

01/21
84



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“APLICACIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS
DE INGENIERÍA CIVIL EN LOS EFECTOS
DE SITIO OBSERVADOS EN UNA CIUDAD
DE MEDIANO DESARROLLO ANTE
ACCIÓN SÍSMICA”

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
VICTOR HENRY LIRA COLÍN

Tesis terminada
[Firma]
20/05/2003

DIRECTOR DE TESIS:
M. en I. Leonardo Alcántara Nolasco



México, D. F.

2003

Q



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.

TESIS CON FALLA
DE
ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/022/00

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Señor
VICTOR HENRY LIRA COLIN
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. LEONARDO ALCANTARA NOLASCO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"APLICACION DE LOS CONOCIMIENTOS DE INGENIERIA CIVIL EN LOS EFECTOS DE SITIO OBSERVADOS EN UNA CIUDAD DE MEDIANO DESARROLLO ANTE LA ACCION SISMICA"

INTRODUCCION

- I. GEOLOGIA DEL ESTADO DE OAXACA
 - II. LA RED ACELEROGRAFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA
 - III. DETERMINACION DE LOS EFECTOS DE SITIO
 - IV. CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitario a 25 de febrero de 2000
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFR/GMP/matg.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico o impreso el contenido de mi trabajo profesional.

NOMBRE: VICTOR HENRY LIRA COLIN
FECHA: 02/02/03
FIRMA: [Firma]

b

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos:

A mi niña, mi Esposa Montse que me ha brindado su amor, confianza y dedicación de forma incondicional, y que comparte conmigo todos mis momentos de felicidad y tristeza apoyándome en cada paso que doy para lograr juntos nuestros sueños; y por supuesto, a mi "pansa", mi Hijo Fabián que es mi fuerza para buscar un mundo mejor que ofrecerle, en verdad los admiro.

A mi Madre, por darme su cariño y confianza durante toda mi vida, así como su ejemplo de lucha sin descanso para el bienestar de sus hijos.

A mi Padre, quién me brindo sus mejores consejos, su fuerza y voluntad para realizar mis ideales y valorar esos pequeños detalles de la vida.

A mis hermanas, quienes han salido adelante con su esfuerzo y dedicación, Claudia que aunque este lejos de nosotros y Nancy que esta en el momento difícil de decidir su camino, tomen en cuenta que siempre habrá alguien que las apoyará.

A mis Suegros, Gelis y Benja, por su comprensión y apoyo, así como sus consejos en los momentos difíciles en esta nueva etapa de nuestras vidas.

A Benja Jr., por brindarme su amistad más que el lazo familiar que nos une, y sobre todo por querer tanto a su sobrino.

A toda mi familia en general, desde Papa Beto y Maña, hasta mis tíos, primos y sobrinos, por estar unidos en muchos momentos felices de mi vida.

A todos mis amigos y a los que considero mis hermanos, desde el más viejo hasta el más reciente, han contribuido en gran parte a que llegue hasta aquí, simplemente por brindarme su amistad sincera.

A la UNAM, al Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, A la gloriosa Facultad de Ingeniería, A el Instituto de Ingeniería y A todos mis profesores a los que les tengo un gran respeto y admiración.

A mi tutor, MI Leonardo Alcántará, y a todos los del instituto encabezados por, MI Marco Macías y demás investigadores y amigos, por su paciencia y apoyo para terminar este trabajo.

Sinceramente Gracias.

Henry.

INTRODUCCIÓN	1
I. GEOLOGÍA EN EL ESTADO DE OAXACA	4
I.1 Aspectos Geológicos	4
I.2 Marco Tectónico	4
I.3 El Valle de Oaxaca	8
I.4 Tipos de suelo en la ciudad de Oaxaca	10
II. LA RED ACELEROGRÁFICA EN LA CIUDAD DE OAXACA	19
II.1 Red sísmica en el estado de Oaxaca	21
II.2 Red Acelerográfica en la ciudad de Oaxaca	23
II.3 Características de las estaciones acelerográficas	25
III. DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO	41
III.1 Acelerogramas registrados	41
III.2 Registro y Procesamiento de la información	41
III.3 Espectros de Fourier y Respuesta	53
III.4 Funciones de Transferencia	68
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS	77

Introducción

La ciencia que estudia las causas que producen los terremotos o sismos, el mecanismo por el cual se producen y propagan las ondas sísmicas, y la predicción del fenómeno sísmico se denomina sismología. Esta es una ciencia joven, puesto que gran parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX. A pesar de esto, la sismología ha logrado avances notables. Quizá una de sus más valiosas contribuciones al entendimiento de nuestro planeta lo constituya su aportación a la llamada Tectónica de Placas.

En 1620, Sir Francis Bacon (Ref. 1) reconoció que existía una correspondencia muy clara en la forma de las líneas de la costa atlántica de América y las de África. Tomando como base lo anterior, el meteorólogo alemán Alfred Wegener desarrolló, en 1912, la teoría de la Deriva Continental (Ref. 2), que afirma que los actuales continentes se hallaban agrupados hace 200 millones de años formando un supercontinente llamado PANGEA. Sin embargo, fue hasta finales de los años sesenta y principios de los setenta cuando, con base en la teoría elaborada por Wegener, surgió la teoría de la tectónica de placas, que establece que la litosfera se encuentra dividida en una especie de mosaico de sectores rígidos, conocidos como placas, las cuales se mueven entre sí con desplazamientos promedio de centímetros por año sobre la superficie de la Tierra, en un estrato de material viscoso llamado astenosfera (Ref. 3).

Las placas que constituyen la litosfera tienen aproximadamente 100 km de espesor y varían en dimensiones (Ref. 4), en el caso de México se tiene desde la enorme placa del Pacífico hasta la pequeña placa de Rivera frente a las costas de Jalisco. Los límites o márgenes entre placas pueden ser de tres tipos:

- Divergente: Las placas se separan entre sí y pueden dar origen a grandes estructuras como las cordilleras oceánicas.
- Convergente: Una placa se introduce bajo otra o bien, dos de ellas chocan entre sí. El ejemplo más representativo del choque entre placas es el efecto producido entre las Indo-australiana y Euroasiática, dando como resultado plegamientos de grandes proporciones que constituyen la cadena montañosa de los Himalaya.
- Transformación o transcurrente: Dos placas se mueven entre sí lateralmente y en dirección contraria, por ejemplo la falla de San Andrés, que afecta a nuestro país en la península y Golfo de Baja California.

La actividad sísmica más frecuente y de mayor magnitud tiene lugar en las fronteras de placa donde éstas se mueven en direcciones encontradas unas a las otras, como ocurre a lo largo de la costa del Pacífico. Como resultado de este movimiento relativo y al comportarse las placas casi como cuerpos rígidos, una de las dos placas se desliza por debajo de la otra. A este proceso se le llama subducción (Ref. 5). Los sismos debidos a este fenómeno representan un gran peligro, ya que se producen con mayor frecuencia y pueden llegar a alcanzar una gran magnitud.

La causa de los movimientos entre las placas aún se desconoce, sin embargo, se establece que son debidos a lentas corrientes de convección las cuales transmiten el calor del interior de la tierra hacia la parte superior de la misma, transportando materiales calientes a profundidades menores y materiales de menor temperatura hacia profundidades mayores. Cada celda de convección arrastraría un segmento de la

superficie haciendo que diferentes placas tengan movimientos a veces encontrados, y que en los bordes de algunas de ellas se esté creando nueva litosfera y en otros destruyendo.

México, incluido su mar territorial está ubicado entre cuatro placas tectónicas, la de Norteamérica que va desde México hasta el Ártico; la del Pacífico, que abarca parte de México, EUA y casi todo el Pacífico Norte; la de Cocos frente a las costas de México y Centroamérica, extendiéndose al sureste de Costa Rica; y por último, la placa de Rivera localizada en la boca del golfo de California, y que finaliza en las inmediaciones del estado de Colima.

Existen dos regiones sísmicas que abarcan importantes zonas del país, la primera se ubica en el extremo norte del Golfo de California, donde la placa del pacífico se mueve horizontalmente hacia el noreste respecto a la placa Norteamericana llevando consigo a la península de Baja California. Su velocidad relativa de deslizamiento es aproximadamente de cinco centímetros por año. La segunda de estas regiones es la zona de subducción de la costa del Pacífico y es directamente responsable de casi toda la actividad sísmica en el centro del país. Está localizada en una franja de más o menos 200 km de ancho y 1500 km de largo que va desde Colima hasta Chiapas. Esta zona es la que ha producido los sismos de mayor magnitud que han afectado a un alto porcentaje de la población del país.

Una de las características de la placa de Cocos a lo largo del Océano Pacífico, es la variación de su ángulo de inclinación en toda la longitud de la trinchera, iniciando con unos 9 grados en Michoacán, 12 cerca de Acapulco, 15 bajo Oaxaca, 35 en Chiapas y finalmente 45 en el área de Tehuantepec. Este cambio de inclinación parece ser la razón por la cual se generan sismos tanto de tipo somero como profundo en las costas del sur de México, así como de la sismicidad en los estados del centro y sur del país.

En el caso del estado de Oaxaca, los grandes sismos son causados por la subducción de las placas de Cocos y de Norteamérica. En esta región el ángulo de buzamiento de la placa de Cocos es aproximadamente de 15 grados, la velocidad relativa con respecto a la Norteamericana es de 6.4 cm/año y su zona de contacto (zona de Benioff), se encuentra a 16 Km de profundidad en una franja de 80 km, dicha profundidad se alcanza casi a 300 Km dentro del continente a partir de la costa, con lo anterior se puede afirmar que la placa de Cocos se sumerge casi horizontalmente en la región de Oaxaca y mantiene su geometría, por lo que no se puede descartar la posibilidad de sismos de gran magnitud en esta zona.

En el estado de Oaxaca también se presentan sismos que no están ligados directamente a movimientos relativos en las fronteras de las placas sino a fallas de tipo normal o inversa (Ref. 6). Los eventos de esta naturaleza son altamente peligrosos en la región epicentral por su poca profundidad (10 a 15 km).

Por otro lado, muchos autores han reconocido que los cortos tiempos de recurrencia (30 a 60 años) observados en la ocurrencia de grandes sismos a lo largo de la zona de subducción mexicana hacen a esta región muy atractiva para la investigación y predicción de sismos. Estos cortos periodos de retorno permiten hacer predicciones y evaluaciones científicas en relativamente poco tiempo; y esto a su vez permite incrementar el entendimiento de los procesos que ocurren en otros límites de placas, donde los intervalos de tiempo de recurrencia son más largos (de 100 a 200 años), y desarrollar programas de mitigación de desastres para áreas específicas dentro de periodos de tiempo socialmente útiles.

Existen tres parámetros necesarios para una exitosa predicción de un sismo en cualquier límite de placa, estos son: localización esperada, tamaño y tiempo de recurrencia de un evento futuro. La hipótesis de los "gaps" o brechas sísmicas, que plantea que los segmentos históricamente activos y que han dado origen a grandes sismos, son las regiones con mayor probabilidad de generar temblores de gran magnitud y sobre todo aquellos que han experimentado un periodo de quietud de la actividad sísmica durante un tiempo relativamente grande. Esta hipótesis ha sido adecuada para establecer la localización y el tamaño de varios sismos que han ocurrido dentro del cinturón circumpacífico, sin embargo la determinación del tiempo esperado de ocurrencia no ha sido posible establecerlo.

En la región costera del estado, de Oaxaca ubicada entre las longitudes 94 W a 98.5 W existe un riesgo sísmico importante por la gran actividad sísmica que se presenta en la zona de subducción, además de la ocurrencia de sismos continente adentro y al riesgo latente que significan las brechas sísmicas.

Considerando la cobertura que ha alcanzado la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RACO) y los estudios complementarios de los tipos de suelo con los que se cuenta, es posible evaluar los efectos locales que se producen en los diferentes sitios donde se tiene instrumentado ante la ocurrencia de un sismo. Dados los resultados que se obtengan se podrán comparar con otros estudios para determinar una zonificación sísmica de la ciudad.

Objetivos y Alcance del trabajo

Considerando la información recabada sobre las características geológicas y geotécnicas en el estado y la ciudad de Oaxaca, la tesis tiene como principal objetivo determinar algunos efectos de sitio observados en suelos de la ciudad de Oaxaca durante la ocurrencia de sismos. En el primer capítulo se describe la geología regional y algunas de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de suelo que se tienen en la ciudad. Posteriormente en el capítulo dos, se describen la red sísmica del estado de Oaxaca y la red acelerográfica en la ciudad, se exponen las consideraciones para su ubicación, diseño y construcción. Y adicionalmente se detallan las características de las estaciones acelerográficas. En el capítulo tres se incluye el procesamiento de los acelerogramas registrados, y los aspectos relevantes para el cálculo de los espectros de Fourier, Respuesta y Funciones de Transferencia. Finalmente, en el capítulo cuatro se incluyen las conclusiones del trabajo.

I. Geología en el estado de Oaxaca

I.1. Aspectos geológicos.

La geología de Oaxaca es muy compleja, debido a los diferentes eventos tectónicos superpuestos que existen en su territorio, dentro del cual afloran diferentes tipos de rocas: metamórficas, sedimentarias marinas y continentales, e ígneas intrusivas y volcánicas. (Fig. I.1).

La historia geológica de la región sucedió en el paleozoico (Ref. 7) con la formación de rocas que posteriormente fueron metamorizadas a consecuencia de un movimiento orogénico que se verificó en este periodo. Después de estos fenómenos el mar volvió a invadir estos terrenos en el Triásico hasta el principio del Terciario, periodo en el que se depositaron una serie de rocas como conglomerados, areniscas, lutitas y calizas que posteriormente fueron metamorizadas 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 capital y que se depositaron a fines del Cretácico y principios del terciario. En el Terciario, a causa del levantamiento orogénico, termina la sedimentación marina y se forman rocas volcánicas como son las tobas andesíticas y los depósitos clásticos continentales depositados 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.

La región no ha sido objeto de ningún estudio detallado de geología estructural. Existen planos generales donde se observan las direcciones de los principales ejes anticlinales de la región (Fig. I.2), de dirección N 20° W y la falla que se encuentra en la Fosa Mesoamericana de dirección aproximada N 70° W. (Ref.8)

De observaciones en el campo se puede decir 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 esta última orogénesis, correspondientes a los levantamientos presentan una dirección N 20° W, misma que se observa en los estratos de areniscas y lutitas que afloran en la porción norte de la ciudad. Además de estos rasgos, se observó que el contacto entre las rocas metamórficas y las areniscas, lutitas, calizas y conglomerados metamorizados, corresponde a una falla de dirección aproximada E-W.

I.2. Marco tectónico.

El evento tectónico más antiguo conocido como Orogenia Oaxaqueña, tuvo como resultado la formación del complejo Oaxaqueño. Actualmente, se cree que las rocas de este complejo forman parte de un cinturón metamórfico que se extiende desde el sureste de Canadá, pasando por los Estados Unidos de América, hasta aflorar en la parte centromeridional del estado de Oaxaca.

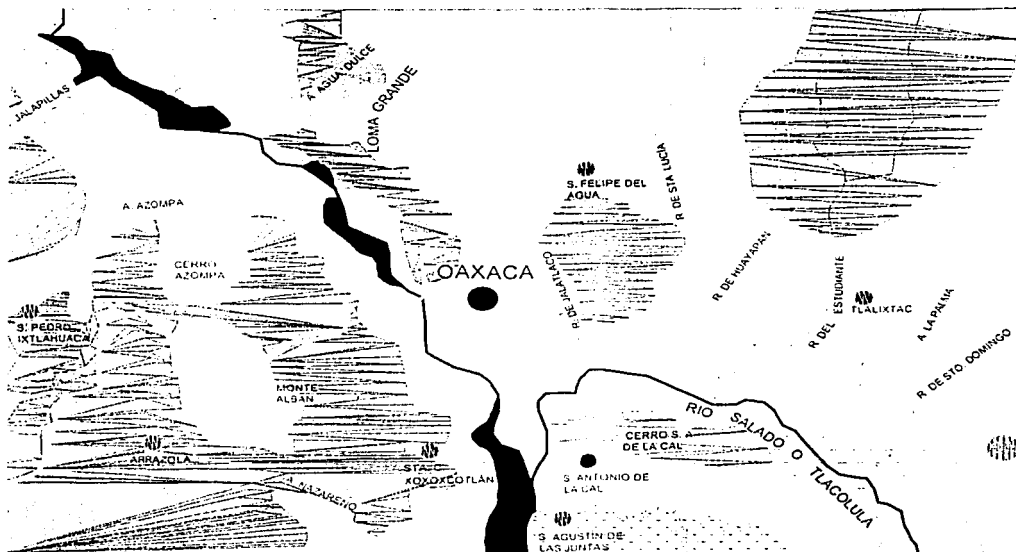


Figura I.1 Geología Regional (Ref. 9).

La secuencia de sedimentos arcilloarenosos depositados directamente sobre el basamento metamórfico precámbrico, afectado por un metamorfismo regional, fue lo que dió lugar a la formación del Complejo Acatlán.

Durante el Triásico la entidad se vió afectada por un episodio de distensión que dió lugar a la formación de depresiones (fosas tectónicas) propiciando así la acumulación de sedimentos continentales (lechos rojos) (Ref. 7).

Como ya se mencionó, la superficie del país fue afectada por la orogenia Laramide y el tectonismo derivado de esta, levantó y comprimió los sedimentos mesozoicos. Además durante esta etapa, los sedimentos alojados en la porción oriental del estado fueron plegados, fallados, ligeramente metamorizados y sepultados; en contraste, los sedimentos cretácicos de los valles únicamente están deformados.

Durante el Eoceno-Oligoceno, la entidad estuvo sujeta a plegamiento y empuje en tres direcciones deformantes; la primera de NW – SE, que dió lugar a los pliegues de los límites con el estado de Puebla, en la región de la Cañada, así como la cabalgadura de Vista Hermosa, la segunda dirección es E – W y está expresada por pliegues recostados en el área de Zapotitlán Salina y Miahuatepec, y finalmente la dirección N – S que se expresa en los pliegues de Cipiapa. Estos tres sistemas de empuje, al actuar

Capítulo I

conjuntamente produjeron, además, la zona de fallas de Agua del Burro, en los límites con el estado de Veracruz.

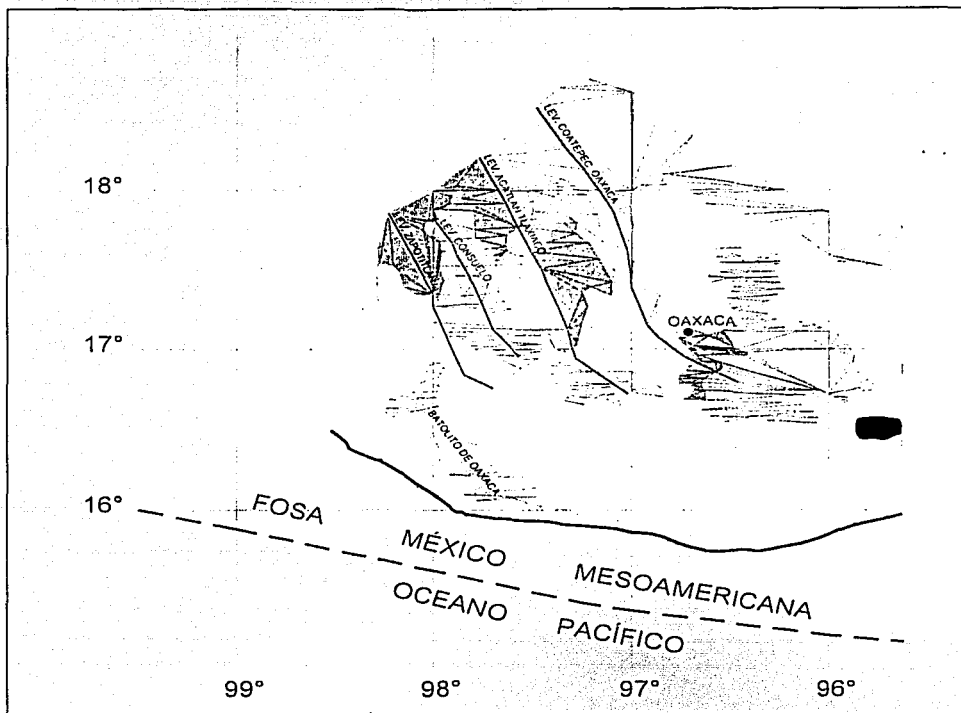


Figura I.2 Geología Estructural de la Región de Oaxaca (Ref. 8).

Como consecuencia del levantamiento, se inicia una etapa de erosión dando lugar a depósitos conglomeráticos.

Finalmente, en el Terciario superior se presenta una actividad tectónica tensional, con la formación de grandes fallas normales, como las denominadas Oaxaca y Donají, ambas tuvieron actividad sincrónica durante el Cenozoico. La falla de Oaxaca se extiende desde Tehuacan, Puebla, hasta la Ciudad de Oaxaca, donde se intercepta con la falla de Donají, de dirección oriente-poniente. Esta actividad tectónica fue seguida por una intensa actividad volcánica asociada a zonas de debilidad. La figura I.3 muestra los elementos tectónicos principales del territorio oaxaqueño.

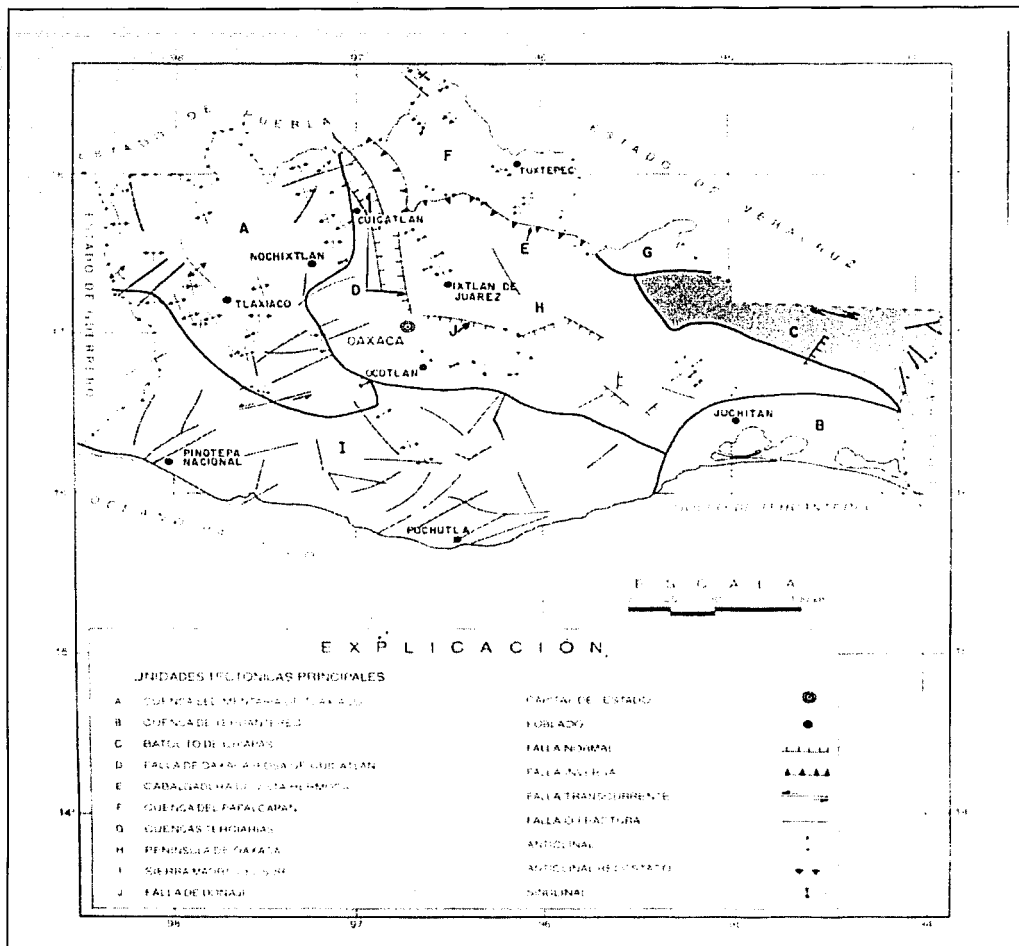


Figura I.3 Mapa tectónico del Estado de Oaxaca (Ref. 7).

I.3. El valle de Oaxaca.

I.3.1. Fisiografía.

La ciudad de Oaxaca está localizada en la subprovincia fisiográfica del valle de Oaxaca, ubicada en la provincia de la Sierra madre del Sur, que se extiende al sur del eje Neovolcánico hasta el Istmo de Tehuantepec.

El valle de Oaxaca se ubica a una altura de unos 1,500 m sobre el nivel del mar y está drenado por el río Atoyac, mismo que desemboca en el océano Pacífico con el nombre de río Verde.

Morfológicamente, en el área de la ciudad se pueden diferenciar cuatro zonas:

- a) Alta. En la que existen afloramientos de rocas metamórficas y sedimentarias (calizas) que presentan pendientes pronunciadas.
- b) De pendientes. Las cuales son poco pronunciadas y en ellas se presentan superficialmente depósitos derivados de la alteración de la roca.
- c) Intermedia. De pendientes suaves donde afloran depósitos clásticos o tobas andesíticas. Zona colonial de la ciudad de Oaxaca.
- d) Baja. Se encuentra sobre materiales aluviales que constituyen los rellenos del valle de Oaxaca.

La transición entre las zonas anteriores es generalmente gradual (Fig. I.4)

I.3.2. Estratigrafía.

