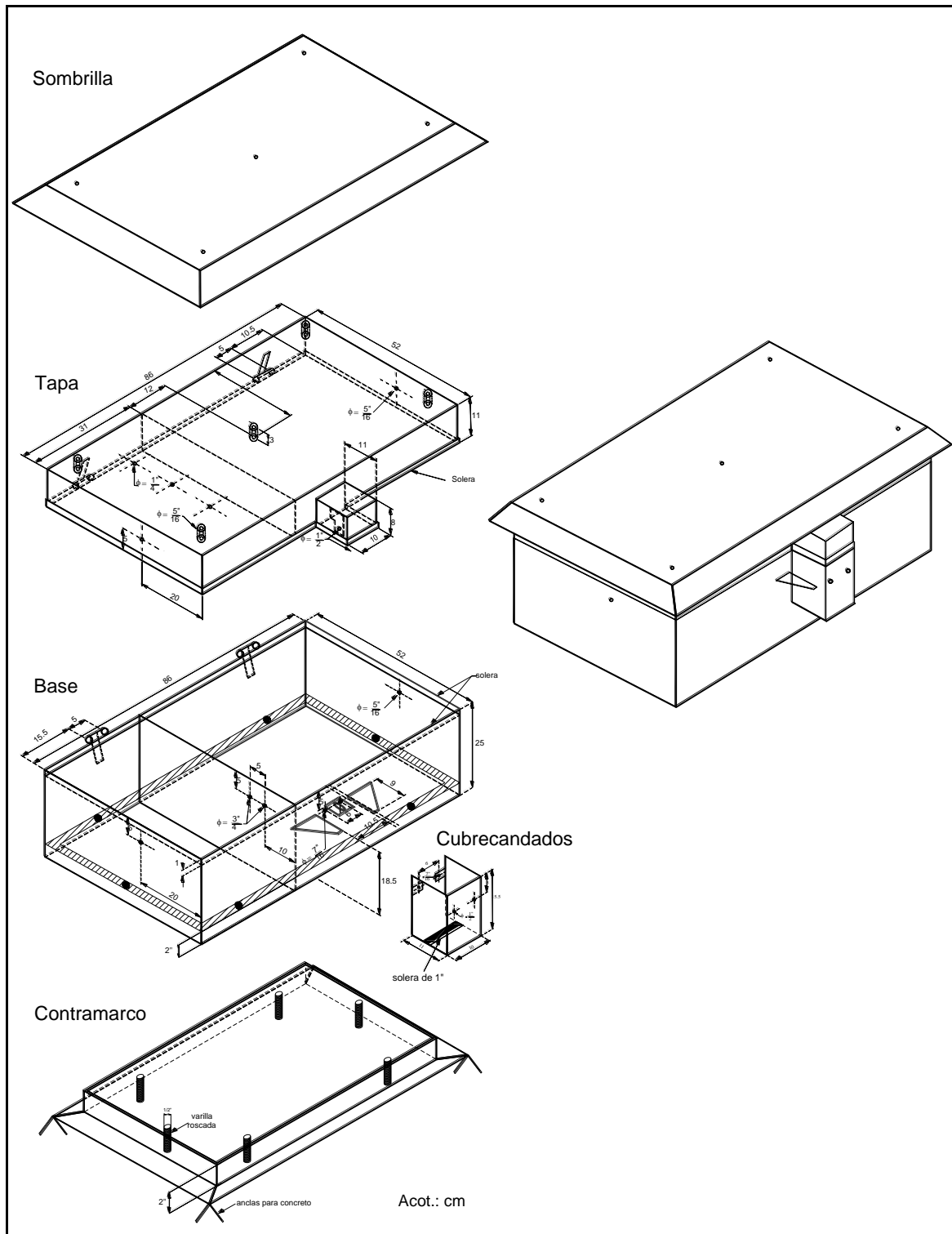


Figura III.15. Caja metálica



Figura III.16. Ensamble de la caja metálica

Torre metálica

Debe colocarse en un área despejada de forma tal que la luz del sol incida en ella durante todo el día, esto se debe a que sirve de emplazamiento para las celdas solares. Su altura mínima es de 6 m y debe estar anclada a una base de concreto enterrada que sobresalga del nivel de terreno natural de forma tal que no permita la acumulación de agua o humedad constante (figura III.17).

La estabilidad fue reforzada con tres tensores de acero galvanizado de $\frac{1}{4}$ " anclados al terreno y distribuidos radialmente con respecto a la base. El amarre entre la torre y los tensores se realizó considerando que aún en caso de romperse estos últimos no se provoque la caída de la estructura. En el caso de esta estación, la torre quedó retirada 8 m al este de la base de concreto para permitir una mejor incidencia de luz solar.

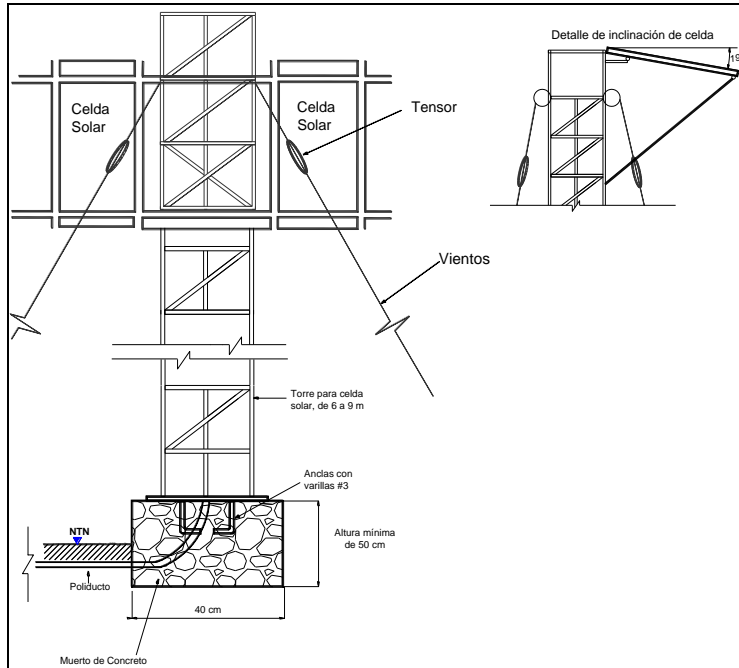


Figura III.17. Torre metálica

Acelerógrafo

Representa el núcleo de la estación ya que es el instrumento encargado de monitorear, registrar y almacenar la vibración del terreno. El modelo utilizado en la estación es un *Altus K2* de *Kinematics* (figura III.18), el cual es un acelerógrafo digital de alta resolución diseñado para el registro de movimientos fuertes que cuenta con un acelerómetro triaxial interno de fuerzas balanceadas, y es capaz de utilizar 4, 6 u 8 canales de registro (ref. 71). Para la alimentación de energía, el equipo cuenta con una batería interna de 13.6 V y 12 Ah, así como un cargador para corriente AC capaz de auto ajustarse a un intervalo entre 90 y 250 VAC (50/60 Hz). Así mismo, se tiene la posibilidad de realizar el suministro mediante el uso de baterías externas de 12 VCD, este último sistema es el utilizado para el suministro de energía de la estación de Xoxocotlán.

El aparato es capaz de monitorear continuamente los datos de aceleración hasta que la señal satisfaga los criterios de detección de evento preestablecidos, guardando la información en un dispositivo de almacenamiento PCMCIA; cuenta con un reloj de tiempo sincronizado por GPS. La configuración del equipo y recuperación de la información guardada se lleva a cabo mediante la conexión con una computadora de sistema operativo *Windows*, a la cual debe instalarse el programa de comunicación y soporte proporcionado por *Kinematics*. La colocación del instrumento dentro de la caja metálica debe garantizar una perfecta fijación al dado de concreto, sin embargo, debido a los requerimientos específicos de la estación de Xoxocotlán, se decidió utilizar un sensor externo, por lo que es éste el que debe ser anclado, para ello se utilizó la varilla roscada que previamente fue ahogada en el dado durante el proceso de colado. El sensor fue nivelado cuidadosamente para reducir la desviación a cero del voltaje de salida de los canales de registro.

El sensor externo utilizado es un FBA-23 de *Kinematics* (figura III.19), el cual es un acelerómetro triaxial de fuerzas balanceadas de alta sensibilidad caracterizado por su construcción robusta y gran fiabilidad (ref. 72). Contenido en una carcasa de aluminio, está diseñado para una variedad de aplicaciones sísmicas, estructurales, aeroespaciales y comerciales. Los tres acelerómetros del FBA-23 se encuentran montados ortogonalmente en una placa en el interior de la carcasa, la cual se encuentra herméticamente sellada, por lo cual restringe el paso de la humedad y la suciedad. La perfecta compatibilidad con el *K2* permite la sustitución de los sensores internos de éste por el arreglo triaxial externo del FBA-23. El sensor es la parte más importante del acelerógrafo, por ello se presentan en la tabla III.1 las características del FBA-23.

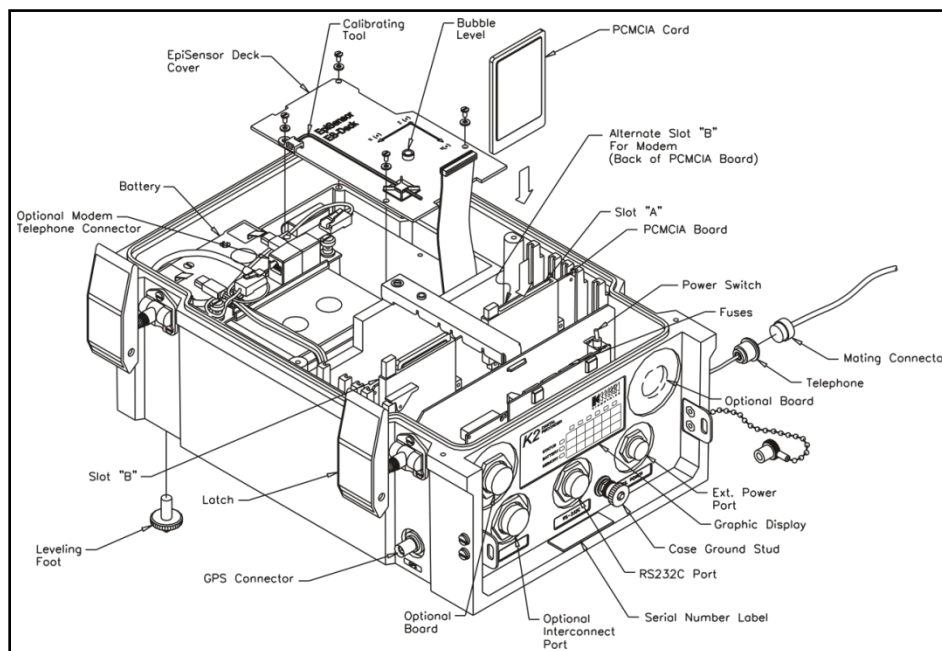


Figura III.18. Acelerógrafo Altus K2 (ref. 73)



Figura III.19. Acelerógrafo Altus K2 y sensor externo FBA-23

Tabla III.1. Características del sensor externo FBA-23

Especificaciones técnicas	
Escala total	± 1.0 g (0.1, 0.25, 0.5 y 2g)
Frecuencia natural	50 Hz
Amortiguamiento normal	70 % crítico
Escala total de salida	± 2.5 V en 50 000 Ohms
Cero offset	menor a 25 mV
Sensitividad de ejes	menor a 0.03 g
Linealidad (70°F)	menor a 1 % de la escala total
Ruido	de 0 a 50 Hz menor a ± 25 µV, de 0 a 10 000 Hz, menor a ± 2.5 mV
Rango dinámico (0 a 50 Hz)	100 dB
Voltaje	±12 VDC, 1 mA por eje
Calibración	Se aplican comandos eléctricos para producir salidas de amortiguamiento y frecuencia natural
Tiempo de encendido	Operacional después de 0.1 segundos de suministrar energía
Características físicas	
Temperatura de operación	-20°C a 70 °C
Dimensiones	200x200x100 mm
Efectos de temperatura	menor al 2 % de la escala total
Peso	12 lbs

Celdas solares

Representan uno de los sistemas de suministro eléctrico. Las celdas utilizadas son modelo *SX75U* marca *BP Solar* de dimensiones 145 x 50.5 cm; cada una tiene una potencia pico de 75 W, un voltaje de salida en circuito abierto de 20.7 V y una corriente en corto circuito de 4.97 A. Se utilizaron dos elementos colocados sobre la torre metálica con una inclinación de 19° hacia el sur para obtener la mayor insolación del cuerpo de la celda durante el día. La energía generada es conducida desde la torre hacia la base a través de la tubería, la cual recorre la torre en toda su altura para proteger la línea de transmisión (figura III.20). El suministro eléctrico se transmite directamente a una batería para alimentación del acelerógrafo.



Figura III.20. Colocación de celdas solares

Alimentación eléctrica

Para el suministro de energía eléctrica se implementó un arreglo que consiste en una batería externa, la cual fue colocada dentro de la caja metálica para resguardarla y facilitar las conexiones. Es una batería de tipo automotriz de voltaje nominal de 12 VCD. Según el número de placas (de 9 u 11) es posible disponer de una capacidad de almacenamiento de 55 a 70 Ah, cuenta con dos sistemas redundantes de recarga, el primero de ellos lo constituyen las celdas solares, las cuales se acoplaron a un controlador de carga que a su vez se conectó a la batería, mientras que la segunda línea de alimentación consiste en el suministro comercial de corriente alterna.

