



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA DEL
EX LAGO DE TEXCOCO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LUIS OSORIO FLORES

TUTOR PRINCIPAL
DR. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA – FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ROMO ORGANISTA MIGUEL PEDRO

Secretario: DR. OVANDO SHELLEY EFRAÍN

Vocal: DR. MAYORAL VILLA JUAN MANUEL

1^{er.} Suplente: DR. MENDOZA LÓPEZ MANUEL JESÚS

2^{do.} Suplente: DR. RIVERA CONSTANTINO RIGOBERTO

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. MAYORAL VILLA JUAN MANUEL

FIRMA



DEDICATORIA

A mi esposa y a mi familia, por su apoyo incondicional.

A todas aquellas personas que de un modo u otro han participado en esta tesis.





AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería, UNAM, que me brindo todas la facilidades para la realización de este trabajo de tesis, incorporándome como becario.

Agradezco de manera especial, el apoyo brindado para la realización de este trabajo de grado por parte del Dr. Juan Manuel Mayoral Villa.

Al Dr. Miguel Pedro Romo Organista, Dr. Manuel Jesús Mendoza López, Dr. Efraín Ovando Shelley y al Dr. Rigoberto Rivera Constantino por los aportes y comentarios dirigidos a este trabajo.

A todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucrados en este trabajo.





RESUMEN

La determinación de los movimientos de diseño por sismo en una zona donde se planea construir obras de infraestructura de gran importancia, es un tema clave para los ingenieros de la práctica y la academia. En este contexto, no siempre se cuenta con suficiente información de los parámetros que influyen en la respuesta dinámica de los depósitos de suelo, tales como: la velocidad de onda de cortante, los espesores de los estratos y las propiedades dinámicas de los geomateriales encontrados, para definir los movimientos del terreno del área de interés. En este sentido, en este trabajo de investigación doctoral se estableció la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, señalada en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal como no suficientemente investigada, a partir de la determinación del espectro de diseño para la zona estudiada. En particular, esta investigación centra su atención en un área ubicada al Noreste del ex Lago de Texcoco, inscrita en un rectángulo que tiene de largo 15.0 km y de ancho 10 km, instrumentada con cuatro estaciones sismológicas. Para esto es necesario establecer la caracterización geotécnica y geosísmica del área investigada, así como, el ambiente sísmico y la respuesta dinámica de los depósitos de suelo encontrados, que permitan definir el espectro de diseño típico de esta región. Por lo tanto, se llevó a cabo una importante campaña de exploración de campo y laboratorio que posteriormente fue complementada con información de otros proyectos. De los trabajos de exploración de campo se tuvieron 28 pruebas de penetración estándar, SPT, combinadas con muestreo selectivo, 67 sondeos de cono eléctrico, CPT, 4 sondeos de piezocono, PZC, y 4 sondeos de sonda suspendida, SS. Las pruebas de laboratorio que se realizaron para determinar las propiedades índice incluyeron el contenido de agua, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, densidad de sólidos, granulometría y porcentaje de finos. Para la determinación de las propiedades dinámicas se llevaron a cabo ensayos con equipo de columna resonante y triaxial cíclica, con muestras inalteradas para estudiar el comportamiento dinámico de los geomateriales encontrados, a distintos niveles de deformación. Con la información recabada en los trabajos de exploración de campo y laboratorio se definió, de manera general, la secuencia estratigráfica, velocidades de onda de cortante, propiedades mecánicas y propiedades dinámicas de los geomateriales. La información disponible fue complementada con datos obtenidos a partir de técnicas geoestadísticas. En la primera fase



del análisis geoestadístico se determinó la dependencia espacial entre los datos medidos de cada una de las variables estudiadas a través de semivariogramas. En la segunda etapa se realizaron predicciones en sitios del área de estudio para los cuales no se tenía información, usando la técnica kriging, que permitió generar 2501 perfiles estratigráficos virtuales, separados a una distancia de 250 m en ambas direcciones ortogonales horizontales. Por otro lado, se determinó el ambiente sísmico a través de un espectro de peligro uniforme, para el sitio TXCR, San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Edo. Méx., generado a partir de los análisis de peligro sísmico probabilistas realizados para este sitio, para un periodo de retorno de 125 años. Se generaron 61 curvas de peligro sísmico para periodos que van de cero a seis segundos, estableciéndose un rango de magnitudes de eventos de 4.5 a 8.2, las cuales están disponibles en este trabajo para futuras investigaciones. Se realizaron análisis de respuesta de sitio de los que se obtuvieron un total de 2501 espectros de respuesta, que permitieron establecer una propuesta del espectro de diseño para esta región. Asimismo se pudieron comparar diferentes metodologías utilizadas para definir el ambiente sísmico en un sitio, en particular la propuesta a partir de los registros acelerográficos de estaciones sismológicas desplantadas en la zona de estudio, con los análisis de peligro sísmico probabilista, empleadas para definir el espectro de diseño. Finalmente, cubriendo con el objetivo de este trabajo doctoral, se presentan dos mapas modificados de la zonificación sísmica del Distrito Federal (RCDF, 2004) que incluyen la zona IIIe, zona de estudio, en donde el primero muestra una subdivisión del área para la cual se proporcionan tres espectros de diseño, en el segundo se muestra sólo la zona IIIe representado con un espectro de diseño único. Los resultados de esta tesis doctoral serán puestos a consideración para generar una actualización de la zonificación sísmica del Distrito Federal del RCDF.



ÍNDICE

RESUMEN	i
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del área de estudio	5
1.3. Motivación de la investigación	7
1.4. Objetivo	7
1.5. Organización de la investigación	9
2. TRABAJOS PRELIMINARES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA NORESTE DEL EX LAGO DE TEXCOCO	11
2.1. Descripción del área de estudio	11
2.2. Investigación del subsuelo	13
2.2.1. Trabajos de campo	13
2.2.2. Trabajos de laboratorio	15
2.2.2.1. Curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante dinámico normalizadas y amortiguamiento	16
2.3. Estimación de los perfiles de velocidades de onda de cortante	19
2.3.1. Arcillas y limos	19
2.3.2. Arenas	20
2.4. Ambiente sísmico	20
2.5. Perfiles idealizados del subsuelo	23
2.6. Análisis de respuesta de sitio	24
2.6.1. Análisis probabilístico con RADSH	24
2.7. Conclusiones	29
3. DETERMINACIÓN GEOESTADÍSTICA DE PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA RESPUESTA DE SITIO	31



3.1. Antecedentes	31
3.2. Información disponible	33
3.2.1. Línea derivación Lago 1 de 400 kV (Ovando <i>et al.</i> , 2006)	33
3.2.2. Subestación eléctrica Lago 1 (Mayoral <i>et al.</i> , 2006)	35
3.2.3. Línea de 230 kV Lago 1-Madero (Mendoza <i>et al.</i> , 2006)	36
3.2.4. Proyecto del nuevo aeropuerto de la ciudad de México (Romo <i>et al.</i> , 2001)	37
3.3. Generación de perfiles virtuales	43
3.3.1. Ubicación de perfiles virtuales	43
3.3.2. Marco teórico	45
3.3.2.1. Variograma y Semivariograma	45
3.3.2.2. Modelos teóricos de semivarianza	46
3.3.2.3. Kriging	48
3.3.3. Indicadores estadísticos	50
3.3.3.1. Distribución de probabilidades de la variación espacial de los espesores de los estratos de los perfiles estratigráficos	50
3.3.3.2. Distribución de probabilidades de la variación espacial de la velocidad de onda de cortante	51
3.3.3.3. Distribución de probabilidades de la variación espacial del índice de plasticidad	52
3.3.4. Perfiles estratigráficos virtuales	53
3.3.5. Perfiles de velocidad de onda de cortante virtuales	53
3.3.6. Curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento	66
3.3.6.1. Modelo de Darendeli y Stokoe (2001)	66
3.3.7. Perfiles de índice de plasticidad virtuales	73
3.4. Validación del modelo geoestadístico	74
3.5. Conclusiones	82
4. AMBIENTE SÍSMICO	83
4.1. Determinación de espectros de peligro uniforme	84



4.2. Determinación de curvas de peligro sísmico	85
4.2.1. Definición de las fuentes sismogénicas que influyen en el comportamiento dinámico del área de estudio	88
4.2.2. Modelos de recurrencia de sismos	88
4.2.3. Leyes de atenuación	94
4.2.3.1. Validación de la ley de atenuación	95
4.2.4. Resolución de la integral de riesgo sísmico	99
4.3. Curvas de peligro sísmico probabilista para el sitio TXCR	102
4.4. Espectro de peligro uniforme para el sitio TXCR	105
4.5. Conclusiones	107
5. RESPUESTA DE SITIO Y DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO	109
5.1. Análisis de respuesta de sitio	111
5.2. Análisis de respuesta de sitio de los puntos virtuales	114
5.3. Espectro de diseño propuesto para la zona Noreste del ex Lago de Texcoco	117
5.4. Evaluación puntual del espectro de diseño propuesto (único)	121
5.5. Conclusiones	125
6. CONCLUSIONES	127
6.1. Líneas de investigación futuras	131
REFERENCIAS	133
ANEXO A	145





1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Desde hace varias décadas, se han realizado importantes investigaciones en el valle de México tratando de caracterizar: 1) la sismicidad de la región (ej. Rosenblueth, 1987; Esteva y Ordaz, 1989; Singh y Ordaz, 1994; Pérez-Rocha, Sánchez- Sesma, Singh y Reinoso, 2000), 2) la respuesta de sitio (ej. Romo, 1976; Romo y Jaime, 1986; Seed y Sun, 1989; Rosenblueth y Ovando, 1991; Lermo y Chávez-García, 1994, Romo 1995), y 3) las propiedades dinámicas de los suelos (ej. Marsal y Mazari, 1959; Zeevaert, 1973; Rascón, 1964; Reséndiz *et al.*, 1967; León *et al.*, 1974; Romo y Jaime, 1986; Ovando y Romo, 1991; Romo, 1995; Mayoral *et al.*, 2006, Mayoral *et al.*, 2008a). En este contexto se han realizado algunas campañas de exploración del subsuelo con el fin de estudiar las condiciones geodinámicas prevalecientes en la ciudad de México. En la actualidad se encuentran adecuadamente caracterizadas las zonas donde ocurrieron los daños más severos a causa del sismo de 1985. A pesar de la abundante información reunida de los depósitos de arcilla encontrados en la zona centro de la ciudad de México, el área circunvecina, como el ex lago de Texcoco, todavía permanece insuficientemente explorada y en consecuencia las condiciones geotécnicas y geosísmicas del suelo no están disponibles para diseños ingenieriles. Los trabajos más recientes sobre este tema, se presentan en Mayoral *et al.*, 2008a y Mayoral *et al.*, 2008b.

En particular el ambiente sísmico de un sitio de interés se puede determinar bajo dos enfoques (Gupta, 2002): 1) El análisis de peligro sísmico determinista y 2) El análisis de peligro sísmico probabilista. La diferencia fundamental entre ellos estriba en la forma de considerar la sismicidad del área de influencia. Por otro lado, los resultados de los análisis deterministas son más conservadores que los probabilistas (Klügel, 2008).



En el método determinista se establecen los sismos más grandes posibles de cada fuente y se calcula el movimiento que generaría cada uno en el sitio de estudio. Sin tomar en cuenta los tiempos de recurrencia, se selecciona la magnitud y ubicación del evento o eventos considerados representativos del riesgo sísmico, para una zona determinada, que generalmente corresponde al máximo histórico. En función de éste se establecen correlaciones y modelos espectrales para calcular los espectros específicos de respuesta. Este método permite reagrupar las fuentes sísmicas en diferentes rangos de distancia y calcular un espectro para el movimiento de cada distancia a la fuente. Este tipo de evaluación se caracteriza por presentar escenarios sísmicos específicos, en donde la incertidumbre no se incluye en el análisis final. Esta clase de evaluaciones se realiza generalmente en cuatro etapas (Reiter, 1990):

- 1) Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, en las cuales se determina el potencial sísmico de las fallas,
- 2) Selección de una distancia de la fuente al sitio, asumiendo una magnitud y la distancia de ruptura más próxima,
- 3) Combinación de los sismos de control, que proporcionen la mayor respuesta o excitación en el sitio de estudio,
- 4) Definición del escenario sísmico más desfavorable a través de un espectro de respuesta de diseño, y
- 5) Generación de historias sintéticas cuyo contenido de frecuencias y amplitudes espectrales coincidan con el espectro de diseño, con duración variable para análisis en el dominio del tiempo.

El método probabilista (Esteva, 1967; Cornell, 1968), permite obtener probabilidades anuales de excedencia para el parámetro del movimiento del terreno que se considera representativo del riesgo sísmico. En las primeras etapas de desarrollo del método, el parámetro de referencia era la aceleración máxima del terreno, PGA. Con el desarrollo de leyes de atenuación para parámetros espectrales fue posible la construcción de espectros de diseño en los que se considera la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los periodos de interés en ingeniería sísmica. De este modo surgen los espectros de peligro uniforme (UHS, Uniform Hazard Spectra), que se construyen



representando “punto a punto” las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo período de retorno (ej. Trifunac *et al.*, 1987). Uno de sus inconvenientes es el de no proporcionar directamente un sismo de diseño, para lo cual se han propuesto métodos de desagregación del peligro sísmico probabilista (ej. McGuire, 1995; Klügel, 2008). En general, los pasos que se siguen en un análisis de peligro sísmico probabilista (ej. Cornell, 1968; McGuire, 1995; Klügel, 2008) son:

- 1) Definición de las fuentes sismogénicas (en función de las bases de datos de las variables geológicas y sismológicas, y de modelos sismo-tectónicos),
- 2) Definición del modelo de sismicidad por el cual se establezca la relación entre la frecuencia de ocurrencia de sismos y su magnitud,
- 3) Definición del parámetro del movimiento a estudiar (aceleración espectral, velocidad espectral, medida de intensidad),
- 4) Desarrollo de un modelo de atenuación del movimiento del suelo (empírico, fenomenológico o una combinación de ambos) para cada una de las fuentes o la asunción de un modelo para una región,
- 5) Cálculo del espectro de peligro uniforme (UHS) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno),
- 6) Cálculo de la desagregación del peligro sísmico probabilista, para identificar los escenarios sísmicos que contribuyen significativamente al peligro sísmico del sitio en función de sus magnitudes y distancias de la fuente sísmica,
- 7) Generación de diferentes movimientos de suelo para los escenarios sísmicos en términos de magnitudes y distancias, y comparar sus espectros de respuesta con el espectro de peligro uniforme.

En ambos métodos, la cuantificación del peligro sísmico presenta varias limitaciones, tales como: 1) gran parte de la información geológica y tectónica es interpretativa y se emplea para caracterizar mecanismos no muy bien conocidos; 2) los modelos de sismicidad, propagación y atenuación son simplificaciones de un fenómeno mucho más complejo; 3) las tasas de deslizamiento de las fallas y los tiempos de recurrencia tienen una gran incertidumbre; 4) los catálogos sísmicos cubren periodos relativamente cortos de



sismicidad; y 5) algunas de las variables involucradas en el proceso son poco conocidas, por lo que presentan grandes incertidumbres.

En la Tabla 1.1 se resumen los métodos de análisis de peligro sísmico recomendados según su aplicación (Klügel, 2008).

Tabla 1.1. Método recomendado de análisis de peligro sísmico según su aplicación

Aplicación	Objetivo del análisis	Método recomendado
Diseño	Infraestructura crítica cuya vida útil sea corta	Análisis de peligro sísmico determinista, para sitios específicos
	Infraestructura crítica cuya vida útil sea larga	Análisis de peligro sísmico probabilista o determinista, para sitios específicos
	Estructuras civiles en general	Análisis de peligro sísmico determinista
Evaluación de seguros de riesgo	Estructuras civiles en general e instalaciones industriales	Análisis de peligro sísmico probabilista
Riesgo técnico	Infraestructura crítica	Análisis de peligro sísmico probabilista

En general, las desventajas del método probabilista tienen su origen en el uso incorrecto de los modelos, información limitada sobre las fuentes sísmicas, y el poco entendimiento de los conceptos modernos de análisis de riesgo, resultado de la falta de capacidad del manejo correcto de los parámetros físicos y sus incertidumbres, dando resultados poco congruentes con la realidad.

En el departamento de geotecnia, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, I de I, en donde se desarrolló esta investigación doctoral, se ha utilizado en varios trabajos una metodología alternativa para determinar el ambiente sísmico de un sitio específico de estudio para fines de diseño, la cual consiste en tomar los registros acelerográficos de estaciones sismológicas desplantadas en roca y generar una forma espectral normalizada que contenga movimientos del terreno de mayor importancia que se han presentado en el sitio estudiado, para después escalarla. La normalización y el escalamiento se hacen tomando como factor a la



aceleración máxima del terreno. De esta forma la variabilidad de las características de las ondas sísmicas debido a la trayectoria de propagación que se sigue de la fuente a un sitio particular en roca, se puede tomar en cuenta si se usan historias de aceleraciones registradas en estaciones sismológicas cercanas al sitio estudiado. El espectro de respuesta normalizado con respecto a la máxima aceleración del terreno elimina el factor de intensidad del movimiento registrado en el sitio en roca para diversos eventos. Usando el espectro obtenido como un espectro de referencia se obtienen acelerogramas sintéticos, mediante un ajuste espectral en el dominio del tiempo, los cuales permiten definir el ambiente sísmico de un sitio en particular, a través de las historias de aceleraciones generadas para sismos de diferente duración. A partir de la metodología anteriormente descrita se establecieron dos variantes, en la primera solo se cuenta con registros acelerográficos de estaciones sismológicas ubicadas en suelo, con base en un espectro de referencia definido a partir de la sismicidad histórica, se obtienen historias de aceleraciones sintéticas en la superficie del depósito de suelo estudiado, para que finalmente a través de un proceso de deconvolución, las historias de tiempo de la superficie se lleven a la roca, definiendo con esta última el movimiento de diseño. En la segunda variante, se toma el espectro diseño del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004), generalmente el de la zona I, como espectro de referencia para generar las historias de aceleraciones sintéticas. Esta metodología se ha usado en diferentes proyectos en los cuales ha mostrado buenos resultados y su capacidad para definir el ambiente sísmico de un sitio en particular (ej. Mayoral *et al.* 2006; Mayoral *et al.*, 2009; Romo *et al.*, 2009; Mayoral *et al.*, 2011; Romo *et al.*, 2012).

Sobre estos conceptos fue estructurado el trabajo de investigación aquí presentado.

1.2. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicado al Noreste del ex Lago de Texcoco, inscrita en un rectángulo que tiene de largo 15.0 km y de ancho 10.0 km, cuenta con una superficie de 150 km². Esta zona está instrumentada con cuatro estaciones sismológicas, Texcoco Sosa (TXSO), Texcoco Sitio 1 (TXS1), Texcoco Sitio 2 (TXS2) y Texcoco Chimalhuacán (TXCH), de las cuales se tiene registros acelerográficos. Tomando como referencia al



Aeropuerto Internacional de la ciudad de México, la estación más cercano (sitio TXCH) se localiza aproximadamente a 10.0 km al Este, mientras que la estación más alejado (sitio TXSO) se encuentra a 16.5 km al Noreste, como se puede ver en la Figura 1.1.

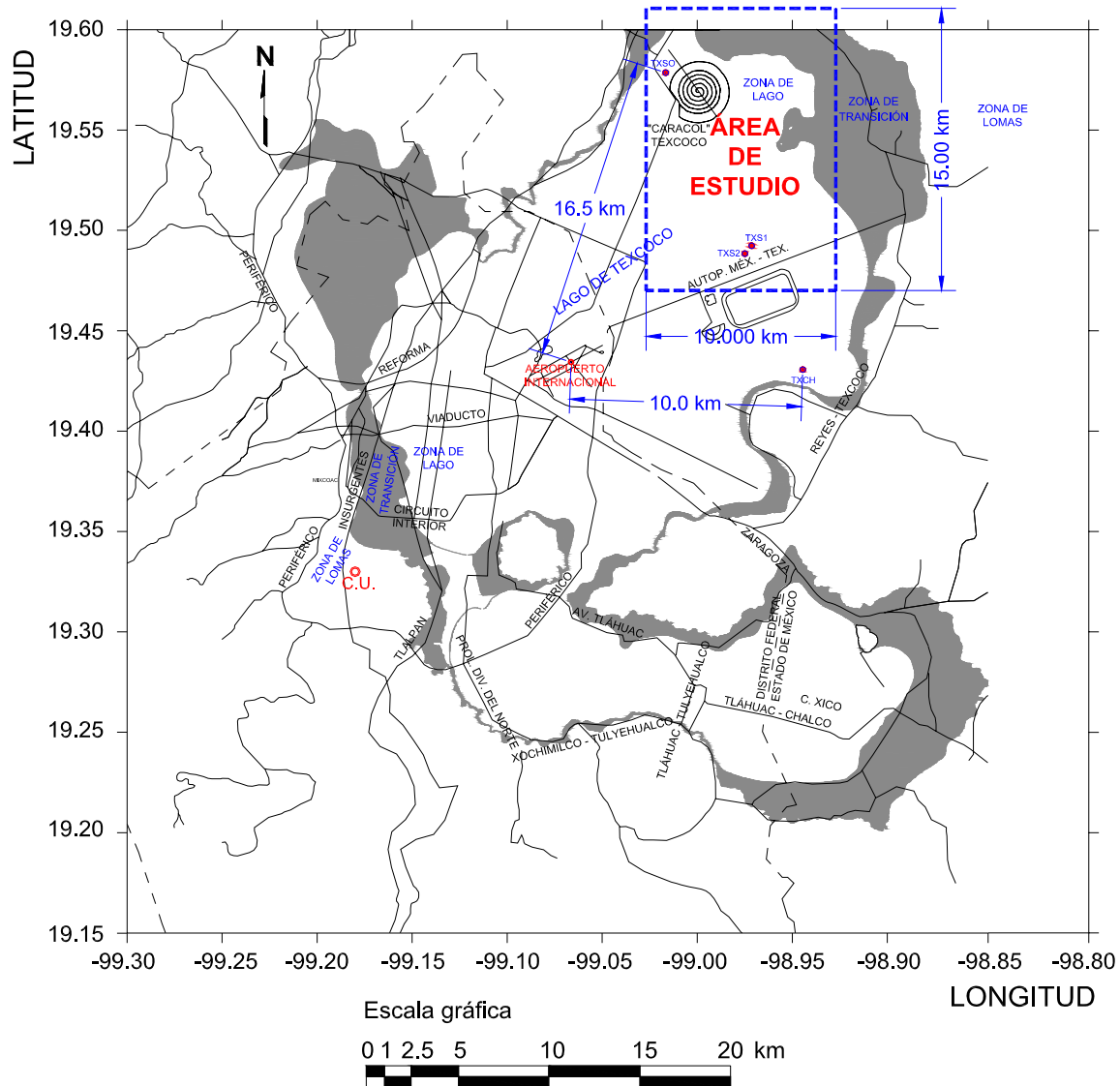


Figura 1.1. Localización del área estudiada

Exploraciones previas han demostrado que en esta zona comúnmente el perfil estratigráfico se compone de una costra desecada de arcilla en la parte superior, que se extiende hasta una profundidad media de 1.0 m, por debajo de ésta se encuentra un estrato de arcilla blanda de alrededor de 25.0 m de espesor, fase arcillosa superior, FAS, con numerosas intercalaciones de lentes de limo arenoso, arcilla arenosa y arena limosa. El contenido de



agua de este geomaterial oscila entre 190 a 295 %, y el índice de plasticidad fluctúa entre 139 y 265 %. Subyaciendo a la arcilla se tiene una capa de 4.0 m de espesor en promedio de limo arenoso muy denso ($(N_1)_{60} > 65$, $(N_1)_{60}$, es el número de golpes para la prueba SPT corregido por energía y efecto del esfuerzo efectivo vertical), combinado con cenizas volcánicas, primera capa dura, PCD, la cual descansan en un estrato de arcilla firme ($(N_1)_{60}$ de 9 aproximadamente) que llega hasta una profundidad de 60 m, fase arcillosa inferior, FAI. El contenido de agua de este estrato va del 100 al 112 % y el índice de plasticidad de 59 a 106 % aproximadamente. Por debajo de esta elevación se encuentra un estrato limo arenoso muy denso ($(N_1)_{60}$ superior a 100), depósitos profundos, DP. En este contexto se debe destacar que la FAS presenta una importante variación en su espesor, observándose espesores de 6.0 m aproximadamente en la parte Norte del ex Lago de Texcoco, en tanto que en la parte Sur se pueden encontrar espesores de hasta 37.0 m aproximadamente.

1.3. Motivación de la investigación

La zona Noreste del ex Lago de Texcoco presenta en la actualidad un crecimiento poblacional importante que requiere de la infraestructura que satisfaga sus necesidades cotidianas, tales como puentes, hospitales, estaciones eléctricas, edificios, escuelas, etc., siendo preocupante este crecimiento ya que en esta zona no se cuenta con un espectro de diseño (RCDF, 2004), Figura 1.2, que les permita a los ingenieros de la práctica desarrollar sus proyectos. En este sentido, los beneficios de una apropiada zonificación sísmica, redundará en diseños funcionales, seguros y económicos, en pro de prevenir daños como los causados por el sismo de 1985 en la ciudad de México. En este trabajo de investigación se propone un espectro de diseño, con base en los resultados aquí obtenidos, para el área estudiada que cuenta con una superficie de 150 km², el cual está soportado con trabajos de exploración de campo y laboratorio, así como, del uso de herramientas probabilísticas, geoestadísticas y analíticas, que permitieron estudiar el comportamiento del suelo sometido a cargas dinámicas.

1.4. Objetivo

El objetivo de este trabajo de investigación doctoral es definir la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, señalada en el Reglamento de Construcciones



para el Distrito Federal (RCDF, 2004) como no suficientemente investigada (Figura 1.2), a partir de la determinación del espectro de diseño para la zona estudiada. Para esto es necesario establecer la caracterización geotécnica y geosísmica del área investigada, así como, el ambiente sísmico y la respuesta dinámica de los depósitos de suelo encontrados, que permitan definir el espectro de diseño típico de esta región.

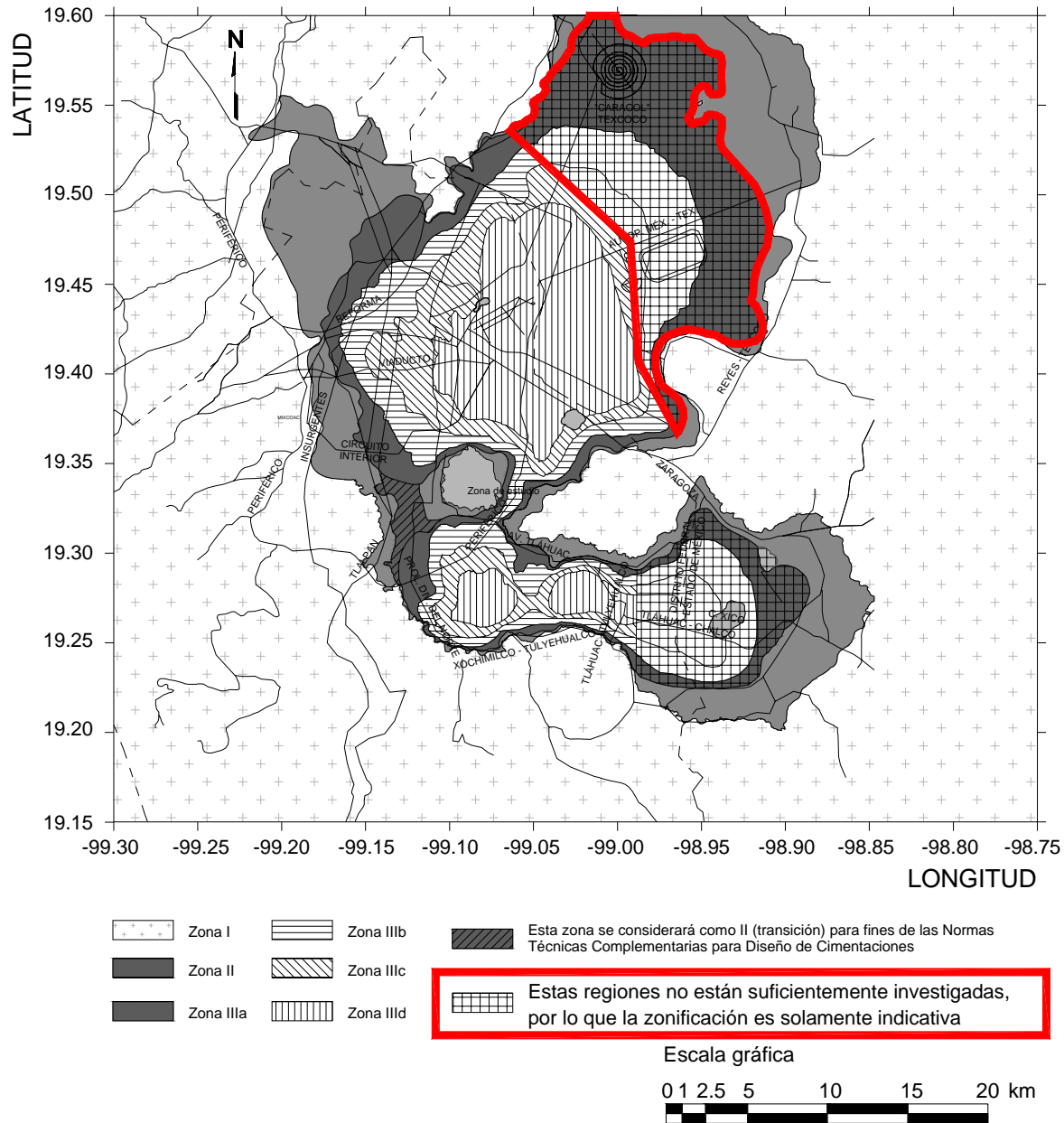


Figura 1.2. Zonificación del DF para fines de diseño por sismo (RCDF, 2004)



1.5. Organización de la investigación

Este trabajo de investigación está enfocado en la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco y se ha organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes, la motivación de la investigación, los objetivos, y la organización de este trabajo.

En el Capítulo 2 se presentan los trabajos preliminares que se llevaron a cabo para caracterizar geotécnica y geosísmica de la zona de interés, en una primera etapa, poniendo especial atención en los sitios en donde se localizan las estaciones sísmológica Texcoco Sosa (TXSO), Texcoco Sitio 1(TXS1), Texcoco Sitio 2 (TXS2) y Texcoco Chimalhuacán (TXCH), estableciéndose los primeros tres sitios estudiados como puntos de control para las siguientes etapas.

En el Capítulo 3 se generan 2501 perfiles virtuales estratigráficos, de velocidad de onda de cortante y de índice de plasticidad, con base en la información disponible y técnicas geostatísticas. Además se determinaron las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento a partir del índice de plasticidad. Estableciéndose la distribución espacial de estos parámetros en una superficie de 150 km².

En el Capítulo 4 se define el ambiente sísmico del área estudiada a partir del espectro de peligro uniforme para el sitio TXCR, ubicado en la zona de influencia de la zona de interés. El espectro de peligro uniforme se determinó a partir las curvas de peligro sísmico, derivadas de un análisis de peligro sísmico probabilista, y se compara con el obtenido con el método propuesto por el I de I.

En el Capítulo 5 se presenta el espectro de diseño, con el cual queda completamente caracterizado los movimientos del terreno de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, generado a partir de los resultados obtenidos de 2501 análisis de respuesta de sitio.



Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones alcanzadas en este trabajo de investigación doctoral, así como las recomendaciones para futuras investigaciones.



2. TRABAJOS PRELIMINARES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA NORESTE DEL EX LAGO DE TEXCOCO

Para caracterizar las condiciones geotécnicas y geosísmicas prevalecientes en la zona de estudio, de manera preliminar, se llevó a cabo una importante campaña de exploración, poniéndose particular interés en la caracterización de los materiales encontrados en el subsuelo, en donde se ubican las estaciones acelerográficas Texcoco Sosa (TXSO), Texcoco Sitio 1 (TXS1), Texcoco Sitio 2 (TXS2) y Texcoco Chimalhuacán (TXCH), localizadas en la zona de estudio, que cuentan con registros acelerométricos de gran valía para este proyecto. La definición del ambiente sísmico con base en la sismicidad histórica (Mayoral *et. al.*, 2008), permitió realizar análisis de respuesta dinámica en los cuatro sitios antes mencionados. La caracterización geotécnica y geosísmica prevaleciente en estos sitios, permitieron establecerlos como puntos de control para las siguientes etapas.

Cabe hacer mención que en esta primera etapa, solo se presenta los resultados obtenidos a partir de la información derivada de la investigación de campo y de laboratorio de cuatro sitios en particular, en el capítulo 3 se presenta información adicional, a la aquí mostrada, que permitió estimar los parámetros en los lugares no explorados empleando técnicas geoestadísticas.

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada al Noreste del ex Lago de Texcoco, en una región instrumentada con cuatro estaciones sismológicas, tres de las cuales están dentro de la zona de interés (TXSO, TXS1 y TXS2), como se puede observar en la Figura 2.1. La ubicación en coordenadas geográficas y UTM de los vértices del área estudia y de las estaciones sismológicas se presenta en la Tabla 2.1.

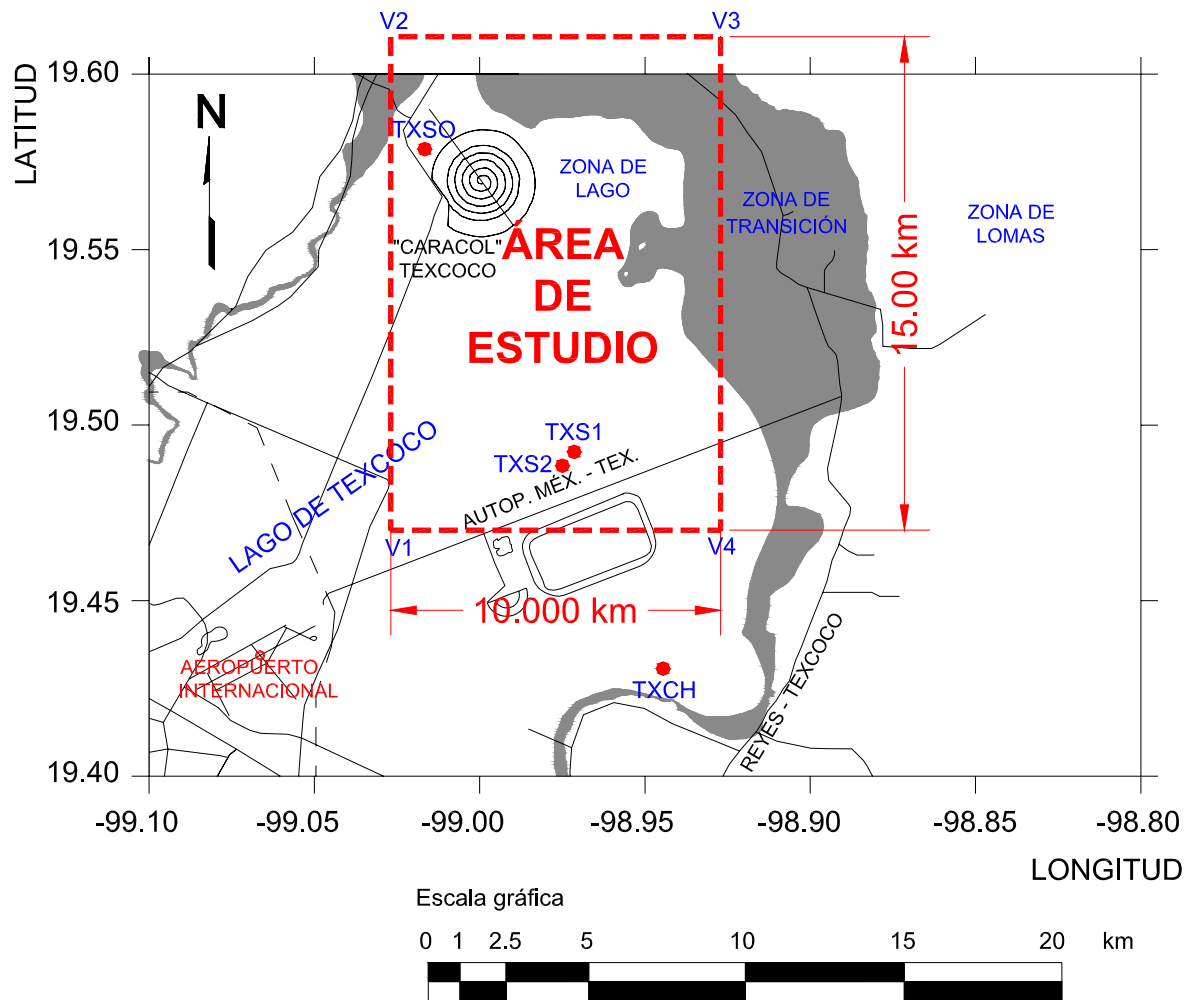


Figura 2.1. Localización del área estudiada



Tabla 2.1. Ubicación geográfica de los sitios explorados y vértices que configuran el área de estudio

Sitio	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	X	Y	Latitud	Longitud
TXSO	498035.7898	2164895.3380	19.57900	-99.01872
TXS1	502686.3378	2155489.8570	19.49400	-98.97440
TXS2	502683.0012	2155067.7120	19.49019	-98.97443
TXCH	505253.4481	2148537.5403	19.43117	-98.94995
V1	497000.0000	2153550.0000	19.47647	-99.02858
V2	497000.0000	2168550.0000	19.61203	-99.02858
V3	507000.0000	2168550.0000	19.61203	-98.93324
V4	507000.0000	2153550.0000	19.47647	-98.93324

2.2. Investigación del subsuelo

Para este proyecto en particular se realizó una investigación exhaustiva de campo y de laboratorio para definir la estratigrafía del subsuelo, condiciones hidráulicas y propiedades índice, así como, el comportamiento esfuerzo-deformación ante carga monotónica y cíclica (Mayoral *et al.*, 2008b). Prestando especial interés en los trabajos relacionados con el comportamiento dinámico de los geomateriales encontrados en los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH.

2.2.1. Trabajos de campo

Como parte de los trabajos de campo, se ejecutó un sondeo de penetración de cono eléctrico, CPT, un sondeo de penetración estándar, SPT, y muestreo selectivo, en cada uno de los sitios que corresponden a la ubicación de las estaciones acelerográficas (Figura 2.2) Texcoco Sosa (TXSO), Texcoco Sitio 1 (TXS1), Texcoco Sitio 2 (TXS2) y Texcoco Chimalhuacán (TXCH), hasta alcanzar una profundidad donde se presentó un cambio importante de impedancia. La definición de esta interfaz es de gran importancia para establecer el inicio del semiespacio elástico. Además, se realizaron sondeos de piezocono en las estaciones TXSO y TXCH. De los estudios de campo, se obtuvieron las características del subsuelo tales como la estratigrafía, consistencia y compacidad de los materiales, velocidad de onda de cortante y condiciones hidráulicas. Así mismo, se



extrajeran muestras alteradas e inalteradas, para determinar las propiedades índice y propiedades dinámicas de los geomateriales de los depósitos de suelos encontrados en los sitios de estudio. En la Figura 2.2 se presenta un plano de localización de los sondeos realizados, así como las profundidades que alcanzaron cada uno de ellos. En la Tabla 2.1 se muestran las coordenadas geográficas de los sitios explorados.

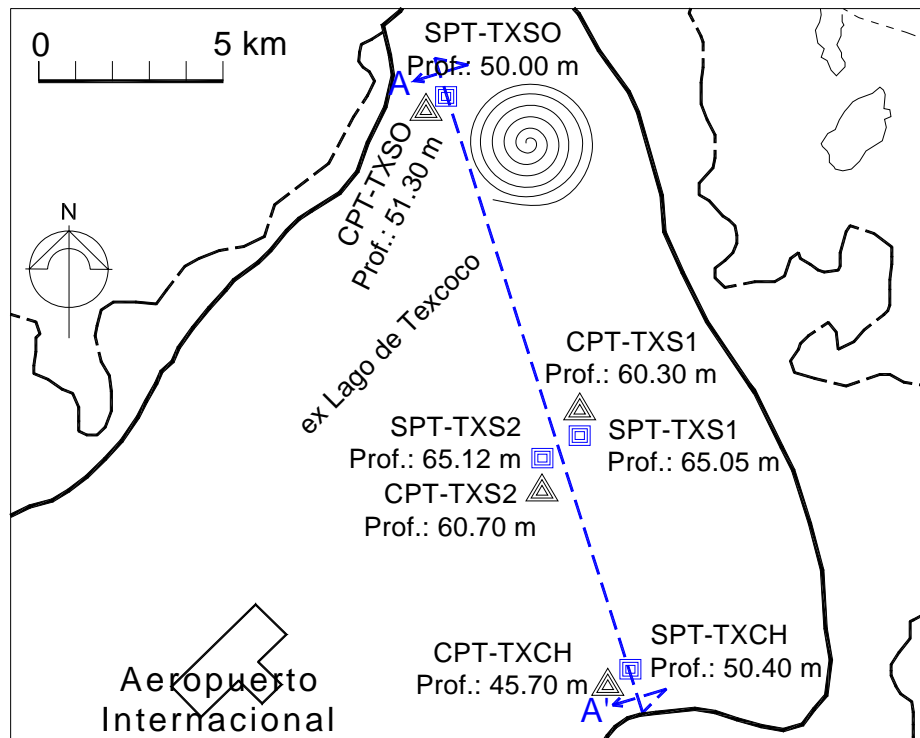


Figura 2.2. Ubicación de los sondeos de exploración del subsuelo

En la Figura 2.3 se presenta un corte estratigráfico que permite visualizar la tendencia que guardan los estratos de los depósitos de suelo presentes en esta región, en ésta se observa que la variación de la pendiente no es significativa. La consideración de una estratigrafía horizontal permitirá hacer simplificaciones en los análisis de respuesta de sitio realizados para este trabajo. La ubicación del corte presentado en la Figura 2.3 está indicada en la Figura 2.2.

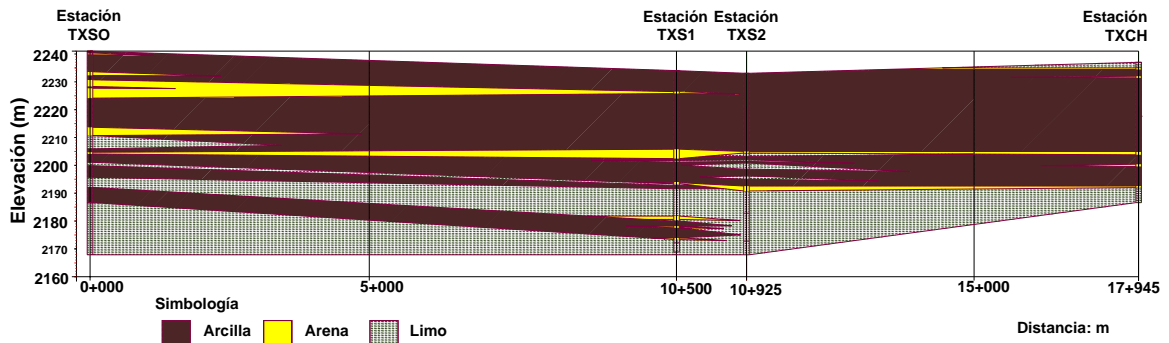


Figura 2.3. Corte esquemático (A-A') de la estratigrafía de la zona en estudio

2.2.2. Trabajos de laboratorio

Durante la exploración se recuperaron 18 muestras alteradas y 366 inalteradas, que fueron llevadas al laboratorio para determinar sus propiedades índice, estáticas y dinámicas. Las pruebas que se realizaron para determinar las propiedades índice incluyen el contenido de agua, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, densidad de sólidos, granulometría y porcentaje de finos. Para determinar los parámetros de resistencia del suelo en estudio (c, ϕ), se llevó a cabo una serie de pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas, UU, en muestras recuperadas de los sondeos selectivos a distintas profundidades para tres esfuerzos de confinamiento (σ_c) diferentes, definidos de acuerdo al estado de esfuerzos *in-situ*. Los resultados de los trabajos de laboratorio y de campo se pueden ver en Mayoral *et al.*, 2008b. Por otro lado, se llevaron a cabo ensayos con equipo de columna resonante y triaxial cíclica, con muestras inalteradas para estudiar el comportamiento dinámico de los geomateriales encontrados, a distintos niveles de deformación. En la Tabla 2.2 se muestran las propiedades índice de los materiales ensayados, en tanto que en la Tabla 2.3 se resume el programa de ensayos.



Tabla 2.2. Propiedades índice de las muestras ensayadas en columna resonante y triaxial cíclica

Sitio	Muestra	Profundidad [m]	w (%)	w _L (%)	w _p (%)	PI (%)	G _s	I _r	SUCS
SOSA	M-1	2.4-2.6	331	368	159	210	2.45	0.18	MH
SOSA	M-9	5.6-5.8	311	306	156	150	2.74	-0.03	MH
TXS1	M-7	4.8-5.0	370	284	90	194	2.65	-0.44	CH
TXS1	M-1	17.4-17.6	275	311	107	204	2.78	0.17	OH
TXS1	M-2	25.6-25.8	303	360	71	288	2.82	0.2	CH
TXS1	M-3	34.2-34.4	280	243	108	135	2.53	-0.27	MH
TXS1	M-6	51.8-52.0	139	173	122	51	2.4	0.66	MH
TXS2	M-7	4.2-4.4	308	302	75	226	2.7	-0.03	CH
TXS2	M-15	9.2-9.4	399	326	125	201	2.51	-0.37	MH
TXS2	M-40	25.8-26.0	280	310	81	229	2.82	0.13	CH

w, contenido de agua; w_L, límite líquido; w_p, límite plástico; PI, índice de plasticidad; G_s, densidad de sólidos; I_r, índice de consistencia relativa.