En la región afloran rocas de diferente *litología* cuya edad varía desde el Paleozoico hasta el Cuaternario (Fig. I.1) La sucesión estratigráfica y la litología de las formaciones en el área de la ciudad de Oaxaca, se describen a continuación:

- a) Rocas metamórficas. En la parte oeste de la ciudad, en la zona de los cerros de Monte Albán y al pie del Cerro del Fortín, afloran rocas metamórficas del Paleozoico. Superficialmente, estas rocas presentan un alto grado de intemperización, dando lugar a un suelo limo-arenoso de tono amarillento. En esta formación, que presenta una coloración café clara, prácticamente no existe desarrollo urbano, a excepción de la franja que se ubica en la parte baja del Cerro del Fortín.
- b) Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfizados. Sobreyaciendo las rocas paleozoicas, se encuentra una serie de rocas metamorfizadas que se originaron a partir de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados. El contacto entre la formación paleozoica y estos materiales está indicado por una falla en la dirección E-W. Dentro de la formación predominan los conglomerados que presentan un grano fino y una fuerte silicificación. La coloración de esta formación es muy 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. Sobre estos materiales no existe prácticamente desarrollo urbano.

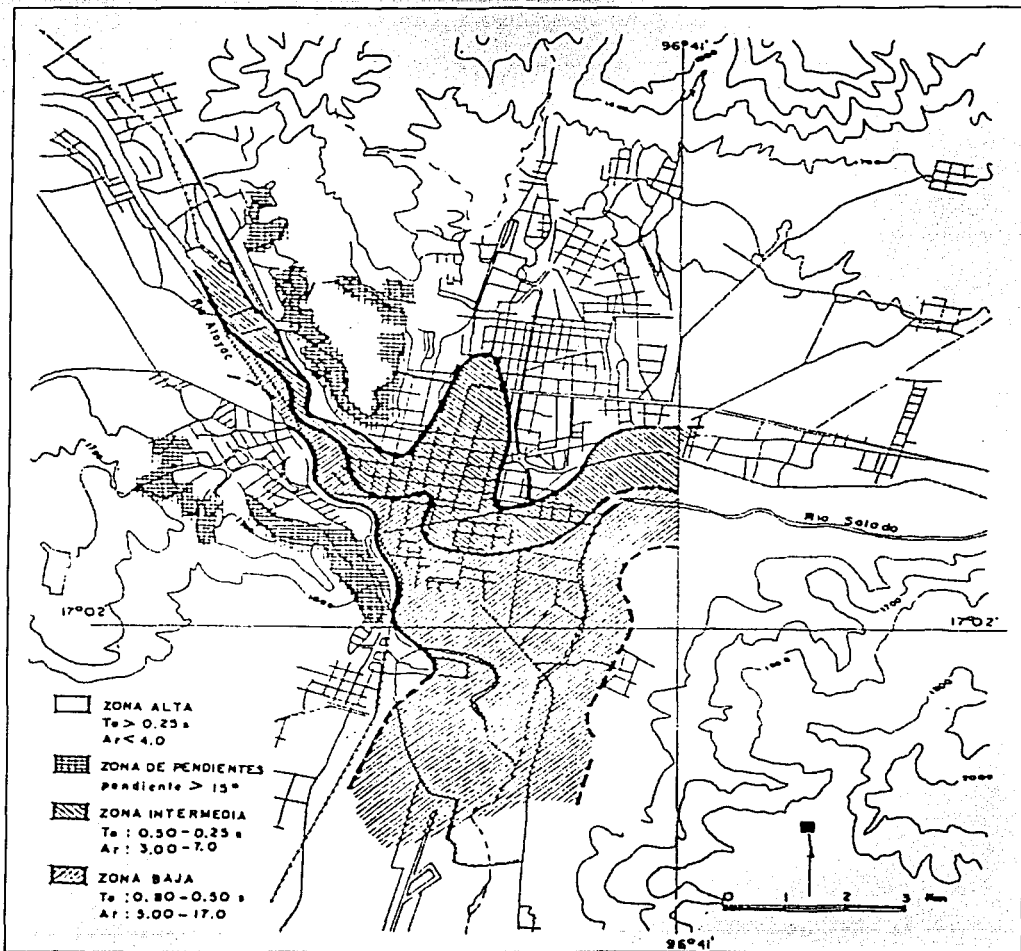


Figura I.4 Morfología de la Ciudad de Oaxaca (Ref. 9).

- c) Areniscas y lutitas. Sobreyaciendo las rocas anteriormente descritas se encuentra una sucesión de capas constituidas por areniscas y lutitas del Terciario. Estas rocas presentan un color café amarillento y están recubiertas parcialmente por una capa de materiales intemperizados del mismo color. Las areniscas se forman en estratos de 50 cm a 1 m de espesor mientras que las lutitas se presentan en capas delgadas. Estas rocas presentan una inclinación variable entre 30° y 45° hacia el Noroeste mientras que su dirección es de N 20° W, habiéndose observado sin embargo algunas pequeñas variaciones en la dirección de las capas. Sobre estas rocas se ha desarrollado parte de la ciudad de Oaxaca en la zona NW.
- d) Tobas andesíticas. En la porción noreste de la ciudad se observa una toba andesítica del terciario de color verde claro explotada en la zona como piedra para cantera. Esta roca sobreyace la formación antes descrita y está parcialmente recubierta por depósitos clásticos continentales, razón por la cual no siempre es posible definir con exactitud su límite de afloramiento. Sobre estos materiales se ha desarrollado una pequeña porción de la ciudad.
- e) Depósitos Clásticos Continentales. Entre fines del Terciario y principios del Cuaternario, se manifiesta en el área una fuerte erosión que dió lugar a la sedimentación de depósitos clásticos. Estos materiales están constituidos en su parte superior por limos arenosos de color café rojizo mientras que a mayor profundidad, como fue posible observar en una noria que se encuentra en los terrenos del INFONAVIT y en las proximidades del pueblo de San Felipe del Agua, el material está constituido por grava compactada dentro de una escasa matriz arenosa. Sobre estos materiales se ha desarrollado la parte colonial de la ciudad de Oaxaca.
- f) Depósitos Aluviales. En la parte baja de la ciudad, en terrenos dedicados a la agricultura, se encuentran limos y arenas sueltas del Cuaternario que provienen de los aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales, que en gran parte se localizan a lo largo del río Atoyac, son objeto de explotación de agua subterránea y, según información obtenida en las oficinas de la SARH, presentan un espesor promedio de 30 m. En los pozos excavados al Sureste de la ciudad se observan espesores mayores del aluvión, por lo que se cree que atraviesan los depósitos clásticos continentales anteriormente descritos.
- g) Depósitos de abanico aluvial. 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. Estos depósitos tienen importancia desde el punto de vista de peligrosidad sísmica ya que en ellos existen construcciones susceptibles de sufrir fuertes deformaciones y desplomes, por estar sobre un material no consolidado.

1.3.3. Hidrografía de la Ciudad de Oaxaca.

La ciudad de Oaxaca se encuentra drenada por los ríos Atoyac, Jalatlaco, Donaji, Salado y Chiquito; sin embargo los tres primeros ríos son los más importantes en cuanto a la

peligrosidad sísmica por que cruzan a la ciudad, lo que provoca un cambio estratigráfico, así como variaciones de su cause a lo largo de un tiempo. Los daños provocados por el terremoto del 15 de enero de 1931, se concentraron al lo largo de la calle del progreso (actualmente Av. Juárez); y una posible causa es que el lecho del río Jalatlaco pasaba por esta calle (Ref. 9)

I.4. Tipos de suelo en la ciudad de Oaxaca.

I.4.1. Exploración del subsuelo.

De la exploración del subsuelo con métodos directos se obtuvieron datos de 11 estudios de mecánica de suelos efectuados en esta ciudad, se analizaron 23 sondeos y 26 pozos a cielo abierto (Fig. I.5) Cinco de los pozos tienen una profundidad mayor de 15 m, con información estratigráfica, contenido de agua y número de golpes en prueba de penetración estándar. En la tabla 1 se indican todos los estudios recopilados, así como su localización, la empresa que los facilitó y los datos generales del subsuelo del lugar.

Respecto al comportamiento de las estructuras ante los sismos, se pudo saber que la zona en que existen aluviones recientes (del río Atoyac) ha sido siempre la más afectada; en particular, se sabe que en diversas partes del cause del río Atoyac, entre la colonia Alemán y la salida a México, se tiene un espesor de aluvión de 30 m aproximadamente.

En las figuras I.6 y I.7 se muestran los perfiles estratigráficos de algunos de los estudios obtenidos. Los resultados obtenidos concuerdan con la distribución geológica de la figura I.5, excepto los estudios 4 y 10 que caen dentro de la zona correspondiente a areniscas y lutitas. En dichos estudios se reportan tobas y granitos alterados, pero se piensa que los materiales corresponden a las areniscas de esa zona.

I.4.2. Propiedades de los suelos:

En las tablas 1 y 2 se presentan propiedades índice y mecánicas respectivamente.

Propiedades índice.

Contenido de agua natural. Los materiales que corresponden a los depósitos aluviales del cuaternario (arenas y gravas), tienen un contenido de agua que varía de 4 a 38 %. Los materiales de los depósitos clásticos continentales (limos, arenas y gravas) así como las areniscas y lutitas intemperizadas superficialmente muestran una variación de 5 a 55 %; los valores más bajos (menores que 10) corresponden a las partes arenosas.

Densidad de sólidos. La variación encontrada en todos los materiales es de 2.59 a 2.79 (gm/cm³) con un valor excepcional de 2.86.(gm/cm³)

Límites de plasticidad. El límite líquido de todos los materiales varía entre 22 y 74 %. En los materiales aluviales, los valores reportados corresponden a las partes limo- arenosas. El índice de plasticidad de todos los materiales varía entre 8 y 50 %.

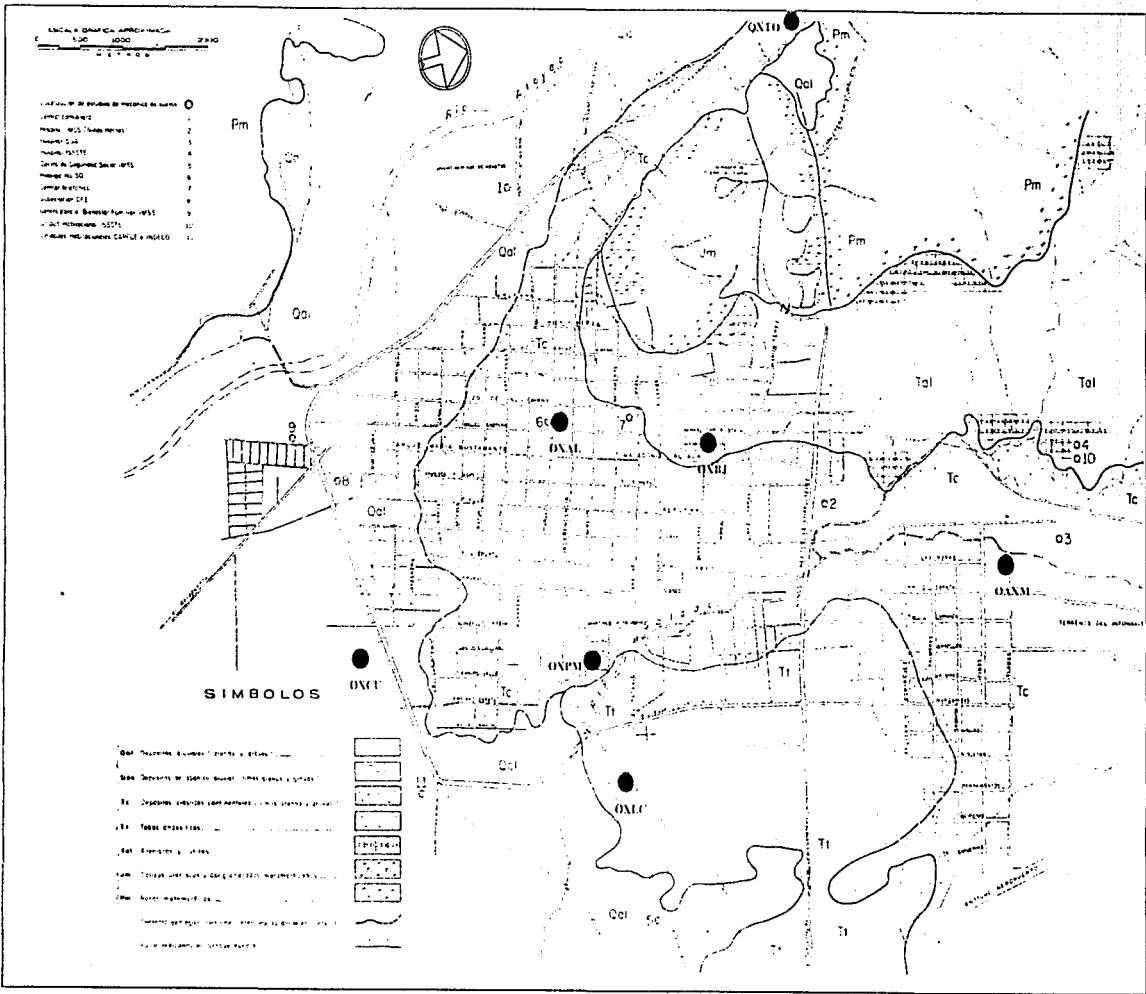


Figura 1.5 Localización de estudios de mecánica de suelos (Ref.9)

12

Número de golpes en prueba de penetración estándar. Los materiales aluviales tienen una variación entre 4 y 30 golpes para penetrar 30 cm. En el estudio 1 se observa que a partir de 12 m de profundidad este número aumenta considerablemente. Los materiales de los depósitos clásticos continentales muestran una variación de 10 a 42 golpes, excepto en la parte superficial del lugar correspondiente al estudio 7 en donde se encuentran rellenos muy sueltos con un número de golpes menor que 4.

a) Propiedades mecánicas.

Resistencia a la compresión sin confinar. Se obtuvieron pocos datos. La variación fue de 0.6 a 0.8 (kg / cm²).

Angulo de fricción. Todas las pruebas triaxiales efectuadas en el estudio 11 fueron no consolidadas no drenadas; sin embargo, el ángulo de fricción varió entre 2° y 12.5°. Esto se debe, muy probablemente, a los grados de saturación tan bajos que se obtuvieron. En las pruebas consolidada no drenadas realizadas, el ángulo de fricción varió entre 17.5° y 25°.

Cohesión. Las pruebas triaxiales de las cuales se determinó la cohesión son las mismas anteriores; se obtuvo una variación entre 0.2 y 0.45 (kg / cm²), excepto en un caso en que se alcanzó un valor de 1.10 (kg / cm²) en prueba no consolidada no drenada.

Estudio	Localización	Tipo de sondeo	Prof. (m)	S _s	ω (%)	e	ω _L (%)	I _p (%)	N	Clasificación (SUCS)	NF (m)	Realizado por
1	Prolongación V. Trujano Río Atoyac y Calle Las Flores Central Camionera	1S 3P	16.8 2.8 - 3.6	2.66 2.69	2.56 8.35	0.76 1.06	34.58	20.25	5-43 +50 a 14 m	SP-SM y SM-GP	2.7-3.75	Solum
2	Niños Heroes y Porfirio Díaz Hospital IMSS	3P	1.2-3.0	2.77	22.30	0.88	37.53	6.38	---	ML-CL, CH care rojizo	--	S&O
3	Entre Porfirio Díaz y Emiliano Zapata Hospital SSA	6S 4P	15.9-15.8 5.0	2.55 2.75	3.30 3.20	0.6-1.3	--	--	6-55	Arcilla limosa con arena y grava	13.3	Solum
4	Camino Nacional Oaxaca Hospital ISSSTE	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	Ingeniería Experimental
5	Camino Nacional y Oriente 5 Centro de Seguridad Social IMSS	2S 1P	11.20 1.5	5.58 2.62	31.35 26	0.91 0.97 0.86	49.84 74	23.57 49	8-40	Releno y arcilla A 5 m de profund se encontró toba en un sondeo	3.5	Solum
6	Av. Hidalgo No. 50 y B García Vigil	2S	5.9	2.73	7.25	--	--	--	---	Arcilla limosa y grava	--	ICA
7	B. García Vigil y Porfirio Díaz Central telefonica	2S	3.5-4	--	--	--	--	--	3-17	Arcilla arenosa y refino	--	Ingeniería experimental
8	Calle J. Pardo y Armenta y Lorenz Subestación CFE	3P	3.2 3.2 3.7	2.81 2.74 2.79	23.32 19.31 18.35	0.74 0.79	34.45 34.45 46.52	156-25 16-25 24-30	--	Arcilla limo-arenosa	3-3.30	CFE
9	Vicente Guerrero y Parque de Bienstar Centro para Bienestar Familiar IMSS	8S 3P	8.2-12.9 0.9-1.5	2.74 2.69	4.39 12.36	--	25.42 39.49	8-20 17-26	2-45	Arena con poco limo y grava	0.6-1.55	Solum
10	Arroyo del Cartaron y Camino a Microondas Unidad Habitacional ISSSTE	6P	1.85-2.4	--	--	--	--	--	---	Arcilla amarilla con poca arena (granito alterado)	--	--
11	Plán de Ayala y 5 de Febrero Unidad Habitacional CAPFCE	2S	11.20 19.80	--	15.48	--	25.78	10.56	5-50	Arcilla arenosa con poco limo y poca grava Entre 5 y 10 m se encontró una capa de arcilla de alta plasticidad con vetas de materia orgánica	0.45-0.97	--

Notaciones:

S	sondeos	ω _L	limite liquido
P	pozos a cielo abierto	I _p	indice de plasticidad
Prof.	Profundidad	N	número de golpes para penetrar 30 cm
S _s	densidad de sólidos	NF	nivel freático
ω	contenido de agua natural	SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Tabla 1. Propiedades Índice.

Estudio	Tipo de sondeo	Prof. (m)	q_u (Kg/c m ²)	c (Kg/c m ²)	ϕ^*	e_i	ω_i (%)	Clasificación (sucs)	Observaciones
1	PCA-3	0.13	0.93	0.20	25°	0.78-0.85	15.5-19.2	Arcilla limo y arena	Prueba consolidada no drenada
	PCA-1	2.3	2.3	--	--	--	--	Arcilla limosa	Nota 1
2	PCA-1	1.2	1.2	--	--	--	--	Limo arcilloso café rojizo	Prueba de consolidación $0.05 > a_v > 0.022$ cm ² /kg para $0.4 < \sigma_v < 3.0$ kg/cm ² $w_L = 32\%$, $w_p = 25\%$
	PCA-2	2.0	2.0	--	--	0.88	27.8	Limo arcilloso café rojizo	
3	Pozo D	2.50	--	0.38	24°	1.08-1.16	10.1-11.2	Arcilla poco limosa con muy poca arena café	Prueba consolidada no drenada
		3.70	--	1.10	17.5°	0.67-0.72	12.7-13.1	Arena poco limosa con pocas granos café amantillado	Prueba consolidada no drenada
5	S.M-2	3.20	--	0.12	19°	0.67-0.70	32.5-33.8	Arcilla con ramillas y poca arena fina	Prueba consolidada no drenada
	PCA-1	1.50	--	--	--	0.88	24.3	Arcilla (CH)	Prueba de consolidación $a_v = 0.03$ cm ² /kg para $\sigma_v = 0.4$ kg/cm ² $w_L = 74\%$, $w_p = 24\%$
	S.M-1	8.70	--	--	--	0.94	33.4	Arcilla (CH)	Prueba de consolidación $0.058 > a_v > 0.035$ cm ² /kg para $0.4 < \sigma_v < 1.5$ kg/cm ² $w_L = 64\%$, $w_p = 25\%$
	S.M-2	2.50	--	--	--	0.97	35.9	Arcilla (CL)	Prueba de consolidación $0.13 > a_v > 0.027$ cm ² /kg para $0.4 < \sigma_v < 3$ kg/cm ² $w_L = 48\%$, $w_p = 20\%$
		5.77	--	--	--	0.81	32.0	Arcilla (CH)	$a_v = 0.04$ cm ² /kg $w_L = 84\%$, $w_p = 26\%$
11	Obra CAPUFE	2.05-2.50	--	0.30	2°	0.72	27.29	Arcilla arenosa	Prueba no consolidada no drenada
		2.50-3.93	--	0.29	3°	0.74-1.01	30-39	Arcilla café	Prueba no consolidada no drenada
		3.85-4.15	--	0.15	8°	0.56-0.70	24-27	Arcilla gris	Prueba no consolidada no drenada
		5.65-6.53	--	0.35	1.5°	0.93-0.97	37-39	Arcilla gris	Prueba no consolidada no drenada
		6.60-7.48	--	0.35	2°	0.93-1.01	40-42	Arcilla gris	Prueba no consolidada no drenada
		7.60-9.50	--	0.31	6°	1.00-1.39	42-51	Arcilla café oscuro	Prueba no consolidada no drenada
		10.8-11.4	--	0.45	21.5°	0.81-0.94	32	Arcilla arenosa	Prueba no consolidada no drenada
	Obra I.R.D.E.C.U.	2.0-2.5	--	0.40	5.5°	0.74-0.94	29-32	Arcilla arenosa café	Prueba no consolidada no drenada
		3.8-4.7	--	0.27	4°	0.73-0.77	29	Arcilla limosa	Prueba no consolidada no drenada
		4.8-5.6	--	0.15	8°	0.78-1.03	32-40	Arcilla poco limosa	Prueba no consolidada no drenada
		5.9-6.0	--	0.21	9.5°	0.71-0.79	28-30	Arcilla limosa	Prueba no consolidada no drenada

Nota 1. Descripción deducida del perfil estratigráfico correspondiente.

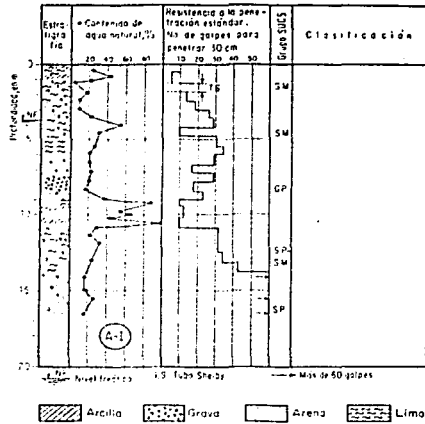
Prof. Profundidad
S sondeo
 q_u resistencia a la compresión sin confinar
c cohesión
 a_v coeficiente de compresibilidad
 σ_v esfuerzo normal aplicado.

ϕ ángulo de fricción interna
 e_i relación de vacíos inicial
 ω_i contenido de agua inicial
 w_L límite líquido
 w_p límite plástico

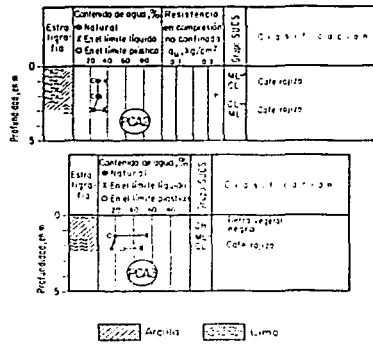
Tabla 2.

Propiedades mecánicas.

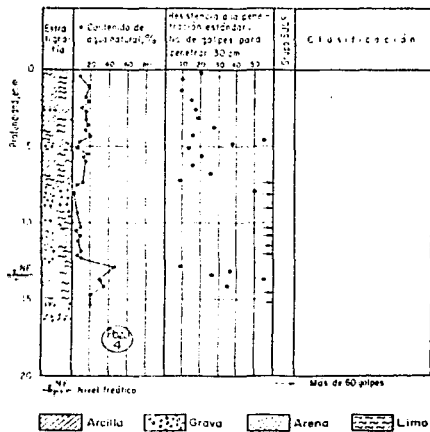
Capítulo I



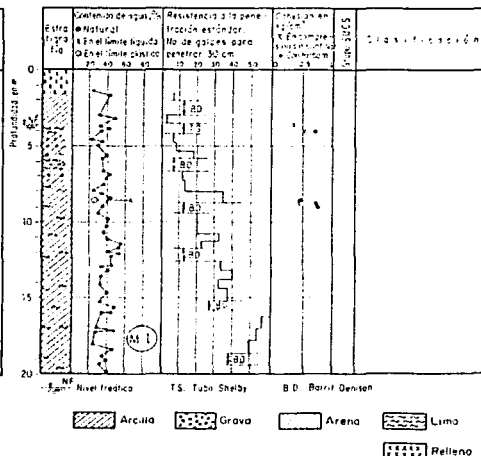
(a)



(b)



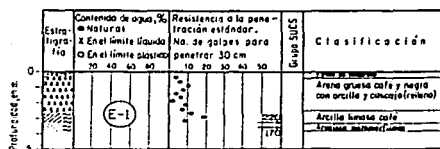
(c)



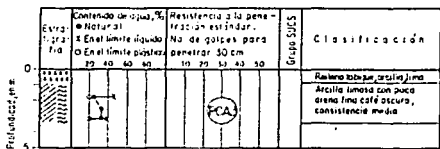
(d)

Figura 1.6 a) Perfil estratigráfico. Estudio 1. Central Camionera (Ref. 9).
 b) Perfiles estratigráficos. Estudio 2. Hospital IMSS (Ref. 9).
 c) Perfil estratigráfico. Estudio 3. Hospital SSA (Ref. 9).
 d) Perfil estratigráfico. Estudio 5. Centro de Seguridad Social (Ref. 9).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

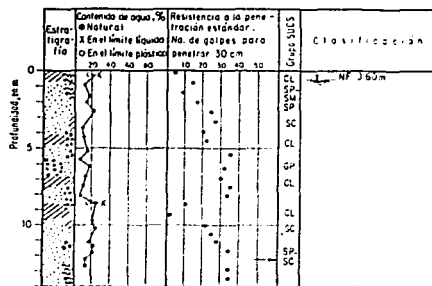


(e)



(f)

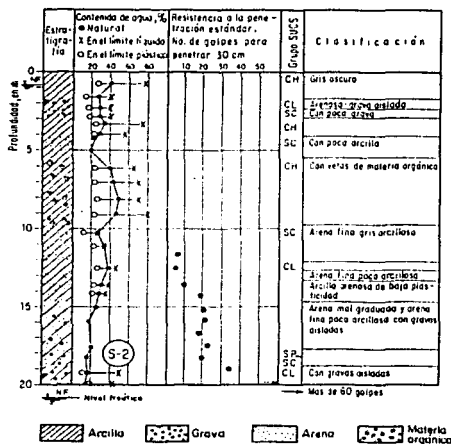
Arcilla
 Retieno
 Arena
 Limo



NE Nivel freático

Arcilla
 Grava
 Arena
 Limo
 Materia orgánica

(g)



Arcilla
 Grava
 Arena
 Materia orgánica

(h)

Figura 1.6

- e) Perfil estratigráfico. Estudio 7. Central Telefónica (Ref. 9).
- f) Perfil estratigráfico. Estudio 8. Subestación CFE (Ref. 9).
- g) Perfil estratigráfico. Estudio 9. Centro para el Bienestar Familiar IMSS (Ref.9).
- h) Perfil estratigráfico. Estudio 11. Unidad Habitacional CAPFCE (Ref. 9).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo II

La Red Acelerográfica en la ciudad de Oaxaca

II. La Red Acelerográfica en la ciudad de Oaxaca.

A finales del siglo XIX y a principios del XX, se establecieron estaciones sísmicas con diferentes tipos de aparatos con el objetivo de registrar la actividad sísmica en el mundo. En México, la instrumentación para el registro de temblores se remonta a la última década del siglo XIX y su aplicación dentro del campo de la ingeniería sísmica se inicia en 1960, debido sobre todo a los graves daños producidos por el sismo del Ángel ocurrido en el año de 1957 (Ref. 10), que hicieron evidente la falta de instrumentos para registrar temblores de gran magnitud. Seguido de lo anterior, la instrumentación sísmica se incrementó dado al interés que este tipo de eventos despertó en el ámbito de la ingeniería civil.