El controlador de carga de las celdas es un modelo *SCI-120* marca *SUNPOWER* (figura III.21). Tiene una capacidad de 20 A y su función es proteger a la batería contra daños producidos por sobrecargas o descargas profundas en sistemas solares de 12 VCD. Cuenta con indicadores del estado de la batería y las celdas, así como protección contra polaridad inversa. Sus parámetros eléctricos son: conexión de la celda solar de 13.10 VCD, desconexión de la celda solar de 14.50 VCD, conexión de carga 13.10 VCD y desconexión de carga 10.80 VCD. Las dimensiones del aparato son 14.2 x 8.9 x 5.5 cm.



Figura III.21. Controlador de carga de celdas solares

En el caso de la alimentación comercial AC de 127 V, se conectó la línea al suministro de los salones ubicados el norte de la estación, pasando la energía por un interruptor de protección termomagnético y, finalmente, de éste a las terminales de la batería. Con este sistema se pretende garantizar la operación continua del equipo, ya que con el arreglo establecido se cuenta con dos suministros constantes (celdas solares y línea AC) y una reserva (batería externa) en caso de falla de los primeros (figura III. 22).

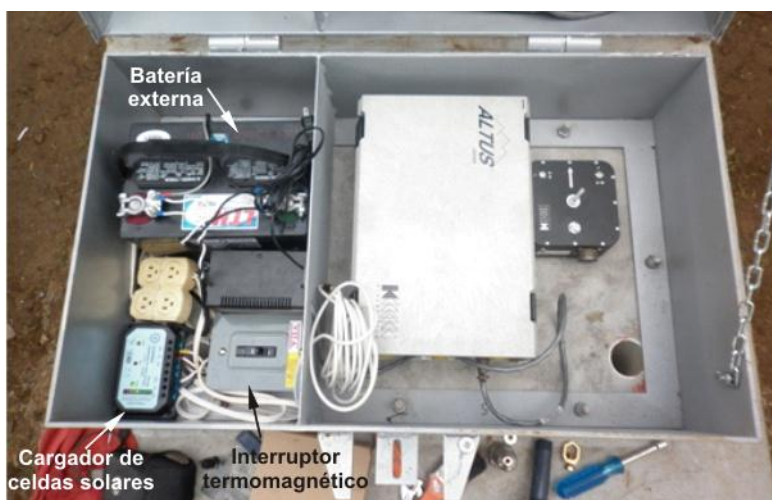


Figura III.22. Arreglo del sistema de alimentación eléctrica

Sistema GPS

El objetivo fundamental de este componente es mantener un estricto control de tiempo durante la ocurrencia de eventos sísmicos; la estación cuenta con un receptor interno GPS, el cual se utiliza para sincronizar la señal de tiempo del acelerógrafo; así mismo, a través de él es posible determinar las coordenadas exactas de la posición de la estación para referencia futura. El modelo utilizado cuenta con una salida *UTC (Universal Time Code)*, que tiene una precisión de posición de 25 a 100 m de *SEP (Spheric Error Probability)*. La alimentación requerida por el aparato es de 12V a 100 mA nominal y utiliza una antena tipo bala con cable coaxial para su conexión. La antena fue colocada en la torre metálica para mejorar su recepción, conduciendo su línea de transmisión a través de la tubería hasta el acelerógrafo (figura III. 23).

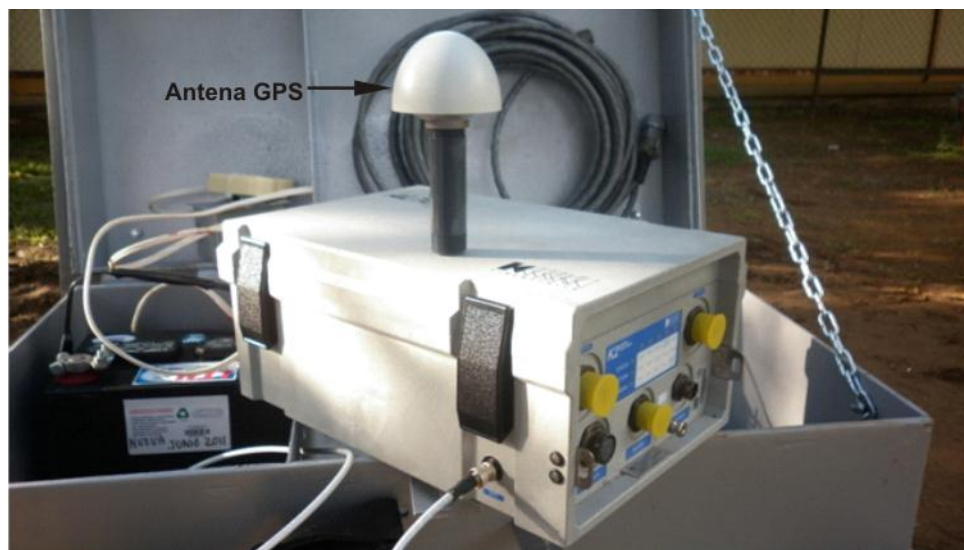


Figura III.23. Antena receptora GPS

Puesta en marcha de la estación

Designación. La estructura de la clave para identificar las estaciones de la RAO consta de 4 caracteres, los dos primeros hacen referencia a la red y los últimos a la ubicación. Siguiendo esta estructura, se decidió asignar a la estación la clave OXXO, OX por pertenecer a la red de la Ciudad de Oaxaca y XO por ubicarse en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán.

Revisión de la instalación. Terminadas las fases de construcción de obra civil, así como de instrumentación e instalación de equipos, se procedió a la inspección preliminar de los componentes e instalaciones para verificar su adecuada colocación y funcionamiento. Al término de este examen se continuó con el encendido de los aparatos, verificando especialmente el correcto desempeño del sensor y el acelerógrafo. Se comprobó el intercambio de información entre ellos, así como con el GPS y la computadora. Por otra parte, se revisaron los sistemas de alimentación y recarga de la batería, haciendo énfasis en el suministro de energía del sistema de celdas solares en busca de posibles fallas.

Pruebas de operación del sistema GPS. En el acelerógrafo K2 se tiene la opción de monitorear el estado de operación del reloj ajustado por GPS, por lo que se comprobó el sistema visualizando el número de satélites disponibles en el momento y la calidad de las señales recibidas, verificándose el tiempo recibido y las coordenadas del sitio, sincronizando finalmente el reloj interno con la señal del GPS.

Definición de los parámetros de operación. Al instalar un equipo por primera vez es necesario establecer la configuración para su operación, lo cual se llevó a cabo mediante el uso de un programa especializado proporcionado por el fabricante, instalado en una computadora portátil. Algunos de los parámetros que deben establecerse son los canales activos, la velocidad de muestreo, el umbral de disparo, los tiempos de pre-evento y pos-evento entre otros.

Con base en las características específicas del sitio y la región a estudiarse, así como en la experiencia adquirida a lo largo de varias décadas de instrumentación en la ciudad y en otras localidades, se establecieron los parámetros de operación de la estación OXXO, los cuales se presentan en la tabla III.2.

Tabla III.2. Características de la estación OXXO

Estación	
Nombre	Xoxocotlán
Clave	OXXO
Localización	CBTIS 259 <i>Manuel García Vigil</i> . Camino antiguo a San Bartolo Coyotepec s/n Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, C.P. 71230
Coordenadas	17° 01' 35'' Lat. N, 96° 43' 36'' Long. W
Altitud	1532 m.s.n.m.
Tipo de suelo	Depósito aluvial, arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)
Acelerógrafo	
Modelo	<i>Altus K2</i>
Número de serie	2754
Número de canales	3
Orientación, C1-C3	N00E/VERT/N90E
Vel. de muestreo, C1-C3 (muestras/s)	100/100/100
Esc. completa de sensores, C1-C3 (g)	1/1/1
Intervalo de muestreo, C1-C3 (s)	0.01/0.01/0.01
Umbral de disparo (gal)	1/1/1
Memoria de preevento (s)	50
Memoria de postevento (s)	60

Verificación de la operación de la estación en su conjunto. Una vez configurado el acelerógrafo con los parámetros de operación adecuada y después de corroborar la sincronización del reloj se realizó una evaluación del funcionamiento general, la cual consistió en disparar el equipo mediante un golpe suave, realizando posteriormente una calibración utilizando el programa para controlar el aparato.

La verificación del funcionamiento se realiza al comprobar la generación correcta de archivos en la memoria interna del equipo. Estas pruebas se observan en la herramienta de visualización que es parte del *software* proporcionado por el fabricante, el cual permite graficar las señales de aceleración de los archivos obtenidos; así mismo, se revisó el comportamiento de los indicadores luminosos en la caratula del acelerógrafo, los cuales reportan de forma visual resumida la condición del aparato. Al término de la comprobación de la operación se realizó una última inspección de los componentes, tras la cual se procedió al cerrado de la caja, dejando la estación lista para el registro de eventos sísmicos futuros (figura III.24).



Figura III.24. Puesta en marcha de la estación OXXO

CAPÍTULO IV

Respuesta sísmica del sitio

IV. RESPUESTA SÍSMICA DEL SITIO

El análisis de la respuesta sísmica del suelo es uno de los problemas más importantes de la Ingeniería Geotécnica, el objetivo fundamental es el desarrollo de espectros que permitan estimar, principalmente, los niveles de deformación y esfuerzo dinámicos producidos por el movimiento del terreno que representen un riesgo para la integridad de la infraestructura física y la sociedad.

Bajo condiciones ideales, un estudio completo debe integrar el modelado del mecanismo de ruptura en la fuente sísmica, la propagación de ondas de esfuerzo a través de la corteza terrestre y la determinación del movimiento superficial, considerando las características del depósito de suelo y la modificación que éste produce en relación con el movimiento de la roca basal; sin embargo, en la realidad, los mecanismos de ruptura y la naturaleza de la transmisión de la energía entre la fuente y el sitio son tan complicados, que un examen exhaustivo no es práctico para fines ingenieriles. Por estos motivos, en el análisis de la respuesta del terreno suelen utilizarse métodos empíricos basados en los registros sísmicos obtenidos a través de estaciones de monitoreo de la actividad sísmica.

Uno de los recursos más valiosos de estas metodologías son los registros obtenidos en afloramientos rocosos, ya que, a través de ellos, el problema puede reducirse a la determinación de la respuesta del depósito de suelo a partir del movimiento de la roca basal; el método de análisis utilizado dependerá de la magnitud del problema y la precisión de los resultados deseados. En la realización de este trabajo se ha decidido aplicar un procedimiento consistente en la obtención de funciones de transferencia empíricas y la aplicación de la teoría de vibraciones aleatorias para la estimación de espectros de respuesta.

IV.1 Antecedentes teóricos

Sistema simple de un grado de libertad amortiguado

Los sistemas vibratorios pueden idealizarse como un conjunto de masas y resortes divididos en dos clases: rígidos, que se caracterizan por no considerar deformaciones internas ya que cada punto se mueve en fase con los demás, y compatibles, en los cuales cada punto presenta movimiento independiente. Debido a su naturaleza, en el estudio del suelo resulta adecuado la aplicación de los sistemas compatibles, representados mediante sistemas discretos en los cuales la masa total del continuo se considera distribuida en masas concentradas en un número finito de ubicaciones, cuyas posiciones se describen a través de variables independientes, el número total de éstas son los *grados de libertad* del sistema.

Un sistema discreto cuya posición puede ser descrita completamente por una sola variable se conoce como *sistema simple de un grado de libertad amortiguado* (S1GLA); este único grado de libertad se utiliza para representar el movimiento de traslación del sistema. Un S1GLA típico sometido a una carga externa $Q(t)$ se encuentra formado por una masa concentrada m , conectada a un resorte de rigidez k , y un amortiguador viscoso de coeficiente c (figura IV.1a). El resorte y el amortiguador se consideran carentes de masa y el origen del desplazamiento coincide con la posición de equilibrio.

Respuesta de sistemas vibratorios

La importancia del S1GLA radica en que a través de él es posible estudiar la respuesta de un sistema en vibración, tal como los depósitos de suelo sometidos a cargas sísmicas. El comportamiento de un arreglo como el mostrado en la figura IV.1a está gobernado por la *ecuación de movimiento*. Cuando una solicitación dinámica es aplicada a la masa, la tendencia al movimiento es resistida por su inercia y las fuerzas desarrolladas en el amortiguador y el resorte, por tanto, la carga externa $Q(t)$ es resistida por tres elementos: la fuerza inercial, f_i , la fuerza debida al amortiguamiento viscoso, f_d , y la fuerza elástica del resorte, f_s (figura IV.1b).

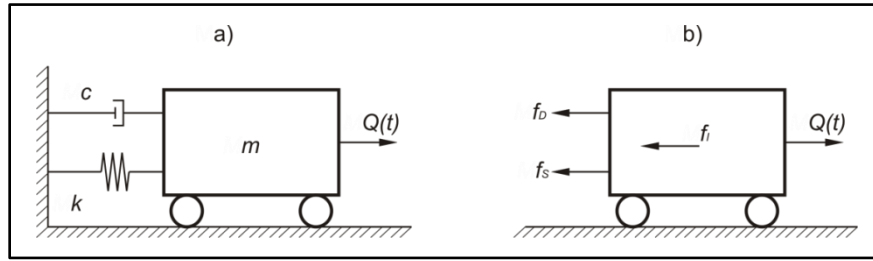


Figura IV.1. Análisis de un S1GLA

La ecuación de movimiento expresada en términos del equilibrio dinámico de estas fuerzas es:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_s(t) = Q(t) \quad (1)$$

Considerando la segunda ley de Newton, la fuerza f_I puede expresarse en términos de m como:

$$f_I(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{du(t)}{dt} \right) = m \frac{d^2u(t)}{dt^2} = m\ddot{u}(t) \quad (2)$$

Por otra parte, el amortiguamiento es proporcional a la velocidad de la masa por lo que se tiene:

$$f_D(t) = c \frac{du(t)}{dt} = c\dot{u}(t) \quad (3)$$

Finalmente, la fuerza debida al resorte es función de su rigidez y su desplazamiento, por tanto:

$$f_s = ku(t) \quad (4)$$

Sustituyendo 2, 3 y 4 en 1 se puede expresar la ecuación de movimiento para un S1GLA como:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = Q(t) \quad (5)$$

Esta ecuación diferencial de segundo orden es ampliamente utilizada para describir el comportamiento oscilatorio de una gran cantidad de sistemas; sin embargo, en ingeniería sísmica las cargas externas frecuentemente son resultado de fuerzas vibratorias aplicadas a la base (figura IV.2), por lo que para evaluar la respuesta es necesario desarrollar una ecuación de movimiento bajo estas condiciones. Considérese el arreglo de la figura IV.2a, cuando se le aplica una excitación $u_b(t)$, se deformará de acuerdo a la configuración mostrada en la figura IV.2b; el desplazamiento total de la masa $u_i(t)$ estará compuesto por la suma del desplazamiento de la base $u_b(t)$ y el de la masa con respecto a ella $u(t)$.