Tabla 2.3. Tipo de pruebas y nivel de esfuerzos aplicados en cada muestra

Sitio	Descripción de la muestra	Tipo de ensaye	σ' _c (Kg/cm ²)		
			0.30	0.50	0.75
SOSA	SOSA-SM1-M1-2.40 a 2.60	CR, TC	0.30	0.50	0.75
SOSA	SOSA-SM1-M9-5.60 a 5.80	CR, TC	0.68	1.03	1.37
TXS1	TXS1-SM2-M7-4.80 a 5.00	CR, TC	0.45	0.68	0.90
TXS1	TXS1-SS1-M1-17.40 a 17.60	CR, TC	0.70	1.05	1.72
TXS1	TXS1-SS1-M2-25.60 a 25.80	CR, TC	0.86	1.29	1.72
TXS1	TXS1-SS1-M3-34.20 a 34.40	CR, TC	1.03	1.55	2.07
TXS1	TXS1-SS1-M6-51.80 a 52.00	CR, TC	1.39	2.08	2.77
TXS2	TXS2-SM1-M7-4.20 a 4.40	CR, TC	0.10	0.50	0.75
TXS2	TXS2-SM1-M15-9.20 a 9.40	CR, TC	0.24	0.50	0.75
TXS2	TXS2-SM1-M40-25.80 a 26.00	CR, TC	0.54	0.81	1.10

CR, columna resonante; TC, triaxial cíclica; σ'_c, esfuerzos de confinamiento

2.2.2.1. Curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante dinámico normalizadas y amortiguamiento

Con los resultados obtenidos de las pruebas de columna resonante y triaxial cíclica, se generaron las curvas de degradación normalizadas y amortiguamiento para las arcillas encontradas en la zona estudiada (Figura 2.4). Los resultados experimentales se ajustaron con un modelo tipo Masing, el cual es capaz de tomar en cuenta las no-linealidades del suelo asociadas a los niveles de deformación angular generados durante un sismo (Romo, 1990; Flores y Romo, 2001), y que están definidas a través de las siguientes expresiones:



$$G = (G_{\min} - G_{\max})H(\gamma) + G_{\max} \quad (2.1)$$

$$\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})H(\gamma) + \lambda_{\min} \quad (2.2)$$

$$H(\gamma) = \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{2B}} \right]^{A'} \quad (2.3)$$

$$A' = I_r + A \quad (2.4)$$

$$I_r = \frac{w_L - w}{PI} \quad (2.5)$$

donde:

G_{\max} , es la rigidez a pequeñas deformaciones angulares (10^{-4} %),

G_{\min} , es la rigidez para grandes deformaciones (cerca de la falla),

λ_{\min} , es el valor de la relación de amortiguamiento para pequeñas deformaciones angulares (10^{-4} %),

λ_{\max} , es el valor para grandes deformaciones (cerca de la falla),

$H(\gamma)$, es una función de la deformación angular,

A y B , son parámetros del suelo que definen la geometría de la curva $G-\gamma$, y son función del índice de plasticidad del suelo,

γ_r , es un valor fijo de referencia de la deformación al cortante correspondiente al 50 % de la degradación del módulo de rigidez al cortante,

I_r , es la consistencia relativa, la cual puede ser expresada en términos del índice de liquidez,

L_i , como, $I_r = I - L_i$

w_L , w y PI , son el límite líquido, contenido de agua e índice de plasticidad del suelo, respectivamente.

En la Figura 2.4 se muestra una comparación entre los datos experimentales y las curvas estimadas en función del PI e I_r . Se observa que el parámetro PI tiene una influencia significativa en el módulo de cortante y en menor grado en la relación de amortiguamiento,



comportamiento que se había observado en otras investigaciones (Vucetic y Dobry, 1991; Sun *et al.*, 1988; Romo *et al.*, 1989).

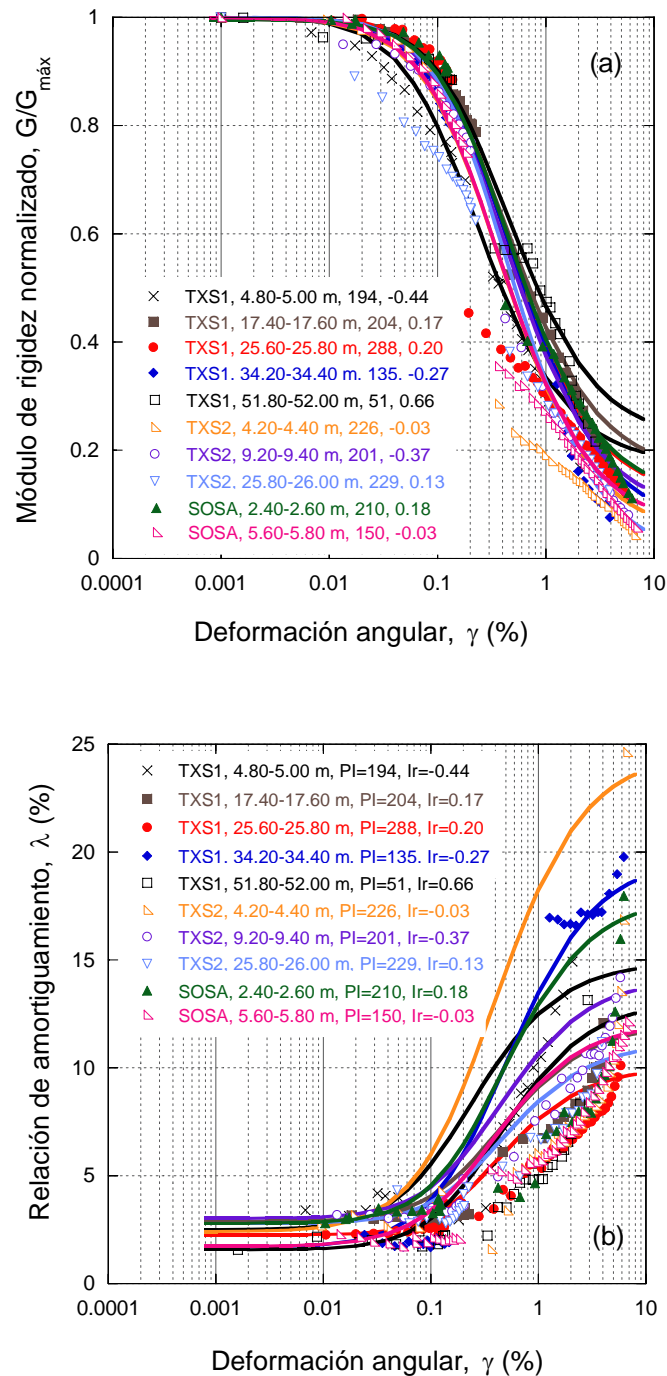


Figura 2.4. Curvas de degradación del módulo (a) y amortiguamiento (b) para arcillas, estimadas (líneas) y medidas (marcadores)



En este sentido, la evidencia experimental sugiere claramente que el rango de comportamiento lineal de estos materiales se incrementa con PI . El parámetro I_r influye principalmente en la rigidez del suelo a pequeñas deformaciones, $G_{m\acute{a}x}$, pero también puede afectar en la geometría de las curvas a través del parámetro A . Como puede verse en la Figura 2.4, hay una buena correspondencia entre el comportamiento estimado y el experimental.

2.3. Estimación de los perfiles de velocidades de onda de cortante

2.3.1. Arcillas y limos

La velocidad de onda de cortante para arcillas y limos se estimó usando la expresión propuesta por Ovando y Romo (1991) en términos de la resistencia a la penetración de punta, q_c , medida en ensaye de cono (CPT).

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh} \gamma_s}} \quad (2.6)$$

Donde:

V_s = Velocidad de onda de corte, m/s,

q_c = Resistencia de punta obtenida de la prueba de cono eléctrico (CPT), t/m^2 ,

γ_s = Peso volumétrico de la muestra, t/m^3 , y

N_{kh} y η son parámetros que dependen del tipo de suelo, los cuales se determinaron para las condiciones particulares del sitio.

Esta expresión se calibró apropiadamente, obteniéndose valores de N_{kh} y η para las condiciones del suelo prevalecientes en la zona, los cuales se presentan en la Tabla 2.4.



Tabla 2.4. Valores de N_{kh} y η

Tipo de suelo	Valores para N_{kh}			η
	Máx.	Prom.	Mín.	
Arcillas del Lago de Texcoco	14	9.5	6.7	23.33
Arenas limosas de la capa dura en el Valle de México	16	11.1	8	40
Arcilla (área de estudio)		7.70		37.5

2.3.2. Arenas

La velocidad de onda de corte para arenas se estimó usando la expresión empírica propuesta por Seed *et al.* (1983), cuya aplicación proporcionó el valor más cercano a los valores medidos.

$$V_s = \alpha N^\beta \quad (2.7)$$

donde:

V_s , es la velocidad de onda de corte, en m/s

N , es el número de golpes de la prueba de penetración estándar corregido por energía y sobrecarga

$$\alpha = 61; \beta = 0.5$$

Ambas expresiones empíricas se usaron para obtener los perfiles de velocidad de onda de corte que se presentan en la Figura 2.5, para cada sitio estudiado.

2.4. Ambiente sísmico

Los movimientos que definen el ambiente sísmico en esta región se tomaron del trabajo de investigación de Mayoral *et al.*, (2008a). Las historias de aceleraciones y sus correspondientes espectros de respuesta se presentan en las Figuras 2.6 y 2.7, éstos se obtuvieron de un proceso de deconvolución a la profundidad de análisis de los depósitos estudiados. Cabe hacer notar que, estos movimientos corresponden a historias de aceleraciones y espectros de respuesta sintéticos, obtenidos mediante un ajuste espectral, realizado en el dominio del tiempo. Para los análisis realizados en este trabajo se tomó la historia de aceleraciones denominada Sintético 3, así como su respectivo espectro de



respuesta, ya que ésta es la de mayor duración y podrá ser usada para evaluar los efectos de fatiga en las estructuras.

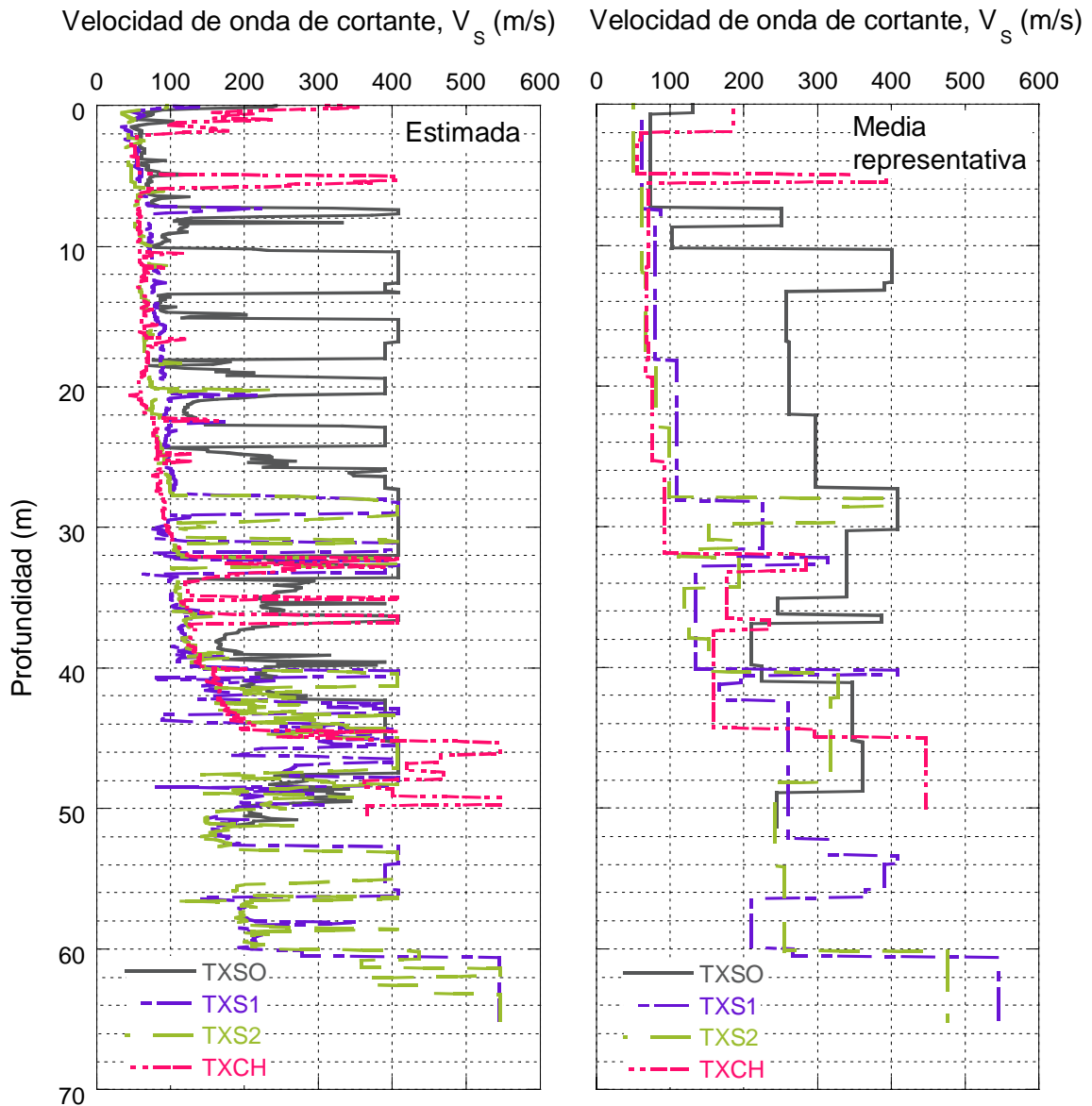


Figura 2.5. Perfiles de velocidad de onda de cortante estimada y media representativa correspondientes a los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH

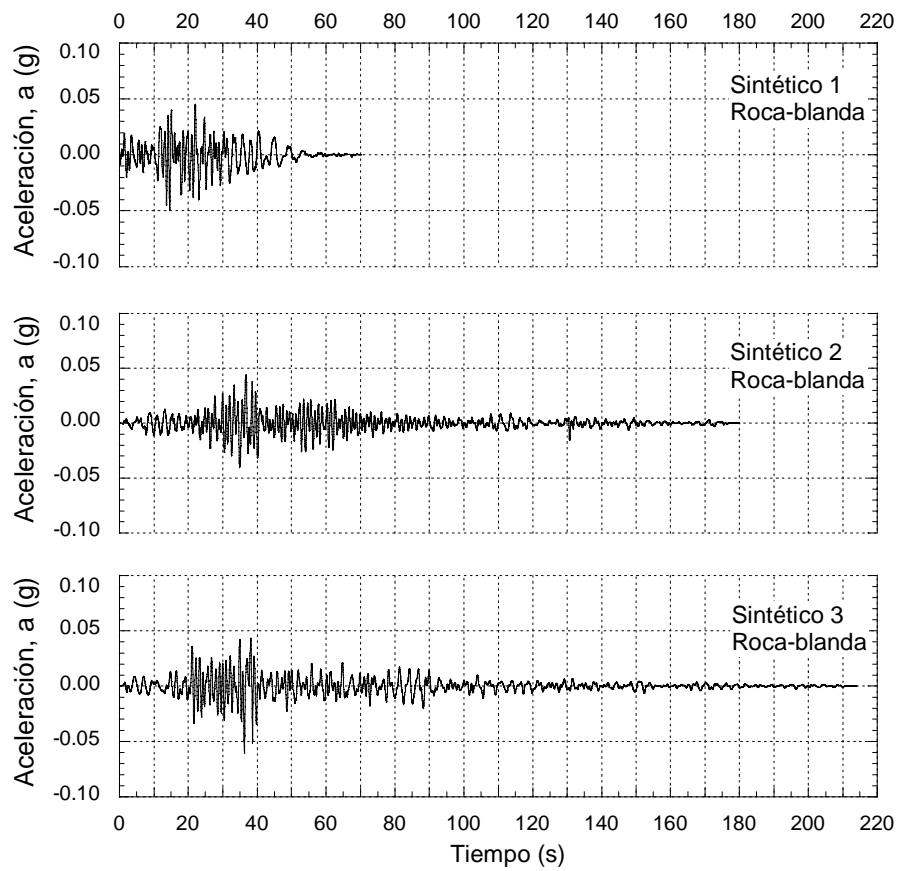


Figura 2.6. Historia de aceleraciones en roca blanda

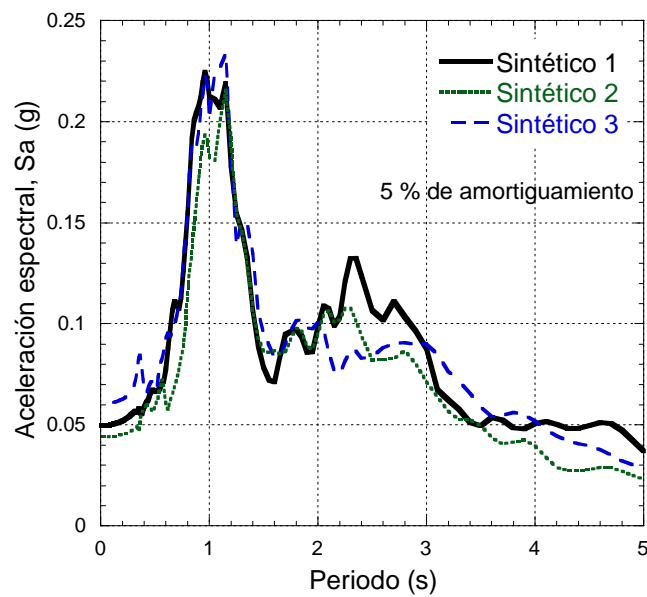


Figura 2.7. Espectro de respuesta de la aceleración en roca blanda

2.5. Perfiles idealizados del subsuelo

Con la información geotécnica recopilada de la zona de interés fue posible construir cuatro perfiles idealizados que permitieron identificar la secuencia estratigráfica de los depósitos de suelo encontrados en el área en estudio, Figura 2.8. Como se puede observar en los sitios explorados los depósitos de suelo se caracterizan por potentes estratos de arcillas con intercalaciones de lentes de limos y arenas. Estos depósitos muestran una estratigrafía casi horizontal, lo que permitió hacer simplificaciones razonables en los análisis de respuesta dinámica, y poder usar herramientas analíticas unidimensionales para llevar a cabo el análisis de propagación de ondas.

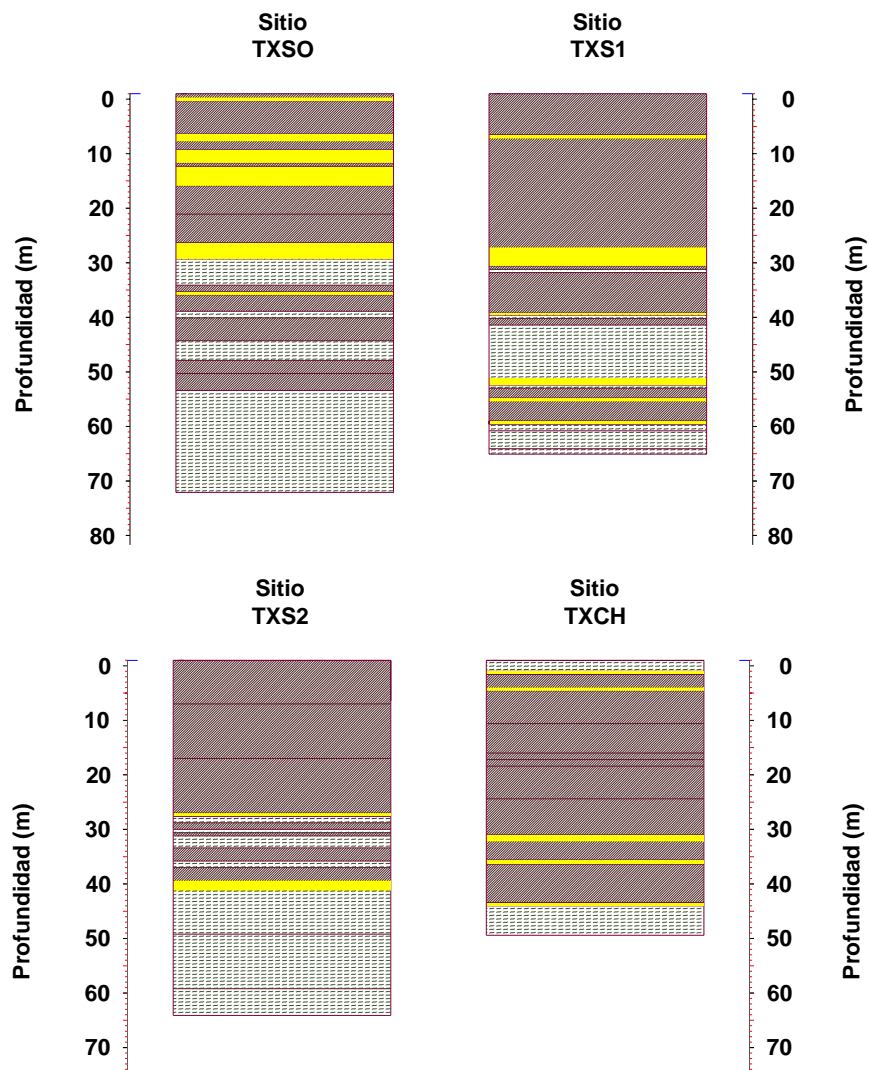


Figura 2.8. Perfiles estratigráficos idealizados de los depósitos de suelo que se usaron para los análisis



2.6. Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio es fundamental en el diseño sísmico de una estructura (ej. Seed *et al.*, 1975), el problema es encontrar la respuesta de un perfil geológico a una carga cíclica dada. La excitación sísmica se define con un “movimiento de entrada” (usualmente una historia de aceleraciones) que se aplica a un perfil estratigráfico en una posición definida, resolviendo el problema de propagación de ondas, se puede calcular el movimiento en otro punto del perfil. El análisis de respuesta dinámica de un depósito de suelo puede clasificarse como determinista o probabilista, siendo un ejemplo del primero, los análisis de respuesta de sitio realizados con el programa SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972), y del segundo, los realizados con el programa RADSH (Bárcena y Romo, 1994). En este contexto, se ha observado que la respuesta calculada por un procedimiento determinista es significativamente dependiente de la historia de aceleraciones usada, mientras que un análisis con enfoque probabilista considera los movimientos sísmicos como fenómenos aleatorios, suponiéndolos como un proceso gaussiano con media cero, con lo que el fenómeno aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia; físicamente, tal definición del ambiente sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas (Romo, 1976). En este trabajo, empleando el programa RADSH se llevaron a cabo los análisis de respuesta dinámica de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH.

2.6.1. Análisis probabilístico con RADSH

Para tomar en cuenta la variabilidad potencial en las propiedades del subsuelo se consideró que para sitios cercanos a esta zona (Santoyo, 1981), se pueden tener variaciones en los valores de q_c (resistencia a la penetración de punta del cono) del orden de $\pm 25\%$, mientras que las magnitudes de N (número de golpes para la prueba de penetración estándar) pueden variar entre $\pm 30\%$ y $\pm 40\%$ (De Alba *et al.*, 1992). Cabe hacer notar que las propiedades mecánicas y dinámicas, así como su distribución espacial, se empezaron a estudiar de manera formal a partir de los años cincuentas y con más intensidad en los sesenta (Marsal y Mazari, 1959; Marsal y Graue, 1969; Reséndiz y Zonana, 1969; Santoyo, 1969). Con base



en estos antecedentes, se propuso para este estudio un rango de variación de la distribución de la velocidad de onda de cortante, tomando la media más y menos el 30 %, como valores máximos y mínimos respectivamente. Una vez definido el rango de variación de la velocidad de onda de cortante, se realizaron 25 análisis de respuesta de sitio para cada uno de los puntos estudiados, haciendo variar aleatoriamente el perfil de velocidades de onda de cortante del depósito de suelo, para tomar en cuenta la variabilidad de ésta en campo. Los resultados de estos análisis se presentan en función de espectros de respuesta en la superficie, generados para cada uno de los 25 análisis de los sitios estudiados. En las Figuras 2.9 a 2.12 se muestran los resultados de estos análisis, así como la media, media más una desviación estándar, $media+1\sigma$, y media menos una desviación estándar, $media-1\sigma$.

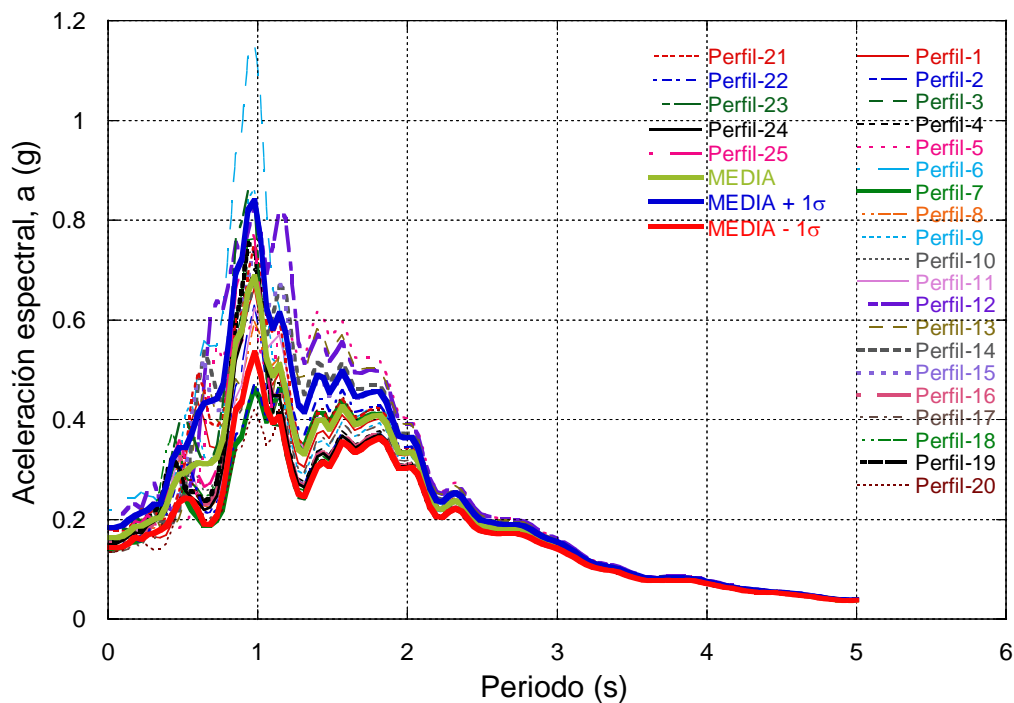


Figura 2.9. Espectros de respuesta obtenidos de estratigrafías aleatorias para el sitio TXSO

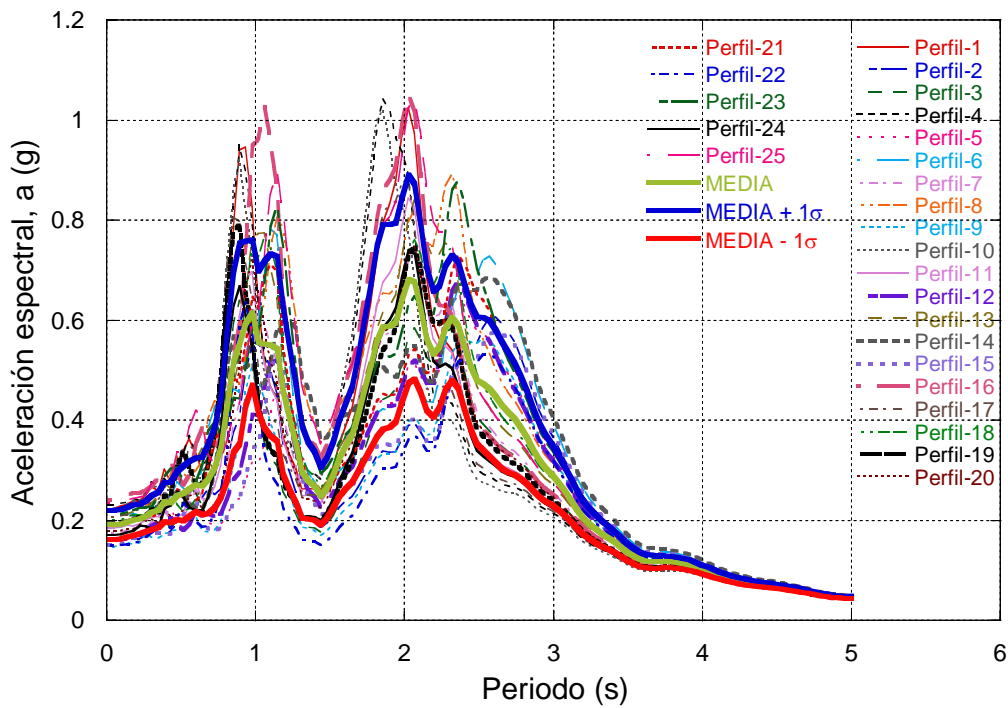


Figura 2.10. Espectros de respuesta obtenidos de estratigrafías aleatorias para el sitio TXS1

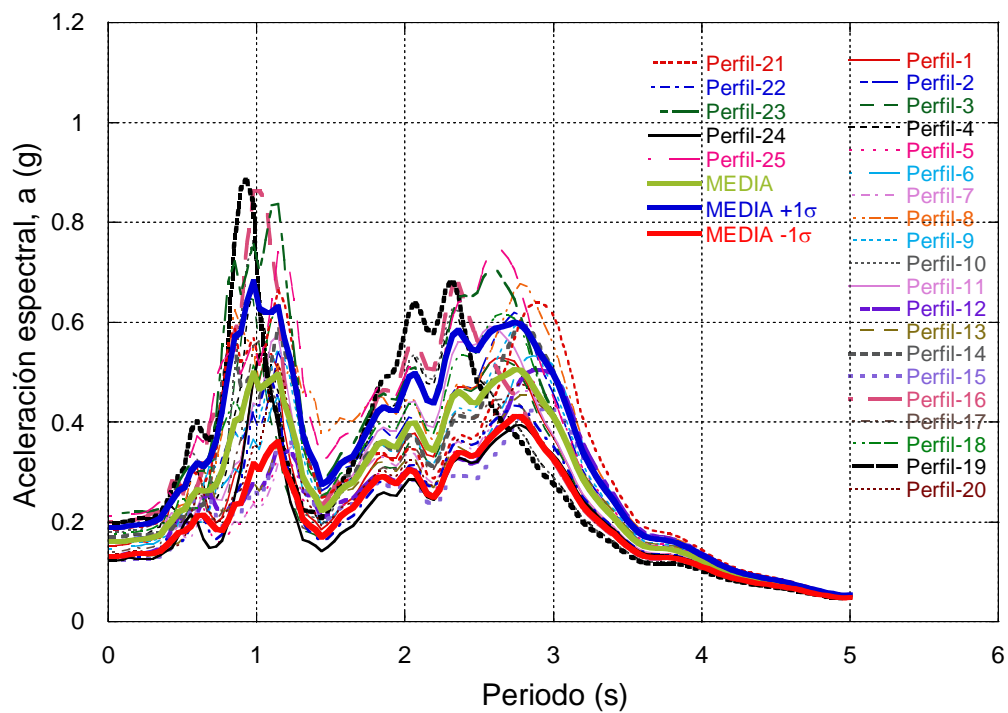


Figura 2.11. Espectros de respuesta obtenidos de estratigrafías aleatorias para el sitio TXS2

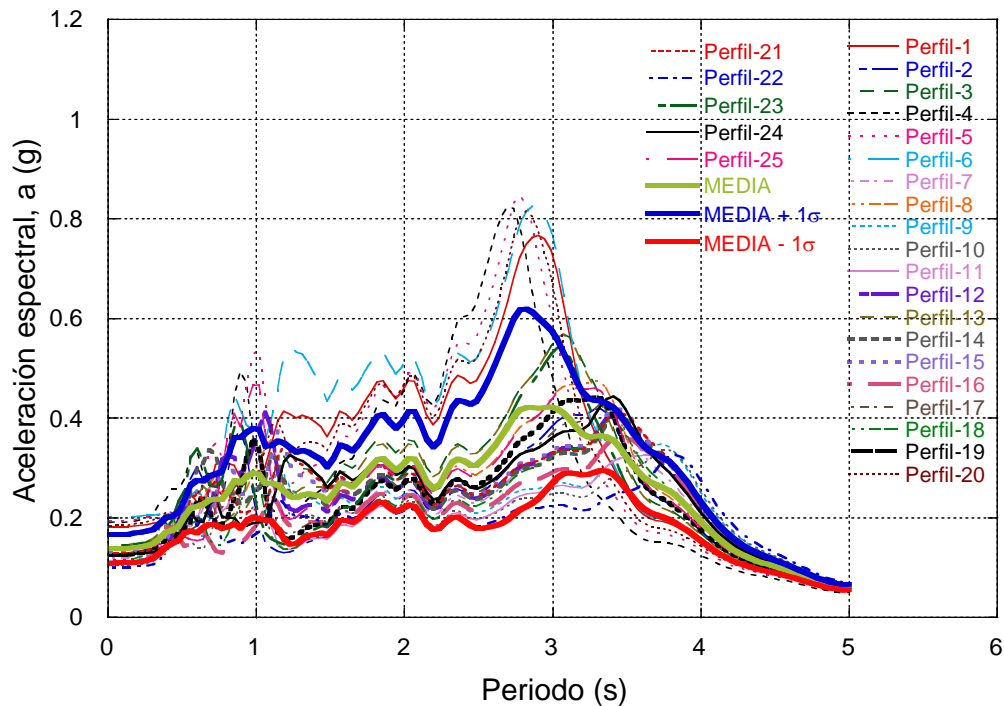


Figura 2.12. Espectros de respuesta obtenidos de estratigrafías aleatorias para el sitio TXCH

Usando la metodología planteada en Mayoral *et al.* (2008a) y los movimientos listados en la Tabla 2.5, se obtuvieron los espectros envolventes para los sitios TXS1, TXS2 y TXCH. De la información generada en la etapa anterior se tomaron los espectros de respuesta media y media+1σ y se compararon con la envolvente de la respuesta medida en campo (para cada sitio) escalada a la máxima aceleración de terreno, $PGA=0.1g$, registrada en la estación TXSO, para el sismo de 1985, observándose una razonable congruencia en el contenido de frecuencias de los espectros de respuesta estimados con RADSH y los medidos en campo, no así con las ordenadas espectrales, que presentan amplitudes mayores en los espectros de respuesta estimados con RADSH (Figura 2.13), en donde no se logró capturar la aceleración máxima del terreno.



Tabla 2.5. Sismos empleados para determinar los espectros de respuesta media, media+1 σ y la envolvente medida de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH

Sitio	Evento	M _s	Distancia epicentral (km)	Tipo de suelo	PGA (gal)
TXSO	25/OCT/81	7.3	311.97	Arcilla	NS=-23.793; V=4.324; EW=-28.320
	21/SEP/85	7.60	381.1	Arcilla	NS=38.561; V=0.000; EW=34.748
	19/SEP/85	8.10	444.42	Arcilla	NS=103.036; V=-25.529; EW=-102.973
TXS1	30/SEP/99	7.5	442.79	Arcilla	NS=32.83; V=-6.96; EW=30.85
	15/JUN/99	6.50	211.83	Arcilla	NS=33.64; V=-12.48; EW=35.82
TXS2	30/SEP/99	7.5	442.27	Arcilla	NS=-24.80; V=4.25; EW=18.54
	15/JUN/99	6.50	211.55	Arcilla	NS=-24.14; V=-7.95; EW=25.71
TXCH	07/JUN/82 (2)	7.0	353.74	Arcilla	NS=-11.41; V=5.47; EW=12.19
	07/JUN/82 (1)	6.9	365.94	Arcilla	NS=-22.17; V=5.33; EW=14.30
	24/OCT/80	Mb=6.4	169.80	Arcilla	NS=-30.88; V=-21.88; EW=26.07
	14/MAR/79	Mb=7.0	324.74	Arcilla	NS=31.86; V=-12.49; EW=-22.43

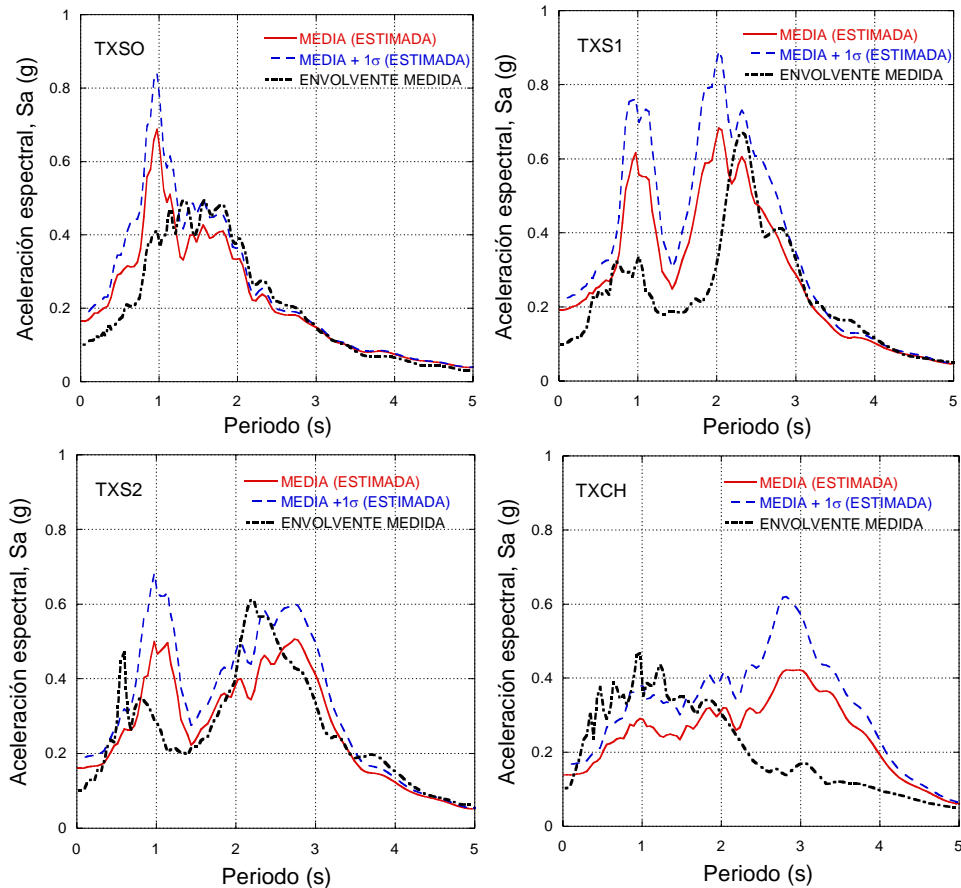


Figura 2.13. Espectros de respuestas estimados media, media+1 σ y envolvente medida en los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH



2.7. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los trabajos iniciales orientados a generar la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, llevándose a cabo los análisis probabilistas de respuesta dinámica de cuatro depósitos de suelo. Como parte de esta investigación se realizaron trabajos de campo y laboratorio en los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH. En particular, se llevaron a cabo dos tipos de sondeos, de penetración de cono eléctrico, CPT, y de penetración estándar, SPT, además de muestreo selectivo. Los resultados de la exploración muestran depósitos de suelo estratificados aproximadamente horizontales, con variaciones en los espesores de los estratos arcillosos, que presenta intercalaciones de estratos arenosos a lo largo de la dirección norte-sureste, que van de 10 m en el sitio TXSO hasta 25 m en el sitio TXCH. El contenido de agua de las arcillas que se extienden hasta los 25 m de profundidad oscilan entre 120 a 395%, y el índice de plasticidad fluctúa entre 105 y 362%. Las curvas del módulo de rigidez al cortante normalizadas del suelo y la relación de amortiguamiento obtenidas a partir de pruebas de columna resonante y triaxial cíclica en muestras gemelas, muestran que los datos experimentales pueden ajustarse con el modelo propuesto por Romo (1995). Los análisis de respuesta de sitio realizados en esta etapa muestran en general una buena congruencia capturando el contenido de frecuencias, pero no las amplitudes espectrales. Cabe destacar que los resultados obtenidos de los análisis de respuesta dinámica en el sitio TXCH presentan una respuesta inconsistente con la envolvente medida en este sitio, esto puede deberse a que la estación sismológica TXCH, actualmente fuera de servicio y de la cual sólo se tienen las coordenadas geográficas, no pudo ser ubicada en su posición original, en donde según las historias de tiempo registradas, acusan una estratigráfica total mente diferente a la del sitio estudiado, localizado de acuerdo con las coordenadas geográfica disponibles. En este sentido, a la vista de los resultados aquí presentados se plantea la necesidad de complementar la información con la generada en otros proyectos y con el uso de técnicas geoestadísticas, temas que se abordan en el siguiente capítulo.





3. DETERMINACIÓN GEOESTADÍSTICA DE PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA RESPUESTA DE SITIO

Como parte de los trabajos de investigación desarrollados para la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, se han llevado a cabo importantes trabajos de exploración de campo y laboratorio, para caracterizar los parámetros que influyen en la respuesta de sitio en esta región, pero hasta el momento la información sigue siendo insuficiente. Por lo tanto para esta investigación, con base en la información disponible y técnicas geostadísticas, se han generado 2501 perfiles virtuales estratigráficos y de velocidad de onda de cortante, así como, las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento en función del índice de plasticidad, siguiendo los pasos de la Figura 3.1, que permitieron definir la distribución espacial de estos parámetros en el área de estudio. Los resultados obtenidos en esta etapa de la investigación se utilizaron para realizar los análisis de respuesta de sitio, para definir una propuesta del espectro de diseño para esta región.

3.1. Antecedentes

Los antecedentes en México en la aplicación de la geoestadística son los trabajos orientados a la caracterización del subsuelo del valle de México, que permitieron evaluar la eficiencia de esta técnica aplicada a la Geotecnia (Juárez y Auvinet, 2000; Juárez, 2001); la descripción del subsuelo del Valle de México (Medina, 2001; Juárez y Auvinet, 2002) y la caracterización geotécnica para la zona norte del valle de México (Auvinet *et al.*, 2005), estos trabajos mostraron que el método puede ser empleado para estimar de manera racional los espesores y profundidades de las formaciones típicas del subsuelo, así como, sus propiedades índice o mecánicas a partir de la información disponible. En este contexto, en los resultados más recientes en el trabajo de caracterización geotécnica para la zona norte del valle de México (Juárez y Auvinet, 2011), se presentan cortes estimados (virtuales) y mapas de contorno de las propiedades del subsuelo (Figura 3.2), con los

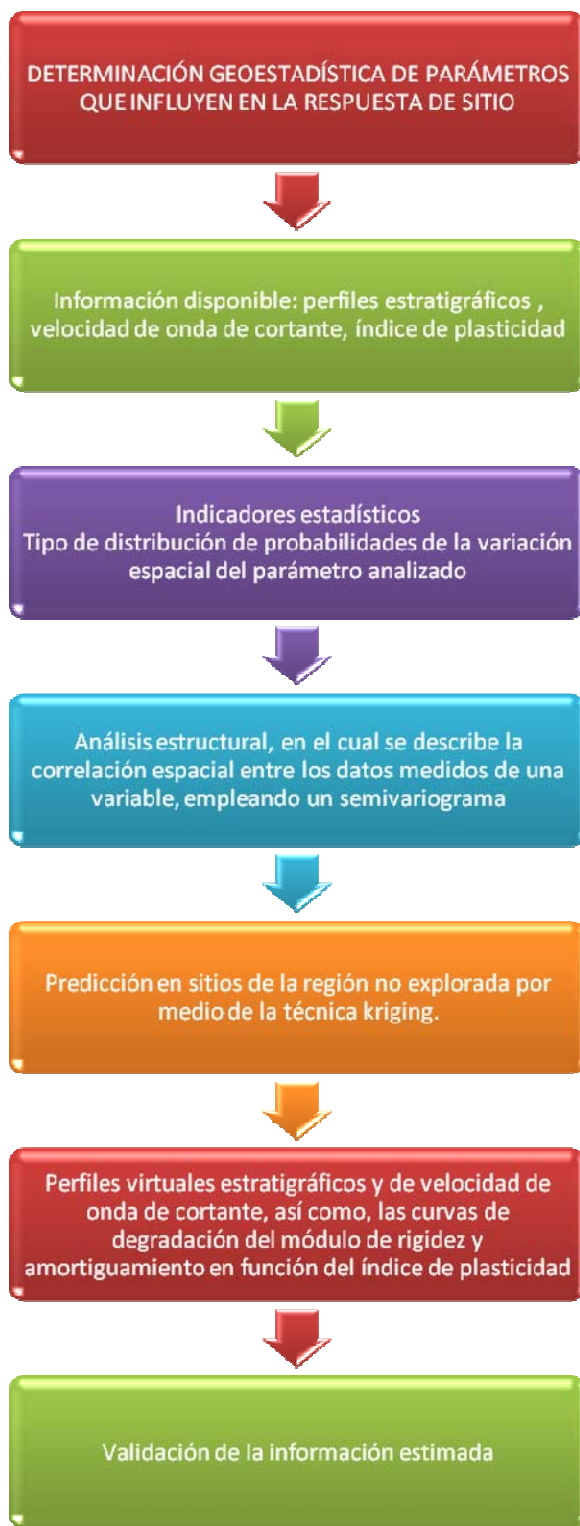


Figura 3.1. Metodología seguida para la determinación geoestadística de parámetros que influyen en la respuesta de sitio

cuales se pueden definir los espesores de los estratos y la extensión de los ex-lagos de Zumpango, Xaltocan y la parte Norte del lago de Texcoco, en la zona en donde se ubican Ecatepec, Coacalco, Tultitlán y Tonatitla. Por otro parte también, se han realizado aplicaciones de la geoestadística para el análisis de las variaciones espaciales de las propiedades geotécnicas más importantes de los suelos en aguas profundas, a partir de la información de la resistencia del suelo, contenido de agua e índices de plasticidad (Auvinet *et al.*, 2000; Valdez y Auvinet, 2003; Galván y Auvinet, 2004; Galván y Auvinet, 2011).