Los sismos pueden registrarse de diversas maneras para ello se han desarrollado aparatos para registrar los movimientos del suelo y se han propuesto escalas de intensidad para comparar sus efectos destructivos o escalas de magnitud para estimar su tamaño. Para medir los movimientos producidos por un sismo se pueden usar distintos tipos de aparatos, que principalmente son los *sismógrafos* y *acelerógrafos* (Ref. 11). Los primeros se caracterizan por su alta sensibilidad (Fig. II.1) que les permite captar y amplificar cientos de miles de veces las vibraciones del suelo. A los registros obtenidos con estos equipos se les conoce como *sismogramas*. En ciertos casos su gran sensibilidad impide que se registren totalmente las amplitudes del movimiento que se origine cerca del aparato. Estos aparatos tienen un sistema de registro continuo durante las 24 horas del día para captar cualquier movimiento lejano que ocurra. Por otro lado, los *acelerógrafos*, como su nombre lo indica, miden las aceleraciones del terreno durante temblores, operan mediante el mismo principio que los *sismógrafos*, sin embargo presentan ciertas diferencias. Sus características dinámicas son tales que son más sensibles a los cambios de aceleración que a los cambios de desplazamiento del suelo, su amplificación es menor por lo que logran captar por completo un temblor fuerte y en general no operan las 24 horas del día, sino que cuentan con dispositivos especiales de arranque que los activan cuando el movimiento del terreno llega a un cierto nivel de amplitud.

La información obtenida de la instrumentación para el registro de movimientos fuertes, es fundamental para la investigación en ingeniería sísmica, sismología, diseño sismorresistente, procesamiento sísmico, estudios de la estructura interna de la tierra, etc. Con base en las investigaciones que se derivan a partir de los *acelerogramas* se ha logrado disminuir los daños

Capítulo II

producidos por los sismos, ya que con los resultados obtenidos se han modificado y creado nuevos criterios que mejoran la práctica de la ingeniería civil, así como la normatividad en la construcción y uso de suelo.

Hoy en día, se cuenta con redes acelerográficas en las principales regiones sísmicas del país, teniendo una mayor concentración en la zona de subducción del Pacífico, en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco y Colima, así como en la parte norte de la península de Baja California en donde se monitorea la actividad de la falla de San Andrés. Un número importante de estas estaciones (Ref. 12) se ubican en las ciudades de Acapulco, Guadalajara, México, Oaxaca y Puebla, y en trayectorias que van de la costa del Pacífico hacia los valles de Oaxaca, Puebla y México (Fig. II.2)

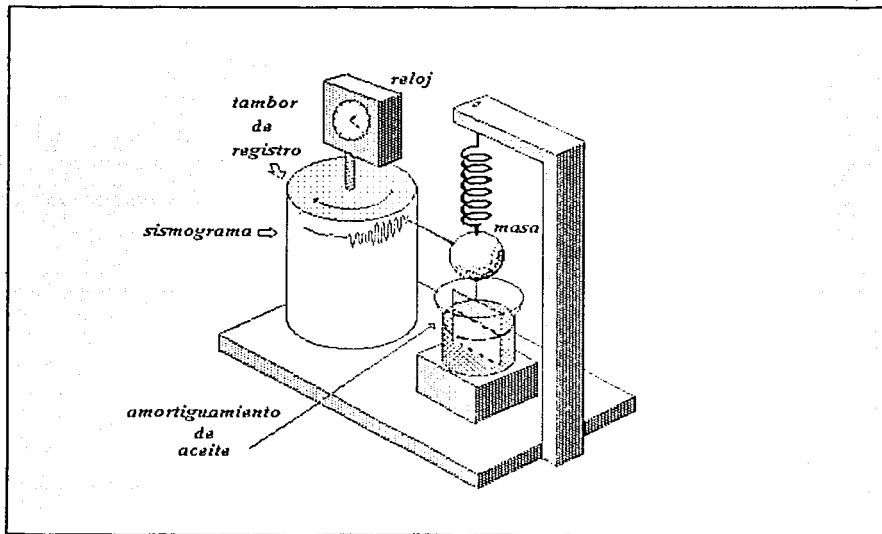


Figura II.1 Principio básico de operación y registro de un sismógrafo (Ref. 11).

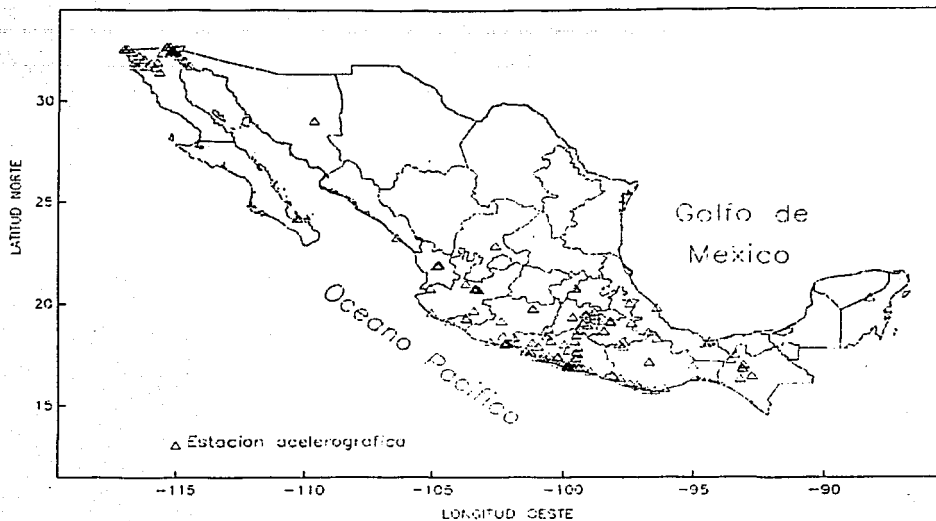


Figura II.2 Estaciones acelerográficas instaladas en México (Ref. 12).

II.1. Red sísmica del estado de Oaxaca

Entre los años de 1910 y 1923 da inicio la instrumentación sísmica en el estado de Oaxaca (Ref. 13), cuando el Servicio Sismológico Nacional (SSN) instala 9 estaciones sismológicas en el país, ubicándolas en las ciudades de: México, Chihuahua, Monterrey, Guadalajara, Veracruz, Mérida, Zacatecas y Oaxaca. Sin embargo es hasta el año de 1970 cuando el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Idel), instala una estación acelerográfica en la Facultad de Medicina de la Universidad de Oaxaca, con el objetivo de registrar movimientos fuertes que en ocasiones no podían ser captados íntegramente por los sismógrafos. En 1979 se instala una estación en Puerto Escondido (PESC) dando inicio a la instrumentación en la franja costera de Oaxaca. Posteriormente, en 1985 se instaló también una estación en Pinotepa Nacional (PNTP) y el Instituto de Geofísica de la UNAM puso en operación, como parte de la red sismológica

Capítulo II

nacional, dos estaciones en roca localizadas en Huatulco y Pinotepa Nacional. No obstante lo anterior, seguía existiendo una franja costera que no estaba monitoreada y en la que se ubica la denominada zona centro de Oaxaca (97.3° a 97.7°) que puede dar origen a sismos de gran intensidad.

Por lo anterior se decidió ejecutar el proyecto de instalación de la red acelerográfica en el estado de Oaxaca, el cual cubre la zona costera de Huatulco (Oaxaca) a Ometepec (Guerrero), así como una línea de atenuación hacia la ciudad de Oaxaca (Ref. 14), que se prolonga hasta la ciudad de Puebla.

Las estaciones que configuran la Red de la Costa de Oaxaca (RAO) son: Huatulco (HUIG), Puerto Ángel (PANG), Las Negras (LANE), Río Grande (RIOG), Jamiltepec (JAMI), Pinotepa Nacional suelo (PNTP), Pinotepa Nacional roca (PNIG) y Ometepec (OMTP). La instrumentación de la RAO permitirá establecer la forma en que el movimiento sísmico se atenúa cuando se propaga en dirección paralela a la costa. (Tabla II.1)

La selección de los sitios de la RAO se basó principalmente en la calidad de la roca, en la seguridad del sitio y en la facilidad de acceso, todo ello con la finalidad de garantizar un monitoreo permanente.

Una vez generado un movimiento sísmico, es importante determinar la forma en la que las ondas se atenúan al propagarse continente adentro y la posterior amplificación de las mismas cuando se filtran en los diferentes estratos del suelo y arriban a la superficie. Para lograr lo anterior, se implementó una línea imaginaria que inicia en Puerto Ángel y se dirige hacia las ciudades de Oaxaca y Puebla (Tabla II.2), en este trayecto se instalaron estaciones acelerográficas en roca, en las poblaciones de Puerto Ángel (PANG), Tamazulapan (TAMA), San Martín Los Canseco (SMLC), Ciudad de Las Canteras (OXLC), Chila de las Flores (CHFL), Raboso (RABO) y Ciudad Serdán (CSER); las tres últimas localizadas en el estado de Puebla y las restantes en Oaxaca.

Además del Idel existen otras instituciones que cuentan con equipos de registro de temblores en el estado y que contribuyen a recabar información importante, para fines de Ingeniería Civil,

entre ellas están: el Instituto de Geofísica de la UNAM, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) (Fig. II.3).

II.2. Red acelerográfica en la ciudad de Oaxaca

A lo largo de su historia la ciudad de Oaxaca se ha visto afectada por eventos sísmicos generados tanto en la zona de subducción mexicana como continente adentro (Ref. 15), tal es el caso de los temblores de 1931 ($M=7.8$), 1980 ($M_w=7.0$) y recientemente los del 15 de Junio ($M_w=7.0$) y 30 de Septiembre ($M=7.5$) ambos en 1999. Sin embargo, poco se conoce acerca de la respuesta sísmica del subsuelo de la ciudad de Oaxaca, y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos. Por lo que, con el objetivo de estudiar estos aspectos, se instaló la Red de Acelerógrafos en esa ciudad. Estos trabajos de instrumentación complementados con la instalación de la RAO y la línea de atenuación de Puerto Ángel servirán para investigar la forma en que las ondas sísmicas se propagan tanto a lo largo de la costa como continente adentro, y el efecto de atenuación que éstas sufren cuando lo hacen en ambas direcciones. Además, con la red sísmica en la ciudad de Oaxaca, se podrá evaluar la amplitud del movimiento en un sitio de referencia en roca, así como el nivel de amplificación que la señal sufre al filtrarse en los diferentes depósitos de suelo.

II.2.1. La Red Local.

Pese a que aún no se pensaba en una instrumentación sísmica local, en 1970 se instaló en la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma Benito Juárez de la ciudad de Oaxaca, la estación OAXM, iniciando su operación con un equipo del tipo SMA-1 el cual fue sustituido posteriormente por un acelerógrafo del tipo DCA-333 que opera hasta la fecha. Posteriormente, en 1998 se instala la estación OXLC en la ciudad de las Canteras, construida sobre un afloramiento de cantera, y cuyos registros serán vitales para los estudios de amplificación de los depósitos de suelo. En 1999, el Idel instaló 5 estaciones acelerográficas en diferentes tipos de suelo dentro de la ciudad la selección de los sitios se realizó considerando la zonificación preliminar establecida para el valle de Oaxaca en 1991 (Ref. 16), en esta se tomó en cuenta la formación geotécnica disponible y un estudio de amplificación relativa de vibración ambiental, lo

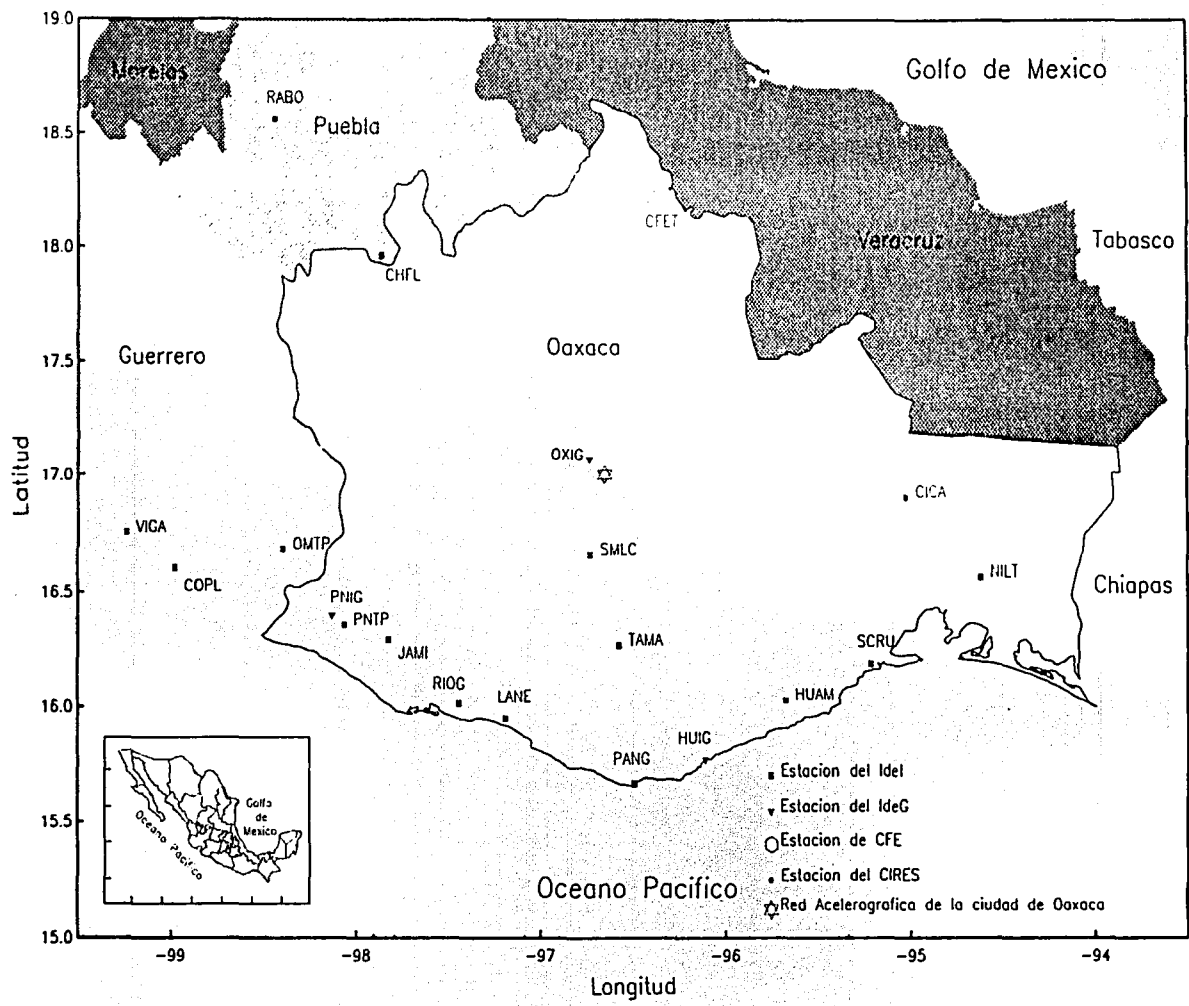


Fig. II.3 Instrumentación sísmica en el estado de Oaxaca (Ref.14).

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

que permitió definir curvas de isoperiodos, niveles de amplificación relativa y un mapa de microzonificación sísmica.

Una visión general de la ubicación de las estaciones acelerográficas se presenta en la figura II.4. las que se localizan en: las instalaciones de la División de Ciencias de la Tierra del Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO); en el jardín de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma Benito Juárez (OXCU), tres más en la zona histórica de la ciudad, en las escuelas primarias Mugica (OXPM) y Benito Juárez (OXBJ), y finalmente en la Alameda de León frente a la Catedral de Oaxaca (OXAL). En la Tabla 3, se incluye información relevante relacionada con la ubicación de las estaciones.

II.3. Características de las estaciones acelerográficas.

El arreglo de las estaciones se determinó bajo la consideración de los siguientes criterios:

- Alcanzar una cobertura general de una zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad.
- Instrumentar sitios con diferentes condiciones de subsuelo.
- Contar con una referencia en roca.

Dado que la instalación de una estación sísmica se planea para que opere por tiempo indefinido, fueron consideradas localidades apropiadas que brinden seguridad y que ofrezcan libre acceso para la recolección de datos. También, debe procurarse la mejor protección contra la intemperie y el fácil acceso a la acometida de corriente eléctrica. Por lo anterior se han preferido áreas dentro de algún parque, escuela u oficina que brinden las ventajas antes descritas.

Una vez determinado el sitio, se realizan pruebas de ruido sísmico para detectar probables fuentes de perturbación que originen falsas activaciones de los acelerógrafos, las cuales pueden saturar su capacidad de almacenamiento e introducir alteraciones relevantes en los registros. Las pruebas se realizan colocando un equipo acelerográfico en el punto previamente seleccionado y se opera a diferentes niveles de activación durante un cierto período. Los registros obtenidos se analizan y si las perturbaciones locales son excesivas (por ejemplo mayor a 4 gal) el lugar puede ser descartado. La figura II.4 muestra la distribución de las siete

estaciones de la RACO en la ciudad y la figura II.5 muestra su ubicación de acuerdo a las zonas de isoperiodos establecidas. Finalmente en las figuras II.6 a II.12 se presenta la localización de cada estación.

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		TIPO DE SUELO	EQUIPO (N/S)	LOCALIZACIÓN
		LAT. N	LONG. W			
OAXACA FAC. DE MEDICINA	OAXM	17.084	96.710	Aluvial	DCA-333 (122)	Fuente de las siete regiones a 2 km del centro de Oaxaca
OAXACA LAS CANTERAS	OXLC	17.060	96.700	Roca. Cantera	ETNA (1328)	Parque de las canteras, junto al estadio de fútbol
OAXACA PRIMARIA MUGICA	OXPM	17.061	96.717	Roca	ETNA (1917)	Instalaciones de la escuela primaria Mugica
OAXACA PRIMARIA BENITO JUÁREZ	OXBJ	17.067	96.744	Suelo	ETNA (1916)	Instalaciones de la escuela primaria Benito Juárez
OAXACA ALAMEDA	OXAL	17.061	96.726	Suelo	ETNA (1918)	Frente a la catedral, en el centro de Oaxaca
OAXACA CIUDAD UNIVERSITARIA	OXCU	17.049	96.713	Arcilla	DCA-333 (170)	Estacionamiento de la Facultad de Arquitectura en CU, Oaxaca
OAXACA INST. TECNOLÓGICO	OXTO	17.078	96.744	Aluvial	ETNA (1531)	Instalaciones del Instituto Tecnológico de Oaxaca, División de C. de la Tierra

Tabla 3. Ubicación de las estaciones acelerográficas

II.3.1 Construcción de las estaciones sísmicas

Las estaciones acelerográficas en la ciudad de Oaxaca se construyeron con un procedimiento diseñado por el Instituto de Ingeniería (Ref. 17), cuyo principio fundamental es desplantar una base de concreto colada in situ sobre el depósito original del suelo, mediante un procedimiento que permite en lo posible no alterar las propiedades mecánicas del estrato original. Como sistema de protección cuenta con una caja fija metálica que aloja al acelerógrafo. Las estaciones OAXM, OXTO, OXPM, OXAL, OXCU, OXBJ, están desplantadas sobre terreno blando (Fig. II.13), mientras que la estación OXLC fue anclada sobre roca (Fig. II.14).

Capítulo II

La alimentación de energía eléctrica a los equipos de la red se realiza por medio de la línea comercial. La disposición del equipo y batería dentro de la caja así como sus dimensiones se presentan en la figura II.15.

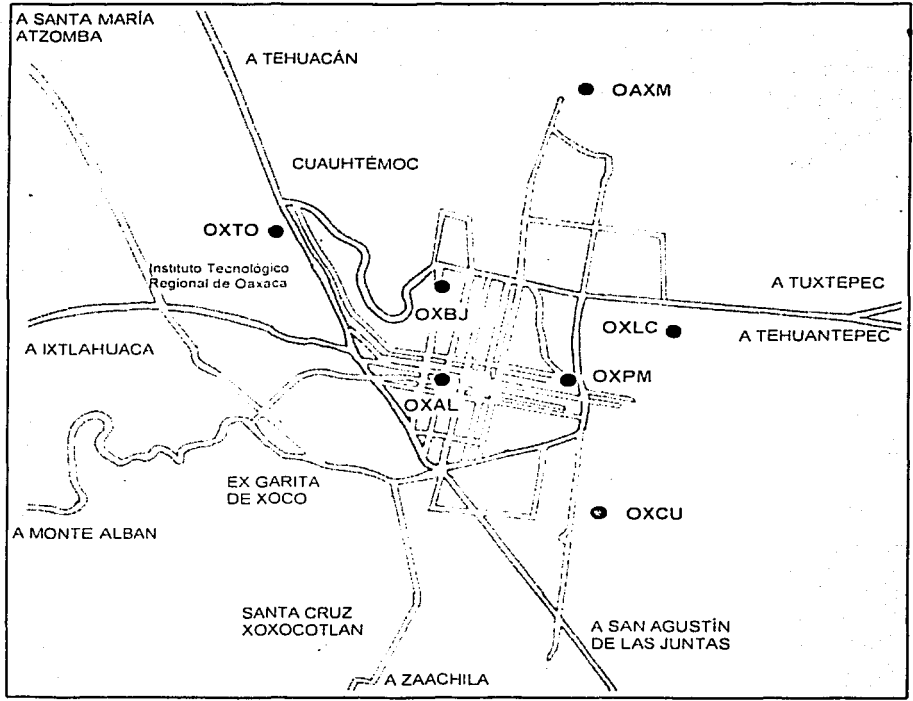


Figura II.4 Ubicación de las estaciones acelerográficas de la RACO

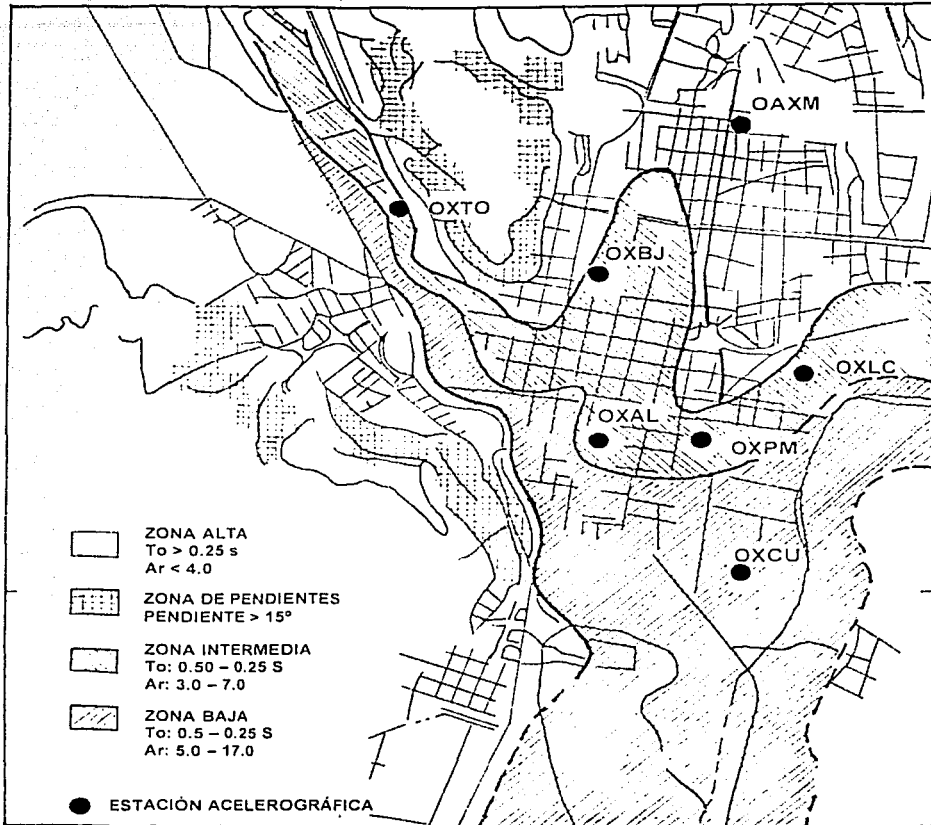


Figura II.5 Mapa de isoperiodos y localización de las estaciones de la RACO.