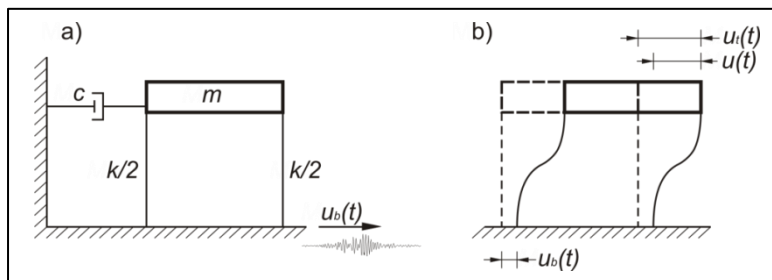


Figura IV.2. Análisis de un S1GLA sometido a una excitación en la base

La fuerza inercial dependerá de la aceleración total de la masa, mientras que el amortiguamiento viscoso y la fuerza elástica del resorte serán función de la velocidad relativa y el desplazamiento, respectivamente. Por tanto, la ecuación de movimiento puede expresarse como:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (6)$$

Sustituyendo $\ddot{u}_t(t) = \ddot{u}_b(t) + \ddot{u}(t)$ y reordenando se tiene:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_b \quad (7)$$

Esto es, el comportamiento de un S1GLA sometido a una excitación en la base es equivalente al que se tendría si la base estuviera fija y la masa fuera afectada por una fuerza externa $Q(t) = -m\ddot{u}_b$. Para evaluar la respuesta de un S1GLA debe resolverse la ecuación de movimiento. Existen cuatro condiciones fundamentales en las que se resuelve dicha ecuación: vibración libre no amortiguada, vibración libre amortiguada, vibración forzada no amortiguada y vibración forzada amortiguada; esta última representa el caso más general y es el de interés en Ingeniería Sísmica.

La ecuación de movimiento para un S1GLA sometido a una excitación $u_b(t)$ está dada por la ecuación 7, dividiendo entre la masa se tiene:

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = -\ddot{u}_b \quad (8)$$

La frecuencia circular natural de vibración del sistema ω_0 está dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

Despejando k se tiene:

$$k = m\omega_0^2 \quad (10)$$

Por otra parte, el coeficiente de amortiguamiento crítico c_c se define como:

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (11)$$

A partir del cual es posible especificar la fracción del amortiguamiento crítico ξ como la relación entre el coeficiente de amortiguamiento y el de amortiguamiento crítico, esto es:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_0} \quad (12)$$

Despejando c :

$$c = 2\xi m\omega_0 \quad (13)$$

Sustituyendo 10 y 13 en 8 y simplificando se tiene:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u = -\ddot{u}_b \quad (14)$$

En esta ecuación se puede apreciar que el desplazamiento $u(t)$ del sistema es función de la frecuencia natural de vibración ω_0 (o del período natural T_0 , $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$) y de la fracción de amortiguamiento crítico ξ .

La solución general de la ecuación 14 está dada por la suma de una solución complementaria $u_c(t)$, que representa la respuesta de la vibración libre amortiguada y depende de las condiciones iniciales, y una solución particular $u_p(t)$, que describe la porción de la respuesta causada por la fuerza externa, la cual se encuentra fuera de fase con la excitación.

Espectro de respuesta

Existen diversas herramientas para el estudio del comportamiento dinámico del terreno, sin embargo, el espectro de respuesta (ER) es de gran utilidad debido a que en él pueden identificarse parámetros importantes como niveles de aceleración y períodos naturales de vibración. Para realizar un análisis no es necesario conocer la historia completa de respuestas de un sistema, basta con conocer los valores máximos (absolutos) ante una sollicitación particular, los cuales dependerán de la masa, la rigidez y el amortiguamiento del sistema, así como de las características de la excitación.

El ER es una gráfica que representa las magnitudes máximas de respuesta de un conjunto de S1GLA ante una excitación, como una función del período natural de vibración para una fracción de amortiguamiento dada (figura IV.3). Los valores obtenidos pueden expresarse en términos de aceleración (S_a), velocidad (S_v) o desplazamiento (S_d) espectrales. Al aplicar la integral de Duhamel a un S1GLA se obtienen expresiones para la aceleración, velocidad y desplazamiento que son proporcionales entre sí en función de ω_0 ; aunque estos valores presentan un desfase, éste no tiene influencia en los valores máximos de respuesta.

$$S_d = |u|_{max} \tag{15}$$

$$S_v = |\dot{u}|_{max} \approx \omega_0 S_d = SV \tag{16}$$

$$S_a = |\ddot{u}|_{max} \approx \omega_0^2 S_d = SA \tag{17}$$

Los términos SV y SA son la seudovelocidad y la pseudoaceleración, aunque no son los verdaderos valores máximos de aceleración y velocidad, se encuentran muy cercanos a los obtenidos en registros sísmicos, por lo que, en la práctica, se les considera iguales a los valores espectrales.

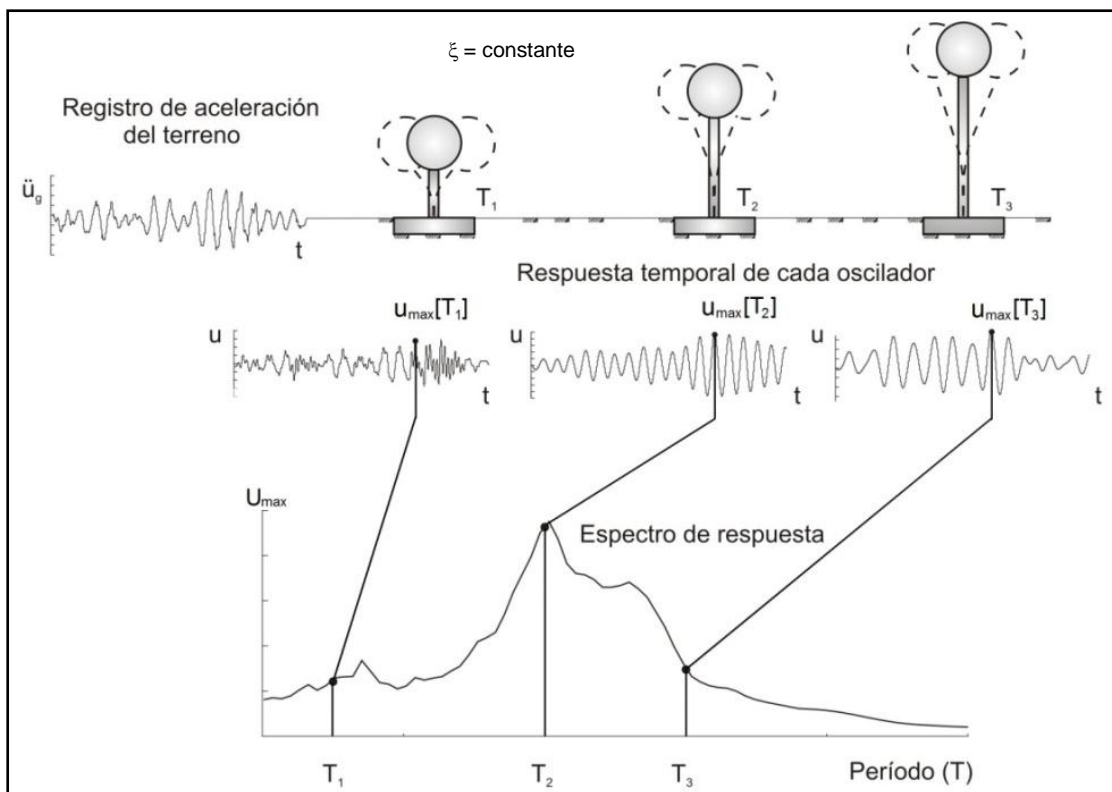


Figura IV.3. Construcción de un espectro de respuesta (ref. 74)

Espectro de Fourier

Una de las herramientas matemáticas más útiles en el análisis de señales son las *transformadas lineales*, las cuales permiten convertir los datos en el dominio del tiempo al de frecuencia. Las transformadas desarrolladas por Jean Baptiste Joseph Fourier son ampliamente utilizadas en Ingeniería Sísmica, ya que permiten desarrollar una función periódica continua (con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período) como una única serie trigonométrica correspondiente a dicha función, conocida como transformada de Fourier (ref. 75). En esencia, una transformada de Fourier (TF) descompone una señal en una serie de senoides de diferentes frecuencias que corresponden a la suma de la original, se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \tag{18}$$

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

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

$j^2 = -1$

La TF permite analizar registros sísmicos, sin embargo, estos no son funciones continuas, sino un conjunto de valores discretos (requeridos así para su proceso por computadoras) por ello, para la aplicación de la TF se recurre a la transformada discreta de Fourier (TDF), la cual se estima a través de un algoritmo llamado transformada rápida de Fourier (TRF) cuya ventaja radica en reducir el número de cálculos, partiendo la señal completa en subseñales más cortas y calculando la TDF de cada una; posteriormente la TRF las combina para obtener la TDF de la señal original (ref.76).

El espectro de amplitudes de Fourier (EF) de un acelerograma permite analizar el contenido de frecuencias del movimiento del terreno producido por la propagación de ondas sísmicas a través de él, relacionándolas con su correspondiente valor de amplitud (figura IV.4); se obtiene al aplicar la TRF al registro acelerográfico y se calcula como el valor absoluto de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, definida como:

$$|F(\omega)| = \sqrt{[R(\omega)^2 + jX(\omega)^2]} \tag{19}$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt \tag{20}$$

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sen \omega t dt \tag{21}$$

$R(\omega)$: parte real

$X(\omega)$: parte imaginaria

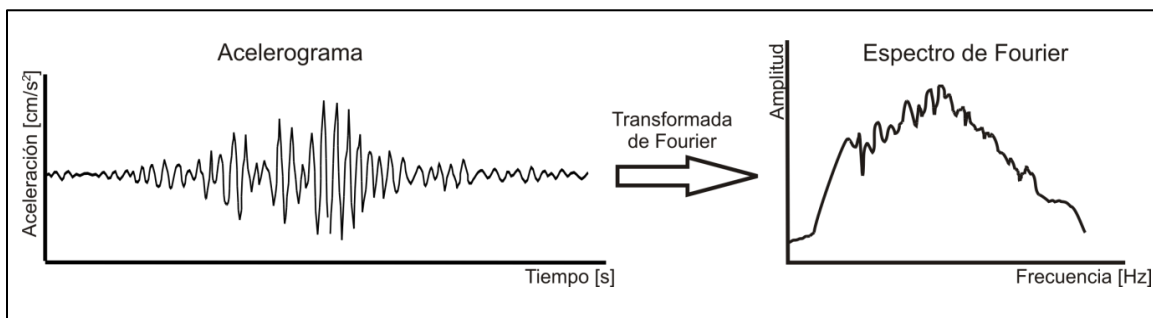


Figura IV.4. Cálculo de un espectro de Fourier

IV.2 Funciones de transferencia

Una función de transferencia (FT) es una herramienta matemática basada en las transformadas lineales que permite estimar la respuesta transitoria y en frecuencia de sistemas lineales. Puede entenderse como un modelo que relaciona la respuesta $y(\omega)$ de un sistema con una excitación de entrada $x(\omega)$ (figura IV.5), y, por tanto, la FT es un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del medio de forma precisa o aproximada (ref. 77). Debe señalarse que la salida depende de la entrada, pero no al contrario; además, la respuesta puede expresarse (en términos de transformadas) como la entrada multiplicada por la FT, esto es:

$$y(\omega) = x(\omega) \cdot H(\omega) \quad (22)$$



Figura IV.5. Diagrama de una función de transferencia

En el caso de este estudio se define la FT como un modelo que relaciona el comportamiento dinámico del terreno (respuesta) con la sollicitación sísmica (excitación). Las FT utilizadas para estimar la respuesta del sitio en que se ubica la estación OXXO, son de naturaleza empírica y se construyen a partir del cociente del espectro de amplitudes de Fourier del sitio estudiado entre otro de referencia.