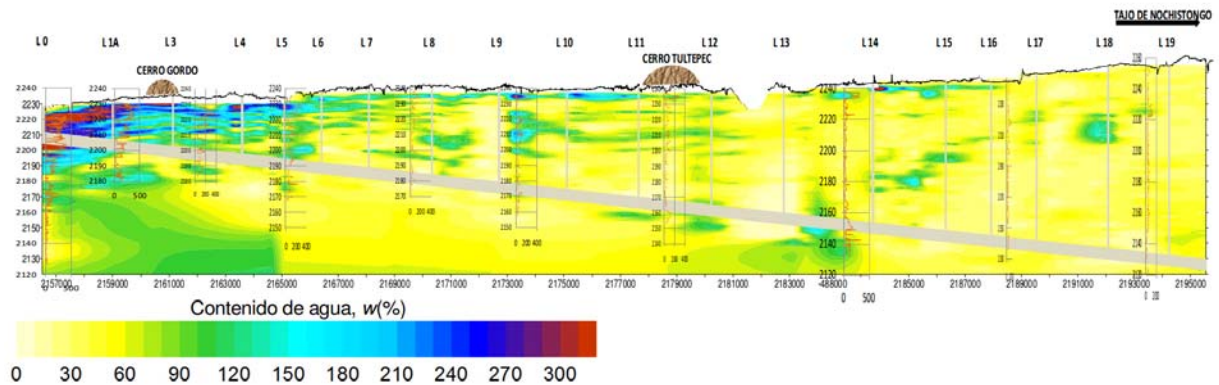


Figura 3.2. Contenido de agua, w (%) [Juárez y Auvinet, 2011]

En este sentido, otros investigadores han utilizado la geoestadística para evaluar el potencial de licuación (Dawson y Baise, 2005); establecer correlaciones espaciales de la velocidad de onda de cortante (Thompson *et al.*, 2007); evaluar la variación espacial del índice de calidad de la roca (Cromer *et al.*, 1996); caracterizar el subsuelo para predecir el transporte de contaminantes (Benson y Rashad, 1996); caracterizar la conductividad hidráulica no saturada (Miller y Kannengieser, 1996); determinar los patrones de variación espacial del nitrato residual en el suelo (Goderya *et al.*, 1996); entre otros.

3.2. Información disponible

La información disponible de la zona de estudio, consiste de los trabajos de exploración de campo y laboratorio que se realizaron para el proyecto denominado “Diseño Geotécnico de la Cimentación de la Subestación Eléctrica Lago 1”, de Luz y Fuerza del Centro, trabajo que se dividió en tres frentes, Línea Derivación Lago 1 de 400 kV, Subestación Eléctrica Lago 1 y Línea Lago 1-Madero de 230 kV; además de la información generada para el



proyecto del Nuevo Aeropuerto de la ciudad de México (2001). La Figura 3.3 muestra la ubicación de la información citada.



Figura 3.3. Información disponible

3.2.1. Línea derivación Lago 1 de 400 kV (Ovando et al., 2006)

Tiene una longitud de 13.2 km, se ubica al Norte del ex Lago de Texcoco, parte de la carretera a Teotihuacan (km 0+000) y penetra a la zona lacustre hasta llegar al sitio donde se construirá la Subestación Eléctrica Lago 1 (km 13+258.88), cerca de la porción Noroeste del antiguo evaporador solar de Sosa Texcoco. Los trabajos de exploración realizados en



este frente consisten en sondeos de cono eléctrico, CPT, sondeos de penetración estándar, SPT, sondeos mixtos, SM, sondeos de sonda suspendida, SS, sondeos de piezocono, PZC, sondeos de phicómetro, SPH, pozos a cielo abierto, PCA, y sondeos con presiómetro de Menard. En la Tabla 3.1 se resume la información de los trabajos realizados en este frente.

Tabla 3.1. Información de los trabajos realizados en el frente Línea derivación Lago 1 de 400 kV

SITIO	Kilometraje	SPT (m.l.)	CPT (m.l.)	SM (m.l.)	PCA (m.l.)	PHICÓMETRO Y PRESIÓMETRO		Sonda Suspendida (m.l.)	P. DE PLACA		PIEZOCONO Lecturas
						Pruebas	Prof.		Pruebas	Prof.	
0+000	0+000,00	29,27			4,1	2,00	4,60 7.2		2,00	2,50 4.1	
T-1	0+271,03	7,40									
T-3	0+921,82	24,40			3,10						
T-5	1+535,64				2,50						
T-9	2+739,22	24,60				2,00	6,90 9,90				
T-11	3+319,28				3,25						
T-12	3+653,30	25,20			3,20						
T-13	3+956,41	25,83				2,00	8,15 13,80	27,00			
T-14	4+356,41				4,40						
T-15	4+756,41	20,20									
T-18	5+385,95		20,20	20,20							
T-19	5+697,59		20,80	21,00							
T-20	5+982,82		25,60	25,85							
T-22	6+620,41		25,50								
T-23	7+024,41			25,10							
T-25	7+864,35		28,00								
T-27	8+669,29		31,30	31,90							
T-29	9+267,51		28,20	25,80							
T-31	9+846,91		29,40	29,29							5,00
T-32	10+119,90		25,50								
T-35	11+019,87			25,50							
T-39	12+219,84		26,60	26,10							5,00
T-42	13+258,88		26,50	26,10							
No. Total de pruebas		7	11	11	7	6		1	2		2

3.2.2. Subestación eléctrica Lago 1 (Mayoral et al., 2006)

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la parte Noroeste del antiguo evaporador solar de Sosa Texcoco, a unos 250 m al este de la Avenida Central, en este segundo frente se realizaron trabajos de exploración, muestreo, ensayos *in-situ* y pruebas de laboratorio, para caracterizar las condiciones del subsuelo requeridas para llevar a cabo el diseño geotécnico y estructural de la cimentación del proyecto. Los trabajos fueron efectuados de acuerdo a las normas ASTM correspondientes, y consistieron en dos sondeos mixtos (SM), diez sondeos de cono eléctrico (CPT), un sondeo de penetración estándar (SPT), un sondeo de piezocono con seis estaciones de lectura y un sondeo de sonda suspendida (SS). La



ubicación de los sondeos practicados así como las profundidades de exploración se muestra en la Figura 3.4.

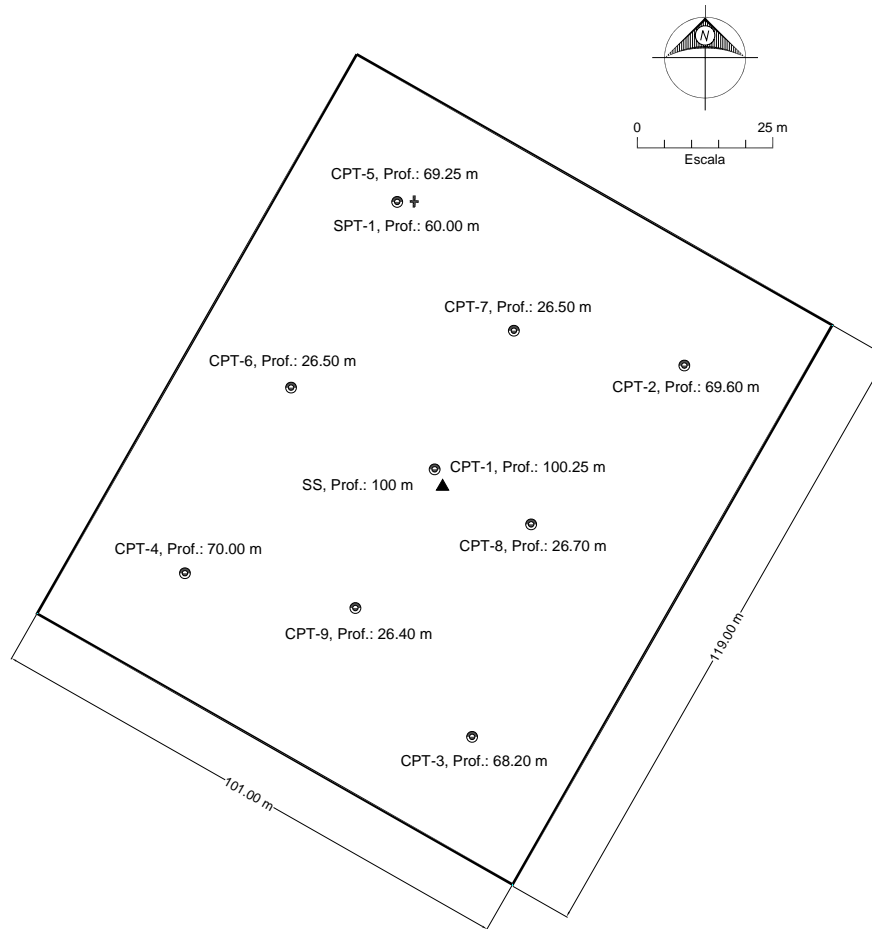


Figura 3.4. Ubicación de los sondeos de exploración del subsuelo en la Subestación Eléctrica Lago I

3.2.3. Línea de 230 kV Lago 1-Madero (Mendoza et al., 2006)

Tiene una longitud de 14.4 km. Parte de la Subestación Eléctrica Lago I y concluye en la Subestación Eléctrica Madero, corre en dirección Sur a lo largo del Dren General del Valle (rama Norte-Sur); al llegar a la intersección con el Río de los Remedios cambia de dirección hacia el Oeste hasta llegar a la Subestación Eléctrica Madero (rama Este-Oeste). Los trabajos de exploración realizados en este frente consisten en sondeos de cono eléctrico, CPT, sondeos mixtos, SM, sondeos de sonda suspendida, SS, y sondeos de piezocono, PZC. En la Tabla 3.2 se resume la información de los trabajos realizados en este tercer frente.



Tabla 3.2. Localización y tipo de sondeos de la Línea 230 kV Lago 1-Madero

SITIO		PROFUNDIDAD Y TIPO DE SONDEOS							
SONDEO	KILOMETRAJE	SPT (m)	CPT (m)	SM (m)	PCA (m)	PHICÓMETRO (Pruebas)	SS	PRUEBA DE PLACA (Pruebas)	PIEZOCONO (Pruebas)
P-1	0+070.06		29.15						
T-6	1+310.05		29.00	45.40					
P-14	3+326.60		30.30						
T-23	5+602.40		47.70	45.80					
T-24	5+746.26		-	-					5.0
P-33	8+041.60		30.0						
T-41	9+998.73		50.50	47.00					
T-42	10+265.90		51.10	45.60			55.0		4.0
T-46	11+305.90		53.00	45.30					
T-47	11+485.99		53.50	44.80					
P-51	12+342.68		41.40						
P-55	13+342.66		50.10				57.00		
T-60	14+354.61		50.00	45.00					

3.2.4. Proyecto del nuevo aeropuerto de la ciudad de México (Romo et al., 2001)

En este proyecto se realizaron trabajos de exploración e instrumentación geotécnicas en el predio donde el gobierno federal pretendía construir un nuevo aeropuerto para la ciudad de México, localizado al Oriente de la ciudad, al Norte de la autopista Peñón-Texcoco y al Oriente del evaporador solar de Sosa Texcoco. La finalidad de los trabajos de exploración fue la determinación detallada de las características estratigráficas e hidráulicas del subsuelo del sitio del proyecto y sus variaciones horizontales a lo largo del trazo de las pistas, la cual permitió asociar las condiciones del subsuelo con las soluciones para la construcción de las pistas y estructuras de operación del aeropuerto. En las Tablas 3.3 y 3.4 se presentan los listados de los trabajos realizados inicialmente así como los solicitados durante el desarrollo del proyecto. En la Figura 3.5 se muestra la ubicación de estos sondeos.



Tabla 3.3. Datos de puntos de exploración e instrumentación

Punto	Coordenadas originales		Profundidad de exploración, m.	CPT	SM	SCS	EBNP	EPA
	X	Y						
1	500 495.53	2 156 962.00	50	X	X	X	X	X
2	502 366.76	2 156 857.36	50	X				
3	503 821.50	2 156 776.01	50	X				
4	505 276.48	2 156 694.65	30	X	X	X	X	X
5	500 865.10	2 158 029.03	50	X				
6	505 645.81	2 157 761.69	30	X				
7	501 234.66	2 159 096.06	50	X				
8	503 105.57	2 158 991.44	50	X	X	X	X	X
9	504 560.30	2 158 910.09	30	X				
10	506 015.14	2 158 828.74	20	X				
11	501 604.23	2 160 163.09	50	X				
12	503 474.97	2 160 058.48	50	X				
13	506 384.46	2 159 895.78	20	X				X
14	501 960.15	2 161 190.72	50	X	X	X		X
15	502 895.44	2 161 138.41	50	X				
16	503 830.73	2 161 086.11	30	X				
17	505 285.22	2 161 004.77	30	X				
18	506 740.15	2 160 923.41	20	X	X	X		

CPT – Sondeo de cono eléctrico
SM – Sondeo mixto
SCS – Sondeo de cono sísmico

EBNP – Estación de bancos de nivel profundo
EPA – Estación de piezómetros abiertos

Tabla 3.4. Sondeos adicionales en el sitio en estudio

Punto	Coordenadas		Tipo de sondeo	Profundidad o cantidad
	X	Y		
PRIORIDAD: 1				
8	502 819.3568	2 159 010.2400	Sonda suspendida	100 m
19	502 739.6466	2 157 930.5128	CPT	52 m
20 c	503 592.1080	2 160 370.7952	SPT	30 m
21 c	503 592.1081	2 160 681.4875	SPT	30 m
22 c	503 419.5766	2 161 108.9342	SPT	30 m
23 c	504 131.2101	2 161 036.3271	SPT	30 m
24 c	504 016.2420	2 160 553.0975	SPT	30 m
25 c	504 790.4425	2 160 911.0344	SPT	30 m
26 c	504 641.2936	2 160 468.5893	SPT	30 m
27 c	504 361.6393	2 161 758.6657	SPT	30 m
28 T	504 477.4115	2 159 292.2020	CPT	52 m
29 T	504 477.4115	2 159 292.2020	SPT	100 m
			SMS	15 muestras
			Presiómetro	6 ensayos
30 T	504 477.4115	2 159 292.2020	CPT	52 m
10 SPC	506 015.1400	2 158 828.7400	Piezo cono	52 m
Cerca del cerro Huatepec			Pozo a cielo abierto	8 pozos
PRIORIDAD 2				
31d	502 258.7200	2 155 216.0030	CPT	50
32d	505 466.6480	2 155 756.0030	CPT	50
33d	507 702.3540	2 162 355.9780	CPT	30
34d	505 504.7454	2 162 347.8317	CPT	30
35d	503 272.8356	2 162 345.0000	CPT	30
36d	501 868.1500	2 162 354.1000	CPT	30
37aut	505 758.9411	2 154 878.7276	CPT	50

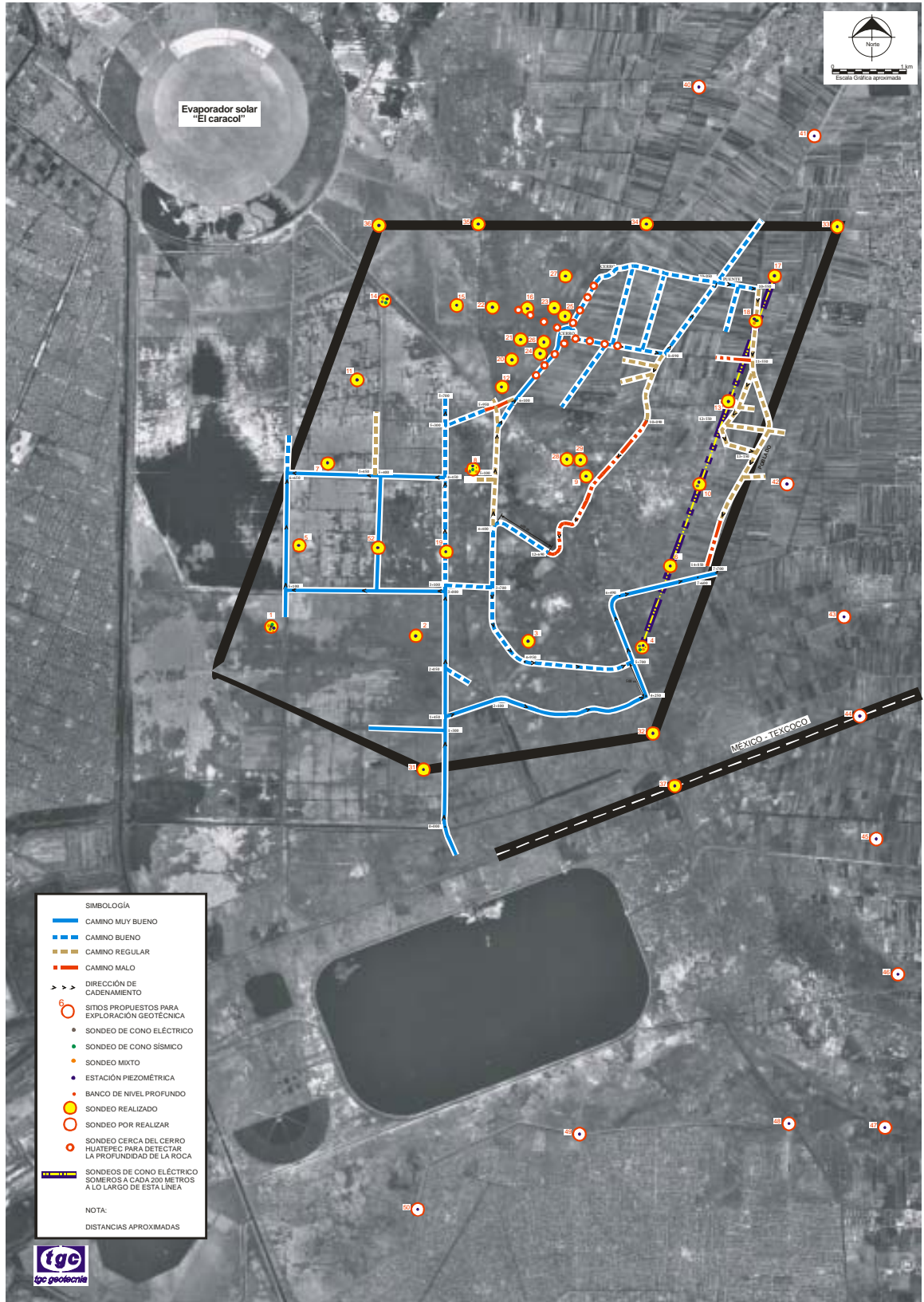


Figura 3.5. Localización de los sondeos (Nuevo Aeropuerto de la ciudad de México, 2001)



En resumen, en el área de estudio se cuenta con 28 pruebas de penetración estándar, SPT, combinados con muestreo selectivo, de los cuales se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas, 67 sondeos de cono eléctrico, CPT, 4 sondeos de piezocono, PZC, y 4 sondeos de sonda suspendida, SS. Con la información recabada se definió, de manera general, la secuencia estratigráfica, velocidades de onda de cortante, propiedades índice, propiedades mecánicas y propiedades dinámicas de los geomateriales que se encontraron en el área de estudio. La localización de los sondeos realizados se muestra en la Figura 3.6 y en la Tabla 3.5 se presentan sus coordenadas UTM y geográficas. La velocidad de onda de corte para arcillas y limos se estimó usando la expresión propuesta por Ovando y Romo (1991) en términos de la resistencia a la penetración de punta, q_c , medida con CPT, en tanto que la velocidad de onda de corte para arenas se estimó usando la expresión empírica propuesta por Seed *et al.* (1983), en términos del número de golpes para la prueba de penetración estándar, cuya estimación proporcionó el valor más cercano a los valores medidos. Generándose 69 perfiles de velocidad de onda de cortante.

Las propiedades índice de los geomateriales encontrados se obtuvieron de muestras alteradas e inalteradas; incluyendo el contenidos natural de agua, w , límite plástico, w_p , límite líquido, w_L , índice de plasticidad, PI, densidad de sólidos, G_s , índice de rigidez, I_R , índice de liquidez, I_L y relación de vacíos, e , clasificando los material de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Con respecto a la determinación de la rigidez dinámica y el amortiguamiento, se llevaron a cabo series de pruebas de columna resonante y triaxial cíclica desarrolladas en muestras gemelas recuperadas en el sitio. Cada muestra se ensayó con tres presiones diferentes de confinamiento, variando el esfuerzo efectivo *in-situ* de 1.5 a 2 veces este valor, para reproducir adecuadamente y en forma práctica, la condición de campo y otros dos escenarios de carga. De estas pruebas, se estableció la variación a pequeñas y grandes deformaciones de la rigidez y el amortiguamiento de los suelos arcillosos.

Para complementar la información para este trabajo de investigación, se consideró apropiada la generación de perfiles virtuales a partir de la información disponible y el empleo de técnicas geostadísticas, como se comenta a continuación.

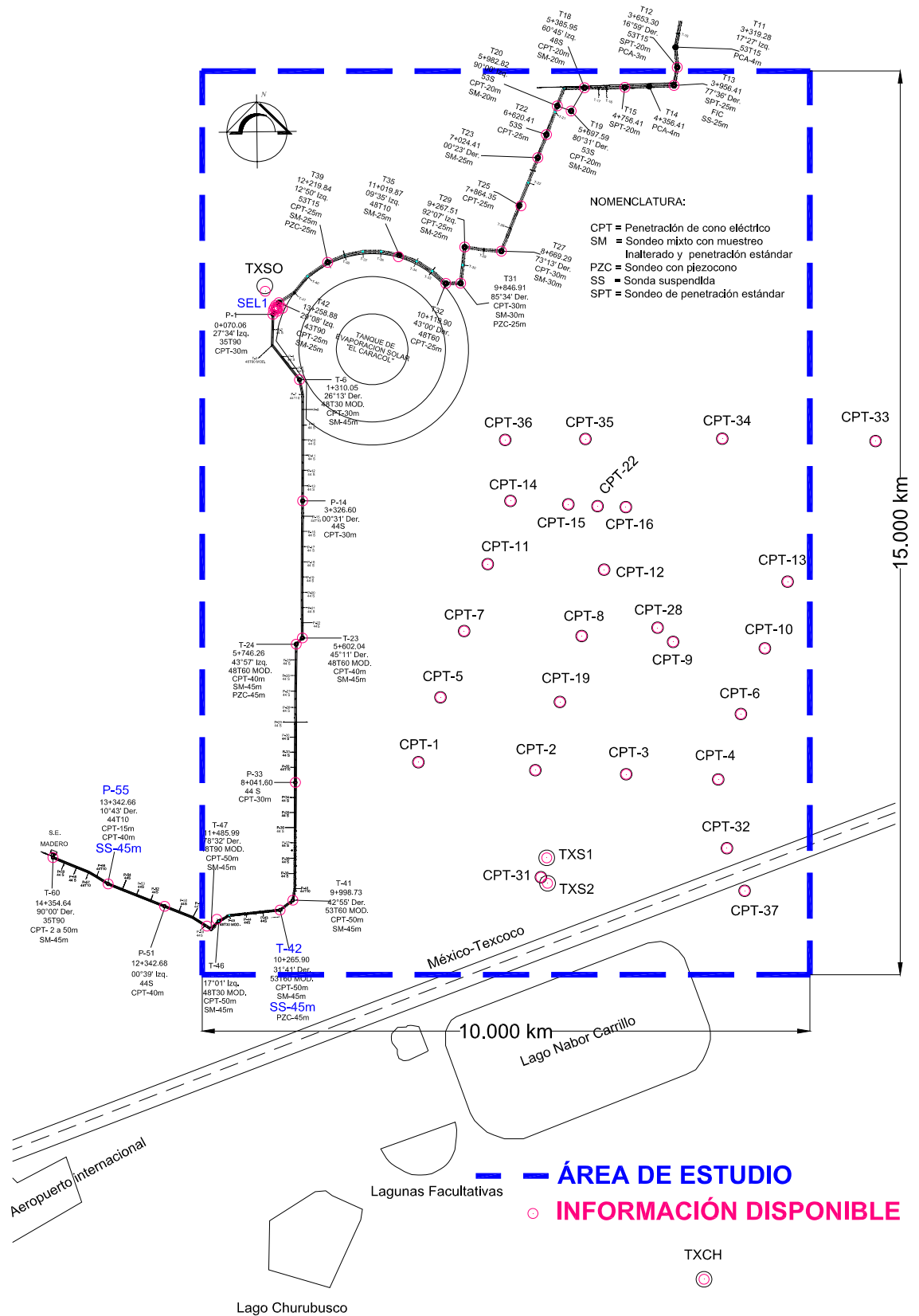


Figure 3.6. Ubicación en planta de los sitios explorados



Tabla 3.5. Ubicación en coordenadas UTM y geográficas de los sitios con información disponible

PROYECTO	SONDEO	COORDENADAS				
		UTM		Geográficas		
		X	Y	Longitud	Latitud	
LÍNEA DE 400 Y 230 KV DEL PROYECTO DE LUZ Y FUERZA DE CENTRO	L400-T12-SPT	504817.944	2168612.44	-98.954053	19.6125932	
	L400-T13-CPT	504763.715	2168310.64	-98.9545709	19.6098659	
	L400-T15-CPT	503955.022	2168279.92	-98.9622831	19.6095901	
	L400-T18-CPT	503290.581	2168272.59	-98.9686195	19.609525	
	L400-T19-CPT	503071.455	2167887.14	-98.9707098	19.606042	
	L400-T20-CPT	502843.298	2167972.3	-98.9728855	19.6068119	
	L400-T22-CPT	502665.594	2167495.36	-98.9745808	19.602502	
	L400-T23-SM	502522.902	2167112.39	-98.975942	19.5990413	
	L400-T25-CPT	502245.524	2166312.28	-98.978588	19.591811	
	L400-T27-CPT	501923.168	2165560.27	-98.9816626	19.5850153	
	L400-T29-CPT	501319.294	2165628.89	-98.9874205	19.5856359	
	L400-T31-CPT	501252.734	2165027.63	-98.9880555	19.5802023	
	L400-T32-CPT	501009.331	2165024.73	-98.9903763	19.5801762	
	L400-T35-SM	500228.632	2165467.52	-98.99782	19.584178	
	L400-T39-CPT	499064.618	2165375.08	-99.0089188	19.5833425	
	L400-T42-CPT	498262.264	2164705.45	-99.0165685	19.5772904	
	L230-P1-CPT	498165.272	2164511.52	-99.0174931	19.5755377	
	L230-T6-CPT	498601.701	2163426.51	-99.0133312	19.5657328	
	L230-T14-CPT	498652.811	2161415.25	-99.0128425	19.5475567	
	L230-T23-CPT	498648.369	2159139.9	-99.0128832	19.5269941	
	L230-T24-CPT	498547.46	2159036.87	-99.013845	19.5260629	
	L230-T33-CPT	498533.284	2156741.62	-99.0139783	19.5053203	
	L230-T41-CPT	498492.279	2154787.1	-99.0143675	19.4876569	
	L230-T42-CPT	498281.089	2154623.46	-99.0163799	19.4861779	
	L230-T46-CPT1	497241.512	2154470.35	-99.026286	19.484793	
	L230-T47-CPT	497077.68	2154357.73	-99.027847	19.483775	
L230-T51-CPT-1	496381.013	2154686.35	-99.0344862	19.4867436		
L230-P55-CPT2	495452.172	2155056.73	-99.0433383	19.490089		
L230-T60-CPT2	494543.825	2155495.77	-99.0519956	19.4940544		
NUEVO AEROPUERTO DE LA CIUDAD DE MÉXICO, 2001	CPT-1	500557.705	2157077.57	-98.9946848	19.5083568	
	CPT-2	502482.281	2156944.57	-98.9763428	19.5071533	
	CPT-3	503976.899	2156878.07	-98.9620985	19.5065499	
	CPT-4	505491.991	2156791.1	-98.9476594	19.5057604	
	CPT-5	500921.106	2158154.38	-98.9912209	19.5180879	
	CPT-6	505865.629	2157878.14	-98.9440951	19.5155831	
	CPT-7	501310.116	2159254.21	-98.9875124	19.5280271	
	CPT-8	503244.929	2159172.36	-98.9690706	19.5272852	
	CPT-9	504749.784	2159075.17	-98.9547271	19.5264038	
	CPT-10	506259.757	2158967.74	-98.940335	19.5254288	
	CPT-11	501699.126	2160365.75	-98.9838035	19.5380719	
	CPT-12	503613.465	2160273.67	-98.9655557	19.5372372	
	CPT-13	506633.412	2160074.16	-98.9367697	19.5354265	
	CPT-14	502072.78	2161414.43	-98.9802406	19.5475486	
	CPT-15	503024.831	2161358.16	-98.9711649	19.5470389	
	CPT-16	503971.764	2161312.12	-98.9621381	19.5466212	
	CPT-19	502886.63	2158077.64	-98.9724874	19.5173926	
	CPT-22	503505.975	2161327.46	-98.9665784	19.5467607	
	CPT-28	504493.856	2159310.48	-98.9571659	19.528531	
	CPT-31	502573.951	2155168.53	-98.9754715	19.4911028	
	CPT-32	505635.31	2155650.35	-98.9462969	19.4954508	
	CPT-33	508081.069	2162407.95	-98.9229605	19.5565119	
	CPT-34	505558.515	2162447.76	-98.9470087	19.5568803	
	CPT-35	503306.352	2162442.64	-98.9684794	19.5568391	
	CPT-36	501985.765	2162427.29	-98.981069	19.5567022	
	CPT-37	505926.603	2154943.45	-98.9435231	19.4890616	
	PROYECTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA LAGO 1	CPT-1	498218.696	2164609.7	-99.0169839	19.576425
		CPT-2	498264.552	2164630.81	-99.0165467	19.5766158
		CPT-3	498227.526	2164559.99	-99.0168996	19.5759758
		CPT-4	498172.84	2164588.58	-99.017421	19.5762341
		CPT-5	498209.867	2164659.4	-99.0170681	19.5768741
		CPT-6	498191.354	2164623.98	-99.0172446	19.5765541
		CPT-7	498232.522	2164636.14	-99.0168521	19.576664
		CPT-8	498237.074	2164600.08	-99.0168086	19.5763381
		CPT-9	498204.87	2164583.25	-99.0171157	19.5761859
		CPT-10	498318.673	2164611.44	-99.0160306	19.5764408
	ZONIFICACIÓN	TXSO	498037.161	2164894.98	-99.018715	19.579003
TXS1		502669.995	2155490.15	-98.9745558	19.4940093	
TXS2		502683.001	2155067.71	-98.9744325	19.4901916	
TXCH		505253.726	2148537.45	-98.949953	19.431171	



3.3. Generación de perfiles virtuales

Para la generación de los perfiles virtuales se estimó adecuada la utilización de técnicas geoestadísticas para predecir los parámetros en sitios no explorados, por lo tanto, en los siguientes párrafos se presenta la información obtenida a partir de mediciones hechas *in situ* y datos de laboratorio.

3.3.1. Ubicación de perfiles virtuales

Para establecer la ubicación de los perfiles virtuales se construyó una malla con 41 columnas y 61 renglones, especificándose una separación entre columnas y entre renglones de 250 m (Figura 3.7). En esta figura se presenta la ubicación de la información disponible (rojo) y los puntos de interpolación propuestos (azul) para los análisis geoestadísticos. Con este arreglo se tienen 2501 puntos virtuales, en los cuales se obtuvieron un número igual de perfiles virtuales estratigráficos y de velocidad de onda de cortante, así como, las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento en función del índice de plasticidad, para establecer la distribución espacial de estos parámetros en el área de estudio. Cada uno de estos puntos es caracterizado por su posición geográfica, en términos de sus coordenadas UTM. En la Tabla 3.6 se presentan las coordenadas UTM de los puntos virtuales 1, 61, 611, 1221, 1831, 2441 y 2501 que son los puntos ubicados en la Figura 3.7, entre los que se encuentran los puntos de los vértices que definen el área de estudio.

Tabla 3.6. Coordenadas UTM de puntos virtuales.

Id	COORDENADAS UTM	
	X	Y
PV1	497000	2153550
PV61	497000	2168550
PV611	499500	2153550
PV1221	502000	2153550
PV1831	504500	2153550
PV2441	507000	2153550
PV2501	507000	2168550

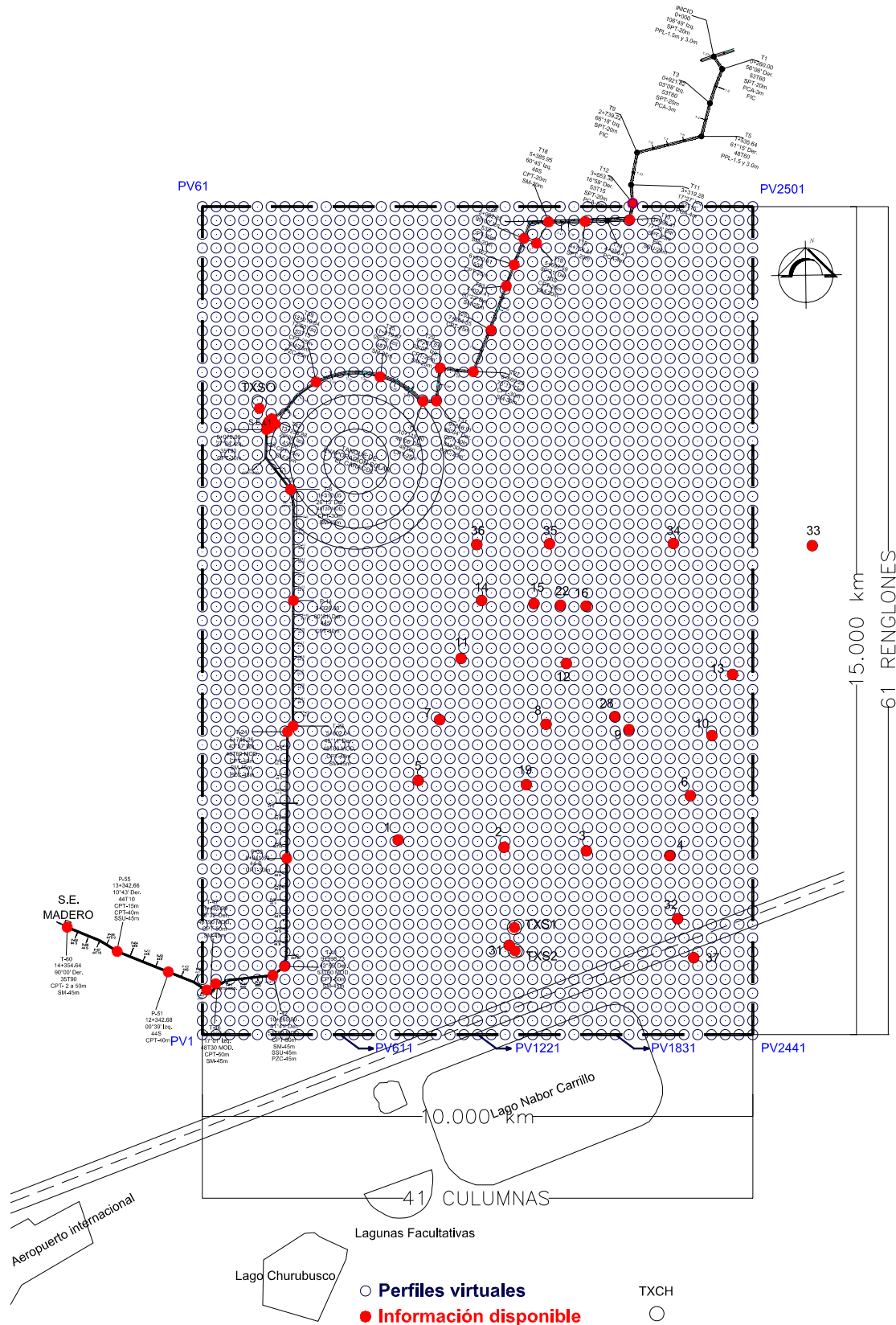


Figura 3.6. Información disponible y perfiles virtuales



3.3.2. Marco teórico

La geoestadística es la disciplina que estudia los fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978), enfocándose particularmente en la estimación, predicción y simulación de éstos (Myers, 1987). Para diversas áreas de investigación la geoestadística ofrece una forma de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks y Srivastava, 1989). Petitgas (1996), la define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales. El proceso predictivo de los métodos geoestadísticos tiene dos fases, la primera es conocida como análisis estructural, en el cual se describe la correlación espacial entre los datos medidos de una variable, empleando un semivariograma, un covariograma o un correlograma. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreada por medio de la técnica kriging. El método geoestadístico kriging describe la correlación tanto espacial como temporal que existe entre los valores de un parámetro distribuido en el espacio.

3.3.2.1. Variograma y Semivariograma

En el empleo de técnicas geoestadísticas se asume que la varianza de los incrementos de la variable regionalizada, $[Z(x+h) - Z(x)]$, es finita, por lo tanto satisface las siguientes condiciones (Clark, 1979):

a) $Z(x)$ tiene esperanza finita y constante para todo punto en el dominio, lo que implica que la esperanza de los incrementos es cero.

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (3.1)$$

b) Para cualquier vector h , la varianza del incremento está definida y es una función única de la distancia.

$$V[Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\gamma(h) \quad (3.2)$$



A la función denotada por $2\gamma(h)$ se le denomina variograma. La mitad del variograma $\gamma(h)$, se conoce como la función de semivariograma y caracteriza las propiedades de dependencia espacial del proceso. Dado el fenómeno, la función de semivarianza es estimada, por el método de momentos, a través del semivariograma experimental, que se calcula mediante (Wackernagel, 1995):

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n} \quad (3.3)$$

donde $Z(x)$ es el valor de la variable en un sitio x , $Z(x+h)$ es otro valor muestral separado del anterior por una distancia h y n es el número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia. La función de semivarianza se calcula para varias distancias h . En la práctica, debido a irregularidad en el muestreo y por ende en las distancias entre los sitios, se toman intervalos de distancia $\{[0,h], [h,2h], [2h,3h], \dots\}$ y el semivariograma experimental corresponde a una distancia promedio entre parejas de sitios dentro de cada intervalo y no a una distancia h específica. Obviamente el número de parejas de puntos n dentro de los intervalos no es constante.

3.3.2.2. Modelos teóricos de semivarianza

La solución del problema de predicción espacial kriging requiere del conocimiento de la estructura de autocorrelación para cualquier posible distancia entre sitios dentro del área de estudio. Por ello es necesario ajustar modelos que generalicen lo observado en el semivariograma experimental a cualquier distancia. Existen diversos modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental. En general dichos modelos pueden dividirse en no acotados (lineal, logarítmico, potencial) y acotados (esférico, exponencial, gaussiano) (Warrick *et al.*, 1986). Los acotados garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, por lo cual son ampliamente usados. En la Figura 3.8 se puede ver los parámetros típicos de un modelo teórico.

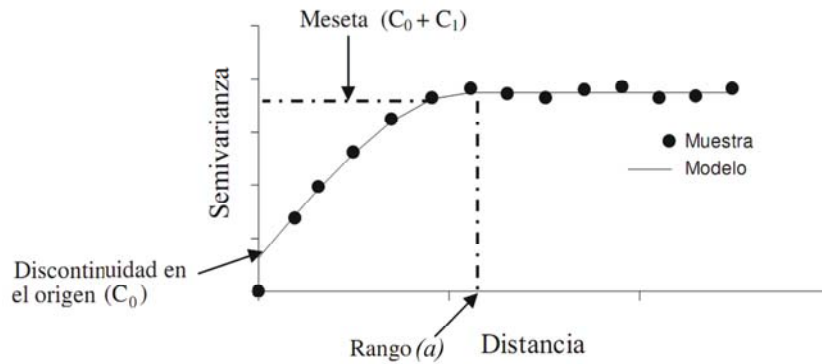


Figura 3.8. Comportamiento típico de un semivariograma acotado con una representación de los parámetros básicos

Modelo esférico

Este modelo tiene un crecimiento muy rápido cerca del origen, pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al rango los incrementos son nulos. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (3.4)$$

En donde, C_0 representa una discontinuidad en el origen, C_1 representa la meseta, a el rango y h la distancia.

Modelo exponencial

Este modelo se aplica cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right) \quad (3.5)$$

Modelo gaussiano

Al igual que en el modelo exponencial, la dependencia espacial se desvanece solo a una distancia que tiende a infinito. El principal distintivo de este modelo es su forma parabólica cerca al origen. Su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right) \quad (3.6)$$

En la Figura 3.9 se presenta una comparación gráfica de los modelos teóricos de semivarianza.

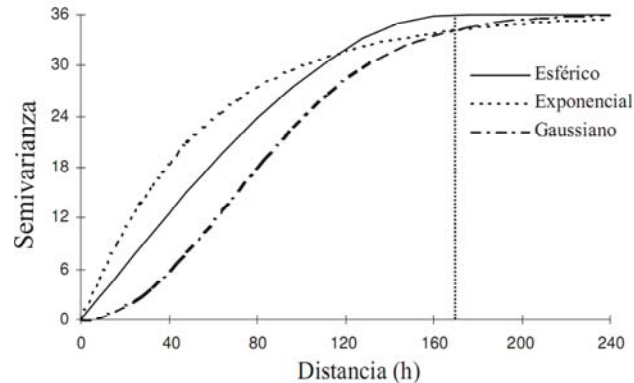


Figura 3.9. Comparación de modelos exponencial, esférico y gaussiano

Para los análisis realizados en esta investigación la información disponible que permitió generar los semivariogramas experimentales fueron ajustados, en general, con un modelo teórico esférico.

3.3.2.3. *Kriging*

El Kriging es un término que ha sido acuñado para designar al “mejor estimador lineal insesgado” de un punto. Es una técnica geoestadística que permite estimar el valor de un parámetro distribuido en el espacio desarrollada por G. Matheron, en los sesentas a partir de los trabajos de D. G. Krige quién fue pionero en el uso de la correlación espacial para propósitos de predicción. Matheron le asigna el nombre de kriging en honor a Krige. El



estimador kriging se considera óptimo ya que: 1) cumple con la condición de insesgo, es decir, el valor esperado del error es cero, y 2) garantiza la mínima varianza de la estimación, es decir, reduce al mínimo la varianza del error de la estimación. El estimador kriging se puede clasificar en lineal y no lineal. Los tipos de kriging lineales son: simple, ordinario, universal y residual. Los tipos no lineales son: disyuntivo, indicador y probabilístico. Para los análisis realizados en esta investigación se utilizó kriging ordinario por lo cual se describe a continuación.

Kriging ordinario

Se emplea cuando se hacen mediciones de la variable de interés Z en los puntos x_i , $i=1, 2, \dots, n$, de la región de estudio, $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$, y se desea predecir $Z(x_0)$, en el punto x_0 donde no hubo medición (Goovaerts, 1999). Este método propone que el valor de la variable (Z^*) puede predecirse como una combinación lineal de las n variables aleatorias con la siguiente expresión:

$$Z^*(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \lambda_4 Z(x_4) + \lambda_5 Z(x_5) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$$

$$Z^*(x_0) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (3.7)$$

en donde λ_i representa los pesos o ponderaciones de los valores originales. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del estimador sea igual a la esperanza de la variable. Esto último se conoce como el requisito de insesgo. Estadísticamente la propiedad de insesgo se expresa a través de:

$$E(Z^*(x_0)) = E(Z(x_0)) \quad (3.8)$$

Se dice que $Z^*(x_0)$ es el mejor estimador, lineal en este caso, porque los pesos se obtienen de tal manera que minimizan la varianza del error de predicción, es decir que minimicen la expresión:



$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) \quad (3.9)$$

Esta última es la característica distintiva de los métodos kriging, ya que existen otros métodos de interpolación como el de distancias inversas o el poligonal, que no garantizan varianza mínima de predicción (Samper y Carrera, 1990). La estimación de los pesos se obtiene minimizando $V[Z^*(x_0) - Z(x_0)]$ sujeto a $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

3.3.3. Indicadores estadísticos

El tipo de distribución de probabilidades de la variación espacial de un parámetro, es un indicador estadístico, que permite elegir de forma óptima, las herramientas geoestadísticas para predecir los datos en los sitios en donde no se realizaron trabajos de exploración. Por lo tanto, conocer *a priori* estos indicadores estadísticos permitirá predecir la información faltante, en forma congruente con la realidad. En este sentido, es altamente recomendable definir el tipo de distribución de probabilidades de la variación espacial de los parámetros estudiados antes de llevar a cabo cualquier tipo de análisis geoestadísticos.

3.3.3.1. *Distribución de probabilidades de la variación espacial de los espesores de los estratos de los perfiles estratigráficos*

Para este trabajo de investigación, se estimó pertinente definir la distribución de probabilidades de la variación espacial de los espesores de los estratos de los perfiles estratigráficos, como de tipo lineal. Esta aseveración está basada en la evidencia obtenida a partir de los trabajos de exploración campo realizados en la zona de estudio (ej. Romo *et al.*, 2001, Ovando *et al.*, 2006, Mayoral *et al.*, 2006, Mendoza *et al.*, 2006, Mayoral *et al.*, 2008a, Mayoral *et al.*, 2008b), en los cuales se ha observado que: 1) los depósitos de suelo en esta región presentan una estratificación perfectamente bien definida, y 2) los espesores de los estratos siguen una tendencia lineal.



3.3.3.2. Distribución de probabilidades de la variación espacial de la velocidad de onda de cortante

Con la información disponible de la zona de estudio, se realizó un análisis estadístico de la distribución de probabilidades de la variación espacial que presenta la velocidad de onda de cortante. En la Figura 3.10 se presenta la densidad de probabilidades de la velocidad de onda de cortante, generada a partir de la información obtenida en campo para este estudio, así como, la distribución de probabilidades estimada con un modelo tipo lognormal, para cuatro diferentes profundidades. En esta figura se puede observar una buena congruencia entre los datos de campo y el modelo. Por lo tanto se puede concluir que este parámetro observa una distribución de probabilidades de tipo lognormal. Este tipo de distribución ya se había observado por otros investigadores en estudios realizados en otras partes del mundo (ej. EPRI, 1993; Bazzurro y Cornell, 2004; Holzer *et al.*, 2005).