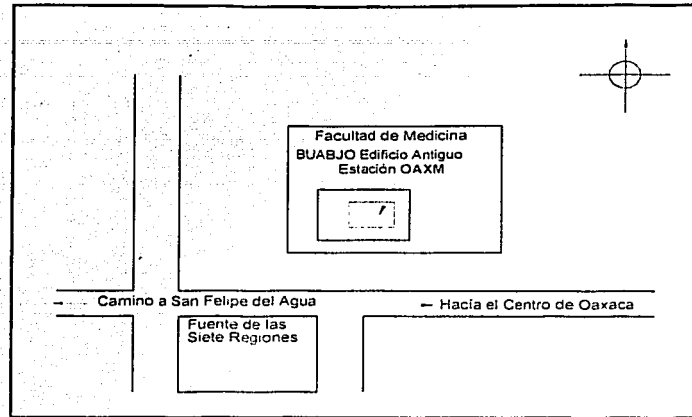


Figura II.6 Estación Oaxaca Facultad de Medicina (OAXM)

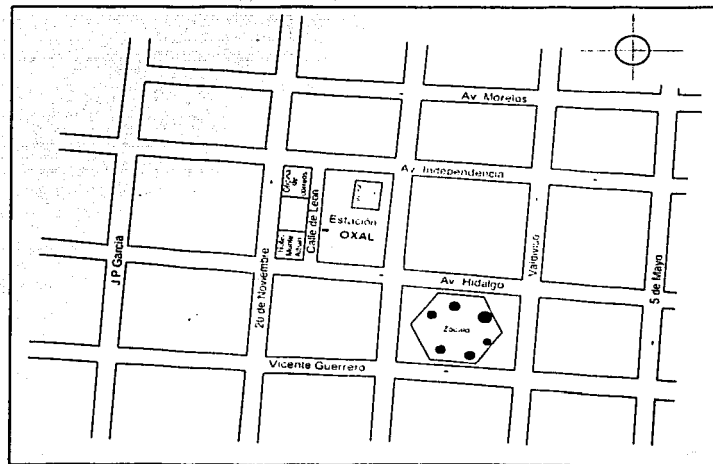


Figura II.7 Estación Oaxaca Alameda (OXAL)

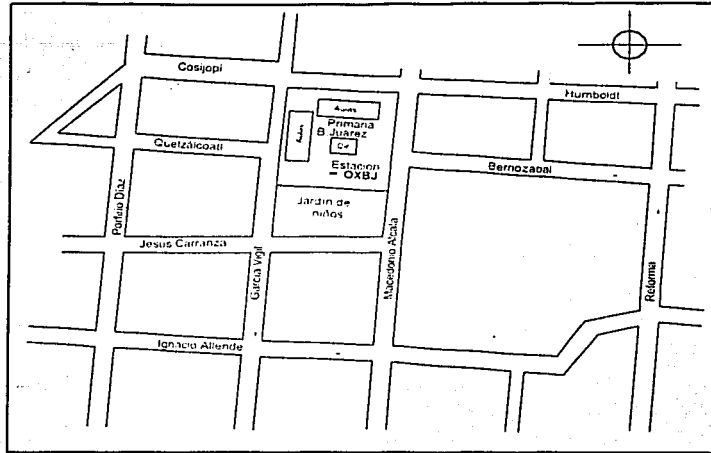


Figura II.8 Estación Primaria Benito Juárez (OXBJ)

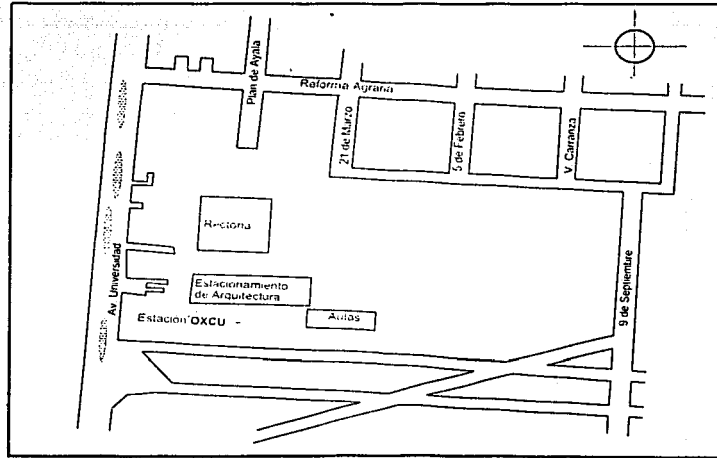


Figura II.9 Estación Oaxaca Ciudad Universitaria (OXCU)

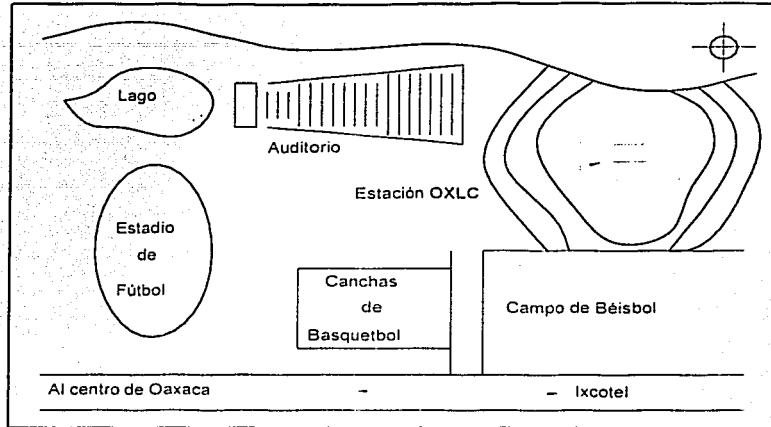


Figura II.10 Estación Oaxaca Las Canteras

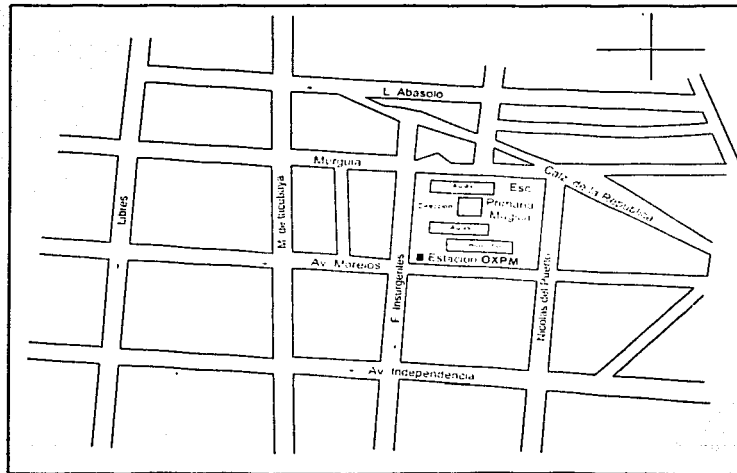


Figura II.11 Estación Primaria Mugica (OXPM)

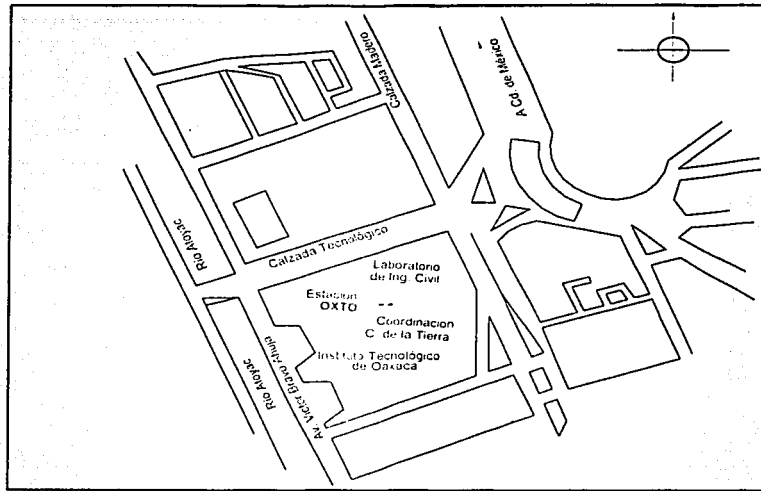


Figura II.12 . Estación Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO)

II.3.2. Instrumentación acelerográfica

Un acelerógrafo está integrado de dos partes principales, los sensores y el sistema de registro (Ref. 18). Los sensores están constituidos por acelerómetros cuyo número y arreglo dependerán de la aplicación en particular, siendo la disposición "triaxial", tres acelerómetros en posición mutuamente ortogonal, la más empleada. El sistema está constituido de: un conversor análogo-digital, la unidad de control y el mecanismo de almacenamiento. El registrador convierte continuamente las señales analógicas, de los sensores, a muestras digitales, las cuales son comparadas en la unidad de control y mediante un algoritmo de activación verifica cada una. Si se satisface el nivel de activación programado se inicia el almacenamiento hasta que la señal deja de cumplir con la condición de activación.

La información es registrada en cinta magnética, memoria RAM, de estado sólido o en dispositivos tipo "Flash".

Un registro normalmente inicia antes de que se cumpla el criterio de activación del aparato, a este lapso de tiempo se le conoce como Memoria de Pre-evento; así mismo, cuenta también, con Memoria de Post-evento, la cual registra los valores de aceleración durante un tiempo fijado, posteriores al cumplimiento de la condición de disparo.

Tanto los sensores como el registrador operan con baterías, que a su vez se recargan a través de un cargador de AC o de una celda solar en caso de no disponer o desconfiar de la alimentación de AC.

Dentro de cada acelerógrafo, se localiza un reloj que permite conocer la fecha y hora de ocurrencia del evento. Esto se utiliza para determinar el tiempo de arribo de la onda sísmica desde el foco hasta la estación.

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

Los instrumentos utilizados para instalar la RACO son de marca Terra Technology modelo digital DCA-333 y Kinematics modelo digital ETNA.

El DCA-333 registra continuamente a razón de 100 muestras por segundo por canal amplifica, filtra y convierte las señales generadas en forma de palabras de 12 bits. El almacenamiento de la información es en cinta magnética e incluye el tiempo de reloj interno, el número serial del instrumento y el número progresivo de registro. El ajuste de nivel de activación es único, esto es, el mismo para las tres direcciones de registro. Este equipo lo complementa una unidad reproductora y graficadora SMR-104 de la misma marca. Con esta unidad pueden obtenerse de manera inmediata las gráficas correspondientes a las señales grabadas.

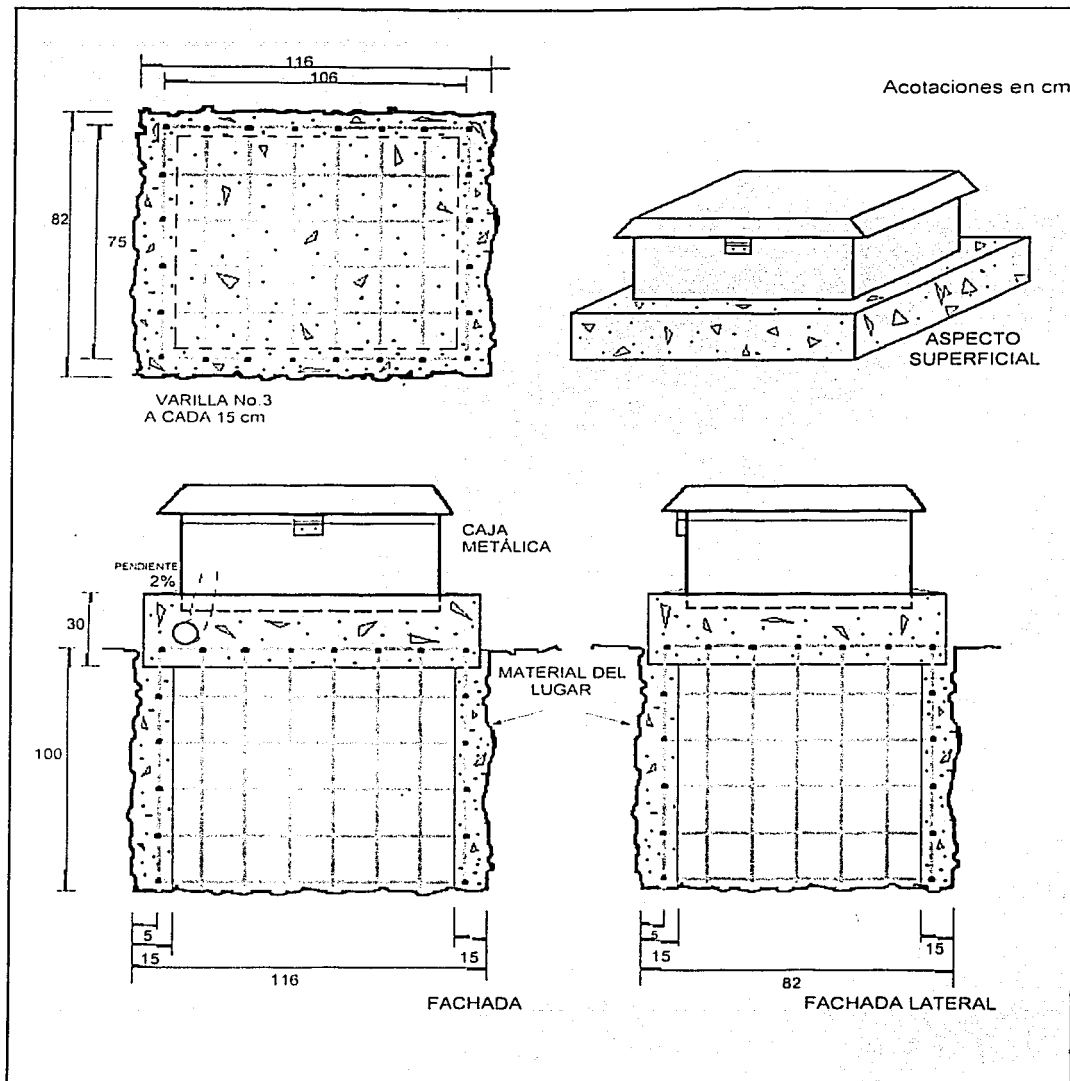


Figura II.13 Estaciones OXTO, OXAL, OXPM, OXBJ, OAXM y OXCU (Ref. 19).

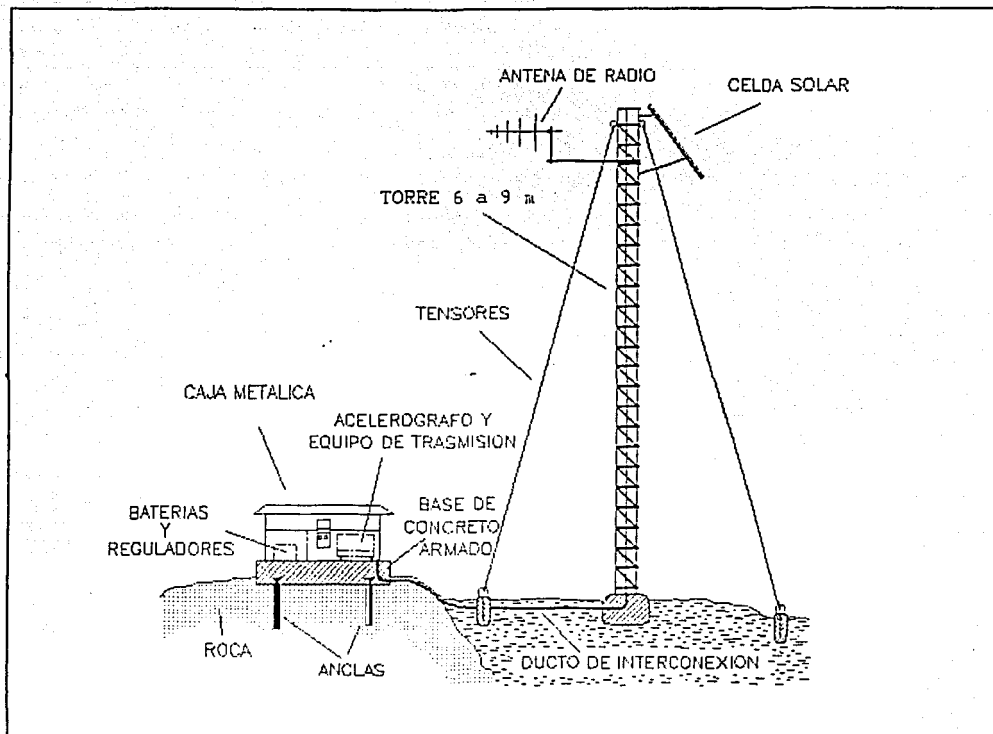


Figura II.14 Estación OXLC (Ref. 17).

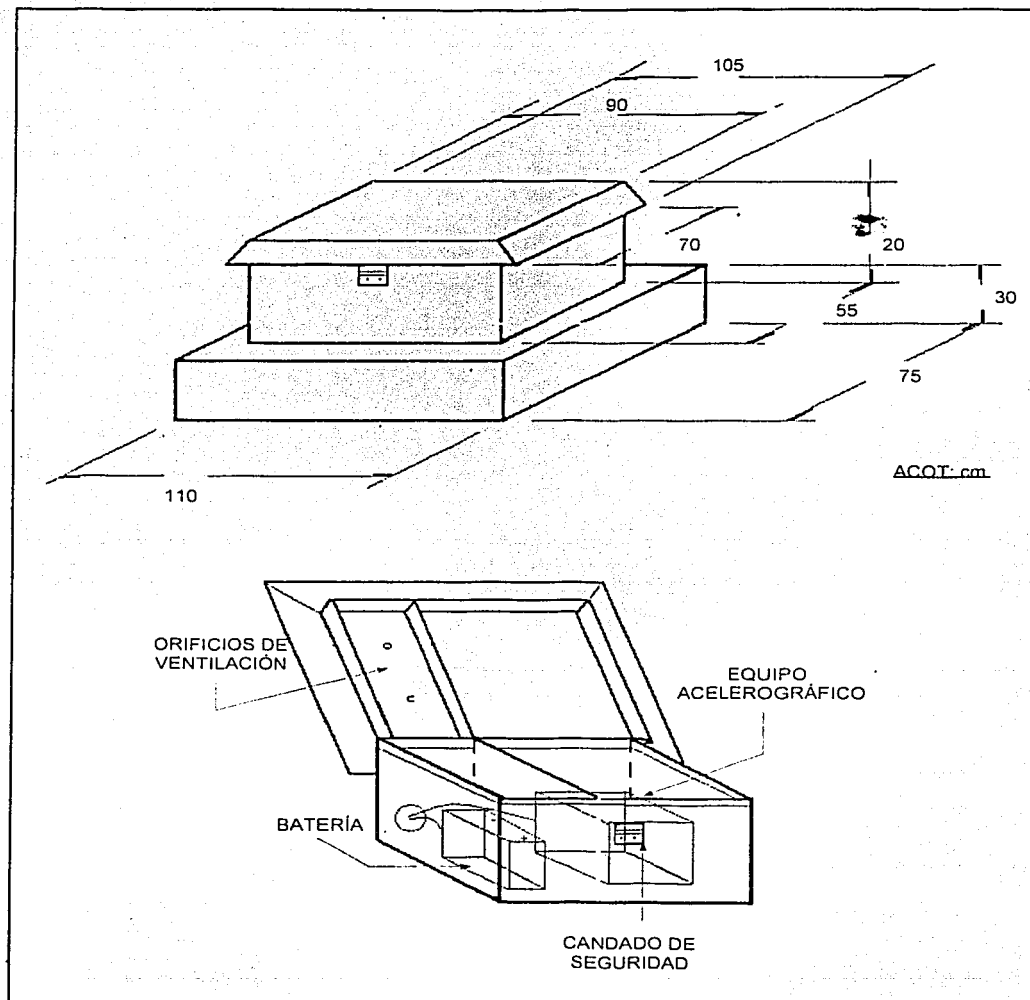


Figura II.15 Dimensiones geométricas de la caja metálica (Ref. 19).

A diferencia del DCA-333, el acelerógrafo ETNA puede registrar 100, 200 o 250 muestras por segundo por canal; amplifica, filtra y convierte las señales generadas a palabras de 18 bits, grabando la información en una tarjeta de almacenamiento "Flash Card" intercambiable con capacidad máxima de 20 minutos, además el nivel de disparo puede ajustarse con valores diferentes en los tres canales.

En la tabla 4 se describen los parámetros de operación de los equipos acelerográficos instalados en la RACO y en la tabla 5 se señalan los equipos que operan en las estaciones acelerográficas.

CARACTERÍSTICAS	EQUIPO		
	DCA-333	ETNA (K2)	ETNAEPI
Fabricante	Terra Technology	Kinematics	Kinematics
Tipo	Digital	Digital	Digital
Medio de registro	Casete Digital o Ramdeck	Tarjeta "flash Card"	Tarjeta "flash Card"
Transductores (3)	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas Episensor Deck
Escala de registros [g]	0.25-1	1-2	Variable 0.25, 0.5, 1, 2, 4
Frecuencia natural [Hz]	.30	50	200
Amortiguamiento	0.7	0.7	0.7
Tiempo de registro [min]	14	40	60 min, 200 muestras con flash de 8 MB
Tasa de muestro [muestras/s]	100	100,200 ó 250	100, 200 ó 250
Longitud de palabra [bit]	12	18	18
Rango Dinámico [dB]	72	108	108
Referencia de tiempo	Interno	Interno	Interno
Alimentación [volt CD]	+12	+12	+12

Tabla 4. Especificaciones generales de los acelerógrafos instalados en la RACO

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CÓDIGO	EQUIPO INSTALADO				
		TIPO	N/S	ORIENTACIÓN		
				C1	C2	C3
Oaxaca, ciudad universitaria	OXCU	DCA-333	170	VERT	N90E	N00E
Las Canteras	OXCL	ETNA	1328	N90W	VERT	N00W
Instituto Tecnológico	OXTO	ETNA	1531	N90W	VERT	N00W
Primaria Mugica	OXPM	ETNA	1917	N00W	N90W	VERT
Primaria Benito Juárez	OXBJ	ETNA	1916	N00W	VERT	N90W
Facultad de Medicina	OAXM	DCA-333	122	VERT	N90E	N00E
Alameda de León	OXAL	ETNA	1918	N00W	N00W	VERT

Tabla 5. Equipos instalados en la RACO

II.3.3 Operación y Mantenimiento

Para garantizar que los aparatos se encuentran en óptimas condiciones de funcionamiento y listos para registrar el movimiento sísmico, es indispensable efectuar visitas periódicas de mantenimiento las cuales se llevan a cabo, dependiendo del sitio, cada 3 o 4 meses y en caso de ocurrir un evento de importancia, se acude de inmediato a la estación para recolectar los acelerogramas, procesarlos y evaluarlos.

En cada visita se debe revisar principalmente:

- Suministro de energía.
- Indicador de eventos para verificar la existencia del registro.
- Funcionamiento correcto del arrancador y reajuste del nivel de disparo en caso de ser necesario.
- Registro de prueba mediante un disparo manual.
- En el caso del equipo DCA-333, intercambiar el cassette de cinta magnética, y para los equipos ETNA, almacenar los registros en disco flexible para dejar totalmente libre de registro la memoria.

Capítulo II

Para la recolección de los registros se utilizan las bitácoras de campo, que contienen la secuencia a seguir en la inspección, el estado del equipo antes y después de la misma y las modificaciones y/o reparaciones realizadas en caso de ser necesarias.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo III

Determinación de los efectos de sitio

III. Determinación de los efectos de sitio.

III.1 Acelerogramas registrados.

Las estaciones sísmicas que integran la RACO, han producido una gran cantidad de registros de aceleración, los cuales fueron generados por sismos ocurridos en las regiones que influyen en el estado de Oaxaca y cuya intensidad ha sido suficiente para alcanzar los niveles de activación predeterminados en cada una de las estaciones. En la tabla 6 se presentan los principales parámetros de los eventos que hasta la fecha han originado al menos un acelerograma en la ciudad de Oaxaca y en la figura III.1 se incluye la localización de cada uno de ellos. Cabe señalar que la mayoría de los eventos provienen de la franja costera de Oaxaca, sin embargo eso no refleja la totalidad de la sismicidad ocurrida en la zona de Oaxaca. De todos estos registros, los más importantes son los ocurridos en agosto 28 de 1973 (6.8 Mb), noviembre 29 de 1978 (7.8 Mc), octubre 24 de 1980 (6.4 Mb), junio 7 de 1982 (6.9 Ms), enero 24 de 1983 (5.3 Mb), septiembre 14 de 1995 (7.3 Mc), octubre 21 de 1995 (6.5 Mc), febrero 3 de 1998 (6.4 Mc), junio 15 de 1999 (7.0 Mw) y septiembre 30 de 1999 (7.4 Me).

III.2 Registro y Procesamiento de la información.

El proceso de acelerogramas pasa por una serie de etapas desde el momento en que se registra el movimiento sísmico hasta la obtención de informes y publicaciones del mismo (Fig. III.2). Esencialmente este procedimiento engloba lo siguiente:

- Registro del movimiento.
- Recopilación de la información.
- Lectura y obtención de datos.
- Almacenamiento
- Transferencia de datos.
- Análisis del acelerograma
- Catalogación y respaldo de la información.
- Distribución de la información.

En cada una de estas etapas se involucran diversas actividades las cuales se describen a continuación:

Registro del movimiento: Mediante una red de observación sísmica, la cual esta integrada por un cierto número de acelerógrafos, se registra el movimiento del terreno, cuando este rebasa un cierto umbral preestablecido.

Recopilación de la información: Se programan visitas periódicas a las estaciones de registro, en las que se realiza la inspección de los aparatos para la recolección de los datos registrados. El proceso de recabar los datos depende del tipo de equipo, ya que los modelos existentes difieren en su sistema de almacenamiento.