Para la aplicación de las funciones de transferencia empíricas (FTE), se establecen algunos tipos de registro sísmicos que pueden obtenerse, éstos se definen a partir de la ubicación del acelerógrafo, teniéndose registros de *superficie libre*, de *afloramiento* y de *roca basal* (figura IV.6). De esta manera, puede considerarse que la FTE es un modelo que permite estimar la respuesta dinámica de la superficie a partir de las características registradas en el basamento, esto es:

$$\text{Respuesta dinámica en la superficie} = \text{FTE} \cdot \text{características dinámicas en la roca basal}$$

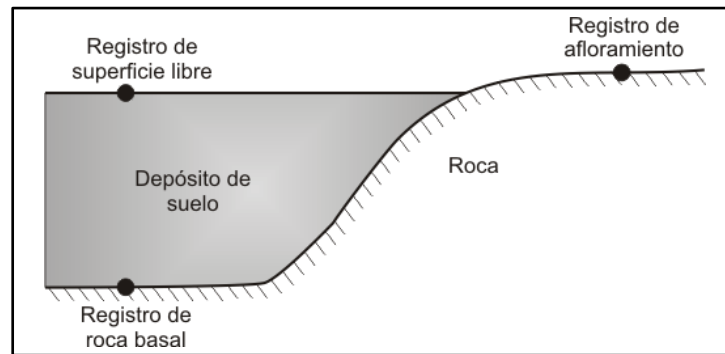


Figura IV.6. Tipos de registro

De acuerdo con este modelo, la determinación de la respuesta requiere contar con registros sísmicos en la superficie del terreno y en el basamento, para estimar la modificación de la propagación de las ondas sísmicas a través del depósito de suelo; sin embargo, la instalación de sensores de pozo no es común, y se reserva para estudios más detallados. Para sortear esta dificultad, se considera que las características del movimiento sísmico al propagarse a través de medios rocosos cercanos y similares sufre poca variación, por lo que un registro obtenido en un afloramiento próximo al sitio de estudio puede sustituir el de la roca basal, ya que representa adecuadamente el campo incidente en la interfase entre el basamento y el suelo.

En este estudio, los registros de afloramiento han sido obtenidos de la estación *Las Canteras* (OXLC) de la RAO, ubicada en el parque *Ciudad de las canteras* de la Ciudad de Oaxaca, sobre un afloramiento de ignimbrita (figura IV.7a), localizado a aproximadamente a 4.8 km al NNE de la estación de Xoxocotlán (OXXO) (figura IV.7b). De esta manera, el sitio de interés queda representado por OXXO, mientras que la referencia en roca corresponde a OXLC y, por tanto, la FTE está definida por el cociente de EF (figura IV.8):

$$FTE = EF_{OXXO} / EF_{OXLC} \quad (23)$$

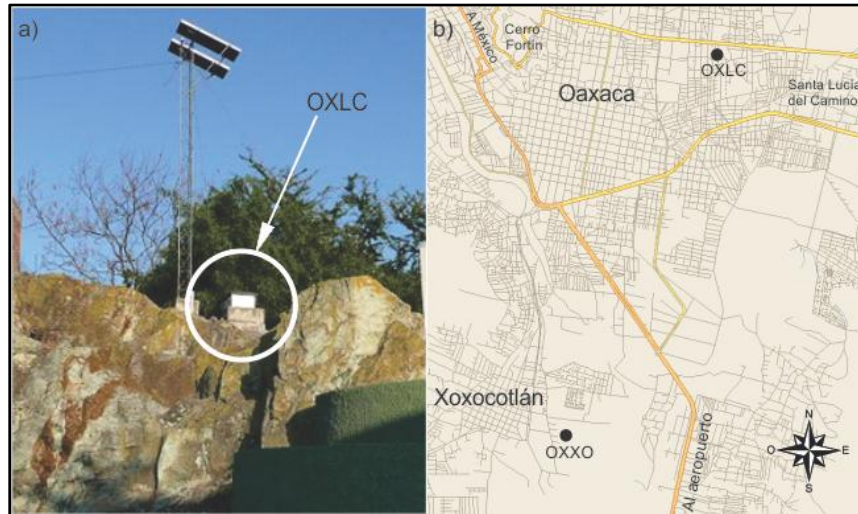


Figura IV.7. Estaciones OXXO y OXLC

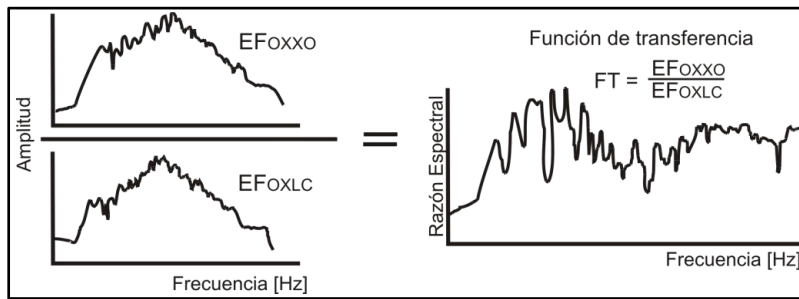


Figura IV.8. Cálculo de la FT para estimar la respuesta en el sitio OXXO

Para la determinación de la FTE se debe contar con un catálogo de sismos registrados simultáneamente en ambas estaciones. Desde su puesta en operación ocurrida el 17/junio/2011 hasta la primera visita de revisión realizada un mes después, la estación OXXO había registrado 6 sismos cuyas características se presentan en la tabla IV.1 y la figura IV.9. Cuatro de estos eventos fueron captados también por la estación OXLC. Se observa que de los 4 sismos simultáneos, 3 son superficiales con profundidades comprendidas entre los 16 y 26 km y uno profundo con hipocentro localizado 127 km bajo de la superficie (ref. 78). El mecanismo de falla productor de los sismos es diferente, la génesis de los superficiales se atribuye al roce entre las placas de Norteamérica y Cocos a lo largo de su zona de contacto, mientras que los profundos son producto de la ruptura interna de la placa subducente al sumergirse bajo las corteza continental (ref. 79).

Estudios realizados en la Ciudad Oaxaca (ref. 80) han mostrado que las FTE calculadas en diferentes sitios no presenta diferencias significativas de acuerdo con el tipo de sismo. Para verificar esto, se calculó una FTE promedio (FTEP), considerando las componentes horizontales y verticales de los sismos 1, 3 y 5 y se compararon con las del 4 (figura IV.10). En consecuencia, la FTEP utilizada para estudiar la respuesta dinámica en la zona de suelos blandos donde se ubica OXXO fue generada considerando los cuatro sismos con registro simultáneo en ambas estaciones.

Tabla IV.1. Sismos registrados por la estación OXXO

No.	Sismo	M	Coordenadas epicentrales		Prof. [km]	Estación de registro	Distancia epicentral [km]	Acel. Máx. [cm/s ²]
			Lat. N.	Long. W.				
1	110618	5.2	16.92	99.6	26	OXXO, OXLC	306, 308	2.25, 0.61
2	110620	4.4	17.32	95.9	126	OXXO	93	1.86
3	110709	5.3	15.87	96.42	22	XOXO, OXLC	132, 135	9.71, 3.21
4	110710	4.8	16.58	95.21	127	OXXO, OXLC	168, 167	2.12, 0.49
5	110813	5.7	14.58	94.88	16	OXXO, OXLC	335, 337	1.28, 0.45
6	110814	4.2	16.63	94.94	82	OXXO	195	1.3

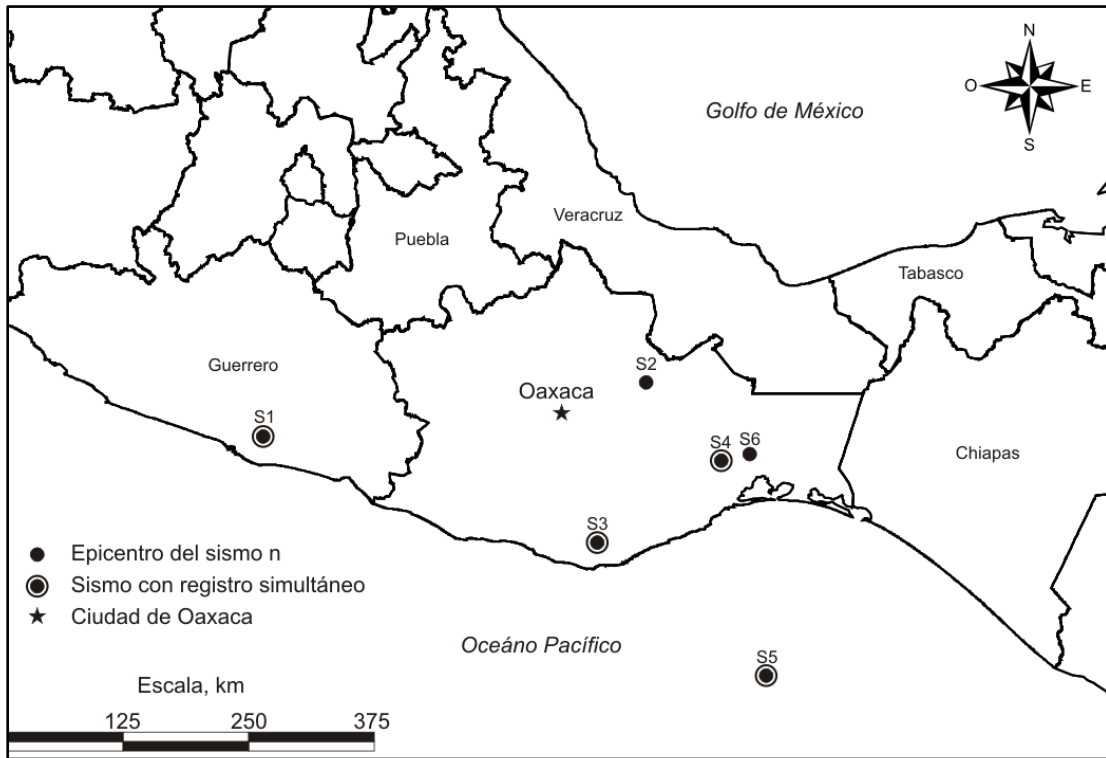


Figura IV.9. Localizaciones epicentrales

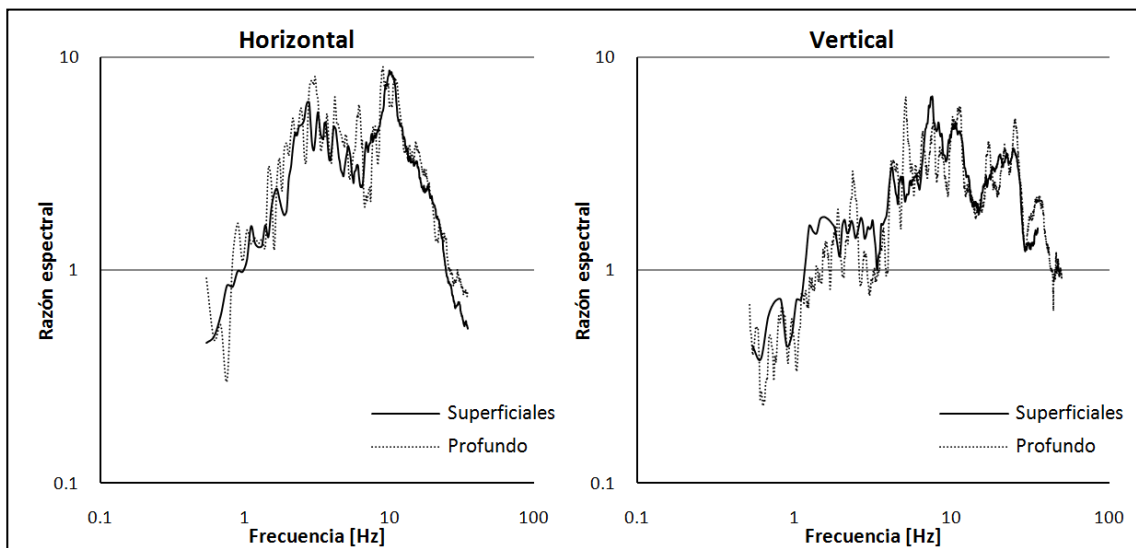


Figura IV.10. Comparación de las FT horizontal y vertical de acuerdo con el tipo de sismo

La información obtenida al interrogar el acelerógrafo para la recuperación de los datos almacenados durante la ocurrencia y registro de un temblor se guarda en archivos en lenguaje binario, los cuales, mediante el uso de programas se transforman a un formato ASCII denominado ASA 2.0 (ref. 81), el cual es utilizado para generar el acelerograma del sismo. En este estudio se empleó el programa Degtra A4 (ref. 82) para el procesamiento de la información, que utiliza como datos de entrada los archivos ASA 2.0.

Para calcular la FTE de un sismo con Degtra A4 se abren dos ventanas, en cada una se lee la misma componente sísmica de cada estación para visualizar los acelerogramas correspondientes. Estos registros son sometidos a un pre proceso que consiste en la corrección de línea base y el filtrado de frecuencias útiles para eliminar vibraciones ajenas al movimiento sísmico. Posteriormente, se obtiene el EF de cada señal y se realiza el cociente espectral para obtener la FTE de dicha componente para ese evento (figura IV.11).

Las FT permiten inferir la respuesta dinámica del terreno, por lo que en este estudio se utilizaron para estimar el comportamiento sísmico en la zona de suelos blandos del sitio OXXO. Para realizar la estimación se obtuvieron dos FTEP, una que considera los componentes NS y EW y que refleja los efectos horizontales del movimiento sísmico y otra calculada a partir de los registros verticales y que manifiesta los efectos en esta misma dirección.