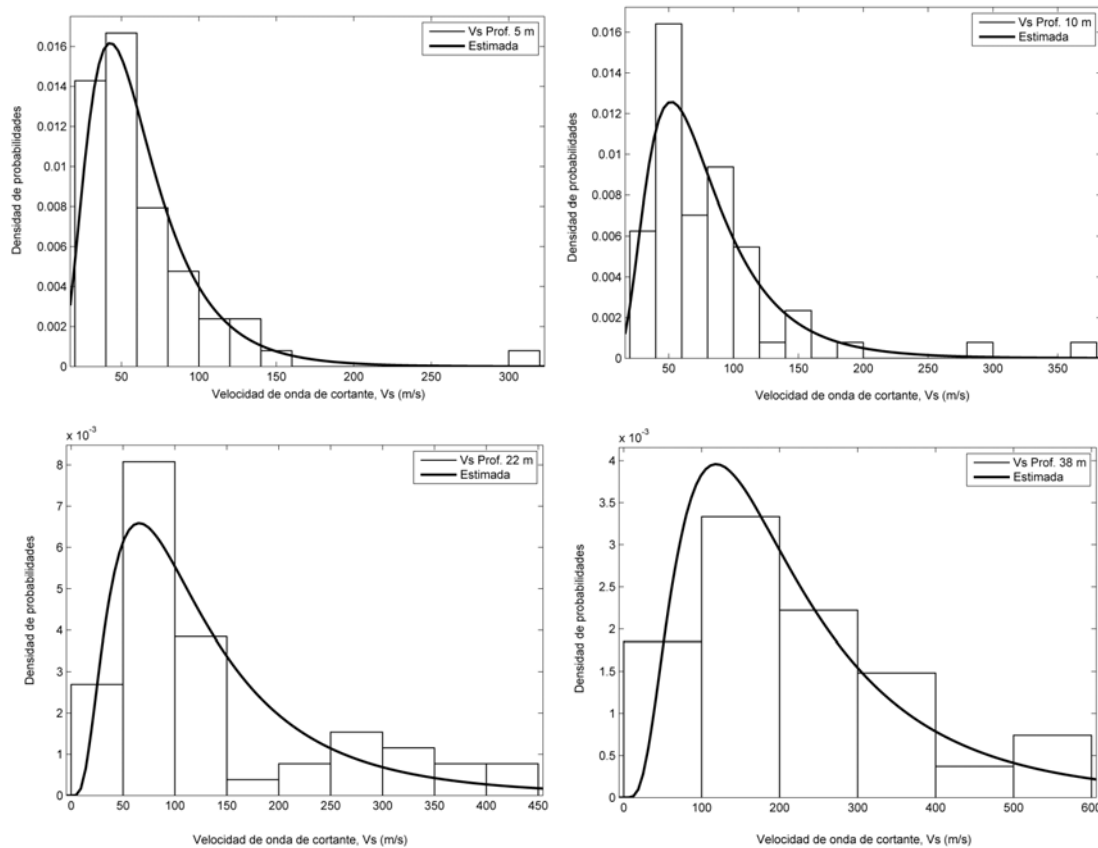


Figura 3.10. Densidad de probabilidades obtenida a partir de la información de campo y distribución de probabilidades estimada con un modelo tipo lognormal



3.3.3.3. *Distribución de probabilidades de la variación espacial del índice de plasticidad*

El índice de plasticidad es un parámetro que influye en el comportamiento dinámico de los geomateriales, de tal manera que las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento, para este trabajo de investigación, se determinaron a partir del índice de plasticidad de los geomateriales encontrados en el área de interés. Con base en la información disponible para la zona de estudio, se realizó un análisis estadístico de la distribución de probabilidades de la variación espacial que presenta el índice de plasticidad, PI. En la Figura 3.11 se muestra la densidad de probabilidades del índice de plasticidad, generada a partir de los datos de laboratorio, obtenidos de muestras alteradas e inalteradas, recuperadas en el zona investigada, y la distribución de probabilidades estimada con un modelo tipo normal, para cuatro diferentes profundidades. En esta figura se puede apreciar una buena correspondencia entre los datos de campo y el modelo, por lo tanto se puede concluir que este parámetro presenta una distribución de probabilidades de tipo normal.

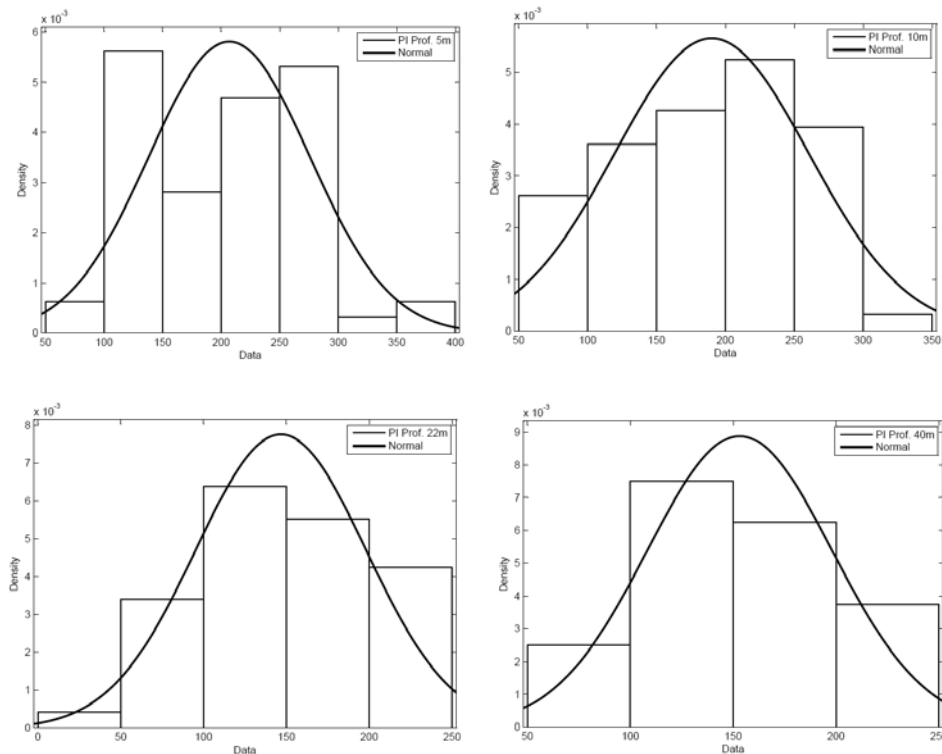


Figura 3.11. Densidad de probabilidades obtenida a partir de la información de laboratorio y distribución de probabilidades estimada con un modelo tipo normal



3.3.4. Perfiles estratigráficos virtuales

Con la información de los espesores de los estratos, la identificación del material al que corresponden, y usando las técnicas geoestadísticas descritas en los párrafos anteriores, implementadas en el programa GS+ de Gama Design Software, V.9, 2008, se definieron 2501 perfiles estratigráficos virtuales, en cuya estimación, se utilizó la malla que se presenta en la Figura 3.7. Para tal propósito, se consideró una distribución de tipo lineal, por ser ésta la más representativa para este parámetro, y la técnica de interpolación kriging ordinario, ya que su desarrollo está basado en una sola variable. Los resultados permitieron identificar tanto el espesor del estrato como el tipo de material que lo conforma a lo largo y ancho de la zona de estudio. A manera de ejemplo, en la Figura 3.12 se puede observar la distribución del espesor del estrato cinco que corresponde a una arcilla.

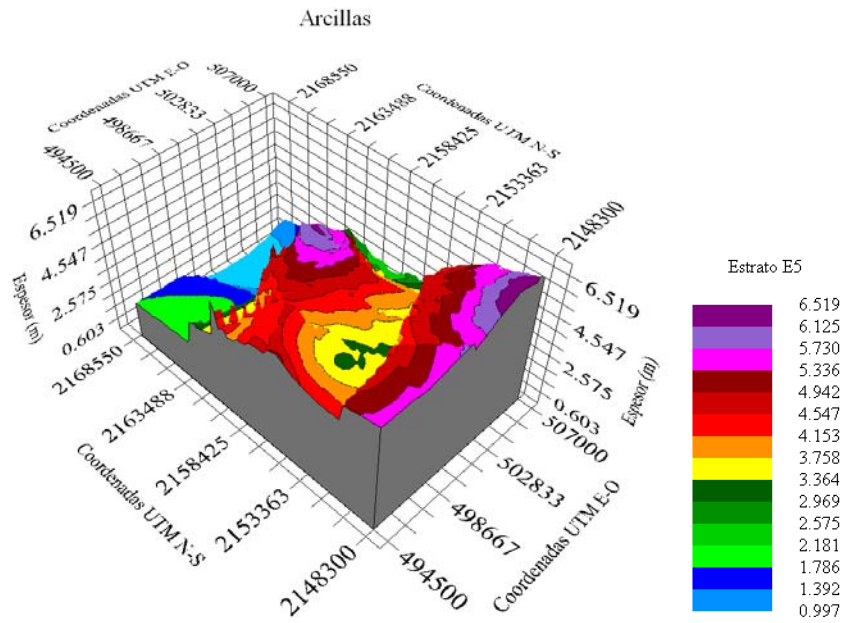
A partir de los resultados obtenidos, se pudo observar que el máximo espesor de los estratos arcillosos encontrados en la zona de estudio es de aproximadamente 34.60 m y se ubica en la porción Suroeste de la región observada. Mientras que, el espesor más delgado de arcilla que se encontró es de 0.80 m. Por otro lado, los espesores de los estratos de arenas y limos oscilan entre un rango de 0.70 m a 10.50 m aproximadamente. En la Tabla 3.7 se presentan siete perfiles virtuales derivados de los análisis realizados a manera de ejemplo.

3.3.5. Perfiles de velocidad de onda de cortante virtuales

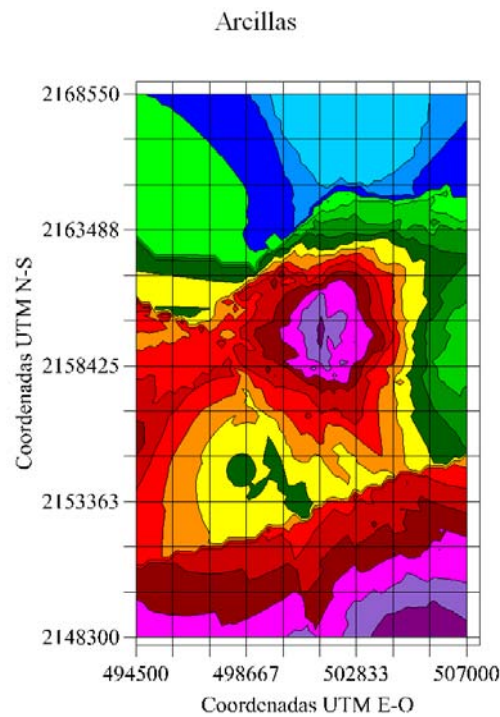
Con la información que se tiene de la velocidad de onda de cortante y utilizando técnicas geoestadísticas se generaron 2501 perfiles de velocidad de onda de cortante virtuales, empleando la técnica de interpolación kriging ordinario, implementada en el programa GS+ de Gama Design Software, V.9, 2008, considerando que este parámetro presenta una distribución de tipo lognormal. La ubicación de los puntos virtuales atiende a la malla de interpolación que se presentó en la Figura 3.7. Para obtener un perfil de velocidades de onda de cortante continuo desde la superficie hasta una profundidad de 50 m, se realizaron interpolaciones geoestadísticas a cada metro. En las Figuras 3.13a a 3.13e se presenta la



distribución de la velocidad de onda de cortante para la profundidad de 1 m, 10 m, 20 m, 30 m y 52 m empleando la técnica kriging ordinario.



Modelo tridimensional



Modelo bidimensional

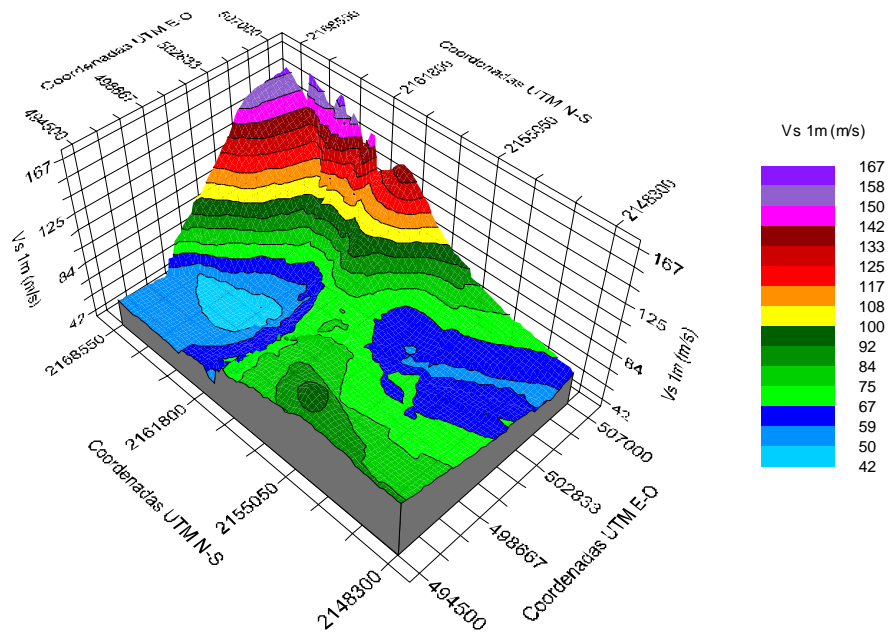
Figura 3.12. Predicción de la distribución del espesor del quinto estrato (arcilla) empleando la técnica de kriging ordinario



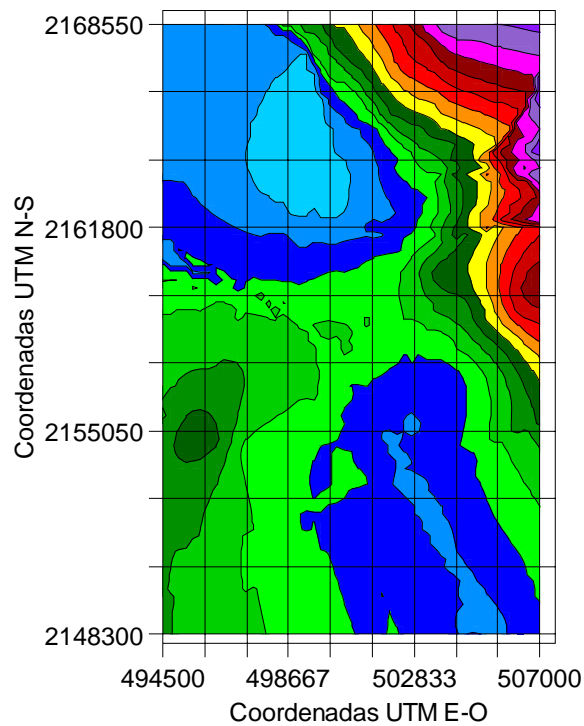
Tabla 3.7. Perfiles virtuales generados con técnicas geoestadísticas

Id. P. V.	1		2		3		4		5		6		7	
Coord. UTM, X-Y	497000		497000		497000		497000		497000		497000		497000	
	2153550		2153800		2154050		2154300		2154550		2154800		2155050	
Estrato	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)	Mat.	Esp. (m)
1	2.0	0.9	2.0	0.9	2.0	1.1	2.0	1.4	1.0	1.8	1.0	2.3	1.0	2.9
2	1.0	30.7	1.0	30.4	1.0	30.5	1.0	31.0	2.0	1.2	2.0	1.2	2.0	1.1
3	2.0	1.2	2.0	1.2	2.0	1.2	2.0	1.2	1.0	15.9	1.0	6.9	1.0	4.7
4	1.0	6.9	1.0	7.0	1.0	7.1	1.0	7.1	1.0	8.0	1.0	9.0	1.0	9.4
5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.6	2.0	1.5
6	1.0	3.4	1.0	3.2	1.0	3.1	1.0	3.0	1.0	2.9	1.0	2.8	1.0	2.7
7	1.0	3.7	1.0	3.7	1.0	3.7	1.0	3.7	1.0	3.8	1.0	3.8	1.0	3.8
8	2.0	1.1	2.0	1.1	2.0	1.1	2.0	1.1	2.0	1.1	2.0	1.1	2.0	1.1
9	1.0	5.3	1.0	5.5	1.0	5.8	1.0	6.0	1.0	6.3	1.0	5.7	1.0	5.0
10	1.0	7.9	1.0	8.2	1.0	8.7	1.0	9.4	1.0	5.4	1.0	2.5	2.0	1.5
11	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.6
12	2.0	0.5	2.0	0.5	2.0	0.6	2.0	0.6	2.0	0.6	2.0	0.7	2.0	0.8
13	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1
14	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1	2.0	0.1
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.4	1.0	0.4
Prof. (m)		65.2		65.3		66.3		67.9		50.3		39.6		36.6

En las Figuras 3.14a a 3.14e se presentan los perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 1, 11, 21, 31 y 41, cada columna consta de 61 perfiles virtuales, observándose una variación congruente con los datos estadísticos proporcionados para la predicción de estos perfiles.

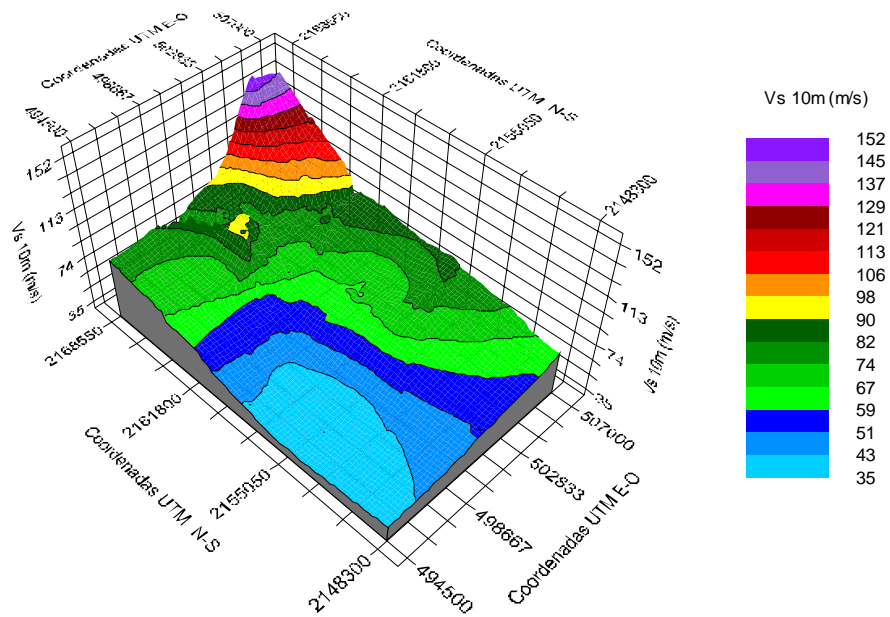


Modelo tridimensional

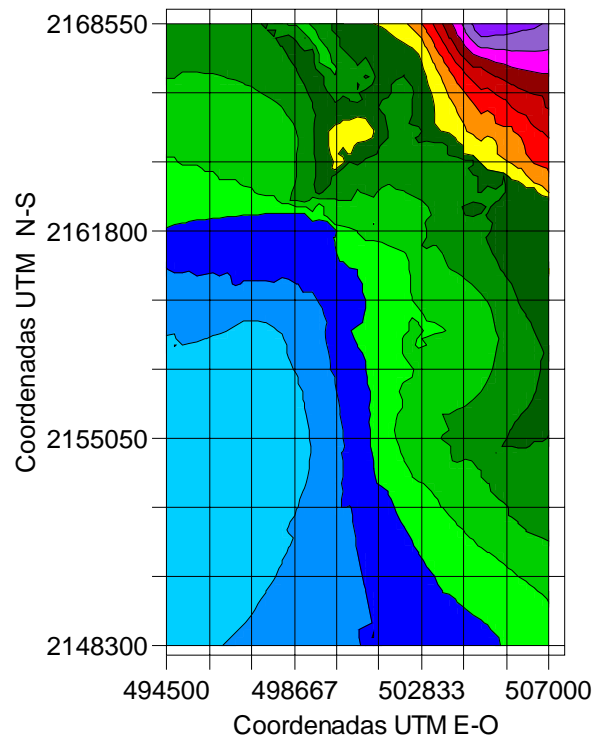


Modelo bidimensional

Figura 3.13a. Predicción de la distribución de velocidades de onda de cortante empleando la técnica de kriging ordinario a la profundidad de 1 m

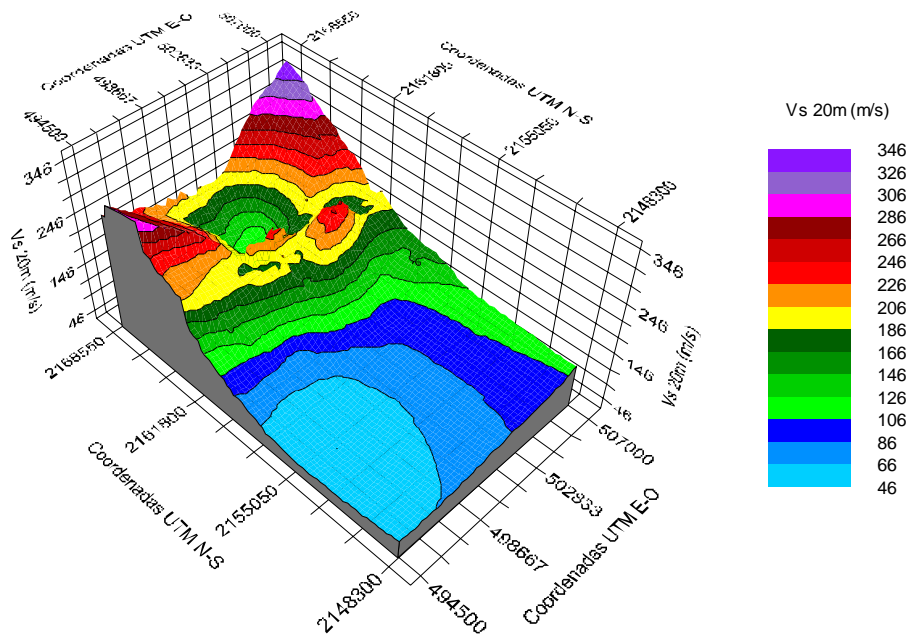


Modelo tridimensional

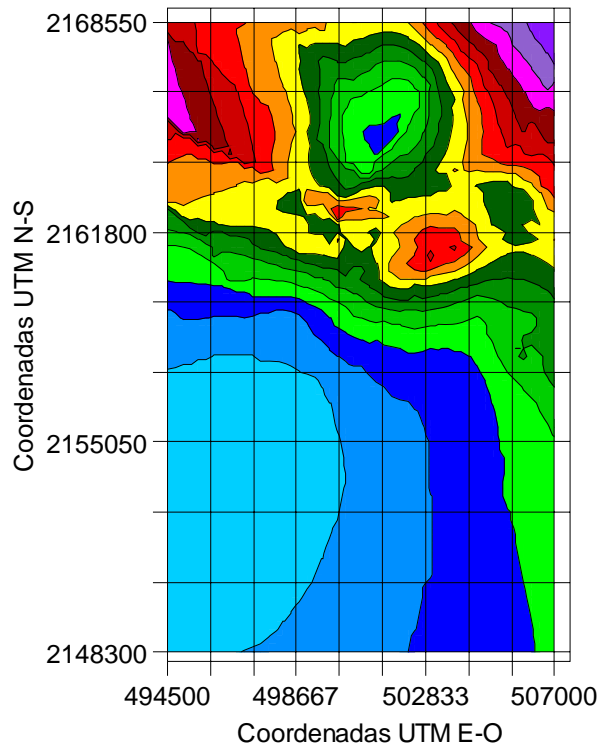


Modelo bidimensional

Figura 3.13b. Predicción de la distribución de velocidades de onda de cortante empleando la técnica de kriging ordinario a la profundidad de 10 m

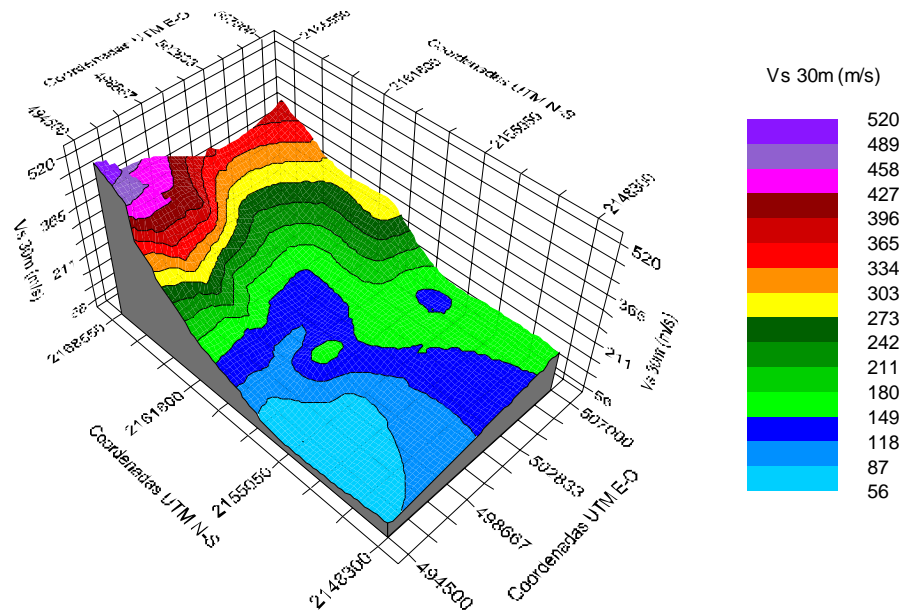


Modelo tridimensional

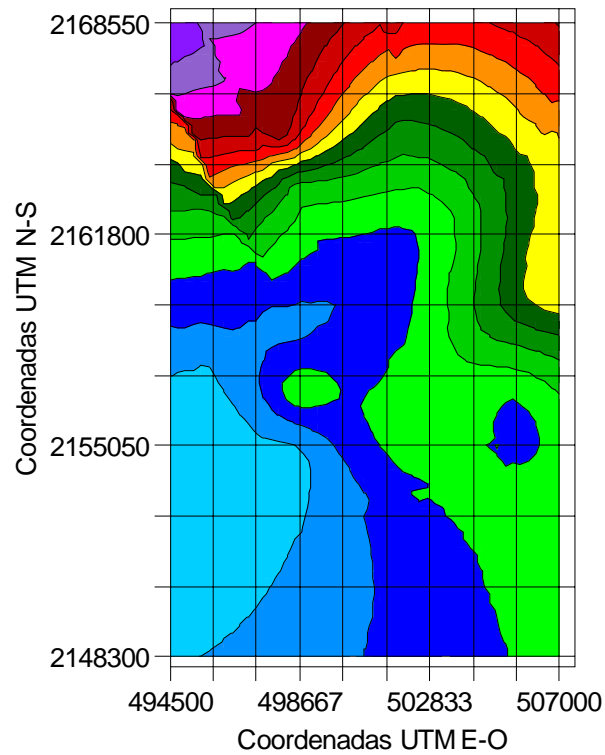


Modelo bidimensional

Figura 3.13c. Predicción de la distribución de velocidades de onda de cortante empleando la técnica de kriging ordinario a la profundidad de 20 m

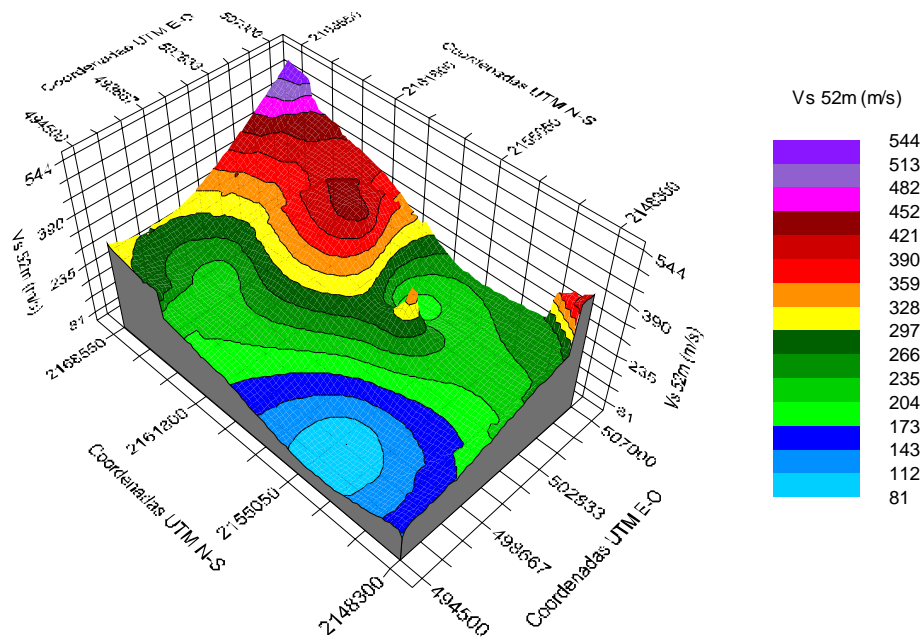


Modelo tridimensional

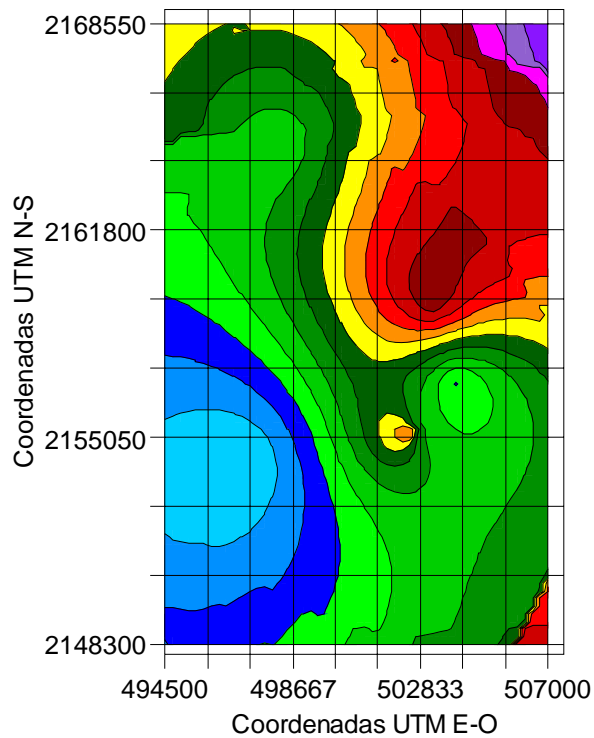


Modelo bidimensional

Figura 3.13d. Predicción de la distribución de velocidades de onda de cortante empleando la técnica de kriging ordinario a la profundidad de 30 m



Modelo tridimensional



Modelo bidimensional

Figura 3.13e. Predicción de la distribución de velocidades de onda de cortante empleando la técnica de kriging ordinario a la profundidad de 52 m

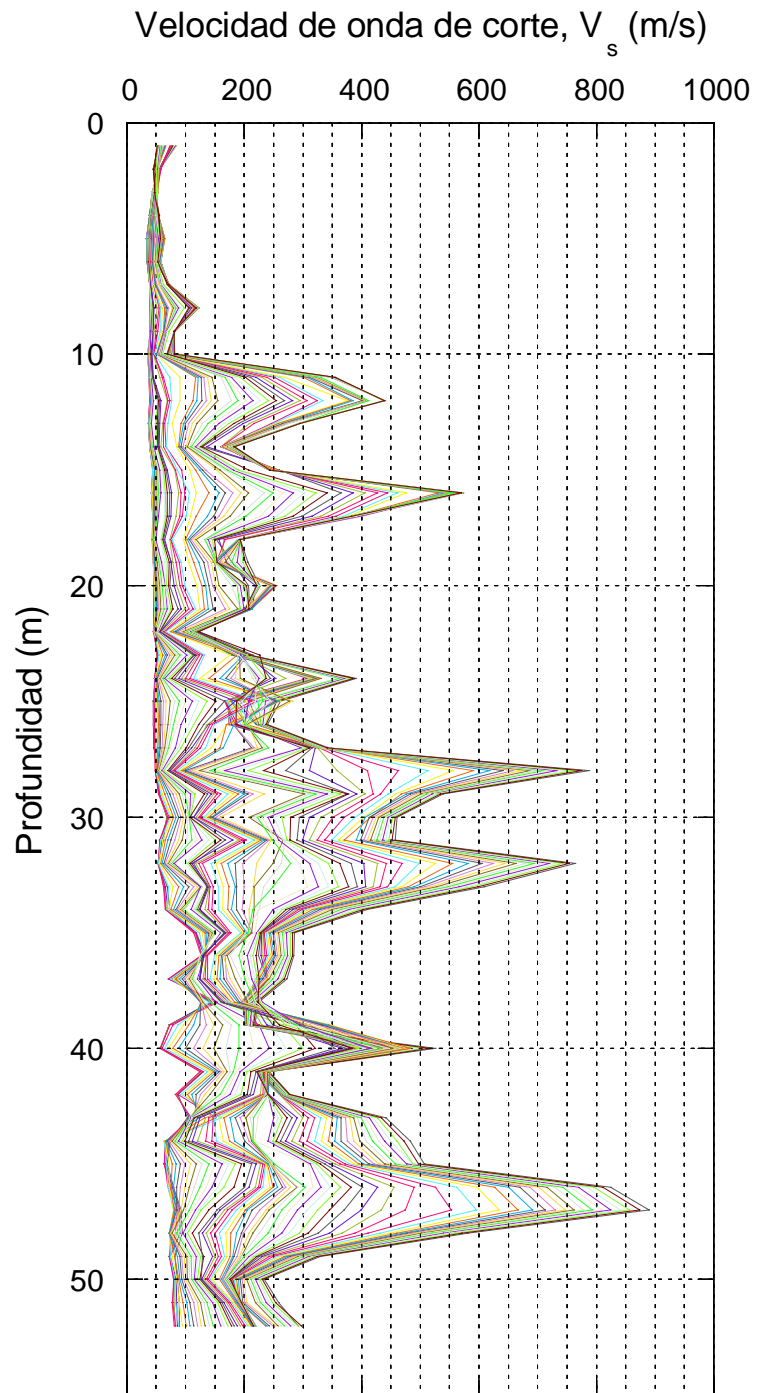


Figura 3.14a. Perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 1 (61 puntos virtuales)

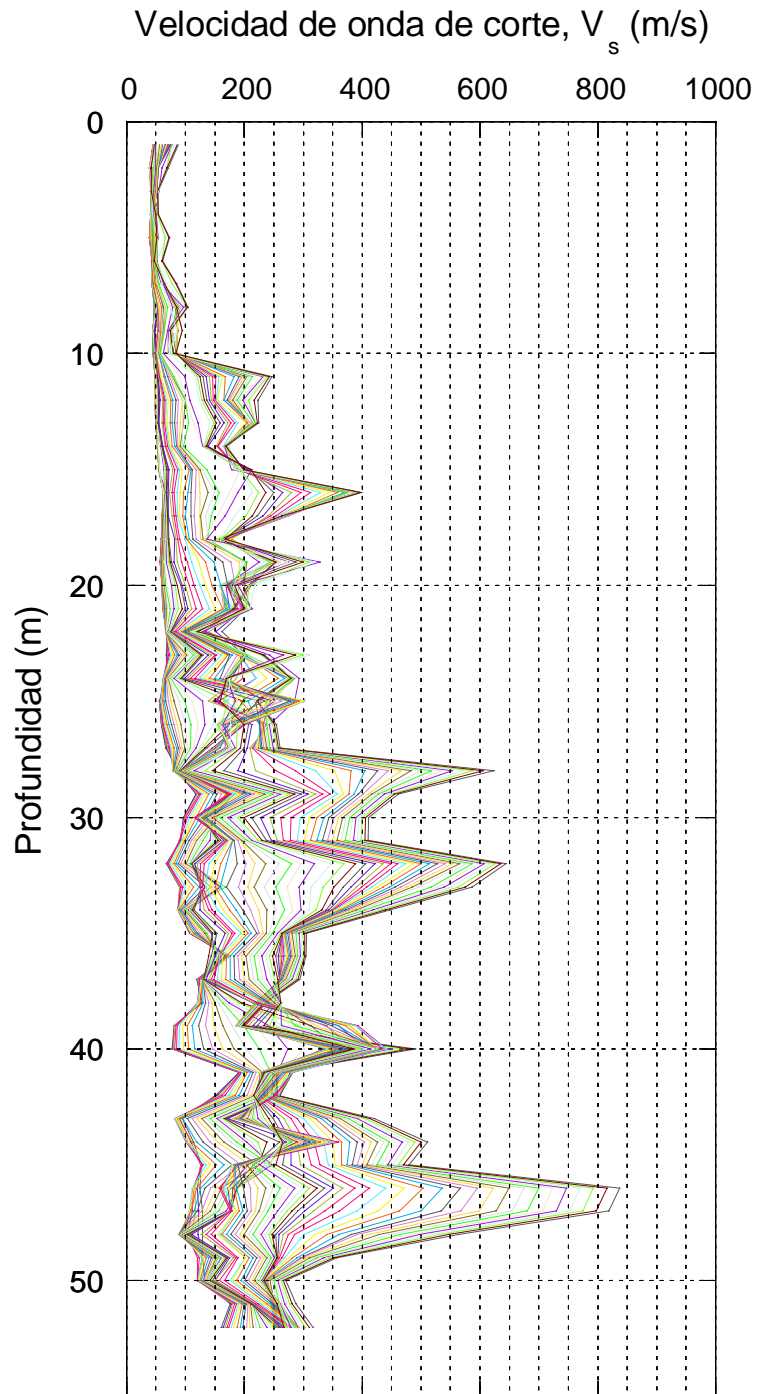


Figura 3.14b. Perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 11 (61 puntos virtuales)

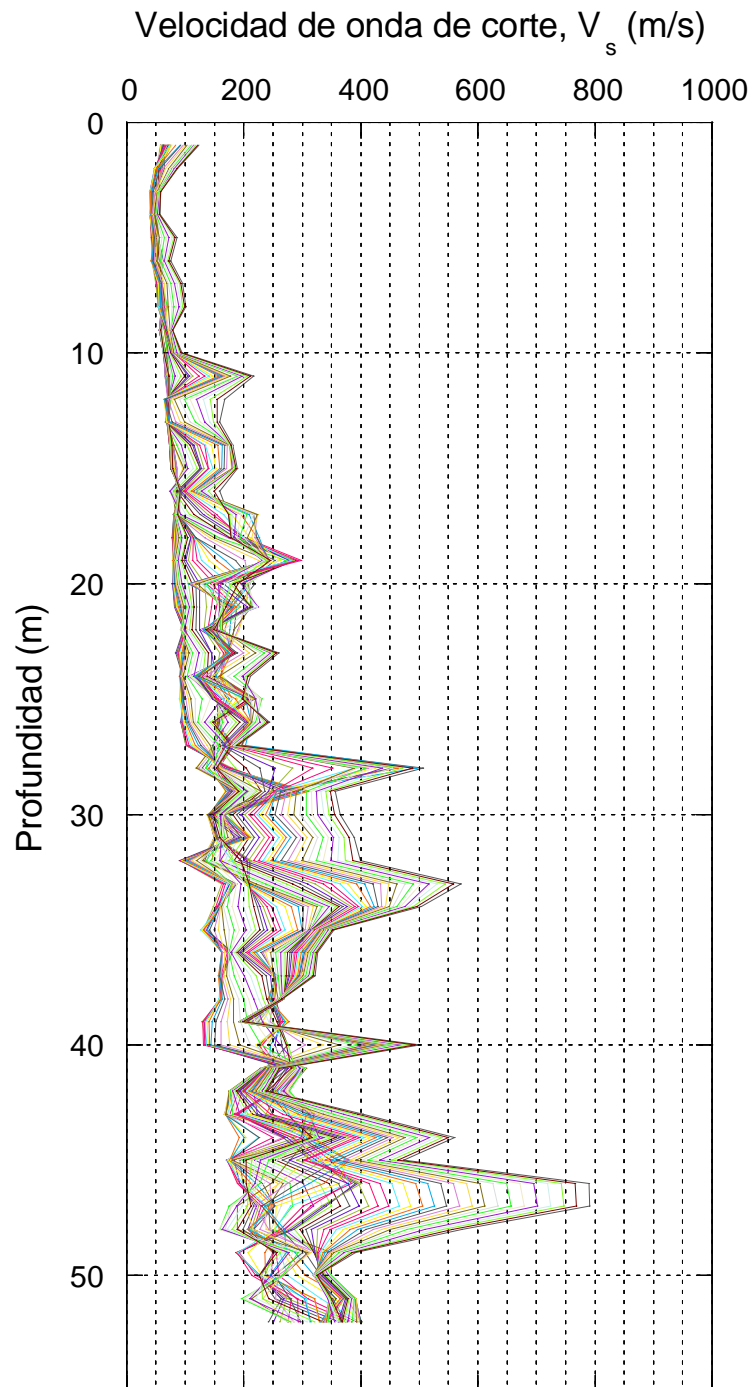


Figura 3.14c. Perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 21 (61 puntos virtuales)

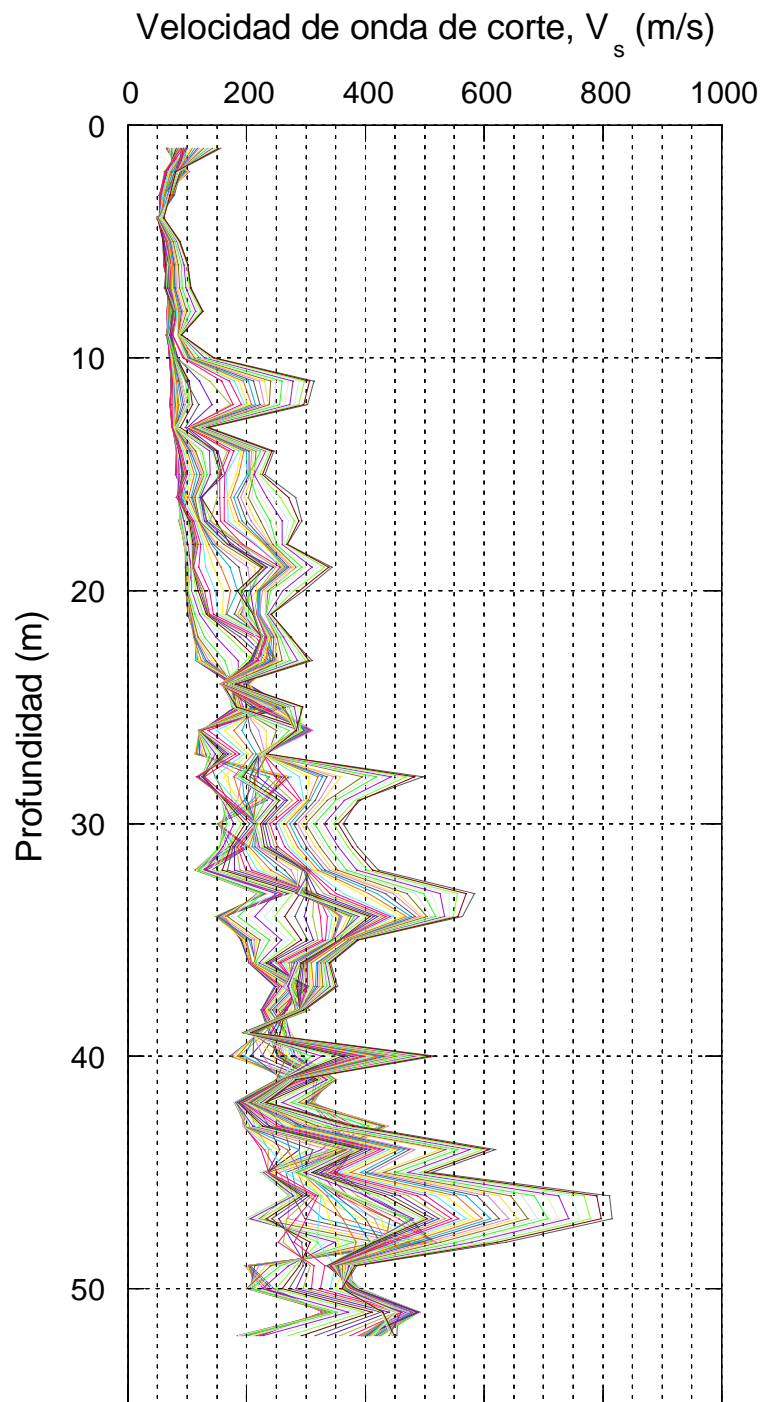


Figura 3.14d. Perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 31 (61 puntos virtuales)

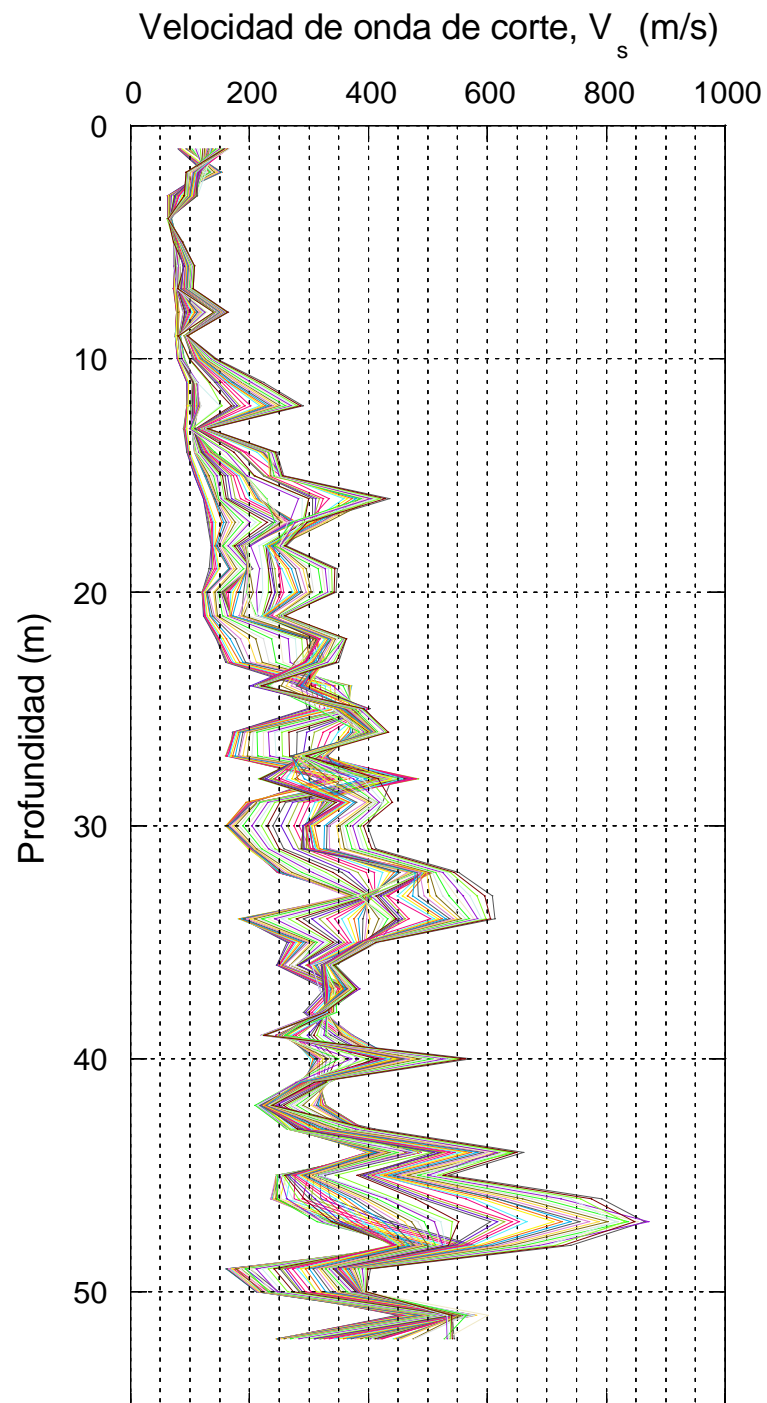


Figura 3.14e. Perfiles de velocidad de onda de cortante de la columna 41 (61 puntos virtuales)



3.3.6. Curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento

3.3.6.1. Modelo de Darendeli y Stokoe (2001)

Las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento se pueden obtener de pruebas de laboratorio en muestras de suelo inalteradas o a través de modelos empíricos en función del tipo de material y de otras variables. Darendeli y Stokoe en el 2001, desarrollaron un modelo empírico a partir del modelo propuesto por Hardin y Drnevich (1972), para generar curvas de rigidez y amortiguamiento, que toman en cuenta los efectos de la presión de confinamiento, σ'_0 , el índice de plasticidad, PI, la relación de sobreconsolidación, OCR, la frecuencia, f , y el número de ciclos de carga, N . Las expresiones que definen este modelo son las siguientes:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (3.10)$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 PI(OCR)^{\phi_3}) \sigma'^{\phi_4} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \lambda_{\min} + b \left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{0.1} \lambda_{msg} \quad (3.12)$$

$$\lambda_{msg} = c_1 + \lambda_{msg,a=1.0} + c_2 \lambda_{msg,a=1.0}^2 + c_3 \lambda_{msg,a=1.0}^3 \quad (3.13)$$

$$\lambda_{msg,a=1.0} = \frac{100}{\pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\gamma^2} - 2 \right] \quad (3.14)$$

Donde $a = 0.9190$ (coeficiente de curvatura), $b=0.620$ (coeficiente de escala), γ es la deformación angular (%), y γ_r es la deformación angular de referencia, σ'_0 = presión efectiva

de confinamiento (atm), λ_{\min} es la relación de amortiguamiento a pequeñas deformaciones, λ_{msg} es el amortiguamiento Masing, $\lambda_{\text{msg},a=1.0}$ es el amortiguamiento para $a=1.0$.

