



48 01149



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

**MEDIO AMBIENTE SÍSMICO DE CAMPO LIBRE PARA EL SITIO
DE TEXCOCO**

Xavier Fernando Vera Grunauer

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE
ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(GEOTECNIA)**

Director de tesis: Dr. Miguel P. Romo Organista

Ciudad Universitaria

Abril, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi Padre, por darme la oportunidad de realizar la maestría y ser para mí un modelo de integridad y profesionalismo

A mi Madre, por estar siempre conmigo

A mi esposa Evelyn y mis hijos, Xavier y Juan Andrés, por ofrecerme su apoyo incondicional durante mis estudios

A mis Hermanos, siempre en mis pensamientos

A la memoria de mi Mamina, con todo mi corazón

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Miguel P. Romo Organista por su atinada dirección durante el desarrollo de este trabajo de tesis, por su paciencia en la revisión del texto y por compartir sus conocimientos académicos.

Le doy las gracias a cada uno de los sinodales: Dr. Gabriel Auvinet, Dr. Efraín Ovando, Dr. Victor Taboada y Dr. Rigoberto Rivera, por los consejos durante la revisión de esta tesis.

Este estudio se llevó acabo dentro del proyecto patrocinado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares, ASA. Agradezco al Arq. Ernesto Velasco León (Director General de ASA) y al Ing. Ricardo Tapia Ruiz (Director de proyectos especiales, ASA) por el apoyo otorgado y la gentil anuencia en el uso de la información del mismo.

Le agradezco al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la beca recibida durante la elaboración de la tesis y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el patrocinio bajo el proyecto 33032 – U.

También agradezco a los profesores de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, en especial al Dr. Eulalio Juárez Badillo por invitarme a participar como ayudante de su cátedra en el posgrado, compañeros de clases, amigos y personal del área de geotecnia del Instituto de Ingeniería que de alguna manera contribuyeron a la realización de esta tesis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Se presentan los resultados y la metodología de los estudios de respuesta sísmica del sitio del ex-Lago de Texcoco, donde se proyecta construir el nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, los cuales sirven de base para definir el medio ambiente sísmico de campo libre representativo del sitio.

Para el análisis de respuesta sísmica del sitio en estudio se utilizó el algoritmo propuesto por Bárcena y Romo (programa de computadora RADSH). Con este programa se hacen análisis unidimensionales de sistemas horizontalmente estratificados a través de los cuales viajan ondas de cortante, en dirección vertical, provenientes del semi-espacio (estrato relativamente rígido con respecto al depósito que se desea estudiar). Considerando los resultados de los sondeos realizados en el predio, se obtuvieron las velocidades de ondas de corte por medio de correlaciones semi-empíricas para los estratos arcillosos en función de la resistencia de punta del cono eléctrico, q_c , y para las series aluviales considerando el número de golpes, N , necesarios para penetrar 30 cm de estrato, utilizando la prueba de penetración estándar (SPT). Para tomar en consideración la variabilidad en la determinación de las velocidades de ondas de corte, para cada sondeo se generaron 25 perfiles de velocidades variando aleatoriamente su valor entre 70 y 130% del valor promedio, obtenido con las correlaciones semi-empíricas de cada estrato. Se consideró una distribución probabilista uniforme. Con los resultados del análisis del modelo analítico, se caracteriza el medio ambiente sísmico de campo libre mediante curvas de isoaceleraciones espectrales para igual periodo, las cuales definen la zonificación sísmica del sitio.

Utilizando como datos, entrenamiento y predicción, los resultados del modelo analítico, se desarrolló un modelo mediante la técnica de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para obtener un algoritmo que permite determinar la variación de las ordenadas espectrales de campo libre en la zona de estudio, demostrando el gran potencial que esta herramienta computacional tiene en el campo de la ingeniería geotécnica. Como se discute en el cuerpo de este trabajo, las redes neuronales son excelentes estimadores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Aspectos generales	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Alcance	4
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3 METODOLOGÍA	
3.1 Antecedentes	7
3.2 Procedimiento analítico	15
3.3 Verificación del modelo analítico	28
4 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUBSUELO DEL SITIO	
4.1 Estratigrafías típicas	36
4.2 Perfiles de velocidades de ondas de corte	52
4.3 Consideración de la variabilidad en los perfiles de velocidades de ondas de corte, V_s	55
4.4 Idealización de las condiciones dinámicas de los depósitos de suelo	59
4.5 Comportamiento no lineal de los suelos	62
5 CÁLCULO DE LAS RESPUESTAS	
5.1 Definición del sismo para las condiciones equivalentes a la del temblor del 19 de septiembre de 1985.	63

5.2 Efecto de la variación aleatoria de los perfiles de V_s	72
5.3 Medio ambiente sísmico del sitio	75
6 MODELO DEL MEDIO AMBIENTE SÍSMICO MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)	
6.1 Aspectos generales	88
6.2 Marco teórico	89
6.3 Metodología de análisis con RNA	96
6.4 Diseño de la RNA	105
6.5 Respuesta sísmica del sitio con RNA	110
7 CONCLUSIONES	118
8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	120

CAPÍTULO I

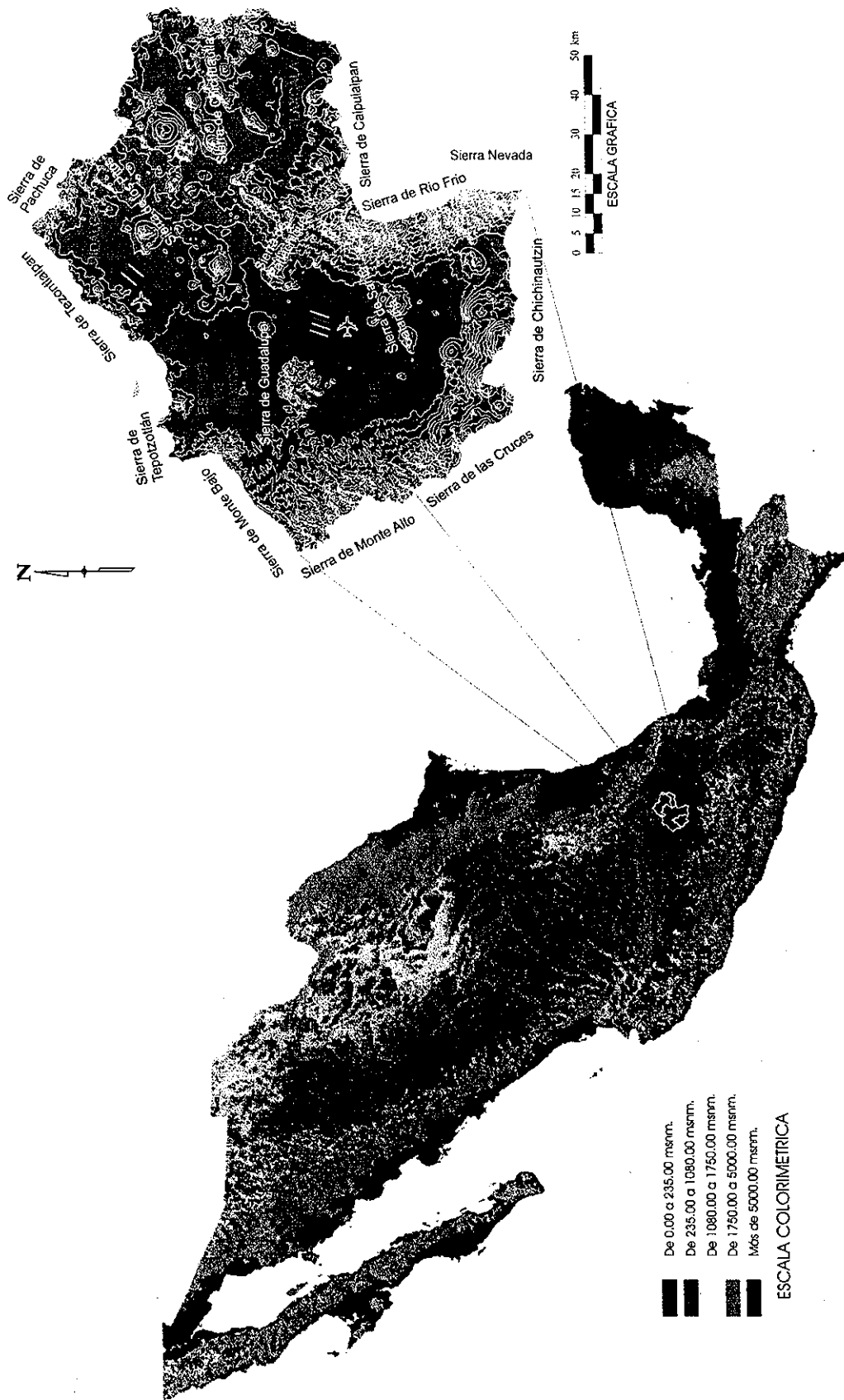
INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

En el sitio del ex-lago de Texcoco se proyecta construir el nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Por su importancia económica, sus impactos social y ecológico, será una de las obras de mayor envergadura que se realizará en México en los próximos años.

El área de estudio se encuentra en el vaso del ex-Lago de Texcoco, en la zona oriental de la Cuenca de México, localizada en la parte más alta y en el extremo sur del altiplano mexicano, figura 1.1.1. Se observa que el predio ocupa una parte de la zona federal pero que se extiende ampliamente hacia el oriente fuera de ella. Al poniente del predio se ha desarrollado una zona industrial y residencial que está limitada al norte por Ecatepec de Morelos, al sur por la ciudad de México al oeste por la sierra de Guadalupe y al este por el Gran Canal. La configuración de la zona del ex lago de Texcoco es prácticamente plana con algunos promontorios aislados como el Cerro del Peñón, Peñón del Marqués, y el Cerro de Chimalhuacán. Hacia el este se levantan las sierras de Calpulalpan y Río Frío y hacia el oeste la sierra de Guadalupe. La transición topográfica entre estas zonas es gradual hacia el oriente y abrupta hacia la Sierra de Guadalupe y el Cerro de Chimalhuacán. En la figura 1.1.2 se presenta la imagen satelital del sitio Texcoco.

El subsuelo del ex-Lago de Texcoco está constituido por potentes estratos arcillosos con alto contenido de agua, baja resistencia y alta compresibilidad, intercalados con algunos estratos más resistentes. El espesor de la formación arcillosa superior varía desde 35 m en el extremo sur-poniente del sitio, hasta menos de 15 m hacia el nor-oriente. Escasas mediciones de velocidades de ondas sísmicas de cortante, indican que se pueden tener, para la arcilla, valores tan bajos como 25 a 30 m/s. La importancia de los efectos de sitio sobre las características de los movimientos sísmicos del subsuelo en el valle de México fue claramente demostrada durante el macrosismo del 19 de septiembre de 1985 y en varios sismos posteriores. En 1985, en la zona lacustre, los movimientos superficiales del terreno en algunas zonas alcanzaron ± 20 cm, con los consiguientes daños estructurales inducidos en pavimentos, tuberías enterradas y otros elementos someros rígidos.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.1.1 Localización de la Cuenca de México, elaborado por Auvinet (Romo et al., 2001)

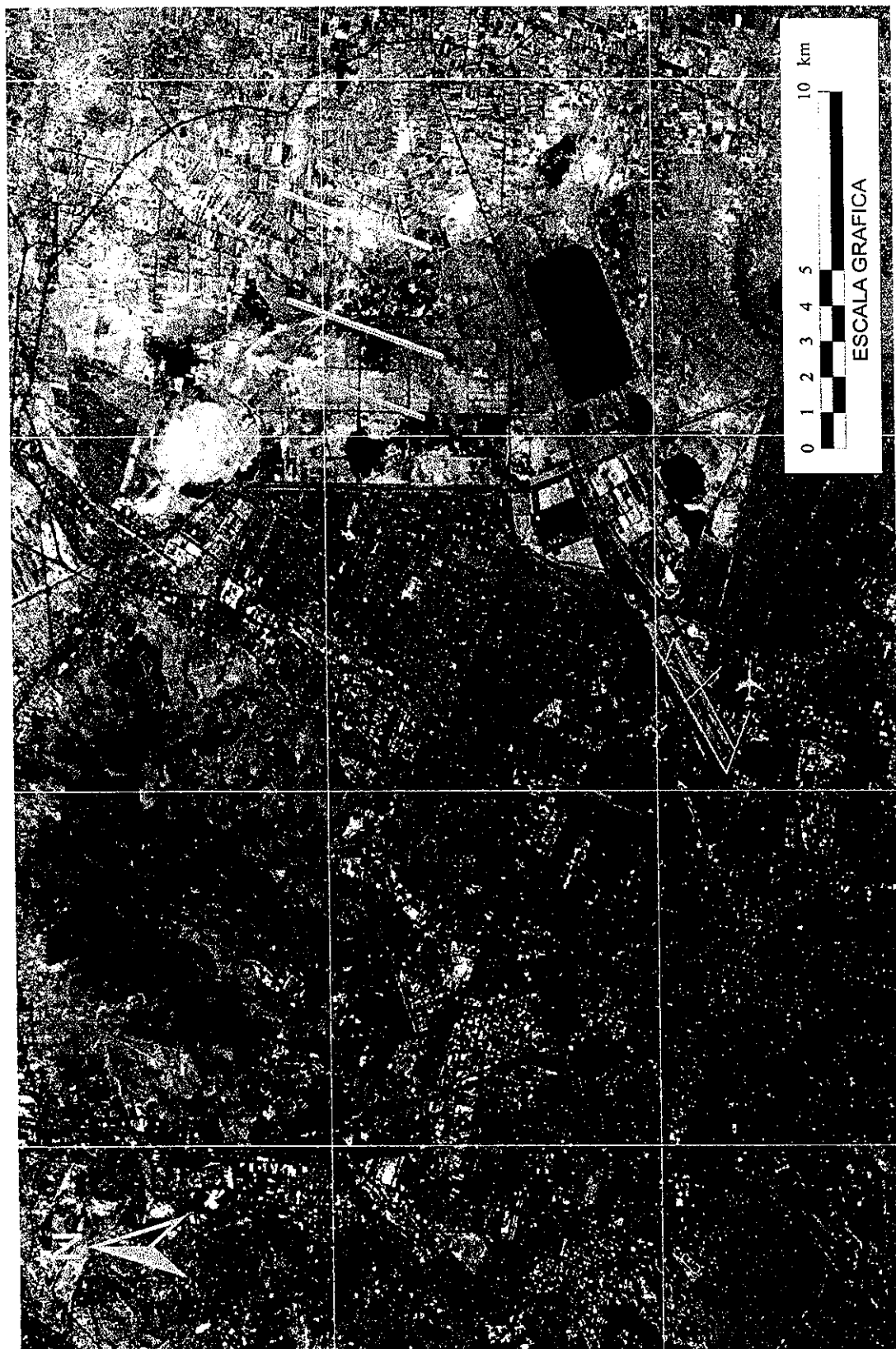


Figura 1.1.2 Imagen satelital del sitio Texcoco, elaborado por Auvinet (Romo et al., 2001)

La gran amplificación de las ondas sísmicas que producen los suelos arcillosos del valle de México puede causar grandes fuerzas inerciales, que deben considerarse en el diseño de las cimentaciones de los edificios y terraplenes de las pistas y calles de rodaje del nuevo aeropuerto.

1.2 Objetivo

Debido a la extensión del sitio del ex-Lago de Texcoco, y a la variación espacial de las propiedades de los suelos y de los espesores de los depósitos compresibles, las amplificaciones sísmicas causadas por los depósitos de suelo no serán uniformes en toda el área. Por este motivo, y considerando su impacto en el diseño sísmico de las obras que constituirán el nuevo aeropuerto de la ciudad de México, el objetivo del estudio es presentar en forma detallada los procedimientos y resultados del cálculo del medio ambiente sísmico de campo libre para el sitio del ex-Lago de Texcoco, mediante la utilización de un modelo analítico unidimensional de propagación de onda de corte vertical; adicionalmente, se presenta la aplicación de la técnica de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para reproducir la respuesta sísmica espacial en el sitio de estudio.

1.3 Alcance

Para cumplir con el objetivo planteado, es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Recopilación de la información geotécnica disponible en el sitio de Texcoco.
- Calibración del modelo analítico utilizado para el estudio de la respuesta sísmica espacial.
- Caracterización de los perfiles de velocidades de onda de corte en los puntos donde se realizaron sondeos directos, a partir de los cuales se generaron perfiles virtuales mediante la técnica de interpolación lineal, formando así una malla la cual servirá como base de datos para zonificar sísmicamente el sitio de estudio.
- Obtención de la excitación sísmica de diseño.

- Consideración del efecto de la variación aleatoria de las velocidades de onda de corte en la respuesta sísmica, producto de su determinación a partir de expresiones semi-empíricas.
- Definición de las variables significativas de entrada para el modelo de la red neuronal.
- Diseño de la red neuronal para predecir la respuesta espacial sísmica en la zona del ex-Lago de Texcoco.
- Comparación de los resultados obtenidos mediante el modelo analítico con los resultados de la predicción alcanzada con la RNA diseñada.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los efectos locales de sitio sobre los movimientos sísmicos son fenómenos que han sido reconocidos y estudiados por varias décadas, los cuales serán descritos en forma amplia en la sección 3.1. Sin embargo, fue hasta que ocurrieron los sismos del 19 y 20 de septiembre, 1985 que la influencia de suelos blandos se manifestó tan claramente (Romo y Jaime, 1986; Romo y Seed, 1986). Los registros sísmicos obtenidos durante estos eventos sísmicos constituyeron la primera evidencia irrefutable de la influencia de las características geométricas y geotécnicas de sitios específicos. Esta información se comprobó, posteriormente, con registros en sitios esparcidos, prácticamente en todo el subsuelo (en las tres zonas geotécnicas definidas en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal) de la zona metropolitana de la ciudad de México.

Por razones que se desprenden de la ubicación de las áreas más dañadas durante los sismos de septiembre de 1985, los estudios se concentraron en la zona urbana de la ciudad de México. Consecuentemente, existen grandes extensiones, como la zona del ex-Lago de Texcoco, que han recibido relativamente poca atención.

Por consiguiente, dada la importancia estratégica que tiene el nuevo aeropuerto en el desarrollo del país, es importante que se tenga un conocimiento más detallado del peligro sísmico en el ex-Lago de Texcoco. En la presente tesis se presentan los resultados de los estudios de respuesta sísmica obtenidos, los cuales sirven de base para definir el medio ambiente sísmico representativo del sitio. Conviene señalar que el medio ambiente sísmico, proporciona información sobre los movimientos sísmicos de campo libre. En el caso de algunas estructuras ligeras y para las pistas, tales sollicitaciones dinámicas se pueden considerar directamente. Sin embargo, para estructuras como la torre de control, tanques de almacenamiento de combustible y otras estructuras que son esenciales para el buen funcionamiento del aeropuerto, los movimientos de campo libre pueden ser modificados por los efectos de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura, los cuales no se consideran en el alcance de la tesis.

CAPÍTULO 3
METODOLOGÍA

3.1 Antecedentes

Uno de los estudios más antiguos de los efectos locales del suelo en la intensidad del movimiento del terreno y en los daños a edificios fue el presentado por Wood (1908), refiriéndose a los efectos perjudiciales observados en la región de San Francisco, USA, como resultado del sismo de San Francisco del año de 1906. Después del estudio del daño causado por este evento, Wood concluyó:

“Esta investigación ha demostrado claramente que la magnitud de los daños producidos por el sismo del 18 de abril en diferentes partes de la ciudad y condado de San Francisco dependió principalmente de la naturaleza geológica del terreno”.

Todos los sismos que causan daños físicos (y personales) de consideración tienen el denominador común del comportamiento de los suelos durante los temblores. Muchos de los daños se relacionan con la inestabilidad global del suelo lo cual redundo en asentamientos diferenciales y totales importantes debido a la compactación de suelos granulares sueltos; hundimientos y desplomes en estructuras desplantadas en suelos blandos como se ilustra en la figura 3.1.1., generación de presiones de poro que conducen a la licuación de suelos granulares, como se muestra en la figura 3.1.2; movimientos en presas de tierra y enrocamiento; deslizamientos de apoyos de puentes, etc.



Figura 3.1.1 Vista de un edificio con un asentamiento de 1.5 m en la esquina, luego del sismo del 17 de agosto de 1999 en Kocaeli, Turquía.



Figura 3.1.2 Movimientos laterales y asentamientos productos de la licuación de los suelos, durante el sismo de Loma Prieta 1989 en la bahía de Monterey.

Un efecto más sutil de las condiciones locales geotécnicas en el daño a estructuras es la influencia que tienen en las características de los movimientos sísmicos del terreno las cuales pueden tener un gran impacto en la severidad de los daños estructurales que se puedan desarrollar, aunque el suelo de apoyo permanezca estable durante el temblor. Indicaciones cualitativas y cuantitativas de la ocurrencia de este fenómeno han sido notadas desde hace muchos años en varios sismos; sin embargo, el caso que más claramente evidenció este efecto fue el de la ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. En la figura 3.1.3 se muestra la influencia del número de pisos (y del periodo fundamental del edificio)

sobre la intensidad de daño en la zona más crítica, para los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 en la ciudad de México.

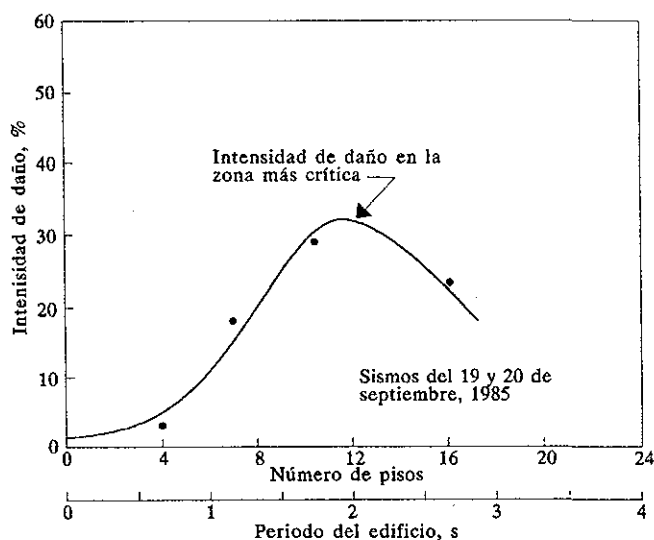


Figura 3.1.3 Influencia del número de pisos (y del periodo fundamental del edificio) sobre la intensidad de daño, para los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 en la ciudad de México (Seed y Sun, 1989)

Se observa que los edificios más dañados fueron aquellos que tenían entre 10 y 14 pisos y estaban desplantados en depósitos de arcilla con periodos naturales entre 1.5 y 2.0 segundos. Otros casos, como el de Caracas, Venezuela (en el sismo de 1967), el de Loma Prieta (1989), el de Northridge (1994) y el de Kobe (1995), refuerzan la idea de que las condiciones locales geotécnicas juegan un papel importante en la extensión y severidad de los daños que sufren las estructuras durante la acción de temblores de gran intensidad. Mediciones de los movimientos del terreno durante estos sismos han mostrado que las condiciones locales del sitio influyen fundamentalmente en las amplitudes de la aceleración máxima del terreno y en las amplitudes y forma de las funciones espectrales.

Resumen de la información obtenida en varios lugares sobre la influencia de los efectos locales de sitio

De la comparación entre las relaciones de atenuación de la aceleración pico para sitios que subyacen diferentes tipos de suelos, se ha observado que existen distintas tendencias en la forma de amplificar (Seed et al., 1976). Aunque los datos de atenuación están dispersos, la tendencia general sugiere que las aceleraciones pico en la superficie de los depósitos de suelo son un poco mayores que en roca. Sin embargo, las aceleraciones pico en suelo son un poco menores para niveles de aceleraciones altos, figura 3.1.4. Esto se debe a los efectos del comportamiento no lineal de los suelos.

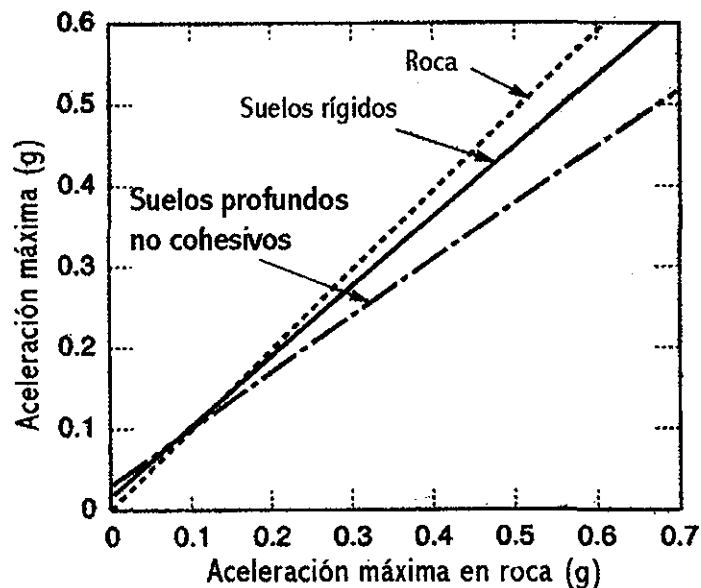


Figura 3.1.4 Relación aproximada entre la aceleración pico en roca y otros tipos de condiciones locales de sitio (Seed et al., 1976)

Con base en la información obtenida en la ciudad de México, en el área de la Bahía de San Francisco, y del análisis de respuesta de un volumen significativo de sitios, Idriss (1990) relacionó la aceleración pico en sitios de suelos blandos con sitios en roca, figura 3.1.5. Se observa que para niveles de aceleraciones bajos a moderados (menores que 0.4g), la aceleración pico en sitios de suelos blandos tiende a ser mayor que en sitios de roca. En ciertos casos, tales como el de la ciudad de México en 1985 y el del área de la Bahía de San

Francisco en 1989, aceleraciones relativamente pequeñas, registradas en roca, pueden amplificarse notablemente por la presencia de depósitos de suelo. Sin embargo, para altos niveles de aceleraciones en roca, los depósitos de suelo blando de baja rigidez y un marcado comportamiento no lineal, usualmente atenúan la aceleración pico de la roca.

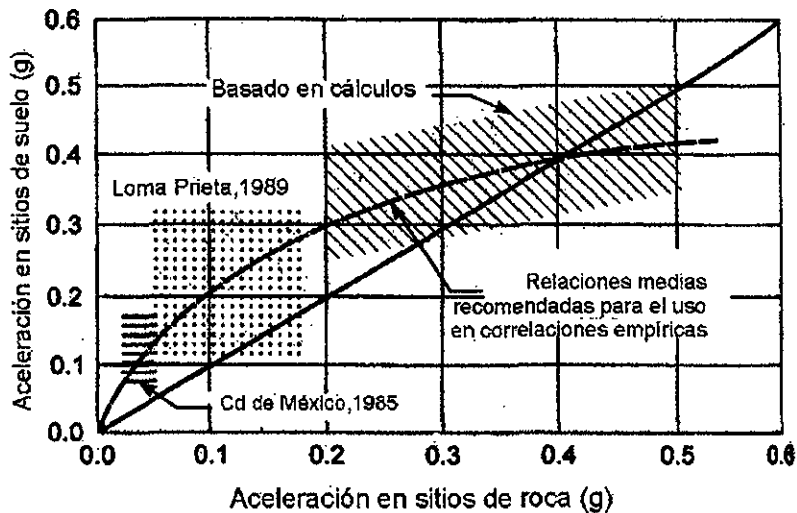


Figura 3.1.5 Relaciones aproximadas entre la aceleración pico en roca con la generada en depósitos blandos de suelo (Idriss, 1990)

Las condiciones locales de sitio también influyen en el contenido de frecuencias del movimiento en la superficie y por consiguiente en el espectro de respuesta que estos generan. Seed et al. (1976) calcularon espectros de respuesta de movimientos de terreno registrados en diferentes sitios subyaciendo diferentes tipos de condiciones: sitio de roca, sitio de suelos rígidos (profundidad < 60 m), sitios de suelos profundos no cohesivos (profundidad > 76m), y sitios que subyacen depósitos de arcillas de blanda a mediana rigidez. Al normalizar los espectros de respuesta calculados (dividiendo la aceleración espectral entre la aceleración pico del terreno) se observan los efectos de las condiciones locales de sitio en las formas espectrales, figura 3.1.6. Los efectos son aparentemente en los periodos mayores de 0.5 segundos, las amplificaciones espectrales son mucho mayores para sitios de suelo que para sitios de roca.

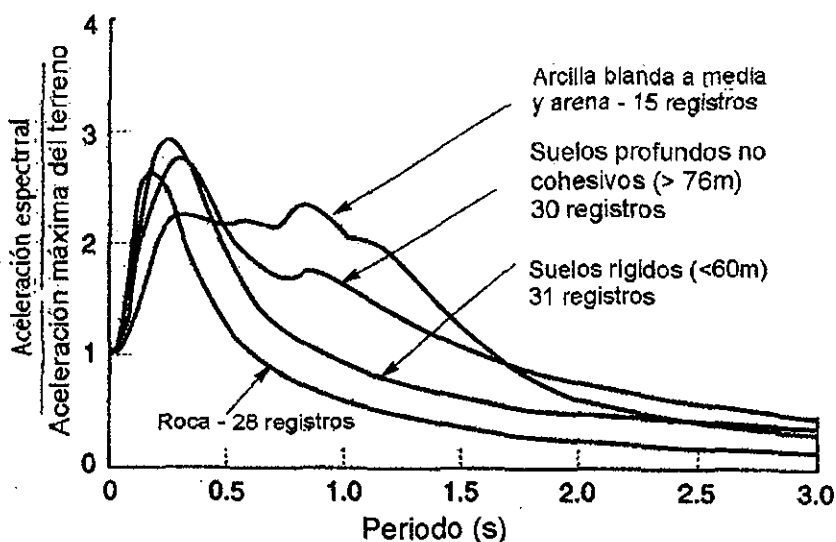


Figura 3.1.6 Espectros de respuesta medios normalizados (5% de amortiguamiento) para diferentes condiciones locales de sitio (Seed et al., 1976)

Para los periodos largos, la amplificación espectral crece con el decremento de las rigideces del subsuelo. En la figura 3.1.6 se muestra claramente que los depósitos de suelos blandos y profundos pueden generar grandes amplitudes espectrales en periodos largos (baja frecuencia). Este efecto podría ser muy significativo, particularmente cuando estructuras de periodo largo, puentes y edificios altos, están cimentadas en tales tipos de depósitos de suelo. Además, estos resultados muestran que el uso de un solo tipo de forma espectral no es apropiado para todas las condiciones de sitio. Los principales factores que influyen en los efectos locales del sitio se resumen en la tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1 Principales factores que influyen en los efectos locales del sitio (Romo et al., 2000)

Sismológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad y contenido de frecuencias de los movimientos sísmicos de roca basal • Duración de los movimientos en roca basal
Geológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras geológicas locales • Tipo de roca subyacente • Características estratigráficas: espesor de los depósitos y tipos de suelos
Geotécnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características de vibración elástica de los depósitos de suelo • Comportamiento no lineal del suelo • Impedancia relativa entre la roca basal y los depósitos de suelo sobreyacientes
Geométricos	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos de suelo estratificados no horizontales • Topografía de la interfaz suelo – roca basal • Configuración de la cuenca

Modelos analíticos para determinar la respuesta sísmica de depósitos de suelo

Los avances en los métodos numéricos y capacidades computacionales permiten, al menos en principio, la evaluación del movimiento específico de sitio de campo libre usando un modelo que incluye la fuente del evento sísmico. Sin embargo, el conocimiento limitado de los parámetros de la fuente y de la geología regional hace que la solución al problema presente una alta incertidumbre en el rango de frecuencias de interés para el diseño de cimentaciones. Por lo tanto, muchos de los procedimientos actuales de respuesta de sitio tienden a predecir el tiempo y la variación espacial del movimiento del terreno de un ambiente sísmico único actuando en algún punto de control dentro del sitio de estudio.

Los procedimientos analíticos que estudian la respuesta del terreno han evolucionado desde los enfoques unidimensionales hasta los tridimensionales. Actualmente, se dispone de modelos de suelos lineales, lineales equivalentes, y modelos no-lineales. En principio, es entonces posible analizar cualquier problema práctico. Sin embargo, a pesar de los

impresionantes avances en las capacidades numéricas-computacionales, parece improbable que la mayor parte de estas herramientas estén pronto al alcance del ingeniero de la práctica.

Las restricciones principales en la aplicación de las técnicas de dos y tres dimensiones son la gran dificultad (pero no la imposibilidad) para definir acertadamente las geometrías tridimensionales (e incluso bidimensionales) y las propiedades del suelo que conforman el valle de estudio. Además, hasta la fecha no existe un procedimiento aceptado como universal para cuantificar la duración del movimiento e incorporarlo en el problema del diseño sísmico.

Debido a su simplicidad, y a la amplia experiencia acumulada a través de los años, los procedimientos unidimensionales son los que comúnmente se utilizan en la práctica de la ingeniería para evaluar movimientos del terreno específicos (Romo et al., 2000). Algunos de los modelos de análisis unidimensionales de respuesta del terreno más utilizados consideran las siguientes hipótesis básicas:

- La respuesta del depósito de suelo se debe predominantemente a la propagación de ondas de corte desde la formación inferior de roca (semi-espacio) a la superficie (Kanai, 1951).
- Todas las fronteras entre los diferentes materiales que forman el depósito de suelo, tanto en la superficie como en la roca basal, son esencialmente horizontales y de extensión infinita.
- El material de cada estrato de suelo es homogéneo y viscoelástico lineal.

Para poder analizar la respuesta sísmica del terreno del sitio de Texcoco, se utilizó el modelo de análisis unidimensional de ondas verticales (o propagándose con cierta inclinación) de corte encontrando su validez para este propósito, según se indica en las siguientes consideraciones, Seed et al., (1988):

- Existe información detallada sobre las condiciones del subsuelo que sobreyace la capa dura.
- Los depósitos arcillosos de la ciudad de México son muy delgados comparados con la gran extensión lateral, por lo tanto, en muchos casos, la respuesta sísmica de los

depósitos en cualquier sitio puede ser evaluada mediante la teoría de la propagación de ondas unidimensionales.

- Estudios previos (Herrera y Rosenblueth,1965; Seed e Idriss,1969; Romo y Jaime, 1986) han demostrado que el uso del análisis unidimensional de respuesta del terreno mediante el uso de la teoría de propagación vertical de ondas cortantes, puede reproducir con buena aproximación los movimientos de la superficie del terreno medidos en sismos anteriores. Por lo tanto, gran parte de la amplificación de los movimientos se produce en los depósitos de suelos que sobreyacen a la capa dura o semi-espacio.
- Los registros en la UNAM proveen una información valiosa acerca de las características del movimiento desarrollado en la capa dura para el sismo del 19 de septiembre de 1985.

3.2 Procedimiento analítico

Para el análisis de respuesta sísmica de la zona en estudio se utilizó el programa de computadora RADSH (Bárcena y Romo, 1994), el cual se basa en el procedimiento de matrices de transferencia propuesto por Thompson (1950) y Haskell (1953). La solución del sistema de ecuaciones de movimiento se obtiene con la teoría de vibraciones casuales y para obtener las respuestas máximas, se aplica la teoría del valor extremo (Romo,1977). Aquí se hace la hipótesis de que tanto la excitación como la respuesta del sistema son procesos estocásticos gaussianos. Al considerar a la excitación como un proceso gaussiano con media cero, ésta queda completamente caracterizada por su espectro de potencia, lo cual significa que el análisis se está realizando con una familia de sismos que satisface esta condición. A manera de ejemplo, en la figura 3.2.1. se muestra un registro del perfil de olas obtenido en una tormenta en el océano, el cual se puede representar, en forma aproximada, con la variación de las amplitudes con respecto a la media, utilizando una distribución de probabilidad normal o gaussiana con media cero. Para el caso de un sismo se puede establecer un símil equivalente.

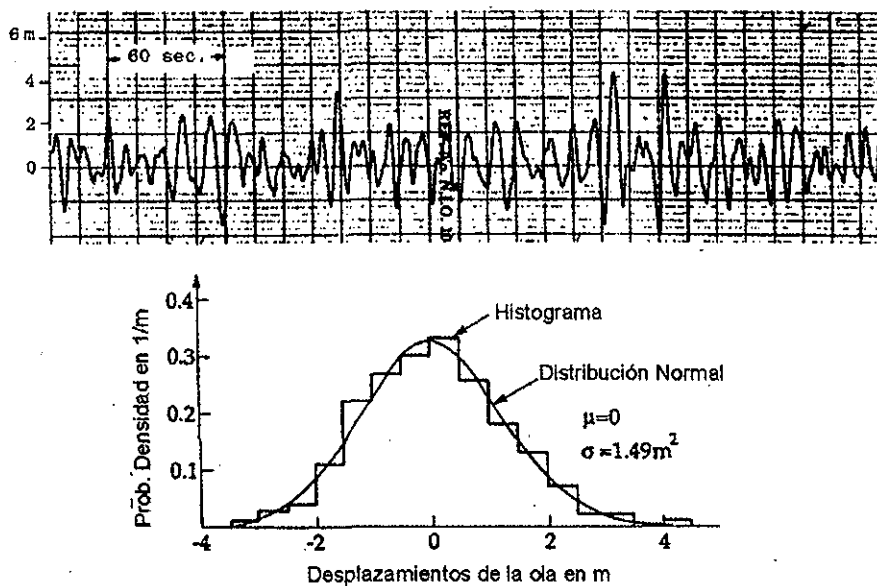


Figura 3.2.1 Ejemplo de un proceso gaussiano con media cero

Esto, indudablemente, es más representativo que usar una muestra de esa familia de señales, como se hace en los análisis deterministas. La excitación en el programa RADSH se define en términos de un espectro de respuesta medio.

El modelo es unidimensional, considera que el depósito está estratificado horizontalmente y que las ondas de corte se propagan con incidencia vertical o con cierta inclinación. Si se conoce el movimiento sísmico en un afloramiento de un estrato relativamente rígido con respecto al depósito de suelo que se desea estudiar, el procedimiento a seguir se esquematiza en la figura 3.2.2. La respuesta del sistema se obtiene como espectros de potencia a través de la teoría de vibraciones casuales. Con los espectros de potencia calculados y con la teoría del valor extremo se obtienen las aceleraciones, deformaciones, y esfuerzos máximos medios y espectros de respuesta en diferentes puntos del depósito de suelo.

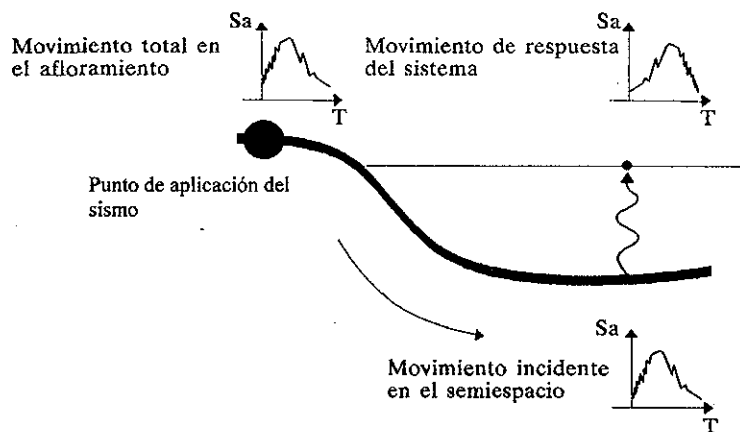


Figura 3.2.2 Sistema excitado con el movimiento del semi-espacio que aflora

Usando la teoría de vibraciones aleatorias, las respuestas máximas de un sistema lineal (aunque se pueden considerar de manera aproximada los efectos del comportamiento no lineal del suelo con soluciones seccionalmente continuas) excitado por un proceso estocástico, pueden ser calculadas para los límites de confianza definidos a partir de la dispersión de los datos de la excitación. Esto equivale a considerar una amplia gama de sollicitaciones sísmicas.

Marco teórico del modelo analítico

La propagación de ondas de corte polarizadas horizontalmente, figura 3.2.3, está gobernada por la ecuación de onda en dos dimensiones, Bárcena y Romo (1994):

$$G \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \eta \left(\frac{\partial^3 v}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial t \partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.2.1)$$

Donde G es el módulo de rigidez al cortante, η la viscosidad, ρ la densidad del material, v = v(x, z, t) es el desplazamiento en la dirección del eje y ($\bar{u} = u \text{ (} u_i + v_j + w_k \text{)}$), y w = u = 0. Supóngase que los desplazamientos armónicos con frecuencia ω pueden escribirse como:

$$v = l_1 \exp[i(\omega t - k^* t)] \quad (3.2.2)$$

Donde $l_1 = l_1(k^*, z, \omega)$, $k^* = \omega/c^*$ = número de onda complejo, c^* = velocidad compleja de propagación aparente en la dirección del eje x.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

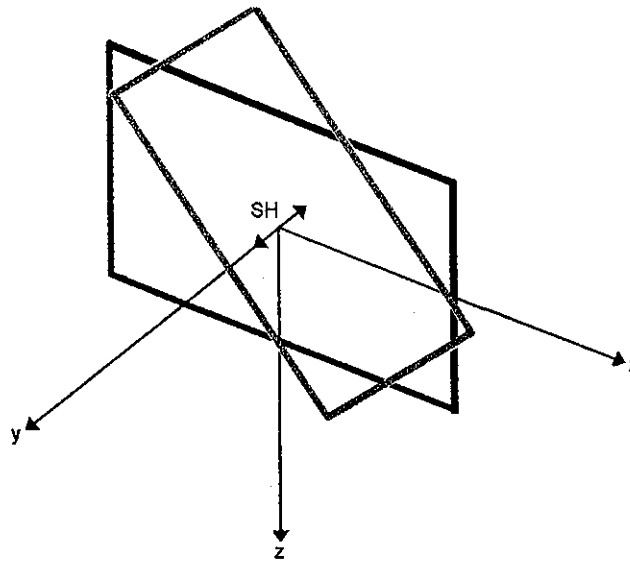


Figura 3.2.3 Plano de polarización de la onda SH

Sustituyendo la ec (3.2.2) en la (3.2.1) y simplificando,

$$G(-k^2 l_1 + l_r) + \eta i \omega (-k^2 l_1 + l_r) = -\rho \omega^2 l_1$$

o bien,

$$-k^2 l_1 G^* + l_r G^* = -\rho \omega^2 l_1 \quad (3.2.3)$$

donde $G^* = G + i\omega\eta$

Haciendo

$$l_2 = G^* \frac{dl_1}{dz} \quad (3.2.4)$$

la ec (3.2.3) queda como:

$$-k^2 G^* l_1 + \frac{dl_2}{dz} = -\rho \omega^2 l_1 \quad (3.2.5)$$

Con las ecs (3.2.4) y (3.2.5) puede formarse el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias

$$\frac{d}{dz} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/G^* \\ k^{*2} G^* - \omega^2 \rho & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix} \quad (3.2.6)$$

o en forma abreviada

$$\frac{d}{dz} \bar{f} = B \bar{f} \quad (3.2.7)$$

donde

$$\bar{f} = \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 1/G^* \\ k^{*2} G^* - \omega^2 \rho & 0 \end{bmatrix}$$

Al vector $\{l_1, l_2\}^T$ se le conoce como vector desplazamiento-esfuerzo para ondas SH.