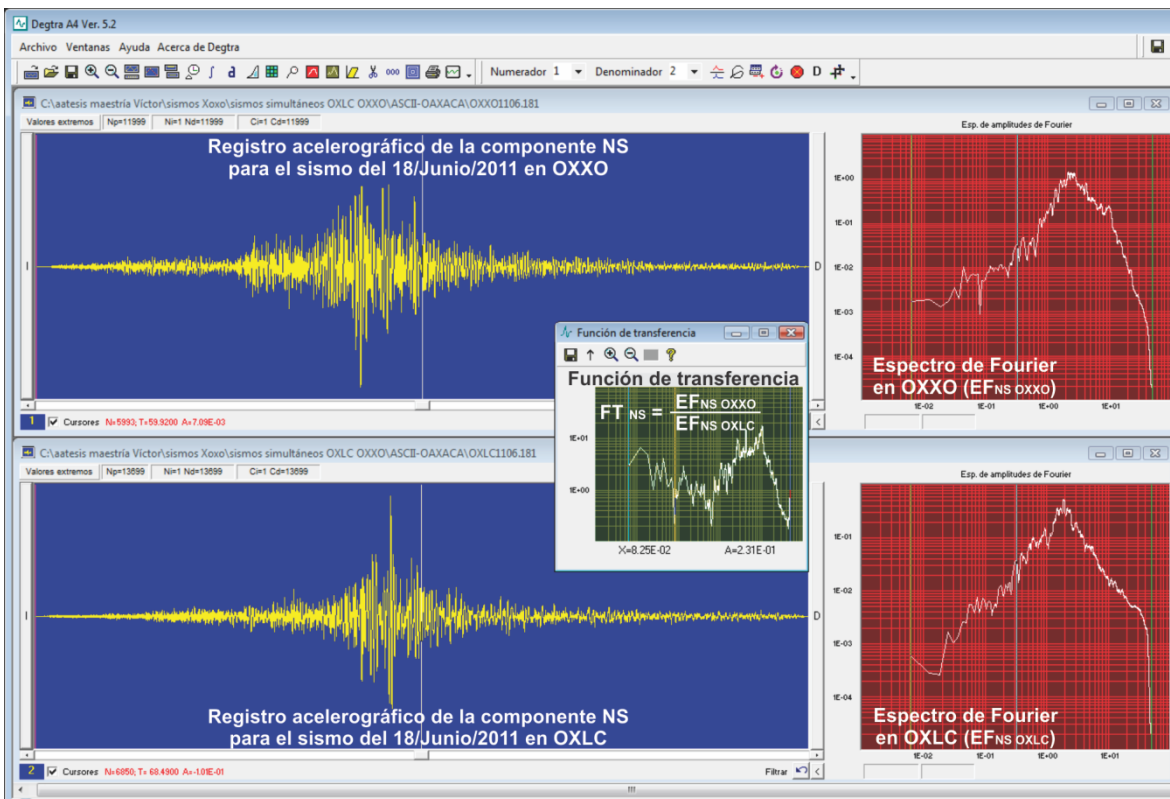


Figura IV.11. Cálculo de una FT utilizando Degtra A4

IV.3 Estimación de espectros de respuesta mediante la Teoría de Vibraciones Aleatorias

En las FTEP se pueden identificar los efectos de amplificación o atenuación del movimiento (para determinadas frecuencias) ocasionado por la propagación de las ondas sísmicas a través del depósito, por tanto, una vez determinadas estas funciones, es posible inferir la respuesta dinámica del terreno conociendo sólo la excitación de entrada en la referencia en roca. Considerando estos antecedentes, se calcularon espectros de respuesta estimados (ERE) en OXXO para sismos cuyo registro acelerográfico sólo existe en la estación OXLC. Los ERE se obtuvieron utilizando la *teoría de vibraciones aleatorias* (TVA), la cual estudia el movimiento oscilatorio de los sistemas mecánicos sometidos a la acción de fuerzas variables con el tiempo.

Las vibraciones se denominan *deterministas* cuando se conoce el valor de las fuerzas excitadoras en cualquier instante, mientras que se consideran *aleatorias* cuando no es posible conocer la magnitud de las fuerzas, sino que solamente se conocen valores estadísticos de ellas. En este último caso no es posible calcular el comportamiento exacto, y por ello se relacionan los valores estadísticos de la excitación con los de la respuesta (ref. 83). Cuando un sistema oscila impredeciblemente se encuentra en vibración aleatoria, el estudio de este fenómeno consiste en investigar de qué forma las propiedades estadísticas del movimiento aleatoriamente inducido depende de las características estadísticas de la excitación y de las propiedades dinámicas del sistema.

La aplicación de la TVA al fenómeno sísmico considera que el movimiento puede modelarse como un proceso estocástico estacionario y ergódico (ref. 84). Un proceso estocástico es estacionario si sus propiedades estadísticas son invariables en el tiempo, y ergódico si dichas propiedades pueden ser determinadas a partir de una sola de sus realizaciones, considerando promedios apropiados en el tiempo.

La TVA establece que el ERE estará dado por (ref. 85):

$$ERE = E[A_{m\acute{a}x}] = a_{cm}F_p \quad (24)$$

$A_{m\acute{a}x}$: pseudo aceleración máxima

$E[]$: esperanza matemática

a_{cm} : aceleración cuadrática media

F_p : factor pico

El cálculo de a_{cm} está dado por:

$$a_{cm} = \sqrt{\frac{M_0}{T_{cm}}} \quad (25)$$

$$M_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (26)$$

T_{cm} : duración de la señal

$Y(\omega)$: transformada de Fourier de la señal cuyo máximo desea estimarse

Sea $a(t)$ el acelerograma de un sismo registrado en OXLC y $A(\omega)$ su transformada de Fourier; para obtener el EF en OXXO, $Y(\omega)$, se requiere del historial de registros simultáneos con su cociente espectral dado por la FTEP, que en la TVA se denota por $H(\omega)$. Por lo tanto, se considera que $Y(\omega)$ estará dado por:

$$Y(\omega) = A(\omega)H(\omega) \quad (27)$$

Para obtener T_{cm} , Boore (ref. 86) propone un resultado empírico calibrado para sismos en California:

$$T_{cm} = T_s + \left[\frac{1}{2\pi\xi/T_0} \right] \left[\frac{(T_s/T_0)^3}{(T_s/T_0)^3 + (1/3)} \right] \quad (28)$$

ξ : fracción del amortiguamiento crítico

T_0 : período natural del oscilador de un grado de libertad

T_s : duración de la fase intensa del movimiento, según el criterio de Arias (ref. 87)

Para obtener el factor F_p , se define N como el número de cruces de la señal por el eje del tiempo dado por:

$$N = \frac{T_s}{\pi} \sqrt{\frac{M_2}{M_0}} \quad (29)$$

$$M_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 [Y(\omega)]^2 d\omega \quad (30)$$

De acuerdo con la TVA, el valor de F_p será:

$$F_p = \sqrt{2 \ln N} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln N}} \quad (31)$$

γ : constante de Euler, ($\gamma = 0.577215$)

Siguiendo esta metodología es posible obtener ERE en el sitio OXXO para sismos cuyo registro sólo existe en OXLC utilizando los conceptos de la TVA y la generación de funciones de transferencia empíricas.

La estación OXLC ha registrado una cantidad significativa de temblores, sin embargo, para estimar la respuesta del terreno en la zona de suelos blandos se han seleccionado 3 eventos históricos, los cuales causaron severas afectaciones en la región; estos eventos son los ocurridos el 24/10/1980 ($M = 7.0$, Huajuapán de León), 15/06/1999 ($M = 7.0$, Tehuacán) y 30/09/1999 ($M = 7.5$, Puerto Escondido). La tabla IV.2 y la figura IV.12 presentan información correspondiente a estos eventos.

Tabla IV.2. Sismos elegidos para obtener su ERE en OXXO (ref. 88)

No.	Sismo	M	Coordenadas epicentrales		Prof. [km]	Estación de registro	Distancia epicentral [km]	Acel. Máx [cm/s ²]
			Lat. N.	Long. W.				
7	801024	7.0	18.03	98.29	70	OXFM	197	162.44
8	990615	7.0	18.18	97.51	69	OXLC, OXFM	150, 147	89.10, 23.5
9	990930	7.5	15.95	97.03	16	OXLC, OXFM	127, 129	370.27, 74.65

Nótese que el evento ocurrido el 24 de octubre de 1980 sólo fue registrado por OXFM, lo cual se debe a que en esa fecha dicha estación era la única en operación; sin embargo, debido a la importancia histórica que este evento tiene para la región, se decidió estimar a partir del registro en OXFM la respuesta del sitio OXLC, para, de esta manera, poder obtener el ERE en OXXO a partir de ésta última (ref. 89); así mismo, se utilizó la estimación en OXLC para obtener ERE en las demás estaciones de la RAO, con el fin de comparar la respuesta de estos sitios con la de OXXO para este importante evento.

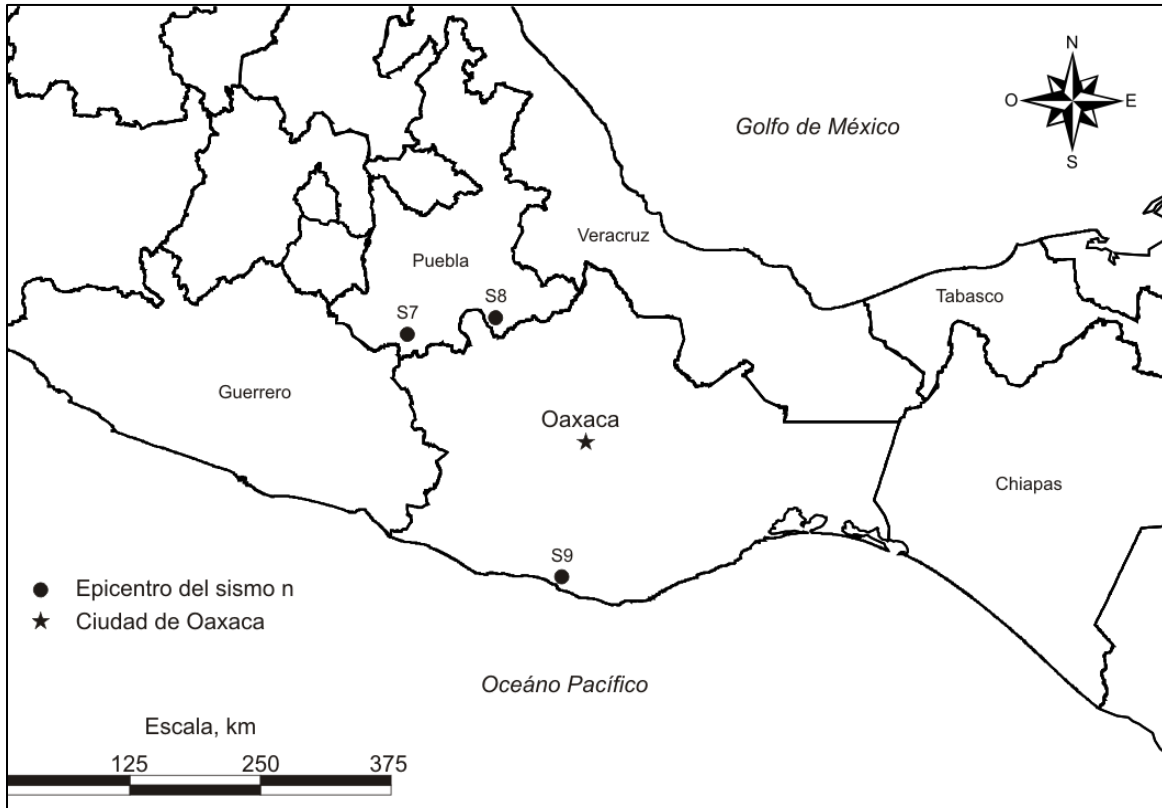


Figura IV.12. Localización epicentral de los sismos 7, 8 y 9

La metodología utilizada para la obtención de los ERE fue la siguiente (ref. 90).

1. Se realizó el pre proceso de los archivos que componen el historial de registros simultáneos en OXXO y OXLC (tabla IV.1), con el fin de realizar las correcciones necesarias y eliminar datos de vibración ajenos al movimiento sísmico. Los acelerogramas obtenidos fueron almacenados, previa identificación del sismo y la componente correspondientes.

De la misma manera, fueron procesados los registros de aquellos eventos cuya respuesta habrá de estimarse en la zona de suelos blandos (tabla IV.2), calculando y almacenando sus correspondientes acelerogramas.

2. Se obtuvieron los EF de los registros simultáneos, calculándose posteriormente los cocientes espectrales para generar las FTE por sismo y componente. Estas funciones fueron determinadas para un intervalo de frecuencias de 0.05 a 35 Hz, ya que éste comprenden los valores de interés para propósitos de ingeniería civil; tanto en este paso como en el anterior se utilizó el programa Degtra A4 para realizar el manejo de la información y los procedimientos de cálculo.
3. Se calcularon las FTEP horizontal y vertical. Se consideraron las componentes NS y EW para generar una única función promedio horizontal. Para obtener estas funciones se utilizó el programa *PROMEDIO* (ref. 91).
4. Se calcularon los ERE utilizando el programa VIBFS2 (ref. 92), el cual sigue la metodología presentada en las ecuaciones 23 a 30. Este programa emplea como información de entrada los registros de aceleración de los sismo cuyo ER ha de estimarse y las FTEP generadas entre el sitio de interés (OXXO) y la referencia (OXLC).

IV.4 Resultados obtenidos

Amplificación relativa del movimiento sísmico

Las FTEP permiten evaluar la amplificación relativa ocasionada por la modificación del movimiento sísmico al propagarse a través del depósito de suelo; las funciones determinadas para caracterizar la respuesta del sitio en la estación OXXO son mostradas a continuación, tanto en su componente horizontal (figura IV.13) como en la vertical (figura IV.14).