Lectura y obtención de datos: Esta etapa consiste en obtener los archivos de datos de aceleración que representen el sismo. La información contenida en una cinta o cassette, es reproducida a través de una unidad lectora especial. Y enviada a la

No	Sismo aammdd	Magnitud					Coordenadas Epicentrales		Prof (km)	Estación de registro	Distancia epicentral (km)				Aceleración máxima (gal)								
		b	c	a	e	s	Lat N	Long W															
1	716710 1	4.2					18.40	100 20	88	OAXM					397				27.03				
2	720609 1						5.0	15.44	97 00	33	OAXM					194				12.65			
3	720708 1						6.1	15.87	97 15	33	OAXM					144				41.97			
4	730828 1	5.8					18.29	56 45	84	OAXM					136				109.40				
5	751204 1	5.0					16.59	94 50	89	OAXM					242				27.51				
6	781129 1						7.8	16.00	96 69	19	OAXM				120				216.43				
7	781129 2	5.3					15.74	96 83	33	OAXM					149				56.90				
8	781129 3	4.5					15.74	96 18	33	OAXM					159				98.21				
9	801024 1	6.4					18.03	98 29	70	OAXM					197				162.44				
10	810721 1	5.1					4.7	15.91	98 66	33	OAXM				245				40.05				
11	820607 1	5.9					6.9	16.17	98 36	16	OAXM				202				19.05				
12	820607 2	6.3					7.0	16.26	98 51	24	OAXM				212				35.37				
13	830124 1	6.3					14.93	95 43	33	OAXM					275				46.03				
14	870115 1	4.6	5.0				16.97	94 58	120	OAXM					228				11.23				
15	940704 1	5.9					14.83	97 29	31	OAXM					257				22.97				
16	940827 1	4.7	5.0				16.81	94 72	115	OAXM					215				16.27				
17	940828 1	5.4	5.2				17.02	96 10	22	OAXM					96				32.54				
18	940925 1	2.4					21.82	104 76	<5	OAXM					994				16.27				
19	950331 1	4.5					16.87	96 15	110	OAXM					55				11.48				
20	950914 1	6.4	7.3				7.2	16.31	99 88	22	OAXM				246				40.96				
21	951021 1	6.2	6.5				16.92	93 62	96	OAXM					330				34.41				
22	960225 1	5.2	5.2				5.3	15.48	98 04	13	OAXM				227				6.66				
23	960327 1	5.5	4.6				4.9	16.21	98 25	7	OAXM				91				12.60				
24	960401 1	4.9	5.0				16.61	96 02	39	OAXM					190				25.05				
25	960603 1	4.9	4.9				17.48	94 65	129	OAXM					224				11.48				
26	960906 1	4.1					17.13	96 86	80	OAXM					16				24.55				
27	961210 1	4.8					16.05	97 03	48	OAXM					119				15.60				
28	970121 1	5.1					5.0	16.44	98 15	18	OAXM				169				10.81				
29	980203 1	6.0	5.4	5.4			6.2	15.69	96 37	33	OAXM				159				71.13				
30	980203 2	4.9	4.7				4.2	15.84	96 60	1	OAXM				138				12.09				
31	980303 1	5.0	4.9	5.0			4.5	15.71	96 47	12	OAXM				154				11.17				
32	980502 1	5.9	4.4				17.28	96 81	91	OAXM					24				13.91				
33	980607 1	5.8	5.2	5.6	5.2		15.82	94 07	16	OAXM					315				14.32				
34	980620 1	4.5	4.8				16.96	95 21	115	OAXM					161				8.19				
35	990113 1	4.5					16.06	97 19	5	OAXM					124				10.15				
36	990127 1	4.5					16.24	95 3	104	OAXM					178				11.03				
37	990615 1					6.7	18.20	97 47	92	OAXM	Oxlc			150	147				89.10	23.50			
38	990615 2	4.5					18.52	97 58	60	OAXM	Oxlc				183	187			11.67	3.35			
39	990930 1					7.4	15.89	97 07	12	OAXM	Oxlc				137	135			370.3	74.65			
40	990930 4	4.5					16.09	97 32	70	OAXM					127				7.11				
41	991001 1	4.6					15.05	97 17	34	OAXM					145				8.86				
42	991007 1	4.4					15.87	97 25	16	OAXM													
43	991025 1	4.6					16.69	98 43	55	OAXM	Oxlc												
44	991106 1						17.60	96 79		OAXM	Oxlc												
45	991110 1	4.3					15.88	96 68	16	OAXM	Oxlc				58	61	143	145	13.22	3.31	3.03	2.98	
46	991129 1	4.4					17.45	94 73	140	OAXM	Oxlc				133	131	187	187	10.28	4.98	5.46	10.70	
47	991217 1	4.3					17.23	95 96	135	OAXM	Oxlc						50	50			4.72	5.14	
48	20000119 1	4.5					16.41	96.68	28	OAXM	Oxlc				83	82	74	72			4.11		
49	20000301 1	4.7					15.86	97.12	16	OAXM	Oxlc				75	72	133	131	13.56	5.00	6.62	4.75	
50	20000312 1	6.4					14.44	93.00	20	OAXM	Oxlc				142	140	141	140	10.28	4.98	5.46	10.70	
51	20000510 1	4.7					16.02	97.23	28	OAXM	Oxlc				83	82	74	72			4.11		
52	20000721 1	5.9					18.09	98.97	47	OAXM	Oxlc				142	140	141	140			5.77		
53	20000817 1	4.4					17.84	95 47	42	OAXM	Oxlc				130	127	129	128	12.60	5.24	10.22	5.84	
															264	266	264	266			8.02	25.24	
															157		157				4.41	8.15	

Tabla 6. Sismos registrados en la Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Oaxaca.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

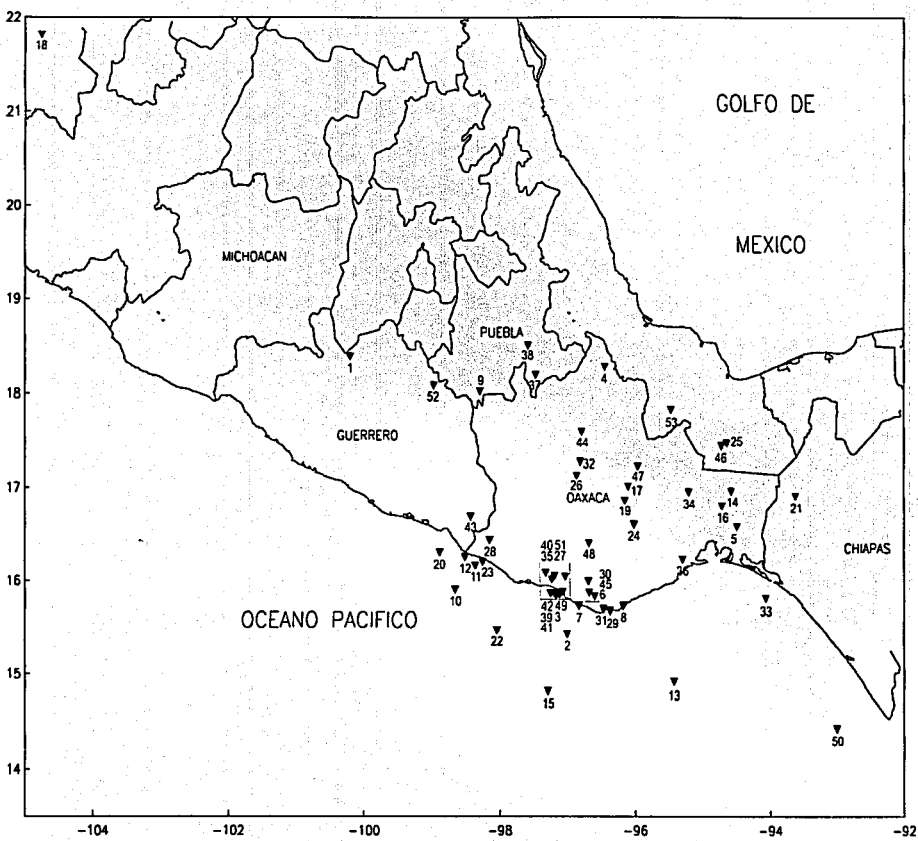


Figura III. 1 Localización epicentral de los sismos registrados en la RACO (Ref. 19).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

computadora, en donde es almacenada en un archivo del tipo binario. En los equipos más modernos la información esta contenida en dispositivos de estado sólido, y la transferencia de datos se realiza directamente a la computadora.

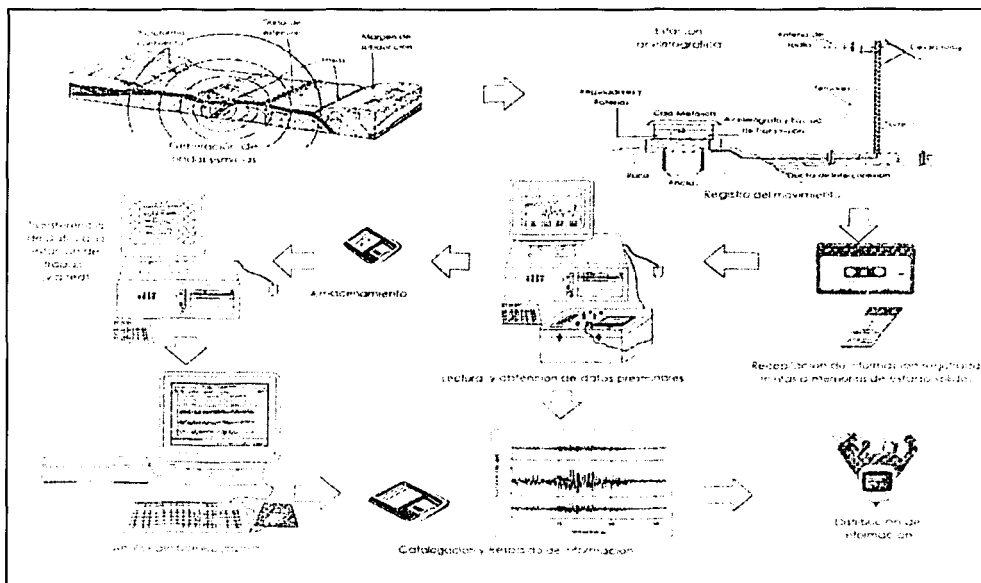


Figura III.2 Procesamiento de acelerogramas.

Una vez recolectadas las cintas y archivos de registro, ya sea en las visitas de campo o por medio de interrogación remota, se efectúa la inspección y edición de gráficas para determinar si la información corresponde a un sismo. Como parte de la actividad de campo se realiza un reporte en el cual se incluyen los datos del cassette y la estación en donde se efectuó la grabación, la fecha y hora de los disparos encontrados. En caso de tratarse de un evento sísmico, se anotan los valores máximos de aceleración por canal y el nombre con el cual se identifica al archivo. Estos reportes se clasifican en carpetas correspondientes a la RACO y se conservan las cintas que contienen registros sísmicos. Cuando un registro se identifica como sismo, se realiza un ajuste de tiempo a los datos en caso de haberse encontrado corrimiento en el reloj interno del equipo al momento de su recolección.

Debido a que los archivos generados por los instrumentos tienen diferente formato, puesto que cada fabricante utiliza sus propias rutinas para generar la información, es necesario aplicar un último proceso que consiste en convertirlos en un formato estándar.

Almacenamiento: Obtenidos los archivos en formato estándar, se realiza la tarea de respaldar la información.

Trasferencia de datos: Para llevar a cabo un análisis de los acelerogramas, en el sistema implementado en la estación de trabajo, es necesario transferir los archivos almacenados en computadoras tipo PC a las estaciones de trabajo. Para este caso la institución cuenta con una serie de computadoras conectadas a la red UNAM, el cual es el medio de comunicación para realizar dicha transferencia. Existe una herramienta de cómputo que permite con facilidad realizar tal actividad y es conocido como FTP (File Transfer Protocol) como su nombre lo indica. es un protocolo de comunicación que es accesado bajo el ambiente Windows, desde la PC.

Análisis del acelerograma: Con los archivos de datos de aceleración se procede a la elaboración de un análisis que consiste en obtener historias de aceleración, velocidad y desplazamiento, así como la determinación de los espectros de Fourier y de respuesta.

Catalogación y respaldo de la información: Se elabora un catálogo que contenga la información más importante de registros procesados, para su fácil localización y se lleva a cabo el respaldo de la información para posteriores consultas.

Distribución de la información: Se realiza la difusión de la información de los acelerogramas en catálogos y medios magnéticos.

III.2.1 Archivo estándar de aceleración. (ASA)

Debido a la amplitud de la red de observación sísmica, la gran diversidad y tipos de instrumentos de registro y el enorme acervo de datos sísmicos recolectados, se consideró necesario integrar esta información que se encontraba dispersa y parcialmente inédita. Para ello, se propuso crear la Base Mexicana de Sismos Fuertes (BMDSF), la cual permite visualizar en forma objetiva y clara datos de la instrumentación existente en el país; así como la compilación de todos los datos recolectados y convertidos a un formato homogéneo para facilitar su disseminación a nivel nacional e internacional (Ref 20).

Como parte del proceso para la creación de la BMDSF y en particular del banco de información de registros acelerográficos, se decidió establecer un nuevo formato único para los archivos de aceleración que manejara el sistema. El archivo estándar de aceleración (ASA2.0) (Ref.21). Esta plataforma uniforme de datos permite procesar de una manera más eficiente la información, desde su captura, almacenamiento y finalmente distribución.

El archivo ASA2.0 tiene como principales características ser un archivo ASCII, es decir de texto, formato que permite ver y editar los datos con mucha facilidad sin la necesidad de programas decodificadores especiales. Es totalmente auto explicativo y se compone de dos partes, la primera es el encabezado (1eras. 109 líneas) que contiene la información necesaria para su procesamiento y análisis. La segunda corresponde a los datos numéricos de aceleración (líneas 110 en adelante).

Los datos del encabezado se obtienen con la ayuda de dos archivos (*Maestro.txt* y *Epicentros.txt*) que funcionan como base de datos y los cuales se actualizan cada vez que

existe un cambio de equipo en las estaciones, estos se encuentran organizados de la siguiente manera:

1. Título del registro.
2. Identificación del tipo de archivo.
3. Nombre del archivo, fecha, hora de creación.
4. Referencia del registro en el Catálogo de Acelerogramas.
5. Datos de la estación.
6. Datos del acelerógrafo.
7. Datos del sismo.
8. Datos del acelerograma.
9. Calidad del acelerograma.
10. Comentarios sobre el registro.
11. Espacio reservado para uso futuro.
12. Encabezado de los datos de aceleración.

El área correspondiente a los datos numéricos, se encuentra distribuida en columnas que pueden variar de 1 a 12 dependiendo del número de canales del acelerógrafo (Fig. III.3).

Una vez que se tienen los archivos *Maestro.txt* y el *Epicentros.txt*, se utiliza otro archivo llamado *Tareas.txt*, en el cual se enlistan todos los archivos a procesar así como la fecha del sismo y la hora en que se registró la primera muestra de dicho sismo. Posteriormente, se obtienen las gráficas para los tres canales del archivo ASA2.0 de aceleración mediante el programa *CREAPXY6.EXE* que se encarga de preparar las instrucciones de graficación e impresión de los archivos de aceleración. Seguido de lo anterior, se aplica el programa *PLOTSH.EXE* que ejecuta las instrucciones creadas anteriormente y manda a impresión los archivos de aceleración (Fig. III.4).

III.2.2 Corrección de Acelerogramas.

Para que los acelerógrafos registren la señal sin afectar su forma, su respuesta debe ser plana en el rango de frecuencias de interés (0 – 50 Hz). Sin embargo, existen señales indeseables que interfieren con la información capturada, la cual recibe el nombre de ruido, de este, se distinguen principalmente dos clases, ambiental y eléctrico inducido por el equipo.

El ruido ambiental es provocado por la actividad humana (tránsito de vehículos, explosiones, ganado, etc.) agentes atmosféricos como son (tormentas, viento, etc.) y otras fuentes del interior de la tierra. Por otra parte se tienen las señales inducidas por el equipo, esto es debido a que el instrumento posee masa, rigidez y amortiguamiento que inducen velocidades y desplazamientos relativos en el equipo.

```

1. ....
2. INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
3. Coordinación de Instrumentación Sísmica
4. Ciudad Universitaria, Apartado Postal 70-472, Coyoacán 04510, México, D.F.
5. Tel. (52-5) 622-3414 Fax. (52-5) 616-1514 e-mail: isismica@pumas.ingen.unam.mx
6. ....
7. ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION:
8. VERSION DEL FORMATO : 2.0
9. NOMBRE DEL ARCHIVO : OAXM9909.301
10. FECHA Y HORA DE CREACION : Tue Oct 05 17:55:48 1999
11. REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS, SMIS 1995 : REGISTRO NO. /PAG.
12.
13.
14. =====
15. DATOS DE LA ESTACION:
16. NOMBRE DE LA ESTACION : OAXACA FACULTAD DE MEDICINA
17. CLAVE DE LA ESTACION : OAXM
18. LOCALIZACION DE LA ESTACION : Fuente de las 7 regiones, a 2 Km.
19. : del Centro, Oaxaca.
20. :
21. :
22. :
23. COORDENADAS DE LA ESTACION : 17.084 LAT. N
24. : 96.716 LONG. W
25. ALTITUD (msnm) : 1600
26. TIPO DE SUELO : ALUVIAL
27. :
28. :
29. INSTITUCION RESPONSABLE : INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
30. :
31.
32. =====
33. DATOS DEL ACELEROGRAFO:
34. MODELO DEL ACELEROGRAFO : DCA-333
35. NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO : 122
36. NUMERO DE CANALES : 3
37. ORIENTACION C1-C6 (rumbo/orientacion) : /V/N90E/N00E
38. ORIENTACION C7-C12 (rumbo/orientacion) :
39. VEL. DE MUESTREO, C1-C6 (muestras/s) : /100/100/100
40. VEL. DE MUESTREO, C7-C12 (muestras/s) :
41. ESC. COMPLETA DE SENSORES, C1-C6 (g) : -2.2/2
42. ESC. COMPLETA DE SENSORES, C7-C12 (g) :
43. FREQ. NAT. DE SENSORES, C1-C6 (Hz) : /31.0/32.0/30.0
44. FREQ. NAT. DE SENSORES, C7-C12 (Hz) :
45. AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C1-C6 : /0.62/0.72/0.63
46. AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C7-C12 :
47. INTERVALO DE MUESTREO, C1-C6 (s) : /0.01/0.01/0.01
48. INTERVALO DE MUESTREO, C7-C12 (s) :
49. UMBRAL DE DISPARO, C1-C6 (Gal) : /6/6/6
50. UMBRAL DE DISPARO, C7-C12 (Gal) :
51. MEMORIA DE EVENTO (s) : 4
52. TIEMPO DE EVENTO (s) : 15
53.
54.
55. =====
56. DATOS DEL SISMO:
57. FECHA DEL SISMO (GMT) : 30 de Septiembre de 1999
58. HORA EPICENTRO (GMT) : 16:31:14
59. MAGNITUD (ES) : /M=7.4
60. COORDENADAS DEL EPICENTRO : 15.89 LAT. N
61. : 97.07 LONG. W
    
```

Figura III.3 Arquitectura del archivo ASA.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

```

62. PROFUNDIDAD FOCAL (Km) : 12
63. FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES : Instituto de Geofísica, UNAM
64. : SSN
65.
66. -----
67. DATOS DE ESTE REGISTRO:
68. HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT) : 16:31:30
69. EXACTITUD DEL TIEMPO (s) : 0.5
70. DURACION DEL REGISTRO (s), C1-C6 : /112.80/112.80/112.80
71. DURACION DEL REGISTRO (s), C7-C12 :
72. NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C1-C6 : /11280/11280/11280
73. NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C7-C12 :
74. ACEL. MAX. (Gal), C1-C6 : /-164.56 -352.89/-370.57
75. ACEL. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA : /2492/2443/3265
76. ACEL. MAX. (Gal), C7-C12 :
77. ACEL. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA :
78. UNIDADES DE LOS DATOS : Gal (cm/s2)
79. FACTOR DE DECIMACION : 1
80. FORMATO DATOS (FORTRAN, 10 campos/dato) : 3F10.2
81.
82.
83. -----
84. CALIDAD DEL ACELEROGRAMA:
85. REGISTRO DIGITAL COMPLETO, CON TIEMPO ABSOLUTO CORRECTO.
86.
87.
88. -----
89. COMENTARIO:
90.
91.
92.
93.
94.
95.
96.
97.
98.
99.
100.
101.
102.
103.
104. -----
105. DATOS DE ACELERACION:
106. -----+-----+-----
107. CANAL-1 CANAL-2 CANAL-3
108. V N90E N00E
109. -----+-----+-----
110. 0.05 -0.71 0.10
111. 0.05 -0.71 0.10
112. 0.05 -0.71 0.10
    
```

Figura III.3 Arquitectura del archivo ASA2.0 (Continuación)

Estas señales se consideran de igual forma como ruido (Ref. 22), por esta razón se ajusta una línea base a las aceleraciones registradas utilizando procedimientos matemáticos, dado lo anterior entendemos por corrección de línea base al algoritmo que permite ajustarle una línea de referencia o de aceleraciones nulas a cada componente del registro sísmico.

Por otro lado, uno de los problemas más importantes en el proceso de los acelerogramas se presenta cuando se desean obtener la velocidad y el desplazamiento, debido a factores como el desconocimiento de los valores iniciales y finales de ambas variables, la longitud finita del acelerograma, el corrimiento del cero del registro con respecto al cero real de aceleración, las distorsiones introducidas por los sensores, el medio de registro y/o la forma de convertir los datos de una señal continua en valores discretos que la representen (conversión analógico-digital).

Algunos otros factores, cuya influencia dependerá de la calidad del instrumento, como pueden ser el envejecimiento de partes, efectos de temperatura y humedad, la respuesta del sensor, entre otros, suelen corregirse mediante calibraciones periódicas del instrumento.

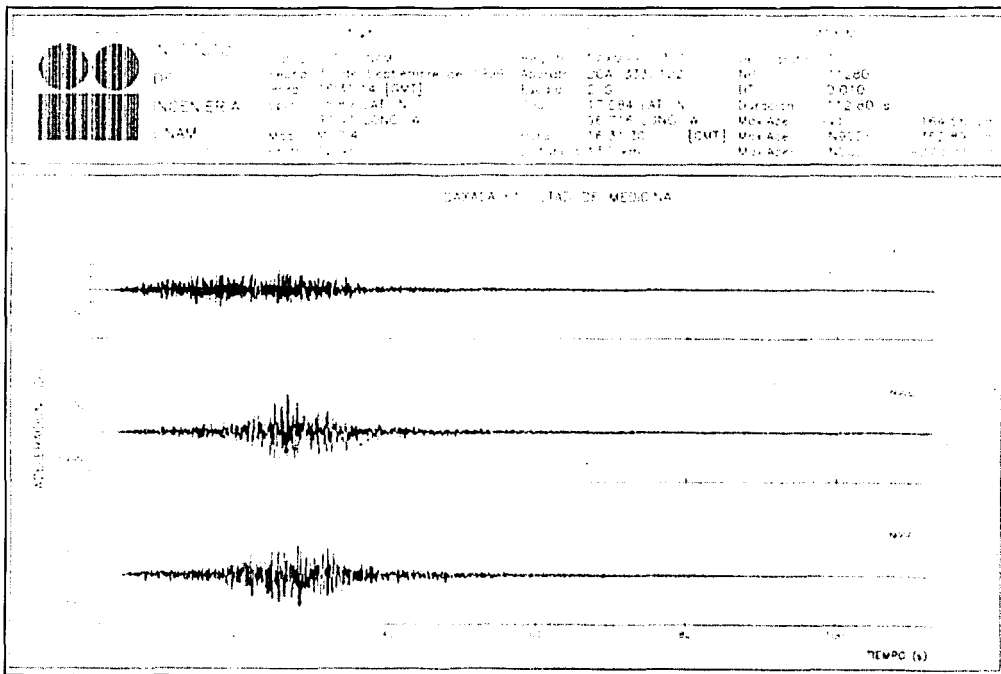


Figura III.4 Gráfica de registro acelerográfico.

III.2.3 Corrección de línea base.

Se conoce como línea base al lugar geométrico de un acelerograma en donde los valores de aceleración son nulos, tal lugar no está siempre bien definido, por lo que es necesario aplicar una corrección que permita, al integrar el acelerograma, obtener valores reales de la velocidad y el desplazamiento. Existen varios métodos para llevar a cabo las correcciones necesarias entre los que destacan los basados en los ajustes por mínimos cuadrados, filtros digitales y ajuste de polinomios. Es en el Instituto Tecnológico de California (CALTECH) donde se desarrolla un método diseñado especialmente para llevar a cabo la corrección e integración de acelerogramas, basado en el filtro desarrollado por Ormsby (Ref. 23). Dicho método, se basa en eliminar parcialmente los contenidos de baja y alta frecuencia del acelerograma mediante el filtro digital Ormsby.

Por otro lado, la corrección por ruido inducido al equipo, se basa en modelar al acelerógrafo como un sistema de un grado de libertad (Fig. III.5), y de esta forma, conocer la respuesta del sistema (acelerógrafo) dada una señal (sismo).

La corrección instrumental se basa en la ecuación que gobierna la respuesta de un sistema de un grado de libertad:

$$a(t) = -\ddot{u}(t) - 2\omega_n \zeta \dot{u}(t) - \omega_n^2 u(t) \quad (3.1)$$

donde $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ y $a(t)$ son funciones que representan la aceleración, velocidad y desplazamiento del instrumento, así como la aceleración en la base, respectivamente.

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m}\right)^{0.5}; \quad \text{frecuencia natural.} \quad (3.2)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}; \quad \text{fracción del amortiguamiento crítico.} \quad (3.3)$$

donde; m es la masa del sistema, k la rigidez y c la constante de amortiguamiento.

Una vez destacada la señal con respecto al ruido, podemos situar la línea base del acelerograma a la altura de la aceleración media nula, restándole a cada ordenada el promedio aritmético de todas las aceleraciones. Las siguientes etapas del proceso, requieren conocer de antemano la línea de aceleraciones nulas o línea base, pues es a partir de esta que se pueden medir las aceleraciones de cada componente de manera confiable.