Coefficientes del modelo:

$$c_1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2523$$

$$c_2 = 0.0805a^2 - 0.0710a - 0.0095$$

$$c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003$$

$$\phi_1 = 0.0352, \phi_2 = 0.001, \phi_3 = 0.3246, \phi_4 = 0.3483, \phi_6 = 0.801, \phi_7 = 0.0129, \phi_8 = -0.107, \phi_9 = -0.289$$

Los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 (Darendeli, 2001) son función del coeficiente de curvatura, Figura 3.15, que permiten definir el amortiguamiento Masing del modelo, a partir de una función polinomial, cuyo valor depende del amortiguamiento Masing obtenido con un coeficiente de curvatura igual a uno, ecuación 3.13.

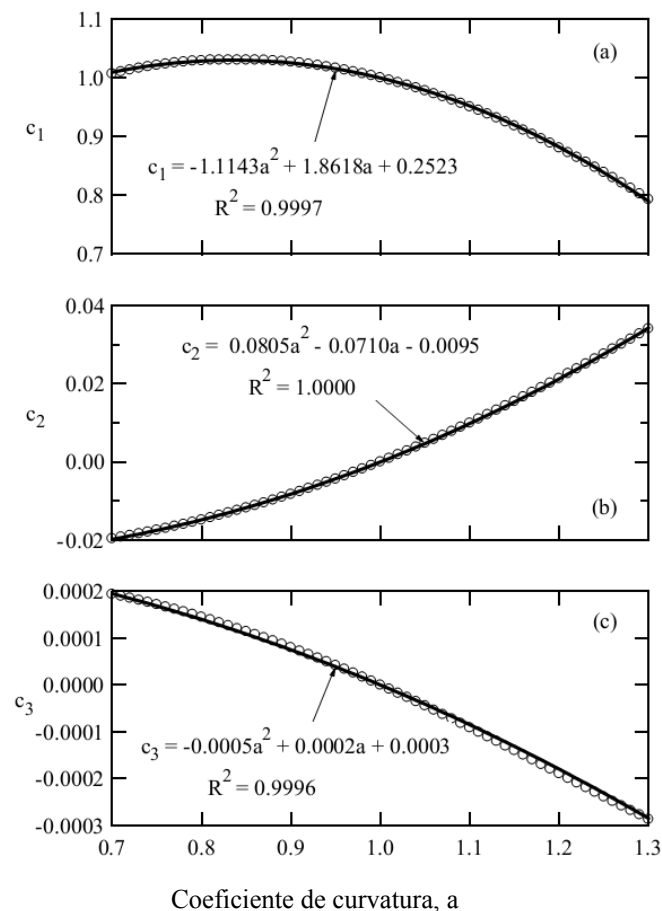


Figura 3.15. Variación de c_1 , c_2 y c_3 con el coeficiente de curvatura (Darendeli, 2001)

Los coeficientes $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_6, \phi_7, \phi_8, \phi_9$ (Darendeli, 2001) se obtuvieron de un análisis estadístico usando el método Bayesiano de primer orden y segundo momento, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores de los coeficientes del modelo de Darendeli (2001)

Coefficientes	Media	Varianza
ϕ_1	3.52E-02	9.99E-07
ϕ_2	1.01E-03	4.16E-09
ϕ_3	3.25E-01	2.85E-03
ϕ_4	3.48E-01	2.20E-04
ϕ_5	9.19E-01	6.78E-05
ϕ_6	8.01E-01	1.73E-03
ϕ_7	1.29E-02	3.82E-06
ϕ_8	-1.07E-01	2.49E-03
ϕ_9	-2.89E-01	4.96E-04
ϕ_{10}	2.92E-01	7.66E-04
ϕ_{11}	6.33E-01	2.23E-04
ϕ_{12}	-5.66E-03	5.02E-06
ϕ_{13}	-4.23E+00	5.38E-03
ϕ_{14}	3.62E+00	7.05E-03
ϕ_{15}	-5.00E+00	9.00E+00
ϕ_{16}	-2.50E-01	1.06E-03
ϕ_{17}	5.62E+00	1.53E-02
ϕ_{18}	2.78E+00	3.86E-03

Para este trabajo de investigación se consideró pertinente el empleo de las expresiones propuesta por Darendeli y Stokoe, ya que éstas toman en cuenta explícitamente los factores más importantes que pueden influenciar el comportamiento dinámico de los geomateriales, y son aplicables para arenas, limos y arcillas. Para la determinación de la curvas de rigidez y amortiguamiento se tomó la relación de sobreconsolidación, OCR, igual a 1, ya que en general la región de estudio está ubicada en la zona virgen del ex lago de Texcoco, en donde se ha visto que el proceso de sobreconsolidación sólo se ha presentado en los primeros 4 metros, por lo que se estima que no habrá cambios significativos en la respuesta dinámica debido a la influencia de esta capa sobreconsolidada. Por otro lado, σ'_0 , se estimó de



acuerdo a la profundidad para el cual se quiere caracterizar las propiedades dinámicas. Fijándose para este estudio el valor de $f=1\text{ Hz}$ y $N=10$. Dejando la definición de las curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento, únicamente, en función del índice de plasticidad.

En la Figura 3.16 se presentan las curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento, para una arcilla recuperada a 51.90 m de profundidad, que exhibe un índice de plasticidad de 51 %, obtenida en el sitio TXS1 localizado en la zona de interés. En ésta se puede observar que el ajuste realizado a los datos experimentales de $G/G_{\text{máx}} - \gamma$, empleando el modelo propuesto por Darendeli y Stokoe (2001), para un valor fijo de la deformación de referencia, γ_r , correspondiente al 50 % de la degradación del módulo de rigidez, se obtuvieron resultados congruentes con el módulo de rigidez experimental, mientras que, para la curva de $\lambda - \gamma$, se obtuvo un ajuste bastante cercano a los datos experimentales, sin llegar a reproducirse el comportamiento de la relación de amortiguamiento experimental. En esta figura también se incluyeron las curvas generadas con las expresiones propuestas por Romo (1995), definiendo un comportamiento semejante al de Darendeli y Stokoe. En las Figuras 3.17a a 3.17c se presentan 15 curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante de geomateriales recuperados a diferentes profundidades, en las cuales se observa que el ajuste realizado a los datos experimentales, empleando el modelo propuesto por Darendeli y Stokoe, se obtuvieron resultados congruentes con el módulo de rigidez experimental. Por lo tanto en este trabajo de investigación se ha considerado adecuada la utilización del modelo propuesto por Darendeli y Stokoe (2001) para caracterizar las propiedades dinámicas de los geomateriales encontrados en el sitio de estudio, ya que se ajusta razonablemente a los datos, además de que los parámetros necesarios para implementarlo se pueden obtener de manera práctica.

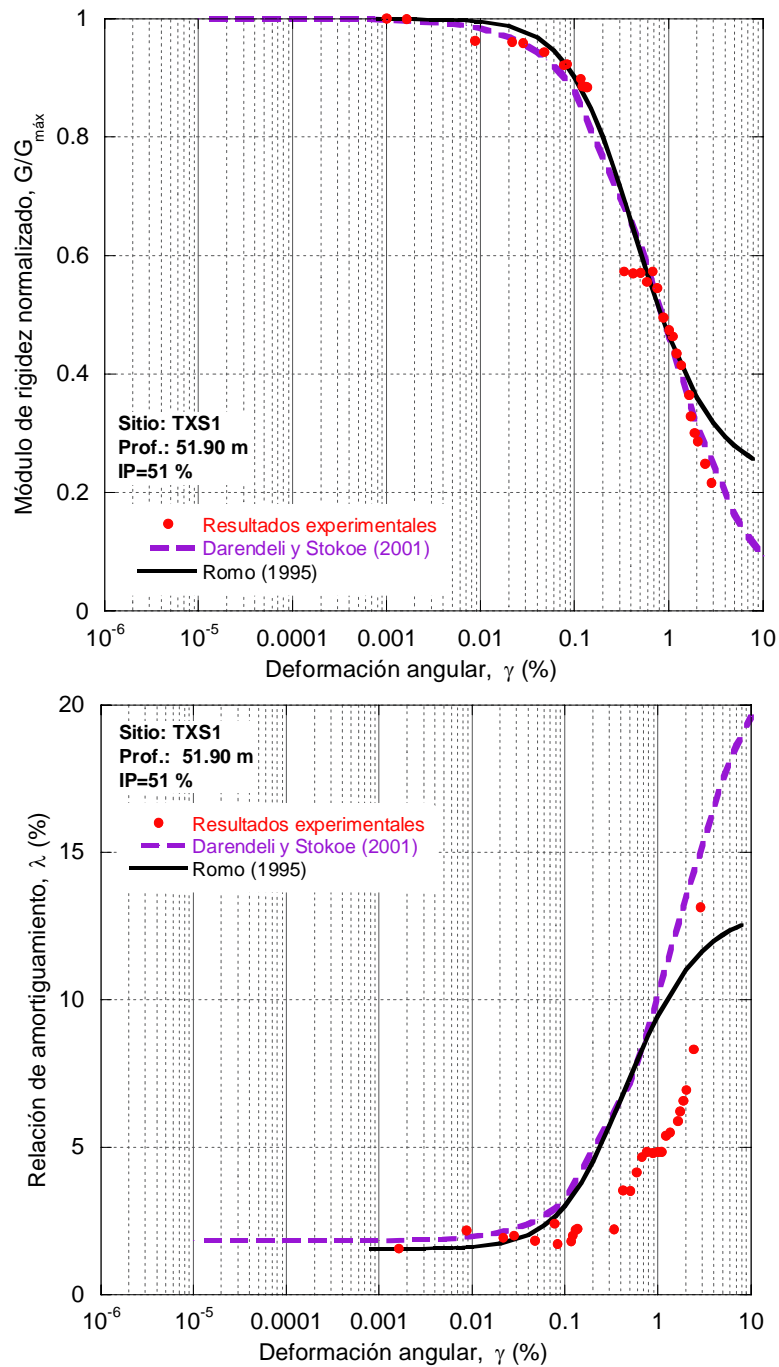


Figura 3.16. Comparación de las curvas de G/G_{\max} - γ y λ - γ obtenidas con el modelo de Darendeli y Stokoe (2001) con los resultados experimentales de laboratorio

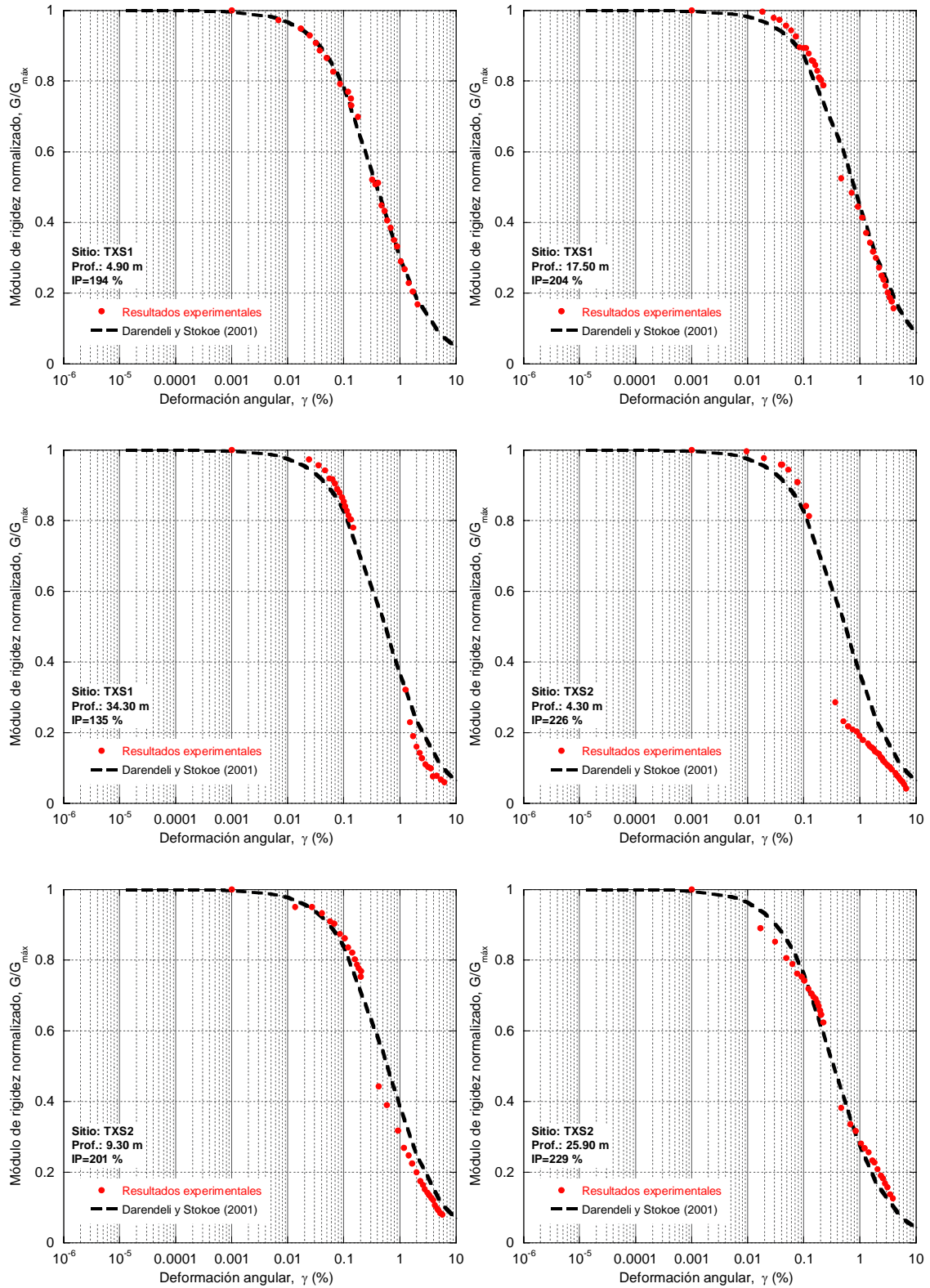


Figura 3.17a. Comparación de las curvas de $G/G_{m\acute{a}x} - \gamma$ obtenidas con el modelo de Darendeli y Stokoe (2001) con los resultados experimentales de laboratorio

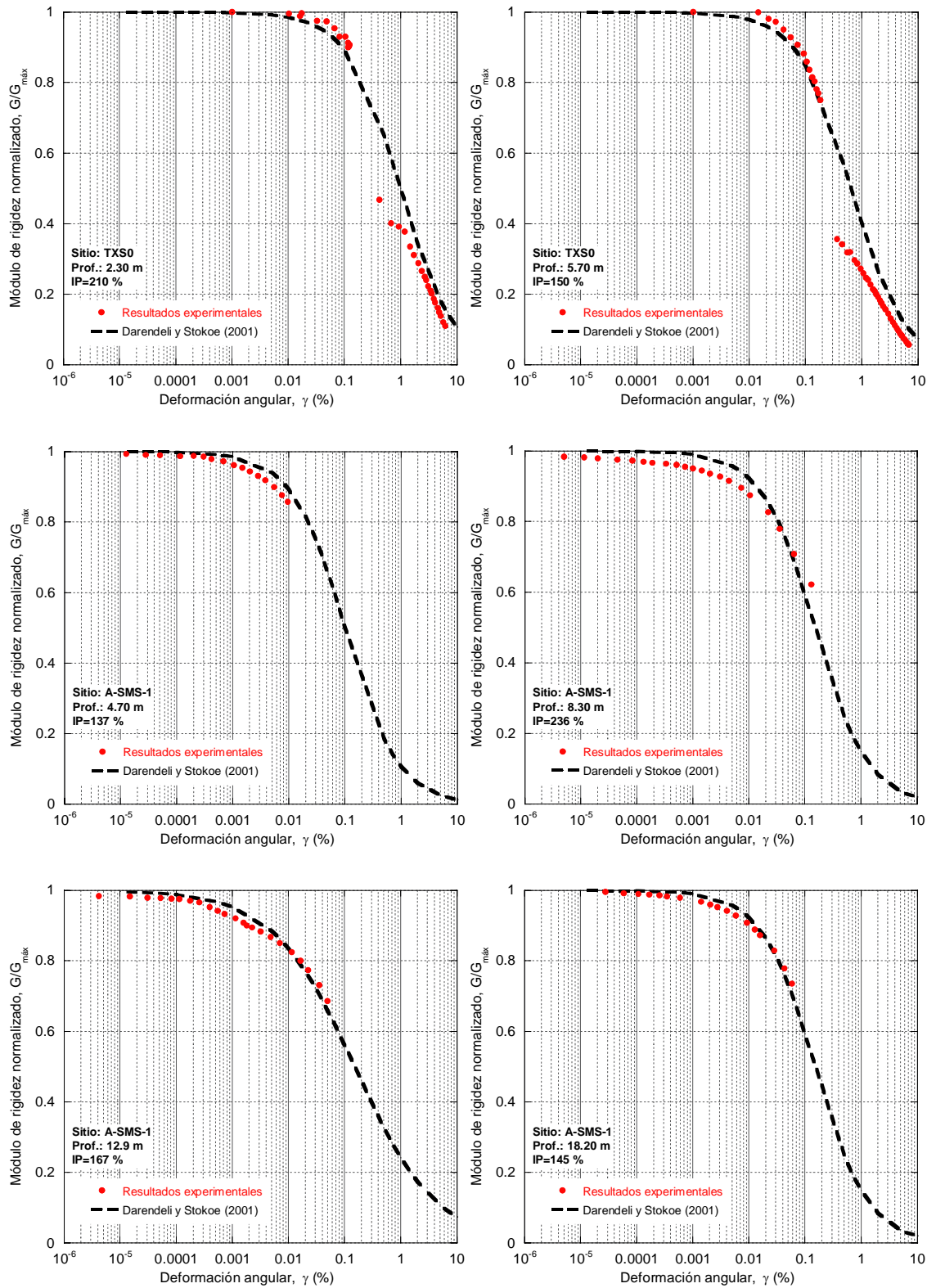


Figura 3.17b. Comparación de las curvas de $G/G_{max} - \gamma$ obtenidas con el modelo de Darendeli y Stokoe (2001) con los resultados experimentales de laboratorio

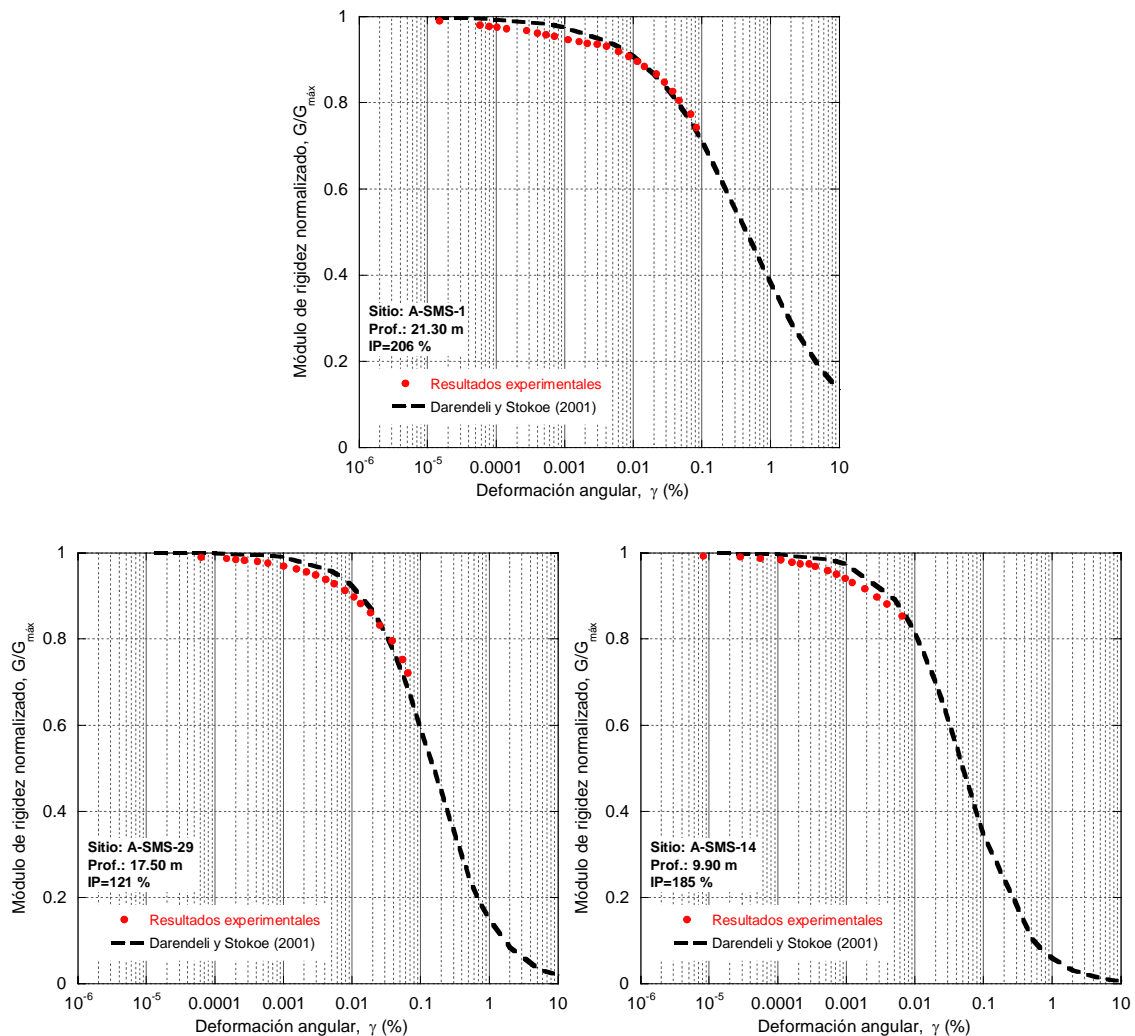


Figura 3.17c. Comparación de las curvas de $G/G_{\max} - \gamma$ obtenidas con el modelo de Darendeli y Stokoe (2001) con los resultados experimentales de laboratorio

3.3.7. Perfiles de índice de plasticidad virtuales

Para determinar las curvas de degradación del módulo de rigidez al cortante y amortiguamiento que definen el comportamiento dinámico de los geomateriales se necesita determinar el índice de plasticidad de éstos como quedó establecido en el párrafo anterior. El índice de plasticidad es un parámetro que influye fuertemente en las propiedades dinámicas de los geomateriales. En este sentido se ha visto que el comportamiento lineal de los suelos en la zona de estudio se incrementa cuando aumenta el valor del índice de



plasticidad, presentándose degradaciones pequeñas del módulo de rigidez al cortante aun a grandes deformaciones angulares. Por lo tanto, a partir de la información recabada en el laboratorio del índice de plasticidad se llevaron a cabo los análisis geoestadísticos para estimar este parámetro en los sitios en donde no se realizaron muestreos, en cuya estimación, se utilizó la malla presentada en la Figura 3.7 y se obtuvieron 2501 perfiles de índice de plasticidad virtuales. Para inferir los valores de índice de plasticidad en cada uno de los puntos virtuales se usó la técnica de interpolación kriging ordinario y se asumió una distribución de probabilidades tipo normal. Los resultados de los análisis geoestadísticos permitieron estimar de manera congruente los índices de plasticidad en lugares en donde no se tenía esta información. En las Figuras 3.18a a 3.18d se puede observar la distribución espacial del índice de plasticidad para las profundidades de 2 m, 10 m, 20 m y 31 m.

3.4. Validación del modelo geoestadístico

Para validar la información generada en este capítulo y la conveniencia del uso de técnicas geoestadísticas cuando no se tiene suficiente información del parámetro de interés, en particular de la velocidad de onda de cortante, se realizaron comparaciones de los perfiles de velocidad de onda de cortante medidas *in situ*, obtenidos de sondeos de sonda suspendida, SS, con los perfiles virtuales de velocidad de onda de cortante estimadas con técnicas geoestadísticas en puntos cercanos. Los perfiles de velocidad medidos con sonda suspendida se ubican en el área de estudio y no fueron tomados como parte de la información disponible para predecir las velocidades de onda de cortante de los perfiles virtuales. Los sitios en donde se ubican los sondeos de sonda suspendida se pueden identificar en la Figura 3.6 con la etiqueta P-55, T-42 (Mendoza *et al.*, 2006), y SEL1 (Mayoral *et al.*, 2006). Por otro lado, los perfiles virtuales más cercanos corresponden a los puntos virtuales PV7, PV310 y PV350, Figura 3.7. En las Figuras 3.19 a 3.21 se presentan las comparaciones de los perfiles de velocidades de la onda de cortante medidas *in situ* con los perfiles virtuales de velocidad de onda de cortante estimadas.

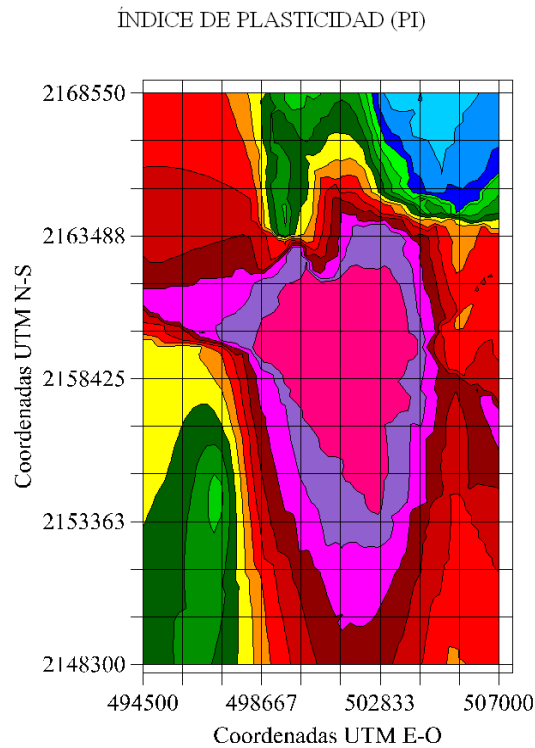
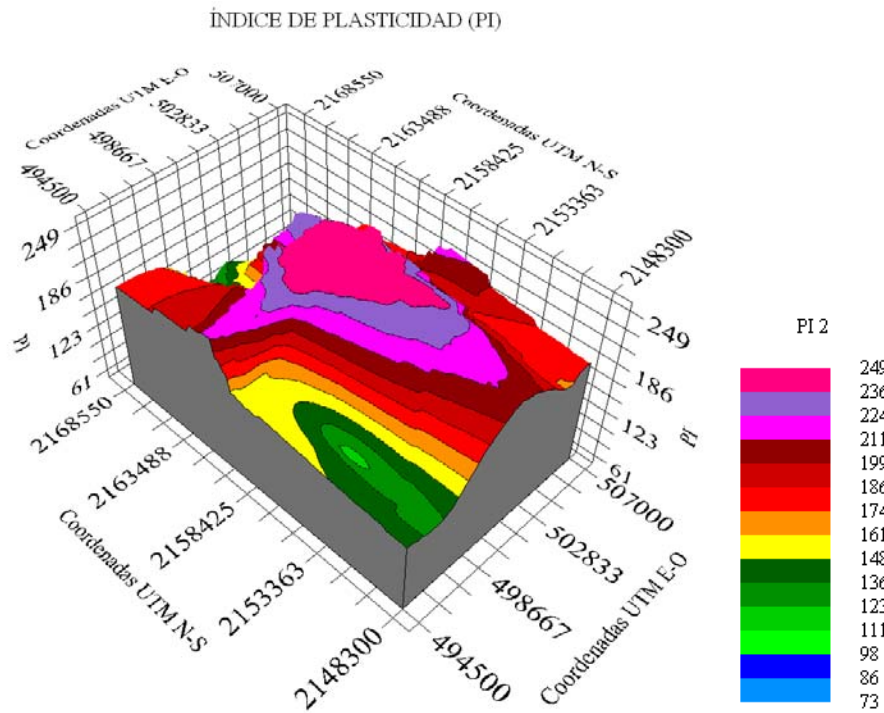
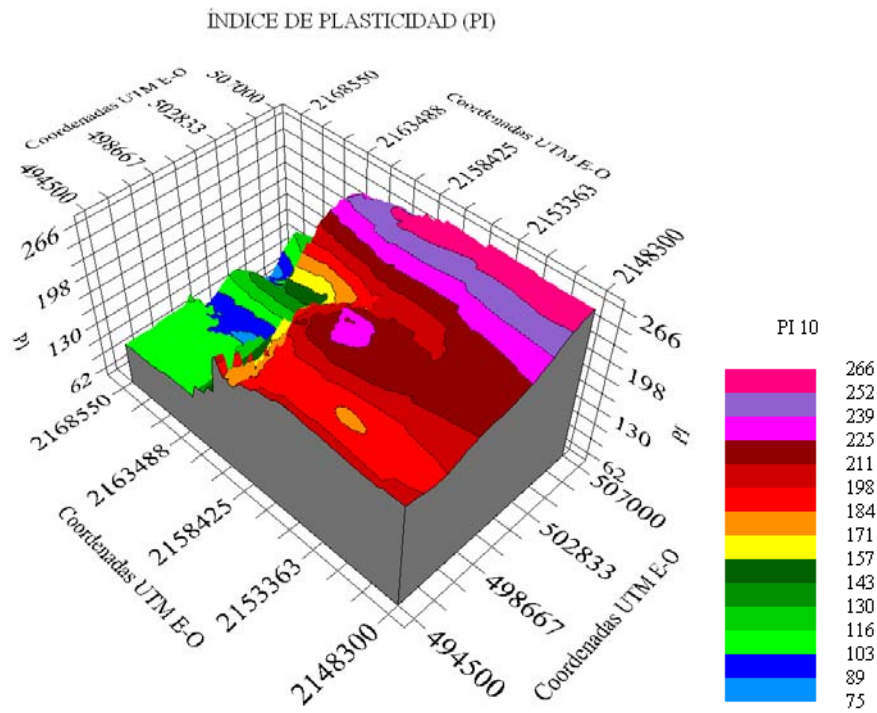
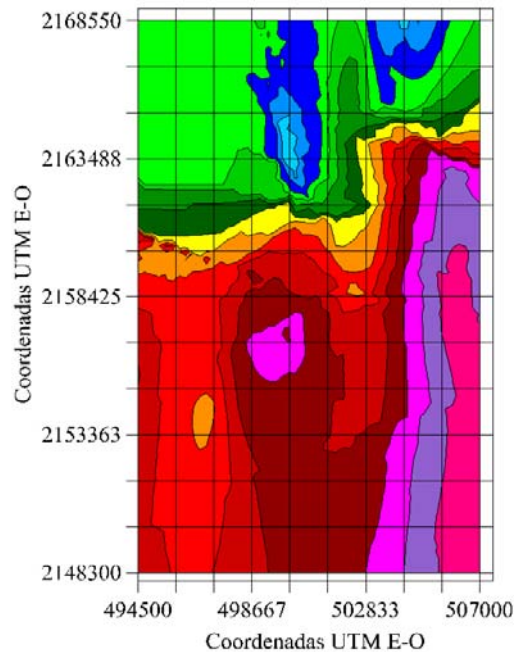


Figura 3.18a. Predicción de la distribución del índice de plasticidad a una profundidad de 2 m empleando la técnica de kriging ordinario



Modelo tridimensional

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (PI)



Modelo bidimensional

Figura 3.18b. Predicción de la distribución del índice de plasticidad a una profundidad de 10 m empleando la técnica de kriging ordinario

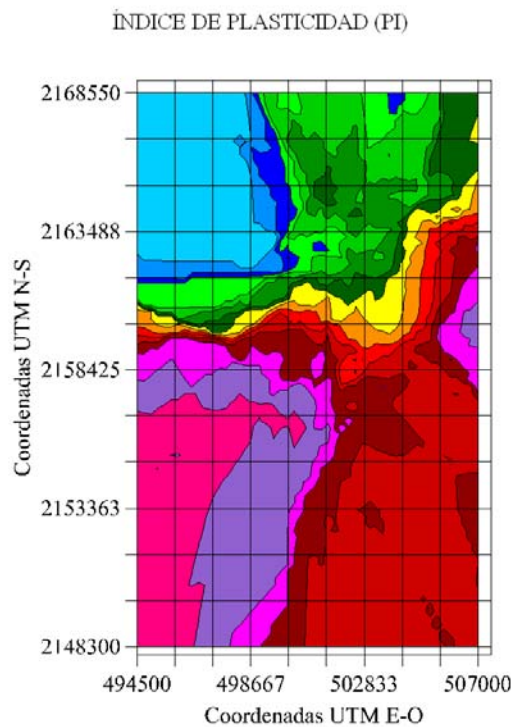
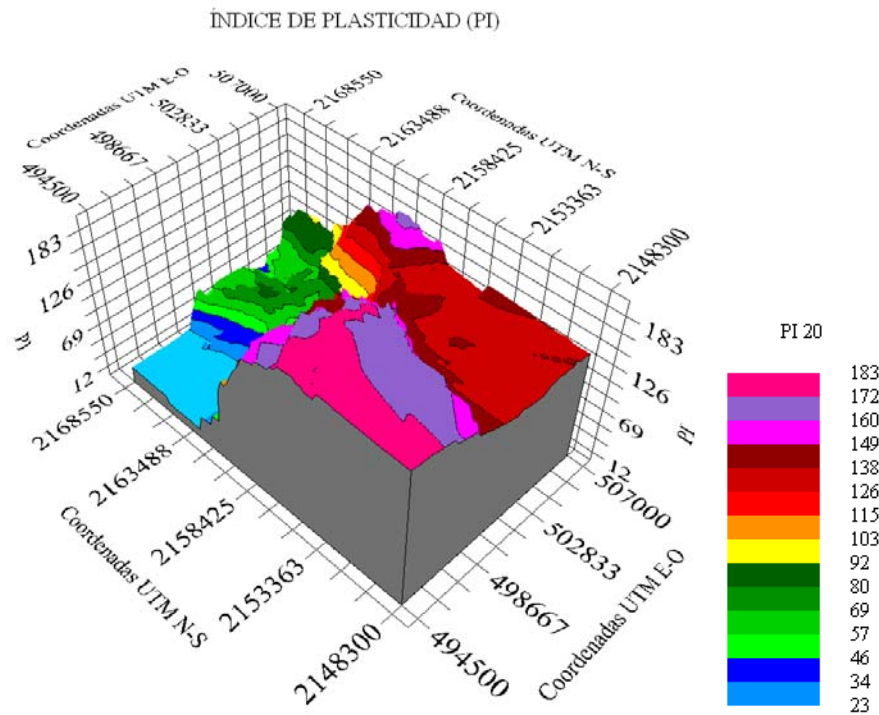
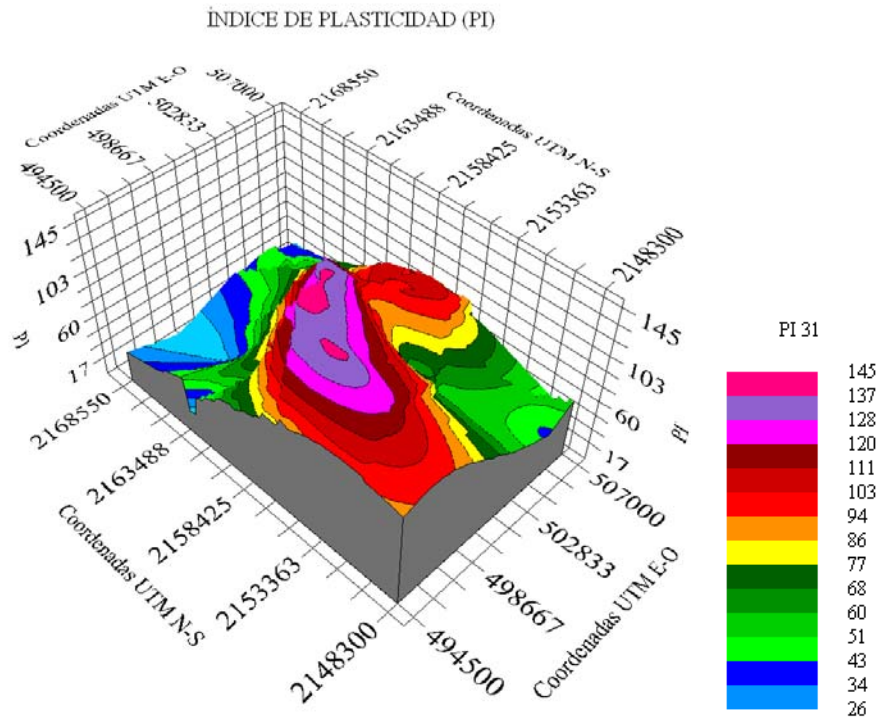


Figura 3.18c. Predicción de la distribución del índice de plasticidad a una profundidad de 20 m empleando la técnica de kriging ordinario



Modelo tridimensional

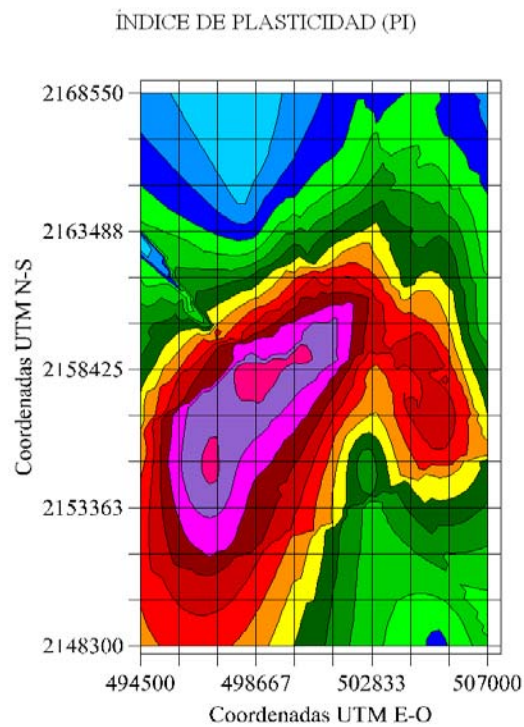


Figura 3.18d. Predicción de la distribución del índice de plasticidad a una profundidad de 31 m empleando la técnica de kriging ordinario

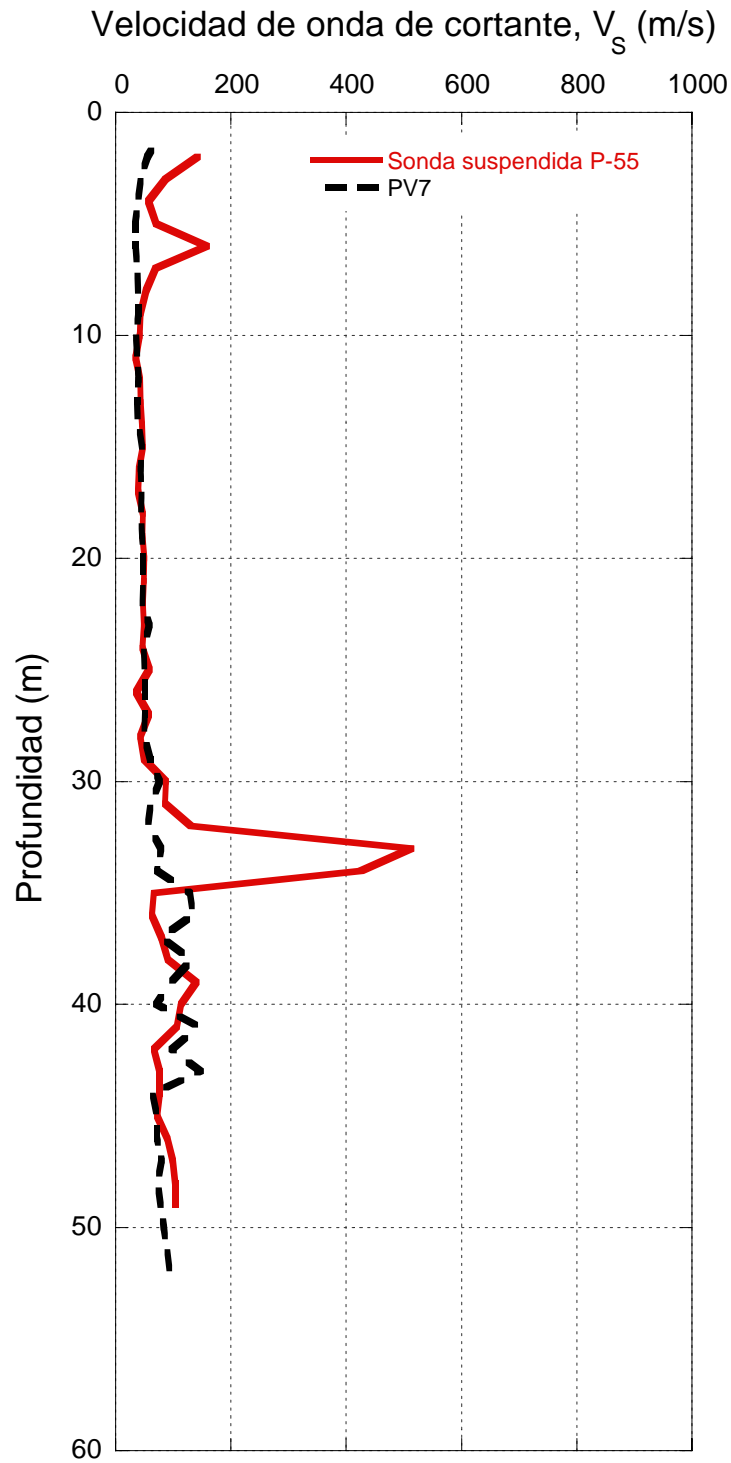


Figura 3.19. Comparación del perfil de velocidad de onda de cortante medida, P-55, con el perfil virtual de onda de cortante estimado PV7

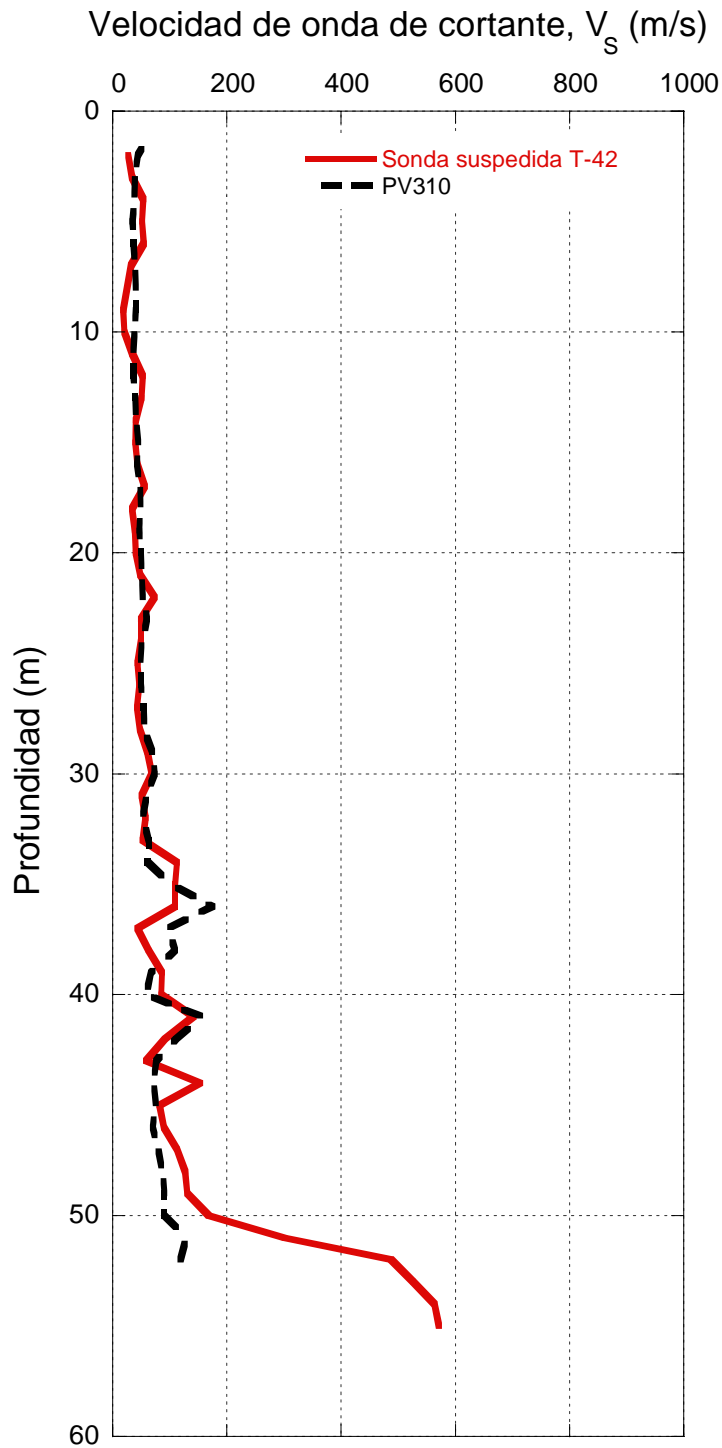


Figura 3.20. Comparación del perfil de velocidad de onda de cortante medida, T-42, con el perfil virtual de onda de cortante estimado PV310

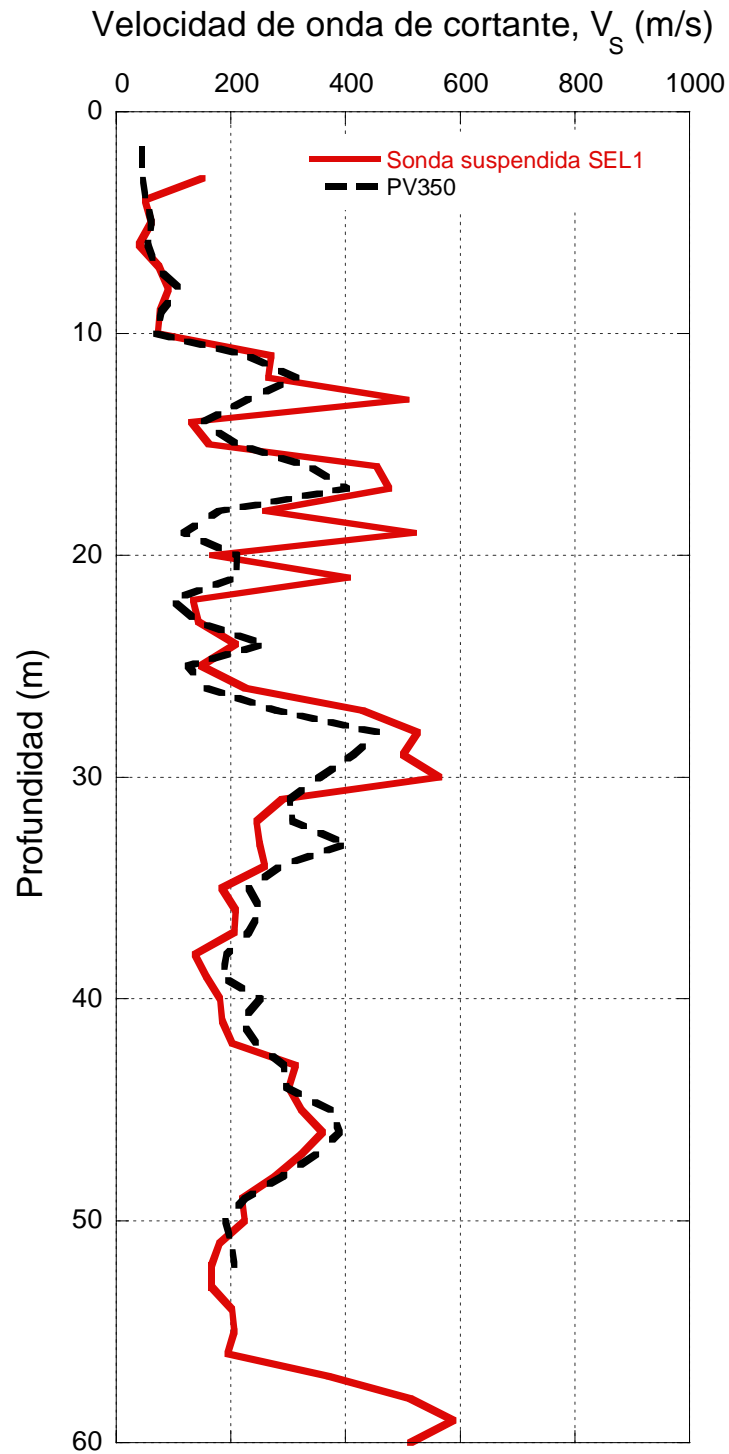


Figura 3.21. Comparación del perfil de velocidad de onda de cortante medida, SEL1, con el perfil virtual de onda de cortante estimado PV350



Como se puede apreciar en las Figuras 3.19, 3.20 y 3.21, los perfiles de velocidad de onda de cortante medidos y estimados presentan una razonable congruencia. Por lo que se considera apropiado el empleo de los datos generados en este capítulo, de los perfiles virtuales de velocidad de onda de cortante.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se determinaron los parámetros que influyen en la respuesta de sitio, incluyendo perfiles virtuales estratigráficos y de velocidad de onda de cortante, así como, las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento en función del índice de plasticidad. En cuanto a la velocidad de onda de cortante, se pudo observar que ésta presenta una distribución de tipo lognormal, mientras que el índice de plasticidad presenta una distribución de probabilidades de tipo normal, la distribución de los espesores de los geomateriales encontrados en la zona estudiada se consideró de tipo lineal, esta consideración está basada en la evidencia de los trabajos de exploración realizados previamente en esta región. Los espesores de los estratos de arcilla fluctúan entre 0.80 m y 34.60 m aproximadamente, localizándose los estratos de mayor espesor en la porción Suroeste de la región observada. En tanto que, los espesores de los estratos de arenas y limos oscilan entre un rango de 0.70 m a 10.50 m aproximadamente. Por otra parte, los índices de plasticidad en los estratos arcillosos pueden llegar a alcanzar valores de 340 %. Los resultados obtenidos en esta etapa de la investigación se usaron para realizar los análisis de respuesta de sitio, que permitió establecer la microzonificación sísmica de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco.