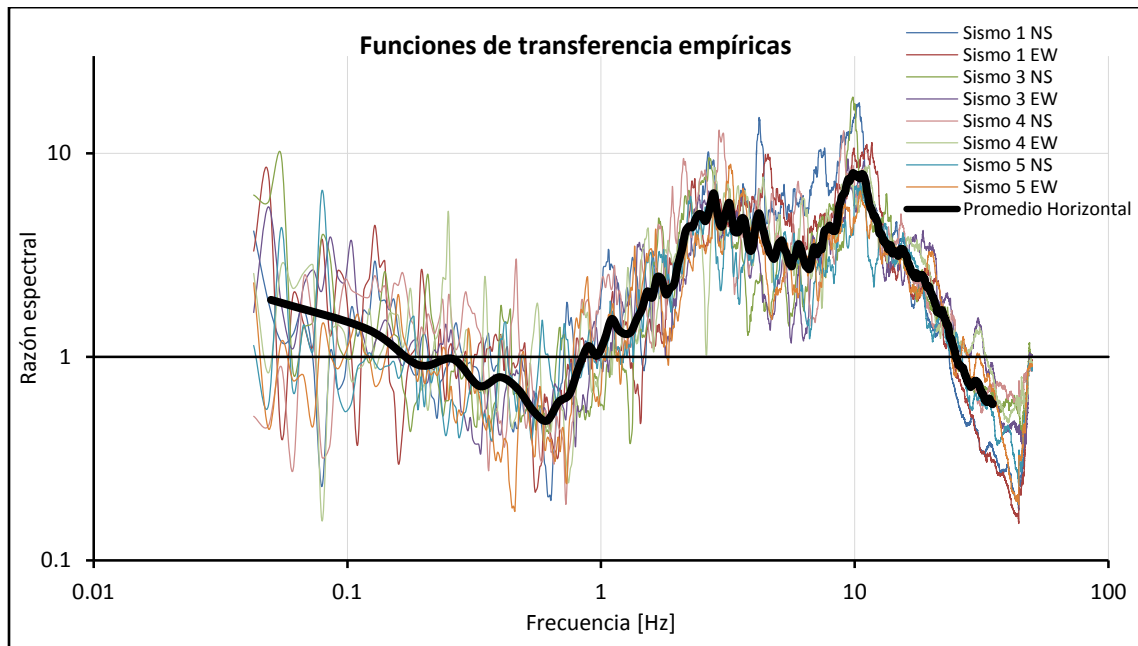


Figura IV.13. Función de transferencia promedio horizontal

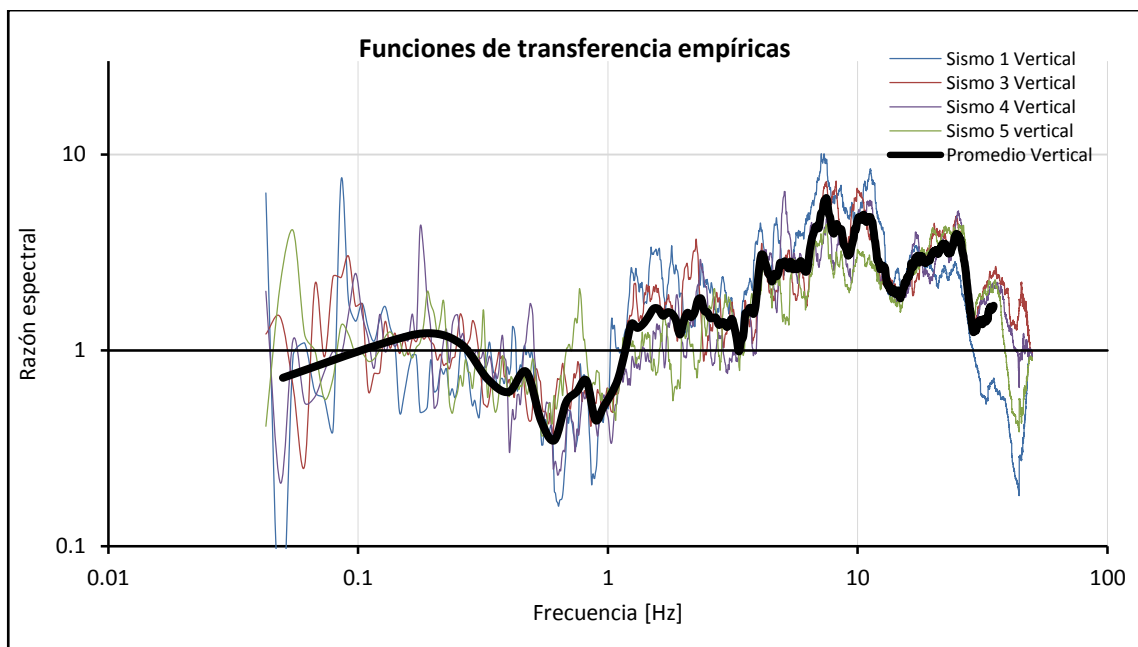


Figura IV.14. Función de transferencia promedio vertical

El registro del movimiento sísmico horizontal se realiza en dos direcciones (NS y EW), sin embargo, se decidió considerar ambas componentes para la generación de una única FTP horizontal, ya que al analizar individual y colectivamente las funciones obtenidas en cada dirección, se observó una buena estabilidad y similitud entre ellas, independientemente del mecanismo de falla productor del sismo, localización epicentral, profundidad, magnitud o dirección de registro.

Las FTE determinadas describen las amplificaciones relativas del movimiento en la superficie, por tanto, en ellas es posible apreciar estos efectos en determinadas frecuencias, de las cuales, los valores donde se presentan los picos de amplificación son los de mayor interés, ya que corresponden a los modos de vibrar del depósito que dependen principalmente del espesor (H), el módulo de rigidez al corte (G) y la densidad del medio (ρ) (ref. 93). La identificación de estos máximos y sus correspondientes frecuencias es esencial, debido a que tienen influencia en los efectos de sitio.

Al observar las FTEP determinadas puede notarse que el intervalo de frecuencias significativas de amplificación (factor de amplificación mayor a 3) se encuentra entre 2 y 20 Hz para la dirección horizontal y entre 4 y 22 Hz para la vertical, intervalos en los que, en ambos casos, quedan comprendidos los valores pico de amplitud; así mismo, para valores inferiores a 1 Hz se aprecian efectos de atenuación del movimiento.

La forma de las FTEP en ambas direcciones establece claramente dos picos máximos de vibración, los cuales se asocian a los modos de vibrar del depósito; en el caso de la componente horizontal, la respuesta en el segundo es mayor mientras que para la vertical lo es en el primero. Los valores de frecuencia para la amplitud máxima se localizan en dirección horizontal en 2.6 y 10 Hz para el primero y segundo respectivamente, mientras que en dirección vertical se encuentran en 7.5 y 10.8 Hz; en ambos casos, estos valores de frecuencia están comprendidos dentro del rango de interés para propósitos ingenieriles.

El nivel de amplificación del movimiento superficial en ambas componentes alcanzan magnitudes significativas; los valores máximos promedio son 9 para la dirección horizontal ($f=10$ Hz) y 6 para la vertical ($f=7.5$ Hz). Estos valores indican que la amplificación relativa en la zona de Xoxocotlán es considerable, además, al analizar los casos individuales se identificaron eventos para los cuales el valor de respuesta con respecto a la referencia es hasta 16 veces mayor (componentes NS de los eventos 1 y 3 de la tabla IV.1). El valor de amplificación máxima promedio obtenido para las componentes horizontales es superior al determinado en otro estudio realizado en la zona cuya magnitud es 6 (ref. 94).

Espectros de respuesta estimados

La figura IV.15 presenta los ERE de los sismos históricos seleccionados, mientras que la figura IV. 16 muestra la comparación de ERE entre las estaciones de la RAO para el evento del 24/octubre/1980 (M = 7.0).

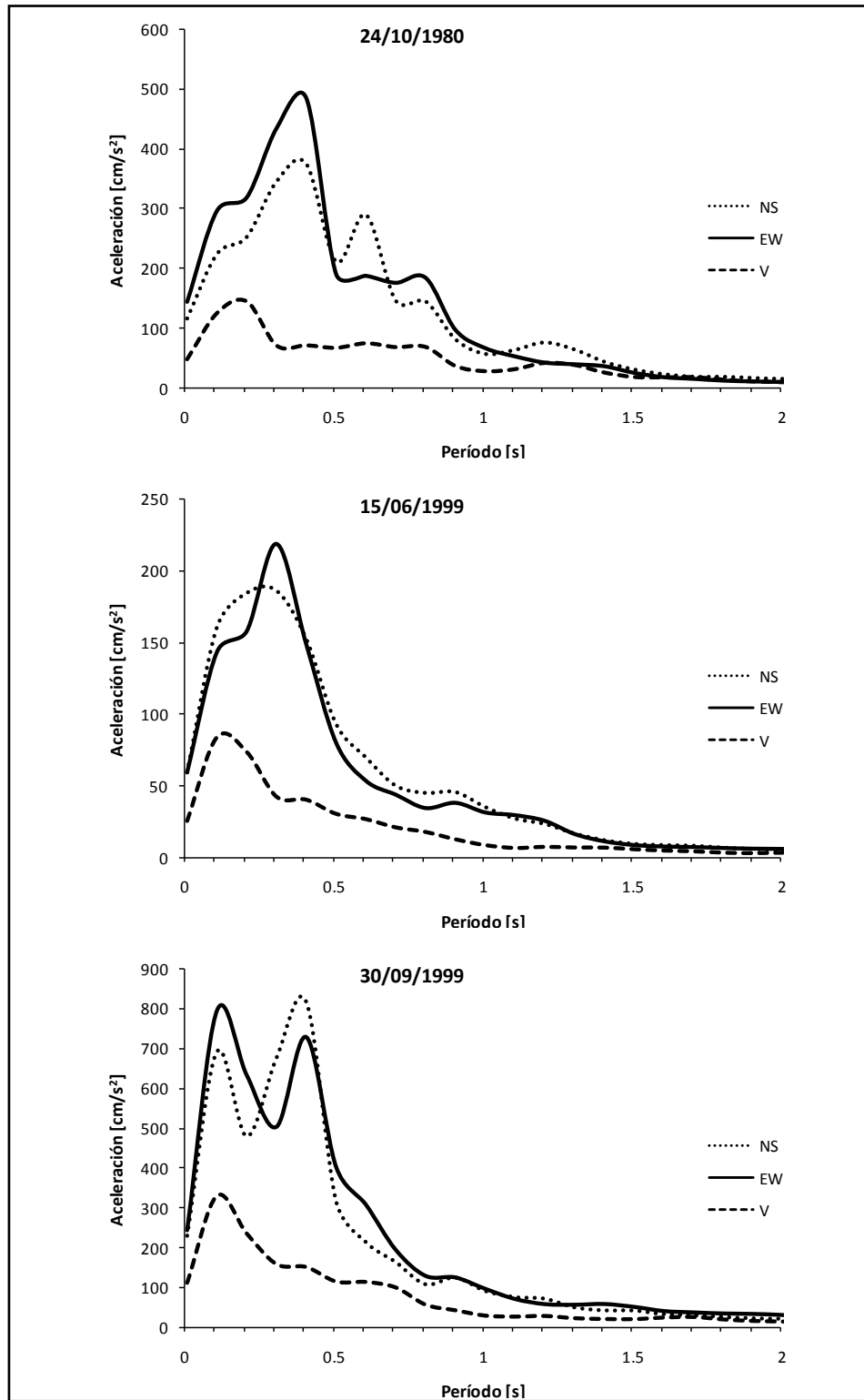


Figura IV.15. Espectros de respuesta estimados para los sismos históricos (5% de amortiguamiento)

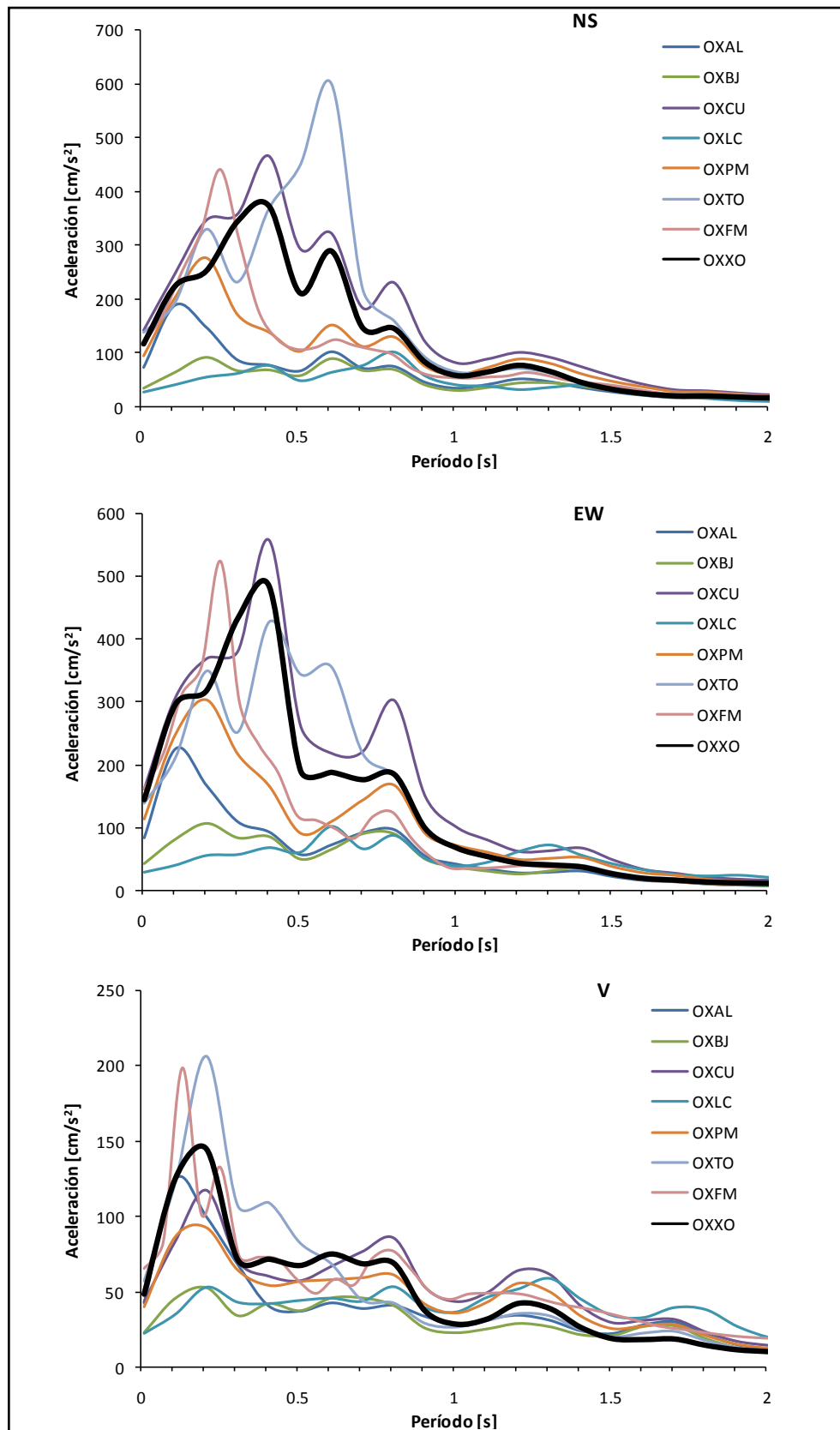


Figura IV.16. Comparación de ERE para el sismo 24/10/1980 en las diferentes estaciones de la RAO

Al analizar los ERE se observa que los períodos dominantes del terreno en el sitio OXXO son 0.4 s en las componentes horizontales y 0.12 s en la vertical; adicionalmente, se pueden identificar otros valores para los cuales se tienen picos de aceleración definidos, los cuales corresponden a 0.12 y 0.63 s en las direcciones horizontales y 0.2 s en la vertical.