Proceso de Caltech:

El proceso consiste en interpolar el acelerograma a un incremento de tiempo (DT) constante, realizar una extensión del mismo, para efectuar un filtrado a paso-bajas y eliminar el ruido de alta frecuencia, decimar la función resultante, derivarla y finalmente con las funciones resultantes calcular la aceleración del terreno.

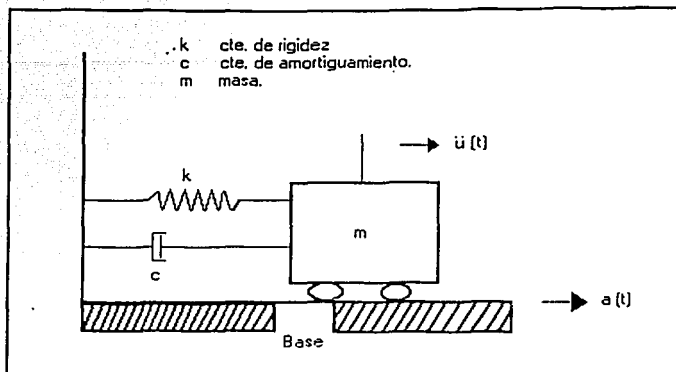


Figura. III.5 Sistema de un grado de libertad (Ref. 23).

Con el acelerograma corregido, se está en posibilidades de modificar la línea base y calcular las historias de velocidad y desplazamiento. En una segunda etapa se eliminan los errores con tendencias lineales, como el corrimiento de cero e inclinación de la línea cero, tanto en aceleración como en velocidad. Los ajustes se realizan mediante un proceso de mínimos cuadrados, considerando que la aceleración y velocidad son nulas antes de un temblor, muy pequeñas en el instante de inicio de operación del instrumento, y suponiendo que tienden a cero al final del movimiento.

Para terminar, se realiza el filtrado e integración para calcular la velocidad y desplazamiento, (Fig. III. 6), los pasos a seguir son:

1. Extender el registro para llevar a cabo un prefiltrado paso-bajas con promedios móviles de igual peso.
2. Decimar el registro para reducir el tiempo de cómputo.
3. Filtrado paso-bajas con diferentes pesos y el promedio de los promedios.
4. Interpolan los puntos resultantes al mismo intervalo que los datos originales y restarlo del acelerograma filtrado y eliminar nuevamente tendencias lineales por mínimos cuadrados.
5. Integrar, eliminar tendencias lineales y filtrar paso-bajas para producir la velocidad corregida.
6. Integrar y volver a filtrar para obtener el desplazamiento.

Al extenderse el acelerograma hacia ambos extremos para proceder con el filtrado de los puntos iniciales y finales, se produce en consecuencia una distorsión al inicio y al final del mismo, que afectan a la velocidad y a los desplazamientos obtenidos, principalmente en el caso en que los valores de aceleración inicial (a_0) y aceleración final (a_f) sean muy diferentes de cero. Si el filtrado seleccionado es adecuado, dichas distorsiones serán mínimas; sin embargo, si el

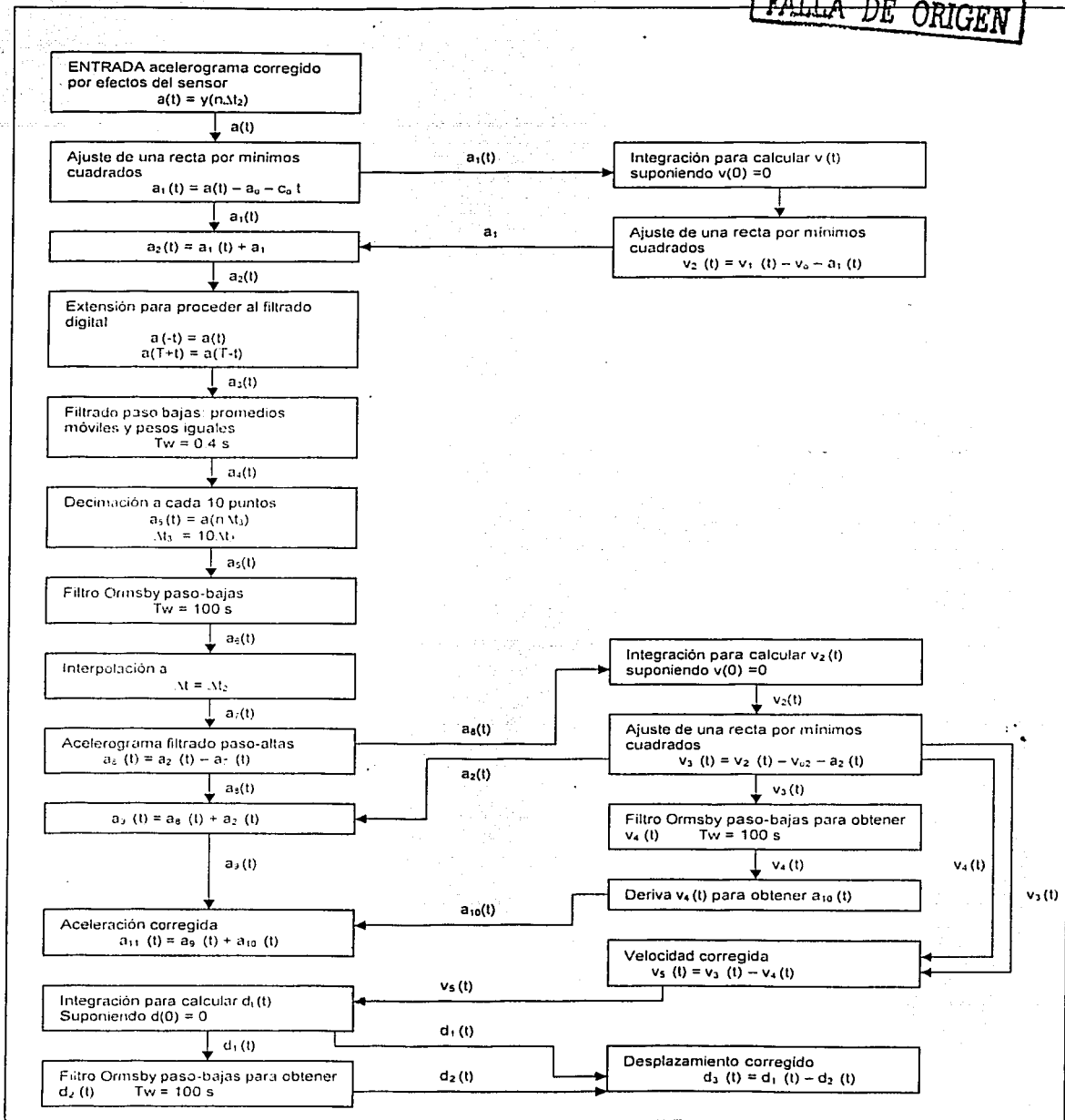


Figura III 6 Algoritmo utilizado para la corrección de línea base mediante el método de CALTECH (Ref.23).

registro consiste de un número reducido de muestras, esta distorsión es más acentuada y afecta a un porcentaje mayor del mismo, por lo que los resultados proporcionados por éste método deberán de emplearse con mucho cuidado en el caso de registros con estas características.

III.3 Espectros de Fourier y Respuesta.

Por considerarse de vital importancia en el proceso de acelerogramas en lo que sigue se hace un resumen sobre los fundamentos de la teoría del Análisis de Fourier.

En 1807 el matemático Joseph Fourier envió un artículo a la Academia de Ciencias de Paris, en el cual se presentaba una descripción matemática de problemas relacionados con la conducción de calor en la que contenía ideas muy interesantes que después se conocerían en su honor como Análisis de Fourier (Ref. 24). Una ramificación muy sorprendente de este análisis fue saber que muchas funciones conocidas pueden desarrollarse en series infinitas e integrales que contienen funciones trigonométricas.

III.3.1 Series de Fourier :

Suponga que una función " f " es integrable en $[-\pi, \pi]$; si se eligen constantes: $a_0, a_1, \dots, b_0, b_1, \dots$ de modo que:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nx) + b_n \operatorname{sen}(nx)] \quad (3.4)$$

considerando condiciones de ortogonalidad se llega a :

$$a_0 = (1/2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (3.5)$$

$$a_n = (1/\pi) \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.6)$$

y

$$b_n = (1/\pi) \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \operatorname{sen}(nx) dx \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.7)$$

Se puede extender lo anterior a funciones definidas en un intervalo $[-L, L]$ simplemente intercambiando la escala: $t = \pi x/L$ esto convierte el intervalo $[-L, L]$ en $[-\pi, \pi]$, por lo tanto:

$$a_0 = (1/2L) \int_{-L}^L f(x) dx \quad (3.8)$$

$$a_n = (1/L) \int_{-L}^L f(x) \cos(n\pi x/L) dx \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.9)$$

y

$$b_n = (1/L) \int_{-L}^L f(x) \text{sen}(n\pi x/L) dx \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.10)$$

por lo tanto la serie queda:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\pi x/L) + b_n \text{sen}(n\pi x/L)] \quad (3.11)$$

Considerando:

$$f \text{ es par en } [-L, L] \quad \text{si: } f(-x) = f(x) \quad \text{para } 0 \leq x \leq L \quad (3.12)$$

$$f \text{ es impar en } [-L, L] \quad \text{si: } f(-x) = -f(x) \quad \text{para } 0 \leq x \leq L \quad (3.13)$$

Debido a que es difícil encontrar una función que solo sea par o impar se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{Impar} \cdot \text{impar} &= \text{par} \\ \text{Par} \cdot \text{par} &= \text{par} \\ \text{Impar} \cdot \text{par} &= \text{impar} \end{aligned}$$

También,

$$\text{Par: } \int_{-L}^L f(x) dx = 2 \int_0^L f(x) dx \quad ; \quad (3.14)$$

por lo tanto la serie queda:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\pi x/L)] \quad (3.15)$$

Impar:
$$\int_{-L}^L f(x)dx = 0 \quad ; \quad (3.16)$$

por lo tanto la serie queda:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [b_n \cos(n\pi x/L)] \quad (3.17)$$

III.3.2 Funciones periódicas y espectro de amplitud.

Una función " f " se llama periódica si está definida para todo " t " real y para algún número positivo " T " (periodo de la función) de modo que:

$$f(t) = f(t + T) \quad \text{para todo " t "}. \quad (3.18)$$

El " T " mínimo de " f " se llama periodo principal o fundamental de " f ".

Cada función de la serie de Fourier tiene un periodo igual a 2L (T = 2L), por lo que se puede utilizar a la serie de Fourier de la derecha para definir f(t) para toda " t " real. Esta extensión se llama extensión periódica de " f " a toda recta real, (Fig. III.7).

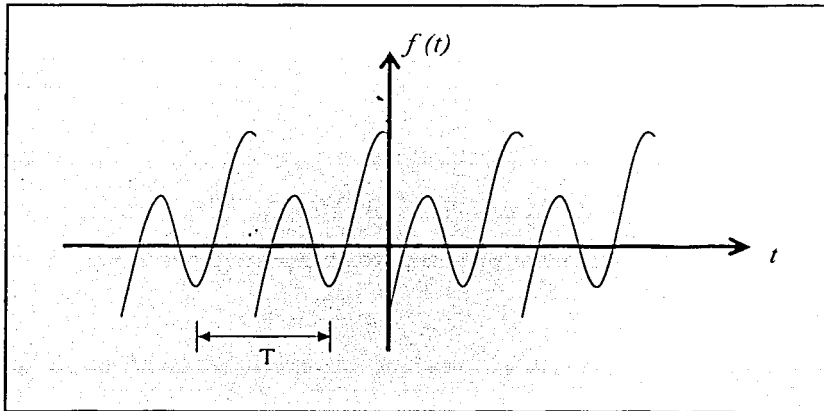


Figura III.7 Extensión periódica de " f " a toda recta real.

De : $T = 2L$, se tiene que : $L = T/2$ (3.19)

Y con : $\omega_0 = 2\pi/T$ (3.20)

$$a_0 = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} g(t) dt \quad (3.21)$$

$$a_n = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.22)$$

y

$$b_n = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad ; \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.23)$$

por lo tanto la serie queda:

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (3.24)$$

se escribe a menudo en forma de ángulo de fase o forma armónica como:

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \cos(n\omega_0 t + \delta)] \quad (3.25)$$

en donde:

$$C_n = (a_n^2 + b_n^2)^{0.5} \quad ; \quad \text{amplitud armónica} \quad (3.26)$$

$$\delta = \tan^{-1} (-b_n / a_n) \quad ; \quad \text{ángulo fase.} \quad (3.27)$$

Espectro de Amplitud:

C_0 para $n = 0 \rightarrow C_0 = |a_0|$ Vs frecuencia angular :

Si $n \geq 1 \rightarrow C_n / 2$ Vs $n\omega_0$

Sólo son puntos debido a que " n " toma únicamente valores enteros positivos.

A este espectro también se le conoce como Espectro lineal o Frecuencia discreta.

El espectro de amplitud permite "visualizar" la magnitud de cada una de las armónicas en las que se descompone la función periódica. (Fig. III.8)

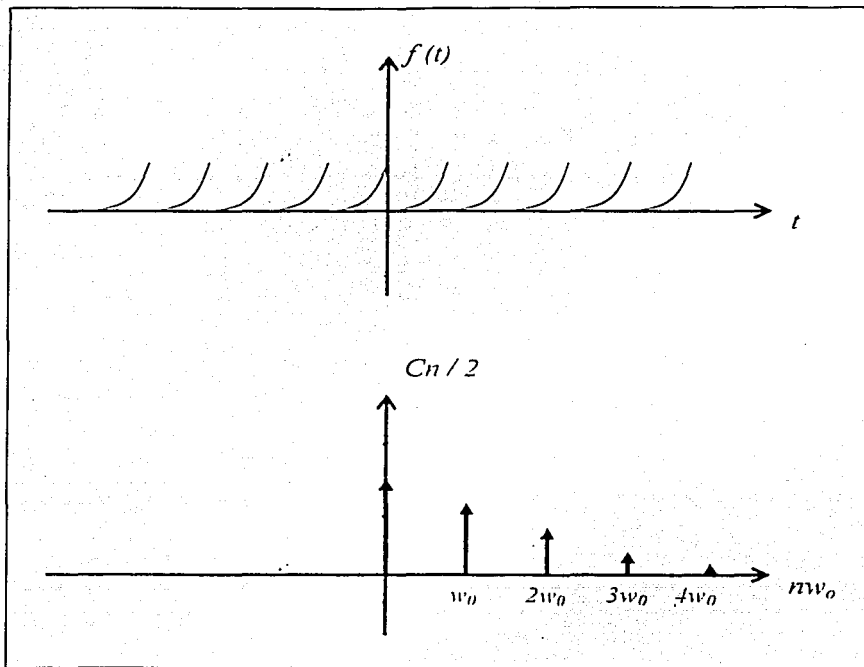


Figura III.8 Espectro de amplitud.

III.3.3 Serie Compleja y Espectros de Frecuencia.

De la ecuación de Euler se tiene que:

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \operatorname{sen}(\theta). \quad (3.28)$$

De donde:

$$\cos(n\omega_0 t) = (1/2)(e^{in\omega_0 t} + e^{-in\omega_0 t}) \quad (3.29)$$

$$\text{sen}(nw_0t) = (1/2i) (e^{inw_0t} - e^{-inw_0t}) \quad (3.30)$$

Por lo que la serie de Fourier queda definida como:

$$a_0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2} (a_n - i b_n) e^{inw_0t} + \frac{1}{2} (a_n + i b_n) e^{-inw_0t} \right] \quad (3.31)$$

si:

$$C_0 = a_0 = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt. \quad (3.32)$$

y, para $n = 1, 2, 3, \dots$

$$C_n = \frac{1}{2} (a_n - i b_n) = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-inw_0t} dt \quad (3.33)$$

por lo que la serie de Fourier en forma compleja queda definida como:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-inw_0t} \quad (3.34)$$

o en forma polar como:

$$C_n = r_n e^{i\theta_n} \quad (3.35)$$

El espectro de frecuencia (espectro de amplitud) de una función periódica f es la gráfica de las magnitudes de:

$$\begin{array}{l} C_n \text{ Vs } nw_0; \text{ como } |C_n| = r_n \\ r_n \text{ Vs } nw_0 \end{array}$$

Cuando una función está definida en toda recta real ó $[0, \infty]$ pero no es necesariamente periódica entonces la serie de Fourier se reemplaza por la integral de Fourier.

Sea " f " definida para todo real " t "; la integral de Fourier queda definida como:

$$(1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} [A(w) \cos(wt) + B(w) \text{sen}(wt)] dw \quad ; \quad (-\infty < t < \infty) \quad (3.36)$$

donde;

$$A(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos(w\xi) d\xi \quad (3.37)$$

y;

$$Bw) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \text{sen}(w\xi) d\xi \quad (3.38)$$

III.3.4 Transformada de Fourier.

El procedimiento de análisis transformado consiste fundamentalmente en realizar una operación convencional mediante una serie de pasos de menor grado de dificultad (Fig.III.9). Tal vez para una operación sencilla resulte similar o incluso más largo el método transformado, sin embargo, conforme el grado de dificultad del problema aumenta los beneficios de este saltan a la vista (Ref. 25).

La función principal de la transformada de Fourier consiste en descomponer o separar una señal o función en funciones armónicas a diferente frecuencia, las cuales corresponden a la suma de la función original, lo que permite identificar o distinguir diferentes frecuencias y sus respectivas amplitudes. Por lo que, la representación gráfica de la transformada de Fourier (Espectro de Fourier), es un análisis de la amplitud y la frecuencia de cada una de las sinusoidales encontradas dentro de la onda.

Dado que la integral de Fourier compleja de " f " en $(-\infty, \infty)$ esta dada por:

$$(1 / \pi) \int_{-\infty}^{\infty} C(w) e^{iwt} dw \quad (3.39)$$

donde;

$$C(w) = (1 / 2) \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) e^{-i w \xi} dw \quad (3.40)$$

La transformada de Fourier esta dada por:

$$\mathfrak{T} \{ f(t) \} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i \omega t} dt = F(\omega) \quad ; \quad (\text{puede ser compleja}). \quad (3.41)$$

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

$f(t)$ = Señal en el dominio del tiempo.

$$\omega = 2\pi / T \quad (3.42)$$

ω = Frecuencia (Hz).

T = Periodo.(s).

Ahora bien, la transformada inversa es:

$$f(t) = \mathcal{T}^{-1} \{ F(\omega) \} = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega . \quad (3.43)$$

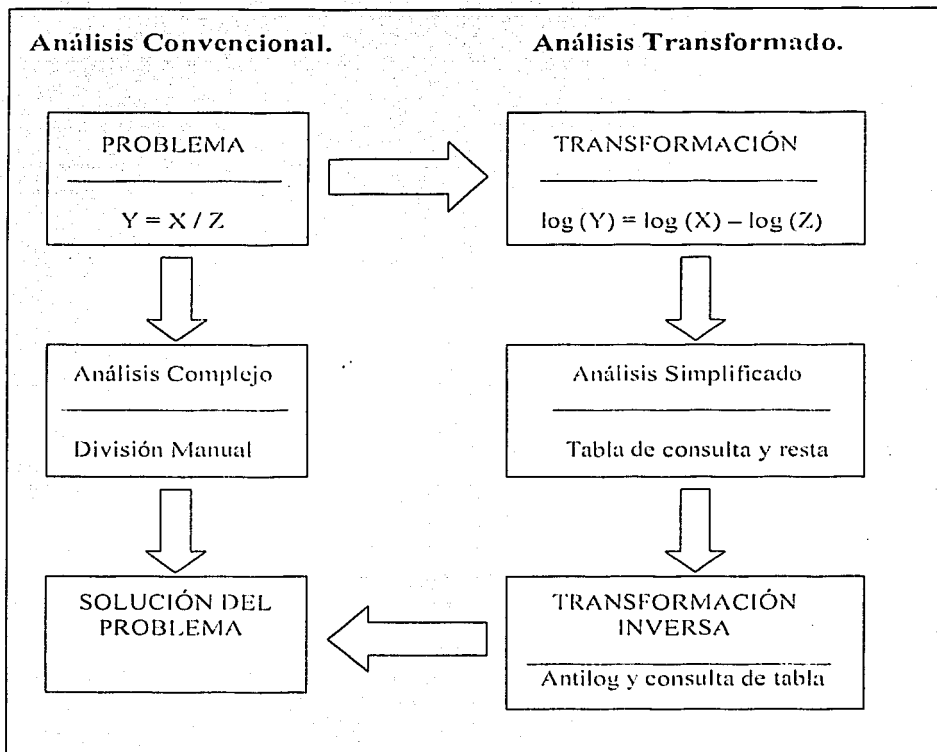


Figura III.9 Diagrama de Comparación Análisis Transformado (Ref. 25).

La transformada inversa de Fourier consiste en realizar la transformación inversa de una transformada de Fourier, con el objeto de encontrar la función que le dio origen.

El espectro de amplitud de " f " es la gráfica de la magnitud $|F(\omega)|$ de su transformada de Fourier contra la frecuencia variable " ω ".

Así como la serie de Fourier descompone una función periódica en un conjunto discreto de contribuciones de varias frecuencias (todas múltiplos de su frecuencia fundamental) la transformada de Fourier proporciona una resolución en frecuencias continuas de una función (posiblemente no periódica). Debido a lo anterior, el espectro de amplitud será una curva continua.

Por otro lado, al conjunto de dos ecuaciones se le denomina Par de transformadas de Fourier y su relación se indica:

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega).$$

Una aplicación del par de transformadas de Fourier se da con las funciones de muestras de tiempo, por ejemplo en funciones representadas como Series de Tiempo, una secuencia de valores discretizados en puntos equidistantes en el tiempo.

III.3.5 Transformada Discreta de Fourier (TDF).

El hecho de poder determinar el contenido de frecuencia de una señal analizando su transformada de Fourier hace de esta una herramienta para el análisis de señales. El mayor problema es evaluar el espectro continuo definido como una integral sobre un intervalo infinito (Número finito de operaciones siempre y cuando se salve la información crucial).

Debido a que las computadoras digitales solo trabajan con datos discretos, y el cálculo numérico de la transformada de Fourier da la posibilidad de hacer un muestreo tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, lo cual proporciona tanto a la señal de tiempo como al espectro de frecuencia una periodicidad implícita, que permitirá un número definido de muestras para su manejo más eficiente en el procesamiento de acelerogramas, pues como ya se dijo anteriormente se maneja la información a razón de 100 a 250 muestras por segundo según el equipo, se desarrolló la transformada discreta de Fourier (TDF), la cual es simplemente un algoritmo para aproximar numéricamente la transformada de Fourier.

como:
$$\mathcal{T}\{f\}(\omega) = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \tag{3.44}$$

La TFD (G):
$$G(2\pi n / NT) = T \cdot \sum_{k=0}^{N-1} f(kT) e^{-2\pi j n k / N} ; \tag{3.45}$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

$T > 0$; (periodo de muestreo).
 N = número de muestras (número entero positivo).
 k = coeficiente empleado para una serie de Fourier que representa espacios entre frecuencias iguales en la que $f_k = k f_1$ donde $f_1 = 1 / T$ (Ref.26).

G es una función periódica de periodo $2\pi / T$ que aproxima a la función F en el intervalo $[-\pi / T, \pi / T]$. Si F y G "casi" coinciden en los puntos $2\pi n / NT$ proporciona valores aproximados de F en N puntos igualmente espaciados, evaluando f en N puntos igualmente espaciados. La exactitud depende de T como del número de muestras usadas (N).

Ahora bien la transformada inversa de Fourier discreta (IFD), esta dada por:

$$g(kT) = 1 / NT \cdot \sum_{k=0}^{N-1} F(2n\pi / NT) e^{2nk i\pi / N} ; \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.46)$$

g(kT) da los valores de f(kT).

III.3.6 Transformada Rápida de Fourier (FFT).

No es en sí una transformada, sino un algoritmo que ayuda a reducir el tiempo requerido para evaluar la transformada discreta de Fourier. Funciona partiendo la señal completa en un número de subseñales más cortas y calculando la TDF de cada una de estas, posteriormente la FFT combina estas TDF para obtener la TDF de la señal original.

La transformada discreta de Fourier se adapta mucho mejor a las computadoras, pues esta compuesta por un número finito de sumas, sin embargo, para obtener N componentes de frecuencia de N muestras de tiempo, se requiere de N² multiplicaciones complejas. Por esta razón, se desarrolló el procedimiento conocido como Transformada Rápida de Fourier (TRF) o "Fast Fourier Transform" (FFT), la cual obtiene el mismo resultado con un número de multiplicaciones complejas del orden de N·log₂N.

Dado que:

$$\text{La TDF} = F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2nk i\pi / N} ; \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.47)$$

donde n / NT cambia por n y KT por K para simplificar operaciones.

$$\text{Si: } W = e^{-2i\pi / N} \quad (3.48)$$

Entonces:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W^{nk} ; \quad (3.49)$$

El procedimiento se llama "transformada rápida de Fourier en base 2. (TRF_{base2}), en sí, la transformada rápida de Fourier son métodos que explotan ideas como esta para reducir el número de operaciones requeridas para encontrar F(0), F(1), ..., F(N-1). (Ref. 24).

Suponga que "t" es proporcional al número de multiplicaciones, entonces la transformada rápida de Fourier realiza importantes ahorros en el tiempo de cálculo cuando el número de muestras es grande (N). (Fig. III.10).

Por otro lado, al aplicar la FFT a una señal se determina la relación de esta en un dominio de frecuencias. Al graficar esta relación se determina el espectro de Fourier (Ref.25), con él se puede hacer una adecuada selección del rango en el que se encuentran las altas y bajas

frecuencias, asociadas a otro tipo de fenómenos. Este espectro relaciona las amplitudes con el contenido de frecuencias de una señal, se calcula como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, mediante las siguientes expresiones:

$$| F(\omega) | = [R(\omega)^2 + j X(\omega)^2]^{1/2} \quad (3.50)$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (3.51)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sen(\omega t) dt \quad (3.52)$$

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

(ω) = Frecuencia (Hz).