Una solución de la ec (3.2.7) está dada por:

$$\bar{f}_j = \bar{V}_j \exp[\lambda_j(z - z_0)] \quad j = 1, 2 \quad (3.2.8)$$

Donde z_0 es una profundidad de referencia; λ_j valor característico de B; \bar{V}_j vector característico de B correspondiente al valor característico λ_j .

Resolviendo la ecuación característica del sistema $B\bar{V}_j = \lambda_j\bar{V}_j$ y con la ec (3.2.8) se obtiene la base del espacio solución de la ec (3.2.7):

$$f_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ iG^* \alpha \end{Bmatrix} \exp[i\alpha(z - z_0)] \quad (3.2.9a)$$

$$f_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -iG^* \alpha \end{Bmatrix} \exp[-i\alpha(z - z_0)] \quad (3.2.9b)$$

Donde $\alpha^2 = \frac{\omega^2}{\beta^2} \cos^2 \theta$, θ es el ángulo de incidencia de la excitación respecto a la vertical y β es la velocidad de propagación del movimiento.

Las ecs (3.2.9) son soluciones particulares de la ecuación de movimiento (3.2.6). Además, como son soluciones linealmente independientes, la solución general de la ec (3.2.6) estará dada por su combinación lineal, así

$$\bar{f} = F \bar{p}$$

donde

$$F = [f_1 | f_2]$$

y \bar{p} es el vector de pesos que representa las amplitudes de la onda incidente I y reflejada R . Entonces

$$\bar{f} = [f_1 | f_2] \begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix}$$

o bien

$$\begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[i\alpha(z-z_0)] & \exp[-i\alpha(z-z_0)] \\ iG^* \alpha \exp[i\alpha(z-z_0)] & -iG^* \alpha \exp[i\alpha(z-z_0)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix}$$

El vector desplazamiento-esfuerzo dado en términos de las amplitudes del campo incidente y reflejado en $z = z_0 = H$, figura 3.2.4, es decir, en la interfaz semiespacio-estrato inferior, está dado por

$$\begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=H} = \begin{bmatrix} I & I \\ iG_{HS}^* \alpha_{HS} & -iG_{HS}^* \alpha_{HS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix}$$

o bien

$$\begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=H} = F \begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix}$$

También, premultiplicando por la inversa de la matriz F , se tiene que

$$\begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix} = F^{-1} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=H} \quad (3.2.10)$$

donde

$$F^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i/G_{HS}^* \alpha_{HS} \\ 1 & i/G_{HS}^* \alpha_{HS} \end{bmatrix} \quad (3.2.11)$$

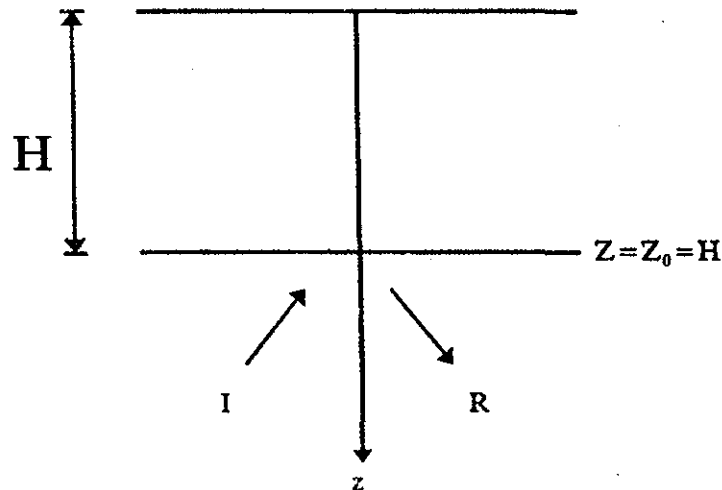


Figura 3.2.4 Movimiento incidente y reflejado en la base del sistema

El subíndice HS denota propiedades en el semiespacio. Por otra parte, si la matriz B se mantiene constante en una cierta profundidad, la matriz propagadora entre z y z₀, según el método de Euler para sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, se define como

$$P(z, z_0) = \exp[(z - z_0) B] \quad (3.2.12)$$

o bien, desarrollando en serie de Taylor

$$P(z, z_0) = I + (z - z_0)B + \frac{1}{2!} (z - z_0)^2 B^2 + \frac{1}{3!} (z - z_0)^3 B^3 + \dots \quad (3.2.13)$$

La matriz propagadora así definida satisface la ecuación de movimiento (3.2.6)

$$\frac{d}{dz} P(z, z_0) = B P(z, z_0)$$

Además, de la ec (3.2.13) se tiene P(z, z₀) = I. También

$$\bar{f}(z) = P(z, z_0) \bar{f}(z_0) \quad (3.2.14)$$

Dado que $P(z, z_0) \bar{f}(z_0)$ satisface la ecuación de movimiento (3.2.6), y también da $\bar{f}(z_0)$ en $z=z_0$ tenemos, entonces, que $P(z, z_0)$ genera al vector desplazamiento-esfuerzo en la profundidad z al operar sobre el vector desplazamiento-esfuerzo en la profundidad z_0 . Por ejemplo,

$$\bar{f}(z_2) = P(z_2, z_1) \bar{f}(z_1)$$

$$\bar{f}(z_2) = P(z_2, z_1) P(z_1, z_0) \bar{f}(z_0)$$

Si ahora seleccionamos $z_2=z_0$ y se aplica la regla anterior

$$\bar{f}(z_0) = P(z_0, z_1) P(z_1, z_0) \bar{f}(z_0)$$

por lo que:

$$P(z_0, z_1) P(z_1, z_0) = I$$

Lo que significa que $P(z_1, z_0)$ es la inversa de $P(z_0, z_1)$.

La matriz propagadora, ec (3.2.12), puede expresarse en términos más sencillos utilizando algún procedimiento algebraico (p.e. la fórmula de Sylvester):

$$P(z, z_0) = \begin{bmatrix} \cos(z - z_0) \alpha_n & \frac{1}{G_n^* \alpha_n} \text{sen}(z - z_0) \alpha_n \\ -G_n^* \alpha_n \text{sen}(z - z_0) \alpha_n & \cos(z - z_0) \alpha_n \end{bmatrix} \quad (3.2.15)$$

Donde

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\omega^2}{\beta_n^2} - \frac{\omega^2}{\beta_{HS}^2} \text{sen}^2 \theta}$$

Aquí, β_n es la velocidad de propagación del movimiento en el intervalo de profundidad (z, z_0) ; β_{HS} es la velocidad de propagación del movimiento en el semiespacio.

Con la ec (3.2.15) se tiene una forma explícita para expresar la matriz propagadora $P(z, z_0)$ en términos del espesor del estrato, de sus propiedades mecánicas, de la frecuencia de excitación y de su ángulo de incidencia.

Combinando ahora la ec (3.2.10) con la (3.2.14), figura 3.2.5

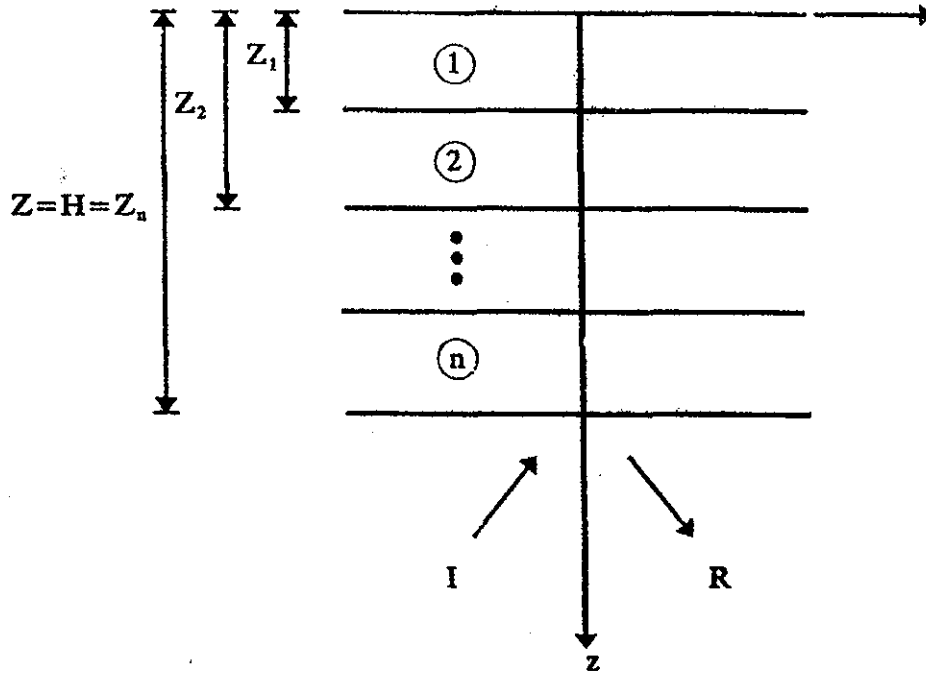


Figura 3.2.5 Sistema estratificado

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix} &= F^{-1} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=H=Z_n} \\ \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_n} &= P(Z_n, Z_{n-1}) \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_{n-1}} \\ \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_{n-1}} &= P(Z_{n-1}, Z_{n-2}) \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_{n-2}} \\ \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_n} &= P(Z_n, Z_{n-1}) P(Z_{n-1}, Z_{n-2}) \dots P(Z_2, Z_1) P(Z_1, Z_0) \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=Z_0} \end{aligned}$$

Por tanto

$$\begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix} = F^{-1} A \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=z_0}$$

donde

$$A = P(z_n, z_{n-1}) P(z_{n-1}, z_{n-2}) \dots P(z_2, z_1) P(z_1, z_0)$$

o bien

$$\begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i/G_{HS}^* \alpha_{hs} \\ 1 & i/G_{HS}^* \alpha_{HS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{Bmatrix}_{z=z_0}$$

Si $z = 0$, se tiene superficie libre, por lo que la segunda componente del vector desplazamiento-esfuerzo es nula, $l_2 = 0$, por lo que

$$\begin{Bmatrix} I \\ R \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i/G_{HS}^* \alpha_{hs} \\ 1 & i/G_{HS}^* \alpha_{HS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ 0 \end{Bmatrix}_{z=z_0}$$

de donde

$$I = \frac{1}{2} \left(A_{11} - \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} A_{21} \right) l_1 \quad (3.2.16)$$

$$R = \frac{1}{2} \left(A_{11} + \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} A_{21} \right) l_1 \quad (3.2.17)$$

Dado que interesa conocer el valor del desplazamiento v en $z = 0$ (esto es, se desea conocer l_1 en $z = 0$) y que:

a) De la excitación solamente se conoce el movimiento (unitario) incidente en la base del depósito de suelo, entonces de la ec (3.2.16)

$$v = \frac{2}{A_{11} - \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} A_{21}}$$

y el movimiento reflejado hacia el semiespacio estará dado por

$$R = \frac{A_{11} + \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} A_{21}}{A_{11} - \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} A_{21}}$$

b) De la excitación se conoce el movimiento total en la base del depósito de suelo. Para este caso si se suman las ecs (3.2.16) y (3.2.17), entonces

$$I + R = A_{11} l_1$$

y considerando un movimiento total unitario

$$v = \frac{I}{A_{11}}$$

El movimiento incidente en la base del depósito estará dado por

$$I = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} \frac{A_{21}}{A_{11}} \right)$$

y el reflejado por

$$R = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{i}{G_{HS}^* \alpha_{HS}} \frac{A_{21}}{A_{11}} \right)$$

Por otro lado, el vector desplazamiento-esfuerzo en cualquier interfaz del depósito estratificado está dado por la ec (3.2.14).

Para calcular la deformación máxima de corte en un punto del sistema, se considera que el estado de deformaciones en un punto está dado por un tensor de deformaciones de segundo orden, de la forma

$$\begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & 0 & \varepsilon_{yz} \\ 0 & \varepsilon_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$

Con este tensor se pueden obtener las deformaciones principales, y con la máxima y la mínima se determina fácilmente mediante el círculo de Mohr la deformación máxima de corte. La deformación efectiva de corte puede definirse como 65 % de la deformación máxima (Seed e Idriss, 1969). Se puede utilizar la raíz del valor medio cuadrático de las deformaciones, como una definición alternativa, la cual se emplea en el proceso iterativo seguido en el programa RADSH para considerar los aspectos no-lineales del comportamiento del suelo.

A partir de las ecuaciones (3.2.14), (3.2.16) y (3.2.17) pueden obtenerse las funciones de transferencia con las cuales se caracteriza dinámicamente al depósito de suelo, tal como se ha expuesto. Si, además, se utiliza la teoría de vibraciones aleatorias, la respuesta del sistema (lineal) excitado por un proceso aleatorio, estacionario, está dado por la expresión

$$P_y^j(\omega) = |H(\omega)|^2 P_x(\omega)$$

donde

$P_y^j(\omega)$	es el espectro de potencia en el estrato j
$H(\omega)$	es la función de transferencia compleja que caracteriza al sistema
$P_x(\omega)$	es el espectro de potencia de la excitación

Por su parte, la teoría del valor extremo establece que

$$S(T, p) = \gamma_{Tp} \sigma \tag{3.2.18}$$

donde $S(T, p)$ es el valor extremo de una señal aleatoria, el cual tiene la probabilidad p de no ser excedido dentro del intervalo de duración $(0, T)$; σ es la desviación estándar del proceso aleatorio definida como

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\omega) d\omega$$

donde $P(\omega)$ es el espectro de potencia del proceso definido como

$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\left| \int_{-T/2}^{+T/2} a(t) e^{i\omega t} dt \right|^2 \right]$$

el cual muestra la distribución de la energía de la señal $a(t)$ en las frecuencias de vibración. σ dividida por $\sqrt{2\pi}$ se define como la raíz de la aceleración cuadrática media, que representa el valor absoluto de la amplitud media de la señal.

Una expresión para γ_{Tp} (llamado factor pico) ha sido propuesta por Vanmarcke (1976)

$$\gamma_{Tp}^2 = 2 \ln \left\{ 2n \left[1 - \exp \left(-\delta^{1.2} \sqrt{\pi \ln(2n)} \right) \right] \right\}$$

donde

$$n = (\psi T / 2\pi) (-\ln p)^{-1}$$

$$\psi = (v_2 / v_0)^{1/2}$$

$$\delta = \left[1 - v_1^2 / v_0 v_2 \right]^{1/2}$$

$$v_i = \int_0^{\infty} \omega^i P(\omega) d\omega, \quad i=0, 1, 2, \dots, u$$

Ψ es una medida de la frecuencia dominante; δ es una medida del ancho de banda del espectro; y v_i es el i -ésimo momento espectral respecto al origen.

Para calcular el espectro de potencia a partir del espectro de respuesta, se utiliza la siguiente expresión (Romo, 1977):

$$P_x(\omega) = Pa \left\{ \left(\frac{Sa(\omega_0)}{\gamma_{Tp}} \right)^2 - \int_0^{\omega_0} P_x(\omega) d\omega \right\}$$

donde

$$Pa = \frac{1}{\left[\frac{(1 + 4\xi^2)\pi}{4\xi^2\lambda} (1 - \exp(-2\xi\omega_0 T)) \right] \omega_0}$$

Y ξ es el coeficiente de amortiguamiento crítico del oscilador simple. Como se ve, para resolver esta ecuación es necesario seguir un proceso iterativo para calcular $P_x(\omega_0)$. Con objeto de evitar problemas de convergencia, el primer incremento en la frecuencia debe ser muy pequeño (Romo et al., 1980).

El programa RADSH permite realizar análisis lineales y no-lineales. Este último considera en forma aproximada la no-linealidad de los suelos, utilizando el método lineal equivalente propuesto por Idriss y Seed (1968), de tal forma que a partir de un valor inicial del módulo de rigidez al cortante y de la relación de amortiguamiento del suelo, se obtiene la

respuesta del suelo. Los valores de estas dos propiedades se comparan con las que resultan del cálculo de la respuesta. Si las magnitudes de ambos parámetros cumplen con el error asignado, la solución obtenida se considera como la correspondiente al depósito de suelo. Por el contrario, se inicia un proceso iterativo hasta que se logra la convergencia entre los valores de estos parámetros en dos iteraciones sucesivas.

En este estudio se realizó un el análisis lineal para obtener las respuestas sísmicas del sitio, ya que con este criterio se obtendrán resultados más conservadores que en el análisis lineal equivalente. Cabe señalar que de acuerdo con los estudios realizados por varios investigadores (Seed et al., 1988, Romo y Jaime,1986 y Dobry y Vucetic,1987) del comportamiento dinámico-cíclico de la arcilla del valle de México, a niveles de deformaciones angulares (de corte) inducidas por un sismo en la arcilla $\leq 0.3\%$ aproximadamente, la arcilla se comporta casi en el rango lineal, con muy poca reducción en el módulo de rigidez al cortante. Por lo expuesto, se considera que la no-linealidad que podrían presentar los depósitos de suelo del sitio para la excitación sísmica de diseño descrita en la sección 5.1, estaría considerada en el análisis de la variabilidad de las velocidades de onda de corte, descrita en la sección 4.3.

3.3 Verificación del modelo analítico

Para la verificación del modelo analítico se cuenta con registros en tres estaciones acelerográficas localizadas en la zona del nuevo aeropuerto. Dos de ellas sobre el ex-Lago de Texcoco (TXS1 y TXS2) y la tercera sobre una roca vulcanítica del oligoceno en San Miguel de Tlaixpan (TXCR). La ubicación de estas estaciones, las pistas y sondeos realizados se presentan en la figura 3.3.1.

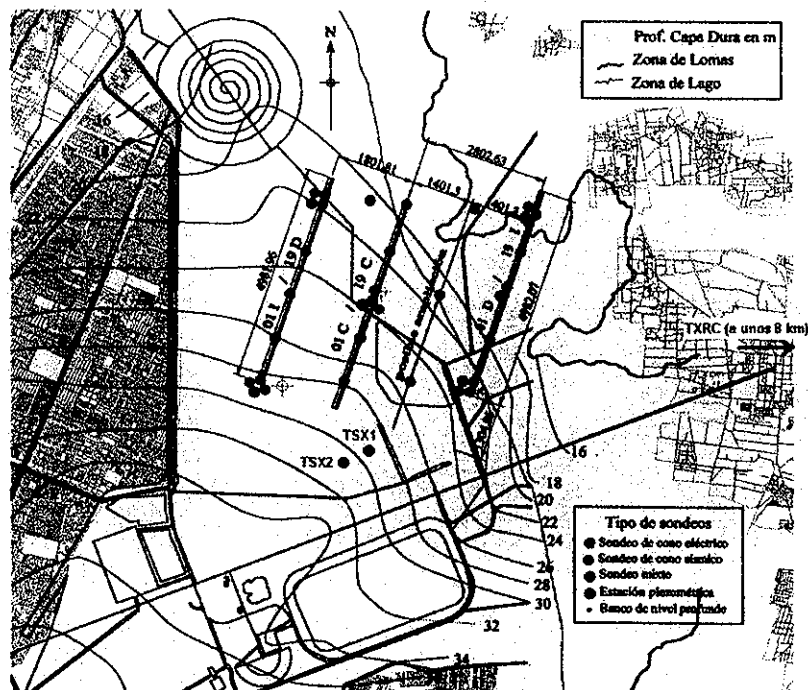


Figura 3.3.1 Ubicacin de las estaciones acelerogrficas (TXS1, TXS2 y TXRC), pistas y estudios de campo

El sismo que se utiliz para la verificacin del modelo analtico fue el registrado el da 30 de septiembre de 1999 de magnitud $M_s=7.5$. Los espectros de las componentes N-S y E-W del sitio en roca (TXCR) se presentan en la figura 3.3.2.



Figura 3.3.2 Espectros de respuesta de aceleraciones para el sismo del 30/Sept/99 en la superficie de la estacin TXCR (San Miguel de Tlaixpan, Texcoco)

Con esta información sísmológica y con las estratigrafías determinadas mediante sondeos eléctricos y sísmicos, en esta tesis, así como los estudios de refracción sísmica reportados por Marsal y Graue (1969), se procedió a reproducir los espectros en el sitio TXS1, figura 3.3.3. Para esto, se aplicó como excitación en el afloramiento rocoso el espectro de aceleraciones medido en el sitio TXCR. La roca de este afloramiento corresponde a la formación que se localiza a una profundidad de 1000 m por debajo de la superficie en la zona del ex-Lago de Texcoco (Hiriart y Graue, 1969; Angel Zúñiga, 2001). Los análisis de respuesta se efectuaron en las direcciones E-W y N-S. El programa utilizado fue el RADSH (Bárcena y Romo, 1994).

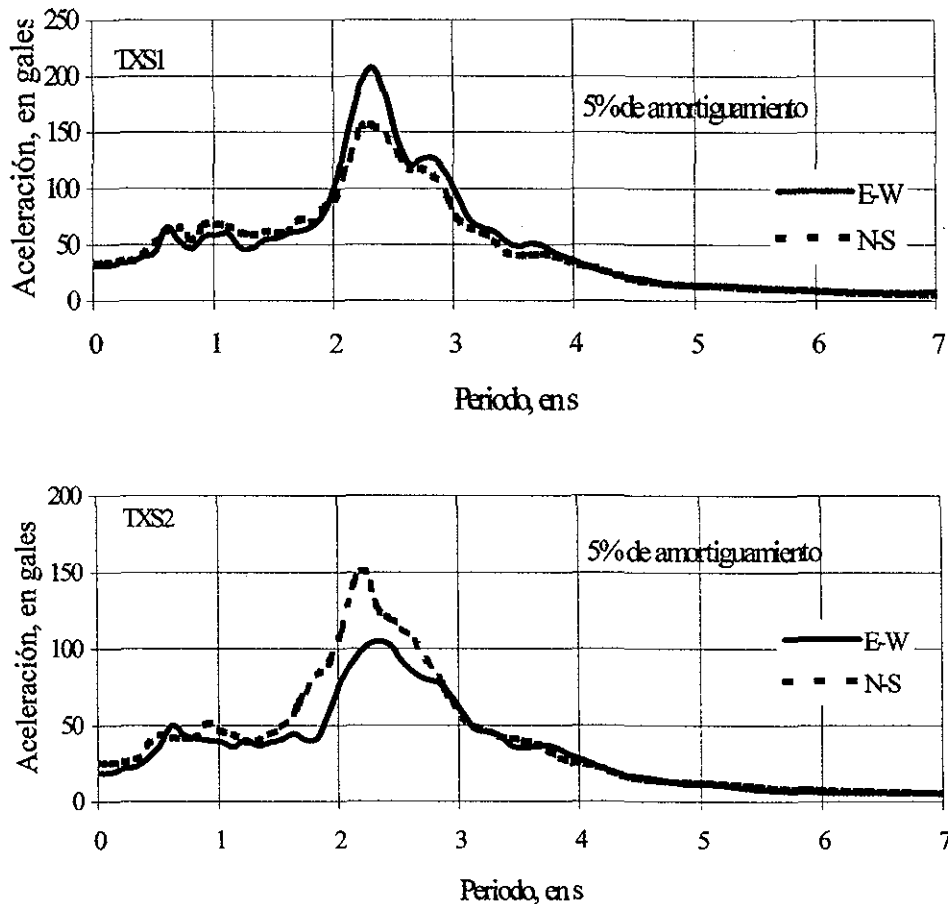


Figura 3.3.3 Espectros de respuesta de aceleraciones en superficie para las estaciones TXS1 y TXS2, sismo 30/sept/1999

Para fines de verificación del modelo estratigráfico, se justifica considerar la estación acelerográfica TXS1 debido a que se encuentra a una distancia aproximada de 1500 m de la zona en estudio; en particular, de los sondeos SCE-01 y SCE-02, por lo que las estratigrafías encontradas en estos sondeos son las que se consideran más representativas del sitio TXS1.

Para conocer las propiedades dinámicas desde la superficie hasta la base del modelo, se tomó como punto de partida la información proporcionada por el sondeo SCE-01, caracterizado por la resistencia de punta del cono eléctrico, q_c , hasta el fin del sondeo a la profundidad de 50 m. A partir de q_c se estimaron los valores de velocidad de onda cortante como se explicará en la sección 4.2. En la figura 3.3.4 se presenta uno de los perfiles de velocidades de onda de cortante utilizados en el modelo, obtenidos a partir de los valores de q_c . En la misma figura se muestran las unidades estratigráficas usadas.

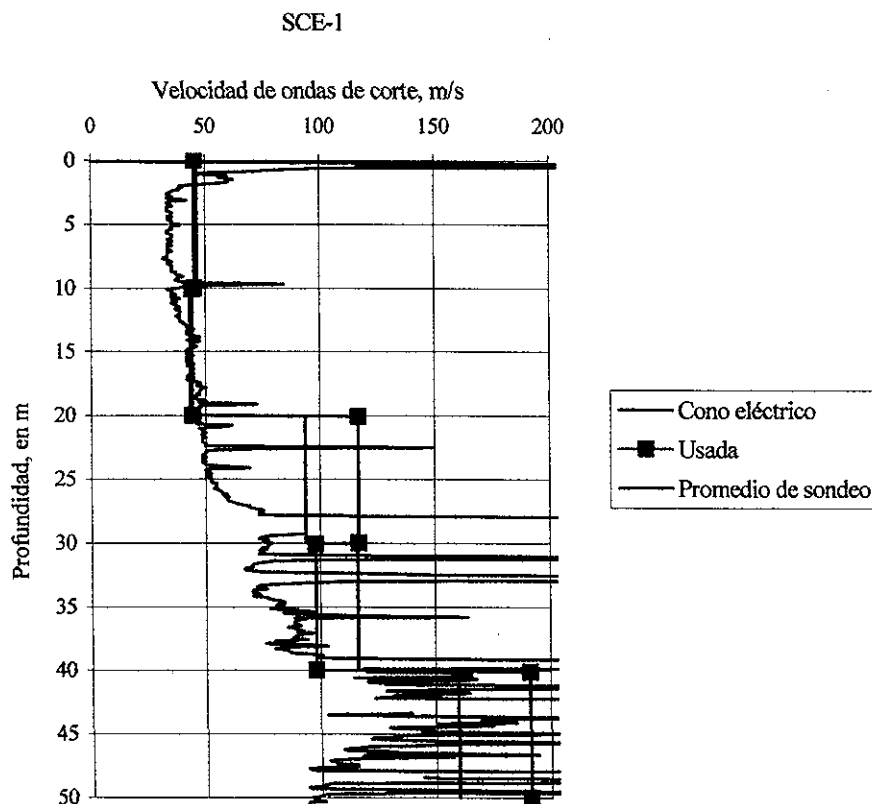


Figura 3.3.4 Velocidades obtenidas a partir del sondeo eléctrico

Subyaciendo a los 50 m de profundidad, se consideraron los resultados del estudio de refracción sísmica reportado por Marsal y Graue (1969). Según dicho estudio se estima, en un punto cercano a TXS1, un valor de velocidad promedio de ondas de compresión de 600 m/s a una profundidad de 80 m. Bajo esta profundidad y hasta 300 m se tiene un estrato de 1700 m/s. Finalmente, entre 300 y 1000 m de profundidad se tiene un valor de velocidad de 2900 m/s (figura 3.3.5).

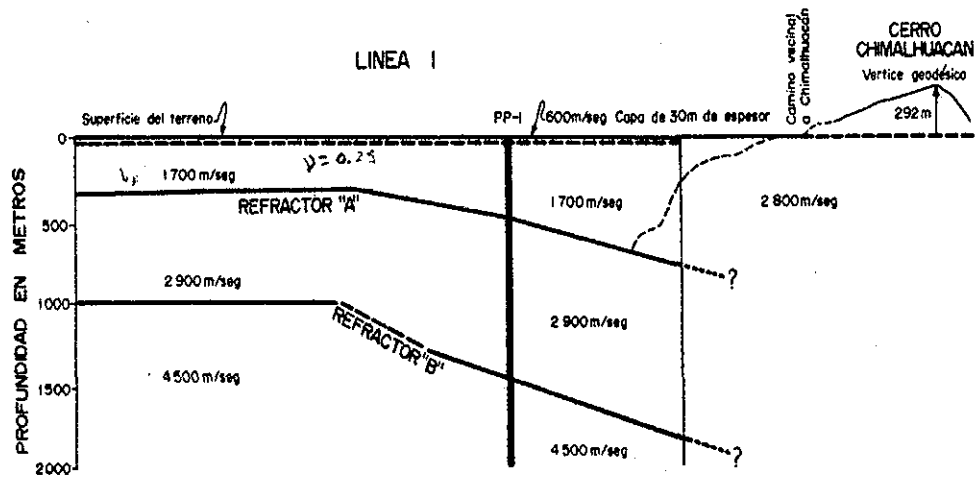


Figura 3.3.5 Perfil de refracción sísmica en la región de Texcoco (Marsal y Graue, 1969)

La velocidad de onda cortante se obtuvo a partir de las velocidades de ondas compresionales con la siguiente expresión, Kramer (1996):

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}} \quad (3.3.1)$$

Tabla 3.3.1 Valores de velocidad de onda de cortante estimadas y usadas en el modelo (estratigrafía superficial: 0-50 m, estratigrafía profunda: 50-1030 m)

Estrato	Espesor (m)	Vs en m/s (sondeos)	Vs en m/s (usada)
1	10	46.29	43.02
2	10	43.00	41.75
3	10	93.66	111.50
4	10	116.52	93.60
5	10	159.86	182.07
6	15	288.75	329.22
7	15	496.25	565.81
8	15	613.00	738.15
9	25	647.68	779.91
10	40	704.04	847.73
11	60	790.75	952.19
12	80	912.13	1098.36
13	100	1030.98	1283.57
14	100	1129.95	1406.78
15	100	1228.92	1530.00
16	100	1327.9	1705.71
17	110	1431.82	1839.20
18	110	1540.68	1979.05
19	110	1649.55	2118.89

Usando un valor de la relación de Poisson $\nu = 0.25$, se obtuvo el perfil de velocidades de onda cortante mostrado en la figura 3.3.6, considerando una variación lineal con la profundidad, para los suelos debajo de los 50 m. En la misma figura se muestra el perfil con el que se logró la mejor aproximación entre los resultados analíticos y los espectros de los acelerogramas registrados. Este perfil corresponde a una relación de Poisson de aproximadamente 0.18, la cual es aceptable para las rocas volcánicas. En la tabla.3.3.1 se muestran los valores de velocidad de onda de corte obtenidos a partir de los sondeos de cono y los valores que permitieron reproducir las respuestas medidas.

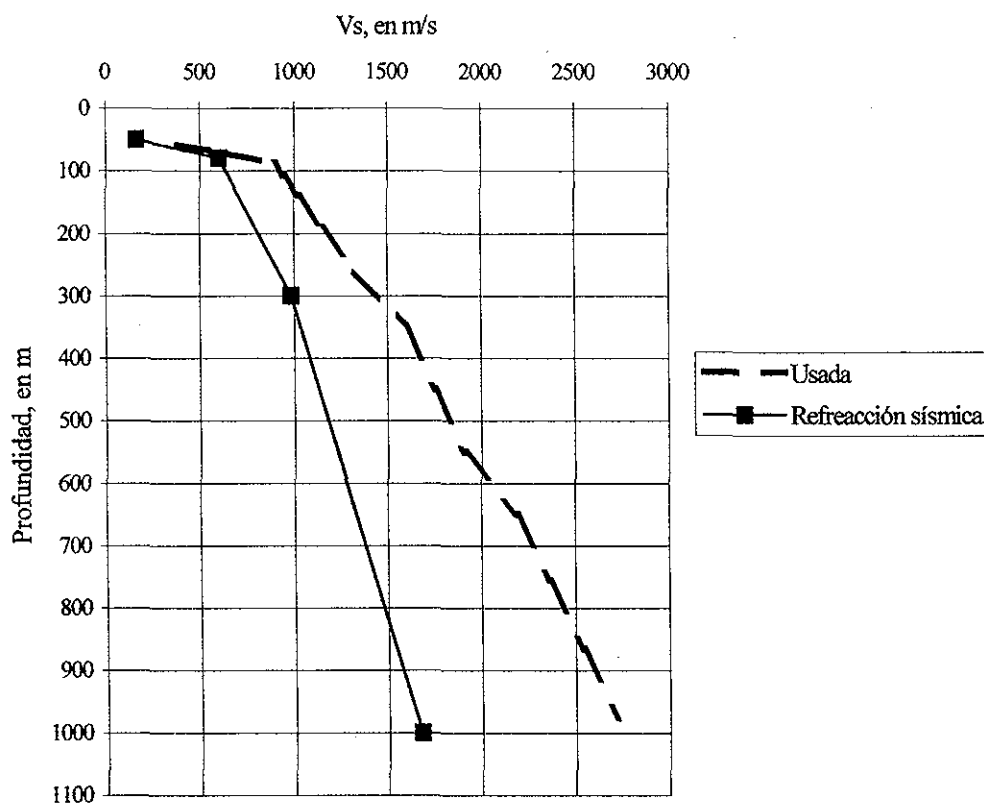


Figura 3.3.6 Perfil de velocidades de ondas de corte para la estratigrafía profunda (50-1030 m)

En las figuras 3.3.7a y 3.3.7b se presentan los resultados de la comparación entre los espectros medidos en ambas direcciones y los espectros calculados para la estratigrafía incluida en la tabla 3.3.1, considerando el semi-espacio a 1030 m de profundidad. Como puede observarse, existe una buena aproximación entre los espectros de respuesta en superficie medidos en la estación TXS1 y los calculados con los programas RADSH y SHAKE (Shnabel et al., 1972). El programa SHAKE se utilizó para tener redundancia en los resultados espectrales de RADSH. Los factores con los que se pasa de la tercera a la cuarta columna de la tabla 3.3.1 se utilizaron en el resto de los sitios para obtener las respuestas. En cada sitio se usó la estratigrafía superficial obtenida de sondeos específicos (Romo et al., 2001), sobreyaciendo la misma estratigrafía profunda.

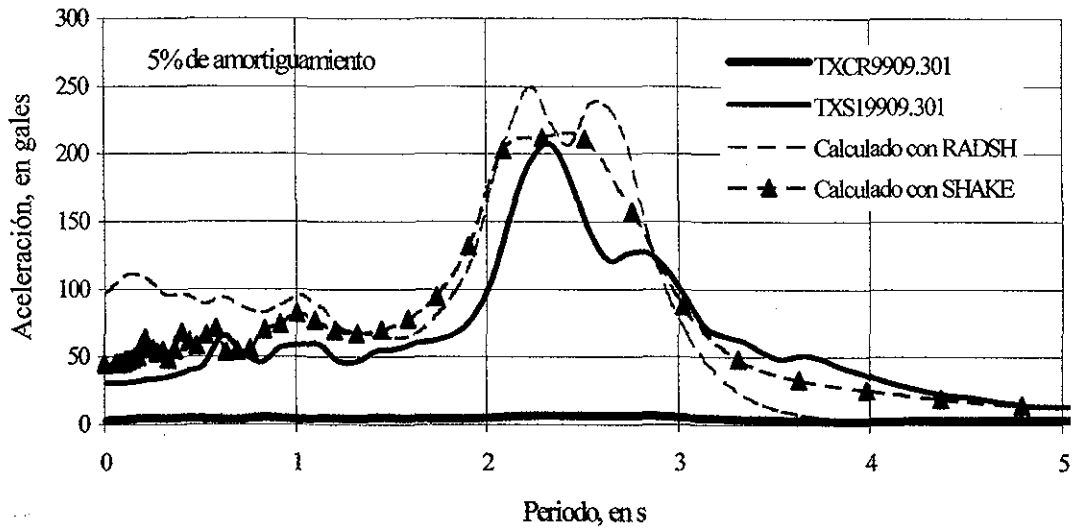


Figura 3.3.7a Comparación de los espectros calculados con el medido en dirección E-W. Sismo del 30 de septiembre de 1999

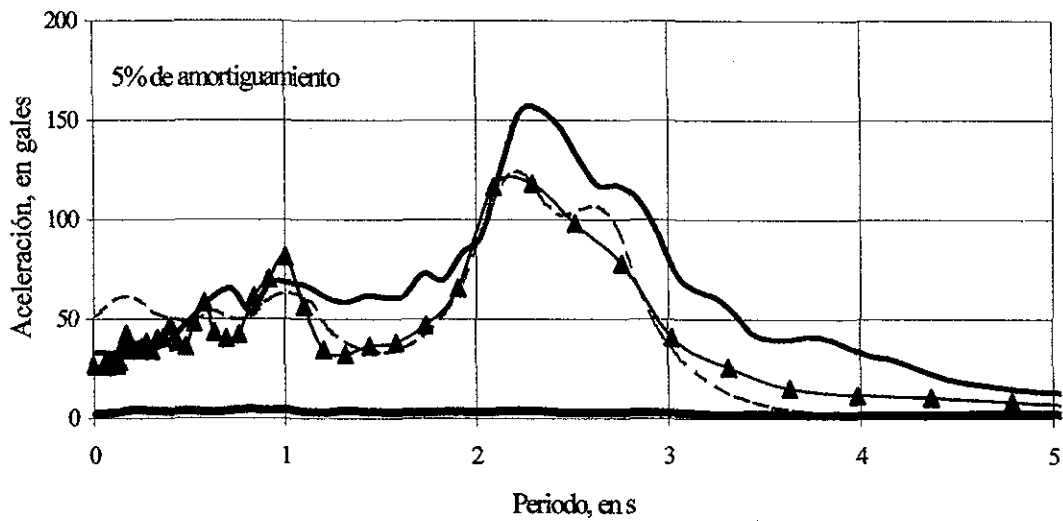


Figura 3.3.7b Comparación de los espectros calculados con el medido en dirección N-S. Sismo del 30 de septiembre de 1999

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUBSUELO DEL SITIO

4.1 Estratigrafías típicas

El sitio del ex-Lago de Texcoco es una de las zonas más deprimidas de la cuenca de México, aun en época de estiaje una parte de la zona permanece inundada. El lago de Texcoco se alimentaba por un flujo que provenía de los lagos del norte (aproximadamente 7 m más altos), como por ejemplo del lago del Xaltocan (San Cristóbal), y de los lagos del sur, Xochimilco y Chalco. Por consiguiente, el lago de Texcoco tiene la característica de ser lacustre permanente con evaporación intensa. Se puede considerar que es la zona más al oriente de lo que era el lago completo de Texcoco, de tal forma que existe una influencia de la zona que se podría llamar costera, por los aportes de los ríos que llegan del oriente; en la figura 4.1.1 se observa el modelo digital de relieve sombreado del sitio Texcoco. Como resultado, se tienen materiales arcillosos combinados, y cada vez más conforme nos movamos hacia el nororiente, con materiales deltaicos, sedimentos muy diferentes de las arcillas plásticas lacustres, Auvinet (2001).

Del oriente llega un gran número de ríos, uno de ellos con caudal reducido, inclusive intermitente, pero que finalmente sí contribuye a la geomorfología del lugar, de tal forma que se podrían esperar anomalías estratigráficas asociadas a estos causes. Sin embargo, estos cauces han sido modificados a lo largo del tiempo, debido a que han sido encauzados o desviados, generando en la actualidad un trazo que puede corresponder a una costa reciente o artificial. Por consiguiente, se considera importante el aspecto hidrológico en el pasado, en la figura 4.1.2 se muestra el mapa hidrológico de la ciudad de México elaborado por el señor Tito Rosas en el año de 1868, digitalizado por Auvinet (Romo et al., 2001), en el cual se observa que una de las pistas coincide con uno de los ramales de los ríos que existían en esa época. En esa zona se podría esperar una mayor presencia de los depósitos deltaicos.