El ERE para el evento del 24/10/1980 la respuesta máxima se presenta en la dirección EW, con un valor de 490 cm/s^2 , mientras que la NS alcanzó una magnitud de 385 cm/s^2 , ambos para $T = 0.4 \text{ s}$ (la componente NS presenta un segundo pico de 290 cm/s^2 para $T = 0.63 \text{ s}$), por su parte, la aceleración en dirección vertical es de 145 cm/s^2 en $T = 0.2 \text{ s}$. Los valores pico del ERE para el sismo del 15/06/1999 son 219 cm/s^2 para $T = 0.38 \text{ s}$ en dirección EW, 189 cm/s^2 para $T = 0.38 \text{ s}$ en NS y 85 cm/s^2 en $T = 0.12 \text{ s}$ para la componente vertical.

Finalmente, las respuestas máximas estimadas para el evento del 30/09/1999 son 825 cm/s^2 para $T = 0.4 \text{ s}$ en dirección NS (un segundo pico de 700 cm/s^2 se presenta en $T = 0.12 \text{ s}$); para la componente EW se tiene 810 cm/s^2 para $T = 0.12 \text{ s}$ (con un segundo máximo de 730 cm/s^2 en $T = 0.4 \text{ s}$) y 335 cm/s^2 para $T = 0.12 \text{ s}$ en dirección vertical. Puede observarse que de los tres eventos analizados, las aceleraciones de mayor magnitud fueron estimadas para este último sismo, en cuyos espectros se puede apreciar dos picos de aceleración claramente definidos.

En los espectros de los tres eventos analizados se observa que en la estación OXXO se pueden esperar altas ordenadas espectrales en las componentes horizontales para un intervalo de períodos bajos. Tal como se estableció al analizar las FTE, el depósito de suelo en la estación es susceptible de desarrollar amplificaciones de respuesta dinámica importantes, lo cual ha sido corroborado al estudiar los ERE; sin embargo, los resultados obtenidos deben tomarse con criterio, ya que el ER refleja las características del movimiento fuerte de forma indirecta, la amplitud, el contenido de frecuencias y la duración del movimiento pueden influenciar los valores espectrales.

Por lo que se puede observar, a partir de los ERE para los sismos históricos en el sitio OXXO, el tipo de suelo en la región tiene el potencial para desarrollar altos niveles de respuesta, comparables a los experimentados en otras regiones para sismos que han ocasionado considerables daños.

En lo que respecta a la comparación del nivel de respuesta en el sitio OXXO, con relación a las demás estaciones de la RAO para el sismo del 24/10/1980, los ERE se presentan en la figura IV.16. Es posible apreciar que las aceleraciones estimadas en OXXO no son las mayores en la red, ya que ésta se ve ligeramente superada por los sitios OXCU, OXPM y OXTO, sin embargo, estas estaciones se encuentran desplantadas en el mismo tipo de suelo en que se localiza la estación OXXO (ref. 95), conformado principalmente por materiales de origen aluvial depositados por el Río Atoyac, por lo que los niveles de respuesta estimados para estos sitios resultan acordes con lo esperado en relación con OXXO.

Para los sitios que presentan las respuestas máximas puede identificarse que los períodos dominantes se encuentran en un intervalo de $0.22 \leq T \leq .062 \text{ s}$. El sitio OXXO exhibe amplitudes espectrales de orden similar a OXPM y OXCU, manifestando además una gran similitud en la forma de su espectro con el de esta última estación. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la región de Xoxocotlán se encuentra dentro de las zonas de mayor vulnerabilidad sísmica en el valle de Oaxaca.

Al analizar la forma de los ER obtenidos para el sitio OXXO se definen períodos dominantes inferiores a 0.5 s, estos valores son típicos de suelos con materiales rígidos, los cuales dominan la respuesta, esto pone en evidencia que en la región, a pesar de la predominancia de materiales de origen aluvial en el depósito, éste no presenta valores de período típicos de suelos blandos.

Un estudio realizado con datos obtenidos a partir de sismos registrados en la Ciudad de México y San Francisco (ref. 96), propone una clasificación de suelos basados en la forma de los espectros de respuesta de aceleración (normalizados con respecto al valor de la aceleración máxima del terreno) calculados a partir de

registros sísmicos. La figura IV.17 presenta una comparación del espectro de respuesta promedio obtenido en dicho estudio para suelos rígidos y los espectros de las componentes horizontales calculados para los sismos registrados en el sitio OXXO que fueron utilizados para generar las FTE (tabla IV.1).

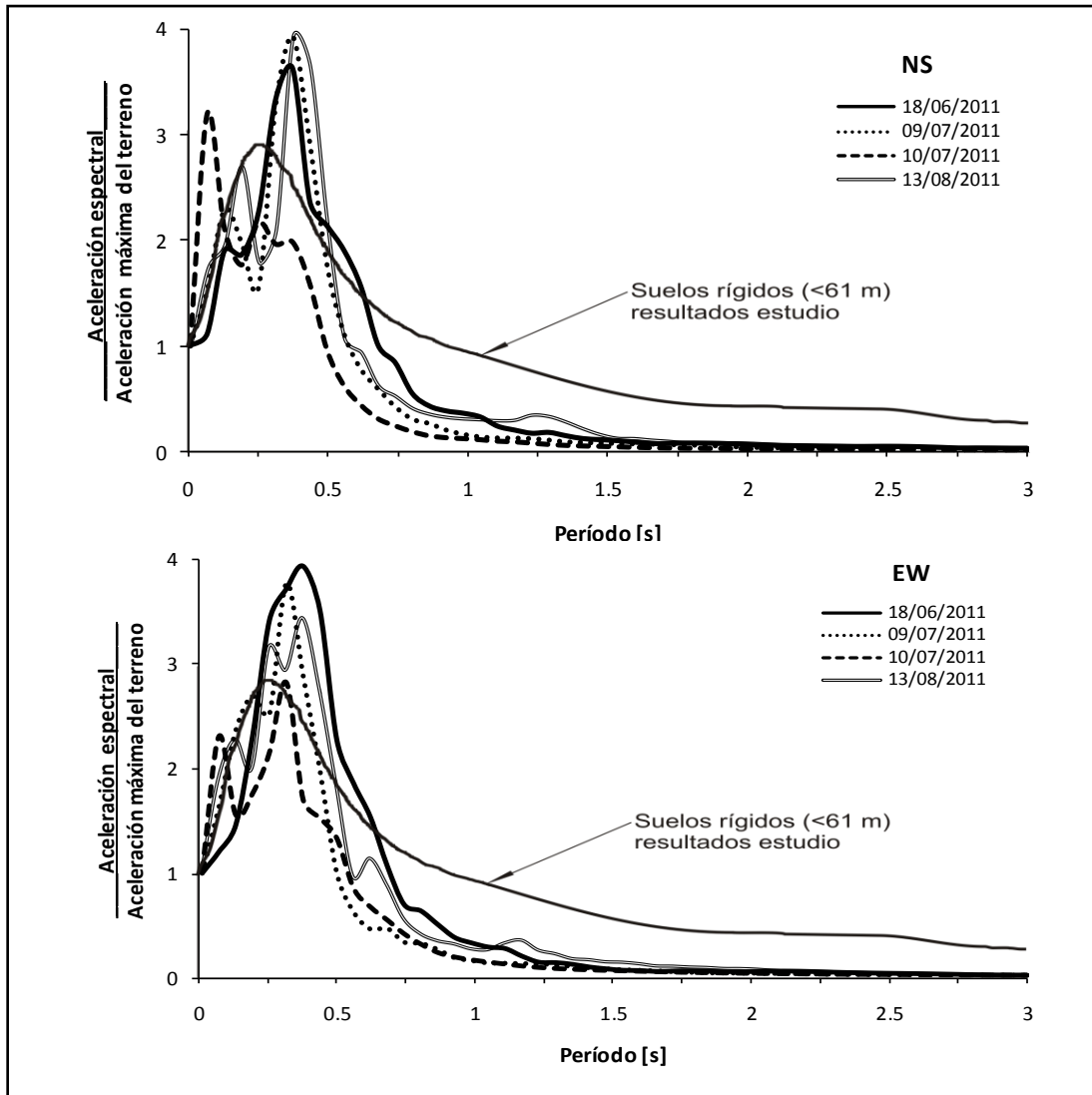


Figura IV.17. Comparación de Espectros de respuesta normalizados (5% de amortiguamiento).

La forma de los espectros refleja las condiciones locales. Para $T > 0.5$ s las respuestas son mayores para suelos que para roca, a mayores períodos las amplitudes espectrales se incrementan al disminuir la rigidez del medio. Los espectros calculados para el sitio OXXO exhiben una forma similar a los resultados del estudio para suelos rígidos, aunque presentan períodos dominantes ligeramente superiores, por lo que se infiere una menor rigidez del depósito en Xoxocotlán; así mismo, se observa que los niveles máximos de respuesta exceden a los del espectro de comparación.

De acuerdo con estas consideraciones, se puede concluir que el sitio de la estación OXXO, ubicado en la zona sur de la Ciudad de Oaxaca, la cual está constituida fundamentalmente por materiales de origen aluvial, presenta estratos de significativa rigidez que definen la respuesta del terreno, estableciendo períodos dominantes bajos, en los cuales se tiene el potencial de desarrollar niveles de amplificación en la respuesta superficial de magnitud considerable.

CONCLUSIONES

V CONCLUSIONES

La magnitud de las aceleraciones superficiales del terreno durante la ocurrencia de un temblor son resultado de las modificaciones de las características de las ondas sísmicas que se propagan a través del depósito de suelo, las cuales sufren efectos de filtrado, reflexión y refracción en su trayecto a la superficie. Por lo tanto, la amplificación de la respuesta sísmica de un sitio depende de las condiciones locales (geología, topografía, basamento, entre otros), variando en función de las propiedades dinámicas de los materiales y el espesor del depósito.

La estimación de la respuesta sísmica en la zona sur del valle de Oaxaca se cumplió satisfactoriamente. La caracterización dinámica del suelo de la región se realizó a través del registro de eventos sísmicos, para lo cual se instaló una estación acelerográfica en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, ubicado al sur de la Ciudad de Oaxaca, zona en la que se ha identificado la presencia de materiales blandos de origen aluvial con contenido de arcilla que presentan efectos de amplificación de la respuesta sísmica.

El análisis de la respuesta se realizó utilizando los registros obtenidos de la estación OXXO, así como los provenientes de una estación de referencia en roca (OXLC) para generar funciones de transferencia empíricas que, en conjunto con la teoría de vibraciones aleatorias, fueron empleadas para estimar espectros de respuesta de sismos históricos.

En los espectros de respuesta estimados se puede identificar el período dominante del sitio ($T=0.4$ s en la dirección horizontal y $T = 0.12$ s en la vertical), el cual es un parámetro que caracteriza el comportamiento del terreno y depende directamente de las propiedades dinámicas y de la configuración estratigráfica del depósito de suelo. Este valor, junto con la amplificación relativa (9 y 6 en dirección horizontal y vertical respectivamente) constituyen dos parámetros importantes en el estudio de la respuesta dinámica y los efectos locales de un sitio.

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio a partir de los registros sísmicos de la estación OXXO, indican que en la zona sur de la Ciudad de Oaxaca, en la cual se infiere que se localizan los depósitos de materiales de origen aluvial de mayor espesor, la respuesta sísmica del suelo está predominantemente determinada por los materiales rígidos del depósito, ya que son éstos los que establecen períodos dominantes $T < 0.5$ s. Por otra parte, los efectos de amplificación de la respuesta dinámica observados en la región son considerables, ya que se estimaron niveles de amplificación relativa promedio entre 6 y 9 veces superiores con respecto a los registrados a una referencia en roca.

Tanto la amplificación relativa como los períodos dominantes del terreno determinados en el sitio OXXO confieren un significativo riesgo sísmico a la región, debido a los valores estimados de estos parámetros. Para eventos sísmicos históricos, los niveles de respuesta obtenidos en los ERE son de magnitud considerable, ya que los picos de aceleración se presentan para valores de T que pueden poner en riesgo la infraestructura de la región de Xoxocotlán.