$f(t)$ = señal en el dominio del tiempo.

$$j^2 = -1. \quad (3.53)$$

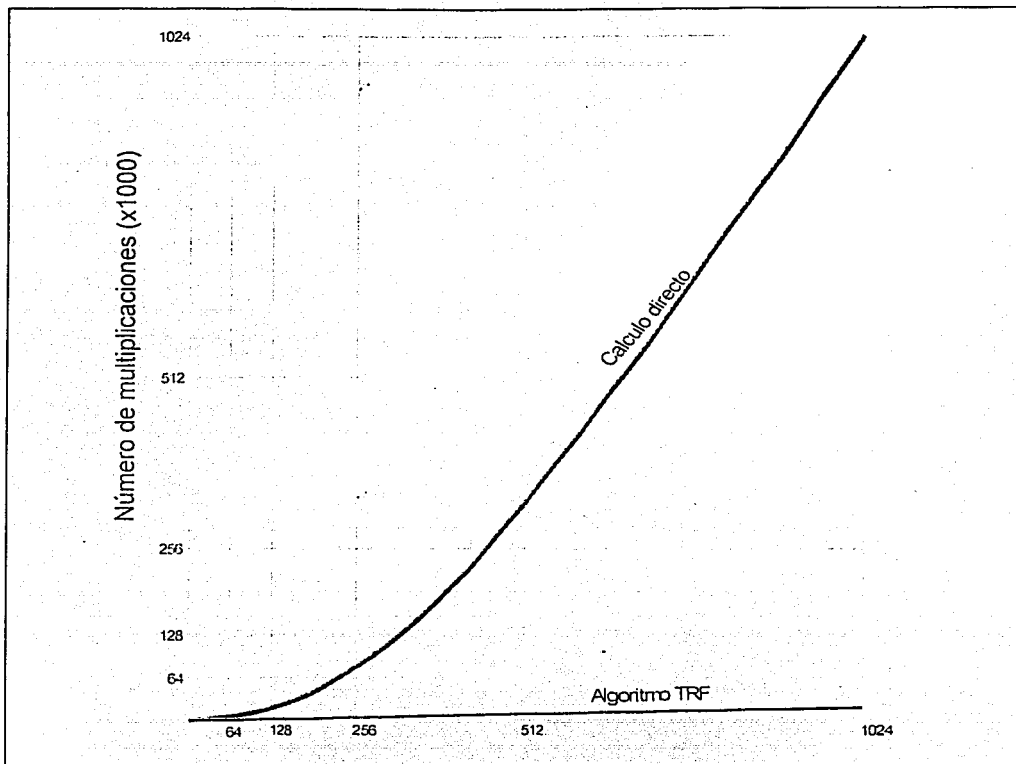


Figura III.10 Comparación de la reducción de operaciones y tiempo al aplicar la FFT (Ref. 24).

III.3.7 Espectros de Respuesta.

Conocidos los acelerogramas de los sismos es posible estimar la respuesta de una estructura en función del tiempo y, por consiguiente la respuesta máxima que puede ocurrir en un instante dado. Esto puede hacerse considerando que el comportamiento de la estructura será elástico en todo el evento o bien que se incursionará en el intervalo de comportamiento inelástico a partir de un cierto valor de deformación.

Algunas características importantes de las que depende la respuesta de la estructura son el amortiguamiento y la ductilidad que pueden desarrollarse. El amortiguamiento es una propiedad intrínseca de los materiales empleados, pero depende también de la forma en que se conecten los miembros estructurales y no estructurales. Valores de amortiguamiento relativamente pequeños reducen considerablemente la respuesta sísmica de las estructuras. En general, todo cuerpo que se encuentre en movimiento, tiende a reducir éste último conforme transcurre el tiempo, la razón de esta disminución está asociada con una pérdida de energía del sistema, la cual es producida por fuerzas de amortiguamiento o fricción que obran sobre el sistema. Es decir, la energía cinética o potencial se transforma en otras formas tales como calor o ruido. Las causas de este amortiguamiento están asociadas con diferentes fenómenos dentro de los cuales se puede contar la fricción de la masa sobre la superficie de apoyo, el efecto del aire que rodea la masa y la no-linealidad del material, entre otros. Existen varios tipos de amortiguamiento, (Ref. 27) entre los que se pueden señalar:

1. Viscoso: Un cuerpo que se encuentra en movimiento dentro de un fluido tiende a perder energía debido a que la viscosidad del fluido se opone al movimiento.
2. Coulomb: Corresponde al fenómeno físico de fricción entre superficies secas.
3. Histerético: La histéresis es un fenómeno por medio del cual dos o más propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. Este tipo de amortiguamiento se presenta cuando el elemento estructural es sometido a inversiones en el sentido de la carga aplicada.

Por otro lado, se conoce como amortiguamiento crítico el que tiene un sistema cuando, al aplicarle un desplazamiento y soltarlo no oscila sino que regresa a su posición inicial de equilibrio. Las estructuras suelen tener amortiguamiento del orden de 3 al 10 % del crítico, siendo menor el de las estructuras metálicas, soldadas y sin recubrir, y mayor el de las estructuras de mampostería, con gran número de juntas.

Ahora bien, la ductilidad de las estructuras es la propiedad que presentan para soportar grandes deformaciones inelásticas sin faltar ni reducir su capacidad de carga. Depende en gran medida de los materiales empleados y de los cuidados que se tienen al diseñarlas.

Una vez definidos los conceptos de amortiguamiento y ductilidad, se puede retomar a los espectros de respuesta, sabiendo que la gráfica que relaciona las respuestas máximas de distintos sistemas de un grado de libertad sometidos a una misma excitación con sus periodos de oscilación recibe el nombre de espectro de respuesta. Según el tipo de comportamiento que se haya considerado se tendrán espectros de respuesta elásticos o espectros de respuesta inelásticos.

Normalmente estos espectros se obtienen suponiendo que las estructuras tienen distintos valores del porcentaje del amortiguamiento crítico, pues, como se dijo antes, un pequeño valor de este es suficiente para reducir considerablemente la respuesta. Los valores empleados normalmente en cálculos de este tipo son 0, 2, 5, 10 y 20 % del amortiguamiento crítico.

El tipo de terreno en que se haya obtenido el acelerograma es muy importante, pues las características dinámicas de la excitación varían en función de esto. Sabemos que, en suelos firmes las vibraciones son rápidas, mientras que en suelos blandos las oscilaciones son de menor frecuencia, esto es, su período de oscilación es relativamente más largo. Esto modifica la forma de los espectros de respuesta. Las respuestas que suelen obtenerse son **desplazamientos, velocidades o aceleraciones**, pues a partir de ellas se pueden calcular

cualquier efecto que desee conocer en la estructura, como por ejemplo momentos de volteo en la base, fuerzas cortantes en cualquier nivel, esfuerzos en alguna sección, etc., además, son una herramienta para la generación de los espectros de diseño.

III.3.8 Análisis de los resultados

El espectro de Fourier aplicado al estudio de los acelerogramas, es una técnica que permite analizar el contenido de frecuencias de los movimientos del terreno, producidos por la propagación de las ondas sísmicas a través de este y relacionándolos con su correspondiente valor de amplitud. Además, con los espectros de Fourier es posible determinar relaciones denominadas como *Funciones de Transferencia*, las cuales son útiles para inferir la variación del movimiento sísmico de un sitio a otro, cuando la señal se propaga y filtra a través de los diferentes estratos de suelo. Dichas funciones, se calculan por medio de los cocientes espectrales de Fourier, lo que permite establecer los niveles de amplificación o atenuación con respecto a un sitio determinado.

En las figuras III.11 a III.16 se muestran los espectros de Fourier calculados para cada uno de los sismos importantes registrados en la RACO. Se puede deducir que las amplitudes máximas se encuentran oscilando en el rango de frecuencias comprendido entre 2 a 10 Hz. Se observa también, que para las estaciones de OXAL y OAXM se tiene un corrimiento en el canal vertical por lo que las amplitudes máximas se localizan en el rango de 4 a 15 Hz.

Ahora bien, para las estaciones OXLC y OXPM, se tienen espectros con formas uniformes, es decir, no presentan picos en alguna frecuencia determinada, para el caso de la estación OXLC se tienen amplitudes máximas dentro de un rango de 1 a 5 Hz, en cuanto a OXPM se observa un corrimiento en sus tres canales hacia la derecha por lo que presenta amplitudes máximas oscilando en un rango de 3 a 15 Hz.

Por último, un dato interesante que se observa es que la estación OXTO registró el mayor número de eventos, presentando amplitudes máximas dentro de un rango de 2 a 10 Hz mismo rango dentro del cual oscilan las amplitudes máximas de la estación OXCU.

Analizando los espectros de Fourier (Fig. III.17 a III.19) se visualizan 3 sismos diferentes registrados por 4 estaciones o más pertenecientes a la RACO, a continuación se describe el comportamiento general de las estaciones para cada evento.

El sismo del 06 de noviembre de 1999 fue registrado por 5 de las 6 estaciones que integran la RACO, se puede deducir que las amplitudes máximas se encuentran oscilando en el rango de frecuencias de 2 a 10 Hz. Cabe destacar que en la estación OAXM se observa un corrimiento sobre el canal vertical, así como la presencia de hasta 3 picos máximos que caen dentro del rango de frecuencias antes mencionado. El 19 de enero del año 2000 ocurrió otro sismo de igual magnitud, este fue registrado por las estaciones OXTO, OXPM, OAXM y OXLC, de igual forma, las amplitudes máximas oscilan en el rango de 2 a 10 Hz presentando para la estación OAXM picos máximos en las frecuencias de 4 a 6 Hz misma situación que se presentó en el sismo del 6 de noviembre de 1999, así también, para la estación OXTO se tienen para los dos sismos amplitudes máximas en el rango de 2 a 6 Hz Por otro lado, la estación OXPM registra sus amplitudes máximas entre 4 y 8 Hz de frecuencia y, en cuanto a la estación OXLC, instalada sobre roca, presenta amplitudes máximas en un rango de frecuencias mejor definido,

entre 2 y 10 Hz tomando una forma más uniforme sin presentar picos en una frecuencia determinada.

Otro de los sismos que proporciona datos interesantes fue el del 01 de marzo del año 2000, registrado nuevamente por 5 de las 6 estaciones instaladas en la RACO, en el se puede observar que las amplitudes máximas se registraron en las estaciones de OXCU y OAXM entre el rango de 2 a 8 Hz de frecuencia, similar al rango en el que fluctúan las amplitudes máximas de las 3 estaciones restantes que registraron este evento.

Dados los resultados anteriores, se puede señalar que la estación que presenta las menores amplitudes como era de esperarse, es OXLC debido a que se encuentra instalada sobre roca, seguida por OXAL y OXPM, las dos últimas instaladas en suelo blando, dichas estaciones presentaron amplitudes máximas entre 0.5 y 3.6, mientras que las estaciones de OXCU, OXTO y OAXM alcanzan amplitudes entre 6 y 9 cm/s.

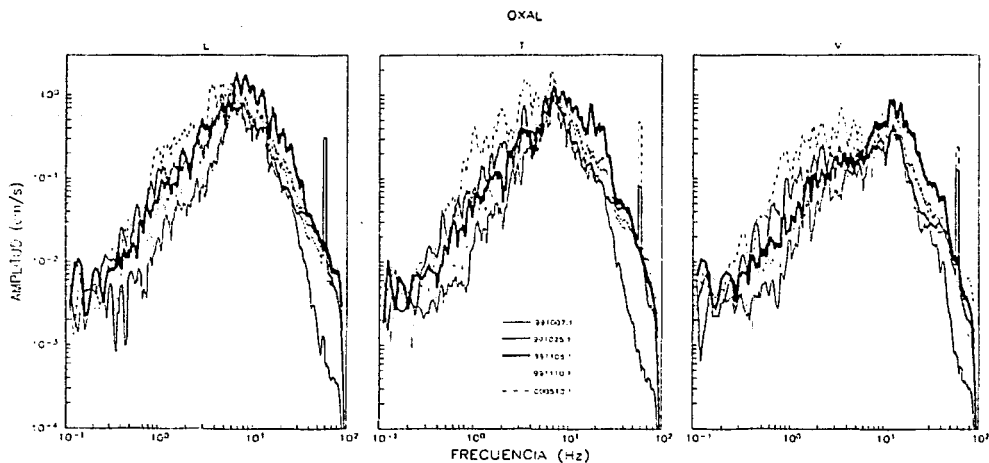


Figura III.11 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OXAL.

TESIS CON
FOLIO DE ORIGEN

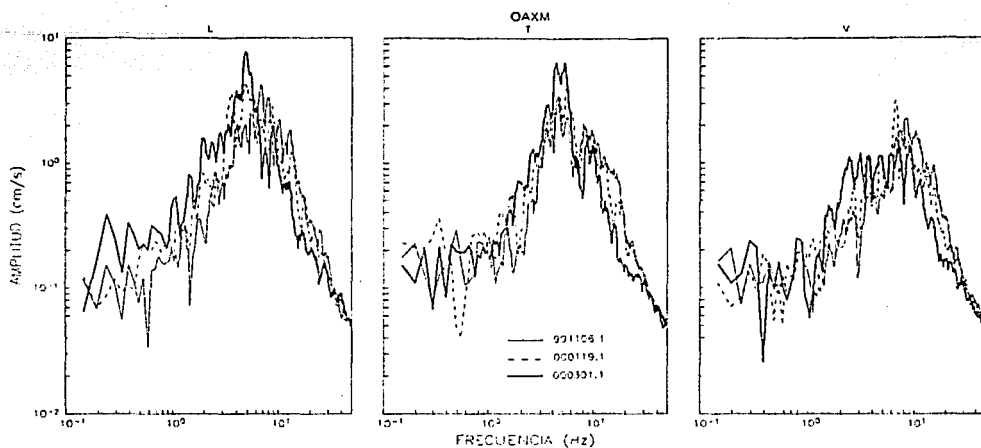


Figura III.12 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OAXM.

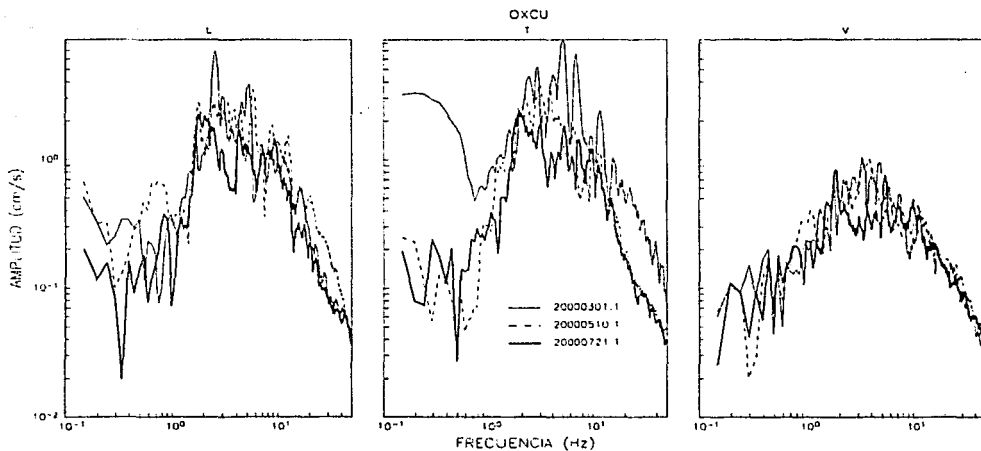


Figura III.13 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OXCU.

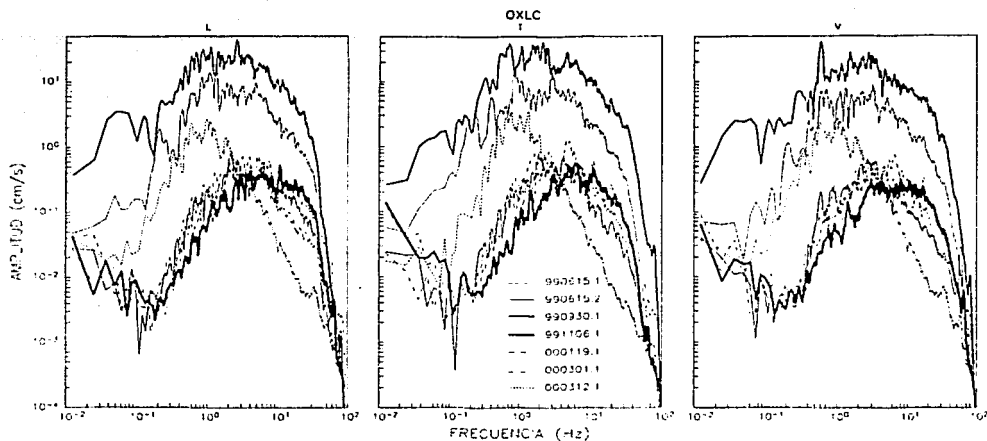


Figura III.14 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OXLC.

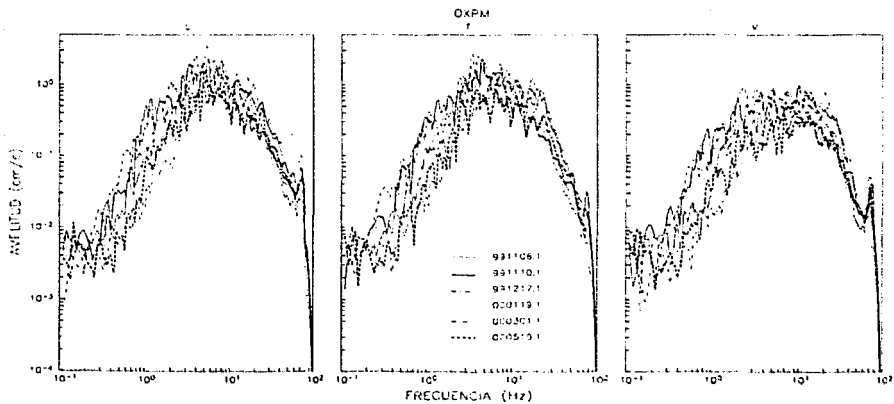


Figura III.15 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OXPM.

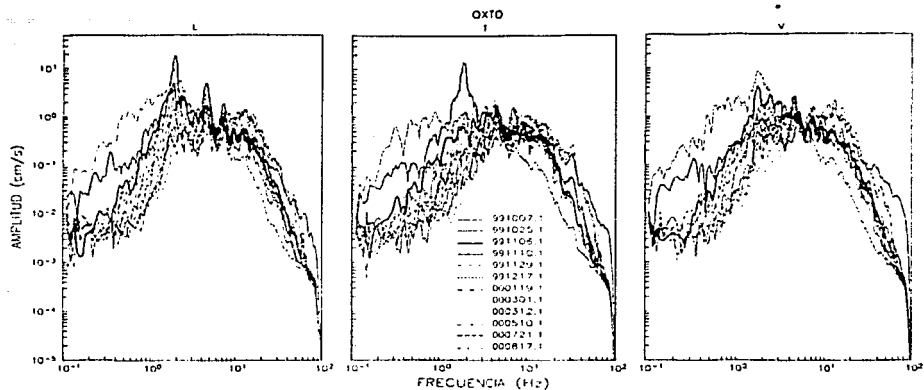


Figura III.16 Espectros de Fourier de sismos registrados en la estación OXTO.

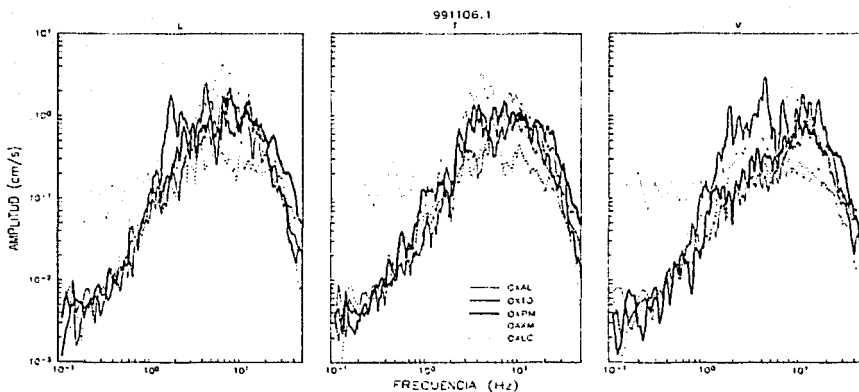


Figura III.17 Espectros de Fourier sismo del 6 de noviembre de 1999.

FALTA

PAGINA

71

Por otro lado, en las figuras III.20 a III.24 se muestran los espectros de respuesta correspondientes a los sismos registrados en la RACO para valores del 5% de amortiguamiento crítico. En estas figuras se tiene que las respuestas máximas oscilan en un rango de 0.1 a 0.5 s, además se observa que para la estación OXAL aparece un pico importante en el canal transversal para un periodo de 0.05 s.

Ahora bien, se pueden observar respuestas mejor definidas en cuanto a forma para las estaciones OXLC y OXPM cuyas respuestas máximas oscilan en un rango de 0.2 a 0.8 s para la estación OXLC y 0.05 a 0.3 para OXPM. Así mismo, cabe mencionar que la estación OXTO presenta muchos picos sin embargo todos ellos fluctúan en un rango definido de 0.1 a 0.5 s.

De igual forma que en el análisis de los espectros de Fourier, se tomaron los sismos ocurridos el 06 de noviembre de 1999, el 19 de enero de 2000 y el 01 de marzo de 2000, debido a que estos, fueron registrados por al menos 4 estaciones de la RACO. Dichos registros fueron estandarizados dividiendo cada punto de la señal entre la aceleración del terreno, ya que el primer punto observado al graficar un espectro de respuesta corresponde a la aceleración del terreno donde se encuentra desplantada la estación. Una vez normalizados los espectros de respuesta, se percata con mayor claridad del rango donde se localizan las mayores amplitudes y así conocer los periodos dominantes para cada estación en particular (Fig. III.25 a III.27).

Se observa que, para el sismo ocurrido el 06/11/1999 la estación OXAL alcanzó amplitudes de hasta 4.5 cm/s^2 para un periodo de 0.05 s aproximadamente, su periodo dominante oscila entre 0.06 a 0.12 s, mismo periodo que se presenta para el caso de la estación OXPM, la cual presentó una amplitud máxima de 4.2 cm/s^2 para un periodo de 0.12 s, aunque es bueno señalar que se presentaron algunos picos en las componentes horizontales entre 0.1 y 0.3 s.

La estación OXTO, también registró dicho evento teniendo valores de amplitud máxima de hasta 4.2 cm/s^2 para un periodo de 0.09 s, su periodo dominante oscila entre 0.08 a 0.25 s, sin embargo, presenta variaciones importantes por encima de 0.3 s mismas que serán evaluadas posteriormente. Otra de las estaciones que registró este sismo fue OAXM, para la cual se presentaron amplitudes máximas en un rango mejor definido alrededor de 0.12 a 0.2 s. Por último, para la estación OXLC instalada sobre roca, se presentó un periodo dominante para dicho temblor de 0.04 a 0.15 s, con amplitudes por debajo de 4 cm/s^2 .

Así también, para el sismo ocurrido el 19/01/2000 se presentaron valores similares a los obtenidos en cada una de las estaciones que registraron el evento anterior, como por ejemplo para la estación OXPM que presenta un periodo dominante de 0.06 a 0.1 s, pero conservando algunos picos en los periodos de 0.2 a 0.3 s, de igual forma, la estación OXTO conservó su periodo dominante de 0.08 a 0.25 s. Al otro lado de la ciudad, la estación OAXM registró amplitudes máximas en el rango de 0.1 a 0.2 s, teniendo su valor máximo en un periodo definido de 0.18 s. Finalmente para la estación OXLC se obtuvo un periodo dominante entre 0.05 a 0.2 s.

Otro de los sismos analizados para el calculo de los espectros de respuesta fue el del 01/03/2000, registrado por 4 estaciones de la RACO, de las que destaca la estación OXCU localizada al sur de la ciudad, fue instalada sobre un terreno arcilloso y no había registrado ninguno de los dos temblores analizados anteriormente. Esta estación, presentó un periodo dominante de 0.12 a 0.4 s, como se puede observar, es un margen bastante amplio. sin embargo, es importante compararlo con respecto a una estación instalada en roca, como es el caso de OXLC para obtener mayor información al respecto.

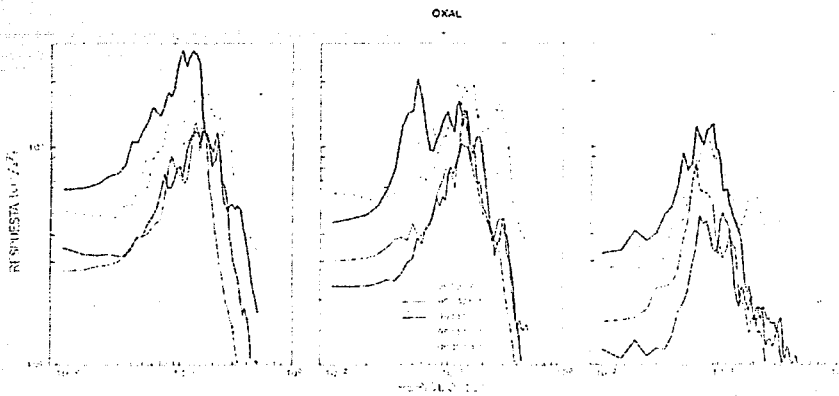


Figura III.20 Espectros de Respuesta de sismos registrados en la estación OXAL.