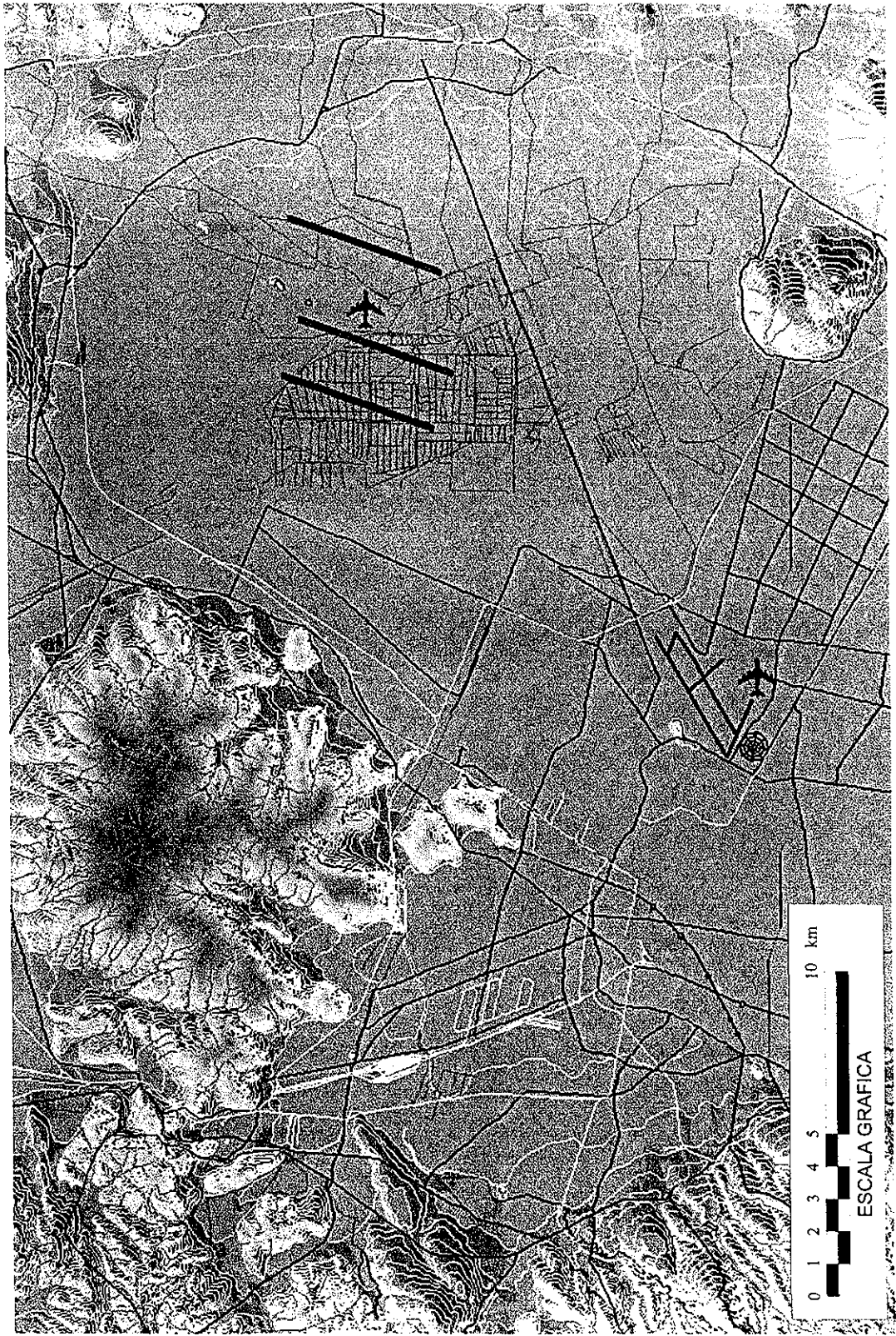


Figura 4.1.1 Modelo digital de relieve sombreado del sitio de Texcoco, elaborado por Auvinet (Romo et al., 2001)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

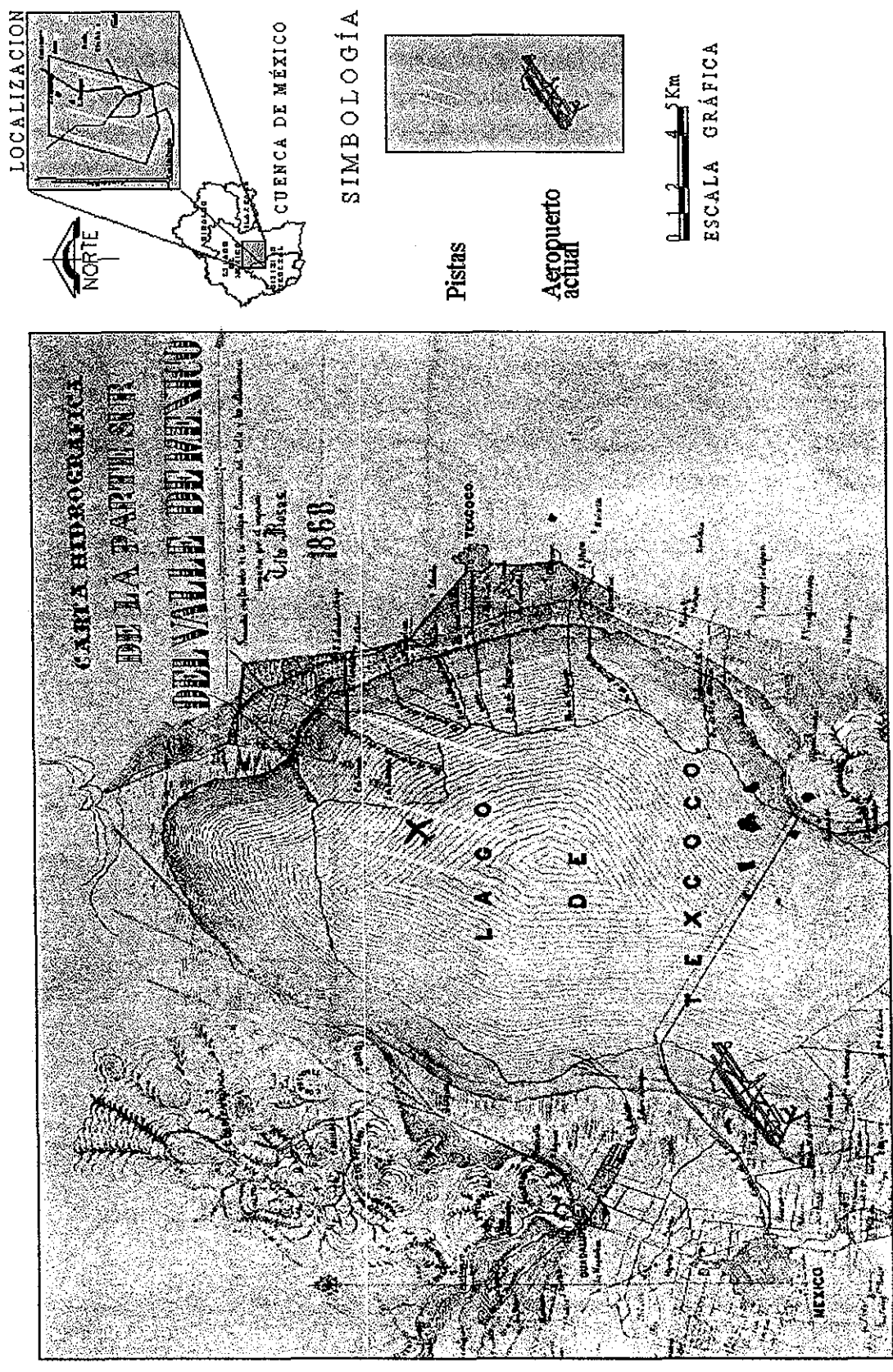


Figura 4.1.2 Hidrología de 1868 elaborado por Tito Rosas, digitalizado por Auvinet (Romo et al., 2001)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La caracterización estratigráfica de la zona de estudio se realizó mediante la información obtenida de la exploración directa, en las que se usó como de penetración estático-eléctrico (CPT) para las series arcillosas combinando con la prueba de penetración estándar (SPT) para las series aluviales, en los estratos donde no se pudo penetrar con facilidad se complementó con la técnica de avance controlado. La ubicación de los sondeos se muestra en la figura 4.1.3.

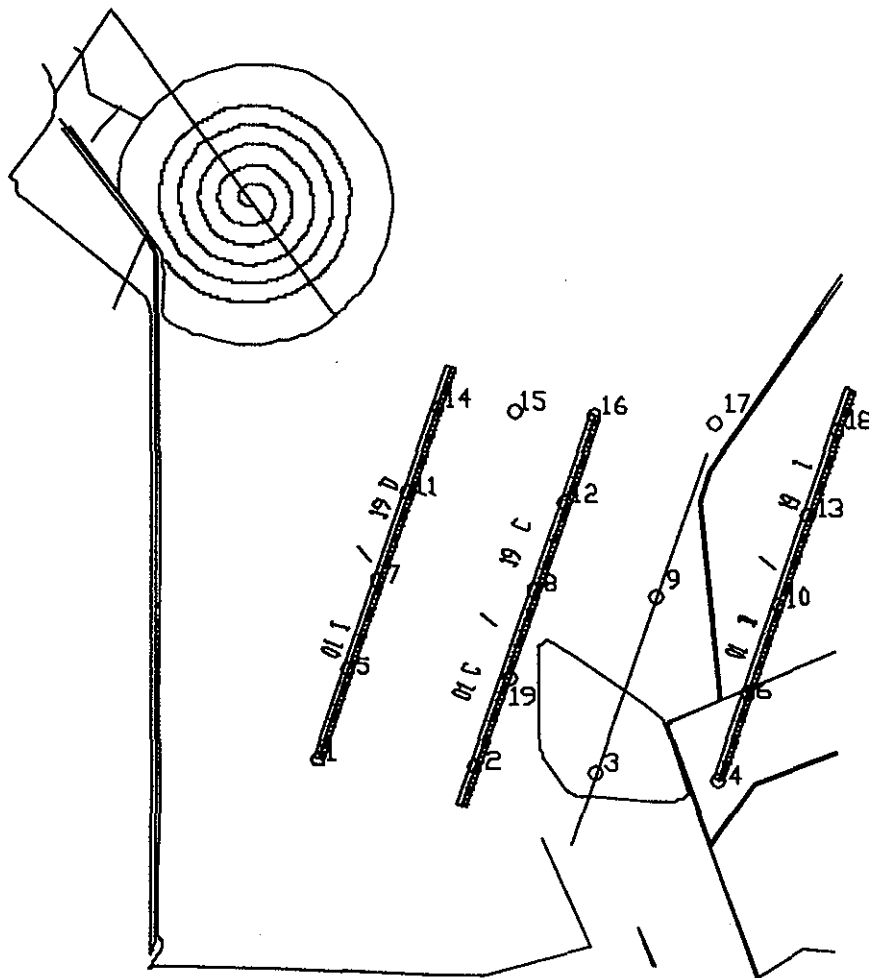


Figura 4.1.3 Ubicación de las pistas y sondeos de exploración directa (Romo et al., 2001)

Penetrómetro estático tipo eléctrico (cono holandés, CPT)

El penetrómetro de cono tipo eléctrico para hincarse a presión (estático) (Begeman, 1963; De Ruitter, 1972 y NRACC, 1975) tiene incorporadas celdas instrumentadas con deformímetros eléctricos que permiten la medición simultánea de las fuerzas necesarias para el hincado de la punta cónica de 60° de ángulo de ataque y de 3.6 cm de diámetro (10 cm² de área lateral) y de la funda cilíndrica de fricción (Begeman, 1953), también de 3.6 cm de diámetro y 13.25 cm de longitud (150 cm² de área lateral). Cabe aclarar que las fuerzas para el hincado de la punta del cono se estiman a partir de las mediciones de los deformímetros y calibraciones. En la figura 4.1.4 se muestran esquemáticamente las características de este penetrómetro (CFE, 1980 y Santoyo y Olivares, 1990). La capacidad de las celdas debe elegirse de acuerdo con la resistencia del suelo en que se hinca.

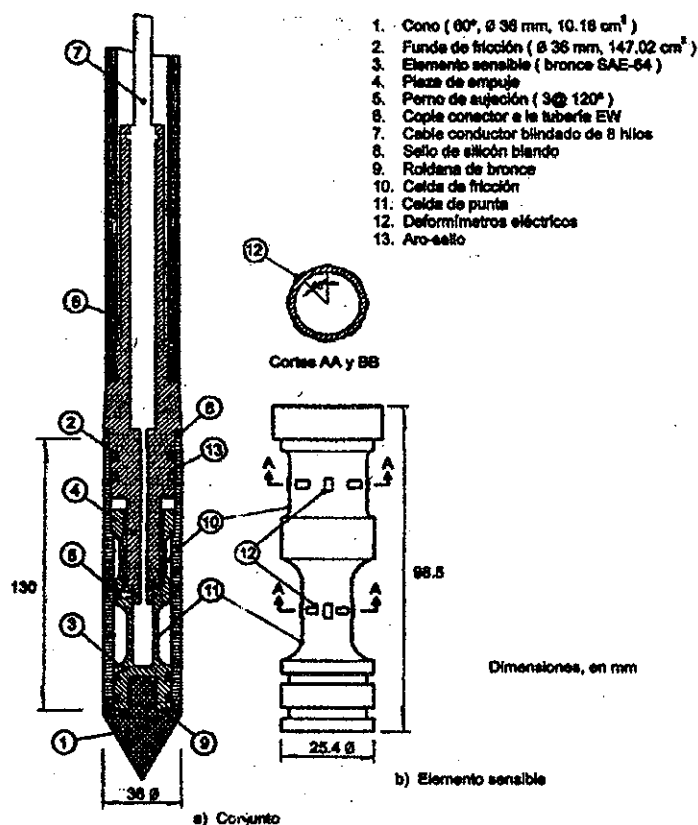


Figura 4.1.4 Corte transversal del penetrómetro eléctrico (CFE, 1980 y Santoyo y Olivares, 1990)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Este penetrómetro se introduce en el suelo con ayuda de un mecanismo hidráulico capaz de aplicar 2.5, 10 o 20 toneladas de fuerza axial. Con una perforadora usual en geotecnia, se puede hincar el cono como se muestra en la figura 4.1.5. La velocidad de hincado, estimada estándar en las arcillas de la ciudad de México es de 2 cm/s, la cual corresponde a la norma ASTM- D- 3441-75T,1975. La resistencia de punta y la de fricción se pueden registrar manualmente, con ayuda de un equipo digital. En la actualidad esta información se captura utilizando computadoras.

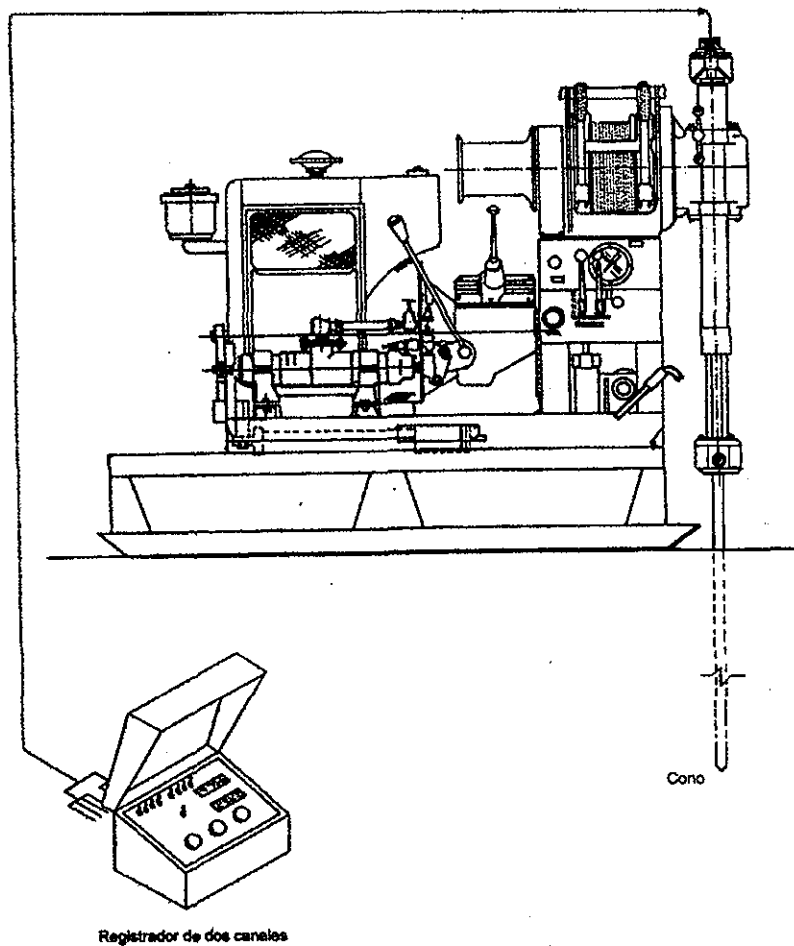


Figura 4.1.5 Operación del cono

Penetrómetro estándar (SPT)

El penetrómetro estándar es un tubo de dimensiones normalizadas que se hinca a percusión, figura 4.1.6. Consiste en un tubo de pared gruesa partido longitudinalmente, con una zapata de acero endurecido y una cabeza que lo une al extremo inferior de la columna de barras de perforación con las que se hinca; la cabeza tiene un conducto para la salida de azolves a través de una válvula esférica o una válvula de varilla. Opcionalmente se utiliza una trampa de paso para detener las muestras (CFE, 1980 y ASTM D – 1586-67,1977).

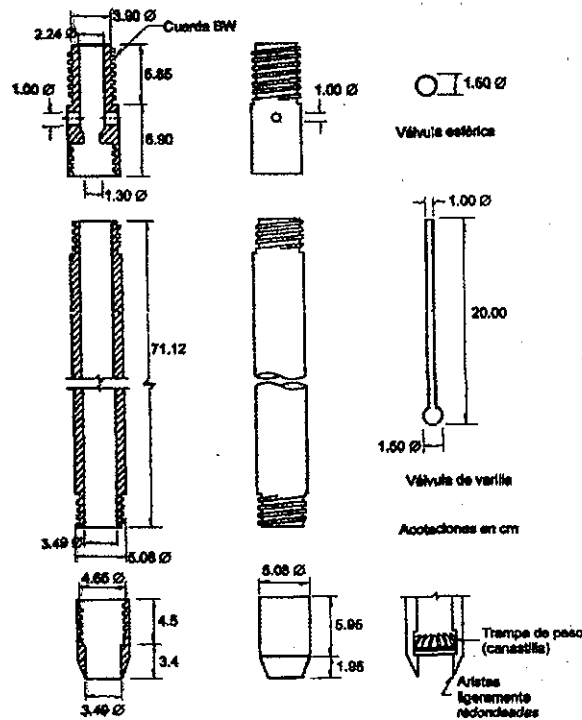


Figura 4.1.6 Penetrómetro estándar (CFE, 1980 y ASTM D – 1586-67,1977)

El equipo auxiliar para el hincado es una masa golpeadora de acero de 64 kg con guía de caída libre de 75 cm y barras de perforación AW o BW (4.44 y 5.4 cm de diámetro y 6.53 y 6.23 kg/m de peso, respectivamente) con un yunque de golpeo incorporado a la columna de barras. La masa golpeadora usualmente se levanta con un malacate de fricción (cabeza de gato).

El penetrómetro estándar se hinca 45 cm en el fondo de una perforación de 7.5 cm de diámetro mínimo con los impactos de la masa de 64 kg y caída libre de 75 ± 1 cm, figura 4.1.7. Se cuenta el número de golpes para hincar cada tramo de 15 cm. Se define como resistencia a la penetración estándar, al número N de golpes necesarios para hincar el penetrómetro los dos últimos tramos de 15cm. Cuando debido a la dureza del suelo no se puede penetrar los 45 cm, se define N por extrapolación (CFE, 1980).

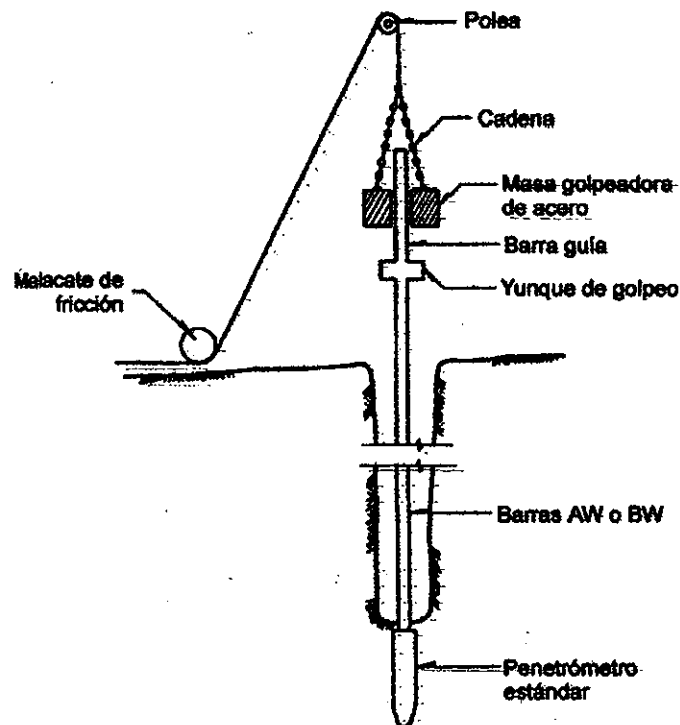


Figura 4.1.7 Prueba de penetración estándar

La prueba de penetración estándar debe realizarse cuidando que el muestreador tenga las dimensiones señaladas, el peso del martillo sea de 64 kg y la caída libre de 75 cm. La perforación debe mantenerse con un espesor máximo de azolves de 5 cm y el agua o lodo empleados a un nivel constante. Las barras AW o BW y su movimiento, al meterlas o sacarlas del sondeo, deberá ser lento para evitar que se genere succión y con ello se reduzca la compacidad relativa de los suelos predominantemente friccionantes.

A partir de la información obtenida durante la etapa de exploración directa y de los resultados de los ensayos de laboratorio, complementada con el conocimiento que se tiene de la zona, se definieron, para fines de los análisis, las estratigrafías típicas.

Técnica de avance controlado

El avance controlado consiste en perforar con presión y velocidad constante midiendo el tiempo que le toma a la herramienta avanzar 10 cm; al graficar los tiempos con la profundidad es posible detectar los cambios de estratos por su resistencia.

4.1.1 Estratigrafía en la pista 011/19D.

La estratigrafía típica de la pista 011/19D, figura 4.1.1.1, presenta series de suelos arcillosos blandos hasta una profundidad de 50 m, identificados por medio de la resistencia de punta del cono eléctrico (CPT), con las siguientes características:

Costra superficial: suelo arcilloso limoso relativamente firme por efecto de secado solar, comprendida entre 0 a 0.8 m de profundidad, con una resistencia de punta, $q_c = 15 \text{ kg/cm}^2$.

Serie arcillosa superior: arcilla plástica de origen lacustre, comprendida entre 0.8 a 22 m de profundidad, de baja consistencia, con $q_c = 3 \text{ kg/cm}^2$. Se observa una tendencia a disminuir de espesor en dirección noreste, es decir, a medida que se acerca al sondeo 14 (ver figura 4.1.3).

Primer capa dura: se tiene una secuencia de estratos alternados de suelos arenosos, arcillosos y limosos de 22 a 30 m de profundidad, con resistencias de punta mayores a 120 kg/cm^2 .

Serie arcillosa inferior: pasando la capa dura anterior se observa la serie arcillosa inferior con una consistencia de media a alta ($q_c = 12 \text{ kg/cm}^2$), ubicada entre los 30 a 35 m de profundidad.

Serie errática: tiene una estratigrafía muy variable en cuanto a los valores de q_c de la arcilla, llegando hasta los 50 m de profundidad.

Depósitos profundos: se consideraron hasta una profundidad de 1030 m y a partir de esta profundidad se definió el semi-espacio para fines de análisis de la respuesta sísmica del sitio. Las características de este depósito se obtuvieron a partir de los valores de velocidades de ondas compresionales obtenidas por ensayos de refracción sísmica reportadas por Marsal y Graue (1969).

Semi-espacio: se ubicó a los 1030 m basados en las siguientes consideraciones: a) el Sondeo PP-1 y la descripción geológica dada por Hiriart y Graue (1969), como se muestra en las figuras 4.1.1.2, cerca del sitio en estudio, b) los análisis de respuesta sísmica para ubicar la profundidad del semi-espacio y c) la información proporcionada por el geólogo Angel Zúñiga para el sitio donde se ubica la estación en roca TXCR (San

Miguel Tlaixpan), indicando que este afloramiento pertenece a una roca vulcanita del oligoceno, la cual se encuentra a una profundidad aproximada de 1000 m en la zona del ex-Lago de Texcoco, la cual coincide con el perfil litológico de las figuras 4.1.1.2.

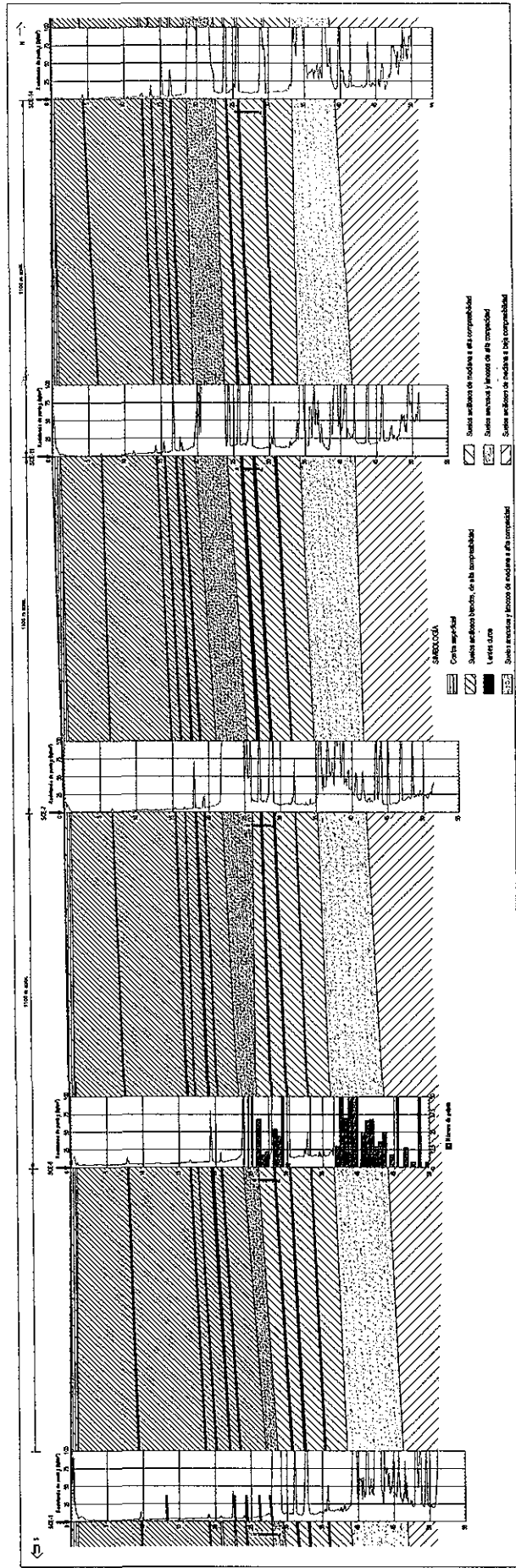


Figura 4.1.1.1 Corte estratigráfico a lo largo de la pista 011/19D, Romo et al., (2001)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.2 Estratigrafía en la pista 01C/19C

La estratigrafía típica de la pista 01C/19C, figura 4.1.2.1, presenta series estratigráficas de suelos arcillosos intercalados con suelos aluviales de baja a alta compacidad relativa, las series arcillosas fueron caracterizadas con resistencia de punta del cono eléctrico (CPT), y las series aluviales mediante el número de golpes, N, necesarios para penetrar 30 cm de estrato, utilizando la prueba de penetración estándar (SPT), teniendo así las siguientes características:

Costra superficial: comprendida entre 0 a 1.2 m de profundidad, con una resistencia de punta, $q_c = 25 \text{ kg/cm}^2$.

Serie arcillosa superior: comprendida entre 1.2 a 21 m de profundidad, de baja consistencia, con $q_c = 3 \text{ kg/cm}^2$. Se observa una tendencia a disminuir de espesor en dirección noreste, es decir, a medida que se acerca al sondeo 12 (ver figura 4.1.3).

Primera capa dura: se tiene un estrato de arcilla dura, intercalada con estratos aluviales de compacidad relativa variable, de 21 a 30 m de profundidad, con resistencias de punta mayores a 100 kg/cm^2 y para estratos aluviales se tiene un N iguales o mayores que 50; lo cual indica estratos compactos.

Serie arcillosa inferior: pasando la capa dura anterior se observa la serie arcillosa inferior con una consistencia de media a alta ($q_c = 13 \text{ kg/cm}^2$), ubicada entre los 30 y 35 m, serie que va disminuyendo de espesor en la dirección noreste.

Serie errática: tiene una estratigrafía muy variable en cuanto a los valores de q_c de la arcilla y los valores de número de golpes N de los estratos aluviales intercalados, llegando aproximadamente hasta los 50 m de profundidad.

Depósitos profundos: se consideraron hasta una profundidad de 1030 m y a partir de esta profundidad se definió el semi-espacio, para fines de análisis de la respuesta sísmica del sitio. Las características de este depósito se obtuvieron a partir de los valores de velocidades de ondas compresionales obtenidas por ensayos de refracción sísmica reportados por Marsal y Graue (1969).

Semi-espacio: se ubicó a los 1030 m basados en las consideraciones anteriores.

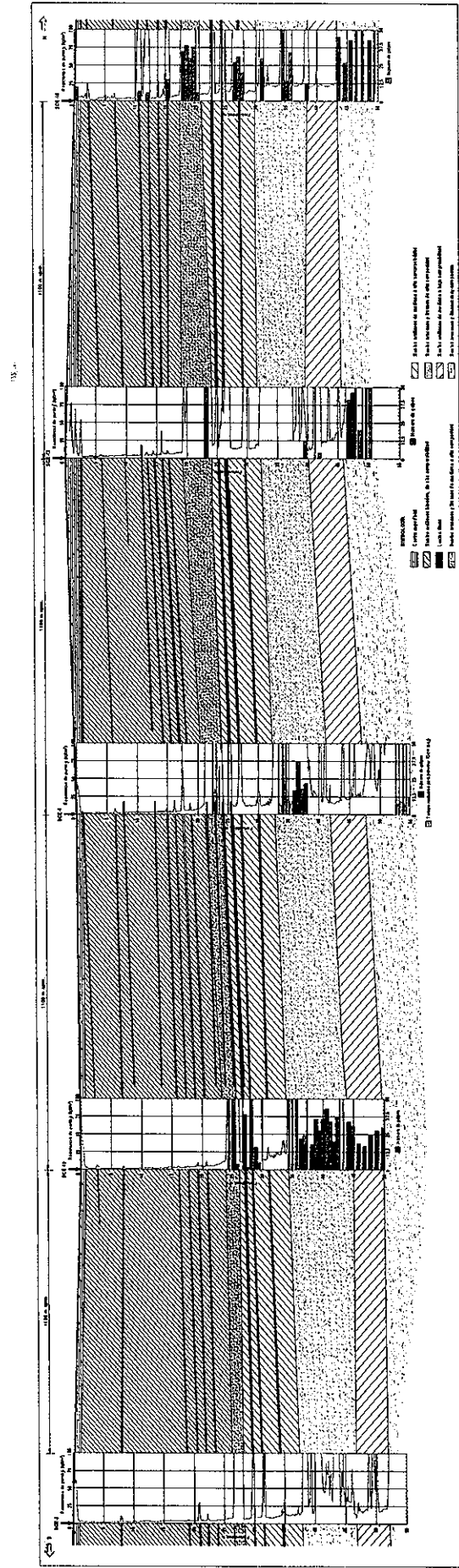


Figura 4.1.2.1 Corte estratigráfico a lo largo de la pista 01C/19C, Romo et al., (2001)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

4.1.3 Estratigrafía en la pista 01D/19I

En esta pista se tiene una variación apreciable en las condiciones estratigráficas a lo largo de la pista. En el extremo 01D, donde se localiza el sondeo SCE-04, las condiciones estratigráficas son iguales a las de zona del lago como se describió anteriormente. Sin embargo, estas condiciones cambian conforme uno se acerca al extremo opuesto, donde se localiza el sondeo SCE-18. En este sondeo se tienen condiciones estratigráficas un tanto similares a las condiciones de la zona de transición, es decir, los depósitos arcillosos son de espesor mucho menor (5 m como máximo), intercalados por estratos aluviales y la segunda capa dura se ubica a una profundidad de 30 m aproximadamente, figura 4.1.3.1.

A partir de los 30 de profundidad se consideraron los depósitos profundos hasta una profundidad de 1030 m y a partir de esta profundidad se definió el semi-espacio, para fines de análisis de la respuesta sísmica del sitio. Las características de este depósito se obtuvieron a partir de los valores de velocidades de ondas compresionales obtenidas por ensayos de refracción sísmica reportados por Marsal y Graue (1969).

De acuerdo con el levantamiento topográfico realizado en el sitio de estudio, se pudo observar que las cotas de la superficie del terreno en cada sondeo realizado no tienen una variación significativa. Por consiguiente, la superficie del terreno se consideró horizontal en el proceso de correlacionar los sondeos, con el fin de obtener perfiles virtuales en puntos donde no se dispone de información geotécnica de campo.

Con base en la información topográfica proporcionada, para la pista 01I /19D se tiene una cota en la superficie del terreno del sondeo 4 de 2231.0635 m y para el sondeo 14 de 2229.6858 m, obteniendo así una pendiente $m = 1.38 / 4429 = 0.031\%$, por lo tanto, es prácticamente horizontal.

De la misma manera, para la pista 01C/19C se tiene una cota en la superficie del terreno del sondeo 2 de 2231.0466 m y para el sondeo 12 de 2230.6294 m, obteniendo así una pendiente $m = 0.417 / 3044.96 = 0.014\%$, por consiguiente, es prácticamente horizontal. La pendiente de la superficie del terreno para la pista 01D/ 19I se consideró horizontal, por tener una pendiente similar a las dos pistas anteriormente mencionadas.

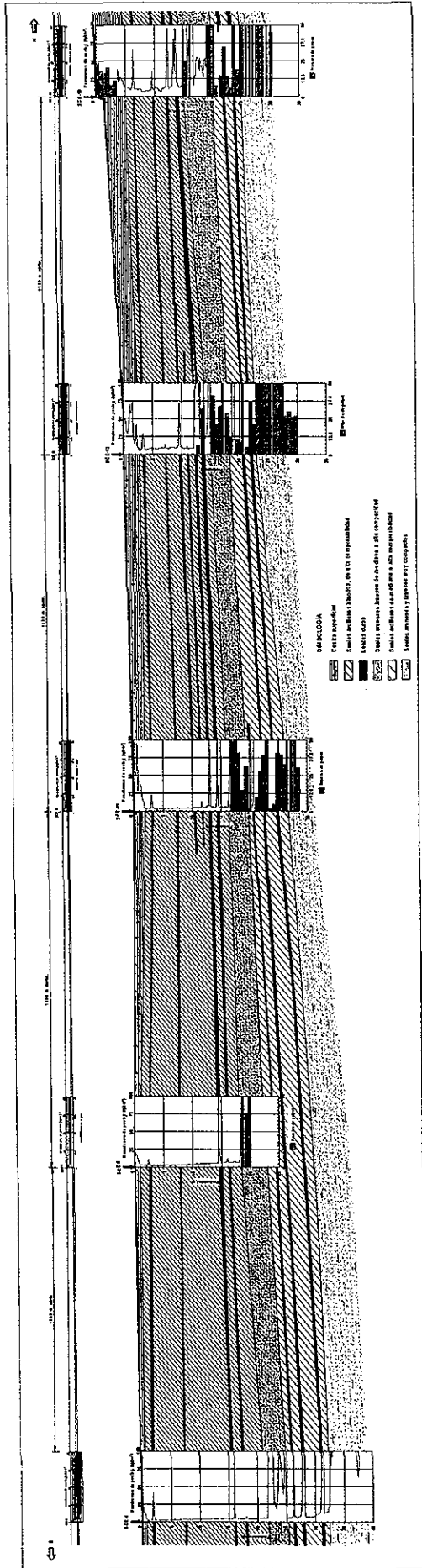


Figura 4.1.3.1 Corte estratigráfico a lo largo de la pista 01D/19I, Romo et al., (2001)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2 Perfiles de velocidades de ondas de corte

Considerando los resultados de los sondeos realizados en el predio, se obtuvieron las velocidades de ondas de corte por medio de correlaciones semi-empíricas para los estratos arcillosos en función de q_c y las series aluviales considerando el valor de N .

Para las series arcillosas se utilizó la correlación propuesta por Ovando y Romo (1991), que permite calcular las velocidades de ondas de cortante, V_s , a partir de la resistencia a la penetración en ensayos de cono eléctrico, la correlación se deriva con base en la teoría de expansión de cavidades y considera el comportamiento no-lineal del suelo por medio de un modelo hiperbólico esfuerzo-deformación. La relación propuesta por estos autores es:

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_k \gamma_t}} \quad (4.2.1)$$

Donde q_c está dado en t/m^2 ; γ_t es el peso volumétrico total del suelo en t/m^3 , V_s velocidad de onda de corte en m/s y, η y N_k son coeficientes que dependen del tipo de suelo, los cuales para la ciudad de México en la zona del lago de Texcoco, se muestran en la tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1. Valores de los parámetros η y N_k (Ec 4.2.1)

Valores de N_k			η	Tipo de suelo
máx	medio	min		
14	9.5	6.7	23.33	Arcillas del lago de Texcoco y virgen

En los análisis de amplificación se usaron los valores de: $N_k = 9.5$ y $\eta = 23.33$

Para las series aluviales se empleó la correlación propuesta por Ohta y Goto (1976), que permite calcular las velocidades de ondas de cortante, V_s , a partir del número de golpes en ensayos de penetración estándar, N . La relación propuesta por estos autores es:

$$V_s = 69 N_1^{0.17} D^{0.2} F_1 F_2 \quad (4.2.2)$$

Donde N_1 es el número de golpes de la prueba SPT corregido. (Al N de campo se le corrige por el efecto del esfuerzo geostático vertical, mediante la ecuación propuesta por Liao y

Whitman (1986): $N_1 = C_N N$; $C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{v0}}}$; aquí el esfuerzo efectivo geostático, σ'_{v0} , está dado en ton/pie²); D es la profundidad en metros, los factores F_1 y F_2 dependen del tipo de depósito y de la distribución del tamaño de los granos; para el factor de $F_1.F_2$ se consideró el valor de 1.20.

A manera de ejemplo, se presenta el sondeo SCE-19 sobre la pista 01C /19C. En la figura 4.2.1 se muestra el perfil de q_c en los estratos arcillosos y el N en las series aluviales, en donde no se pudo utilizar el cono eléctrico. El perfil de velocidades de onda de cortante, obtenidos a partir de las ecuaciones antes mencionadas, se presenta en la figura 4.2.2. Una vez obtenidas las velocidades de onda de cortante, se determinó el módulo cortante de rigidez inicial (deformaciones angulares pequeñas) como, $G_{máx} = V_s^2 \rho$ (ρ =densidad del suelo). Los demás perfiles de velocidad de onda de corte para cada sondeo se obtuvieron de manera similar.

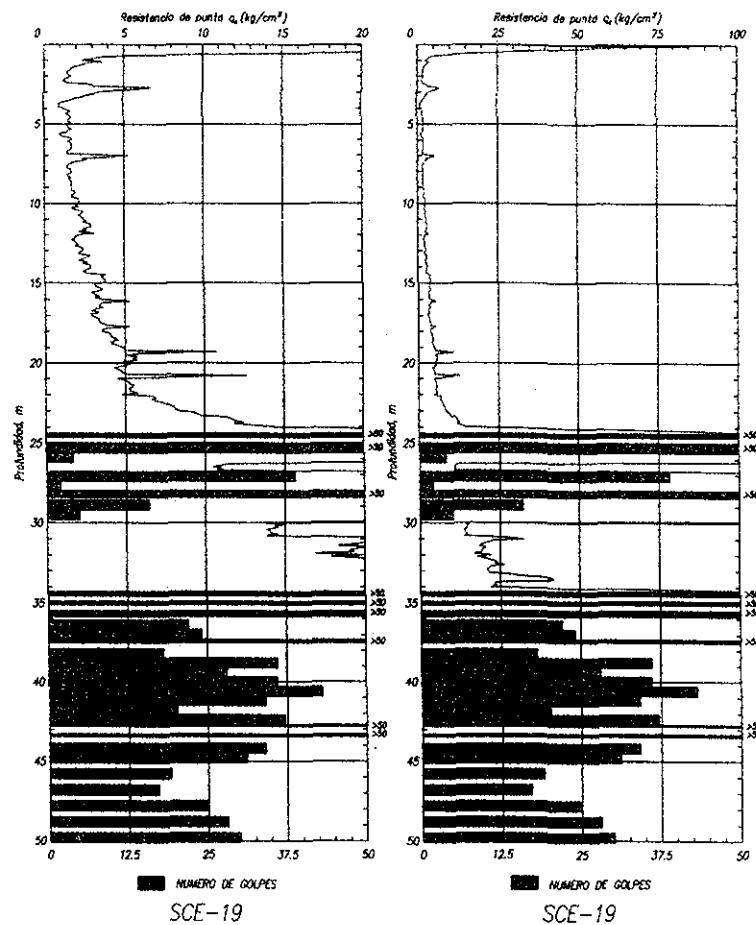


Figura 4.2.1 Sondeo 19 de la pista 01C/19C, se tienen series arcillosas intercaladas con series aluviales, caracterizadas con q_c y N respectivamente (Romo et al., 2001)

SCE-19

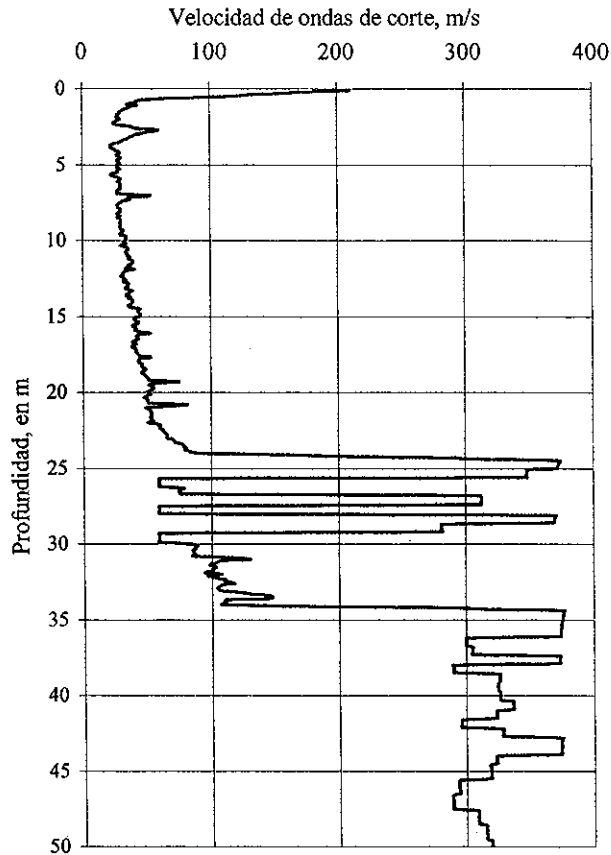


Figura 4.2.2 Perfil de velocidades de onda cortante del sondeo SCE-19

Para fines comparativos, se presenta en la figura 4.2.3a el perfil idealizado de las velocidades de ondas de corte obtenidas de un ensaye de sonda suspendida realizado (a 3 km aproximadamente del sondeo SCE -01) en el sitio Subestación Eléctrica Lago, Mendoza et al., (2002), y en la figura 4.2.3b el perfil de velocidades de onda de corte del sondeo SCE- 01, el cual se encuentra en la cabecera suroeste de la pista 01I /19D. De la comparación se observa una muy buena aproximación de las velocidades de onda de corte obtenidas con las correlaciones antes mencionadas con respecto a las medidas en el sitio de la Subestación Eléctrica Lago, adicionalmente se observa la tendencia estratigráfica descrita en la sección 4.1.