4. AMBIENTE SÍSMICO

A pesar de los grandes esfuerzos llevados a cabo para caracterizar el ambiente sísmico en la ciudad de México y el área circunvecina, aún existen regiones como la zona Noreste del ex Lago de Texcoco que no están suficientemente investigadas desde el punto de vista geotécnico y geosísmico, en la cual el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004) muestra una zonificación solamente indicativa (Figura 4.1). En este sentido, la caracterización apropiada del ambiente sísmico permitirá establecer una actualización del código de construcción vigente.

El ambiente sísmico de una región está influenciado por factores tales como la magnitud máxima del sismo, distancia del sitio a la fuente de liberación de energía; características geológicas de la roca a lo largo de la trayectoria de transmisión de la onda de la fuente al sitio; mecanismo de la fuente del sismo; efectos de interferencia de la onda relacionada con la dirección y velocidad de ruptura de la falla; y condiciones locales del subsuelo (Seed *et al.*, 1982). En este contexto, se puede definir el ambiente sísmico por medio de un espectro de peligro uniforme en el cual están incluidos implícitamente los factores antes mencionados. En este apartado se presenta la metodología seguida para determinar el espectro de peligro uniforme (UHS, Uniform Hazard Spectra) de un afloramiento en roca, UHS_{Roca} , para el sitio TXCR, San Miguel Tlaixpan, Texcoco, para definir el ambiente sísmico de la zona estudiada (Figura 4.1). En este lugar se encuentra ubicada la estación sísmológica TXCR, que se ha elegido como punto de control ya que es la más cercana en roca a la región de interés. El UHS_{Roca} se utilizará en el siguiente capítulo como la excitación en los análisis de respuesta de sitio probabilistas.

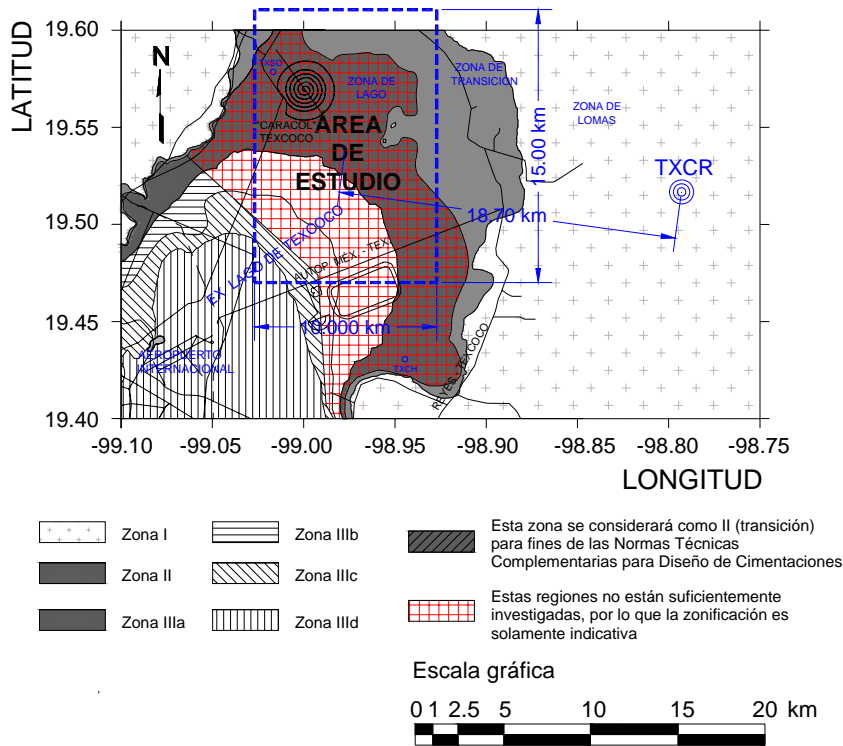


Figure 4.1. Zonificación del DF para fines de diseño por sismo (RCDF, 2004)

4.1. Determinación de espectros de peligro uniforme

El espectro de peligro uniforme, es una representación de la relación entre el periodo natural de vibración, T , y una aceleración espectral, S_a , para una probabilidad de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno. En la Figura 4.2 se muestra esquemáticamente el procedimiento a seguir para obtener un espectro de peligro uniforme.

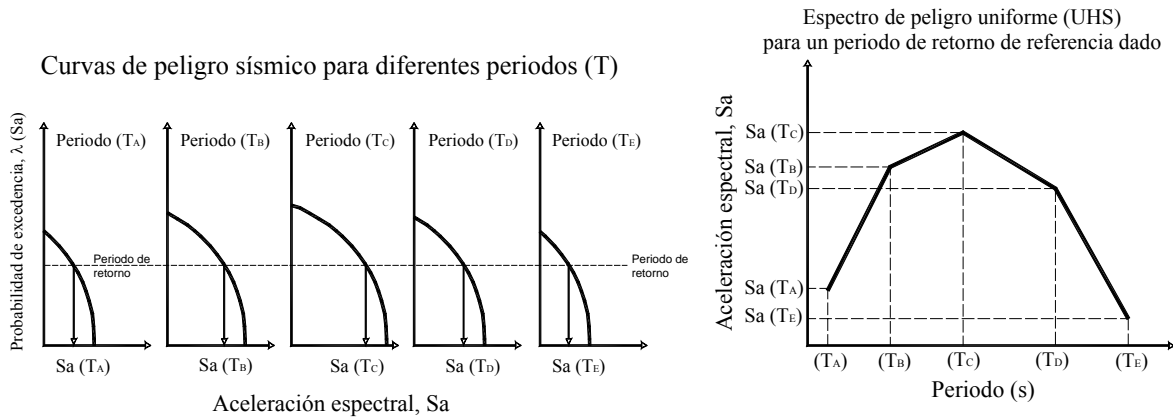


Figura 4.2. Determinación de un espectro de peligro uniforme



Dado que para obtener el espectro de peligro uniforme, en primer lugar se requiere obtener las curvas de peligro sísmico para diferentes periodos (T), a continuación se presentará la teoría y metodología para la obtención de estas curvas.

4.2. Determinación de curvas de peligro sísmico

El objetivo de muchos de los análisis en la ingeniería sísmica es garantizar que una estructura resistirá un nivel de movimiento del suelo dado, mientras mantiene un nivel de eficiencia deseado. En este sentido, el problema es determinar el nivel del movimiento sísmico que deberá ser usado para realizar este tipo de análisis. La definición de un movimiento sísmico futuro es un proceso complejo, ya que en ésta se presentan incertidumbres alrededor de los parámetros de ubicación, tamaño e intensidad. El análisis del peligro sísmico probabilista (PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis) tiene el propósito de cuantificar y combinar estas incertidumbres para generar una descripción explícita de la distribución de sismos futuros que pueden ocurrir en un sitio dado. Los primeros investigadores que desarrollaron este tema fueron Esteva (1967) y Cornell (1968); después de ellos, este tópico ha sido abordado por otros investigadores en todo el mundo tomando como base los trabajos desarrollados en los años 60 (ej. McGuire, 1976; Youngs y Coppersmith, 1985; Chapman, 1995; McGuire, 1995; Ordaz y Reyes, 1999; Cramer, 2003; Ordaz, 2004; Bazzurro y Cornell, 2004; Bommer y Abrahamson, 2006).

La cuantificación del peligro sísmico presenta varias limitaciones, tales como: 1) la información geológica y tectónica; 2) los modelos de sismicidad, propagación y atenuación son simplificaciones de un fenómeno mucho más complejo; 3) las tasas de deslizamiento de las fallas y los tiempos de recurrencia tienen una gran incertidumbre; 4) los catálogos sísmicos cubren periodos relativamente cortos de sismicidad; y 5) algunas de las variables involucradas en el procesos son poco conocidas, por lo que presentan grandes incertidumbres. Esta situación, obliga a realizar evaluaciones y cuantificaciones de los movimientos del terreno de una manera probabilística. Las bases teóricas para evaluar el peligro sísmico de manera probabilista fueron desarrolladas por Esteva (1967) y Cornell (1968). Con este método se define el peligro sísmico como la probabilidad de que ocurra un



movimiento fuerte del terreno que exceda una cierta intensidad, en un sitio dado dentro un periodo de tiempo determinado.

En general, los pasos que se siguen en un análisis de peligro sísmico probabilista (ej. Cornell, 1968; McGuire, 1995; Klügel, 2008) son:

- Definición de las fuentes sismogénicas (en función de las bases de datos de las variables geológicas y sismológicas, y de modelos sismo-tectónicos),
- Definición del modelo de sismicidad por el cual se establezca la relación entre la frecuencia de ocurrencia de sismos y su magnitud,
- Definición del parámetro del movimiento a estudiar (aceleración espectral, velocidad espectral, medida de intensidad),
- Desarrollo de un modelo de atenuación del movimiento del suelo (empírico, fenomenológico o una combinación de ambos) para cada una de las fuentes o la aceptación de un modelo para una región,
- Cálculo del espectro de peligro uniforme (UHS) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno),
- Cálculo de la desagregación del peligro sísmico probabilista, para identificar los escenarios sísmicos que contribuyen significativamente al peligro sísmico del sitio en función de sus magnitudes y distancias de la fuente sísmica,
- Generación de diferentes movimientos de suelo para los escenarios sísmicos en términos de magnitudes y distancias, y comparar sus espectros de respuesta con el espectro de peligro uniforme.

En la Figura 4.3 se presenta en forma gráfica los pasos que se siguen en un análisis de peligro sísmico probabilista. Paso 1) definición de las fuentes sismogénicas; paso 2) definición de un modelo de recurrencia sísmica; paso 3) desarrollo de un modelo de atenuación; paso 4) cálculo de curvas de peligro sísmico y del espectro de peligro uniforme; paso 5) Cálculo de la desagregación del peligro sísmico probabilista.

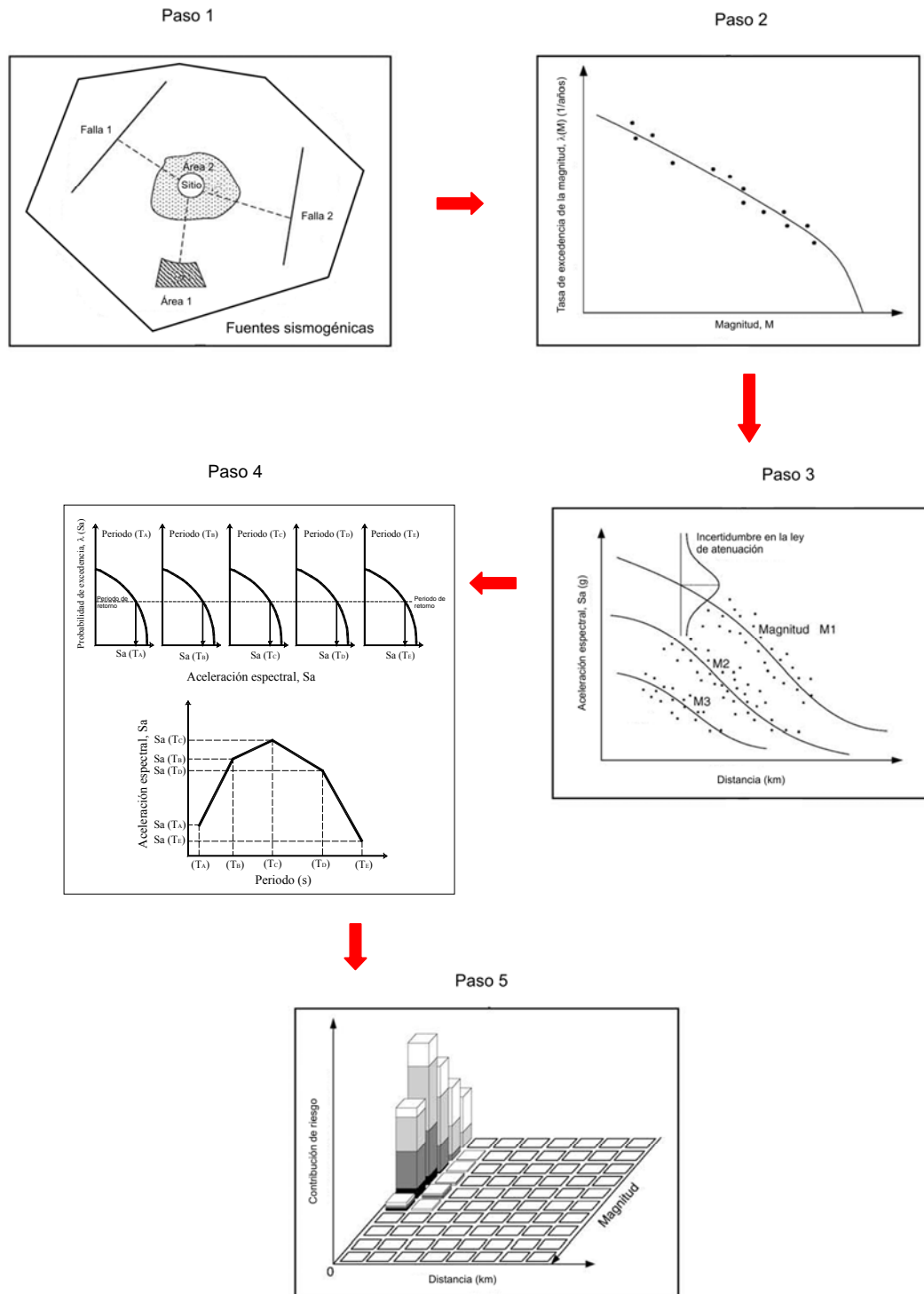


Figura 4.3. Secuencia de pasos para realizar un análisis de peligro sísmico probabilista



4.2.1. Definición de las fuentes sismogénicas que influyen en el comportamiento dinámico del área de estudio

Para definir la sismicidad de una región se debe contar con un catálogo sísmico completo, ya que los resultados de la estimación del peligro sísmico probabilista cambia significativamente al trabajar con un catálogo incompleto. Para este proyecto de investigación se tomó la información utilizada por Reyes (1999), que tomó básicamente el catálogo de sismos generado por Zuñiga (1996), el cual contiene sismos superficiales registrados de 1900 a 1995 con magnitudes M_s a partir de 4.5. En el trabajo de Reyes se corroboraron los datos del catálogo base con el catálogo publicado por Singh *et al.* (1984), estableciéndose que este catálogo cumplía las características de un catálogo completo para magnitudes iguales o mayores que siete de 1900 a 1995, para magnitudes iguales o mayores que seis de 1955 a 1995, y para magnitudes iguales o mayores que 4.5 de 1965 a 1995.

Las zonas sismogénicas consideradas en este estudio fueron establecidas de acuerdo con la regionalización que realizaron Nishenko y Singh (1987) de la zona de subducción mexicana, por ser esta zona donde se han generados los temblores que han ocasionado mayor daño en la ciudad de México. En la Figura 4.4 se presentan las zonas sismogénicas estudiadas y en las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los parámetros correspondientes.

Para cada fuente, cada parámetro se obtuvo del catalogo de sismos de México preparado por Zuñiga y Guzmán (1994), en el cual se usaron procedimientos de estadística bayesiana descritos en Rosenblueth y Ordaz (1987) y Arboleda y Ordaz (1993).

4.2.2. Modelos de recurrencia de sismos

Los modelos de recurrencia permiten determinar el tiempo promedio que tarda en repetirse un sismo de características iguales, en un sitio dado. La elección de un modelo apropiado es de suma importancia ya que se ha observado que la variabilidad de la periodicidad sísmica puede ser significativa, llegando hasta el 40% del intervalo de recurrencia promedio (Goes, 1996). Existen varios modelos de recurrencia de sismos, entre los más utilizados se tiene:

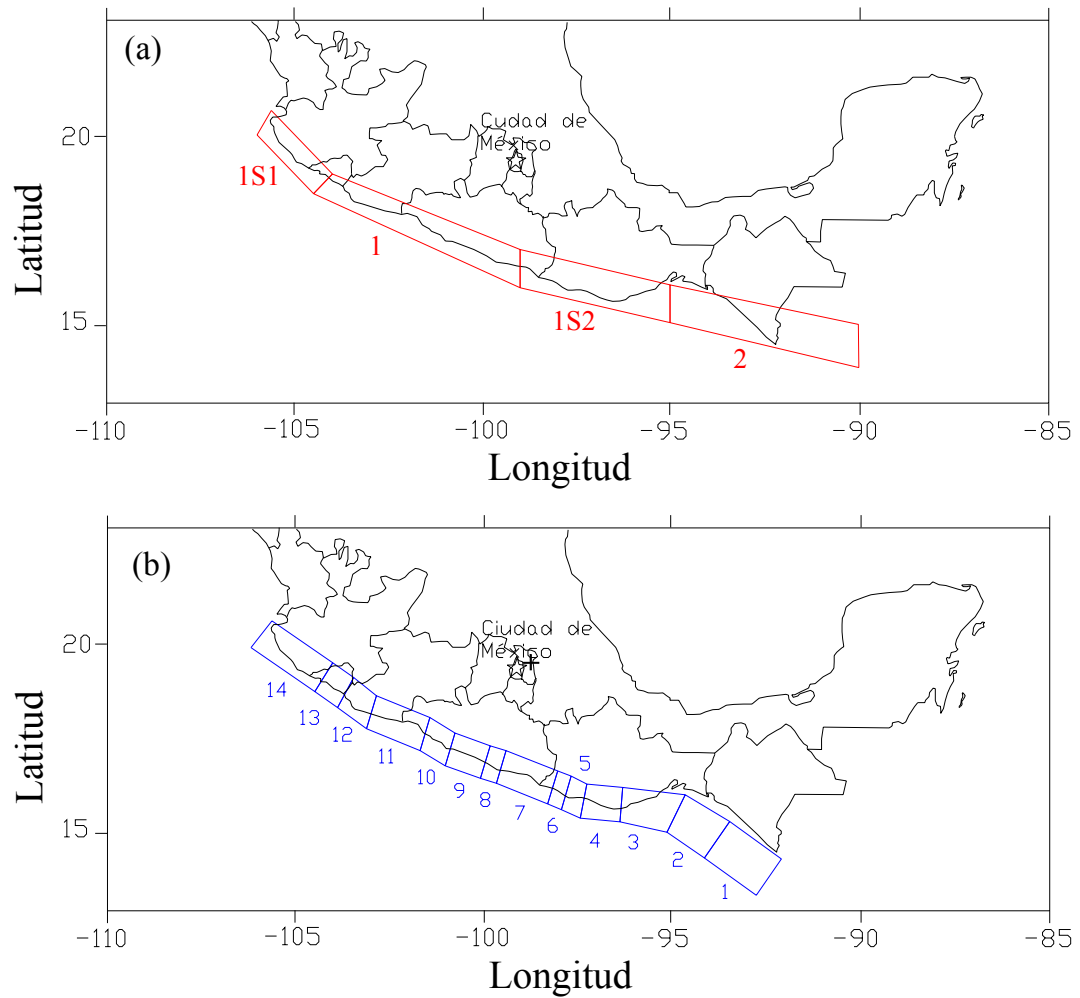


Figura 4.4. Zonas sismogénicas estudiadas (a) sismos de pequeña a moderada intensidad, (b) sismos característicos

Tabla 4.1. Parámetros para las fuentes sísmicas que generan eventos pequeños y moderados, en todos los casos $M_0 = 4.5$ y $M_u = 7.0$ (Ordaz y Reyes, 1999)

Zona	Tasa de excedencia, λ_0	
	(1/año)	β
1S1	2.014	1.827
1	4.792	1.547
1S2	6.717	1.847
2	18.938	2.059



Tabla 4.2. Parámetros de zonas de ocurrencia de sismos característicos con $M > 7.0$
(Ordaz y Reyes, 1999)

Zona	Nombre	Tasa de excedencia, $\lambda(7)$ (1/año)
1	Chiapas	0.0369
2	Tehuantepec Gap	0.03344
3	Este de Oaxaca	0.02793
4	Centro Oaxaca I	0.01898
5	Centro Oaxaca II	0.01339
6	Oeste de Oaxaca	0.01116
7	Ometepec	0.02899
8	San Marcos	0.01116
9	Gerrero	0.02232
10	Petatlán	0.01563
11	Michoacán	0.03356
12	Colima	0.01786
13	Brecha de Colima	0.01675
14	Jalisco	0.04566

EM = 7.5, $\sigma_M = 0.30$

Modelo de Gutenberg–Richter

Con base en el conocimiento de que las fallas tectónicas son capaces de producir sismos de diversas magnitudes, Gutenberg y Richter (1954) fueron los primeros investigadores que realizaron estudios relacionados con la observación de la magnitud de los sismos, notando que la distribución del tamaño de los sismos en una región sigue generalmente una distribución particular, dada por la siguiente ecuación:

$$\log(\lambda_m) = a - bm \quad (4.1)$$

Donde λ_m , es la tasa de excedencia de sismos con magnitud mayor o igual que m , a y b son constantes y se estiman mediante análisis estadístico de las observaciones históricas de sismos y de datos obtenidos a partir de evidencia geológica. El valor de a indica la tasa total de sismos en la región y b indica la razón de sismos de magnitud pequeña y grande.

Comúnmente la expresión 4.1 se expresa en forma acumulativa complementaria y exponencial, como:

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(M-M_0)} & , \text{ si } M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , \text{ si } M > M_u \end{cases} \quad (4.2)$$

donde λ_0 , es la tasa de excedencia para $M = M_0$, M_0 es la magnitud mínima de referencia y $\beta = b \ln(10)$, M_u , es la magnitud máxima considerada.

En la Figura 4.5 se presenta una gráfica de la tasa de excedencia de la magnitud obtenida con la expresión 4.2 (NGR).

Modelo Gutenberg-Richter Modificado

Este modelo es una modificación del modelo de Gutenberg y Richter y fue propuesto por Cornell y Vanmarke (1969), es un modelo muy similar al de Gutenberg y Richter para magnitudes cercanas a M_0 , pero que muestra una transición suavizada cuando $\lambda(M)$ tiende a cero, en $M = M_u$, evitando la caída abrupta que presenta el modelo Gutenberg y Richter. En la Figura 4.5 se presenta una gráfica de la tasa de excedencia obtenida con este modelo, el cual queda expresado como:

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} & , \text{ si } M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , \text{ si } M > M_u \end{cases} \quad (4.3)$$

Modelo de sismos característicos

Un modelo alternativo al modelo de Gutenberg y Richter es el de sismos característicos. En este modelo el sismo máximo que se genera en una falla o en una zona de falla, se presenta con mayor frecuencia de lo que se deduce a partir del modelo de Gutenberg y Richter. Este modelo de recurrencia ha sido estudiado por numerosos investigadores en las últimas décadas (ej. Young y Coppersmith, 1985; Wesnousky, 1994; Sammis *et al.*, 1996; Stirling

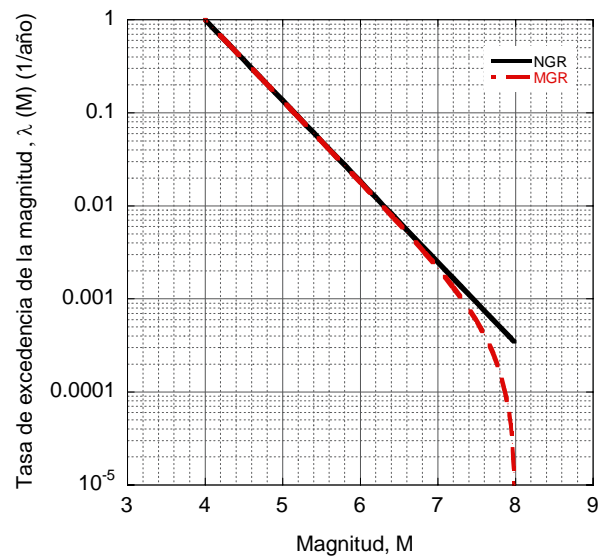


Figura 4.5. Gráficas de la tasa de excedencia de la magnitud empleando el modelo de la ley de recurrencia de Gutenberg y Richter, NGR, y Gutenberg y Richter Modificado, MGR

et al., 1996; Ben-Zion, 1996; Rüttener *et al.*, 1996; Anderson *et al.*, 1996; Yeats *et al.*, 1997; Huang *et al.*, 1998; Dixon *et al.*, 2003). Un sismo característico agota el potencial sísmico almacenado en el sistema, el cual debe recuperarse durante un tiempo dado. Frecuentemente se pueden encontrar en la literatura estudios de peligro sísmico que adoptan modelos que combinan aspectos del modelo característico y de Gutenberg-Richter (Youngs y Coppersmith, 1985), o bien emplean el modelo de sismo característico para fallas y el de Gutenberg-Richter para zonas (ej. Frankel *et al.*, 2007). Con cualesquiera de los modelos adoptados, los parámetros necesarios que definen la sismicidad en cada zona o falla, para el cálculo del peligro sísmico son la magnitud máxima, M_u ; magnitud mínima, M_0 ; la tasa de sismos por encima de la magnitud mínima $\lambda(M_0)$ y el coeficiente β .

En este trabajo de investigación se adoptó una ley de recurrencia para sismos característicos propuesta por Ordaz y Reyes (1999), en la cual se asume que el comportamiento de los sismos característicos observados por muchos años por Singh *et al.* (1983) en la zona de subducción mexicana tiene una distribución Gaussiana, y está definida para cada fuente, con la siguiente expresión:

$$\lambda(M) = \lambda(7) \left[1 - \Phi \left(\frac{M - EM}{\sigma_M} \right) \right], \text{ si } M > 7 \quad (4.4)$$

Donde, $\lambda(7)$ es la tasa de excedencia para $M > 7$, EM y σ_M son, respectivamente, la media y la desviación estándar de la magnitud, y $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución acumulativa normal. En la Figura 4.6 se presenta una gráfica construida con el modelo de Gutenberg-Richter modificado (MGR), combinado con un modelo de sismos característicos, definido con la expresión 4.4.

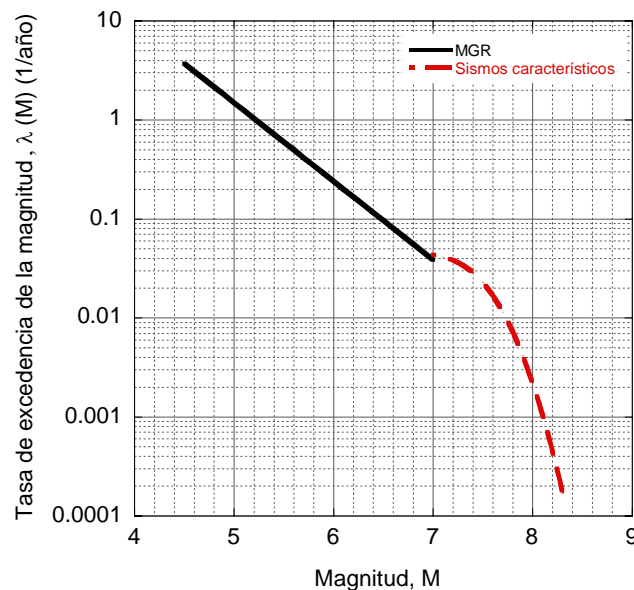


Figura 4.6. Representación gráfica de la tasa de excedencia de magnitudes, construida con los modelos Gutenberg-Richter modificado y sismos característicos

Parámetros que definen la sismicidad en las zonas sismogénicas

Para este estudio, la sismicidad de las zonas sismogénicas se modeló con la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter modificada, para definir la tasa de excedencia de sismos con magnitudes mayores que 4.5 y menores que 7. En tanto que, para definir la tasa de excedencia de sismos con magnitudes mayores que 7, se usó la ley de recurrencia definida en la expresión 4.4, correspondiente a sismos característicos. Los parámetros que definen la sismicidad de las zonas sismogénicas estudiadas para el modelo Gutenberg-Richter



modificado, se presentan en la Tabla 4.1. Asimismo, en la Tabla 4.2 se muestran los parámetros que definen la sismicidad de las zonas sismogénicas estudiadas para el modelo de sismos característicos.

4.2.3. Leyes de atenuación

Una vez determinado el modelo de sismicidad de la región de interés para el estudio PSHA, incluyendo los parámetros característicos de cada zona sismogénica, se debe establecer el modelo de predicción del movimiento del suelo en el sitio (ley de atenuación). Dicho modelo relaciona el movimiento del terreno en un sitio, a través de un parámetro del movimiento genérico Y , que normalmente es una aceleración o velocidad, con el parámetro que establece el tamaño del sismo en la fuente (magnitud, M), la distancia epicentral de la fuente al sitio (R), y una medida de la dispersión del modelo. Algunos modelos incluyen otros términos como el factor de tipo de suelo, el tipo de falla que causa el sismo, o el tipo de sismo en función de su localización hipocentral.

En este contexto, se puede citar como exponentes de estas leyes de atenuación a: Esteva (1970); McGuire (1977); Blume (1980); Joyner y Boore (1981); Bolt y Abrahamson (1982); Singh *et al.* (1987); Ambraseys (1990); Crouse y McGuire (1996); Boore *et al.* (1997); Campbell y Bozorgnia (2000). Ellos han propuesto diferentes modelos de atenuación con el fin de estimar la aceleración máxima del terreno, PGA, la aceleración espectral correspondiente a una frecuencia específica, o la velocidad máxima del terreno, para un sitio dado.

Para esta investigación se empleó la ley de atenuación propuesta por Reyes (1999), la cual permite estimar la aceleración espectral, S_a , en la zona de lomas de la ciudad de México, Ciudad Universitaria (CU), y tiene la siguiente forma funcional:

$$\begin{aligned} \ln y(T) = \ln S_a(T) = & \alpha_1(T) + \alpha_2(T)(M - 6) \\ & + \alpha_3(T)(M - 6)^2 + \alpha_4(T) \ln R + \alpha_5(T)R + \varepsilon(T) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Donde

y = representa la aceleración máxima del terreno en alguna de las direcciones ortogonales, o su media geométrica, MG , en cm/s^2 ;

M_w = magnitud de momento sísmico;

R = distancia mínima al área de ruptura, en km;

α_i = coeficientes presentados en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5.

Este funcional es igual al propuesto por Joyner y Boore (1988).

4.2.3.1. Validación de la ley de atenuación

Con el objeto de corroborar la pertinencia de la ley de atenuación empleada se obtuvo el espectro de respuesta en los sitios CU y TXCR, en roca, considerando el escenario sísmico dado por el terremoto del 14 de septiembre de 1995, de $M_w=7.3$ y distancia epicentral de 280 km, generado en la zona de subducción. En la Figura 4.7 se presentan los espectros de respuesta estimados con la ecuación 4.5 y los obtenidos con los registros medidos para los sitios CU y TXCR, mostrando una congruencia aceptable entre lo medido y lo estimado, tanto en CU como en el sitio TXCR. Por lo tanto, el modelo de atenuación se consideró representativo de los movimientos observados en la ciudad de México. Los valores de los parámetros de la ecuación 4.5 para diferentes periodos se presentan en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 y fueron tomados de Reyes (1999).

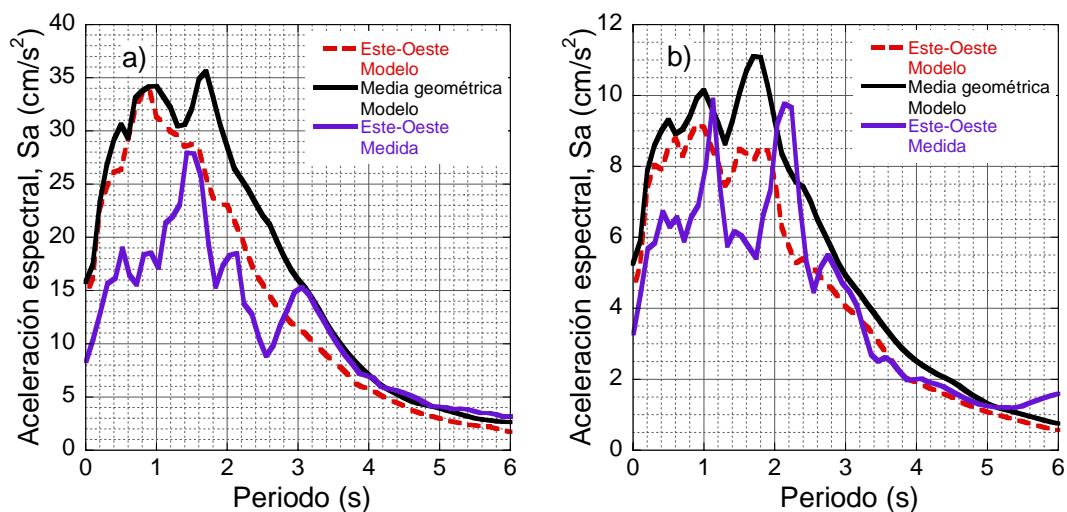


Figura 4.7. Estimación de la aceleración espectral en los sitios a) CU y b) TXCR para la misma componente (Sismo del 14 de septiembre de 1995, $M_w=7.3$, Distancia= 280 km)



Tabla 4.3. Valores de los coeficientes α_i y σ para la componente Norte-Sur de la aceleración espectral (Reyes, 1999)

T (s)	$E''[\alpha_1]$	$E''[\alpha_2]$	$E''[\alpha_3]$	$E''[\alpha_4]$	$E''[\alpha_5]$	$E''[\sigma]$
0	5.9103	1.2093	-0.10366	-0.5	-0.00605	0.43591
0.1	6.0886	1.1683	-0.10892	-0.5	-0.00613	0.43784
0.2	6.6795	1.0857	-0.11466	-0.5	-0.00694	0.43424
0.3	7.0253	1.1345	-0.10565	-0.5	-0.00779	0.40469
0.4	6.8839	1.1882	-0.0897	-0.5	-0.0073	0.49051
0.5	7.3348	1.2144	-0.09841	-0.5	-0.00863	0.43883
0.6	6.5903	1.2697	-0.06649	-0.5	-0.00695	0.45689
0.7	6.9449	1.2579	-0.08313	-0.5	-0.00763	0.44119
0.8	6.6384	1.2624	-0.04921	-0.5	-0.00683	0.47148
0.9	6.4159	1.2804	-0.03138	-0.5	-0.00611	0.45668
1	6.7545	1.3002	-0.07268	-0.5	-0.00693	0.45231
1.1	6.6962	1.2709	-0.04959	-0.5	-0.00688	0.44563
1.2	6.8098	1.2596	-0.05852	-0.5	-0.00727	0.4715
1.3	6.5599	1.2451	-0.05352	-0.5	-0.00667	0.49506
1.4	6.3628	1.2475	-0.04595	-0.5	-0.00593	0.49893
1.5	6.2703	1.3564	-0.08604	-0.5	-0.00565	0.51641
1.6	6.4968	1.4425	-0.11605	-0.5	-0.00616	0.53014
1.7	6.6075	1.461	-0.09922	-0.5	-0.00644	0.55191
1.8	5.7796	1.37	-0.08099	-0.5	-0.00374	0.57378
1.9	5.6896	1.3355	-0.06813	-0.5	-0.00379	0.58257
2	5.6039	1.3038	-0.04696	-0.5	-0.00381	0.61282
2.1	5.534	1.2562	-0.03435	-0.5	-0.00367	0.64125
2.2	5.5392	1.2426	-0.03706	-0.5	-0.00369	0.66666
2.3	5.5323	1.2482	-0.04416	-0.5	-0.00374	0.67991
2.4	5.5382	1.2415	-0.05613	-0.5	-0.00385	0.68724
2.5	5.5229	1.2381	-0.06556	-0.5	-0.0039	0.66944
2.6	5.4954	1.2435	-0.06045	-0.5	-0.00399	0.65122
2.7	5.4091	1.2557	-0.0665	-0.5	-0.00392	0.62028
2.8	5.2936	1.2794	-0.06741	-0.5	-0.00391	0.62041
2.9	5.1743	1.3048	-0.0625	-0.5	-0.00392	0.63362
3	4.8541	1.4053	-0.05942	-0.5	-0.00383	0.6129
3.1	4.739	1.4263	-0.06543	-0.5	-0.00373	0.5995
3.2	4.5639	1.4457	-0.07404	-0.5	-0.00347	0.59082
3.3	4.3739	1.4683	-0.08353	-0.5	-0.00319	0.58432
3.4	4.2387	1.4801	-0.09787	-0.5	-0.00299	0.57427
3.5	4.093	1.4958	-0.10452	-0.5	-0.00281	0.56796
3.6	3.9594	1.5117	-0.11027	-0.5	-0.00268	0.56928
3.7	3.8308	1.5188	-0.10666	-0.5	-0.00258	0.57425
3.8	3.7035	1.5285	-0.09781	-0.5	-0.0025	0.58248
3.9	3.6199	1.5277	-0.09232	-0.5	-0.00247	0.59284
4	3.5244	1.5308	-0.08811	-0.5	-0.00241	0.60285
4.1	3.4371	1.53	-0.07909	-0.5	-0.00235	0.61474
4.2	3.3539	1.5371	-0.07251	-0.5	-0.00229	0.62714
4.3	3.2859	1.5437	-0.0765	-0.5	-0.00225	0.63184
4.4	3.2374	1.5475	-0.07428	-0.5	-0.00231	0.63276
4.5	3.2105	1.5523	-0.06795	-0.5	-0.00246	0.6316
4.6	3.1879	1.5593	-0.05542	-0.5	-0.00263	0.63782
4.7	3.1811	1.5553	-0.04246	-0.5	-0.0028	0.64767
4.8	3.1527	1.5565	-0.03299	-0.5	-0.00293	0.65617
4.9	3.1059	1.5499	-0.02529	-0.5	-0.00297	0.66349
5	3.0424	1.5464	-0.02172	-0.5	-0.00293	0.6724
5.1	2.962	1.5548	-0.02291	-0.5	-0.00287	0.67958
5.2	2.8778	1.5516	-0.02015	-0.5	-0.00278	0.68496
5.3	2.792	1.5442	-0.01255	-0.5	-0.00271	0.69019
5.4	2.7223	1.5445	-0.00686	-0.5	-0.00268	0.69296
5.5	2.6711	1.5463	-0.00118	-0.5	-0.0027	0.6924
5.6	2.6344	1.5421	0.00801	-0.5	-0.00276	0.69579
5.7	2.6298	1.5405	0.01569	-0.5	-0.00289	0.69947
5.8	2.6292	1.5459	0.02195	-0.5	-0.00303	0.70426
5.9	2.6298	1.5405	0.01569	-0.5	-0.00289	0.69947
6	2.6292	1.5459	0.02195	-0.5	-0.00303	0.70426



Tabla 4.4. Valores de los coeficientes α_i y σ para la componente Este-Oeste de la aceleración espectral (Reyes, 1999)