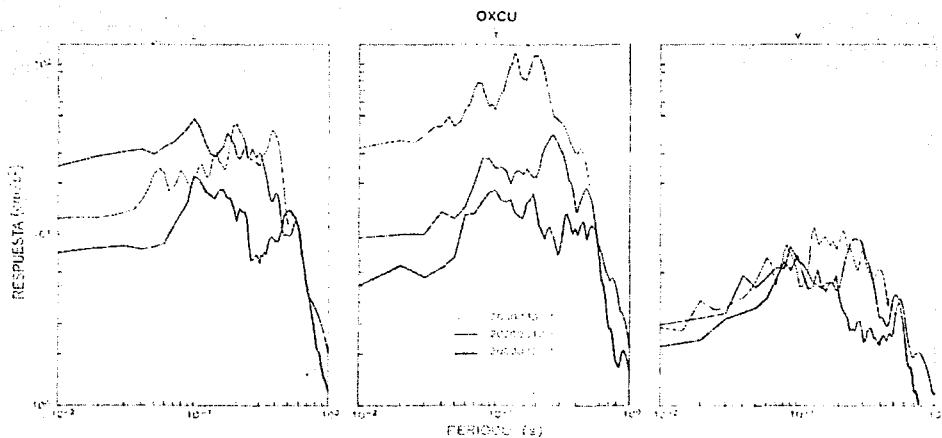


Figura III.21 Espectros de Respuesta de sismos registrados en la estación OXCU.

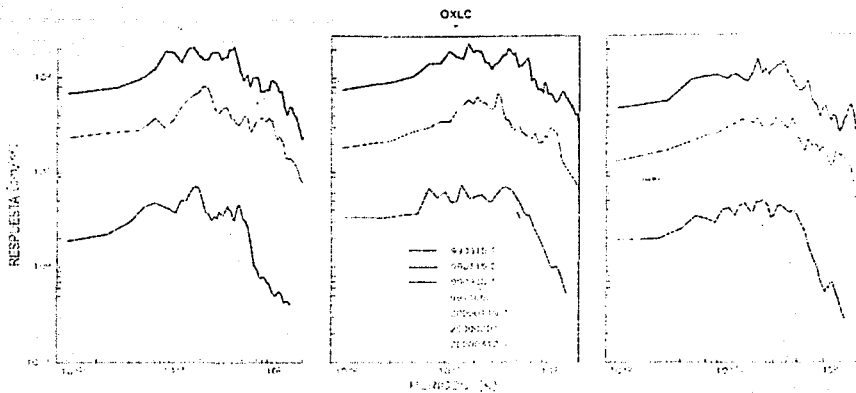


Figura III.22 Espectros de Respuesta de sismos registrados en la estación OXLC.

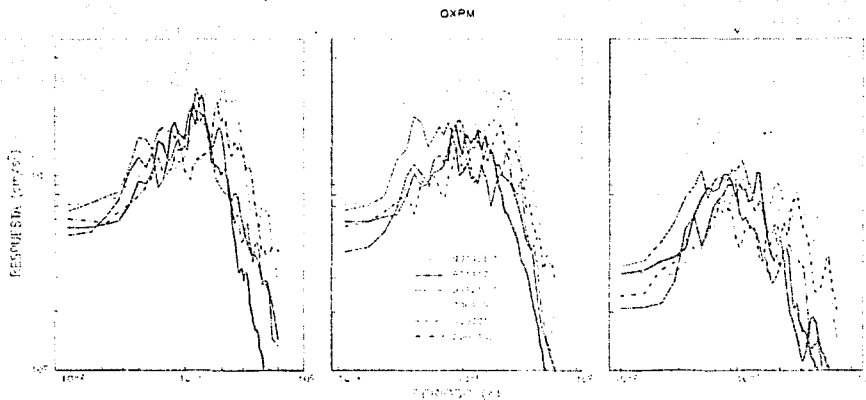


Figura III.23 Espectros de Respuesta de sismos registrados en la estación OXPM.

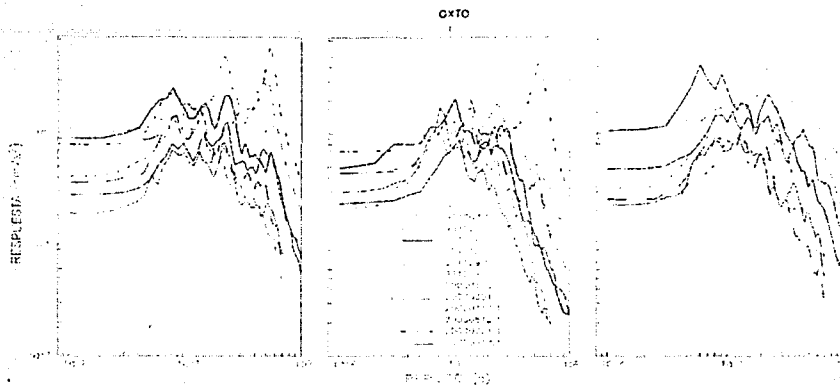


Figura III.24 Espectros de Respuesta de sismos registrados en la estación OXTO.

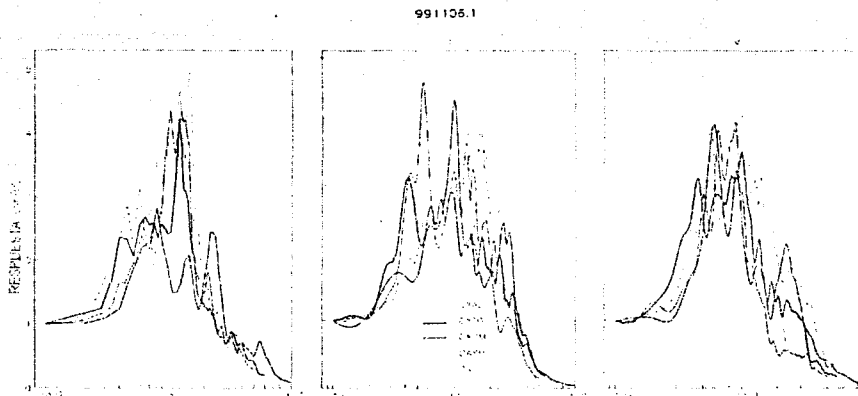


Figura III.25 Espectros de Respuesta normalizados, sismo del 6 de noviembre de 1999.

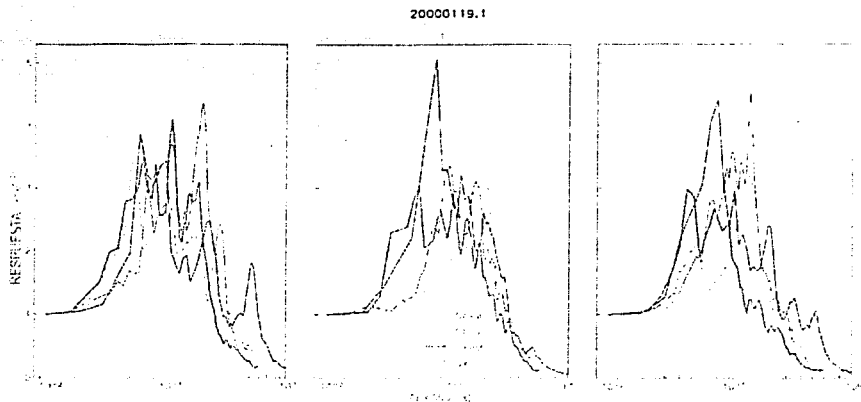


Figura III.26 Espectros de Respuesta normalizados, sismo del 19 de enero de 2000.

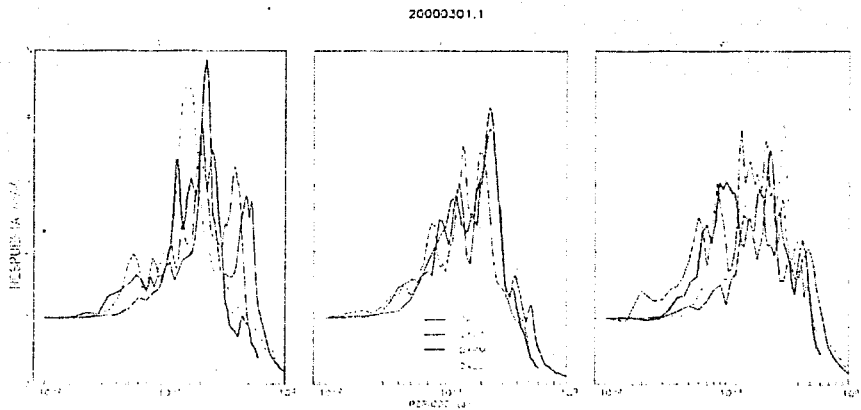


Figura III.27 Espectros de Respuesta normalizados, sismo del 1 de marzo de 2000.

Continuando con otra de las estaciones que registró este evento, se encuentra OXTO, la cual tiene sus mayores amplitudes entre 0.12 a 0.2 s, pero presenta amplitudes importantes entre 0.4 y 0.6 s. Para la estación OXPM se tienen amplitudes máximas entre 0.12 a 0.2 s y de igual forma, se observan variaciones interesantes entre los 0.4 y 0.6 s. Por último, la estación OXLC presenta un periodo bien definido alrededor de 0.15 s, aunque cabe destacar que en el canal vertical se observa una amplitud máxima de hasta 4 cm/s^2 para un periodo de 0.3 s.

III.4 Funciones de Transferencia

Con la finalidad de cuantificar los niveles de amplificación local se calcularon las funciones de transferencia tomando como referencia el espectro de Fourier del sitio OXLC, ubicado sobre roca. Se determinaron dichas funciones para los sismos 06/11/1999, 19/01/2000 y 01/03/2000 en los sitios OXAL OXCU, OXPM, OXTO y OAXM. En las figuras III.28 a III.32 se presentan los resultados obtenidos.

El análisis y procesado de registros de aceleración fueron realizados haciendo uso del programa DEGTRA6. Al igual que para el cálculo de los espectros de Fourier, se utilizó un filtro de 0.01 a 30 Hz y un suavizado de la señal de 9.

Ahora bien, comenzando por la estación OXAL, se observa que para el sismo del 06/11/1999 amplifica 7 veces en un rango de frecuencias de 7 a 9 Hz, es decir, en un periodo de 0.11 a 0.14 s mismo que corrobora su periodo dominante señalado anteriormente. En la estación OXCU se alcanzan amplificaciones de hasta 30 veces con respecto a OXLC en un rango de frecuencias de 6 a 8 Hz, sin embargo se presentan también, variaciones importantes que alcanzan amplificaciones de hasta 20 veces en el rango de 2.5 a 4 Hz de frecuencia, verificando con esto un periodo dominante de 0.3 a 0.4 s. Por otro lado la estación OXPM registró los tres eventos analizados, presentando niveles de amplificación de hasta 10 veces con respecto a OXLC en un rango no muy definido de frecuencias entre 4 a 18 Hz, sin embargo se puede señalar que alrededor de los 4 y 8 Hz se tienen niveles de amplificación importantes por lo que su periodo dominante oscila entre 0.12 y 0.25 s.

En cuanto a la estación OXTO, al igual que OXPM, registró los tres sismos teniendo como resultado amplificaciones de hasta 24 veces para 2 Hz de frecuencia, cabe destacar que presenta otro pico similar a 4 Hz de frecuencia y algunos picos pequeños a frecuencias mayores, por lo que se puede deducir que su periodo dominante oscila entre 0.25 a 0.5 s. Por último, la estación OAXM registró los dos primeros temblores para los cuales presentó una amplificación máxima de 18 veces con respecto a OXLC a 4 Hz de frecuencia sobre el canal longitudinal, también se observan valores de amplitudes máximas entre 7 a 9 Hz de frecuencia, resultando así un periodo dominante entre 0.11 a 0.25 s.

Debido a lo anterior podemos definir que las mayores amplificaciones se tienen en la estación OXCU, seguida por OXTO y OAXM instaladas sobre suelos más blandos (limos, arenas y gravas). Posteriormente, se encuentran las estaciones OXPM y OXAL con amplificaciones mucho menores que en las demás estaciones.

Evidentemente, estos son resultados preliminares y será necesario esperar la ocurrencia de eventos que produzcan mayores intensidades del movimiento en estos sitios para poder establecer una mejor definición de estas funciones de transferencia.

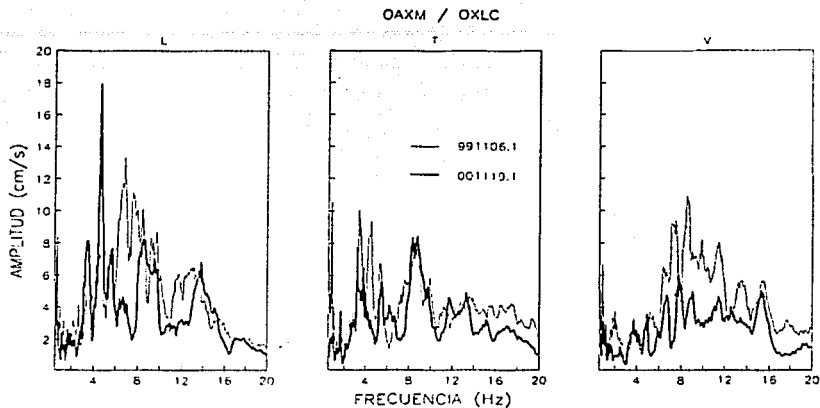


Figura III.28 Funciones de Transferencia para los sismos del 6/11/1999 y 19/01/2000, entre las estaciones OAXM y OXLC.

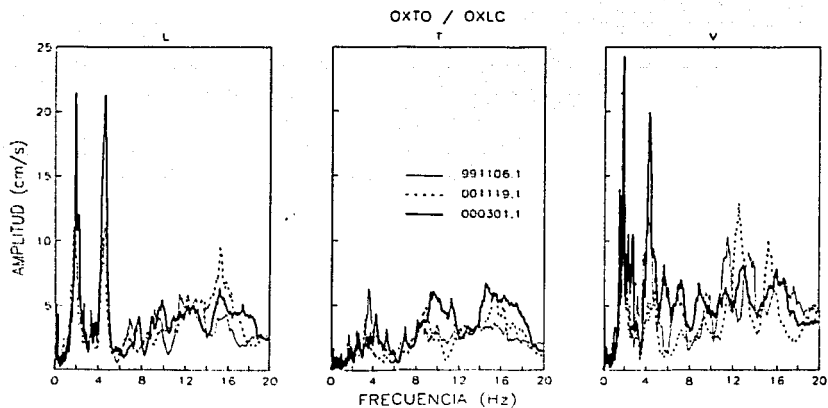


Figura III.29 Funciones de Transferencia para los sismos del 6/11/1999, 19/01/2000 y 01/03/2000, entre las estaciones OXTO y OXLC.

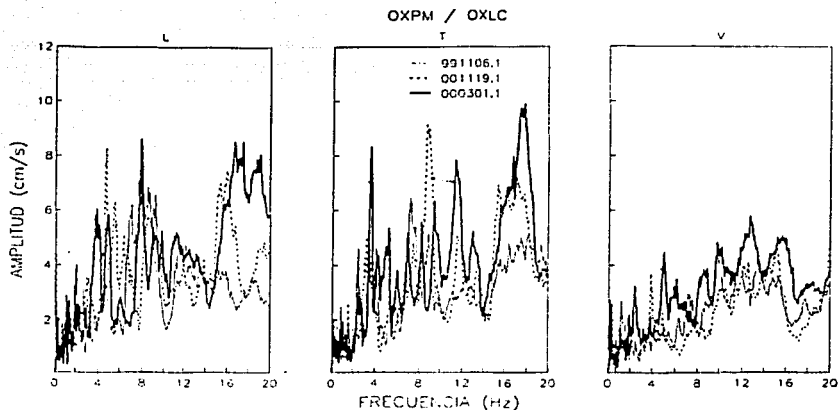


Figura III.30 Funciones de Transferencia para los sismos del 6/11/1999, 19/01/2000 Y 01/03/2000, entre las estaciones OXPM y OXLC.

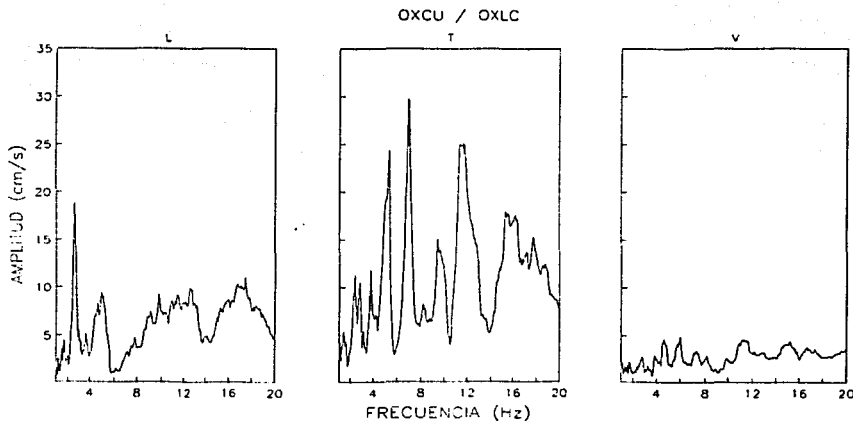


Figura III.31 Función de Transferencia para el sismo del 01/03/2000, entre las estaciones OXCU y OXLC.

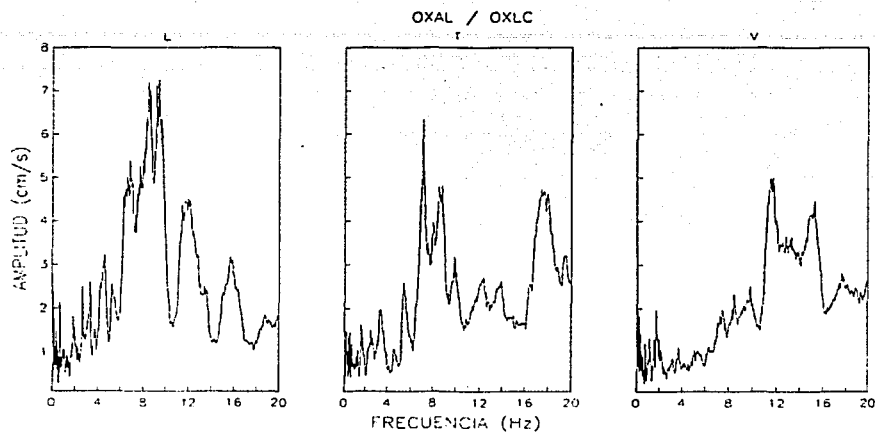


Figura III.32 Función de Transferencia para el sismo del 6/11/1999, entre las estaciones OXAL y OXLC.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Conclusiones

- El estado de Oaxaca, se encuentra en una zona donde el fenómeno de subducción, la ocurrencia de sismos continente adentro, las fallas geológicas activas y el riesgo latente que significan las brechas sísmicas lo hacen uno de los estados de mayor actividad y potencial sísmico, lo cual es una situación por demás preocupante debido a que en cualquier momento puede dar lugar a sismos de gran intensidad, que provocarían graves daños tanto al ser humano como al entorno que habita. Dado lo anterior, es imperativo contar con una apropiada instrumentación sísmica en toda la región, con la finalidad de realizar estudios que permitan una mejor comprensión del fenómeno sísmico, y así mitigar sus efectos.
- Es necesario realizar estudios detallados del subsuelo de la ciudad de Oaxaca, debido a que se cuenta con poca información estratigráfica, principalmente cerca de los ríos Atoyac, Jalatlaco y Donají, ya que cruzan la ciudad y esto representa un cambio estratigráfico. así como variaciones en sus causas a lo largo del tiempo, además dicha zona ha sido siempre la más afectada con la presencia de actividad sísmica.
- El establecimiento de la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca, es parte de un proyecto global que también integran la infraestructura sísmica de la costa de Oaxaca y la línea de atenuación de Puerto Ángel. El proyecto permitirá realizar investigaciones sobre el fenómeno sísmico que tienen relación con su origen en las costas oaxaqueñas, la propagación de las ondas sísmicas tanto en dirección paralela a la costa como continente adentro, la atenuación sufrida al arribar la señal sísmica a núcleos poblacionales como las ciudades de Oaxaca y Puebla y finalmente la amplificación del movimiento sísmico al filtrarse las ondas sísmicas en los diferentes estratos del subsuelo.
- La Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca está integrada por siete estaciones, de las cuales seis se encuentran sobre diferentes tipos de suelo y una en roca. El número y calidad de los registros obtenidos refleja un estado óptimo de operación de la misma debido a los rigurosos programas de operación y mantenimiento. Entre las mejoras que deberán implementarse a corto y mediano plazo se pueden señalar: a) la sustitución de los equipos de registro en casete, b) la implementación de un sistema de monitoreo remoto y

la más importante, c) la expansión de la red hacia el sur de la ciudad en donde se experimenta un mayor crecimiento demográfico sobre depósitos compresibles de suelo. Por otra parte sería importante considerar instrumentar estructuras de reciente construcción así como algunos monumentos históricos.

- Del análisis de los espectros de Fourier se concluye que los máximos valores de amplitud varían entre 0.5 y 9 cm/s dentro de un rango de frecuencias comprendido entre 2 y 10 Hz, así también, se puede señalar que la estación que presenta las menores amplitudes es OXLC, seguida por OXAL y OXPM, mientras que las estaciones OXCU, OXTO y OAXM alcanzan amplitudes de hasta 6 y 9 cm/s.
- De los espectros de respuesta correspondientes a los sismos registrados se observa que las respuestas máximas oscilan entre 2 y 5 cm/s² para un periodo de 0.04 a 2 s, aunque es bueno señalar que se presentaron algunos picos en los periodos de 0.2 a 0.3 s, así como en el rango de 0.4 a 0.6 s.
- Con los resultados obtenidos de las funciones de transferencia se deduce que las mayores amplificaciones con respecto a la roca se tienen en la estación OXCU, seguida por OXTO y OAXM instaladas sobre suelos más blandos (limos, arenas y gravas). Las estaciones OXPM y OXAL presentan amplificaciones menores, lo cual resulta lógico debido a estar desplantados sobre arenas y gravas.
- Estos son resultados preliminares, es necesario esperar eventos que produzcan mayores intensidades para poder establecer una mejor definición de las funciones de transferencia y con base en ello generar funciones de transferencia empíricas; así como determinar con mayor precisión los efectos locales ante la ocurrencia de eventos sísmicos y contribuir a la zonificación sísmica de la ciudad de Oaxaca.

Referencias

1. Lett D. Y Judson S, "Fundamentos de geología física", LIMUSA, México, (1989).
2. Vladimir V, *et al*, "El redescubrimiento de la tierra", CONACYT, México DF, (1982).
3. Suárez G y Jiménez Z, "Sismos en la ciudad de México y el terremoto del 19 de septiembre de 1985", Cuadernos del Instituto de Geofísica, No. 2, UNAM, México, (1987).
4. Espíndola J M y Jiménez Z, "Terremotos y ondas sísmicas", Cuadernos del Instituto de Geofísica, UNAM, vol, 1, México DF, (1994).
5. Nava A, "Terremotos", La ciencia para todos, No, 34, SEP, Fondo de Cultura Económica, CONACYT, México DF, (1998).
6. Flores E, "Sismicidad en Pinotepa Nacional, Oaxaca" , Tesis de Licenciatura, UNAM, México, DF, (1996).
7. "Monografía Geológico – Minera del estado de Oaxaca, Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), primera edición (1996).
8. Z. De Cserna, "Tectonic map of México", The geological Society of America.
9. León J, "Información general acerca del subsuelo de 17 ciudades de México", Oaxaca, Oax, VIII reunión nacional de mecánica de suelos, tomo II, (1976).
10. Alcántara L, *et al* , "sismo del ángel"...
11. Fundación ICA AC, "Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985", LIMUSA, México, (1988).
12. Guevara E, "El sistema de registro de la Red Sismológica Nacional", Curso de Instrumentación Sísmica (Aplicaciones prácticas en las estructuras), Colegio de Ingenieros civiles de México A.C y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, (1997).
13. Alcántara L, *et al* , "Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la ciudad de Puebla", Informe del primer año de avance elaborado para CONACYT, Instituto de Ingeniería, UNAM, (1999).
14. Alcántara L, *et al* , "Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la ciudad de Puebla", segunda etapa, Instituto de Ingeniería, UNAM, (Julio 2000).

-
15. Nishenko S P y Singh S K, "Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican Subduction zone" Bull. Seismol. Soc. AM., 77, 2095-2114, (1987).
 16. Lermo J, *et al*, "Microzonificación Sísmica y análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca (primera parte)", Informe elaborado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres, México DF, (1991).
 17. Aguilar J, "Características de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica", Curso de Instrumentación Sísmica (Aplicaciones prácticas en las estructuras), Colegio de Ingenieros civiles de México AC y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, México DF, (1997).
 18. Velasco J, "Especificaciones técnicas de los equipos de registro", Curso de Instrumentación Sísmica (Aplicaciones prácticas en las estructuras), Colegio de Ingenieros civiles de México AC y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, México DF, (1997).
 19. Carmona G, "Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca", Tesis de Licenciatura, UNAM, México, D.F, (2000).
 20. Quaas R, *et al*, "Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes Catálogo de Estaciones Acelerográficas 1960 - 1992", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, México, (1993).
 21. Quaas R, *et al*, "The Mexican Standard Acceleration File", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, México, (1996).
 22. Mendoza M, "Instrumentación Sísmica para Registro de Temblores Fuertes", Tesis de licenciatura, facultad de Ingeniería, UNAM, México, (1993).
 23. Mena E, Carmona C, "TERRE: Sistema para Proceso de Acelerogramas", Vol II; Publicación SIS-4 del Catálogo de las Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (1987).
 24. Análisis de Fourier...
 25. Bringham E O, "the Fast Fourier Transform", Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, (1974).
 26. Randall R B, Tech B A, "Application of B & K Equipment to Frequency Análisis", september, (1977).
 27. García L E, "Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico", Universidad de los Andes, Bogota, Colombia, (1998).
 28. Meli, R. Bazan, Enrique, (1999), "Diseño sísmico de edificios", LIMUSA, México. D.F.