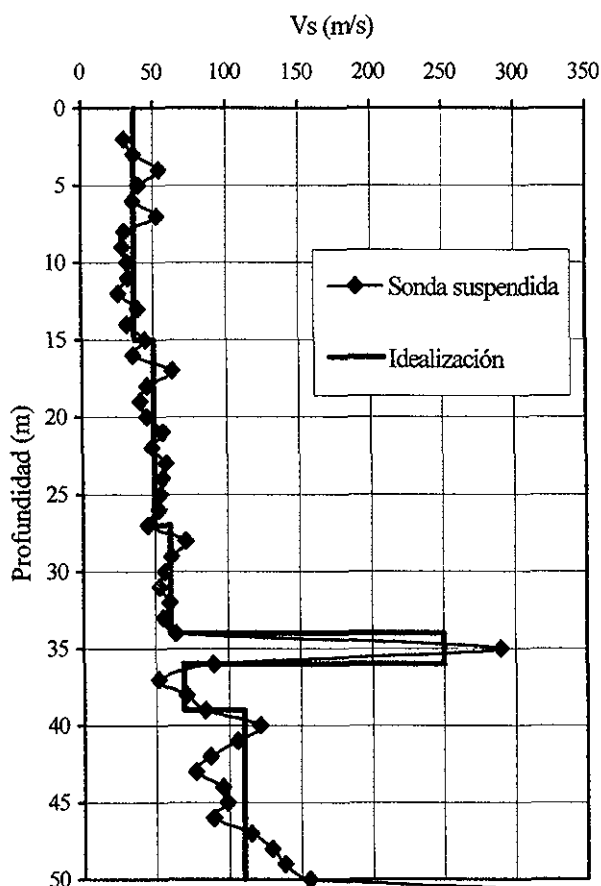


Fig. 4.2.3a Perfil idealizado de ondas de corte para el sitio Subestación Eléctrica Lago, Mendoza et al., (2002).

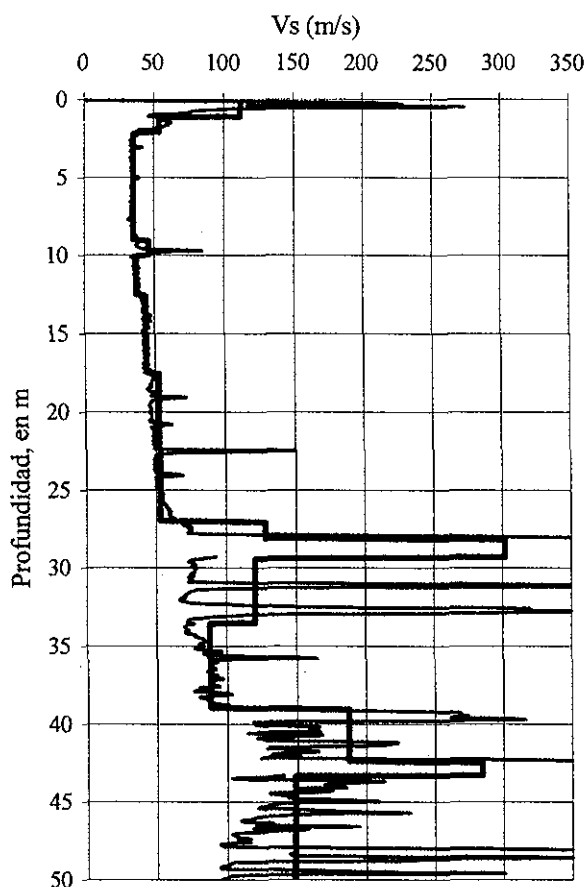


Fig. 4.2.3b Perfil idealizado de ondas de corte para el sondeo SCE - 01

4.3 Consideración de la variabilidad en los perfiles de velocidades de ondas de corte, Vs

En el sitio de estudio se ha observado la existencia de una variación espacial en las velocidades de ondas de corte. En la figura 4.3.1 se muestran las velocidades de ondas de corte a lo largo de la pista 01I / 19D (en escala semi-logarítmica). Se observa que las velocidades calculadas varían hasta en un $\pm 50\%$, con respecto al valor promedio, a lo largo de la pista.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

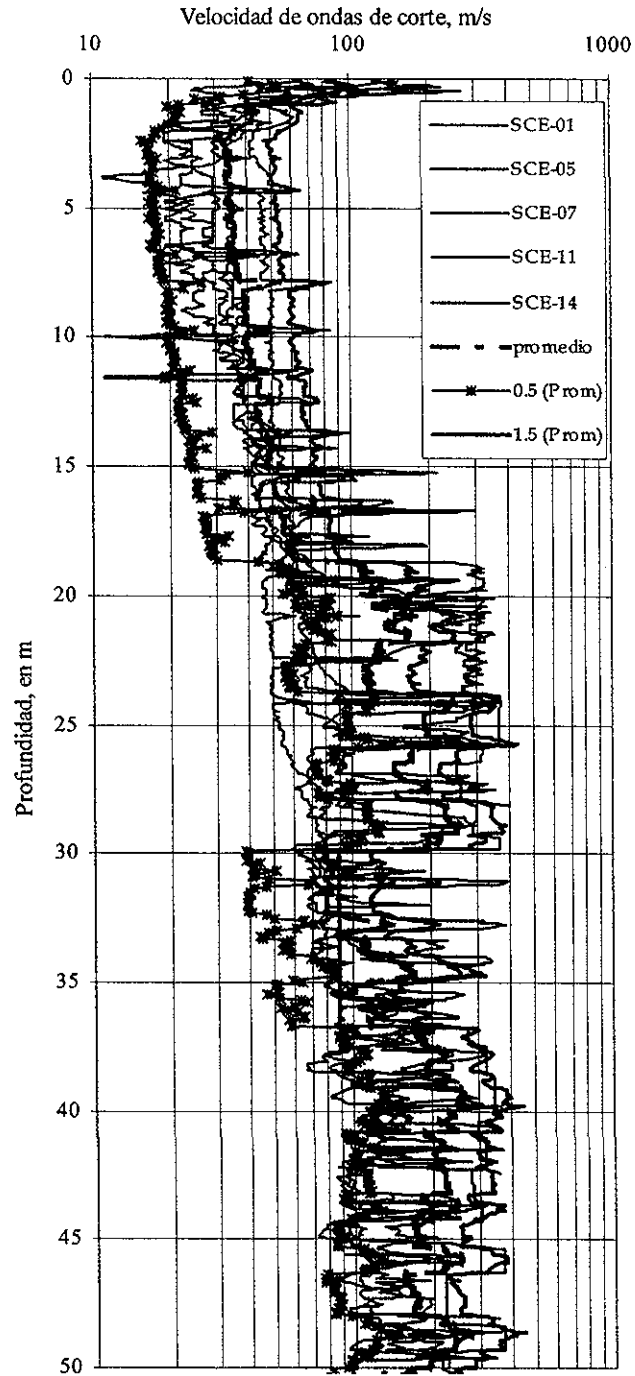


Figura 4.3.1 Variación espacial de las velocidades de ondas de corte a lo largo de la pista 01I / 19D (en escala semi-logarítmica).

Por otra parte, los valores, de las propiedades dinámicas en cada uno de los sondeos realizados en este estudio, están influenciados por, al menos, los siguientes factores:

- Repetibilidad en las mediciones en campo. Las series arcillosas se caracterizaron mediante la resistencia de punta del cono eléctrico (CPT), y las series aluviales con el número de golpes, N , necesarios para penetrar 30 cm de estrato, utilizando la prueba de penetración estándar (SPT).
- Obtención de las velocidades de ondas de corte mediante ecuaciones semi-empíricas; para las series arcillosas se utilizó la correlación propuesta por Ovando y Romo (1991) y para las series aluviales se empleó la correlación propuesta por Ohta y Goto (1976).
- La reducción en el módulo de rigidez al cortante (comportamiento no-lineal) que podrían presentar los depósitos de suelos del sitio, descrita en la sección 4.5, para la excitación sísmica de diseño descrita en la sección 5.1.

Respecto a las mediciones de campo, se sabe que, para sitios cercanos (Santoyo, 1981), se pueden tener variaciones en los valores de q_c del orden del $\pm 25\%$. Por otro lado, las magnitudes de N pueden variar entre $\pm 30\%$ y $\pm 40\%$ (De Alba et al., 1992).

En este estudio se consideraron como límites superior e inferior, un umbral de $\pm 30\%$. Este 30% intenta cubrir las tres fuentes de dispersión anotadas en el párrafo anterior.

Con el propósito de tomar en cuenta el efecto de estas variaciones de las velocidades de ondas de cortante en las respuestas sísmicas para cada sondeo, se generaron 25 perfiles de velocidades variando aleatoriamente la magnitud de la velocidad entre 70 y 130% del promedio calculado para cada estrato en que se dividieron los depósitos de suelo, como se indica en la sección 4.4. Los números aleatorios se generaron considerando una distribución probabilista uniforme.

Cabe señalar que un análisis formal de las incertidumbres va más allá del alcance de esta tesis.

Con base en lo argumentado, para obtener la velocidad de ondas cortantes, se propuso la siguiente expresión:

$$V_{sij} = [0.6\alpha + 0.7]V_s, \quad (4.3.1)$$

donde

α es un valor aleatorio entre 0 y 1.0, con distribución uniforme

V_{si} es la velocidad media del estrato i

V_{sij} es la velocidad del estrato i en el perfil j

En la figura 4.3.2 se presenta la variación de las velocidades de corte en los 50 m más superficiales de los veinticinco perfiles generados aleatoriamente, considerando la velocidad promedio obtenida (Ecs 4.2.1 y 4.2.2), para el sondeo SCE-19 (figura 4.2.2). Así mismo, para los estratos más profundos se generaron los perfiles aleatorios correspondientes, utilizando las velocidades de la tabla 3.3.1, como valores promedio.

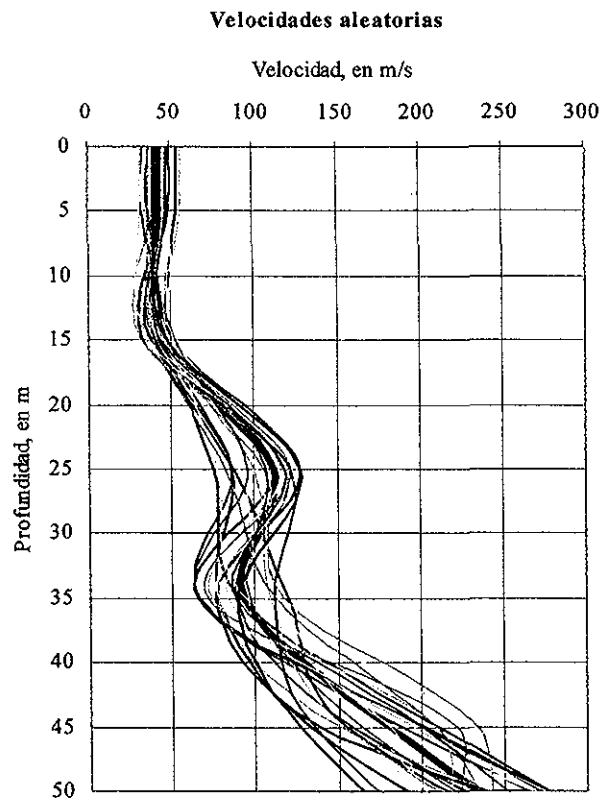


Figura 4.3.2 Veinticinco perfiles de velocidades de onda cortante generados aleatoriamente a partir de la velocidad promedio en el sondeo SCE-19 (Romo et al., 2001)

4.4 Idealización de las condiciones dinámicas del depósito de suelo

Para determinar las características dinámicas del depósito de suelo a lo largo de las pistas, se hizo una generalización de la metodología descrita en la sección 3.3. Esto consistió en sustituir el perfil de velocidades de onda de corte definido a partir del sondeo SCE-01 por el sondeo específico de sitio, conservando las propiedades (incluyendo la variación aleatoria) dinámicas definidas a partir de los 50 m de profundidad.

Los perfiles de la velocidad de onda cortante de cada sondeo, descritos en la sección 4.2, se subdividieron en unidades estratigráficas con valores de velocidad de onda de cortante del mismo orden. A estas unidades se les asignaron valores de velocidad promedio constantes en toda la unidad. A manera de ilustración en la figura 4.4.1 se muestra la idealización de dos perfiles (SCE-05 y SCE-07). Las discretizaciones de los demás sondeos, se hicieron siguiendo lineamientos semejantes.

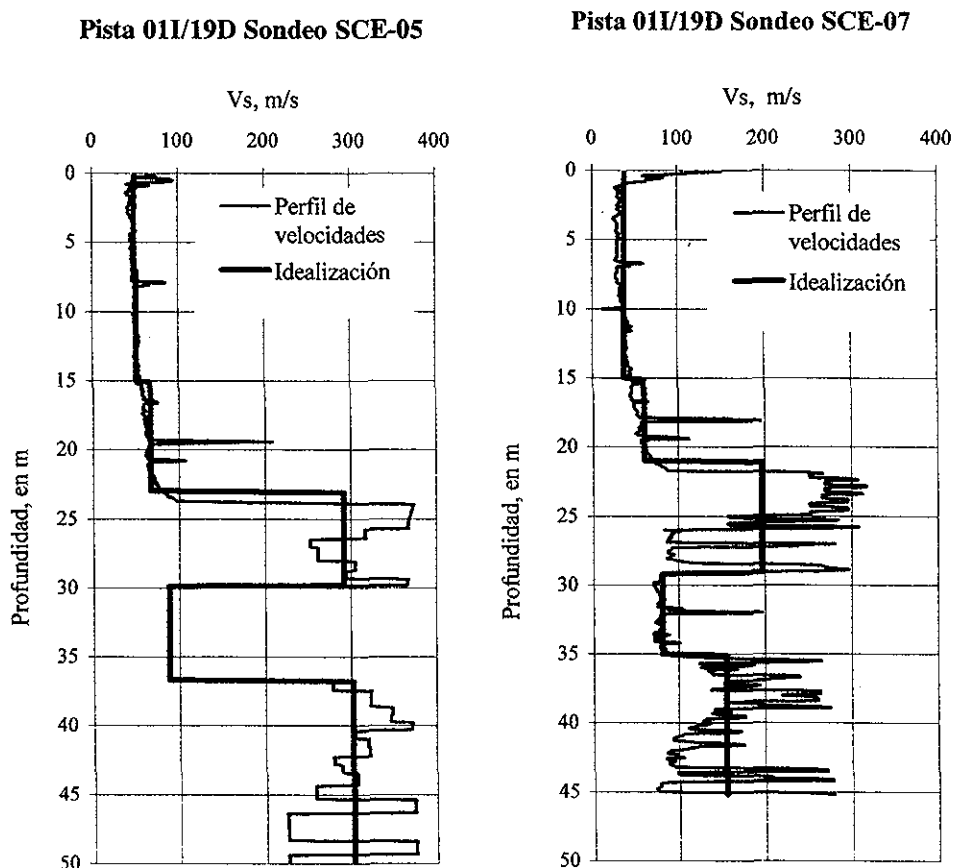


Figura 4.4.1 Idealización del perfil de velocidades en unidades estratigráficas

Para las tres pistas 01I/19D, 01C/19C y 01D/19I se generaron perfiles virtuales, mediante la técnica de interpolación lineal, estimando la velocidad de onda de corte a lo largo del perfil virtual como un valor medio entre las velocidades obtenidas en dos sondeos contiguos, de manera similar se consideró el espesor de cada estrato, a lo largo de las mismas. Estos se ubicaron equidistantes entre dos sondeos reales. De esta manera, se puede producir mayor información sobre la variación espacial de la respuesta sísmica. Por ejemplo, el sondeo virtual entre los sondeos SCE-05 y SCE-07, se obtuvo del modelo del subsuelo. En la figura 4.4.2 se muestra el perfil resultante. Lo mismo se hizo con sus respectivos valores de peso volumétrico. Se usó la aproximación de interpolación lineal debido a que los datos disponibles mostraban trazadores bien definidos en el subsuelo del sitio estudiado, los cuales permitieron definir las series estratigráficas.

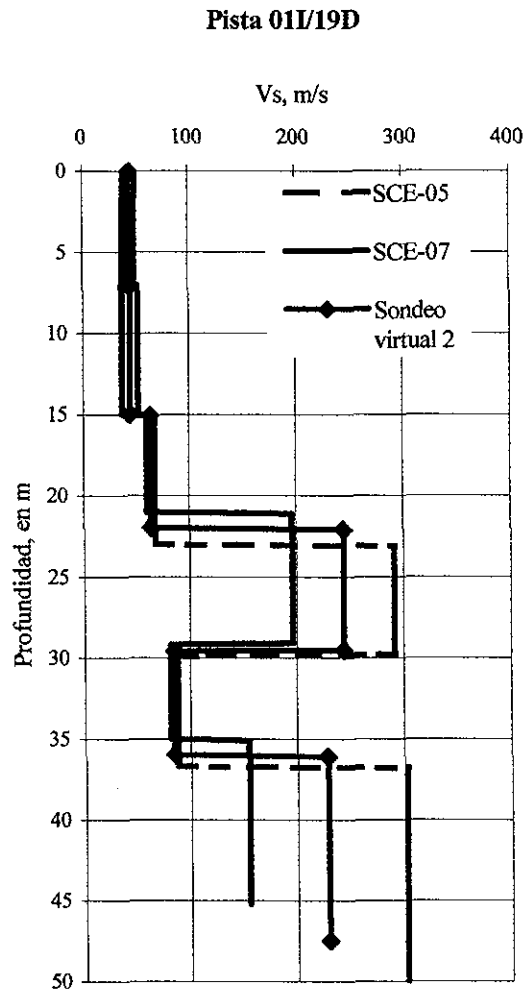


Figura 4.4.2 Generación de un perfil virtual de velocidades entre los sondeos SCE-05 y SCE-07

Para cubrir el área dentro de las pistas y formar así una malla, la cual servirá como base de datos para zonificar sísmicamente el sitio de estudio, se obtuvieron sondeos virtuales intermedios, obtenidos mediante la interpolación lineal entre dos sondeos, reales o virtuales, de dos pistas paralelas, considerando la misma metodología descrita anteriormente. Existen otras alternativas con bases teóricas más sólidas para la obtención de los sondeos virtuales tales como la geoestadística (Medina, 2001; Soulie et al., 1990; Chiasson et al., 1995) y la técnica de las RNA (Juang et al., 2001).

Tabla 4.4.1 Ubicación de los sondeos reales y virtuales en la pista 01I/19D

	Sondeo	Distancia al extremo sur (m)
1	SCE-01	0.0
2	Virtual 1	523.0
3	SCE-05	1046.0
4	Virtual 2	1569.0
5	SCE-07	2092.6
6	Virtual 3	2749.5
7	SCE-11	3406.5
8	Virtual 4	3918.0
9	SCE-14	4429.5
10	Virtual 5	5000.0

En la tabla 4.4.1 se indica la ubicación de los sondeos reales y virtuales, tomando como punto de referencia el sondeo SCE-01, ubicado en el extremo sur de la pista 01I/19D. En la tabla 4.4.2 se presenta la ubicación de los sondeos reales y virtuales para la pista 01C/19C. El punto de referencia es el sondeo virtual SV6', que se encuentra a 956 m del sondeo real SCE-02.

Tabla 4.4.2 Ubicación de los sondeos reales y virtuales en la pista 01C/19C

	Sondeo	Distancia al extremo sur (m)
1	SV6'	0
2	SCE-02	956
3	SV1'	1488
4	SCE-19	2020
5	SV2'	2531
6	SCE-08	3042
7	SV3'	3521
8	SCE-12	4000
9	SV4'	4500
10	SV5'	5000

En la tabla 4.4.3 se indica la ubicación de los sondeos reales y virtuales, tomando como punto de referencia el sondeo SCE-04, ubicado en el extremo sur de la pista 01D/19I.

Tabla 4.4.3 Ubicación de los sondeos reales y virtuales en la pista 01D/19I

	Sondeo	Distancia al extremo sur (m)
1	SCE-04	0.0
2	SV 13'	577.50
3	SCE-06	1155.0
4	SV-14'	1706.50
5	SCE-10	2258.0
6	SV-15'	2833.0
7	SCE-13	3408.0
8	SV-16'	3945.50
9	SCE-18	4483.0
10	SV-17'	5000.0

4.5 Comportamiento no lineal de los suelos

Como se verá en la sección 5.1, el sismo de diseño para los análisis de respuesta sísmica en el ex-Lago de Texcoco corresponde al que se hubiese medido en el sismo del 19 de septiembre de 1985 en roca, en la estación TXCR. Debido a la gran intensidad de este sismo, las deformaciones angulares inducidas en los depósitos arcillosos exceden el umbral de comportamiento lineal del depósito de arcilla. Este umbral se encuentra a una deformación angular del orden de 0.3%. Considerando el sismo anterior y la estratigrafía del sondeo SCE-01 sobre la pista 01I /19D, se verificó que las deformaciones angulares en los estratos superficiales (0-50 m) fueran superiores al umbral de deformación angular. Esto, realizando un análisis no-lineal equivalente. Para evitar el proceso iterativo que implica el procedimiento lineal equivalente, con base en el conocimiento del comportamiento de la arcilla (Seed et al., 1988, Romo y Jaime,1986 y Dobry y Vucetic,1987), a la relación de amortiguamiento se le asignó un valor de 10% para los primeros 50 m de la columna de suelo, de los 50 m a los 1030 m se le asignó un valor de amortiguamiento típico de los materiales ígneos de 3%. Además, con la variación aleatoria que se considera en los módulos de rigidez al cortante se incluyen indirectamente los efectos no lineales.

CAPÍTULO 5

CÁLCULO DE LAS RESPUESTAS

5.1 Definición del sismo para condiciones equivalentes a la del temblor del 19 de septiembre de 1985

La actividad tectónica de la república mexicana que genera grandes temblores ($M_s \geq 6.5$) se concentra básicamente en cuatro zonas (figura 5.1.1). En la del Mar de Cortés el movimiento relativo entre las placas de Norteamérica y del Pacífico es de tipo lateral y ha generado sismos como el del 8 de junio de 1980 ($M_s = 6.7$, con epicentro en la falla de San Jacinto a 70 km al sureste de la ciudad de Mexicali). El potencial sísmico en el norte de la península de Baja California está asociado a la extensión de las fallas de San Andrés y San Jacinto hacia el sur. La segunda zona es la de subducción de las placas oceánicas de Rivera (bajo el estado de Jalisco) y de Cocos (bajo los estados de Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas) que han generado sismos como el de Jalisco del 3 de junio de 1932 ($M_s = 8.4$) y el de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$). En este siglo han ocurrido 35 sismos de magnitud mayor que 7.0 en el sur de México, entre Jalisco y Oaxaca. La continental es la tercera y refleja el rompimiento de la litósfera oceánica debida a la penetración de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica con un ángulo que varía de 35° en Colima-Michoacán a 15° en Oaxaca. La manifestación superficial de este fenómeno es el Eje Volcánico Transmexicano no paralelo a la Trinchera de Acapulco.

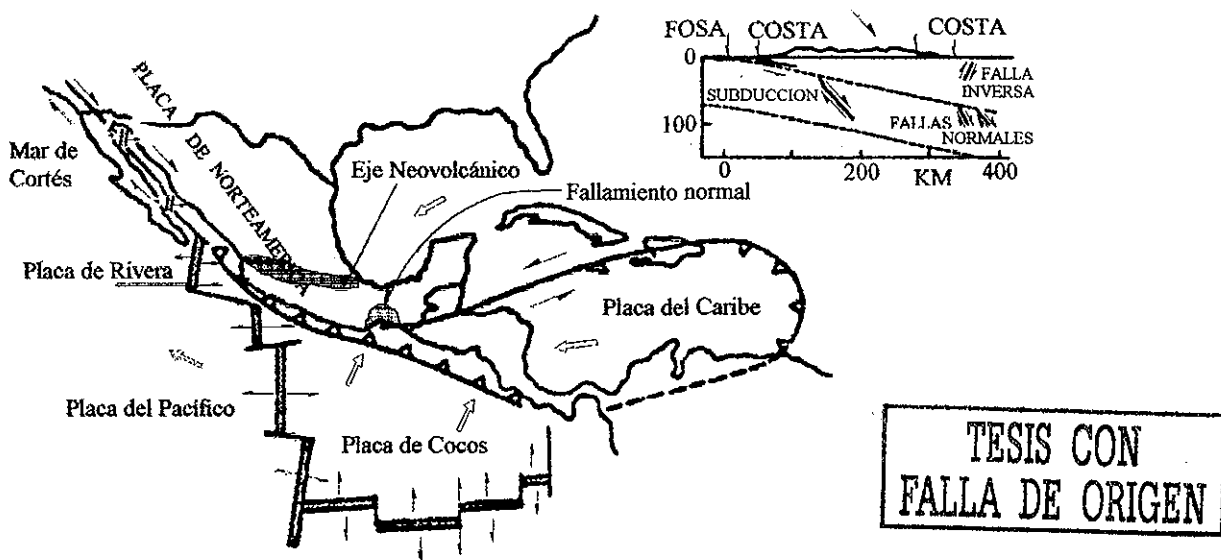


Figura 5.1.1 Regiones Sísmicas en la República Mexicana (Singh y Ordaz ,1990)

A profundidades del orden de 50 a 100 km se generan mecanismos de falla normal que han causado temblores como el de Oaxaca del 15 de enero de 1931 ($M_s = 7.8$) y ha afectado a poblaciones de Puebla, Veracruz y el norte de Oaxaca. En la última zona ocurren dentro de la placa continental como el de Acambay ($M_s = 7.0$) del 19 de noviembre de 1912, asociado al Eje Volcánico Transmexicano. Estos sistemas son de tipo de falla normal someros (15-15km de profundidad), lo que los hace especialmente peligrosos en la zona epicentral. De estas cuatro, la que genera sismos más severos es la de subducción en el Pacífico, figura 5.1.2.

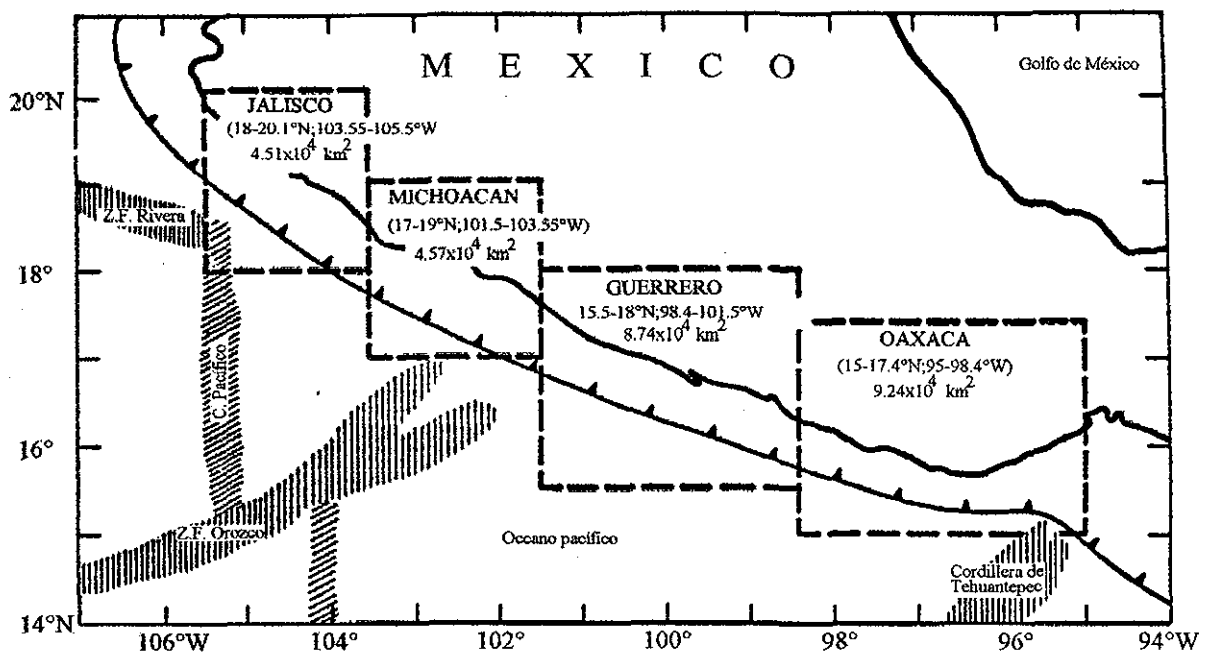


Figura 5.1.2 Provincias tectónicas a lo largo de la zona de subducción (Modificada de Esteva y Ordaz, 1989)

El sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 presentó varias características que lo hacen excepcional en la historia sísmica documentada de la ciudad de México, éstas son las siguientes, Mendoza y Auvinet (1987):

- Su magnitud alcanzó el valor extremadamente alto de 8.1 en la escala de Richter.
- Desde el origen, su espectro de frecuencias se caracterizó por su riqueza en frecuencias bajas. El movimiento fue casi armónico, con período dominante de dos segundos en la zona central de la ciudad, e inclusive con períodos mayores hacia la zona blanda más virgen.

- La intensidad tan alta apreciada en ciertas zonas de la ciudad, aun cuando el epicentro distaba más de 300 km; la intensidad sísmica en la periferia del valle de México fue de VI (escala de Mercalli modificada), en tanto que en zonas circunscritas del centro de la ciudad alcanzó intensidades entre VIII y IX.
- Los factores de amplificación entre las aceleraciones del terreno en la zona blanda de la ciudad y la zona rocosa de su periferia fueron muy altos.
- La duración de más de dos minutos en un temblor de esta magnitud, no tiene precedente en los registros instrumentales del país.

El subsuelo del valle de México se caracteriza por presentar fuertes contrastes de deformabilidad y resistencia. Lo anterior permite definir una zonificación, ahora clásica, en tres zonas, Mendoza y Auvinet (1987):

- *Zona del lago (zona III):* Fondo lacustre del valle, integrado por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por estratos limo-arenosos y areno-arcillosos de consistencia dura a muy dura y espesores variables de centímetros a varios metros.
- *Zona de lomas (zona I):* Formada por rocas o suelos de origen volcánico, generalmente firmes, que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, con la presencia ocasional de materiales arenosos sueltos o arcillosos relativamente blandos y grietas y oquedades naturales o artificiales.
- *Zona de transición (zona II):* Constituida por estratos arenosos y limo-arenosos compactos, intercalados con capas de arcilla lacustre altamente compresibles; éstas de espesor variable entre decenas de centímetros y poco metros.

Las características peculiares del sismo y del subsuelo dieron lugar a fenómenos de amplificación local que aparecen con mucha claridad en la figura 5.1.3, donde se representan las aceleraciones máximas registradas en diferentes sitios del valle. En la zona del lago, la cuasi resonancia entre la frecuencia natural de los estratos blandos y las dominantes del sismo condujo a aceleraciones en la superficie del terreno que, en la dirección con rumbo S 60° E, alcanzaron 196 gales (1 gal = 1 cm/s²).

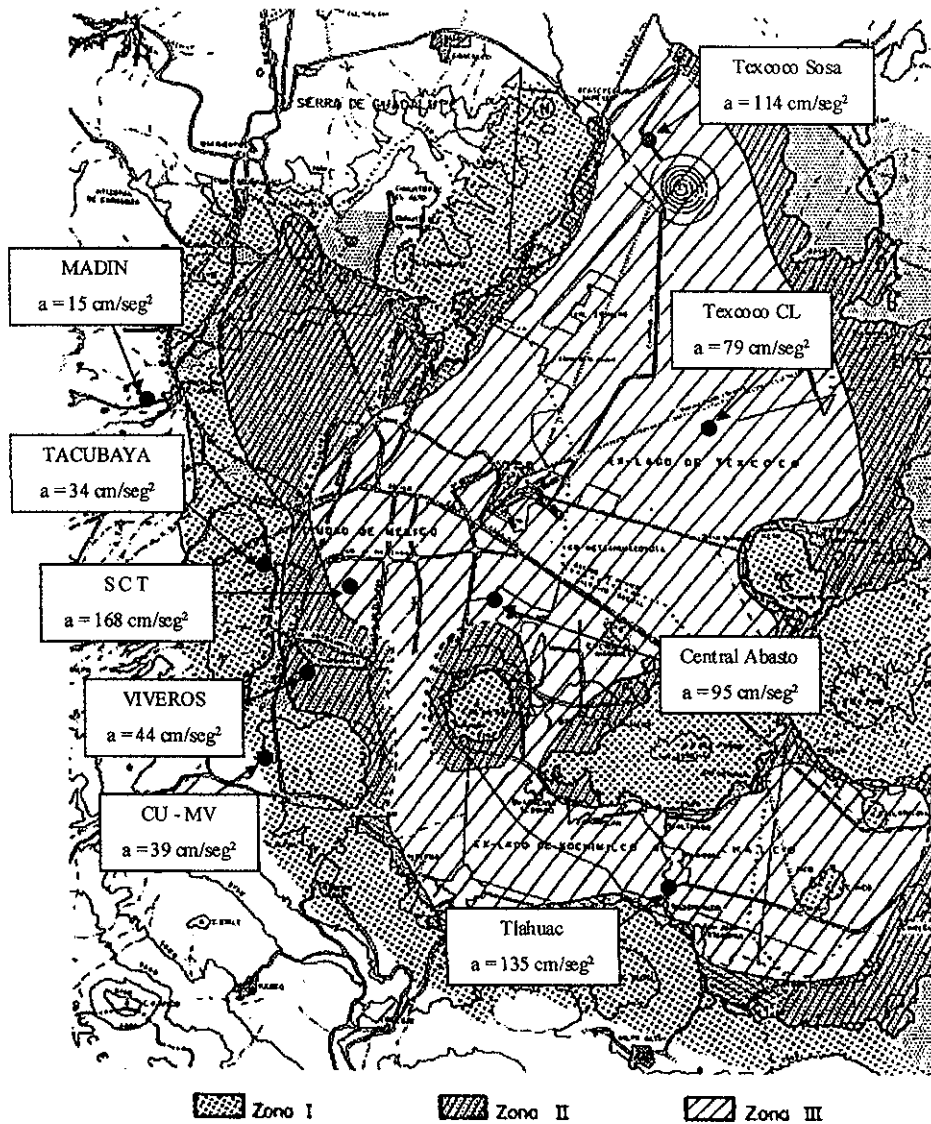


Figura 5.1.3 Aceleraciones máximas registradas en la Ciudad de México, modificado de Mendoza y Auvinet (1987)

En las figuras 5.1.4 y 5.1.5 se observan además las diferencias notables que se encontraron entre los acelerogramas medidos en suelos firmes y blandos, respectivamente. En este segundo caso, además de la amplificación se observa que el período dominante es muy largo (próximo a dos segundos). Del procesamiento del acelerograma (Mendoza y Auvinet, 1987) en la dirección EW de la figura 5.1.5, se obtuvieron los espectros de respuesta del sismo del 19 de septiembre asociados a la zona con mayores daños; se muestran en la figura 5.1.6. Se incluyen los espectros calculados correspondientes a amortiguamientos del 5% y

10% del crítico. En esta misma figura se incluye el espectro de diseño para la zona III definido por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, publicado en 1976.

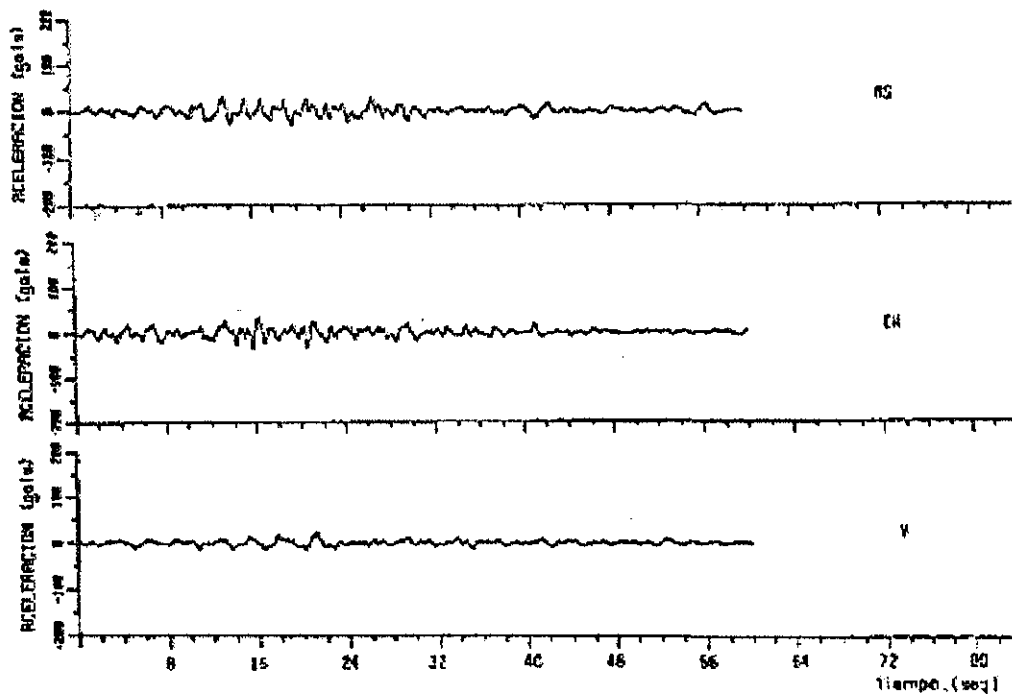
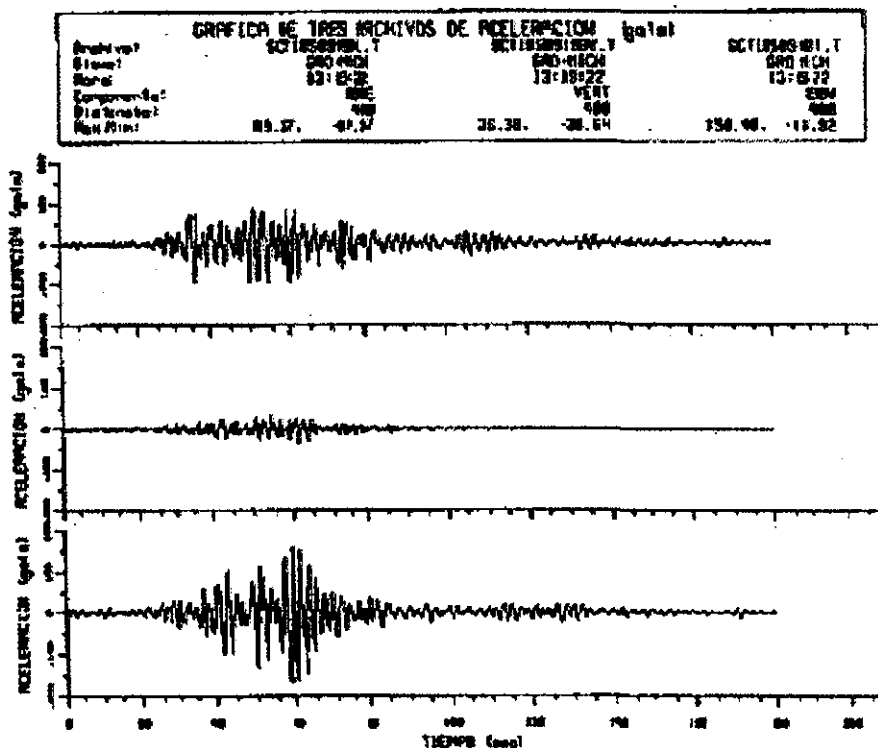


Figura 5.1.4 Acelerogramas registrados en campo libre en la UNAM, Mendoza y Prince (1986)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 5.1.5 Acelerogramas registrados en campo libre en la SCT, Mena et al., (1986)

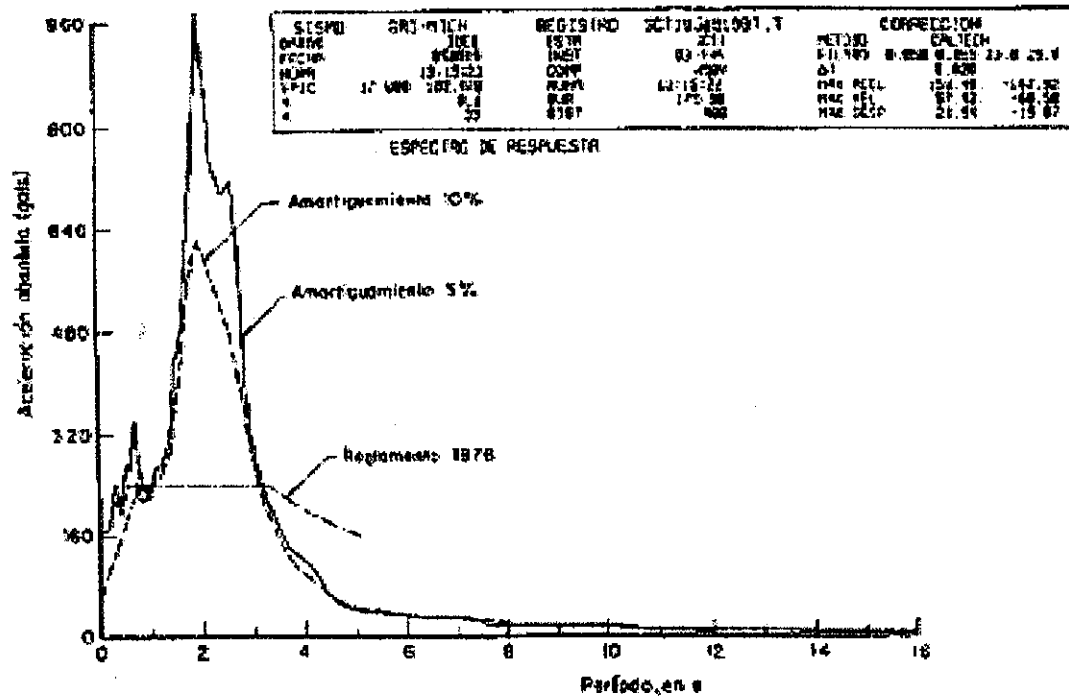


Figura 5.1.6 Espectros de respuesta en la dirección de componente máximo en la SCT, Mendoza y Auvinet (1987)

Se observa que las construcciones sufrieron aceleraciones que rebasaron ampliamente las especificadas por el reglamento, por lo que las cimentaciones también tuvieron que absorber momentos de volteo y fuerza cortantes superiores a las aceptadas para diseño antes de este sismo.