El tipo de edificaciones predominantes en la zona son vulnerables a la respuesta sísmica del depósito, ya que debido a sus características dinámicas pueden desarrollar fuerzas inerciales importantes durante la ocurrencia de un sismo, pues sus períodos de vibración se encuentran próximos a los dominantes del terreno, y el nivel de amplificación de las aceleraciones a nivel superficial de éste es considerable; por tanto, las estructuras bajas y/o de período corto ubicadas en la región de Xoxocotlán pueden experimentar altos niveles de intensidad sísmica y de daños debido al efecto de resonancia, el cual provoca una respuesta excesiva debida a la similitud de las frecuencias de vibración dominantes del suelo y la estructura.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Bolt B (1981). *Terremotos*. Ed. Reverté, Sevilla, España.
2. Tolson G (1998). *La teoría de la tectónica de placas y de la deriva continental*. Cuadernillo, Instituto de Geología UNAM, México D.F.
3. Jacob K H (1991). *Seismic zonation and site response: Are buildings-code soil-factors adequate to account for variability of site conditions across the US?* Proceedings, 4th International Conference on Microzonation, Earthquake Engineering Research Institute, Stanford University, Palo Alto, California, vol. 1, pp 695-702.
4. Dobry R y Vucetic M (1987). *Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits*. Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, vol. 2, pp 51-87.
5. 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) (2000). *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes* CD-ROM vol. 2, México D.F.
6. Idriss I M (1990). *Response of soft soil sites during earthquakes*. Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, vol. 2, pp 273-289.
7. Seed H B, Ugas C y Lysmer J (1976). *Site-dependent spectra for earthquakes-resistant design*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 66, pp 221-243.
8. Tucker B y King J (1984). *Dependence of sediment filled valley response on input amplitude and valley properties*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 74, pp 153-165.
9. Vidale J E y Helmberger D V (1988). *Elastic finite difference of the 1971 San Fernando earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 78, pp 121-141.
10. Munguía L y Brune J. (1984). *Local magnitude and sediment amplification observations from earthquakes in Northern Baja California-Southern California region*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 74, pp 107-119.
11. Bard P y Bouchon M (1985). *The two dimensional resonance of sediment filled valleys*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 75, pp 519-541.
12. Centro Nacional de Prevención de Desastres (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, Secretaría de Gobernación, México D.F.
13. Padilla y Sánchez R J (1986). *Post-Paleozoic tectonica of Northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico*. Geofísica Internacional, vol. 25, No. 1, pp 157 -206.
14. De la Orta S, Aguilar F y Torres C R (1991). *Espectros de sitio para las zonas petroleras de Salina Cruz, Oaxaca y Morelos, Veracruz*. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Manzanillo, Col., pp 1-20 – 1-33.
15. Singh S K y Suárez G (1987). *Overview of the Seismicity of Mexico with emphasis on the September 1985 Michoacan Earthquake; The Mexico Earthquakes 1985: Factors Involved and Lessons Learned*, M A Cassaro and E Martínez Romero (Eds), Proceedings of the international Conference, American Society of Civil Engineerins, New York, pp 7-18
16. Unidad Estatal de Protección Civil de Oaxaca (2003). *Atlas estatal de riesgos. Identificación de peligros y localización de zonas vulnerables*. Tomo I. Gobierno del Estado de Oaxaca.

17. Kostoglodov V y Pacheco J (1999). *Cien años de Sismicidad en México*. Instituto de Geofísica, póster.
18. Núñez-Cornú F y Ponce L (1989). *Zonas sísmicas de Oaxaca, México: sismos máximos y tiempos de recurrencia para el período 1542-1988*. Geofísica Internacional, vol. 28, No. 4, pp 587 -641.
19. Unidad Estatal de Protección Civil de Oaxaca (2000). *Sismicidad en el estado de Oaxaca 1990-2000*, Gobierno del estado de Oaxaca.
20. Singh S K, Ordaz M, Alcántara L, Shapiro N, Kostoglov J F, Alcocer S, Gutiérrez C, Quass R. Mikumo T y Ovando E (2000). *The Oaxaca earthquake of 30 September 1999 ($M_w = 7.5$): A normal Faulting event in the Subducted Cocos Plate*. Seismological Research Letters, vol. 71, No. 1, pp 67-78.
21. Unidad Estatal de Protección Civil de Oaxaca (2000). *Op cit.*
22. Núñez-Cornú F y Ponce L (1989). *Op cit.*
23. Montero I N (2010). *Modelo neuronal artificial para estimar la aceleración máxima del terreno producida por sismos en el Estado de Oaxaca*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM
24. Consejo de recursos minerales (1996). *Monografía geológico minera del Estado de Oaxaca*, Secretaría de comercio y fomento industrial, publicación M-17e, Primera edición. México D.F.
25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2009). *Anuario estadístico de Oaxaca. Mapas*. Conjunto de datos geográficos de la Carta Geológica 1:1 000 000.
26. Ortega-Gutiérrez F (1981) *Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance*, Geofísica Internacional, vol. 20, No. 3, pp 177-202.
27. Mena M, de la Fuente M, Morán D, Espíndola J M, Núñez-Cornú F y Medina F (1995). *Anomalías gravimétricas y espesor de la corteza en la región de Oaxaca México*. Geofísica Internacional, vol. 34, No. 1, pp 79-91.
28. Ortega-Gutiérrez F (1981) *Op cit.*
29. Unidad Estatal de Protección Civil de Oaxaca (2000). *Op cit.*
30. Figueroa J (1956). *Las zonas sísmicas de México*. Anales del Instituto de Geofísica, UNAM, vol. II pp 20-28.
31. Unidad Estatal de Protección Civil de Oaxaca (2003). *Op cit.*
32. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. México D.F.
33. Lermo J, Chávez-García F, Urbieto J y Mijares H (1991). *Amplificación relativa en la zona urbana de Oaxaca. Contribución a la microzonificación sísmica*. Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Col., pp 1-34 a 1-44.
34. Servicio Geológico Mexicano (2000). *Carta geológico-minera, Oaxaca E14-9*. Escala 1:250000.
35. León J L (1976). *Información general acerca del subsuelo de 17 ciudades de México, Oaxaca, Oax*. Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, pp 157-181.
36. *Ídem*
37. Espíndola J M y Jiménez Z (1994). *Terremotos y ondas sísmicas, una breve introducción*, Cuadernillos del Instituto de Geofísica, No. 1, UNAM, México D. F.
38. Figueroa J (1975). *Sismicidad en Oaxaca*, Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 360, dic. México D. F.
39. Unidad estatal de Protección Civil Oaxaca (2000). *Op cit.*
40. Figueroa J (1975). *Op cit.*

41. Alcántara L, Ovando E, Almora D, Singh S, González G, Macías M A, Posada A, Romo M, Sandoval H, Torres M, Vázquez R, Velasco J, Ayala M, Castro G, Pérez C, Ylizaliturri J, Vázquez E, Ruíz A (2002). *Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la Ciudad de Puebla, Informe final elaborado para CONACYT*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
42. Lermo J, Chávez-García F, Urbietta J y Mijares H (1991). *Op cit.*
43. Servicio Sismológico Nacional, *Cien años de Instrumentación Sísmica en México*, Instituto de Geofísica, UNAM, < <http://secre.ssn.unam.mx/SSN/instrumentacion3.html> >.
44. Alcántara L, Alcocer S, Almora D, Torres M, Sandoval H, Macías M, Vázquez R, Ayala M, Velasco J, Castro G (2007). *Instalación y puesta en marcha de 35 estaciones acelerográficas con equipo sísmico especializado de la Red Sísmica Mexicana (Informe final etapa 3)*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
45. Alcántara L, Quaaas R, Pérez C, Javier C, Flores A, Mena E, Espinosa J M, López B, Cuéllar A, Camarillo L, González F, Guevara E, Ramírez M, Vidal A, Ayala M, Ramos S, Macías M A (2001). *La base Mexicana de Sismos Fuertes. Un sistema de CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999*, 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España, pp 861-700.
46. Alcántara L y Macías M A (2012). *Funciones de transferencia y espectros de respuesta estimados para el sismo del 20 de marzo del 2012 ($M = 7.4$) en la Ciudad de Oaxaca*. Informe interno del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
47. Lermo J, Limaymanta F y Alcántara L. (2009). *Propuesta de un nuevo sistema de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico para las zonas urbanas de México*. Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Pue.
48. H. Ayuntamiento Constitucional de Santa Cruz Xoxocotlán (2008). *Plan de desarrollo municipal 2008-2010*.
49. Gobierno del estado de Oaxaca (1998). *Reglamento de construcción y seguridad estructural para el Estado de Oaxaca*.
50. Limaymanta F M, Lermo J y Alcántara L (2008). *Evaluación de los efectos de sitio y la caracterización de los terrenos de cimentación con fines de diseño sísmico: estudio en tres ciudades mexicanas*. XIII Congreso Latinoamericano de Geología y XIV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, Sociedad Geológica Peruana, consulta en línea <http://www.cprm.gov.br/cong_lat_peru/paper/D/D07.swf>
51. Lermo J, Cruz M, Urbietta J y Nava E (1991). *Microzonificación sísmica y análisis de la amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca. Primera parte*. Informe Interno del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México D.F.
52. Lermo J, Chávez-García F, Urbietta J y Mijares H (1991). *Op cit.*
53. Alcántara L, Ovando E, Romo M y Almora D (2000). *Algunos efectos de sitio observado en la Ciudad de Oaxaca*. Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, Oax. pp 259-267.
54. Lermo S y Chávez-García F (1995). *Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca. Resultado con registro de temblores y mediciones de microtemblores*. Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS No. 50 pp 1-13.
55. Limaymanta F M, Lermo J y Alcántara L (2008). *Op cit.*
56. León J (1976). *Op cit.*
57. Velasco G J y Aguilar H (2000.) *Monografía del municipio de Santa Cruz Xoxocotlán Centro, Oaxaca*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), IPN, Oaxaca, México.
58. Lermo S y Chávez-García F (1995). *Op cit.*

-
59. León J. (1976). *Op cit*
 60. *Ídem*
 61. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *Censo de población y vivienda*. Consulta en línea <<http://www.censo2010.org.mx/>>
 62. Gobierno Municipal de Santa Cruz Xoxocotlán (2011). *Plan Municipal de desarrollo de Santa Cruz Xoxocotlán 2011-2013*.
 63. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca*.
 64. *Ídem*
 65. Miller W L y Bragg A L (2007). *Soil Characterization and Hydrological Monitoring Project, Brazoria County, Texas, Bottomland Hardwood Vertisols*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, pp 7-10, Texas, USA.
 66. Soil Survey Staff (1999). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook, No. 436, Second edition, pp 783-818.
 67. H. Ayuntamiento Constitucional de Santa Cruz Xoxocotlán (2008). *Op cit*.
 68. Google maps <<http://maps.google.com.mx/>>
 69. Soil Survey Staff (1999). *Op cit*
 70. Google maps <<http://maps.google.com.mx/>>
 71. *Altus K2. High Dynamic Range Accelerograph. Operations manual*. Kinemetrics Inc.
 72. *Operating instructions for FBA-23, Force Balance Accelerometer*. Kinemetrics Inc.
 73. *Altus K2. High Dynamic Range Accelerograph. Operations manual*. Kinemetrics Inc.
 74. Chopra A K (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, EUA.
 75. Benson H T (2002). *Principles of vibration*. Oxford University Press, EUA.
 76. Brigham E O, (1998). *The Fast Fourier Transform and its Applications*, Prentice-Hall, New York, EUA.
 77. Lathi B P (1963). *Signals, systems and communication*. John Wiley & Sons, Inc., New York, EUA.
 78. Servicio Sismológico Nacional < www.ssn.unam.mx >
 79. Kostoglodov V y Pacheco J (1999). *Op cit*.
 80. Durán R (2007). *Espectros de respuesta estimados para la Ciudad de Oaxaca*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
 81. 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). *Op cit*.
 82. Ordaz M y Montoya-Dulché (1990-2002). *Degtra A4 v.5.2.0*. Instituto de Ingeniería UNAM y Centro Nacional de Prevención de Desastres.
 83. Brigham E O (1998). *Op cit*.
 84. Papoulis A (1985). *Probability, random variable and stochastic processes*. McGraw Hill International Book Company, EUA.
 85. Reinoso E, (1986). *Un Algoritmo para el Cálculo Aproximado de Espectros de Respuesta Sísmica basado en la Teoría de Vibraciones Casuales*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

-
86. 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. No.5, pp 2035-2039.
 87. Arias A (1970). *A measure of earthquake intensity in seismic design for Nuclear Power Plants*. R J Hansen (ed.), the MIT Press, Cambridge, MA, pp 438–469.
 88. Servicio Sismológico Nacional < www.ssn.unam.mx >
 89. Alcántara L (2012). Comunicación personal.
 90. Medrano V H (2009). *Estimación de espectros de respuesta en suelos de la Ciudad de Puebla utilizando Teoría de Vibraciones Aleatorias*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
 91. Ordaz M (2006). *PROMEDIO*. Sistema de cómputo desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM.
 92. Ordaz M y Singh S K (2006). *VIBEF52*. Segunda versión. Instituto de Ingeniería, UNAM.
 93. Carvajal J C, Taboada V y Romo M P (2000). *Análisis espectral de movimientos sísmicos en la Ciudad de México para evaluar propiedades dinámicas del suelo*. Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, Oax. pp 241-252
 94. Lermo J y Chávez-García F (1995). *Op cit.*
 95. Limaymanta F M, Lermo J y Alcántara L (2008). *Op cit.*
 96. Seed H B, Ugas C y Lysmer J (1976). *Op cit.*