T (s)	$E''[\alpha_1]$	$E''[\alpha_2]$	$E''[\alpha_3]$	$E''[\alpha_4]$	$E''[\alpha_5]$	$E''[\sigma]$
0	5.7305	1.3273	-0.08695	-0.5	-0.0065	0.44222
0.1	5.9925	1.2284	-0.0763	-0.5	-0.00664	0.45713
0.2	6.8103	1.0653	-0.07739	-0.5	-0.00758	0.45977
0.3	6.8092	1.116	-0.09177	-0.5	-0.00742	0.41177
0.4	6.4358	1.3635	-0.10711	-0.5	-0.00695	0.4218
0.5	6.3411	1.2511	-0.06936	-0.5	-0.00629	0.40819
0.6	6.6287	1.2806	-0.06872	-0.5	-0.00708	0.43896
0.7	6.4929	1.438	-0.01977	-0.5	-0.00731	0.46863
0.8	6.3989	1.4756	-0.02211	-0.5	-0.00696	0.44355
0.9	6.3739	1.4474	-0.02234	-0.5	-0.0067	0.42202
1	6.2065	1.4146	-0.03517	-0.5	-0.00616	0.43162
1.1	6.4653	1.4443	-0.07251	-0.5	-0.00706	0.46308
1.2	6.4535	1.461	-0.06611	-0.5	-0.00723	0.45445
1.3	6.5082	1.4878	-0.04525	-0.5	-0.00772	0.42546
1.4	6.3761	1.5032	-0.08826	-0.5	-0.00719	0.43478
1.5	6.2308	1.448	-0.08427	-0.5	-0.00641	0.47568
1.6	6.1316	1.455	-0.07353	-0.5	-0.00621	0.49181
1.7	5.7823	1.4895	-0.09443	-0.5	-0.00534	0.51223
1.8	5.2825	1.4789	-0.10122	-0.5	-0.00375	0.53513
1.9	5.0846	1.5014	-0.08816	-0.5	-0.00331	0.52233
2	4.9846	1.5944	-0.0594	-0.5	-0.00358	0.50975
2.1	5.012	1.6766	-0.03705	-0.5	-0.00443	0.52029
2.2	5.0522	1.6621	-0.03655	-0.5	-0.00477	0.54265
2.3	4.9741	1.6501	-0.04494	-0.5	-0.00474	0.54389
2.4	4.7777	1.6061	-0.07857	-0.5	-0.00396	0.54233
2.5	4.6753	1.5827	-0.07273	-0.5	-0.00373	0.55847
2.6	4.4566	1.5411	-0.04862	-0.5	-0.00316	0.57244
2.7	4.4461	1.4883	-0.03467	-0.5	-0.00322	0.57384
2.8	4.4708	1.4401	-0.03826	-0.5	-0.00326	0.58967
2.9	4.3925	1.4452	-0.04246	-0.5	-0.00321	0.60488
3	4.2787	1.4648	-0.02866	-0.5	-0.00314	0.6368
3.1	4.2562	1.4445	-0.0216	-0.5	-0.00316	0.66607
3.2	4.2027	1.4237	-0.02053	-0.5	-0.00313	0.67703
3.3	4.1711	1.392	-0.01636	-0.5	-0.00312	0.68154
3.4	4.112	1.3907	-0.0182	-0.5	-0.00315	0.67473
3.5	4.0163	1.411	-0.00293	-0.5	-0.00322	0.6789
3.6	3.9093	1.4608	-0.00385	-0.5	-0.00331	0.66895
3.7	3.7485	1.5072	-0.00224	-0.5	-0.00329	0.66762
3.8	3.5886	1.5346	-0.01344	-0.5	-0.00322	0.67729
3.9	3.4919	1.5486	-0.01354	-0.5	-0.00315	0.6965
4	3.4328	1.5491	-0.00446	-0.5	-0.0031	0.71408
4.1	3.3452	1.5437	-0.00665	-0.5	-0.00296	0.72009
4.2	3.2568	1.5277	-0.01413	-0.5	-0.00281	0.71708
4.3	3.2688	1.4771	-0.00577	-0.5	-0.00286	0.72258
4.4	3.264	1.4431	-0.00565	-0.5	-0.00292	0.72083
4.5	3.2302	1.4235	-0.01256	-0.5	-0.00293	0.72251
4.6	3.1842	1.4186	-0.02459	-0.5	-0.00296	0.72445
4.7	3.1368	1.4213	-0.0343	-0.5	-0.00302	0.72952
4.8	3.1035	1.4242	-0.03699	-0.5	-0.00311	0.73408
4.9	3.0749	1.4286	-0.0399	-0.5	-0.0032	0.73968
5	3.0472	1.4287	-0.04402	-0.5	-0.00328	0.74362
5.1	3.0177	1.4269	-0.04735	-0.5	-0.00335	0.74153
5.2	2.9694	1.4366	-0.05316	-0.5	-0.00338	0.72838
5.3	2.9205	1.4512	-0.05665	-0.5	-0.00343	0.7191
5.4	2.8908	1.4629	-0.05611	-0.5	-0.00354	0.71853
5.5	2.8688	1.4676	-0.04821	-0.5	-0.00367	0.71749
5.6	2.835	1.4823	-0.02704	-0.5	-0.00385	0.72533
5.7	2.8101	1.49	-0.00628	-0.5	-0.00402	0.73663
5.8	2.7831	1.4859	-0.01681	-0.5	-0.00416	0.75323
5.9	2.7549	1.4696	-0.03617	-0.5	-0.0042	0.77374
6	2.74	1.458	-0.04908	-0.5	-0.00426	0.78362



Tabla 4.5. Valores de los coeficientes α_i y σ para la media geométrica (MG) de la aceleración espectral (Reyes, 1999)

T (s)	$E''[\alpha_1]$	$E''[\alpha_2]$	$E''[\alpha_3]$	$E''[\alpha_4]$	$E''[\alpha_5]$	$E''[\sigma]$
0	5.8929	1.2457	-0.09757	-0.5	-0.00632	0.41983
0.1	6.0831	1.1954	-0.09668	-0.5	-0.00643	0.43341
0.2	6.7942	1.0675	-0.09858	-0.5	-0.00732	0.43005
0.3	6.9623	1.1303	-0.10357	-0.5	-0.00768	0.38868
0.4	6.7632	1.2513	-0.09682	-0.5	-0.00727	0.44214
0.5	6.9039	1.2236	-0.08753	-0.5	-0.00753	0.4171
0.6	6.5941	1.2748	-0.06768	-0.5	-0.00693	0.43516
0.7	6.7755	1.3445	-0.04662	-0.5	-0.0076	0.45236
0.8	6.5941	1.3676	-0.03662	-0.5	-0.00705	0.4477
0.9	6.4534	1.347	-0.0244	-0.5	-0.00648	0.42867
1	6.5638	1.3387	-0.05429	-0.5	-0.00665	0.42775
1.1	6.6701	1.3186	-0.05696	-0.5	-0.00703	0.43626
1.2	6.6903	1.3167	-0.05225	-0.5	-0.00723	0.44576
1.3	6.6186	1.3183	-0.04406	-0.5	-0.00723	0.45722
1.4	6.4825	1.3203	-0.06347	-0.5	-0.00662	0.45886
1.5	6.3741	1.3742	-0.08896	-0.5	-0.00616	0.47824
1.6	6.4614	1.4268	-0.10542	-0.5	-0.00632	0.48386
1.7	6.3949	1.4291	-0.10135	-0.5	-0.00604	0.50109
1.8	6.0912	1.4088	-0.09393	-0.5	-0.00516	0.52712
1.9	5.9378	1.3967	-0.07854	-0.5	-0.00494	0.52748
2	5.8698	1.3854	-0.05267	-0.5	-0.00505	0.53709
2.1	5.8057	1.3938	-0.03657	-0.5	-0.00522	0.5694
2.2	5.8367	1.4032	-0.04392	-0.5	-0.00547	0.59354
2.3	5.8408	1.4162	-0.05743	-0.5	-0.00561	0.59214
2.4	5.838	1.4032	-0.07922	-0.5	-0.00559	0.58237
2.5	5.8323	1.3937	-0.08121	-0.5	-0.0057	0.584
2.6	5.858	1.3951	-0.06917	-0.5	-0.00601	0.58756
2.7	5.754	1.3905	-0.06887	-0.5	-0.00589	0.57904
2.8	5.6616	1.3937	-0.0717	-0.5	-0.00583	0.57934
2.9	5.5518	1.4126	-0.07024	-0.5	-0.00579	0.58407
3	5.4214	1.4344	-0.0608	-0.5	-0.00568	0.59134
3.1	5.323	1.4555	-0.06183	-0.5	-0.0056	0.59488
3.2	5.1785	1.4662	-0.06368	-0.5	-0.00537	0.59129
3.3	5.0476	1.4684	-0.06438	-0.5	-0.00519	0.58594
3.4	4.8327	1.4731	-0.06784	-0.5	-0.00477	0.57814
3.5	4.6026	1.4899	-0.06365	-0.5	-0.00438	0.57545
3.6	4.4198	1.5125	-0.06782	-0.5	-0.00412	0.56937
3.7	4.2003	1.5357	-0.06716	-0.5	-0.00377	0.5649
3.8	3.9923	1.5517	-0.0638	-0.5	-0.00344	0.56863
3.9	3.8123	1.5584	-0.06047	-0.5	-0.00314	0.5817
4	3.6367	1.5601	-0.05951	-0.5	-0.00283	0.59661
4.1	3.4877	1.5489	-0.0618	-0.5	-0.00254	0.60756
4.2	3.3429	1.5375	-0.06438	-0.5	-0.00225	0.61156
4.3	3.2848	1.5117	-0.05615	-0.5	-0.00219	0.6209
4.4	3.1955	1.4952	-0.05207	-0.5	-0.00203	0.62776
4.5	3.098	1.4864	-0.05698	-0.5	-0.00187	0.63315
4.6	3.0614	1.4894	-0.06039	-0.5	-0.00196	0.63549
4.7	3.0962	1.5011	-0.06049	-0.5	-0.00232	0.63683
4.8	3.1583	1.5143	-0.0536	-0.5	-0.00276	0.64459
4.9	3.2384	1.5218	-0.04547	-0.5	-0.00325	0.65558
5	3.2887	1.5282	-0.03953	-0.5	-0.00364	0.66443
5.1	3.2792	1.5237	-0.03394	-0.5	-0.00379	0.67003
5.2	3.213	1.5208	-0.0312	-0.5	-0.00375	0.67315
5.3	3.1213	1.5266	-0.03198	-0.5	-0.00364	0.67495
5.4	3.0212	1.5268	-0.03054	-0.5	-0.0035	0.67766
5.5	2.9345	1.523	-0.0244	-0.5	-0.0034	0.68002
5.6	2.8914	1.5329	-0.01676	-0.5	-0.00348	0.68336
5.7	2.9014	1.5408	-0.00898	-0.5	-0.00371	0.68717
5.8	2.9438	1.5417	0.00253	-0.5	-0.00403	0.69477
5.9	3.0208	1.5413	0.01408	-0.5	-0.00444	0.70459
6	3.0975	1.5468	0.02315	-0.5	-0.00484	0.71082

4.2.4. Resolución de la integral de peligro sísmico

Una vez establecidos los modelos de recurrencia sísmicos, las zonas sismogénicas donde éstos ocurren, y los modelos de predicción del movimiento del suelo en el sitio, se tienen todos los elementos necesarios para resolver la integral de peligro sísmico, según el planteamiento probabilista de Cornell (1968). El peligro se evalúa entonces como la probabilidad de superar un valor umbral del parámetro de movimiento en el sitio, debido a la actividad de todas las zonas sismogénicas que rodean al mismo, y que pueden contribuir al movimiento esperado.

La forma funcional de la integral de peligro sísmico debido a un conjunto de N fuentes sísmicas es la siguiente:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} P_i[y > Y | M, R] f_{M_i}(M) f_{R_i}(R) dM dR \quad (4.6)$$

donde la doble integral tiene como límites las magnitudes y distancias, mínimas y máximas de la fuente. $\lambda(y > Y)$ representa la tasa anual de excedencia del nivel del movimiento, Y , debida a la ocurrencia de terremotos en las N fuentes, que es suma de las tasas anuales de excedencia $\lambda(y > Y)$ en cada una de las fuentes (las cuales presentan una tasa anual de ocurrencia de terremotos v_i). El término $P_i[y > Y | M, R]$ da la probabilidad de excedencia de Y condicionada a las variables M y R . Por último, las funciones $f_{M_i}(M)$ y $f_{R_i}(R)$ son las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de la magnitud y la distancia, respectivamente.

Si se considera que la probabilidad de excedencia de Y es función de las variables M y R únicamente, entonces $P_i[y > Y | M, R]$ sólo puede tomar los valores uno o cero (Abrahamson, 2000). Cuando se produce excedencia del movimiento, es decir, los valores de las variables R y M usados para evaluar el movimiento y son tales que $y > Y$, la



probabilidad de excedencia vale uno. En caso de que no se produzca excedencia, entonces la probabilidad condicionada $P_i[y > Y|M, R]$, toma el valor cero.

Función de densidad de probabilidad de la magnitud, $f_{Mi}(M)$

La función de densidad de probabilidad de la magnitud para la fuente i , $f_{Mi}(M)$, se calcula directamente a partir de la ley de recurrencia de las magnitudes. Para el caso de la ley de Gutenberg-Richter doblemente truncada, la expresión de $f_{Mi}(M)$ tiene la forma siguiente:

$$f_{Mi}(M) = \frac{\beta e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}}, \text{ para } M_0 \leq M \leq M_u \quad (4.7)$$

donde M_0 y M_u son las magnitudes mínima y máxima asignadas a la fuente i .

Función de densidad de probabilidad de la distancia, $f_{Ri}(R)$

La amplitud del movimiento del suelo en el sitio o zona estudiada, depende de la distancia de la fuente donde se origina el sismo hasta el sitio de estudio. En general, se desconoce el lugar concreto dentro de la zona sismogénica en el que va a ocurrir un sismo en el futuro. Por tanto, la estimación de la distancia fuente-sitio debe realizarse recurriendo a planteamientos probabilistas. Esto se realiza a través de la función de densidad de las distancias $f_{Ri}(R)$. Por lo general, la función de densidad de probabilidad de las distancias $f_{Ri}(R)$, no tiene una expresión analítica y debe ser calculada numéricamente. En este sentido, se tienen tres casos particulares para los cuales se conocen las expresiones analíticas, que son:

Caso 1: Fuente puntual

$$f_R(R) = 1 \forall R \quad (4.8)$$

Caso 2: Fuente lineal de longitud L , cuyos extremos equidistan del sitio en el que se calcula el peligro, siendo $R_{mín}$ y $R_{máx}$ las distancias fuente-sitio mínima y máxima, respectivamente.

$$f_R(R) = \frac{2R}{L\sqrt{R^2 - R_{\min}^2}} \quad (4.9)$$

$$\text{Con } R_{\min} < R < \sqrt{R_{\min}^2 + \frac{L^2}{4}}$$

Caso 3: Fuente circular de radio R_{\max} centrada en el punto donde se calcula el peligro:

$$f_R(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2} \text{ con } 0 \leq R \leq R_{\max} \quad (4.10)$$

Probabilidad de excedencia condicionada, $P_i[y > Y | M, R]$

En el cálculo del peligro, se considera que el término de probabilidad de excedencia del movimiento del suelo Y condicionado a M y R , $P_i[y > Y | M, R]$ sigue una distribución normal de media $\overline{\ln y}$ y desviación típica $\sigma_{\ln y}$, y se expresa como:

$$P_i[y > Y | M, R] = \frac{1}{\sigma_{\ln y} \sqrt{2\pi}} \int_{\ln y}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(\ln y - \overline{\ln y})^2}{2\sigma_{\ln y}^2}\right) d(\ln y) \quad (4.11)$$

Ahora bien, dado que se ha observado que el logaritmo natural de y presenta una distribución normal se puede calcular la probabilidad de excedencia de cualquier nivel de aceleración espectral conociendo su media y su desviación estándar, con la siguiente expresión:

$$P_i[y > Y | M, R] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - \overline{\ln y}}{\sigma_{\ln y}}\right) \quad (4.12)$$

Donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución acumulativa normal estándar.



Por lo tanto la ecuación 4.6 se puede redefinir de la siguiente forma:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \iint \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln y - \overline{\ln y}}{\sigma_{\ln y}} \right) \right) \left(\frac{\beta e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}} \right) f_{Ri}(R) dM dR \quad (4.13)$$

En donde $f_{Ri}(R)$ se sustituirá por las expresiones definidas en los casos 1 a 3 del apartado función de densidad de probabilidad en la distancia.

Para el caso 1, se tiene que la ecuación 4.6 queda reducida a la siguiente expresión:

Dado que $f_R(R) = 1 \forall R$, entonces:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \int_{M_0}^{M_u} \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln y - \overline{\ln y}}{\sigma_{\ln y}} \right) \right) \left(\frac{\beta e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}} \right) (1) dM \quad (4.14)$$

4.3. Curvas de peligro sísmico probabilista para el sitio TXCR

Las curvas de peligro sísmico probabilista para el sitio de control TXCR, San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Edo. Méx., se obtuvieron con base en la información y teoría establecida previamente. En esta etapa se fijó un rango de magnitudes de los eventos analizados que va de 4.5 a 8.2 en magnitudes de momento sísmico. En tanto que las zonas sismogénicas de forma irregular se subdividieron en áreas constantes regulares (cuadriláteros de 30 por 30 km), como se muestra en la Figura 4.8, para las zonas que generan sismos de pequeña a mediana intensidad y zonas de generación de sismos característicos, respectivamente. Esta subdivisión permitió asumir que estos cuadriláteros son puntos fuentes con toda la sismicidad tributaria concentrada en el centro geométrico (Ordaz, 2004), simplificando el análisis de peligro sísmico probabilista de este estudio. En la Tabla 4.6 se presentan las distancias de la fuente al sitio de cada uno de los puntos analizados, así como las zonas sísmicas a las que pertenecen cada una de ellas.

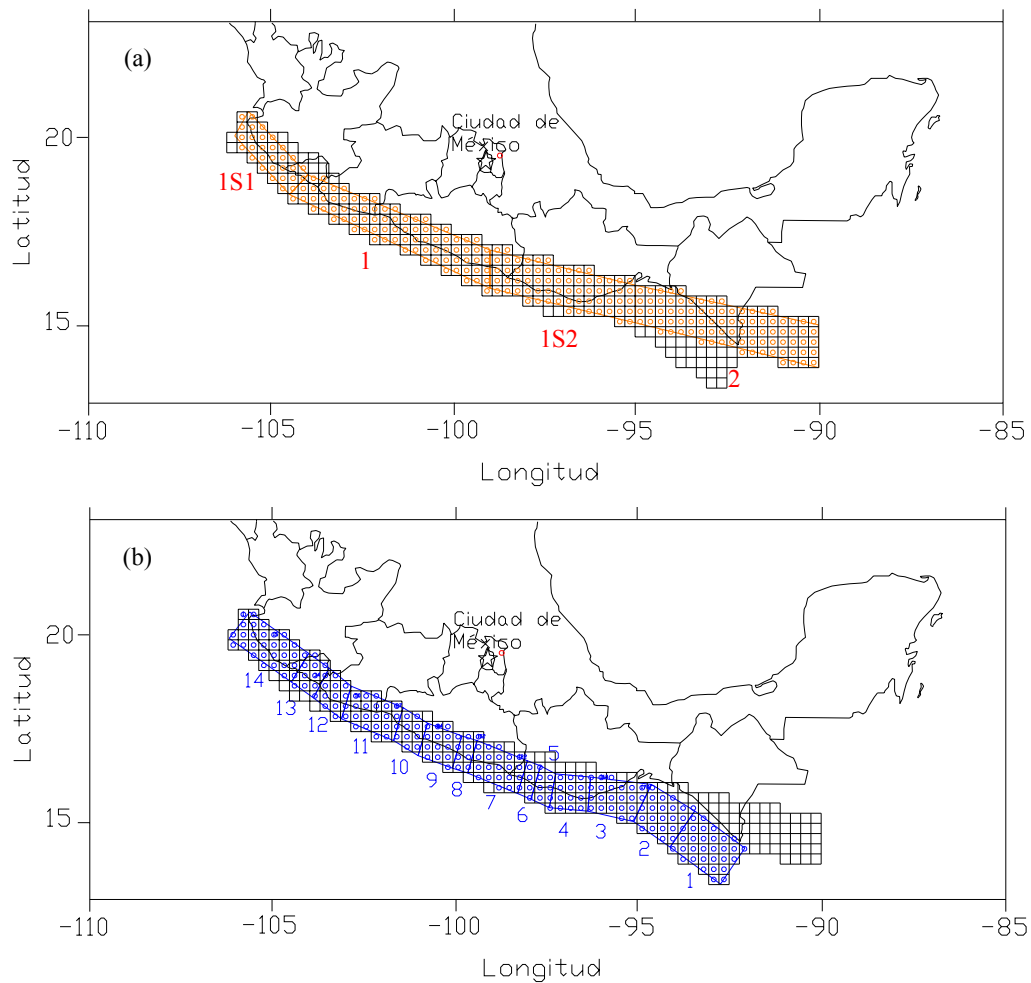


Figura 4.8. Subdivisión de las zonas sísmogénicas que afectan el sitio de estudio (a) zonas de generación de sismos de pequeña a mediana intensidad y (b) zonas de generación de sismos característicos

De los análisis realizados se obtuvieron un total de 61 curvas de peligro sísmico para un intervalo de periodos que van de 0 a 6.0 segundos, una para cada 0.1 segundos, empleando los parámetros para la media geométrica, MG, en la ley de atenuación. En particular en la Figura 4.9 se presentan las curvas de peligro sísmico para los periodos 0, 3.0 y 6.0 segundos, obtenidas de los análisis de peligro sísmico probabilista realizados con la información presentada en los párrafos anteriores. En el Anexo A de esta tesis se presentan las 61 curvas de peligro sísmico, que pueden ser utilizadas para generar los espectros de



peligro uniforme para cualquier periodo de retorno deseado, además también se presenta una gráfica con las 61 curvas en la cual se pueden observar todas a la misma escala.

Tabla 4.6. Distancias de la fuente al sitio de estudio y zonas sísmicas de referencia

ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7	ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7	ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7
1	766.3	1S1	14	65	401.3	1	11	129	405.0	1S2	6
2	762.4	1S1	14	66	418.3	1	11	130	434.4	1S2	6
3	759.7	1S1	14	67	345.4	1	11	131	326.5	1S2	
4	758.2	1S1	14	68	360.0	1	11	132	354.8	1S2	6
5	736.6	1S1	14	69	376.4	1	11	133	383.4	1S2	5
6	732.6	1S1	14	70	394.5	1	10	134	412.2	1S2	5
7	729.8	1S1	14	71	334.7	1	10	135	441.1	1S2	5
8	728.2	1S1	14	72	352.3	1	10	136	338.0	1S2	
9	727.9	1S1	14	73	371.5	1	10	137	365.4	1S2	
10	702.8	1S1	14	74	392.1	1	10	138	393.2	1S2	5
11	699.9	1S1	14	75	310.3	1	10	139	421.3	1S2	5
12	698.2	1S1	14	76	329.2	1	10	140	449.7	1S2	5
13	697.9	1S1	14	77	349.6	1	10	141	378.1	1S2	
14	698.8	1S1	14	78	371.4	1	10	142	405.0	1S2	4
15	670.0	1S1	14	79	371.4	1		143	432.4	1S2	4
16	668.3	1S1	14	80	307.2	1	9	144	460.0	1S2	4
17	667.9	1S1	14	81	329.1	1	9	145	392.6	1S2	
18	668.9	1S1	14	82	352.1	1	9	146	418.6	1S2	4
19	671.2	1S1		83	376.1	1	9	147	445.2	1S2	4
20	638.3	1S1	14	84	286.7	1	9	148	472.1	1S2	4
21	637.9	1S1	14	85	310.0	1	9	149	499.4	1S2	4
22	638.9	1S1	14	86	334.4	1	9	150	408.9	1S2	
23	641.3	1S1	14	87	359.6	1	9	151	433.9	1S2	4
24	645.1	1S1		88	268.0	1	9	152	459.6	1S2	4
25	607.9	1S1	14	89	292.8	1	9	153	485.7	1S2	4
26	609.0	1S1	14	90	318.5	1	9	154	512.2	1S2	4
27	611.5	1S1	14	91	344.9	1	9	155	426.6	1S2	
28	615.5	1S1	13	92	371.8	1	9	156	450.7	1S2	3
29	620.9	1		93	277.8	1	9	157	475.4	1S2	3
30	579.0	1S1	13	94	304.7	1	8	158	500.7	1S2	3
31	581.7	1S1	13	95	332.2	1	8	159	526.5	1S2	3
32	585.9	1	13	96	360.1	1	8	160	468.8	1S2	3
33	591.6	1		97	265.3	1	8	161	492.6	1S2	3
34	551.9	1	13	98	293.4	1	8	162	517.1	1S2	3
35	556.3	1	13	99	321.8	1	8	163	542.1	1S2	3
36	562.3	1	12	100	321.8	1	8	164	488.0	1S2	3
37	569.8	1		101	379.4	1		165	511.0	1S2	3
38	522.1	1	13	102	255.8	1	8	166	534.6	1S2	3
39	526.8	1	12	103	284.8	1	7	167	558.8	1S2	3
40	533.1	1	12	104	314.0	1	7	168	508.3	1S2	
41	541.0	1	12	105	343.4	1	7	169	530.4	1S2	3
42	497.3	1	12	106	372.8	1	7	170	553.2	1S2	3
43	504.0	1	12	107	279.2	1	7	171	576.6	1S2	3
44	512.4	1	12	108	308.9	1	7	172	600.7	1S2	3
45	522.3	1	12	109	338.7	1	7	173	529.6	1S2	
46	467.9	1	12	110	368.6	1	7	174	550.8	1S2	3
47	475.0	1	12	111	398.4	1		175	572.7	1S2	3
48	483.9	1	11	112	276.7	1S2	7	176	595.4	1S2	3
49	494.4	1	11	113	306.7	1S2	7	177	618.7	1S2	3
50	446.2	1	11	114	336.7	1S2	7	178	572.0	2	3
51	455.6	1	11	115	366.7	1S2	7	179	593.2	2	3
52	466.8	1	11	116	396.7	1S2	7	180	615.1	2	2
53	479.6	1	11	117	277.5	1S2		181	637.7	2	2
54	417.5	1	11	118	307.4	1S2	7	182	594.0	2	2
55	427.6	1	11	119	307.4	1S2	7	183	614.4	2	2
56	439.4	1	11	120	367.3	1S2	7	184	635.6	2	2
57	453.0	1	11	121	397.2	1S2	7	185	657.5	2	2
58	389.0	1	11	122	311.0	1S2	7	186	616.6	2	
59	399.8	1	11	123	340.6	1S2	7	187	636.3	2	2
60	412.5	1	11	124	370.3	1S2	7	188	656.8	2	2
61	426.9	1	11	125	400.0	1S2	6	189	678.0	2	2
62	442.9	1	11	126	317.4	1S2		190	699.9	2	2
63	372.4	1	11	127	346.5	1S2	6	191	639.9	2	
64	386.0	1	11	128	375.7	1S2	6	192	658.9	2	2



ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7
193	678.7	2	2
194	699.2	2	2
195	720.4	2	2
196	663.7	2	
197	682.0	2	
198	701.2	2	2
199	721.1	2	2
200	741.7	2	1
201	705.7	2	
202	724.2	2	2
203	743.5	2	1
204	763.5	2	1
205	729.8	2	
206	747.7	2	
207	766.4	2	1
208	785.8	2	1
209	805.9	2	1
210	754.4	2	
211	771.7	2	
212	789.8	2	
213	808.7	2	1
214	828.2	2	1
215	779.3	2	
216	796.1	2	
217	813.7	2	
218	832.0	2	
219	850.9	2	1
220	820.9	2	
221	837.9	2	
222	855.7	2	
223	874.1	2	1
224	846.0	2	
225	862.5	2	
226	879.8	2	
227	897.7	2	
228	916.3	2	1
229	871.4	2	

ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7
230	871.4	2	
231	904.2	2	
232	921.7	2	
233	939.8	2	
234	897.0	2	
235	912.7	2	
236	929.0	2	
237	946.0	2	
238	963.7	2	
239	923.0	2	
240	938.2	2	
241	954.1	2	
242	970.7	2	
243	987.9	2	
244	964.0	2	
245	979.5	2	
246	995.6	2	
247	1012.4	2	
248	1029.8	2	
249	990.0	2	
250	1005.1	2	
251	1020.8	2	
252	1037.2	2	
253	1054.2	2	
254	1016.2	2	
255	1030.9	2	
256	1046.3	2	
257	1062.3	2	
258	1078.8	2	
259	1042.7	2	
260	1057.0	2	
261	1072.0	2	
262	1072.0	2	
263	1072.0	2	
264	789.7		14
265	788.2		14
266	640.1		14

ID	Distancia, R (km)	M < 7	M > 7
267	608.3		14
268	577.9		14
269	547.9		13
270	549.1		13
271	519.1		13
272	492.4		12
273	478.2		4
274	488.0		4
275	660.9		2
276	680.0		2
277	722.3		2
278	742.2		2
279	764.6		1
280	762.9		1
281	784.6		1
282	806.9		1
283	784.1		1
284	805.3		1
285	827.0		1
286	826.5		1
287	847.7		1
288	869.4		1
289	848.3		1
290	868.9		1
291	890.1		1
292	911.8		1
293	870.5		1
294	890.7		1
295	911.4		1
296	932.6		1
297	893.2		1
298	912.8		1

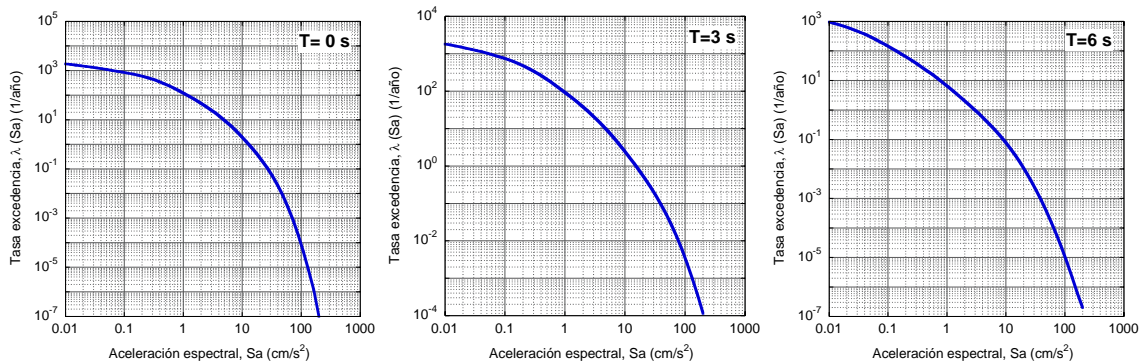


Figura 4.9. Curvas de peligro sísmico para los segundos 0, 3.0 y 6.0

4.4. Espectro de peligro uniforme para el sitio TXCR

Finalmente, con base en la información obtenida de las curvas de peligro sísmico se obtuvo un espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 125 años (Figura 4.10), que



se establecerá como el movimiento de entrada para los análisis de respuesta de sitio que se realizarán en la siguiente etapa de la investigación para un total de 2501 puntos ubicados dentro de la zona de estudio, del proyecto denominado “Microzonificación sísmica de la zona del ex lago de Texcoco”.

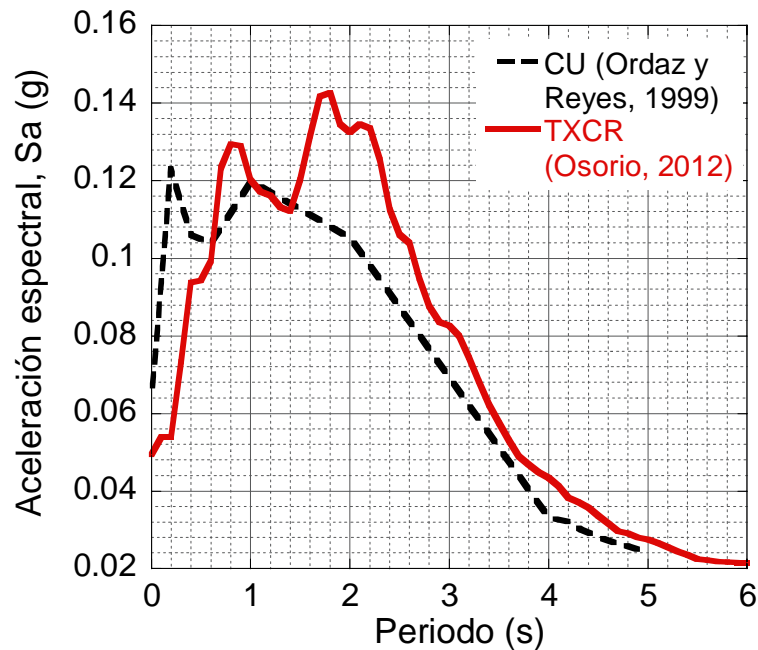


Figura 4.10. Espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 125 años para los sitios TXCR y C.U., obtenidos con los parámetros de la media geométrica para la ley de atenuación usada

En la Figura 4.10 se pueden observar los espectros de peligro uniforme de los sitios TXCR y CU para un periodo de retorno de 125 años; en ésta se puede apreciar que la aceleración máxima del terreno (PGA) en el sitio TXCR corresponde a una aceleración espectral (S_a) = 0.0493 (g), en tanto que la PGA de CU corresponde a un S_a = 0.0641 (g). La disminución en la PGA en el sitio TXCR se ha observado también al comparar los registros de iguales movimientos de la estación sísmológica CU y TXCR. En cuanto a la máxima amplitud espectral se presenta una diferencia del orden de 0.02 (g). Ambos cubren un rango amplio de contenidos de frecuencia, presentándose un corrimiento a la derecha del espectro de peligro uniforme del sitio TXCR.

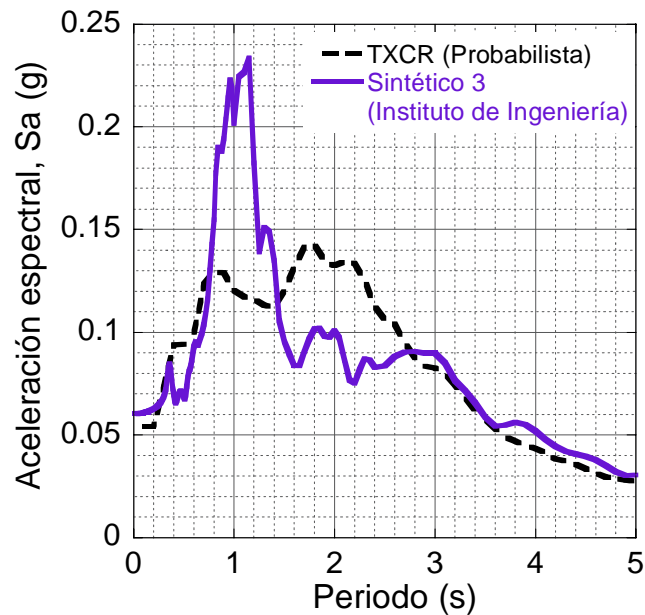


Figura 4.11. Comparación de espectros en roca

En la Figura 4.11 se presenta una comparación del espectro obtenido con el método presentado en el capítulo dos, sintético 3, *versus* el espectro de peligro uniforme para roca, obtenido en este capítulo. En esta comparación se puede observar que el espectro sintético 3 representa un escenario sísmico muy conservador.

4.5. Conclusiones

De los resultados obtenidos en esta etapa se puede concluir que el movimiento obtenido en este trabajo presenta una razonable congruencia en el contenido de frecuencias que se puede observar en esta región, por lo que puede ser utilizado como un movimiento representativo de la roca que subyace los depósitos altamente compresibles de suelo encontrados en la zona Noreste del Lago de Texcoco. Finalmente en el Anexo A se presentan todas las curvas de peligro sísmicos generadas en esta etapa, el valor de estas curvas radica en la posibilidad que brindan para construir espectros de peligro uniforme para cualquier periodo de retorno de interés (ej. 200, 350, 500 años).





5. RESPUESTA DE SITIO Y DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO

En la actualidad los ingenieros de la práctica no cuentan con información de los movimientos de diseño para realizar sus análisis estructurales en la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, ya que el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004) presenta para esta región una zonificación sísmica indicativa (Figura 5.1). En este sentido los trabajos desarrollados para esta investigación permitieron establecer una propuesta del espectro de diseño que caracteriza los movimientos del terreno que se pueden presentar en esta región. El movimiento de diseño propuesto toma en cuenta los parámetros que influyen en la respuesta de sitio tales como los perfiles estratigráficos, perfiles de velocidad de onda de cortante, y las curvas de degradación del módulo de rigidez al esfuerzo cortante y amortiguamiento; éstos se obtuvieron para 2501 puntos virtuales empleando técnicas geoestadísticas para una superficie de 150 km^2 (Figura 5.1), como se describió en el capítulo 3. Para los análisis de respuesta de sitio se tomó como movimiento de entrada el espectro de peligro uniforme obtenido para el sitio TXCR, ubicado en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. Con esta información se realizaron 2501 análisis de respuesta de sitio probabilista en el dominio de la frecuencia en la zona de estudio, el enfoque probabilista considera los movimientos sísmicos como fenómenos aleatorios, suponiéndolos como un proceso gaussiano con media cero, con lo que el fenómeno aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia. Con los espectros de potencia de respuesta y con la teoría del valor extremo se obtienen aceleraciones, deformaciones, esfuerzos máximos medios, y espectros de respuesta en diferentes puntos del sistema. En este proceso se usa el método lineal-equivalente para simular el comportamiento no-lineal de los materiales térreos.

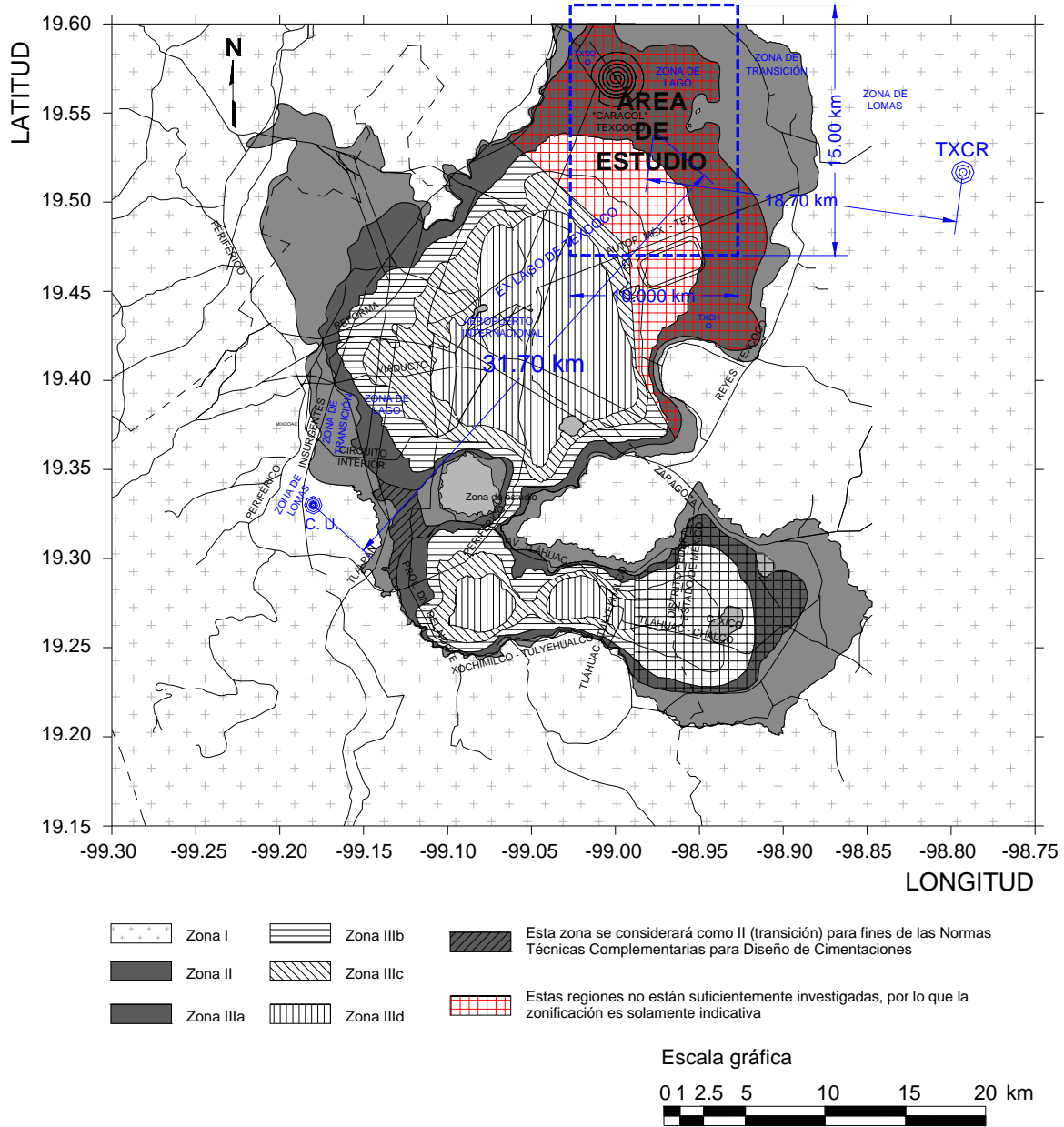


Figura 5.1. Zonificación sísmica propuesta en el RCDF (2004) y ubicación del área de estudio

5.1. Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio de un depósito de suelo consiste en predecir el comportamiento de éste ante una excitación sísmica. De este análisis, generalmente se obtienen historias de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, esfuerzos y deformaciones dinámicas para estimar riesgos asociados con los movimientos del terreno, y así determinar las fuerzas inducidas por un sismo que puedan llevar a la inestabilidad del terreno y las estructuras que soporta. Los análisis de respuesta de sitio unidimensionales se basan en la suposición de que todas las fronteras son horizontales y que la respuesta de un depósito de suelo es predominantemente causada por las ondas de corte horizontales, SH, que se propagan verticalmente desde los estratos de mayor impedancia dinámica, comúnmente llamada lecho de roca (Figura 5.2). Para estos análisis se asume que el suelo y la superficie de la base se extienden infinitamente en la dirección horizontal (Figura 5.3).

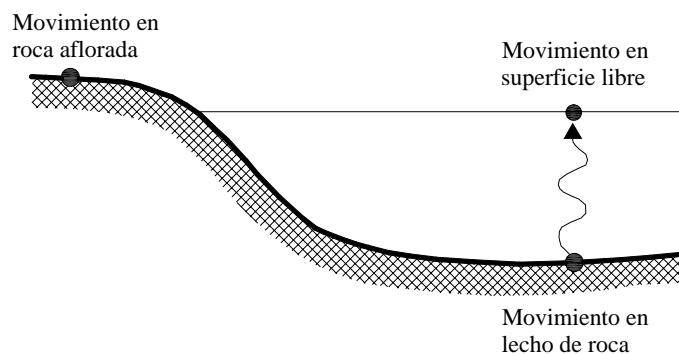


Figura 5.2 Nomenclatura de respuesta de sitio

Los análisis de respuesta de sitio tradicionalmente son subdivididos en aquellos que resuelven el problema de propagación de ondas en el dominio de la frecuencia y los que lo resuelven en el dominio del tiempo. La primera categoría, incluye programas como SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio unidimensional y FLUSH (Lysmer *et al.*, 1975), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio bidimensional. En la segunda categoría podemos citar programas como el QUAD4 (Idriss *et al.*, 1973) y más recientemente el QUAD4M (Hudson *et al.*, 1994). Todos estos programas usan un procedimiento lineal equivalente, en el cual se aproxima el comportamiento no lineal del suelo a través de una rigidez y amortiguamiento

representativos obtenidos de un proceso iterativo que los hace compatibles con una fracción determinada de la deformación angular máxima observada durante el sismo. Esta fracción generalmente varía entre 0.40 y 0.75, para niveles de excitación de moderada a alta respectivamente (ej. Seed *et al.*, 1993). Los análisis de respuesta de sitio también se pueden clasificar en deterministas y probabilistas (atendiendo al tipo del movimiento de entrada), siendo un ejemplo del primero los análisis de respuesta de sitio realizados con el programa SHAKE, y del segundo los realizados con el programa RADSH (Bárcena y Romo, 1994).

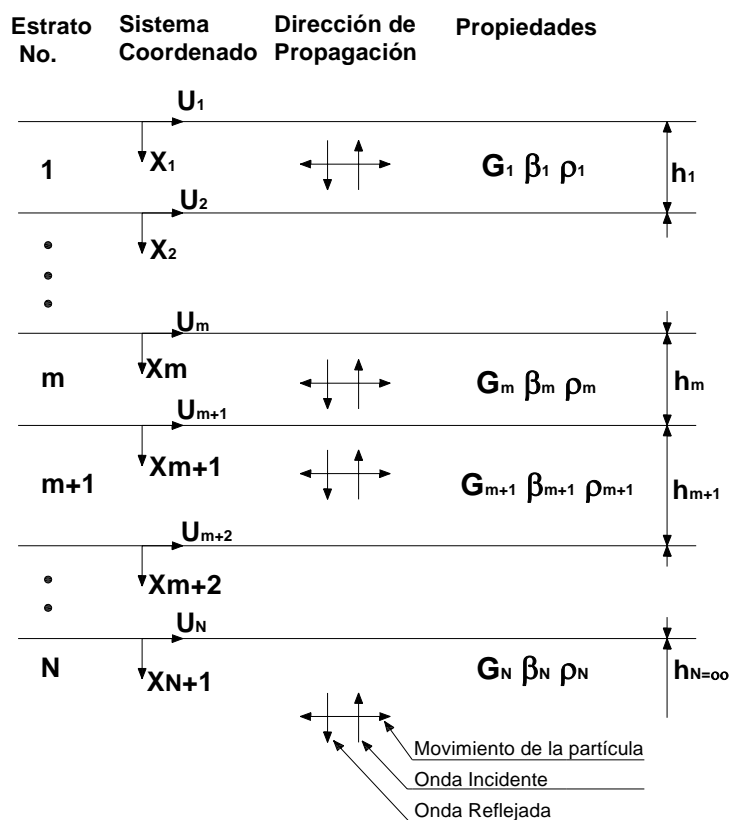


Figura 5.3 Sistema unidimensional

La definición del movimiento de entrada en el análisis de respuesta sísmica implica una de las mayores incertidumbres en este proceso, para resolver este problema, se recurre a procedimientos de tipo determinista, en el cual la excitación se declara a través de una historia de aceleraciones definida en algún punto del campo libre. La excitación comúnmente se precisa como un movimiento que satisface a un espectro de diseño dado.



Sin embargo, dicho espectro no está definido por una historia de aceleración única. Se ha demostrado que la respuesta calculada por un procedimiento determinista es significativamente dependiente de la historia de aceleraciones usada. De aquí que sea necesario ejecutar varios análisis con varias historias generadas a partir de un mismo espectro de respuesta para considerar las incertidumbres introducidas por el enfoque determinista. Una alternativa al enfoque determinista es considerar a los movimientos sísmicos como procesos aleatorios, suponiéndolos como gaussianos con media cero, con lo que el proceso aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia. Con el uso de la teoría de vibraciones aleatorias, las respuestas pico de un sistema lineal excitado por un proceso estocástico pueden ser calculadas para límites de confianza dados (probabilidad de no excedencia). Físicamente, tal definición del ambiente sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas.