De lo expuesto en párrafos anteriores, se considera como excitación sísmica, para realizar el estudio del medio ambiente sísmico (zonificación sísmica) en el sitio del ex – Lago de Texcoco, a los acelerogramas registrados por las estaciones ubicadas en la Ciudad Universitaria, UNAM, para el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Una vez definidas las estratigrafías en el sitio ex-Lago de Texcoco, se determinó la función de transferencia de aceleraciones espectrales, $FT_{CU-TXCR}$, de Ciudad Universitaria (CU) al sitio de Texcoco (TXCR) ubicado en San Miguel Tlaixpan (afloramiento de roca ígnea), con el fin de definir el sismo de diseño en Texcoco.

Para determinar la $FT_{CU-TXCR}$, se utilizaron los registros del sismo del 30 de septiembre de 1999 captados en 3 estaciones ubicadas en CU en el sitio IDEI Patio (caseta del patio del

Instituto de Ingeniería, UNAM). Cada estación registró las 3 componentes de aceleración, sin embargo, sólo se consideraron dos direcciones N-S y E-W, obteniendo así 6 acelerogramas. Mediante el programa Degtra 2000 (Ordaz et al., 2000) se determinaron los espectros de respuesta para cada uno de los acelerogramas y considerando una relación de amortiguamiento estructural de 5%, para luego obtener el promedio de las ordenadas espectrales para cada periodo.

De la misma manera y para los registros captados en la estación TXCR del sismo del 30 de septiembre de 1999, ubicada en San Miguel de Tlaixpan (roca ígnea), se obtuvieron los espectros de respuesta en las dos direcciones N-S y E-W. Posteriormente, considerando los dos espectros de respuesta, con una relación de amortiguamiento estructural de 5%, se obtuvo el promedio para cada periodo. En la figura 5.1.7 se muestran los espectros de respuesta promedio para este sismo en los sitios CU y TXCR

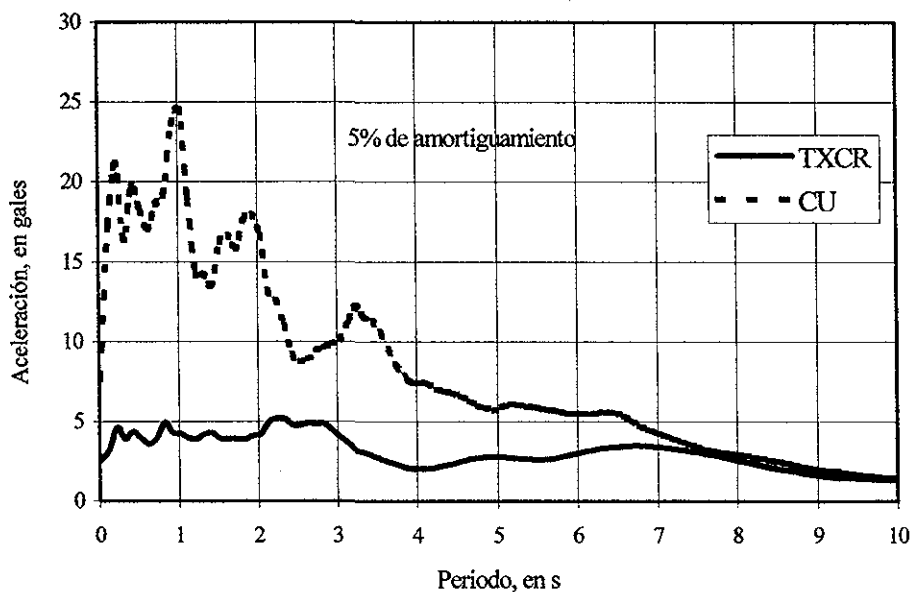


Figura 5.1.7 Espectros de respuesta promedios de los registros de las estaciones de CU y TXCR, para el sismo del 30/sept/99

Al tener las aceleraciones espectrales de cada sitio se obtiene la función de transferencia empírica del sitio de CU a TXCR, con la siguiente expresión:

$$FT_{CU-TXCR} = \frac{a_{TXCR}[f(T, \xi = 5\%)]}{a_{CU}[f(T, \xi = 5\%)]} \quad (5.1.1)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde a es la aceleración espectral del sitio TXCR o CU.

En la figura 5.1.8 se presenta la función de transferencia para obtener las aceleraciones espectrales de CU a TXCR. Debe enfatizarse que esta función de transferencia no se afecta significativamente por la intensidad del sismo de 1985, ya que los sitios donde se registraron los sismos están constituidos por terreno firme (CU) y roca (TXCR).

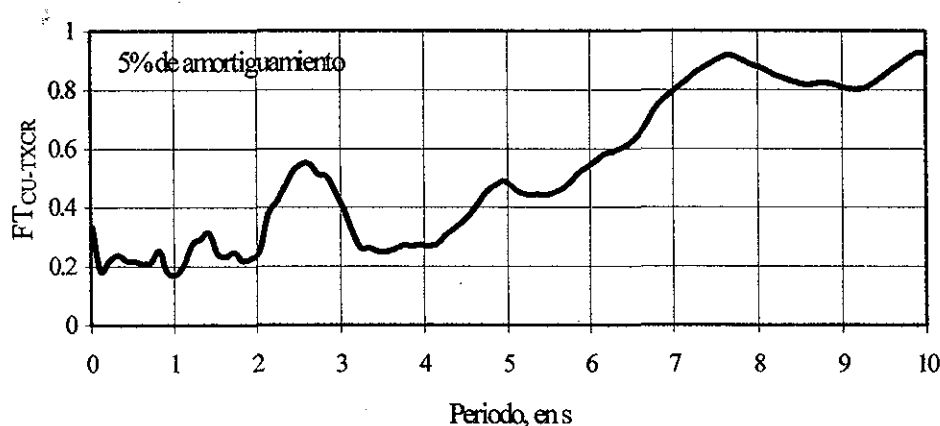


Figura 5.1.8 Función de transferencia de CU a TXCR (para el sismo del 30 de septiembre de 1999)

La excitación sísmica de diseño se caracteriza mediante un espectro de respuesta de aceleraciones, ya que en el programa utilizado para determinar la respuesta sísmica del depósito de suelo en Texcoco, RADSH (Bárcena y Romo, 1994), considera como excitación un espectro de respuesta situado en un afloramiento, en el semiespacio o cualquier estrato dentro del depósito por analizar. Por consiguiente, se utilizaron los registros medidos en las 3 estaciones de Ciudad Universitaria para el sismo del 19 de septiembre de 1985 y se obtuvieron los espectros (5% de amortiguamiento) correspondientes.

Con el mismo criterio utilizado para la obtención del espectro de aceleraciones promedio en CU, para el sismo del 30 de septiembre de 1999, se obtuvo el espectro de respuesta promedio de los 6 registros (en las dos direcciones N-S y E-W) para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en el sitio de CU. En la figura 5.1.9 se muestra el espectro de respuesta de aceleraciones promedio, para una relación de amortiguamiento estructural de 5%.

Una vez determinado el espectro de respuesta promedio en CU, se obtiene el espectro de respuesta de diseño en el sitio TXCR (Texcoco, roca) despejando la amplitud de la aceleración espectral de TXCR de la ecuación 5.1.1:

$$a_{TXCR} \text{ (aceleración espectral en Texcoco Roca)} = FT_{CU-TXCR} * a_{CU} \quad (5.1.2)$$

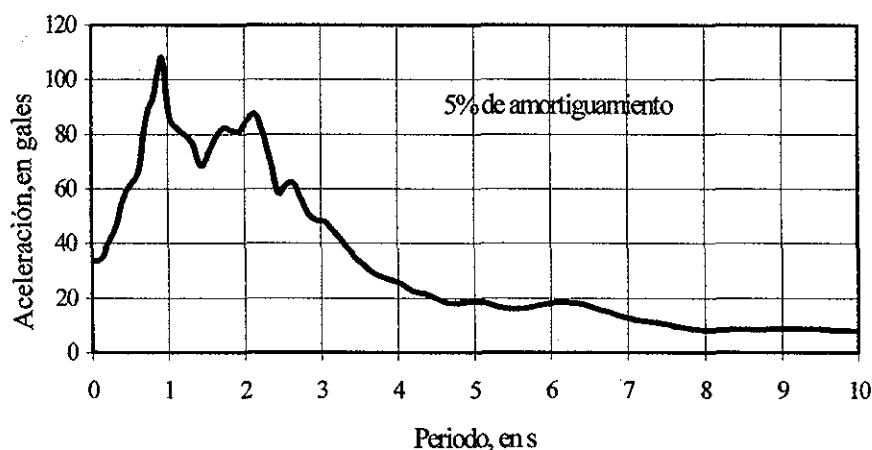


Figura 5.1.9 Espectro de respuesta promedio en CU para el sismo del 19 septiembre de 1985

En la figura 5.1.10 se presenta el espectro de respuesta de aceleraciones representativa del medio ambiente sísmico en el afloramiento (TXCR) en el ex-Lago de Texcoco, para las condiciones sísmicas impuestas por el evento del 19 de septiembre de 1985. Dadas las condiciones de frontera, la excitación en el semi-espacio que sobreyace el depósito de suelo corresponderá a la amplitud del movimiento de la onda incidente del afloramiento.

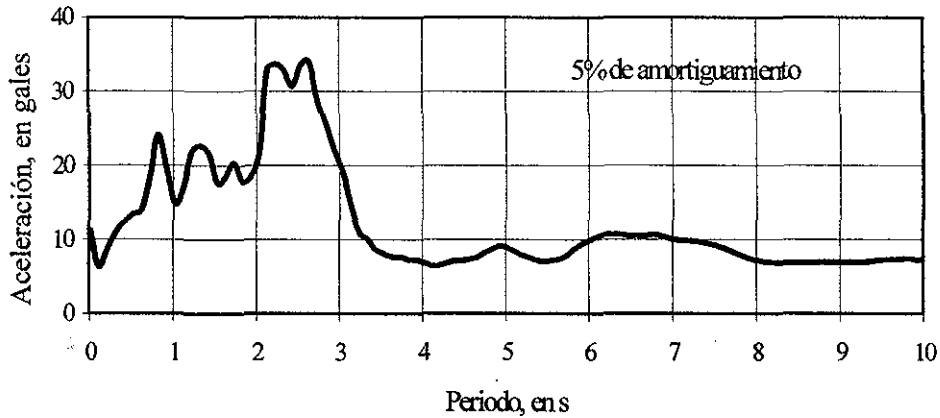


Figura 5.1.10 Espectro de respuesta en el sitio Texcoco (Roca TXCR)

5.2 Efecto de la variación aleatoria de los perfiles de Vs

En las figuras 5.2.1 y 5.2.2 se presentan, a manera de ilustración, los espectros de respuesta de aceleración para las veinticinco combinaciones aleatorias de perfiles de V_s en los sondeos SCE-02 y SCE -10, respectivamente.

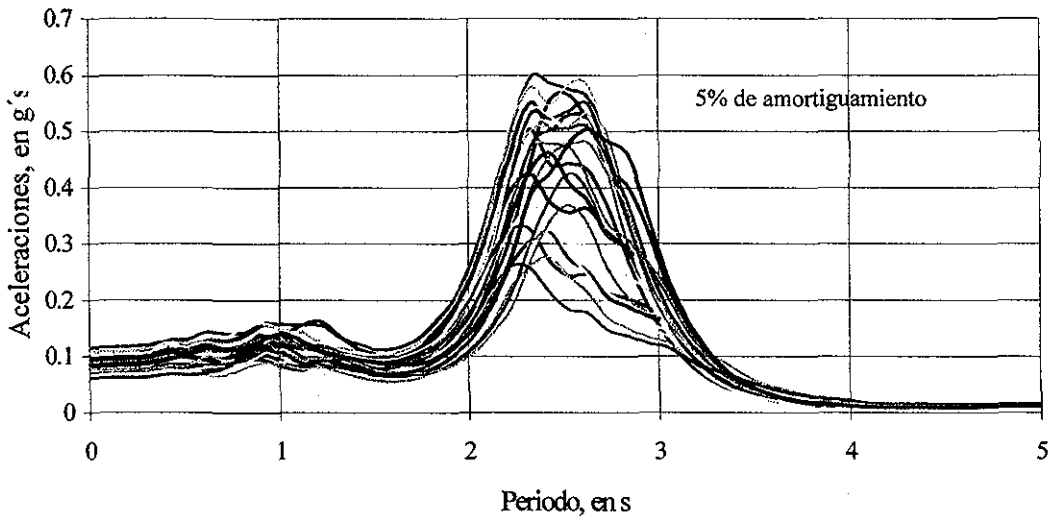


Figura 5.2.1 Efecto de la variación aleatoria de las propiedades dinámicas en los espectros de aceleraciones en el sondeo SCE-02

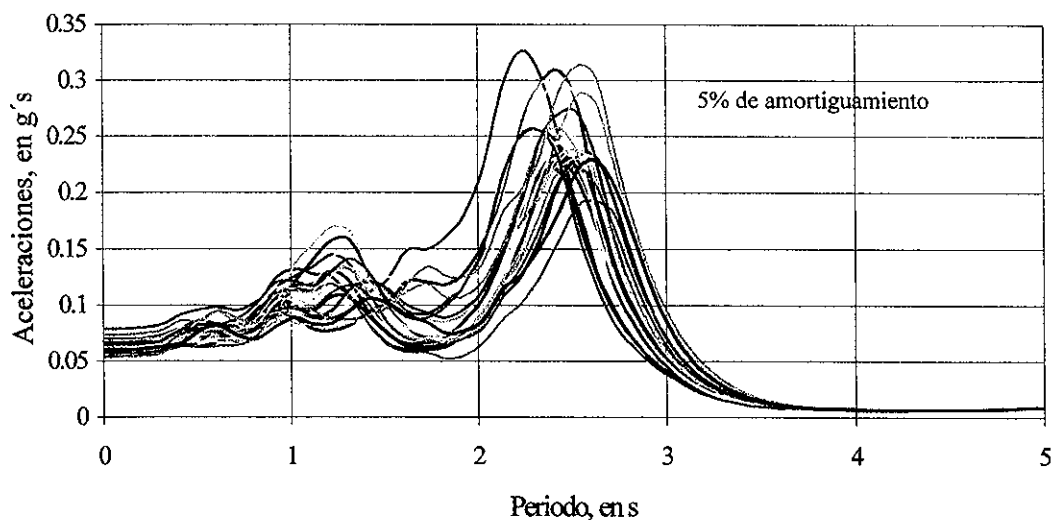


Figura 5.2.2 Efecto de la variación aleatoria de las propiedades dinámicas en los espectros de aceleraciones en el sondeo SCE-10

Una vez evaluadas las respuestas de las 25 estratigrafías en cada sitio, se obtuvieron los espectros correspondientes a las amplitudes espectrales medias, las medias más una desviación estándar y las envolventes. La desviación estándar tiene la connotación de parámetro estadístico que indica la dispersión que se obtiene en las ordenadas espectrales, al calcular los espectros de respuesta para las 25 estratigrafías consideradas para cada sondeo. Para ejemplificar esto, en la figura.5.2.3 se muestran los tres niveles de las formas espectrales para el sitio donde se localiza el sondeo SCE-02, ubicado en la pista 01C/19C. La envolvente es el lugar geométrico de las amplitudes máximas de los 25 espectros calculados con el modelo analítico descrito en el capítulo 3.

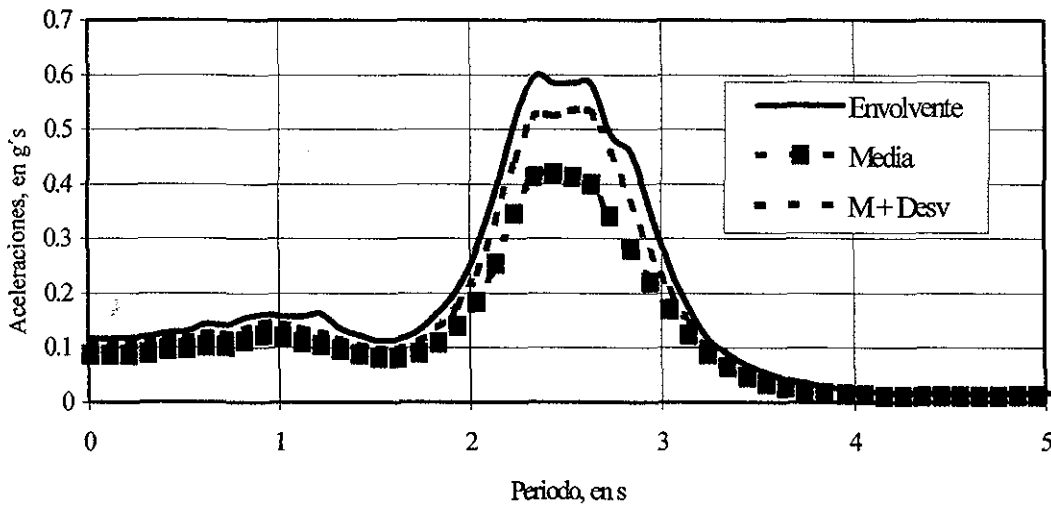


Figura 5.2.3 Espectros medio, medio más una desviación estándar y envolvente para el sondeo SCE-02

En la figura 5.2.4 se presentan los espectros medio, medio más una desviación estándar y envolvente para el sondeo SCE-07 ubicado sobre la pista 01I/19D. De manera similar, en la figura 5.2.5 se presentan los espectros medio, medio más una desviación estándar y envolvente para el sondeo SCE-18 ubicado sobre la pista 01D/19I.

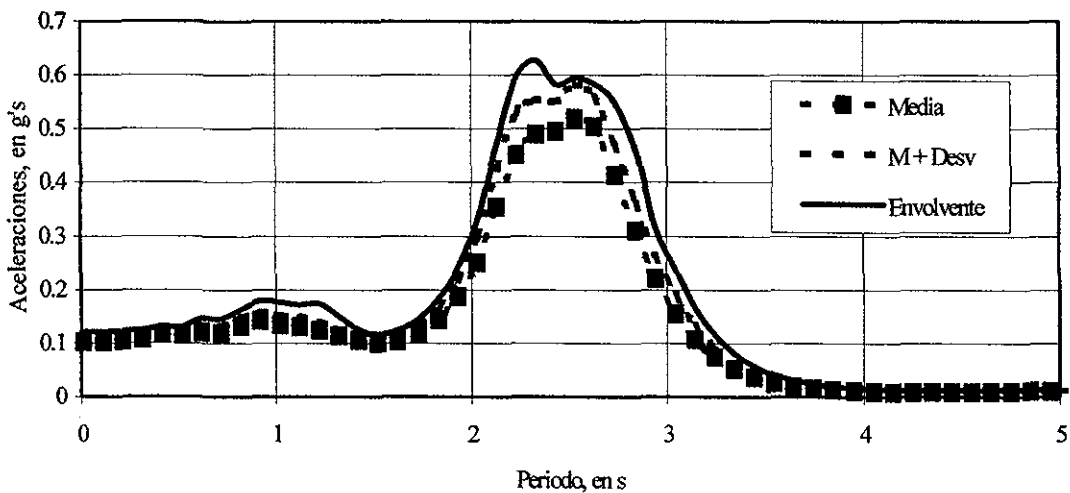


Figura 5.2.4 Espectros medio, medio más una desviación estándar y envolvente para el sondeo SCE-07

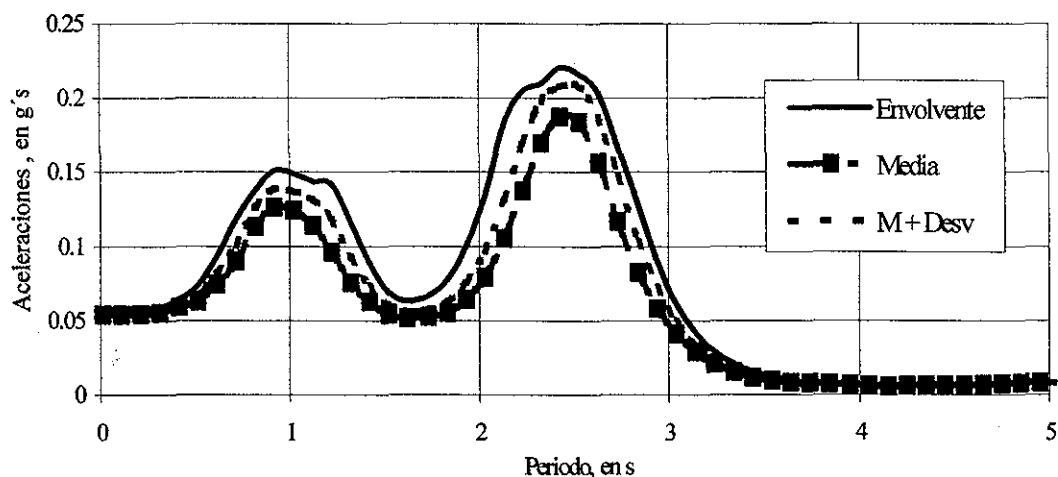


Figura 5.2.5 Espectros medio, medio más una desviación estándar y envolvente para el sondeo SCE-18

5.3 Medio ambiente sísmico del sitio

El medio ambiente sísmico del sitio se puede caracterizar de dos formas: la variación espacial de las ordenadas espectrales (media más una desviación estándar) a lo largo de las pistas 01I/19D, 01C/19C y 01D/19I y por la zonificación sísmica del sitio, en términos de contornos de isoaceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales.

De los resultados obtenidos del análisis generalizado de la zona de estudio, descrito en la sección 5.2, se muestra la figura 5.3.1 en la cual se observa la superficie tridimensional de estimación de las aceleraciones máximas del terreno en la zona, obtenida mediante la técnica de interpolación de Mínima Curvatura, ésta técnica es análoga a decir que un delgado plano elástico y lineal atraviesa por cada uno de los datos con una mínima cantidad de dobleses o curvatura.

El método de Mínima Curvatura genera una superficie suavizada procurando agrupar la mayor cantidad de datos posibles, generando una malla en la cual se aplican repetidamente ecuaciones sobre la malla para poder suavizar la configuración de la misma. Existen cuatro pasos para generar la malla final en el método de Mínima Curvatura, Smith y Wessel (1991):

1. Se ajustan los datos mediante un modelo simple y plano, usando una regresión de mínimos cuadrados:
 $AX + BY + C = Z (X, Y)$
2. Los valores obtenidos con el modelo de regresión plana para cada ubicación de los datos, son restados de los valores originales, esto nos lleva a tener un conjunto de datos de valores residuales.
3. El algoritmo de Mínima Curvatura es usado para interpolar los valores residuales en los nodos de la malla.
4. Los valores obtenidos con el modelo de regresión plana en los nodos de la malla son sumados a los valores residuales interpolados, obteniendo como resultado una superficie final interpolada.

Los contornos de isoaceleraciones espectrales fueron obtenidos mediante la técnica antes mencionada. De la figura 5.3.1 se distingue la correlación que existe entre la respuesta sísmica del sitio y los tipos de depósitos del subsuelo que participan en la respuesta sísmica. En la sección 4.1 se describió en forma detallada la variación estratigráfica que existe en el sitio de Texcoco, indicando que según los datos hidrológicos, figura 4.1.2, se observa la presencia de un ramal de un río antiguo que pasaba por la parte noreste de la zona de estudio, por la cabecera noreste de la pista 01D /19I, por lo tanto, se podrían esperar depósitos deltaicos, los cuales poseen diferentes características geotécnicas que los depósitos lacustres que se encuentran en la zona suroeste del predio. Esto fue confirmado con la exploración directa realizada en el sitio, descrita en las secciones 4.1.1 a 4.1.3.

En la zona noreste se observa una depresión de la aceleración máxima del terreno, esto es debido a que se tienen depósitos aluviales intercalados con depósitos lacustres, de mayor rigidez que los depósitos del subsuelo en las otras zonas dentro del sitio de estudio. A lo largo de la zona oeste, por el eje de la pista 01I /19D, la aceleración máxima del terreno va creciendo en dirección sur-norte. De acuerdo con lo indicado en la sección 4.1 el espesor de la serie arcillosa superior va disminuyendo conforme nos acercamos a la parte norte de la zona de estudio; sin embargo, según los valores de la resistencia de punta obtenidos en los sondeos directos, estos disminuyen conforme nos acercamos al norte, por tal motivo se puede inferir que a pesar de tener una disminución en el espesor de la serie arcillosa superior, al tener valores menores del módulo de rigidez al cortante, la respuesta sísmica aumentará con poca intensidad, tal como se muestra en la figura 5.3.1.

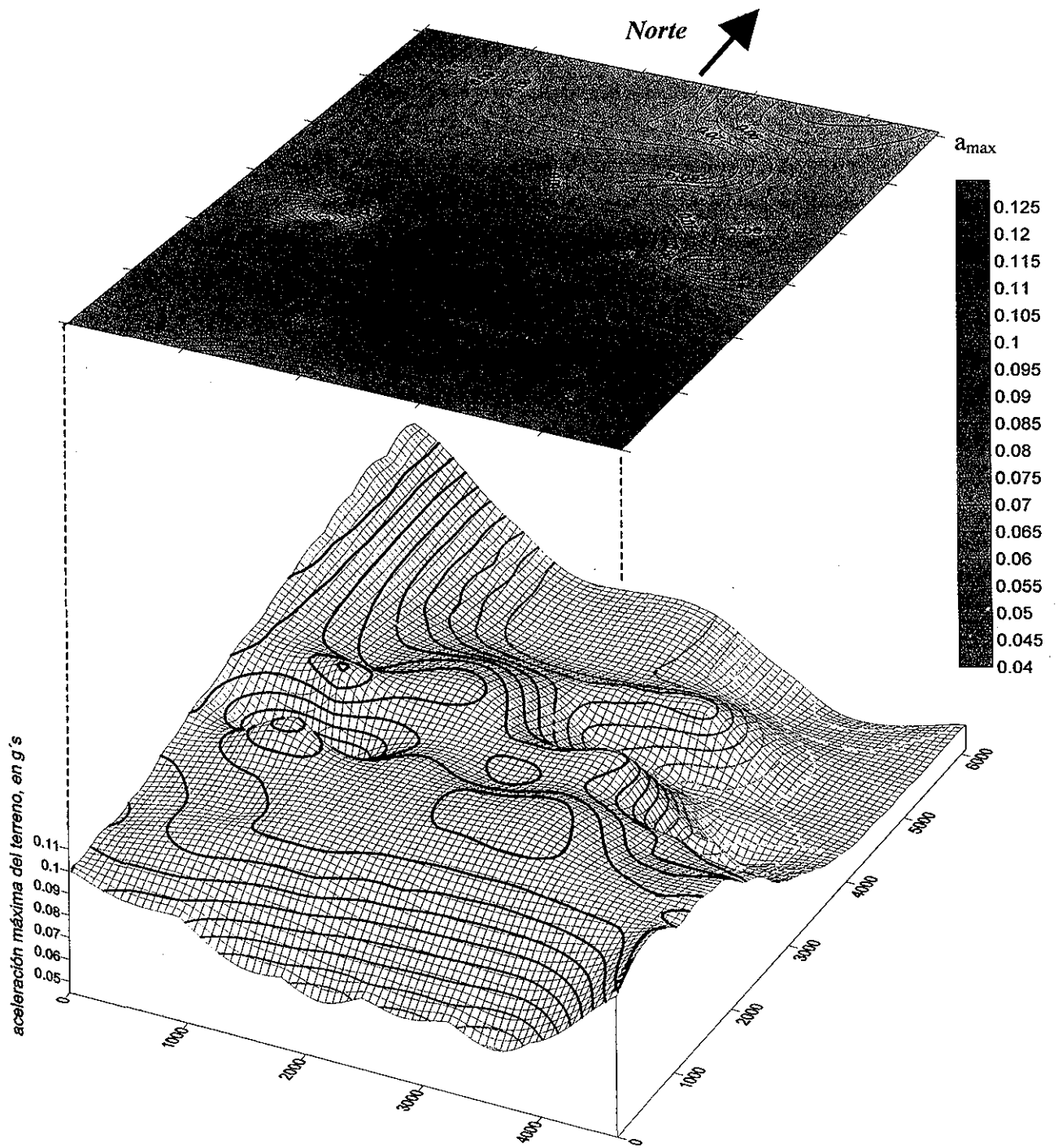


Figura 5.3.1 Representación tridimensional de las aceleraciones máximas del terreno en fracción de la gravedad.

Variación espacial de las ordenadas espectrales (Media más una desviación estándar) a lo largo de las pistas 01I/19D, 01C/19C y 01D/19I.

Con base en los resultados presentados en las secciones anteriores, se dibujan los espectros medios más una desviación estándar en función de la distancia medida a partir de la cabecera de la pista 01I, 01C y 01D. En las figuras 5.3.2 a 5.3.4 se muestra la variación espacial de las formas espectrales a lo largo de las pistas 01I/19D, 01C/19C y 01D/19I, respectivamente.

Estas figuras permiten definir los coeficientes sísmicos en campo libre para cualquier punto a lo largo de las pistas, correspondiente al periodo del sistema depósito de suelo-pavimento. De esta manera se puede evaluar la seguridad sísmica de las pistas, las cuales serán sometidas a esfuerzos de compresión, tensión y cortante al paso de las ondas sísmicas superficiales.

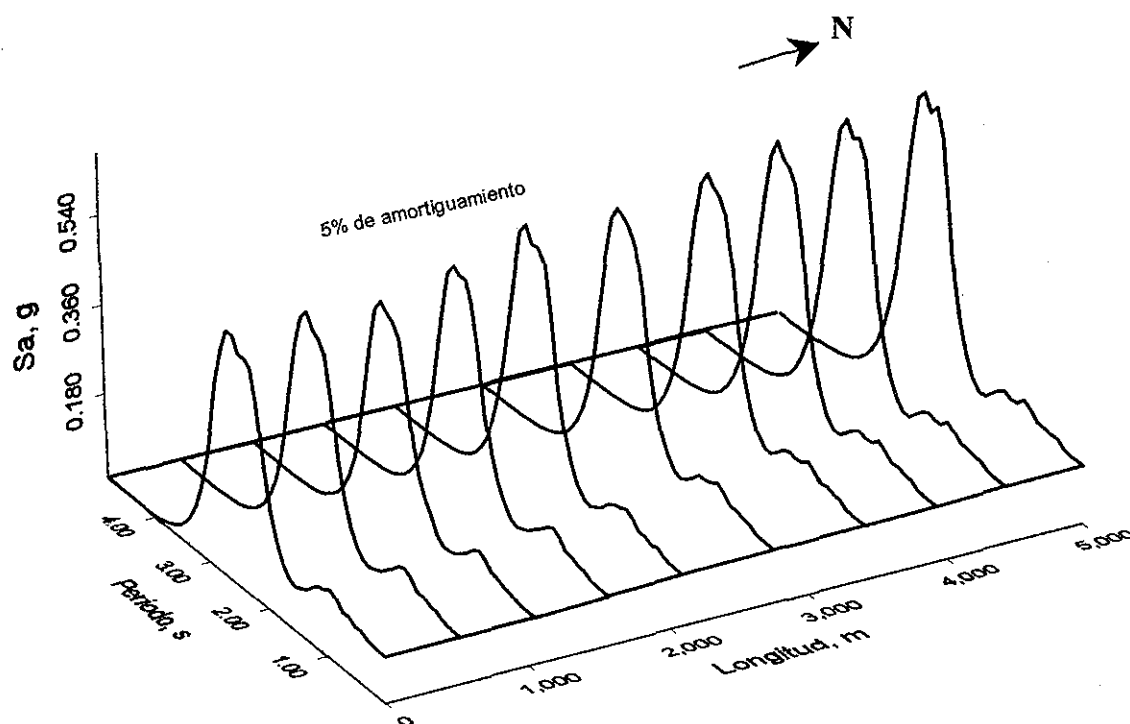


Figura 5.3.2 Variación espacial de los espectros de aceleraciones, a lo largo de las pistas 01I/19D

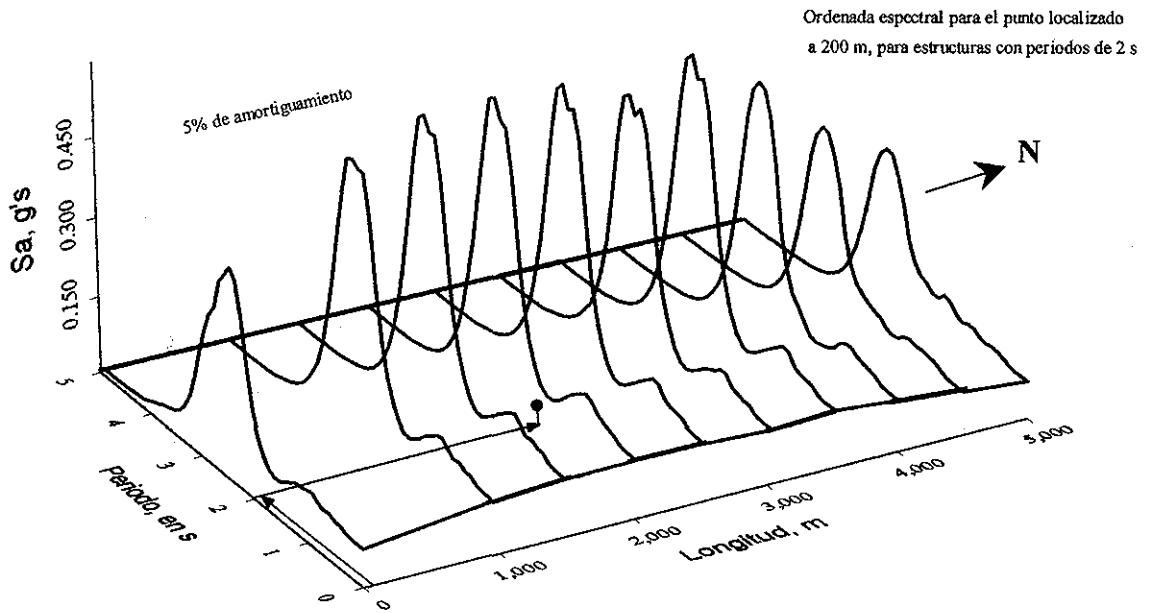


Figura 5.3.3 Variación espacial de los espectros de aceleraciones, a lo largo de las pistas 01C/19C

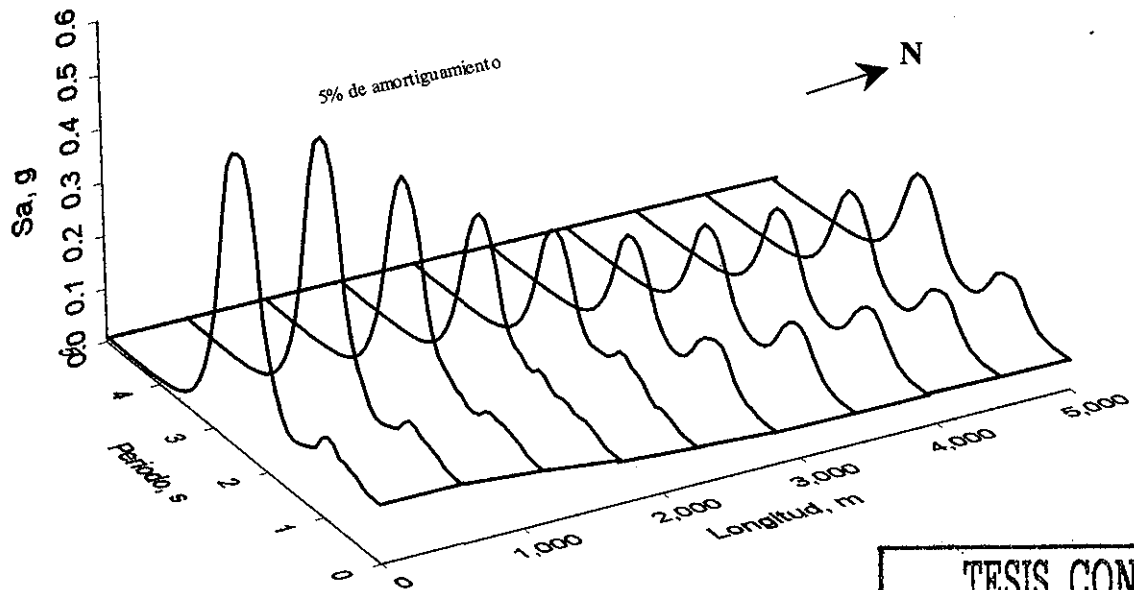


Figura 5.3.4 Variación espacial de los espectros de aceleraciones, a lo largo de las pistas 01D/19I

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Para ejemplificar el uso de las figuras, supónganse que se desea obtener el coeficiente sísmico en un punto localizado a 2000 m de la cabecera de la pista 01C, para una estructura de periodo de 2 segundos (ver figura 5.3.2). Una vez localizado el punto (periodo = 2 s, longitud = 2000 m) se traza una línea vertical. Donde ésta cruza con la superficie espectral (S_a) se tiene el valor del coeficiente sísmico, el cual tiene un valor de 0.12 g, donde g es la aceleración de la gravedad. Note que en estas figuras sólo se muestran “nervaduras” de la superficie espectral, para poder visualizar la parte “oculta” de las formas espectrales.

Zonificación sísmica del sitio

Para obtener la variación espacial de las ordenadas espectrales en todo el sitio, se trazó una retícula de aproximadamente 500 m para cubrir el área de las pistas. La base de datos estratigráficos se formó con resultados de sondeos reales y perfiles virtuales obtenidos con el modelo estratigráfico.

Los resultados de los análisis de amplificación se muestran en las figuras 5.3.5 a 5.3.11, en términos de contornos de isoaceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales. Esta serie de figuras permite obtener la ordenada espectral (coeficiente sísmico) en cualquier punto, donde se ubican las pistas, del sitio ex-Lago de Texcoco. Conviene enfatizar que estos resultados corresponden a movimientos de campo libre.

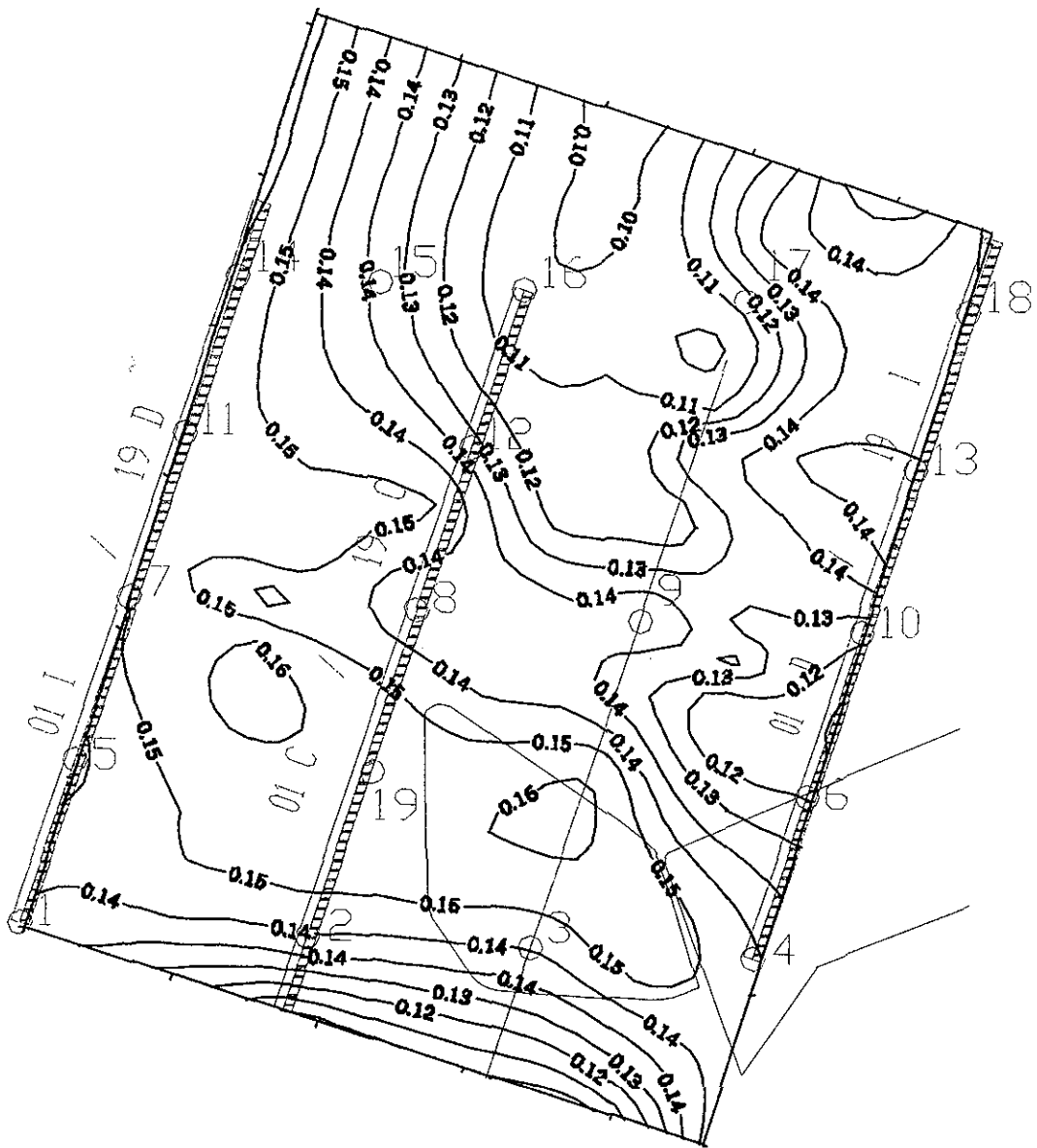


Figura 5.3.6 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=1 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

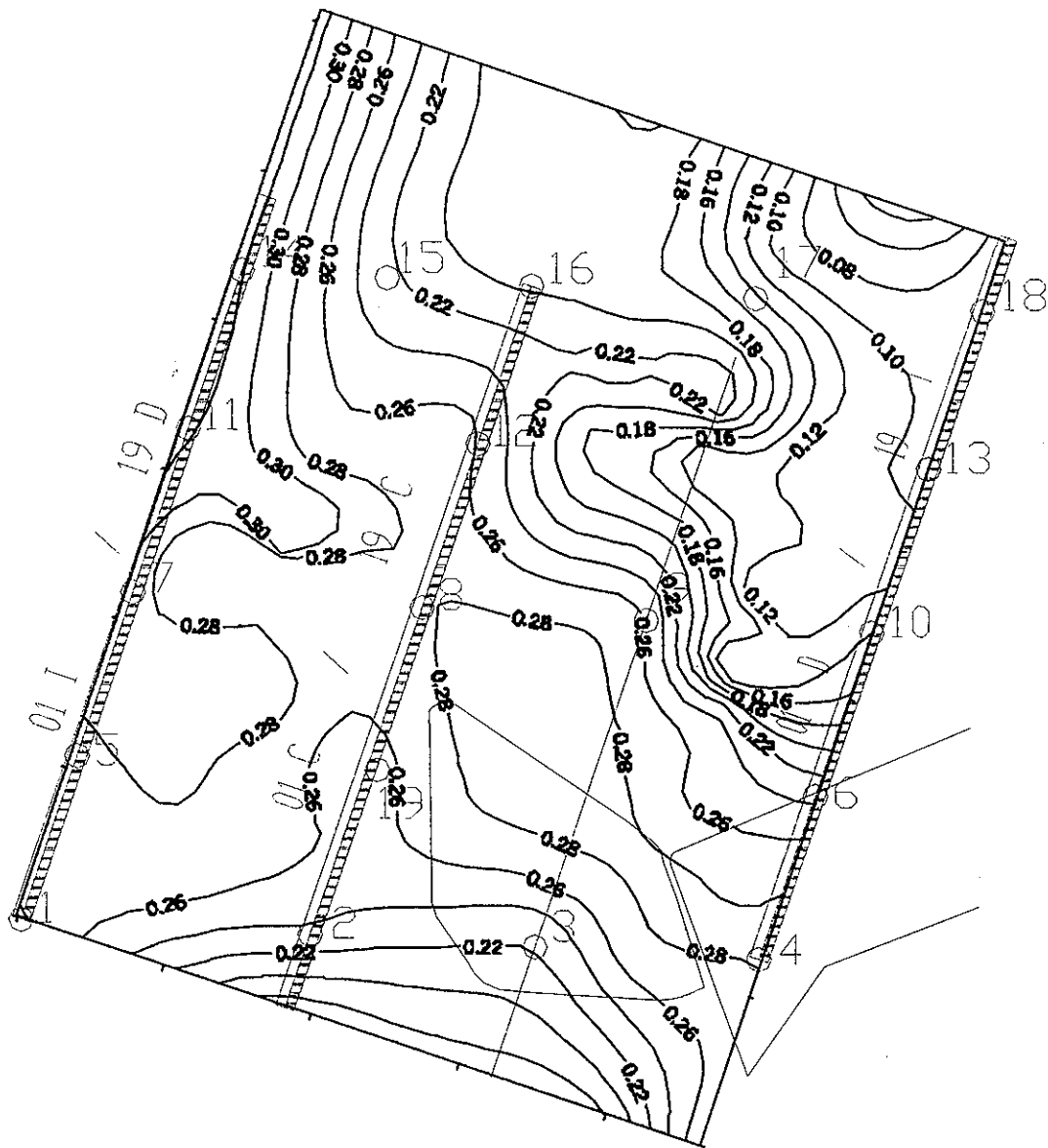


Figura 5.3.7 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=2 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

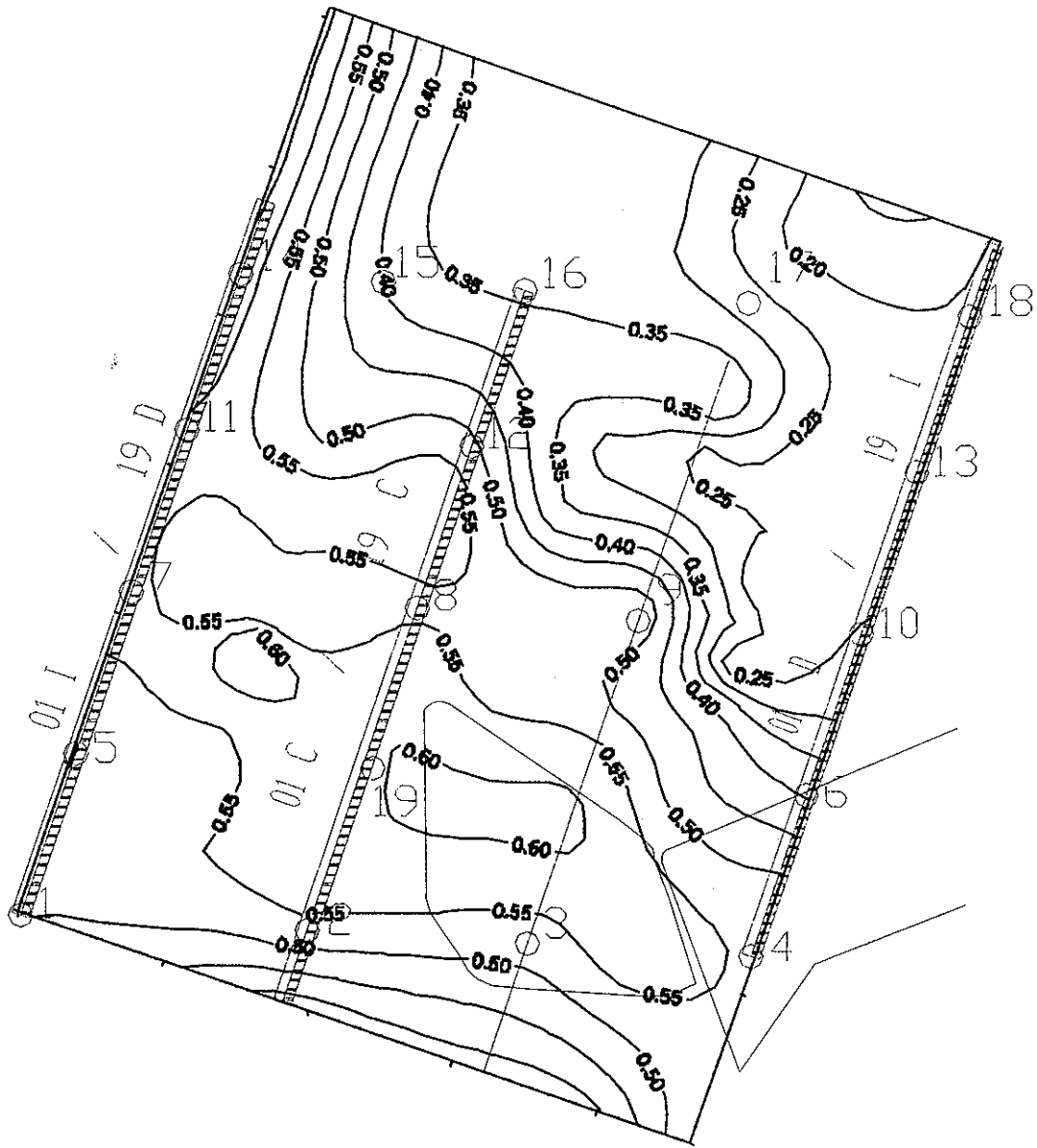


Figura 5.3.8 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=2.5 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

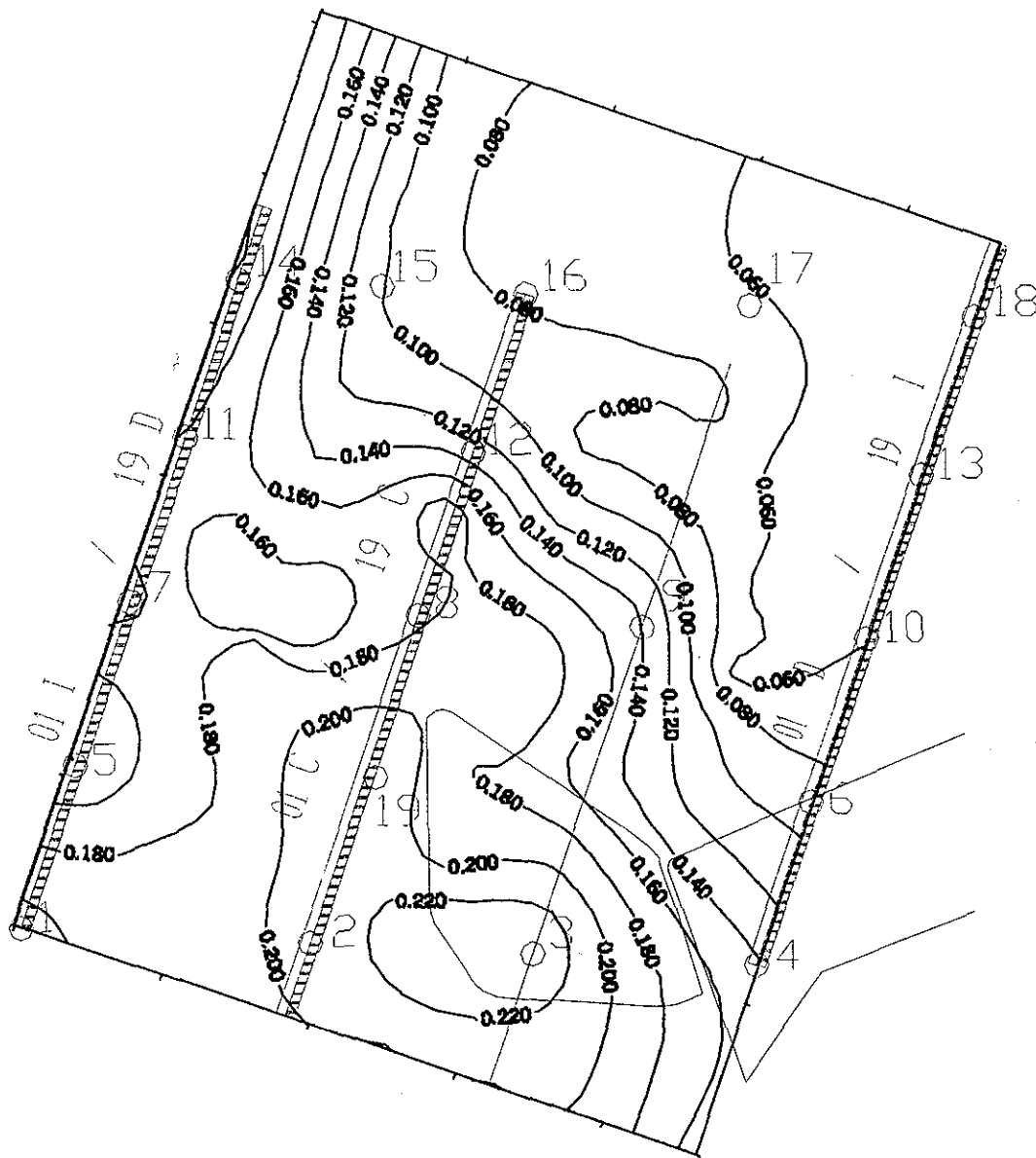


Figura 5.3.9 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=3 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

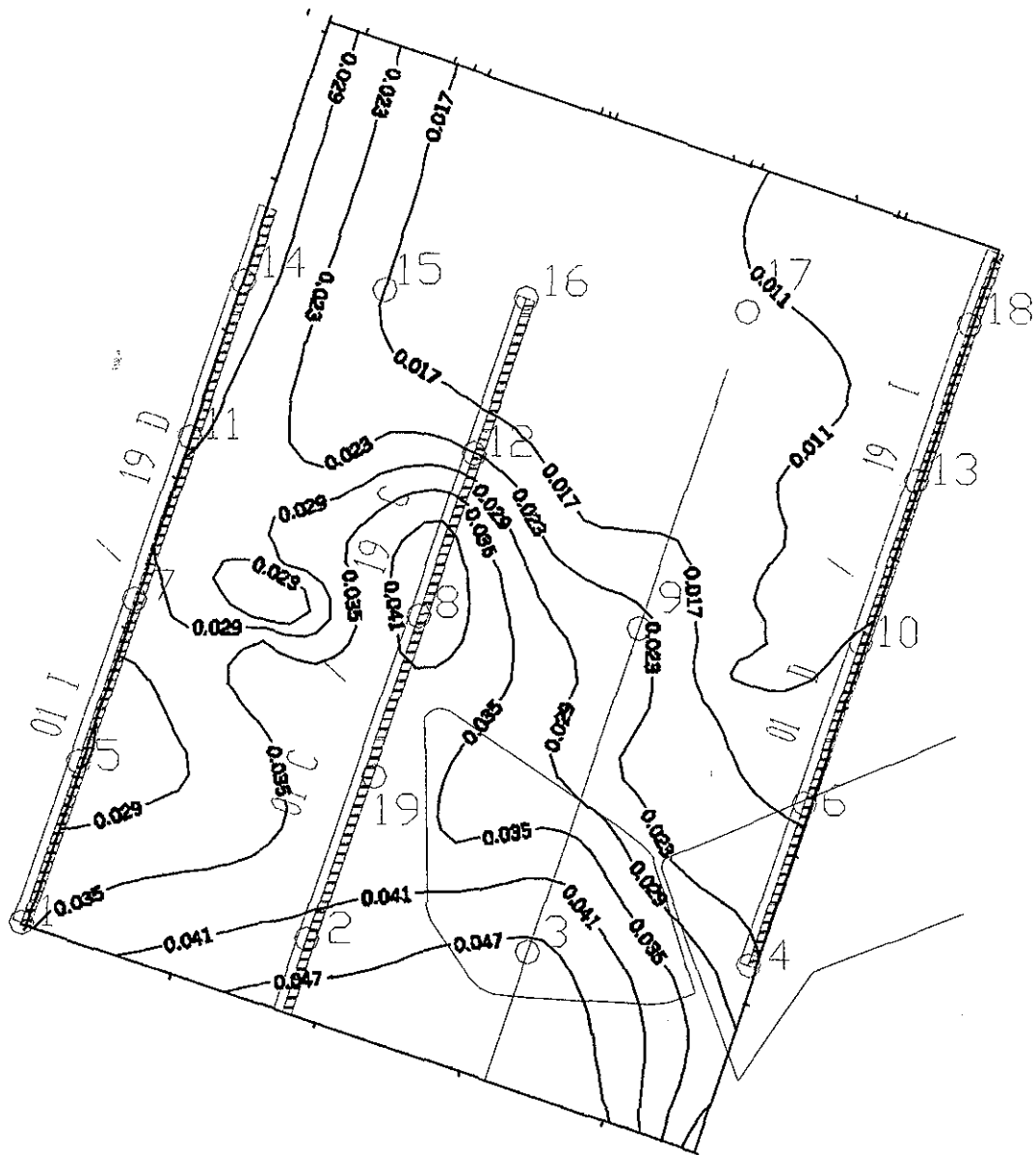


Figura 5.3.10 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=3.5 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

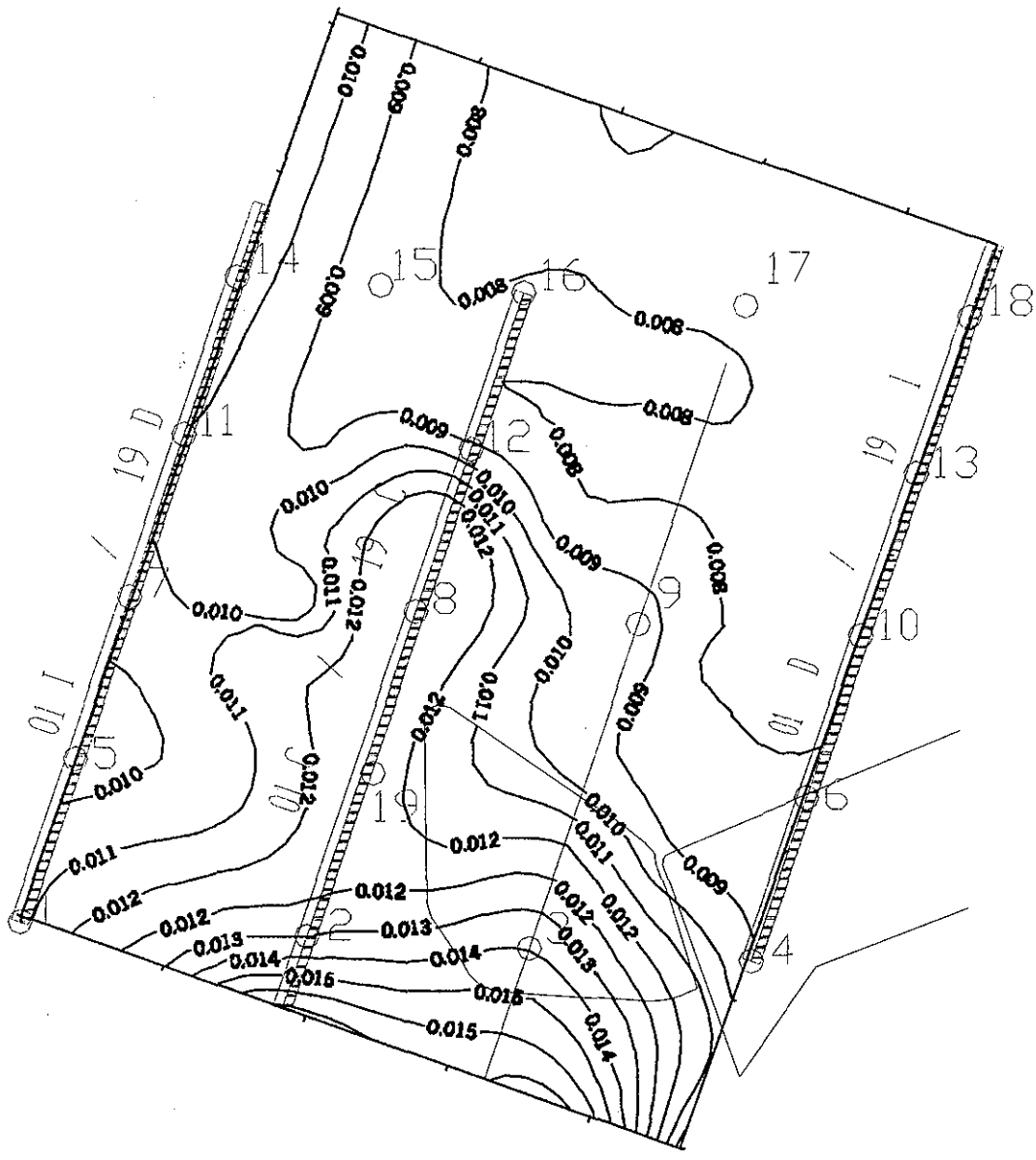


Figura 5.3.11 Curvas de iso-aceleración espectral, media más una desviación estándar, para T=5 segundos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 6

MODELO DEL MEDIO AMBIENTE SÍSMICO MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)

6.1 Aspectos generales

La ingeniería geotécnica es conocida como una de las áreas “imprecisas” de la ingeniería, debido a que ésta estudia los materiales desarrollados por la naturaleza (suelo y roca), los cuales exhiben una gran variedad e incertidumbre en su comportamiento producto del proceso físico, complejo e impreciso, de la formación de los mismos. En muchas circunstancias, nuestro conocimiento acerca del comportamiento de estos materiales todavía no es suficiente para poder predecir su comportamiento. Bajo estas circunstancias, la experiencia de los expertos juega un papel primordial, provocando el uso generalizado de las aproximaciones empíricas en el diseño. Desde que las técnicas de inteligencia artificial pueden hacer uso del conocimiento heurístico o de la técnica para definir patrones, en contraposición a la solución de un conjunto de ecuaciones matemáticas, se tienen tecnologías alternas para estudiar muchos de los problemas del campo de la ingeniería geotécnica.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son una forma de inteligencia artificial, las cuales toman el nombre de las redes de las células nerviosas del cerebro humano. Las RNA son sistemas de neuronas o nodos unitarios masivamente interconectados en forma paralela, inspirados en la forma que aprende el cerebro (esencialmente por experiencia). Muchos autores han descrito la estructura y el funcionamiento de las RNA, tales como Hecht- Nielsen, 1990, Maren et al., 1990, Romo, 1999 y Zurada, 1992.

La aplicación de las RNA en problemas geotécnicos se ha incrementado notablemente en los últimos años, algunos de estos incluyen la interpretación del comportamiento de los suelos tales como arcillas (Agrawal et al., 1994), arenas (Ghaboussi et al., 1991; Romo et al., 1998; Romo et al., 2001), gravas (Romo et al., 1998) y areniscas (Millar y Clarici, 1994), compactación de suelos (Basheer y Najjar, 1995), clasificación de suelos (Cal, 1995), caracterización de sitio de rellenos de suelo (Basher et al., 1996), predicción de capacidad de carga en pilotes (Lee y Lee, 1996; Chow et al., 1995; Romo et al., 1998), evaluación del potencial de licuación (Goh, 1994; Agrawal et al., 1997), desplazamientos laterales en excavaciones apuntaladas (Goh et al., 1995), evaluación del

coeficiente de permeabilidad en suelos parcialmente saturados (Gribb y Gribb,1994), flujo de agua debajo de presas de concreto cimentadas en formación rocosa (Ohnishi y Soliman,1995), respuesta y peligro sísmico (Wong et al., 1992; Sarmiento, 2001; García et al., 2001), caracterización dinámica de depósitos de arcilla (Romo et al., 2001). De lo expuesto, se considera que la presente sección de este estudio servirá para enriquecer la gama de aplicaciones de las RNA realizadas hasta la fecha en la ingeniería geotécnica, demostrando la notable diversidad de la técnica, considerándola como una estimadora universal.

El entrenamiento de una red neuronal requiere de alguna experiencia (en gran parte obtenida a prueba y error) para diseñar la arquitectura de red apropiada (óptima). Es necesario, además, entender el problema que se desea estudiar para determinar los parámetros que gobiernan el fenómeno. A partir de ejemplos presentados a la red, ésta es capaz de aprender los patrones existentes en la información presentada, lo cual le permite producir, con buena precisión, respuestas a problemas de la misma índole. Su desempeño no depende de hipótesis y simplificaciones concernientes a ningún tipo de modelo establecido. En esta tesis, la técnica de las RNA se la aplicará como procedimiento complementario al desarrollado en la sección anterior, obteniendo un algoritmo de predicción para la obtención del medio ambiente sísmico de campo libre en el sitio del ex-Lago de Texcoco.

6.2 Marco teórico

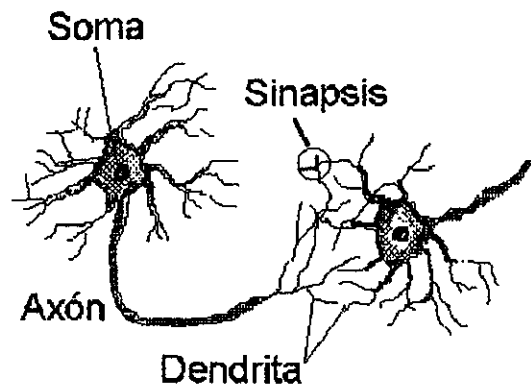
Para poder comprender mejor cómo trabajan las neuronas artificiales, es necesario conocer la forma en que las neuronas biológicas están integradas en la red neuronal, donde se procesa la información proveniente del medio ambiente exterior.

Neuronas biológicas

El cerebro humano está formado por un conjunto o grupo de células llamadas neuronas en forma acoplada por receptores y transmisores. Millones de receptores están distribuidos en todo el cuerpo humano, los cuales monitorean en forma continua los cambios del medio ambiente interior y exterior, ingresando la información a la red. Centenares de millones de células controlan a los transmisores, por medio de los cuales el cerebro produce sus efectos en el cuerpo y en su medio ambiente. Los receptores transforman la energía en un mensaje neuronal, a la vez que son traducidos por las neuronas en un nuevo impulso, obteniendo la

respuesta de los transmisores (como la contracción de las fibras del músculo en respuesta a estos impulsos).

Las partes esenciales de una neurona biológica se reducen a cuatro: las dendritas, el soma, el axón y la sinapsis, las cuales están conectadas como se indica en la figura 6.2.1. Las dendritas son extensiones extremadamente delgadas del soma que actúan como canales que transmiten la información que proviene de otras neuronas. El soma procesa esta información y la envía a otras neuronas a través del axón y las sinapsis, que son los espacios entre las dendritas de neuronas adyacentes.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 6.2.1. Modelo de una neurona biológica

El sistema neuronal biológico no tiene su símil en las computadoras actuales o en las redes neuronales artificiales. Lo que éstas tratan de reproducir, en forma primitiva, son las funciones más elementales de estos organismos neuronales, con el fin de resolver problemas.

Neuronas artificiales (Unidades de procesamiento)

Para simular el proceso de la neurona biológica, la unidad básica de las redes neuronales artificiales (denominada neurona McCulloch-Pitts, 1943) se indica en la figura 6.2.2. El cuerpo (soma) de la neurona representa a la activación (z_j) de la neurona j , la cual está definida por una suma lineal ponderada, $\sum w_{ij}x_i$ incluyendo un punto de comienzo o sesgo θ_j , de datos externos x_i , seguida por una transformación (lineal o no lineal) funcional, $y_j=f(z)$, denominada función de activación (transferencia), la cual usa los datos del problema para determinar las respuestas (actividad) de la neurona. Esta unidad es el elemento primario en la mayoría de las arquitecturas de las redes neuronales o conglomerados de perceptrones interconectados. Las redes neuronales usan diferentes funciones de activación, pero la estructura interna del neurón es común a la mayoría de las redes. Las funciones $f(z)$ pueden ser lineales, sigmoidales no

lineales, hiperbólicas y de umbral. La eficiencia sináptica depende de los pesos de interconexión w_{ij} , de la neurona i a la j . Estos pueden ser positivos (excitatorios) o negativos (inhibitorios). Los pesos y las funciones $f(z)$ definen la operación de la red; usualmente, para una arquitectura dada, $f(z)$ se mantiene fija de tal manera que los pesos permitirán a la red ejecutar cálculos diferentes. Luego de pasar la suma de las entradas afectadas por los pesos y por la función de activación, se obtiene como resultado la salida de la neurona j :

$$y_j = f(z_j) = f\left(\sum w_{ij}x_i\right) \quad (6.2.1)$$

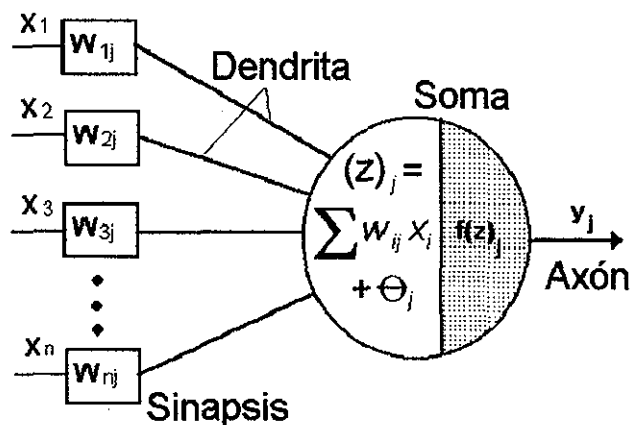


Figura 6.2.2. Modelo de una neurona artificial (Unidad de procesamiento)

Redes neuronales artificiales (RNA)

Si se combinan varias unidades de procesamiento o nodos en capas, como se ilustra en la figura 6.2.3, se obtiene una red neuronal. La arquitectura o topología de una red neuronal, como la mostrada en esta figura, es muy capaz para reconocer patrones. Esta arquitectura, denominada red multicapa con alimentación hacia adelante (MNFFN, Multilayer Normal Feed Foward Network), no tiene interconexiones entre neuronas de la misma capa y cada neurona en la capa de entrada (capa en que se dan los datos) proporciona un dato para cada una de las neuronas de la siguiente capa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

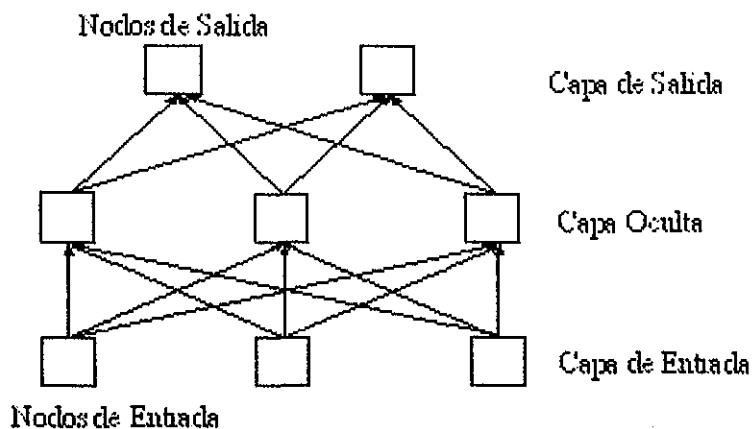


Figura 6.2.3 Arquitectura multicapa con alimentación hacia adelante, completamente conectada.

Una red multicapa con alimentación hacia adelante consiste de al menos tres capas: la de entrada, una oculta y la de salida. El número de neuronas en la primera capa debe ser, al menos, igual a la de los datos, el número de neuronas en la capa de salida es igual al de resultados y el número de neuronas en la capa oculta depende del diseñador de la red.

En la arquitectura también se incluye un sesgo, θ_j , representado por una neurona en cada capa. Los sesgos son opcionales y son tratados como pesos, participan en el proceso de entrenamiento (o aprendizaje) de la red neuronal y se usan para estabilizar la señal. La propagación de la información en una RNA comienza en la capa de entrada, la red ajusta sus pesos en la presentación del conjunto de datos de entrenamiento y utiliza una regla de aprendizaje para determinar el conjunto de pesos que producirán el grupo de salidas que generen el menor error posible entre la salida de la red y el valor deseado, a este proceso se le denomina aprendizaje o entrenamiento supervisado. Una vez que se alcance satisfactoriamente la fase de entrenamiento del modelo, su comportamiento deberá ser validado mediante un conjunto de datos independientes, etapa de predicción.

De acuerdo con lo expuesto, las RNA aprenden de los datos (ejemplos) presentados a éstas, y usan estos datos para ajustar sus pesos en un intento de capturar la relación que existe entre el modelo de entrada y las salidas correspondientes. Consecuentemente, las RNA no necesitan de ningún conocimiento inicial sobre la naturaleza de la relación entre las variables de entrada y de salida, lo cual representa un beneficio comparando las RNA con muchos de los métodos estadísticos y empíricos.

La filosofía en el modelado de la RNA es similar a las de muchos modelos estadísticos convencionales, en el sentido de que los dos tratan de capturar la relación que existe entre un conjunto de entradas históricas del modelo y las correspondientes salidas. Para ejemplificar, supongamos que tenemos un conjunto de valores de x con sus correspondientes valores en y en un plano bidimensional, donde $y = f(x)$. El objetivo es el de obtener una función desconocida f , la cual relaciona la variable de entrada x con la variable de salida y . En un modelo de regresión lineal, la función f se podría obtener al cambiar la pendiente $\tan \varphi$ y la intercepción β de la línea recta de la figura 6.2.4, para poder minimizar el error entre las salidas reales y las salidas de la línea recta (regresión). El mismo principio es utilizado en los modelos de las RNA.

Las RNA podrían desempeñar el modelo de regresión lineal simple mediante la configuración de una sola entrada y salida, sin ninguna capa oculta y con una función de transferencia lineal, figura 6.2.5.

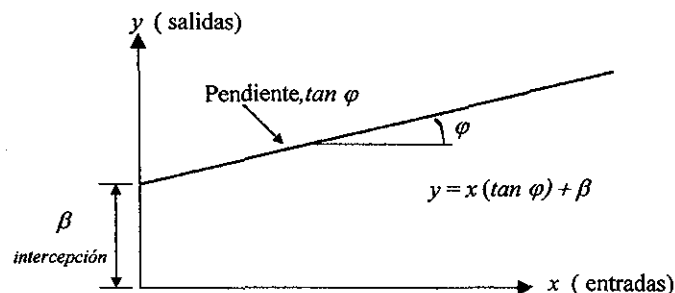


Figura 6.2.4. Modelo de regresión lineal

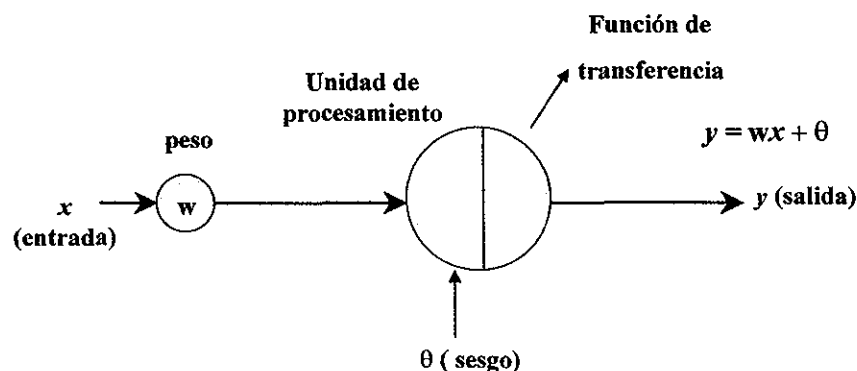


Figura 6.2.5. Representación de la RNA para el modelo de regresión lineal.

La conexión de los pesos w en un modelo de RNA es equivalente a la pendiente $\tan \phi$ y el sesgo θ es equivalente a la intercepción en β , en el modelo de regresión lineal. Si la relación entre las variables x y y es no-lineal, el análisis mediante la regresión lineal sólo podrá ser satisfactoria si existe un conocimiento previo de la naturaleza no-lineal de la relación entre las variables. Por el contrario, este conocimiento previo de la naturaleza no-lineal no es necesario conocerlo en un modelo de RNA. En el modelo de RNA, el grado de no-linealidad puede ser modificado de manera sencilla cambiando la función de transferencia (activación) y el número de nodos en las capas ocultas. En la práctica de la ingeniería, es común encontrar problemas complejos y de alta no-linealidad. En tales casos, el análisis de regresión tradicional no es adecuado (Gardner y Dorling, 1998). En contraste, las RNA pueden ser utilizadas para manejar esta complejidad mediante el cambio de funciones de transferencia o de la estructura de la red, y el tipo de no-linealidad puede ser modificado mediante la variación del número de capas ocultas y el número de nodos en cada capa oculta. Adicionalmente, los modelos con RNA pueden ser actualizados de uni-variables a multi-variables, incrementando el número de nudos de entrada. Para resumir lo expuesto en los párrafos anteriores, se presenta en la figura 6.2.6 el diagrama de flujo conceptual para el diseño de un modelo de RNA.

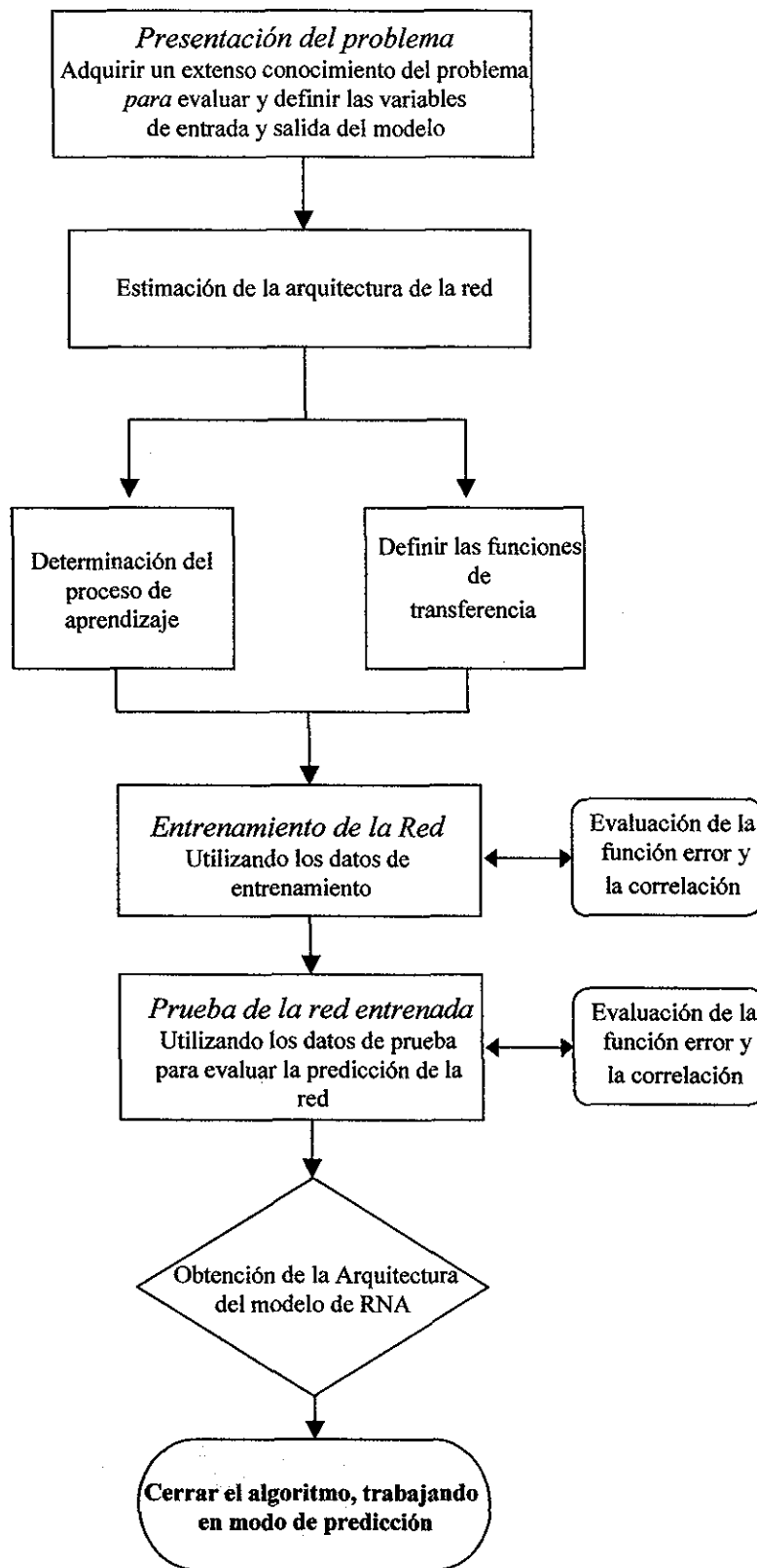


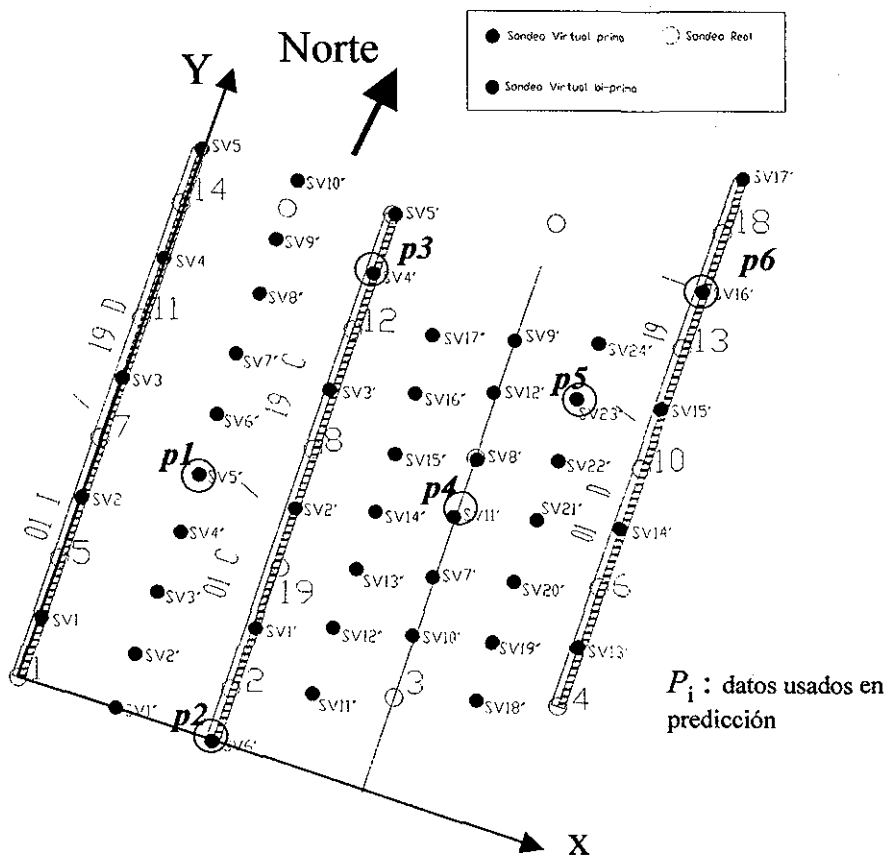
Figura 6.2.6. Diagrama de flujo conceptual para el diseño de un modelo de RNA.

6.3 Metodología de análisis con RNA

Para diseñar la RNA que modelará el fenómeno de la variación espacial de las ordenadas espectrales en la zona del sitio ex-Lago de Texcoco, es necesario definir los parámetros que tienen potencialmente una influencia más significativa en la respuesta sísmica del terreno, los cuales se describen a continuación:

✓ Datos para las etapas de entrenamiento y predicción de la red

Para realizar la etapa de aprendizaje de la red neuronal se consideraron como datos, el espectro de respuesta medio más una desviación estándar, obtenido en la sección 5.3, para 55 de los 61 sondeos, reales y virtuales, en la zona de estudio. Para la etapa de prueba (etapa de predicción) de la red, se consideró el 10 % de la base de datos. Es decir, las formas espectrales de seis sondeos, esparcidos en el predio tratando de cubrir toda la zona, los cuales se muestran en la figura 6.3.1.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 6.3.1 Ubicación, en la zona de estudio, de los datos utilizados en la etapa de entrenamiento y predicción de la red

✓ Variables de entrada y salida para el modelo de la red

Como en toda herramienta matemática aquí también se cumple la máxima: “*entra basura y sale basura*”, por tanto, para modelar el problema en forma correcta es necesario considerar las variables de entrada que representen el fenómeno a estudiar. En la literatura no existen métodos formales para seleccionar las variables (independientes) de entrada para la solución correcta del problema; sin embargo, existen criterios heurísticos que indican que tener un grupo pequeño de variables de entradas frecuentemente mejora las capacidades de generalización de la RNA. Adicionalmente, si las variables de entrada contienen ruido podría disminuir la capacidad de generalización (predicción) de la RNA, (Walczak y Cerpa, 1999).

Se plantea como criterio para la modelación con la red, considerar como origen coordinado la respuesta sísmica determinada en el sondeo SCE -01 (intersección de los ejes Y,X de la figura 6.3.2), caracterizada por el espectro de respuesta medio más una desviación estándar. Cualquier punto i dentro de la zona de estudio se referencia al origen de este sistema coordinado. La ubicación de la respuesta en un punto i esta caracterizada por las coordenadas polares R_i (radio) y θ_i (ángulo). Para eliminar las disparidades entre los valores de R_i y los de las ordenadas espectrales (usualmente menores que la unidad), se consideró conveniente normalizar el radio R_i por la mediana del radio del conjunto de puntos, R_m , obteniendo así una relación cuyos valores varían entre:

$$0.0 \leq \frac{R_i}{R_m} \leq 1.90, \text{ donde } R_m \text{ es } 4,003 \text{ metros.}$$

El valor del ángulo θ_i se consideró en radianes cuyos valores fluctuaron entre:

$$0.0 \leq \theta_i \leq 1.57$$

Las magnitudes de las ordenadas espectrales obtenidas para el sondeo SCE -01 se las consideraron como fracción de la gravedad y el periodo en segundos. De acuerdo con el comportamiento observado en la sección 5.3 de las formas espectrales en la zona de estudio, el sitio se zonifica geotécnicamente, asignando dos clases; la *clase 1* para la zona de depósitos predominantemente lacustres y la *clase 2* para depósitos de origen deltaico, tal como se muestra en la figura 6.3.2. De tal forma que se le indica a la red por medio de estas clases la existencia de dos patrones diferentes en las formas espectrales.

La variable de salida es la aceleración espectral, en unidades de fracción de la gravedad para cualquier periodo estructural entre 0 a 5 segundos, en un punto i en la zona de estudio. Resumiendo, se consideran las siguientes variables de entrada y de salida de la red:

Variables de entrada del modelo:

1. R_i/R_m es la distancia normalizada del punto i con respecto al origen coordinado.
2. θ_i es el ángulo con respecto al eje de las abscisas (eje X de la figura 6.3.2).
3. Clase: 1 ó 2, dependiendo de la zona geotécnica (ver figura 6.3.2).
4. T es el contador, valor del periodo estructural en segundos para el cual se evaluará la ordenada espectral en el punto i .
5. Sa_1 es la ordenada del espectro en el origen del sistema coordinado.

Variable de salida del modelo:

1. Sa_i es la ordenada espectral en el punto i .

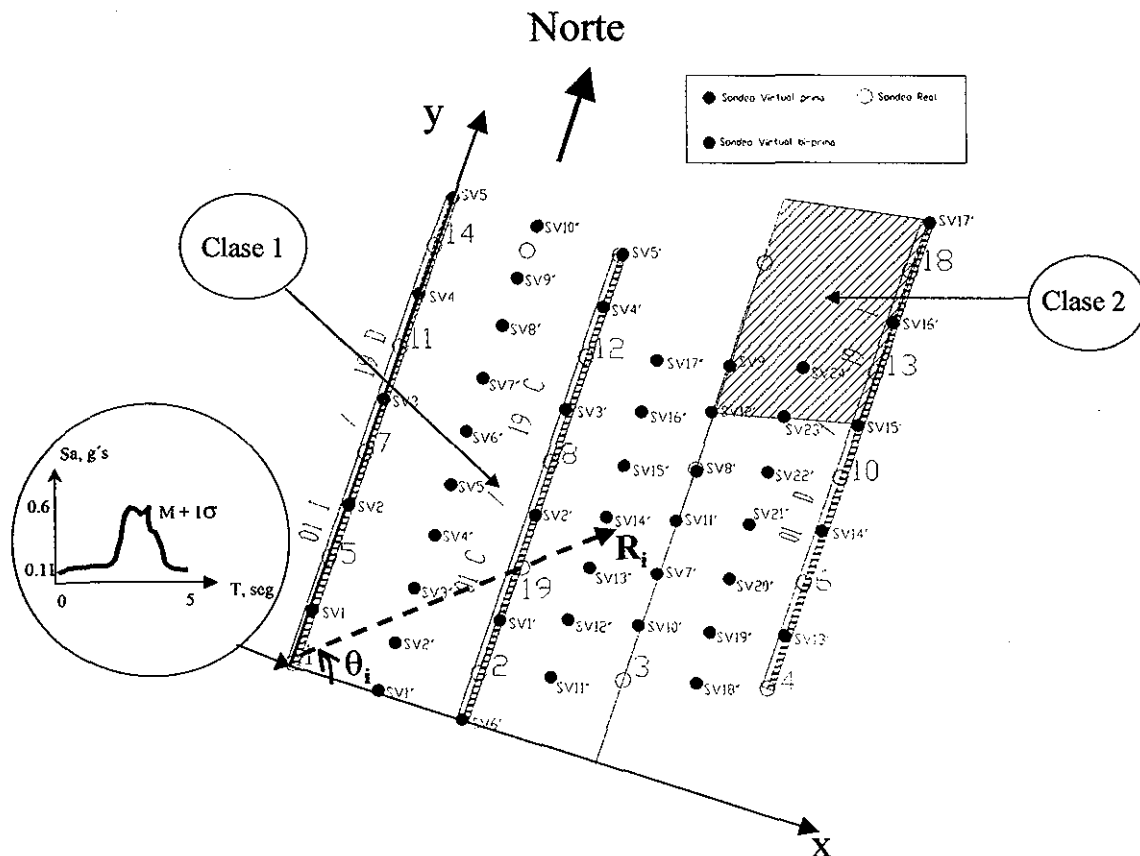


Figura 6.3.2 Variables de entrada para el modelo de la RNA

✓ Arquitectura de la Red

Como se describió en la sección anterior, la arquitectura de la red tiene relación con la topología de las conexiones sinápticas, de tal forma que los algoritmos de aprendizaje se relacionan estrechamente con cierta clase de topología de red. Existen varios tipos de topologías, tales como:

- Multicapa con alimentación hacia adelante
- Recurrentes: Totales, Jordan, etc.
- Constructivos: Cascada, Piramidal, etc
- Otros.

De acuerdo con los estudios realizados por Romo et al., (2001), indican que las redes recurrentes desarrollan el proceso de alimentación hacia atrás mediante la utilización de la información del estado previo para calcular el estado presente. Transforma conjuntos de baja calidad de entrenamiento (p.e., algunos de los parámetros de los datos de entrada tienen una influencia predominante en el entrenamiento) en subconjuntos donde el efecto de todos los patrones de entrenamiento son razonablemente controlados. Las redes constructivas tienen la característica de añadir nodos en la capa oculta en forma secuencial hasta obtener la convergencia deseada, en ésta sólo se permite una capa oculta. Los diseñadores de las redes de correlación en cascada (o cualquier tipo de redes crecientes) deben de considerar que los procesos de crecimiento no necesariamente garantizan el diseño óptimo de la arquitectura de la red. Esto es producto de que el número de neuronas o nodos adicionados depende de la magnitud del criterio de convergencia, a menor criterio de convergencia más neuronas serán adicionadas. Los resultados obtenidos por Romo et al., (2001) demuestran que las redes sobredimensionadas se comportan bien durante el entrenamiento, pero podrían tener problemas en la generalización (predicción). Por tanto, deberá existir un balance entre la magnitud del criterio de convergencia y el número de neuronas adicionadas, definido por prueba y error.

Para el modelo de todas las redes analizadas en el proceso de prueba y error para la obtención de la red óptima, se consideró la arquitectura multicapa con alimentación hacia adelante, la cual fue descrita en la sección 6.2. Se ha demostrado que este tipo de arquitectura constituye un estimador universal en la evaluación de funciones no lineales (Hornik et al., 1989). Este tipo de arquitectura se complementa muy bien con algoritmos de aprendizaje

supervisados, como los de propagación hacia atrás (back propagation) y los de propagación rápida (quick propagation).

✓ Algoritmo de entrenamiento (aprendizaje) de la red

De acuerdo con lo descrito en el párrafo anterior, se consideran dos tipos de algoritmos de entrenamiento que son compatibles con la arquitectura multicapa con nutrición hacia adelante, de propagación hacia atrás (BP) y de propagación rápida (QP).

El algoritmo de propagación hacia atrás es quizás el más utilizado para modelar problemas mediante RNA, en el cual se presentan a la red respuestas deseadas. En el algoritmo de aprendizaje de propagación hacia atrás se involucran procesos de propagación hacia adelante, de la información, seguido por procesos de propagación hacia atrás, del error. Los dos procesos se efectúan para cada patrón de presentación durante el entrenamiento. El proceso de propagación hacia adelante se inicia con la presentación de los patrones de entrada (variables de entrada) en la capa de entrada de la red, continuando como nivel de activación, el valor de salida de cada unidad de procesamiento o neurona que se propaga hacia adelante a través de las capas ocultas. En cada capa consecutiva, cada unidad de procesamiento suma sus entradas para luego aplicar la función de transferencia (p.e., sigmoide y bipolar sigmoide) para calcular su salida. Las unidades de la capa de salida producirán entonces los resultados de la red. El proceso de propagación hacia atrás se inicia con la comparación entre la salida de la red y el vector deseado (target), calculando el error o la diferencia entre los dos valores.

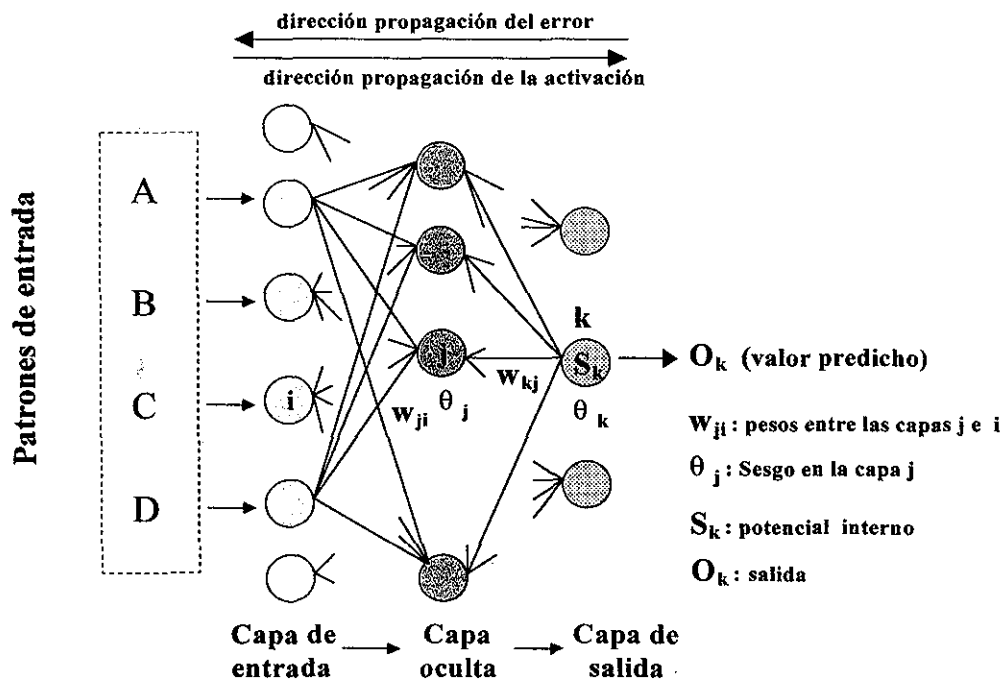


Figura 6.3.3 Esquema de un modelo con tres capas para ilustrar las bases analíticas del proceso de entrenamiento de una RNA

Luego se calculan los valores de los errores para las neuronas ocultas y se modifican los pesos entrantes, iniciando el proceso en la capa de salida y moviéndose hacia atrás de forma consecutiva, de tal manera que en cada proceso o paso la red corrige sus pesos hasta observar un decrecimiento del error, en la figura 6.3.3 se esquematiza el proceso de aprendizaje. Aunque las RNA de propagación hacia atrás han demostrado su efectividad en su aprendizaje, es conocido que tiene una baja relación de convergencia en el aprendizaje debido a su algoritmo de entrenamiento, la regla delta generalizada, siendo básicamente una combinación del método del gradiente descendente con una longitud constante de intervención en la configuración de la red. Adicionalmente, la configuración de la red se obtiene mediante prueba y error, Zhou y Wu (1994). Las operaciones matemáticas que se requieren durante el entrenamiento de la red mediante el algoritmo de propagación hacia atrás se describieron en forma detallada en la IV conferencia Arthur Casagrande, Romo (1999). Para ilustrar matemáticamente el esquema de la figura 6.3.3 se define la salida de la red con la siguiente expresión matemática:

$$O_k = f(S_k); S_k = \sum_j (w_{kj} \cdot R_j) - \theta_k \quad (6.3.1)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Considerando que R_j es la salida generada por una neurona oculta j , O_k es el resultado de la producción de la neurona de salida k , w_{kj} es el peso entre la neurona oculta j y la salida de la neurona de salida k , y θ_k es el sesgo (umbral) de la neurona de salida k , la relación entre todas estas variables se la presenta en la ecuación 6.3.1, donde $f(.)$ es la función de transferencia o activación.

Una modificación al algoritmo de propagación hacia atrás (BP) es el algoritmo de propagación rápida (QP), el cual ha demostrado tener una velocidad sustancial en la obtención de la relación de convergencia en el aprendizaje, lo cual minimiza el tiempo requerido para determinar un buen conjunto de pesos mediante algunas técnicas heurísticas (empíricas). Estas técnicas heurísticas regulan automáticamente el tamaño de los procesos o pasos; y detectan las condiciones para acelerar el aprendizaje. También es un algoritmo de aprendizaje supervisado. El algoritmo de QP considera el signo del error para un peso en particular y lo compara con el signo del peso ajustado anterior, para detectar cómo se podría modificar en forma "segura" el tamaño del proceso, Romo et al., (2001). En el análisis de todas las topologías para la obtención de la red del modelo sólo se consideró el algoritmo de propagación rápida (QP).

✓ Función de error y criterio de convergencia

La función de error que se utiliza en los análisis es la del error medio cuadrático, representada por la siguiente expresión matemática:

$$E = \sqrt{\frac{\sum (D_{ij} - O_{ij})^2}{M}} \quad (6.3.2)$$

donde D_{ij} , es la (i -ésima) salida deseada (dato de entrenamiento) para entrenar el ejemplo j .

O_{ij} es la (i -ésima) salida real de la red para el ejemplo j .

M es el número de salidas multiplicado por el número de ejemplos.

Para ejemplificar cómo trabajan las funciones de error en el proceso de entrenamiento de una red, se muestra en la figura 6.3.4 una función hipotética de error, se observa que tiene

zonas de mínimos locales y globales. Si el algoritmo inicia desde un punto inferior de la zona de mínimos locales, la red convergerá inmediatamente, pero se tendrá una mala aproximación. Para solucionar el inconveniente, se podría tratar de cambiar los valores iniciales, o usar un método de optimización de segundo orden como el algoritmo de Levenberg-Marquart, el cual a sido probado como un generador de convergencia global (Osborne, 1976).

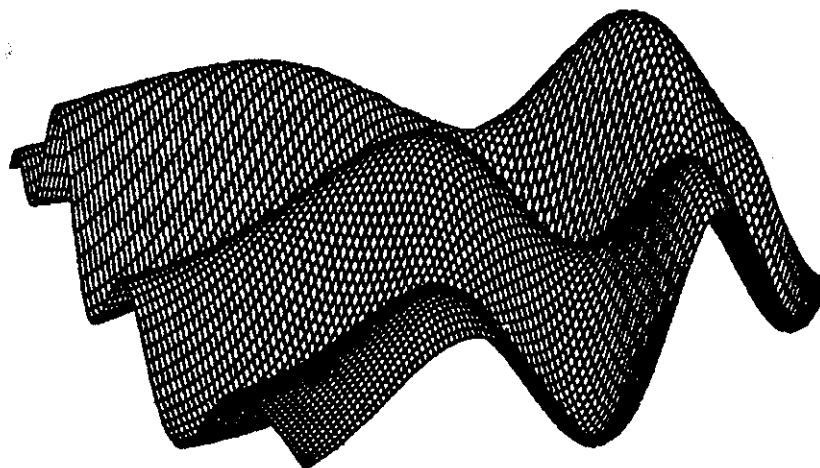


Figura 6.3.4 Función de error hipotética

Se pueden presentar dos situaciones no satisfactorias, sobreentrenamiento y subentrenamiento de la red. Entrenar muy poco la red, causaría que la función estimada capte muy poco de los aspectos de una función. El entrenamiento excesivo de una red, podría ocasionar una completa memorización de los datos de entrenamiento de la red, con muy poca habilidad para la generalización (predicción). Por tanto, no hay un procedimiento directo para definir la magnitud del criterio de convergencia que produce la definición de la topología para modelar el fenómeno. Por consiguiente, se tiene que adoptar el proceso de prueba y error, hasta obtener los valores de salida de la red que mejor se ajusten a los datos de predicción. Un parámetro para definir la aproximación de los valores de salida de la red con los valores deseados, es el porcentaje de clasificación de entrenamiento (C_e) y predicción (C_p), el cual representa al porcentaje del conjunto de ejemplos de entrenamiento o predicción "correctos". Para lo cual se debe de definir un criterio de convergencia o de tolerancia, es decir, definir el significado del "valor correcto" por medio de una tolerancia, con esto todas las salidas de la red que cumplan con la tolerancia establecida, se considerarán como valores correctos.

✓ Función de entrada

La función de entrada utilizada para todas las topologías de redes analizadas es la del producto punto, la cual consiste en la suma del producto de cada entrada con su respectivo peso incluyendo un valor de sesgo (*bias*), el cual escala cada valor de entrada de acuerdo con su relativa influencia en el incremento de la red de entrada a cada nodo o neurona, expresada matemáticamente como:

$$f(x,w) = w_0 + x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_n w_n, \text{ también como } f(x,w) = x^t \cdot w \quad (6.3.3)$$

Donde w_i son los pesos o ponderaciones, se tiene un peso especial llamado peso *bias*, w_0 , de igual manera se tiene una constante especial de entrada llamada constante *bias*, $x_0 = 1$.

✓ Función de activación (transferencia)

Se considera el uso de la función de transferencia más popular en los diseñadores de RNA, la función sigmoide (figura 6.3.5), la cual actúa como un exprimidor, comprimiendo la función de entrada cuando ésta toma valores negativos o positivos grandes. Los valores positivos grandes se aproximan asintóticamente a 1, mientras que los valores negativos grandes son comprimidos a 0, la función sigmoide se define matemáticamente como:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (6.3.4)$$

La función sigmoide limita los valores de salida de las unidades de procesamiento en el intervalo de [0,1].

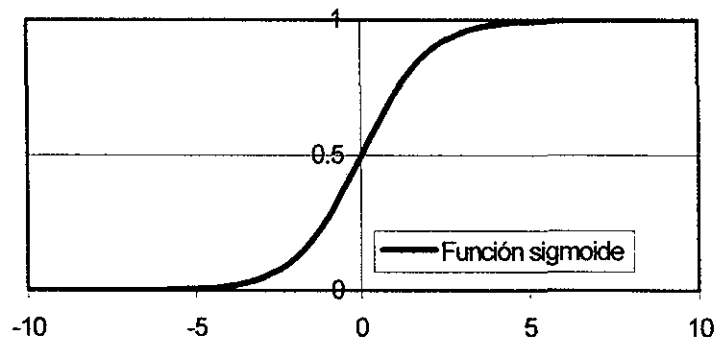


Figura 6.3.5 Función de activación sigmoide

Adicionalmente a la función sigmoide se considera el uso de la función bipolar sigmoide, cuya expresión matemática está definida por:

$$f(t) = -1 + \frac{2}{1 + e^{-t}} \quad (6.3.5)$$

La función bipolar sigmoide limita los valores de salida de las unidades de procesamiento en el intervalo de $[-1,1]$. Se puede notar que es una versión escalada de la función sigmoide, proyectada hacia abajo para tener un rango entre -1 y 1 .

✓ Diseño de las capas ocultas: Número de capas y de neuronas por capa

Las RNAs que contienen capas ocultas tienen la habilidad de tratar en forma robusta con problemas no lineales y complejos. La cantidad de capas ocultas depende de la complejidad del dominio del problema que se desea resolver. Una red con una capa oculta crea un hiperplano. Dos capas ocultas en la red combinan hiperplanos para formar áreas de decisión convexas, tres capas ocultas combinan áreas de decisión convexas para formar áreas de decisión convexas que contienen regiones cóncavas. La convexidad o concavidad de la región de decisión corresponde aproximadamente al número de las inferencias o abstracciones que son desarrolladas en las variables de entrada para producir los resultados de las salidas deseadas. Una consideración heurística para determinar la cantidad de capas ocultas requeridas en una RNA es: “ A medida que el espacio del problema se incrementa dimensionalmente (problemas de alto orden), el número de capas ocultas debería aumentarse en forma correspondiente.”, Bansal et al., (1993) y Fu (1994).

Para determinar la cantidad de nodos o neuronas por capa oculta no existe ninguna regla específica, por tanto, se considera el proceso de prueba y error para obtener la cantidad óptima de nodos por capa oculta.

6.4. Diseño de la RNA

Para la obtención de la red neuronal óptima se considera para todas las topologías analizadas el criterio de convergencia o tolerancia de 0.01. Con este umbral se definieron los valores de los parámetros del porcentaje de clasificación de entrenamiento (C_e) y de predicción (C_p).

Se analizaron 33 topologías diferentes en el proceso de prueba y error. Manteniendo constante los siguientes parámetros, descritos en la sección 6.3:

- Arquitectura : Multicapa con alimentación hacia adelante
- Algoritmo de aprendizaje: Propagación rápida, Qp
- Función de entrada: Producto punto, DP
- Tipo de error: Medio cuadrático
- Función de transferencia (activación): Sigmoide (S) o Bipolar sigmoide (BS)

Se consideró inicialmente la configuración de una capa oculta con varios nodos, obteniendo valores de C_e y C_p muy bajos. Consecuentemente, se analizaron topologías de dos y tres capas ocultas, de las cuales sólo se presentarán las que obtuvieron mayor porcentaje de C_e y C_p . En la tabla 6.4.1 se muestran las diez topologías que dieron mejores resultados en las etapas de aprendizaje y prueba (predicción). La nomenclatura usada, en la tabla 6.4.1, para representar los nudos que contiene cada capa escondida: $(a-b-c)$, indica que a son los nodos en la primera capa escondida, b en la segunda y c en la tercera.

Tabla 6.4.1 Resumen de las diez topologías para la obtención de la RNA óptima

Nombre	No. Capas Ocultas	No. de nodos / Capa	Función de trans.
Red 18	2	40 – 30	Sigmoide
Red 20	2	40 – 35	Bipolar sigmoide
Red 24	2	50 – 50	Sigmoide
Red 33	2	60 – 50	Sigmoide
Red 11	3	25 – 25 – 10	Sigmoide
Red 29	3	60 – 30 – 10	Sigmoide
Red 30	3	60 – 40 – 10	Sigmoide
Red 28	3	50 – 50 – 20	Sigmoide
Red 32	3	50 – 50 – 25	Sigmoide
Red 31	3	60 – 50 – 30	Sigmoide

Como se observa en la tabla 6.4.1, nueve de las diez mejores topologías utilizan la función de transferencia sigmoide, y sólo una emplea la bipolar sigmoide. Esto es producto de varios análisis de redes, en los cuales se mantuvieron constantes todos los parámetros excepto

la función de transferencia, obteniendo como resultado una mayor eficiencia en la función sigmoide con respecto a la función bipolar sigmoide, como se muestra en la figura 6.4.1. En esta figura se observa que, para la misma topología (50-40-30), la eficiencia de la función sigmoide es más alta que la bipolar sigmoide en la etapa de predicción de la red.

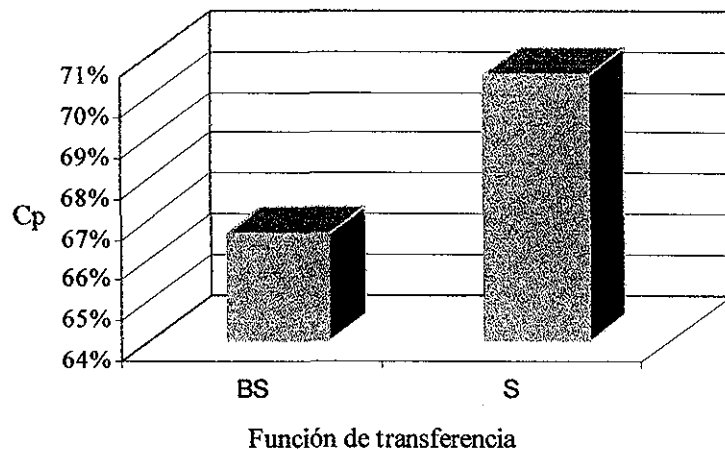


Figura 6.4.1 Comparación de la eficiencia de las funciones de transferencia en las RNAs con topología (50-40-30)

La mayor eficiencia de la función sigmoide se puede deber a que los valores de las variables de entrada de la red son positivos y se encuentran normalizados de tal forma que están dentro del dominio de $[0,1]$. En la figura 6.4.2 se muestran los valores obtenidos de C_e y C_p para las diez mejores topologías, lo cual permite definir la RNA que modela más adecuadamente el fenómeno de respuesta sísmica del sitio del ex-Lago de Texcoco. De esta figura se pueden realizar los siguientes comentarios:

Consideremos dos zonas de estudio dentro de la figura, una correspondiente a las topologías con dos capas ocultas y la otra con 3 capas ocultas. En las dos zonas se observan dos crestas para los dos parámetros, C_e y C_p . Lo cual significa que se tienen dos valores máximos de los dos parámetros, uno en cada zona. Una vez que se alcanza el máximo valor de C_p , correspondiente a la topología 3, al aumentar el número de nodos en las capas ocultas la red comienza a memorizar, disminuyendo en forma apreciable su capacidad de predicción, topología 4. Al observar este comportamiento y teniendo como valor máximo de 76.5% de C_p , para topologías de 2 capas ocultas, se consideró aumentar una capa oculta, para incrementar la no-linealidad del modelo con lo cual se obtendrían mayores valores de C_p , lo

CAP. 6 MODELO DEL MEDIO AMBIENTE SÍSMICO MEDIANTE REDES NEURALES ARTIFICIALES (RNA)

cual es compatible con la alta no-linealidad observada en los contornos de isoaceleraciones espectrales, obtenidos en la sección 5.3. De tal forma que se aumentó gradualmente la cantidad de nodos en las tres capas ocultas, tal como se muestra en el cuadro de la figura. Del análisis de la topología 7 se obtuvo como resultado un alto valor de C_e , 97%, sin embargo la predicción disminuyó drásticamente a un valor de C_p de 71%, lo cual indica que la red había memorizado o se había sobreentrenado. De la misma forma, al aumentar el número de nodos en las capas ocultas, topología 9, se observó una disminución en los valores de C_e y C_p .

Con base a estas observaciones, se considera a la topología 8 como la más adecuada para modelar el medio ambiente sísmico de campo libre para el sitio en estudio. Con esta topología se obtienen valores de C_e de 93% y C_p de 81%, lo cual significa que el 81% de los datos deseados utilizados para la predicción coinciden con la salida de la red, pudiendo tener una menor o igual tolerancia que la impuesta como umbral (0.01).

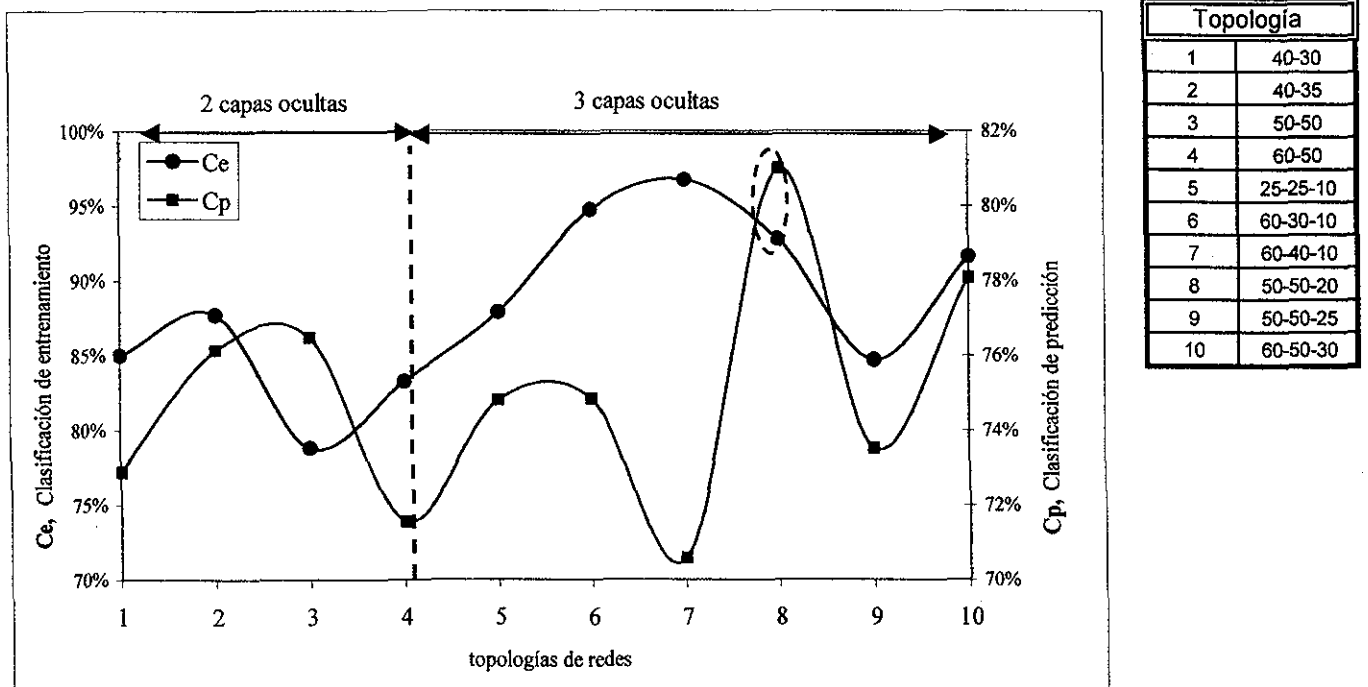


Figura 6.4.2 Variación de los parámetros C_e y C_p para las diez mejores topologías de red.

CAP. 6 MODELO DEL MEDIO AMBIENTE SÍSMICO MEDIANTE REDES NEURALES ARTIFICIALES (RNA)

Durante el proceso de prueba y error para la obtención de la red óptima, se observó que las redes con topologías de 3 capas ocultas, al pasar el umbral de los 15,000 ciclos de cálculo, tendían a disminuir el valor de C_p y aumentar el valor de C_e , provocando el fenómeno de memorización de la red.

Luego de la obtención de la RNA óptima (50-50-20) se procedió a su evaluación. En la figura 6.4.3 se presenta la configuración resultante. En principio se realizó un estudio paramétrico con el fin de estimar la influencia relativa de cada una de las variables de entrada en la respuesta.

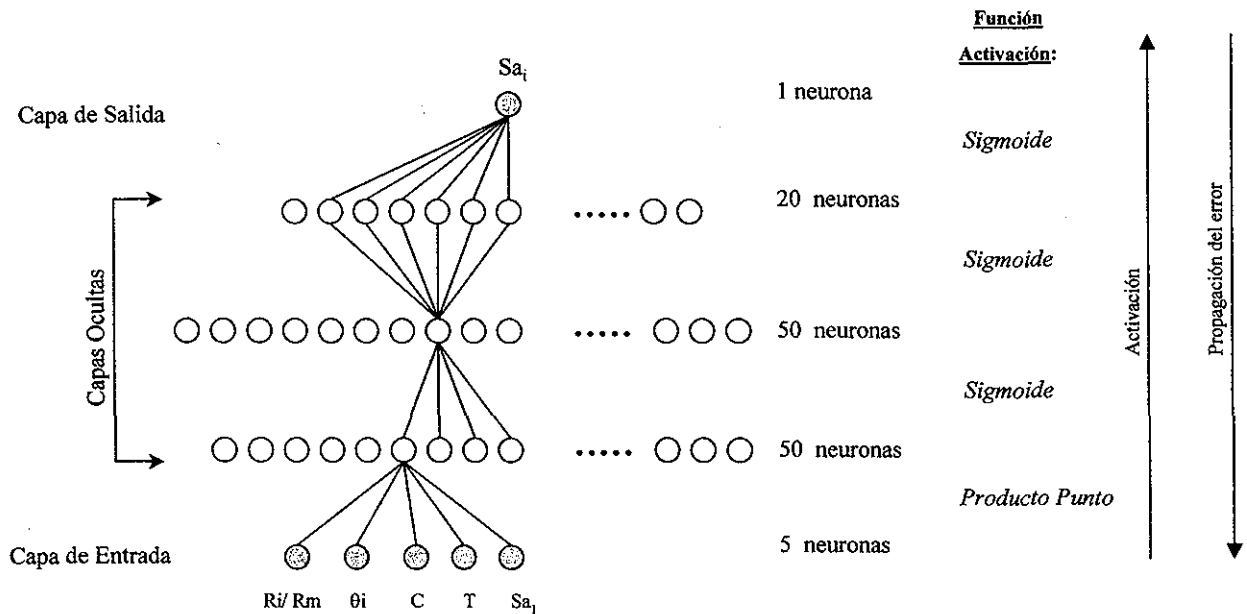


Figura 6.4.3 Arquitectura de la RNA para el modelo del medio ambiente sísmico del ex-Lago de Texcoco.

En la fig. 6.4.4 se puede notar que para el banco de datos proporcionado a la red, el periodo estructural del espectro de respuesta tiene la mayor contribución en la variable de salida, esto en gran parte se debe a que la aceleración espectral varía con respecto al periodo. Se puede observar que las coordenadas polares de la ubicación donde se desea estudiar la respuesta sísmica (dentro de la zona de estudio) tienen contribuciones similares a la Clase (zonificación geotécnica), la segunda mayor contribución es la aceleración espectral en el

sondeo SCE -01. Estas influencias relativas (contribuciones) dependen del volumen de datos que se presente a la red.

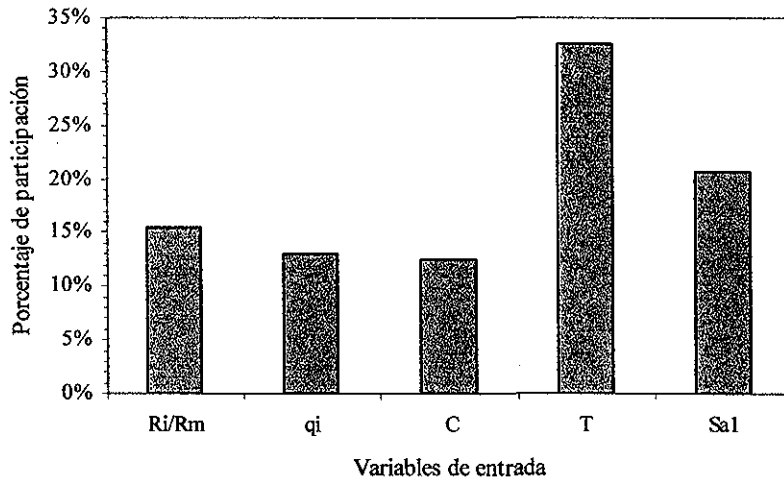
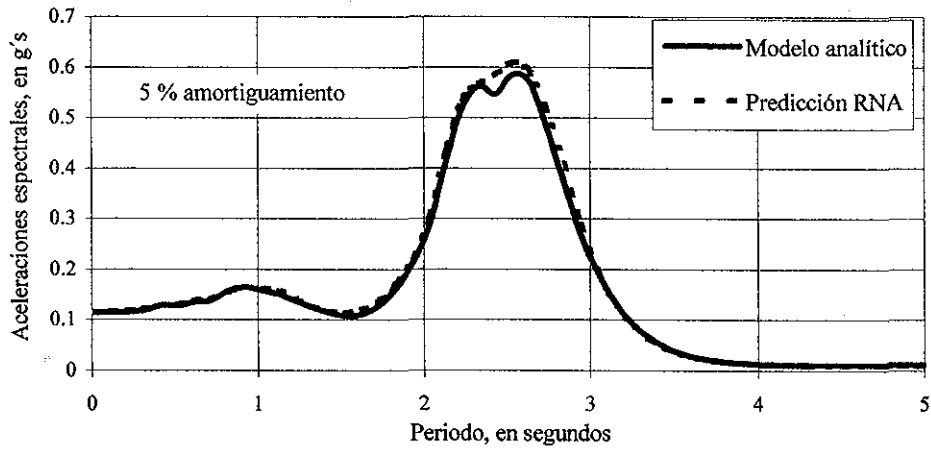


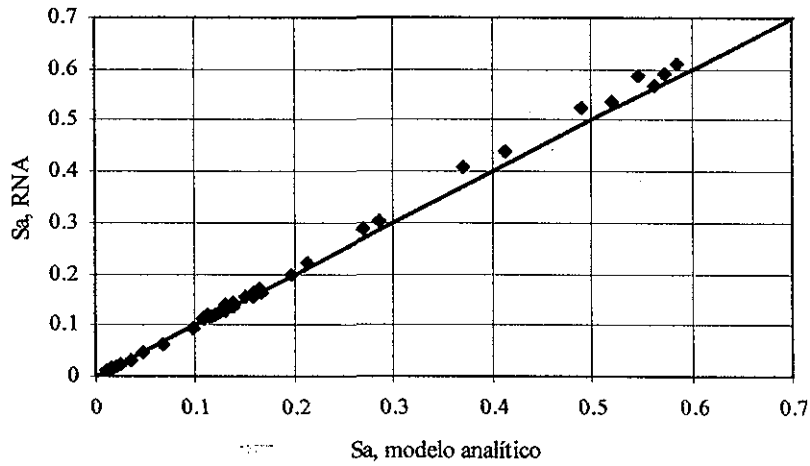
Figura 6.4.4 Porcentaje de contribución de las variables de entrada en la salida de la red

6.5 Respuesta sísmica del sitio con RNA

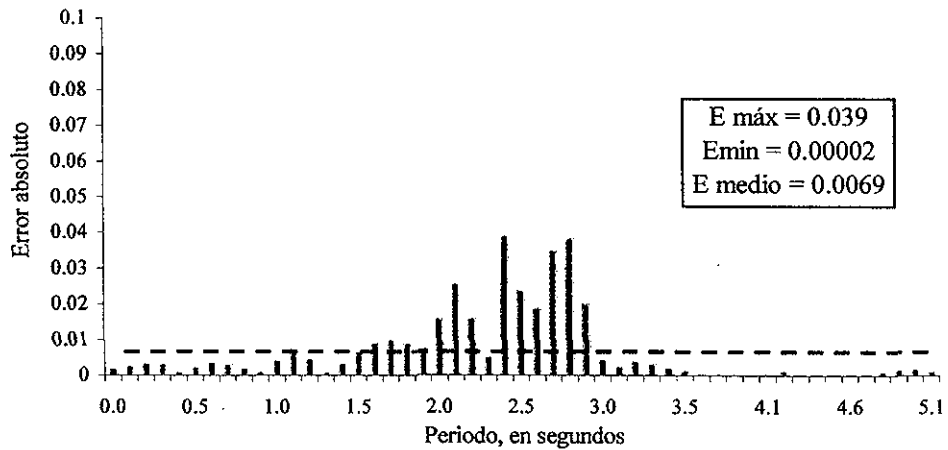
Una vez obtenida la RNA para modelar el medio ambiente sísmico de campo libre en la zona de estudio, se cerró el algoritmo de la red y se trabajó en modo de predicción para comprobar la eficacia de la red. Para esto, se presentan tres tipos de gráficas para cada uno de los seis puntos escogidos como datos para la predicción de la red, descritos en la sección 6.3 (ver las figuras 6.5.1 a 6.5.6). En la primera gráfica (a) se presenta la comparación de las formas espectrales obtenidas por el modelo analítico (determinado en la sección 5.3) y por la RNA (algoritmo de predicción), en la segunda gráfica (b) se muestra la comparación de las ordenadas espectrales obtenidas por el modelo analítico y las RNA, observando su grado de aproximación a medida que se acercan a la línea de 45 grados. Por último, en la tercera gráfica (c) se presentan las características estadísticas de las comparaciones presentadas en las gráficas a y b, caracterizándolas por medio de la variación del error absoluto de la diferencia entre la salida de la red y el valor deseado en el espectro de respuesta. En el recuadro de las gráficas c se muestran los errores mínimo, máximo y medio.



a) Comparación de las formas espectrales

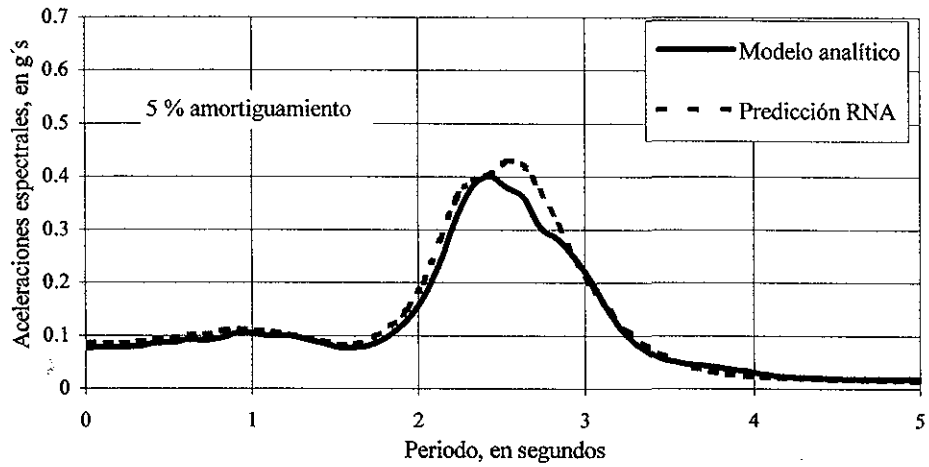


b) Comparación de las ordenadas espectrales

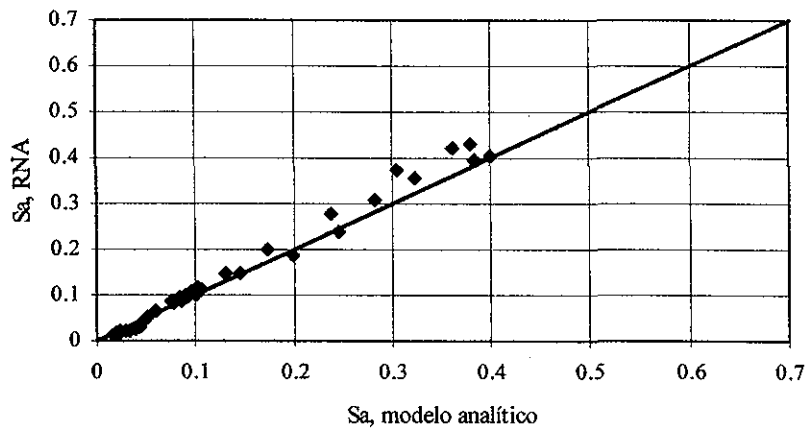


c) Características estadísticas de las comparaciones

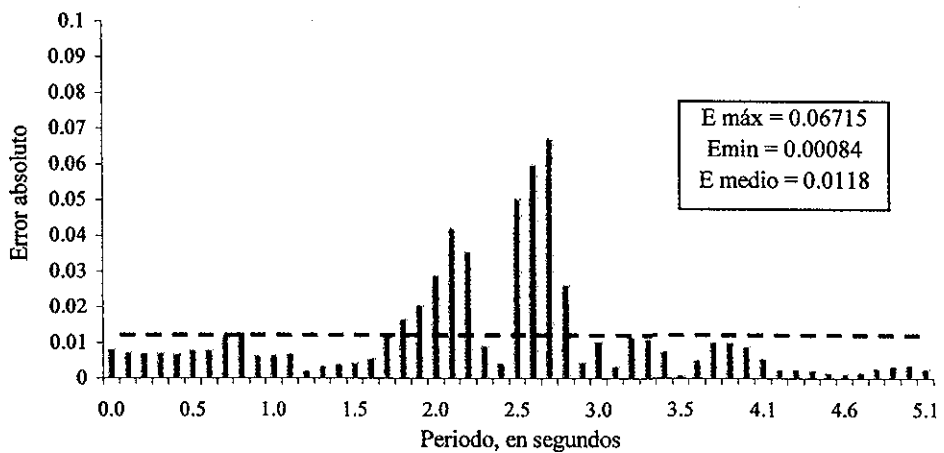
Figura 6.5.1 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p1, sondeo virtual SV5".



a) Comparación de las formas espectrales

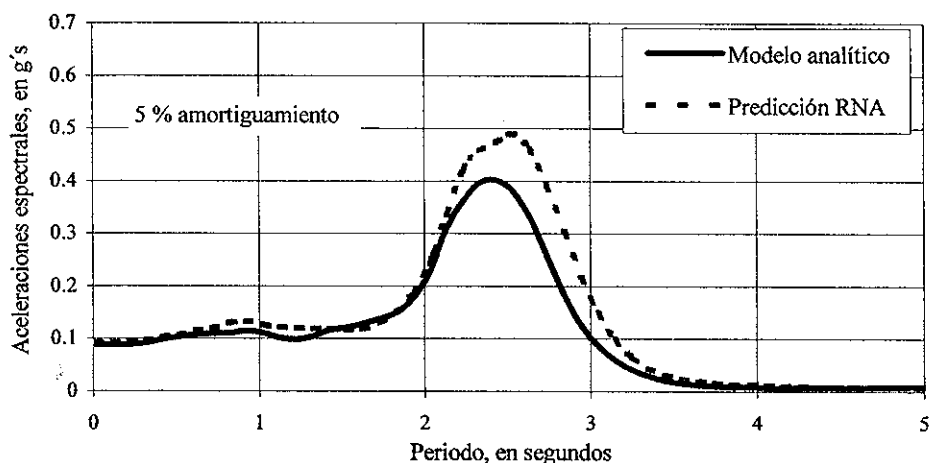


b) Comparación de las ordenadas espectrales

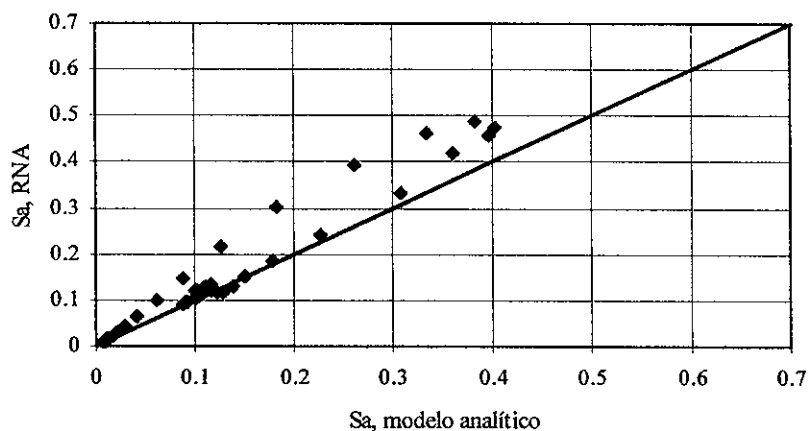


c) Características estadísticas de las comparaciones

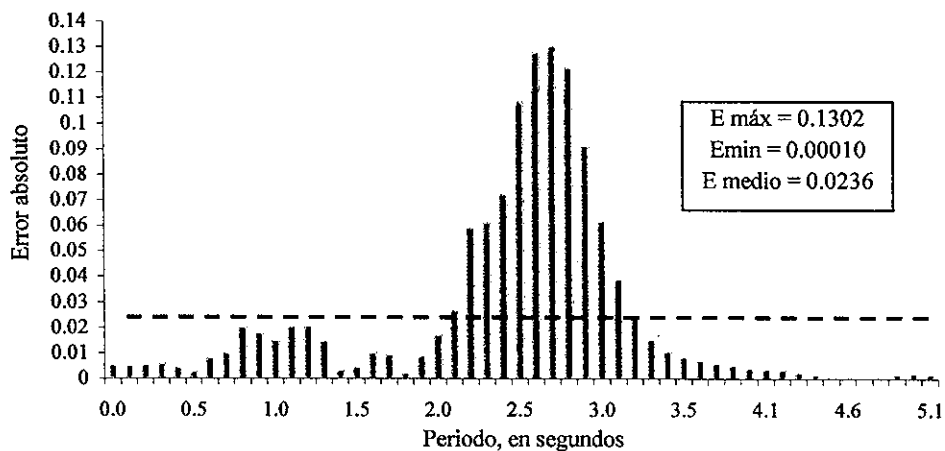
Figura 6.5.2 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p2, sondeo virtual SV6'.



a) Comparación de las formas espectrales



b) Comparación de las ordenadas espectrales

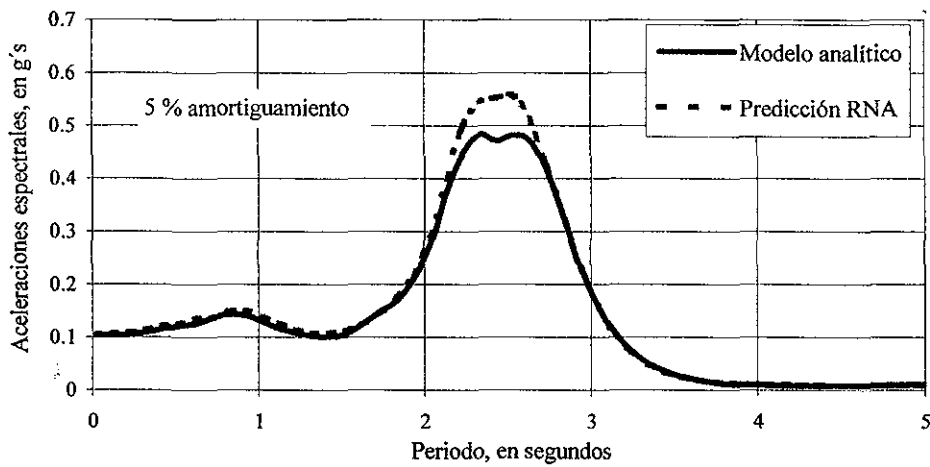


c) Características estadísticas de las comparaciones

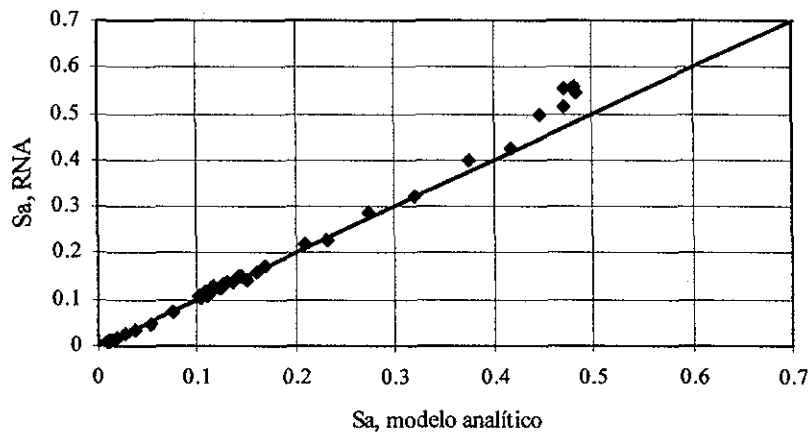
Figura 6.5.3 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p3, sondeo virtual SV4'.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

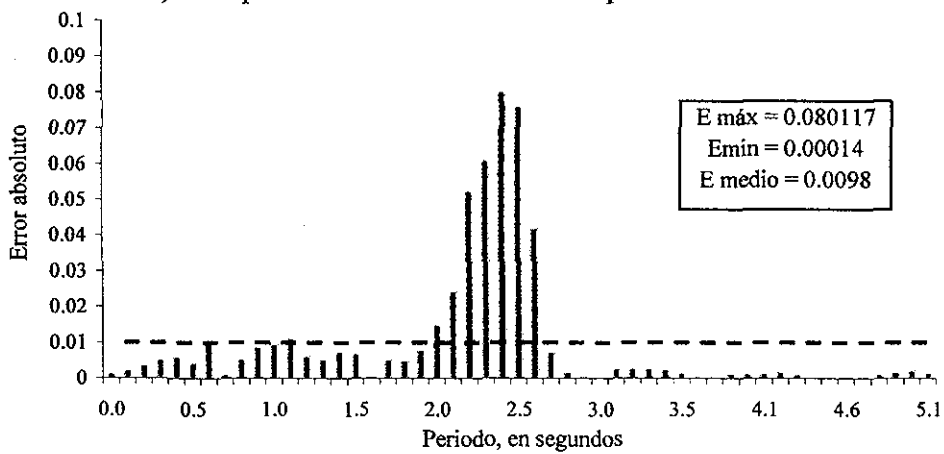
CAP. 6 MODELO DEL MEDIO AMBIENTE SÍSMICO MEDIANTE REDES NEURALES ARTIFICIALES (RNA)



a) Comparación de las formas espectrales

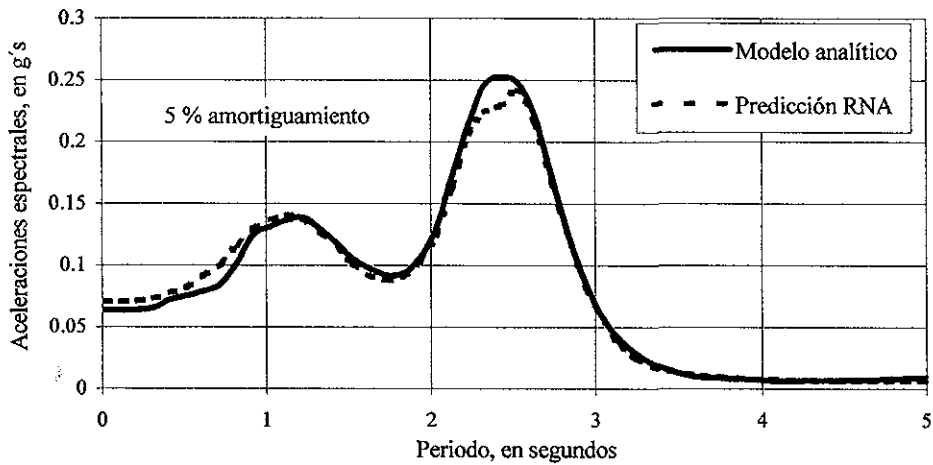


b) Comparación de las ordenadas espectrales

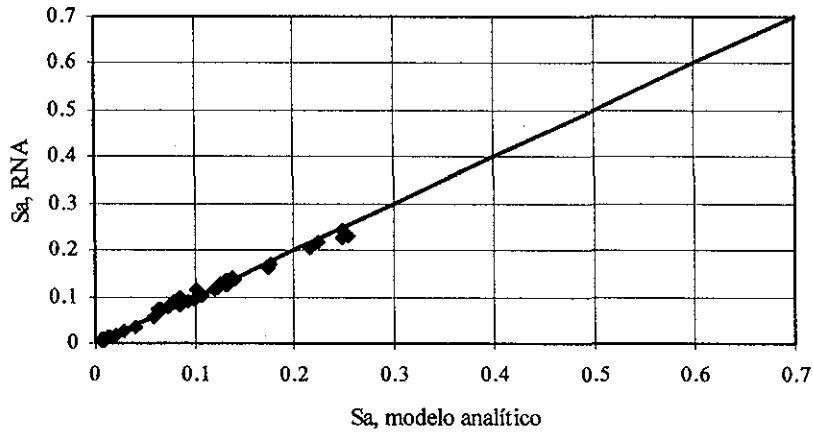


c) Características estadísticas de las comparaciones

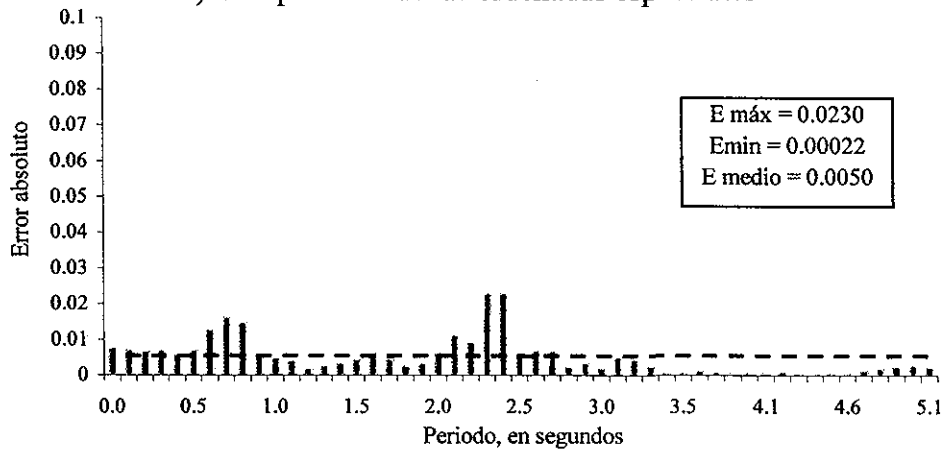
Figura 6.5.4 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p4, sondeo virtual SV11'.



a) Comparación de las formas espectrales

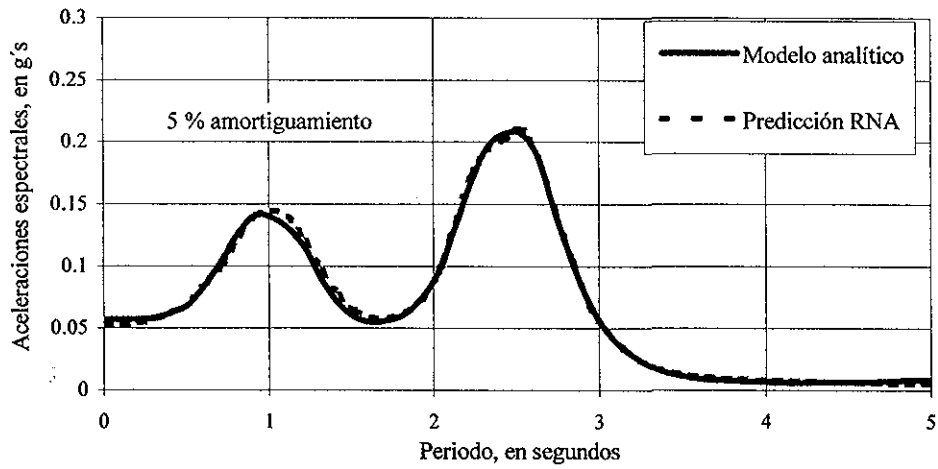


b) Comparación de las ordenadas espectrales

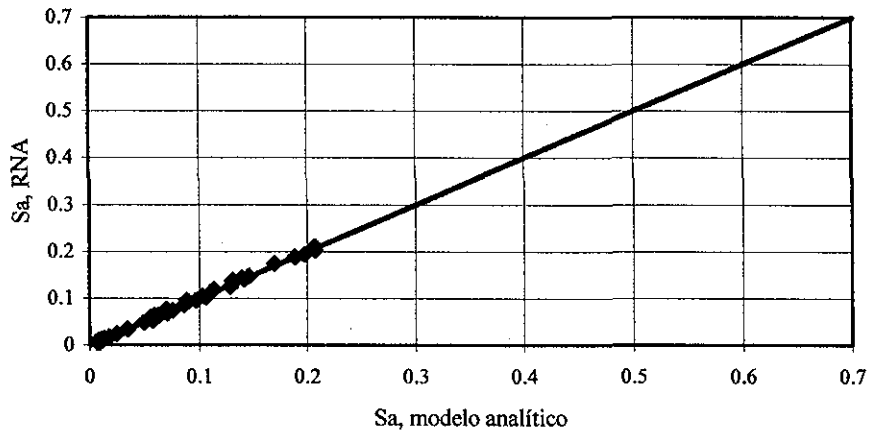


c) Características estadísticas de las comparaciones

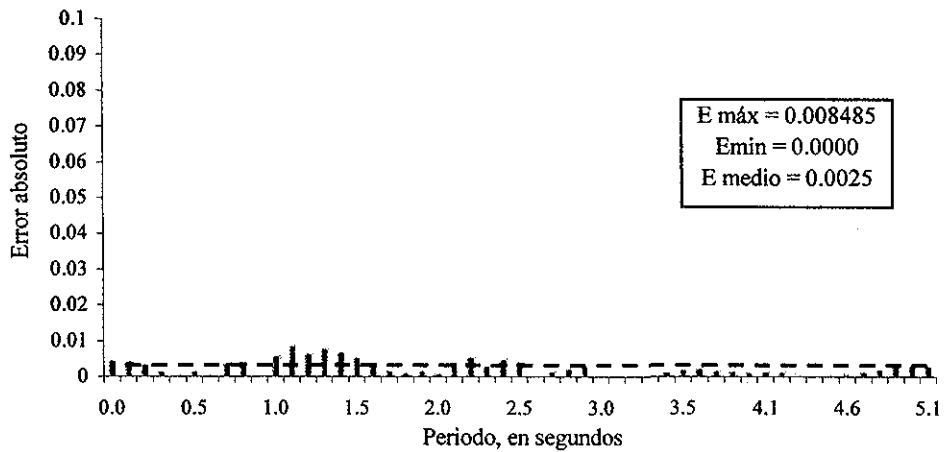
Figura 6.5.5 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p5, sondeo virtual SV23".



a) Comparación de las formas espectrales



b) Comparación de las ordenadas espectrales



c) Características estadísticas de las comparaciones

Figura 6.5.6 Resultados de la predicción sísmica de la RNA en p6, sondeo virtual SV16'.

Luego de evaluar los resultados presentados en las figuras 6.5.1 a 6.5.6, se puede concluir que la red predice con una muy buena aproximación los patrones de las formas espectrales para las dos clases o zonas geotécnicas (obtenidas mediante el modelo analítico). Por tanto, el algoritmo de predicción de la red se puede utilizar para obtener las variaciones espaciales de las aceleraciones espectrales dentro del sitio de estudio, zona del ex-Lago de Texcoco, considerándola como una herramienta complementaria a la presentada en la sección 5.3.

Cerrando el algoritmo de predicción de la red, se puede desarrollar un programa alternativo para crear un ambiente amigable para los usuarios, mediante el cual podrán obtener el espectro de respuesta de campo libre en cualquier ubicación dentro de la zona de estudio, el programa alternativo no está dentro del alcance de la presente tesis, por tanto se recomienda que en un estudio futuro se desarrolle dicho programa. Estos resultados dan mayor soporte a la tendencia de emplear redes neuronales artificiales como un método alternativo de análisis en la ingeniería geotécnica. Debe tenerse siempre presente que la comprensión del fenómeno involucrado en el problema por resolver es de gran importancia para lograr un diseño adecuado de las RNAs.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Del análisis realizado mediante el modelo analítico unidimensional de propagación de ondas de corte, se determinó que el periodo predominante o fundamental de los depósitos de suelo en el sitio de estudio es de 2.43 segundos, obteniendo en éste periodo la máxima respuesta espectral en todo el predio. Adicionalmente, se comprobó la eficacia del modelo analítico mediante la comparación de la aceleración máxima del terreno registrada en el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985, cerca de la zona de estudio, con el valor obtenido mediante el modelo analítico (para la zona suroeste, depósitos predominantemente lacustres) siendo éste del orden de 0.115 g.

Como parte del producto final de este estudio se presentan contornos de isoaceleraciones (media más una desviación estándar) para varios periodos estructurales, los cuales definen la zonificación sísmica del sitio. Además, se muestran curvas de variación espacial y temporal de las ordenadas espectrales (media más una desviación estándar) en la superficie del terreno para las pistas 01I/19D, 01C/19C y 01D/19I, considerando las condiciones locales del sitio ex-Lago de Texcoco, obtenidos mediante un modelo analítico unidimensional de propagación de onda de corte vertical. Adicionalmente, se presentó una metodología para determinar el ambiente sísmico en un sitio, utilizando ecuaciones semi-empíricas para la obtención de las velocidades de onda de corte en cada sondeo y considerando la variabilidad inherente en la determinación de las velocidades. Esta metodología se puede utilizar cuando no se tiene disponibilidad para realizar ensayos de campo para la obtención de las velocidades de onda de corte. Aunque debe aceptarse que los métodos geofísicos también introducen dispersiones en la determinación de parámetros de rigidez.

En forma complementaria al estudio del medio ambiente sísmico evaluado mediante el modelo analítico, se desarrolló mediante la técnica de Redes Neuronales Artificiales (RNA) un algoritmo que permite reproducir la respuesta sísmica espacial en el sitio de estudio. Este algoritmo puede ser utilizado cuando el periodo de la estructura a analizar no está dentro de los periodos incluidos en las figuras de los contornos de isoaceleraciones espectrales. Este permite obtener, en cualquier punto de la zona de estudio, la forma espectral completa.

Estas informaciones (obtenidas del modelo analítico y del algoritmo de la RNA) pueden ser utilizadas directamente para el análisis y diseño sísmico de las estructuras ligeras de la terminal aérea y de las tres pistas incluidas en este trabajo. Para la torre de control, tanques de almacenamiento de combustible y otras estructuras prioritarias se recomienda que los espectros de diseño incluyan el efecto del fenómeno de la interacción dinámica suelo-estructura, el cual no está incluido en este estudio.

De la experiencia obtenida respecto al uso de la RNA, se pueden hacer las siguientes reflexiones:

A pesar de los muchos casos con buen comportamiento, las RNA tienen varios inconvenientes, principalmente, la falta de teoría para ayudar a desarrollarlas, el hecho de que no siempre se garantiza el éxito de determinar o encontrar buenas soluciones, y la limitada habilidad de explicar la forma en que éstas usan la información disponible para arribar a la solución. En consecuencia, existe una necesidad en desarrollar algunas guías, las cuales podrían ayudar en el proceso de diseño de una RNA. Además, existe una necesidad de una mayor investigación para dar una explicación comprensiva de cómo las RNA arriban a las soluciones de los problemas.

Un tema adicional que se necesita darle alguna atención en el desarrollo futuro de las RNA, es el de incorporar las incertidumbres asociadas con los parámetros de la ingeniería geotécnica. A pesar de estas incertidumbres, los modelos de RNA que se han desarrollado hasta la fecha en el campo de la ingeniería geotécnica son esencialmente determinísticos. Por tanto, se necesita incorporar estas incertidumbres en los modelos de RNA, para que éstas puedan generar soluciones más realistas. En general, a pesar de la limitación de las RNA, éstas tienen un número significativo de beneficios, haciéndolas una herramienta poderosa y práctica para resolver muchos problemas en el campo de la ingeniería geotécnica.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Agrawal G, Frost J S and Chameau J L, 1994, "Data analysis and Modeling Using an Artificial Neural Network", Proceedings XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, January, New Delhi, India, Vol. 4, pp 1441-1444

Agrawal, G., Chameau, J. L. y Bourdeau, P. L. (1997), "Assessing the Liquefaction Susceptibility at a Site Based on Information from Penetration Testing", ASCE, Artificial Neural Networks for Civil Engineers: Fundamentals and Applications, eds. Kartan N, Flood I and Garrett Jr J H, pp 185-214

ASTM (1975) "Tentative standard method for deep quasi static cone penetration test". D 3441 – 75T.

ASTM (1977) "Standard method for penetration test and split-barrel sampling of soils". D 1586 – 67.

Auvinet, G. (2001) " Exploración y caracterización de suelos blandos", Curso de Tecnologías para pavimentos sobre suelos blandos, SMMS, Noviembre, México D.F.

Basheer, I. A. y Najjar, Y. M. , (1995), "A Neural-Network for Soil Compaction", Proc. 5th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, Davos, Switerland, ed. Pande G N and Pietruszczak S, Rotterdam, Balkema, pp 435-440

Basheer, I. A., Reddi, L. N. y Najjar, Y. M.(1996), "Site Characetrization by Neuronets - An Application to the Landfill Siting Problem", Ground Water, Vol. 34, No. 4, pp 610-617

Bansal, A., Kanuffman, R.J. y Weitz, R.R. (1993), "Comparing the modeling performance of regression and neural networks as data quality varies: a business value approach", Journal of Management Information Systems, 10 (1), 11 - 32

Bárcena, A. y Romo, M.P. (1994). RADSH: Programa de computadora para analizar depósitos de suelo estratificados horizontalmente sujetos a excitaciones dinámicas aleatorias. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Begeman, H.K.S. (1953) “ Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed between the cone”, Proceedings, Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1.

Begeman, H.K.S. (1963) “ The use of static soil penetrometer in Holland”, New Zealand Engineering, Vol 18, No.2.

Cal, Y.(1995), “Soil Classification by Neural-Network”, Advances in Engineering Software, Vol. 22, No. 2, pp 95-97

CFE (1980), Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección B.2.1, Exploración y Muestreo de Suelos, México D.F.

Chiasson, P., Lafleur, J., Soulie, M. y Law, K.T. (1995), “ Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics”, Canadian Geotechnical Journal, 32, 1- 10.

Chow, Y. K., Chan, W. T., Liu, L. F. y Lee, S. L. (1995), “Prediction of Pile Capacity from Stress-Wave Measurements – A Neural-Network Approach”, Int. Jnl. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 19, No. 2, pp 107-126

De Alba, P.A., Benoit, J., Pass, D.G. y Carter J.J. (1992) “ Low-strain shear modulus from penetrometer tests”, Meeting of the International Committee on Foundation Performance During Earthquakes and its Influence on Building Codes, ISSMFE y SMMS, August 20, Mexico City, pp 1-7.

De Ruiter, J.T. (1972), “ Electric penetrometer for site investigation”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 97, SM2.

Dobry, R y Vucetic, M (1987), “ Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits”, Memorias del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos, SMMS, Vol. 2, pp 49 – 85, México

Esteva L y Ordaz M (1989) Riesgo sísmico y espectros de diseño en la República Mexicana, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM

Fu, L. (1994), *Neural Networks in Computer Intelligence*, Mc Graw-Hill, New York.

García, S.R., Romo, M.P., Figueroa-Nazuno, J. y Ramos, A. (2001) "A RPs Approach for the Modelling of Mexico City Ground Motions", *Proc. of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Published by Elsevier Science Ltd., accepted for publication.

Gardner, M.W. y Dorling, S.R. (1998), "Artificial neural networks (The multilayer perceptron) – A review of applications in the atmospheric sciences." *Atmospheric Environment*, 32 (14/15), 2627 – 2636.

Ghaboussi J, Garret Jr J H and Wu X, 1991, "Knowledge-Based Modeling of Material Behavior with Neural Networks", ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 1, January, pp 132-153

Goh, A. T. C.(1994), "Seismic Liquefaction Potential Assessed by Neural Networks, *Journal of Geotechnical Engineering*", ASCE, Vol. 120, No. 9, pp 1467-1480

Goh, A. T. C., Wong, K. S. y Brons, B. B. (1995), "Estimation of Lateral Wall Movements in Braced Excavations Using Neural Networks", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 6, pp 1059-1064

Gribb, M. M. y Gribb, G. W. (1994), "Use of Neural Networks for Hydraulic Conductivity Determination in Unsaturated Soil", *Proc. 2nd International Conference on Ground Water Ecology*, Atlanta, eds. Stanford J A and Valett H M, Bethesda M D: Amer. Water Resources Assoc., pp 155-163

Haskell, N.A (1953). "The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 43 , pp 17 – 34.

Hecht-Nielsen, R (1990). *Neurocomputing*, Addison- Wesley Publishing Company.

Herrera, I. y Rosenblueth,E. (1965). "Response Spectra on Stratified Soil", *Proceedings, III World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, Vol. I, pp 44 – 60.

Hiriart, F y Graue R (1969). *Proyecto Texcoco*. Libro. El hundimiento de la ciudad de México proyecto Texcoco. Secretaria de Hacienda y Crédito Público, México , pp 149-165.

Hornik, K., Stinchcombe, M. y White, H. (1989) “ Multilayer Feedforward Networks Are Universal Approximators”, *Neural Networks*, 2, 359 – 366.

Idriss, I.M. y Seed, H.B (1968) “ Seismic response of horizontal layers”, *Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 94, 1003 –1031.

Idriss, I.M. (1990). “ Response of soft soil sites during earthquakes,” in J.M. Duncan, ed., *Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Bi Tech Publishers, Vancouver, British Columbia, Vol. 2, pp. 273 – 289.

Juang, C.H., Jiang, T. y Christopher, R.A. (2001). “ Three-dimensional site characterization: neural network approach”, *Géotechnique*, 51, No.9 , 799 –809.

Kanai,K. (1951). “Relation Between the Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motions”. *Bulletin Tokyo Earthquake Research Institute*.

Kramer, S (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, NJ. Pp 115.

Lee, I.-M. y Lee, J.-H. (1996), “Prediction of Pile Bearing Capacity using Artificial Neural Networks”, *Computers and Geotechnics*, 18, 3, pp 189-200

Liao, S.S.C y Whitman, R.V. (1986), “ Overburden correction factors for SPT in sand ”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.112, No.3, pp 373 – 377.

Maren, A., Harston, C y Pap, R. (1990). *Handbook of neuronal computing applications*, Academic Press, Inc., San Diego, California.

Marsal, R.J y Graue , R.L (1969). *El subsuelo del lago de Texcoco* . Libro. El hundimiento de la ciudad de México proyecto Texcoco. Secretaria de Hacienda y Crédito Público, México , pp 167-202.

McCulloch, W.S. y Pitts, W. (1943), "A logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, Bull. Math. Biophysics, 5, 115-133.

Medina, Z. (2001). "Interpretación geoestadística de campañas de reconocimiento del subsuelo", tesis de maestría en Ingeniería, DEPMI, UNAM, México D.F.

Mena, E., Carmona, C., Delgado, R., Alcántara, L y Domínguez, O. (1986), Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985, Parte I: Ciudad de México, Series del Instituto de Ingeniería, No. 497, Julio.

Mendoza, MJ y Prince, J. (1986). "Preliminary report on the earthquake of September 19, 1985, and its effects on structures and foundations in Mexico City", Geotechnical News, Vol. 4, No.1, March.

Mendoza, MJ y Auvinet, G (1987), Comportamiento de Cimentaciones de edificios en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, Enero.

Mendoza, MJ, Ibarra, E, Romo, MP, Vera, XF y Cruz, E (2002), Diseño Geotécnico de la cimentación de la subestación eléctrica Lago de Luz y Fuerza del Centro, Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, febrero.

Millar D L and Clarici E, (1994), "Investigation of Backpropagation Artificial Neural Networks in Modeling the Stress-Strain Behavior of Sandstone Rock", Proc. 1994 IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, N J:IEEE Service Center, pp 3326-3331

NRACC (1975), Canadian manual on foundation engineering, Associate Committee on National Building Codes National Research Council of Canada, Ottawa.

Ohnishi, Y. y Soliman, M. (1995), "Seepage Under Concrete Dam Founded on Rock Formation using Artificial Neural Networks", International Workshop on Rock Foundation, Tokyo, eds. Yoshinaka R and Kikuchi K, Rotterdam, Balkema, pp 355-360

Otha, Y y Goto, N. (1976). "Estimation of S-Wave velocity in terms of Characteristics indices of soil". Butsuri-Tanko (Geophysical exploration; in Japanese), Vol. 29, No 4, pp. 34-41.

Ordaz, M, Montoya, C, Singh, S.K y Pacheco, J. (2000). DEGTRA versión 1.1.2: Programa de computadora para calcular espectros de aceleraciones. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Osborne, M. R. (1976), "Nonlinear Least-Squares: the Levenberg Algorithm Revisited", Journal of the Australian Math. Society, 19, Ser. B, pp 343-357

Ovando, E y Romo, M.P (1991). "Estimación de la velocidad de ondas S en la arcilla de la ciudad de México con ensayos de cono". Revista Sismodinámica, Vol.2, pp.107-123.

Romo, M.P. (1977). "Soil-structure interaction in a random seismic environment", tesis doctoral, University of California, Berkeley

Romo M P., Lysmer, J. y Seed, H.B. (1980). "PLUSH: A computer program for probabilistic finite element analysis of seismic soil-structure interaction", Universidad de California, Report No.EERC 77/01, Berkeley

Romo, M.P. y Jaime, A. (1986), "Características dinámicas de las arcillas del valle de México y análisis de respuesta sísmica del suelo", Proyecto 6504, elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM, pp 65, marzo

Romo, M P y Seed, H B, (1986), "Analytical modeling of dynamic soil response in the Mexico earthquake of September 19, 1985", Proceedings of the ASCE Specialty International Conference on The Mexico Earthquakes-1985, pp 148-162, Sept 19, México.

Romo, M. P., Rangel, J. L., Flores, O. and García, S. R., (1998), "Aplicación de redes neuronales artificiales a la geotecnia", Proc. XIX Reunión nacional de Mecánica de Suelos, Puebla, Pue., México, pp 418-427.

Romo, M.P, (1999). " Earthquake Geotechnical Engineering and Artificial Neural Networks, IV Arthur Casagrande Lecture, XI Panamerican congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguassu, Brazil, Vol. IV.

Romo, M.P, Mendoza,M.J. y García, S. (2000). “ Geotechnical factors in seismic design of foundations, state of arte report”, 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

Romo, M.P, García, S.R, Mendoza, M.J y Taboada, V.M. (2001). “ Recurrent and Constructive - Algorithm Networks For Sand Behavior Modeling.” The International Journal of Geomechanics, Vol.1, No.4, 371- 387.

Romo, M.P., García, S.R, Ovando-Shelley, E. y Rangel, J.L. (2001) “Dynamic Characterization of Mexico City Clay Deposits: A Neuronal Network Approach,” Proc. of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey.

Romo, M.P, Auvinet, G., Ovando, E., Mendoza, M.J, Taboada, V.M., Lermo, J y Mooser, F. (2001) “ Ingeniería geotécnica para el nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México: Soluciones en el ex-Lago de Texcoco y en Zapotlán de Juárez”, Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a Aeropuertos y Servicios Auxiliares, julio.

Sarmiento, N. (2001), “Evaluación de la respuesta sísmica en el Valle de México aplicando redes neuronales artificiales”, tesis de Maestría, DEPMI, UNAM.

Santoyo, E. Y Olivares, A. (1980), Penetrómetro estático para suelos blandos, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 8069.

Santoyo, E (1981), Exploración geotécnica de la zona instrumentada cercana a la Lumbrera No. 6, DGCOH, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 9187.

Seed, H.B e Idriss, I.M. (1969) “The Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE, Vol.94, No. SM1, pp 93 – 137.

Seed, H.B., Murarka,R., Lysmer,J., e Idriss,I.M. (1976). “Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes,” Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 66. No.4, pp. 1323 – 1342.

Seed, H.B, Romo, M.P, Sun, J.I., Jaime, A. y Lysmer, J. (1988) " The Mexico Earthquake of September 19,1985 – Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions". Earthquake Spectra, Vol.4, No 4.

Seed, H.B. y Sun, J. I. (1989), Implications of site effects in the Mexico City earthquake of Sept. 19, 1985 for earthquake-resistant design criteria in the San Francisco Bay area of California, Report No UCB/EERC-89/03, march

Schnabel, P.B, Lysmer, J. y Seed, H.B (1972). SHAKE : A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley. Report No. EERC 72-12.

Singh, S. K. y Ordaz, M. (1990), Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual, Informe CENAPRED, noviembre

Smith, W.H .F y Wessel, P. (1990), " Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension," Geophysics, Vol. 55, No.3, pp 293 – 305.

Soulie, M., Montes, P. y Silvestri, V. (1990). "Modeling spatial variability of soil parameters", Canadian Geotechnical Journal, 27, 617 – 630.

Thomson, W.T. (1950), " Transmission of elastic waves through a stratified solid," Journal of Applied Physics, Vol. 21, pp. 89 – 93.

Vanmarcke E. (1976). "Structural response to earthquakes", Seismic Risk and Engineering Decisions, Lomnitz y Rosenblueth editores, Elsevier Scientific Publising Company, New York.

Walczak, S. y Cerpa, N. (1999) " Heuristic principles for the design of artificial neural networks." Information and Software Technology, Elsevier, No.41, 107 --117.

Wong, F., Tung, A. y Dong,W. (1992). "Seismic hazard prediction using neural nets." Proceedings , 10th World Conference on Earthquake Engineering, 339 – 343.

Wood, H.O. (1908). "Distribution of apparent intensity in San Francisco, in the California earthquake of April 18, 1906," *Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institute of Washington, Washington, D.C., Vol.1, pp 220 – 245.*

Zhou, Y. Y Wu, X. (1994). "Use of neural networks in the analysis and interpretation of site investigation data." *Computer and Geotechnics, 16, 105 – 122.*

Zuñiga , A. (2001). Comunicación personal.

Zurada, J.M. (1992). *Introduction to artificial neural systems, West Publishing, St. Paul.*