Un procedimiento analítico que usa el enfoque probabilista fue introducido por Romo (1976) para el análisis de la respuesta dinámica de sistemas suelo-estructura. En éste se propone considerar al espectro de diseño como la respuesta extrema media de un proceso aleatorio equivalente. Este tratamiento aleatorio de los eventos sísmicos se ha incorporado en el programa de computadora RADSH para el análisis probabilista de la respuesta dinámica de depósitos de suelo estratificados horizontalmente sujetos a la propagación bidimensional de ondas de corte SH, utilizando la solución de Thomson-Haskell (1953). La excitación se define en términos de un espectro de respuesta medio a partir del cual se obtiene el espectro de potencia equivalente de la excitación. La respuesta del sistema se obtiene en términos de espectros de potencia a través de la teoría de vibraciones casuales. Con los espectros de potencia de respuesta y con la teoría del valor extremo se obtienen aceleraciones, deformaciones, esfuerzos máximos medios, y espectros de respuesta en diferentes puntos del sistema. En este proceso se usa el método lineal-equivalente para simular el comportamiento no-lineal de los materiales térreos. Esta metodología se empleó en esta investigación para resolver el problema de propagación unidimensional de ondas sísmicas.



5.2. Análisis de respuesta de sitio de los puntos virtuales

Con base en la información generada en los capítulos 3 y 4 de este trabajo de investigación se realizaron los análisis de respuesta de sitio para un total de 2501 puntos virtuales, distribuidos formando una malla con una separación de 250 m en ambas direcciones ortogonales (Figura 5.4).

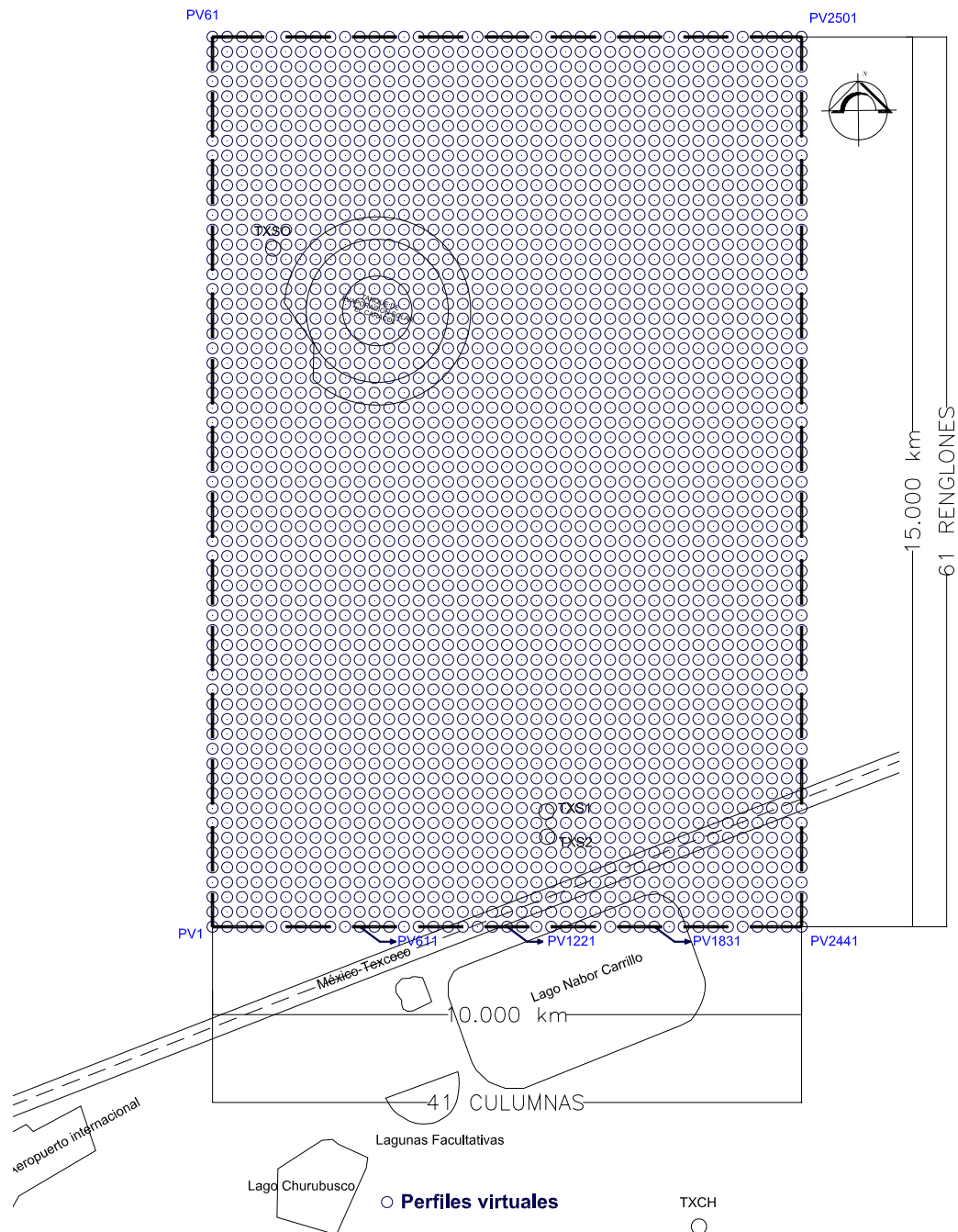


Figura 5.4. Ubicación de puntos virtuales

Los resultados de los análisis de respuesta de sitio realizados se muestran en la Figura 5.5, en ésta se pueden apreciar 2501 espectros respuesta, que generan una nube de respuestas que pueden presentarse en el área de estudio.

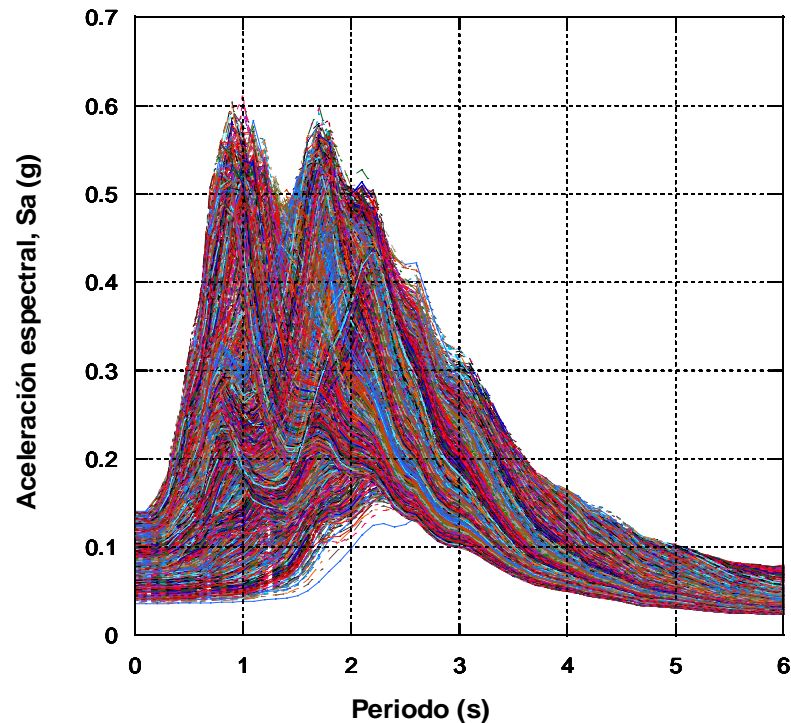


Figura 5.5. Espectro de respuesta de los puntos vitales 1 al 2501

A partir de los resultados de los análisis de respuesta de sitio se elaboró un mapa de isoperiodos dominantes (Figura 5.6), el cual permitió clasificar los espectros de respuesta en tres grupos. El primer grupo incluye respuestas cuyos periodos dominantes, T_s , se encuentren en un intervalo de cero a un segundo (Figura 5.7), el segundo grupo cubre un rango de respuestas de $1 \leq T_s \leq 2$ segundos (Figura 5.8) y el último grupo cubre un intervalo de respuestas de $2 \leq T_s \leq 3$ segundos (Figura 5.9). En este contexto, a partir de clasificación de las respuestas obtenidas, se propusieron los espectros de diseño para la microzonificación de la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, como se detalla en el siguiente apartado.

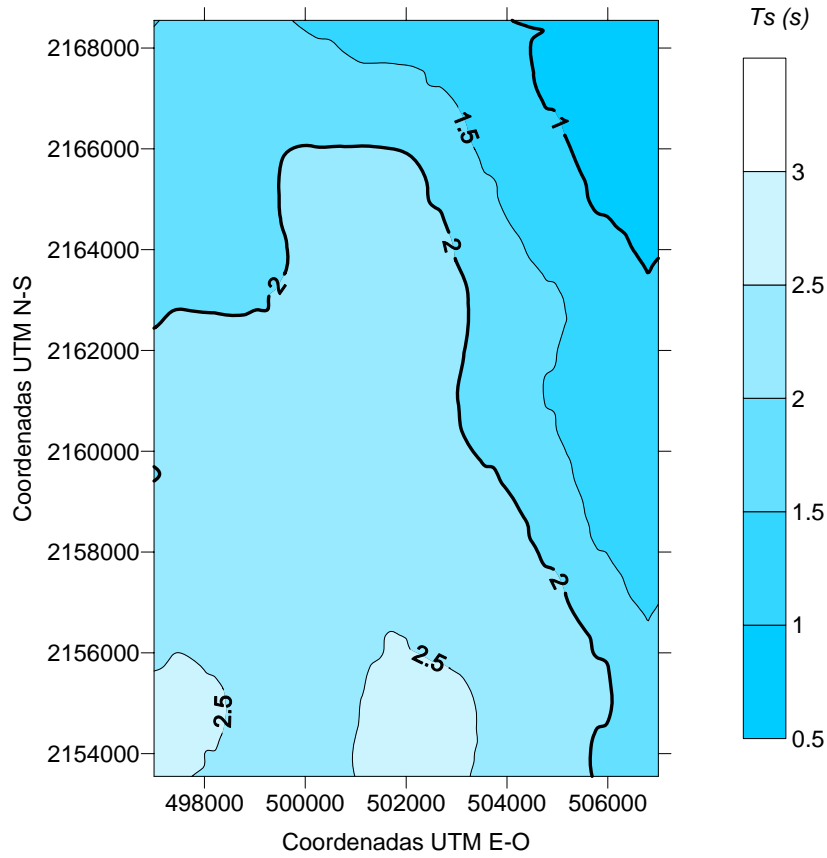


Figura 5.6. Periodos dominantes del suelo, T_s

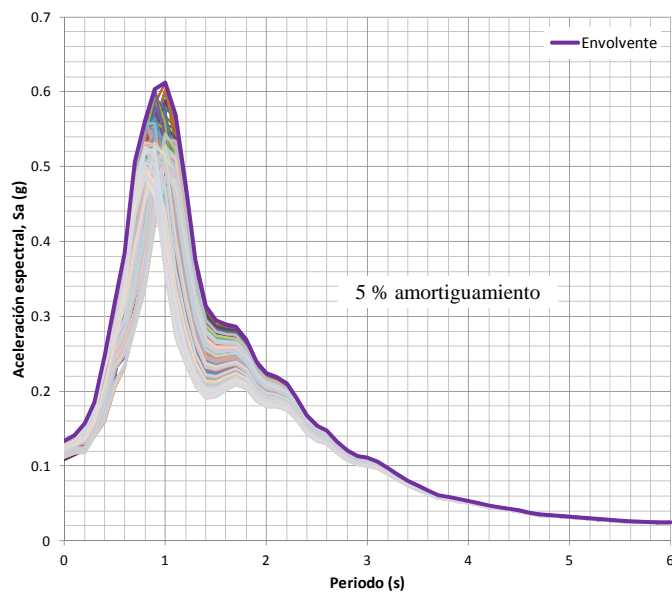


Figura 5.7. Respuestas con periodos dominantes del suelo, T_s , de cero a un segundo (Subzona 1)

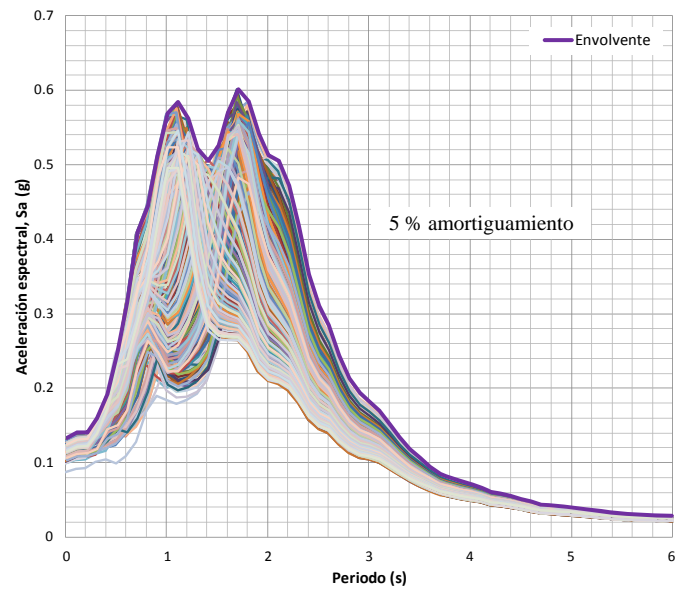


Figura 5.8. Respuestas con periodos dominantes del suelo, T_s , de uno a dos segundos (Subzona 2)

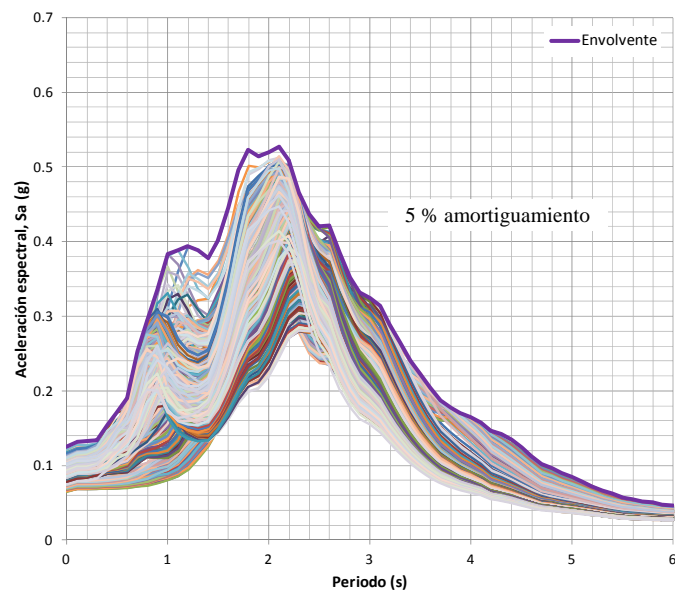


Figura 5.9. Respuestas con periodos dominantes del suelo, T_s , de dos a tres segundos (Subzona 3)

5.3. Espectros de diseño propuestos para la zona Noreste del ex Lago de Texcoco

De los análisis probabilistas de respuesta de sitio efectuados para los 2501 puntos virtuales, se obtuvieron tres conjuntos de espectros de aceleraciones y sus envolventes, éstos definen



la variación espacial de la respuesta dinámica de los depósitos encontrados en la zona Noreste del ex Lago de Texcoco y por ende su microzonificación. En este contexto, los espectros de diseño propuestos se obtuvieron reduciendo en un 40 % el valor de aceleración espectral máxima de los espectros de respuesta envolventes, ésta reducción está basada en las siguientes consideraciones (Rosenblueth, 1989; Rosenblueth y Ovando, 1990):

- 1) Los reglamentos de construcciones actuales reconocen el conservadurismo de un diseño dirigido a mantener estructuras en el rango lineal, por lo tanto cuando se toma en cuenta la ductilidad estructural de éstas se pueden hacer reducciones significativas sin que se presente daños importantes en las mismas
- 2) Las estructuras ordinarias tienen grandes reservas sobre su capacidad calculada de manera convencional
- 3) La interacción suelo estructura juega un papel muy importante, por lo tanto se debe tomar en cuenta la rigidez de la estructura, especialmente la de la subestructura en su propio plano, que disminuye la amplitud de las oscilaciones del terreno en función de las dimensiones de la planta del edificio, particularmente para ondas superficiales y ondas de cuerpo.

Así, después de reducir en un 40% del valor de la aceleración espectral máxima de los espectros de respuesta envolventes que caracterizan las subzonas en las que se dividió el área de estudio, se obtuvieron los espectros de diseño propuestos para la región investigada, como se muestra en las Figuras 5.10 a 5.12.

Los espectros de diseño propuestos en este apartado quedan así definidos por las expresiones que se presentan a continuación:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}; \text{ si } T < T_a \quad (5.1)$$

$$a = c; \text{ si } T_a \leq T \leq T_b \quad (5.2)$$

$$a = c \left(\frac{T_b}{T} \right)^r ; \text{ si } T > T_b \quad (5.3)$$

en donde los parámetros que intervienen en estas expresiones se obtienen de la Tabla 5.1.

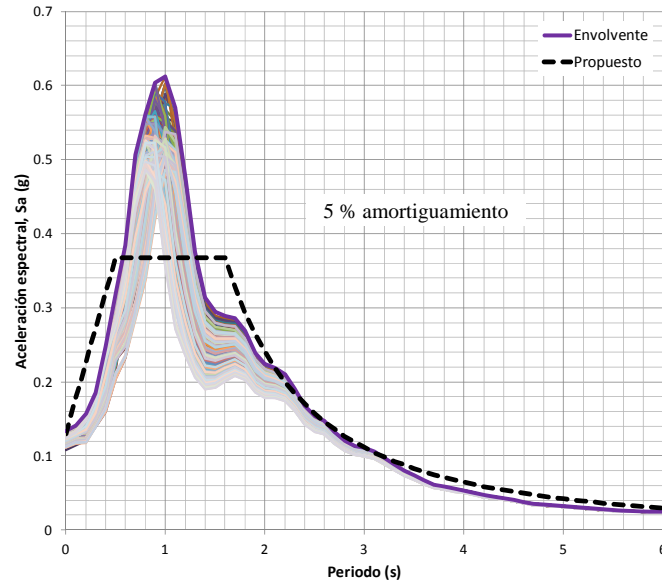


Figura 5.10. Espectro de diseño propuesto para la Subzona 1 del área de estudio

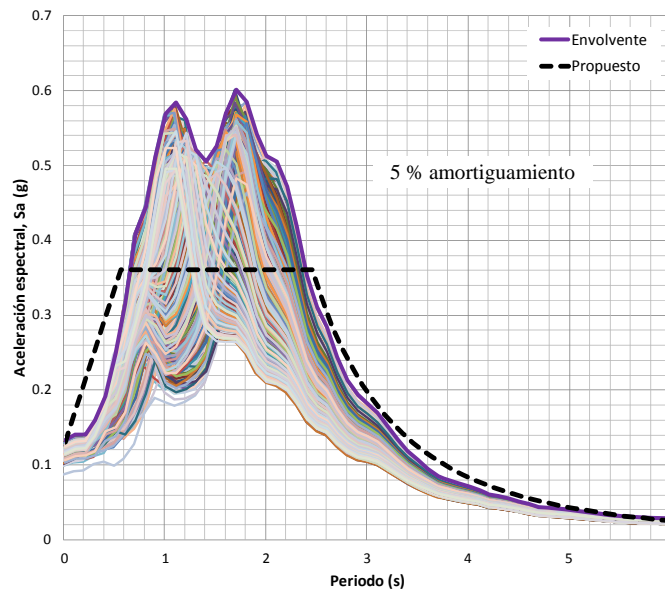


Figura 5.11. Espectro de diseño propuesto para la Subzona 2 del área de estudio

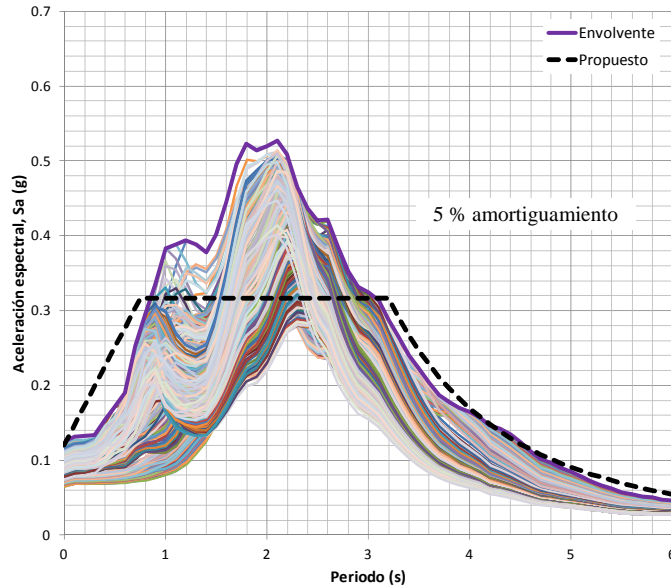


Figura 5.12. Espectro de diseño propuesto para la Subzona 3 del área de estudio

Tabla 5.1. Valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones propuestos para el área de estudio

<i>Subzona</i>	<i>c</i>	<i>a</i> ₀	<i>T</i> _a ¹	<i>T</i> _b ¹	<i>r</i>
1	0.37	0.13	0.50	1.60	1.9
2	0.36	0.13	0.55	2.45	3.0
3	0.32	0.12	0.75	3.20	2.8

¹Periodos en segundos.

Si bien la definición de esta microzonificación le permitirá al ingeniero de la práctica afinar los cálculos de sus diseños, con estos tres espectros propuestos se tendrían que contemplar en el reglamento nueve espectros de diseño, en donde seis de éstos corresponden a la zona de lago. Por lo tanto, con el propósito de simplificar el uso de los espectros de diseño, se propone un espectro único que engloba la respuesta observada en las tres subzonas en que se dividió la región estudiada (Figura 5.13), en donde los parámetros que intervienen en las expresiones para definir este espectro se obtienen de la Tabla 5.2.

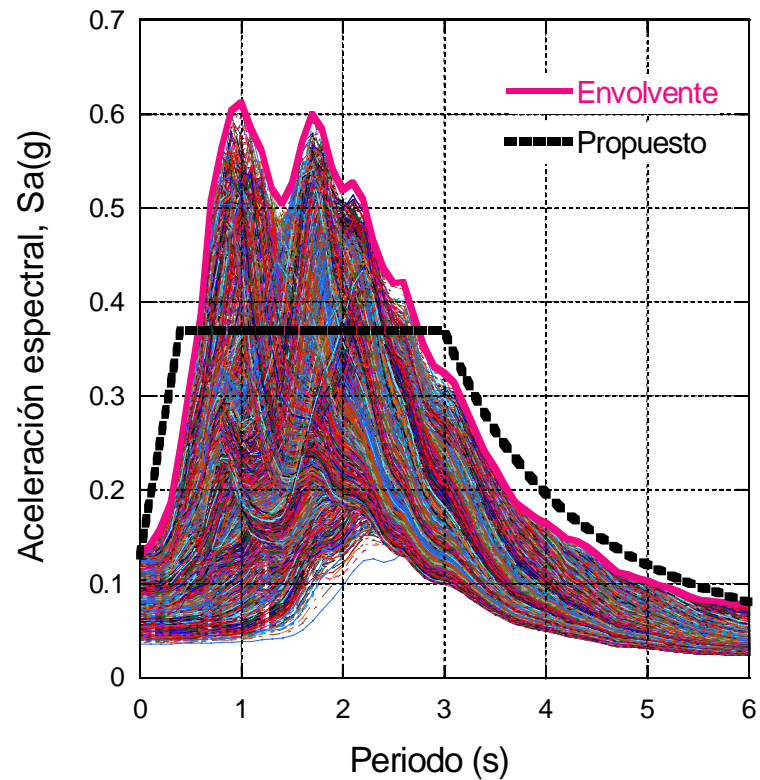


Figura 5.13. Espectro de diseño propuesto para la zona de estudio

Tabla 5.2. Valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones propuesto

c	a_0	T_a^1	T_b^1	r
0.37	0.13	0.40	3.00	2.2

¹Periodos en segundos.

5.4. Evaluación puntual del espectro de diseño propuesto (único)

En la Figura 5.7 se presenta una comparación del espectro de diseño (único) propuesto en este trabajo de investigación con el espectro de respuesta envolvente medido de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH, escalados a una aceleración máxima del terreno de 0.13 g, PGA=0.13 g, para compararlos con la misma magnitud (Mw= 8.2).

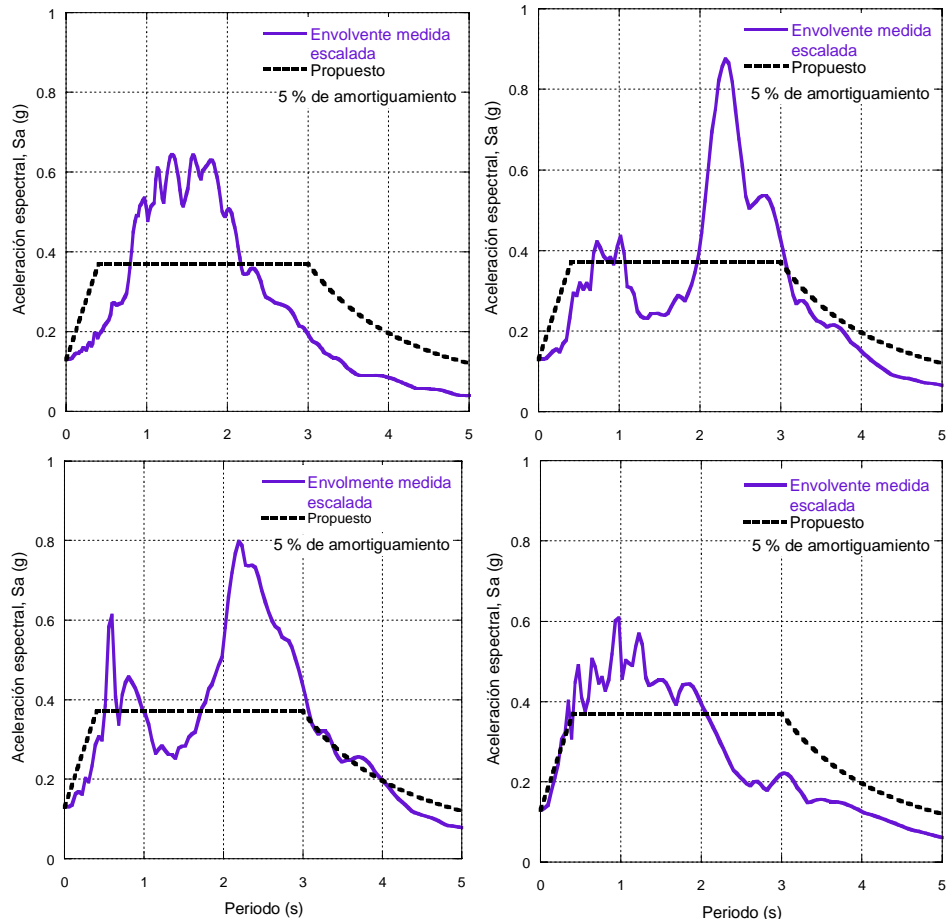


Figura 5.7. Comparación del espectro de diseño propuesto con el espectro de respuesta envolvente medido de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH

Los espectros de respuesta envolventes de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH, se obtuvieron siguiendo la metodología expuesta en Mayoral *et al.* (2008a), empleando los sismos que se presentan en la Tabla 5.3.



Tabla 5.3. Sismos empleados para determinar el espectro de respuesta envolvente medida de los sitios TXSO, TXS1, TXS2 y TXCH

Sitio	Evento	M_s	Distancia epicentral (km)	Tipo de suelo	PGA (gal)
TXSO	25/OCT/81	7.3	311.97	Arcilla	NS=-23.793; V=4.324; EW=-28.320
	21/SEP/85	7.60	381.1	Arcilla	NS=38.561; V=0.000; EW=34.748
	19/SEP/85	8.10	444.42	Arcilla	NS=103.036; V=-25.529; EW=-102.973
TXS1	30/SEP/99	7.5	442.79	Arcilla	NS=32.83; V=-6.96; EW=30.85
	15/JUN/99	6.50	211.83	Arcilla	NS=33.64; V=-12.48; EW=35.82
TXS2	30/SEP/99	7.5	442.27	Arcilla	NS=-24.80; V=4.25; EW=18.54
	15/JUN/99	6.50	211.55	Arcilla	NS=-24.14; V=-7.95; EW=25.71
TXCH	07/JUN/82 (2)	7.0	353.74	Arcilla	NS=-11.41; V=5.47; EW=12.19
	07/JUN/82 (1)	6.9	365.94	Arcilla	NS=-22.17; V=5.33; EW=14.30
	24/OCT/80	Mb=6.4	169.80	Arcilla	NS=-30.88; V=-21.88; EW=26.07
	14/MAR/79	Mb=7.0	324.74	Arcilla	NS=31.86; V=-12.49; EW=-22.43

En la Figura 5.8 se presenta una comparación del espectro diseño (único) propuesto en esta investigación con los espectros de diseño del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004). Cabe hacer notar que esta comparación es cualitativa ya que los espectros del reglamento fueron establecidos considerando una magnitud de momento sísmico de 8.1, en tanto que el espectro propuesto en este trabajo considera una magnitud de momento sísmico de 8.2, con el mismo periodo de retorno de 125 años.

En la Figura 5.9 se presenta el espectro de respuesta obtenido para el punto virtual 350, PV350, con RADSH, un punto cercano al sitio TXSO, en Texcoco Sosa, del cual se presenta la media, la envolvente y las dos componentes horizontales del sismo del 19 de septiembre de 1985, registrado en esta estación sismológica (TXSO). En esta figura se puede apreciar que tanto la respuesta medida como la respuesta estimada presentan una muy buena congruencia, tanto en el contenido de frecuencias como con sus amplitudes espectrales. Estableciéndose de esta manera la validación de los perfiles virtuales estratigráficos y de las curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento en función de índice de plasticidad, generados a partir de técnicas geoestadísticas.

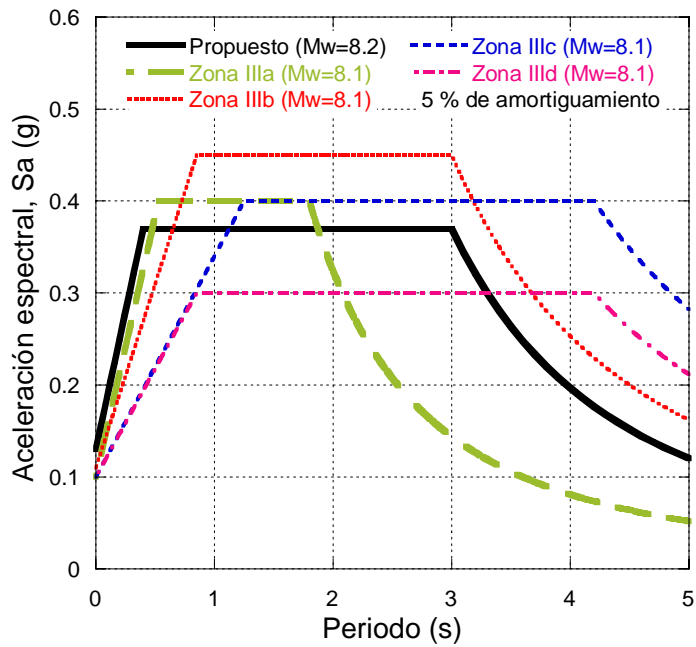


Figura 5.8. Comparación del espectro de diseño (único) propuesto para la zona en estudio con los espectros del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal

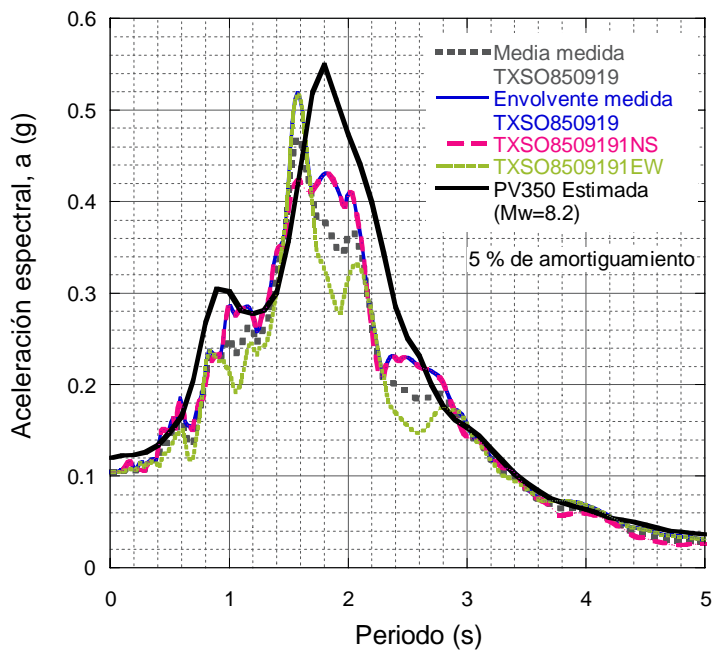


Figura 5.9. Espectros de respuesta del punto virtual 350 y el sitio TXSO



5.5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los trabajos realizados para generar una propuesta del espectro de diseño para la zona Noreste del ex Lago de Texcoco, llevándose a cabo 2501 análisis probabilistas de respuesta de sitio. De los resultados de estos análisis se concluyó que los espectros de respuesta de los puntos virtuales pueden ser representados favorablemente por un sólo espectro de diseño. Los parámetros para el espectro de diseño propuesto se definen con un coeficiente sísmico igual a 0.37 g, la aceleración máxima del terreno es de 0.13 g, mientras que su T_a es de 0.40 s y T_b tiene un valor de 3.00 s. El contenido de frecuencias que cubre el espectro diseño incluye las observadas en los análisis, en tanto que la amplitud corresponde al 60% de la amplitud máxima de la envolvente de los análisis realizados.





6. CONCLUSIONES

En cuanto a parámetros geodinámicos

En los trabajos realizados para determinar los parámetros que influyen en la respuesta de sitio, se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) La variación espacial de la velocidad de onda de cortante presenta una distribución de probabilidades tipo lognormal;
- 2) La variación espacial del índice de plasticidad presenta una distribución de probabilidades tipo normal.

En cuanto a las curvas $G/G_{máx-\gamma}$ y $\lambda-\gamma$

Se considera adecuada la utilización del modelo propuesto por Darendeli y Stokoe (2001) para caracterizar las propiedades dinámicas de los geomateriales encontrados en el sitio de estudio, ya que se observó que es capaz de reproducir el comportamiento dinámico de los geomateriales de manera aceptable, empleando parámetros que se pueden obtener de forma práctica, tanto para arcillas, como para limos y arenas.

En cuanto al modelo geoestadístico

Mediante comparaciones de los perfiles de velocidad de onda de cortante medidos y estimados se puede establecer que presentan una buena congruencia, validando el empleo de las técnicas geoestadísticas, para la generación de los perfiles virtuales de velocidad de onda de cortante. Para validar los perfiles virtuales estratigráficos (espesores de estratos) y curvas de degradación del módulo de rigidez y amortiguamiento en función del índice de plasticidad, se comparó la respuesta medida en el sitio TXSO y la obtenida en el punto virtual PV350, punto más cercano a TXSO, obteniéndose una muy buena congruencia tanto en el contenido de frecuencias, como en las amplitudes espectrales. Con ello se concluye que la información virtual generada a partir de técnicas geoestadísticas para este trabajo de investigación es confiable.

*En cuanto al espectro de peligro uniforme (UHS_{roca})*

Se concluye que hay poca variación entre UHS_{roca} de Ciudad Universitaria y el obtenido para el sitio TXCR, para un periodo de retorno de 125 años, considerando este último representativo de la zona de estudio.

En cuanto a los métodos para definir el ambiente sísmico

De los trabajos realizados en el capítulo 2 y 4 se pudo establecer una comparación de los movimientos en roca obtenidos con dos procesos deferentes, el primero definido a partir de los registros acelerográficos de estaciones sismológicas desplantadas en la zona de estudio, con los cuales se genera una forma espectral normalizada, y el segundo a través de un análisis de peligro sísmico probabilista, observándose que ambos cubren contenidos de frecuencias similares, aunque con la primera metodología se presenta un pico alrededor del periodo $T=1.1$ s en el espectro obtenido en roca. En este sentido, se puede concluir que el espectro presentado en el capítulo 2 es representativo de un escenario más conservador, con una amplitud que sobrepasa por mucho la ordenada espectral de 0.16 g, propuesto en el RCDF (2004). Por lo tanto, se consideró apropiado el uso del espectro de peligro uniforme, obtenido en el capítulo 4, para los análisis de respuesta de sitio realizados en este trabajo, ya que los resultados generados permitirán hacer las recomendaciones de diseño en las próximas actualizaciones del RCDF. En la Figura 6.1 se presenta una primera propuesta de actualización del mapa de zonificación sísmica del Distrito Feral (RCDF, 2004), que incluye la microzonificación del área de estudio, denominada como IIIe, la cual se subdividió en tres subzonas, cada una con su correspondiente espectro de diseño (capítulo 5). Finalmente, con el propósito de simplificar el uso de los espectros de diseño del reglamento, se propuso un espectro único que engloba la respuesta observada en las tres zonas en las que se dividió la región estudiada, para el que la actualización del mapa de zonificación sísmica del Distrito Federal queda como se muestra en la Figura 6.2, que incluye la zona IIIe.

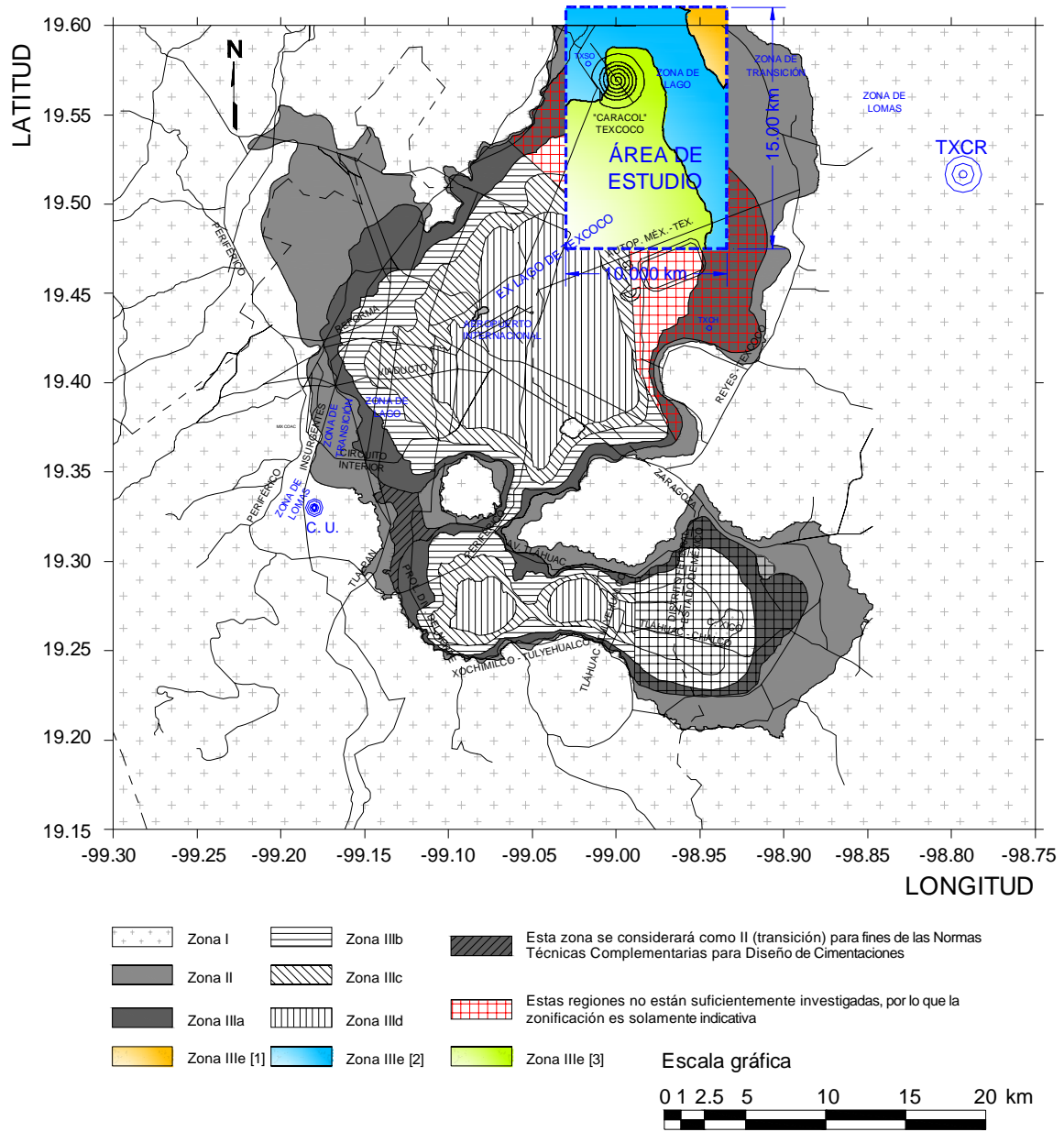


Figura 6.1. Propuesta de actualización de la zonificación del DF para fines de diseño por sismo (incluye subzonas de la zona IIIe)

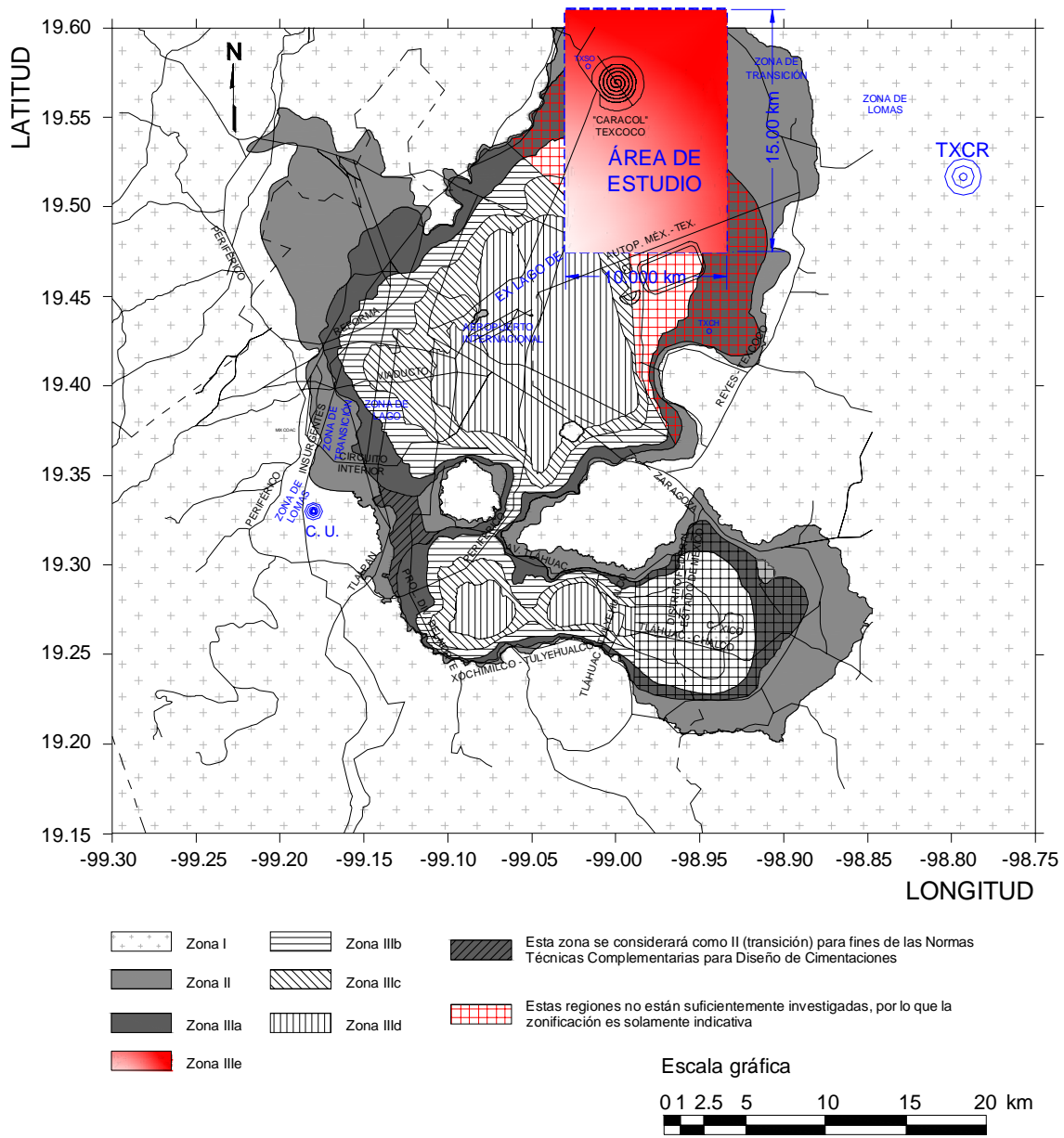


Figura 6.2. Propuesta de actualización de la zonificación del DF para fines de diseño por sismo (incluye zona IIIe)



6.1. Líneas de investigación futuras

Con la metodología expuesta en este trabajo, se tiene la capacidad para determinar la microzonificación sísmica de la zona Sureste del Distrito Federal (Lago de Chalco), en la cual hasta hoy el RCDF no tiene establecido un espectro de diseño.

En este contexto, tomando como marco de trabajo esta investigación, se podrá plantear la zonificación sísmica, de regiones densamente pobladas del país en donde se requiera normalizar el análisis y diseño de estructuras sismorresistentes.

Dirigir trabajos de investigación en el que se lleven a cabo análisis de respuesta de sitio tridimensionales, que tomen en cuenta el comportamiento no lineal de los geomateriales, que permitan realizar comparaciones con los resultados que se obtuvieron en esta investigación, para establecer la necesidad del uso de análisis más complejos para estudiar el comportamiento dinámico de los depósitos de suelo y su influencia en la determinación de los espectros de diseño de los códigos de construcción.



**REFERENCIAS**

- Abrahamson, N. A., 2000. State of the practice of seismic hazard evaluation. Proceedings of GeoEng 2000, Melbourne, 19-24 November, Vol. 1, pp. 659-685
- Ambraseys, N. N., 1990. Uniform magnitude reevaluation of european earthquakes associated with strong-motion records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(1), 1-20
- Anderson, J. G., Wesnousky S. G. y Stirling M. W., 1996. Earthquake size as a function of fault slip rate. *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 683-690
- Arboleda, J. y Ordaz, M., 1993. Un mejor uso de los datos estadísticos para estimación de la sismicidad local. *Memorias del X Congreso de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta Jalisco, Méx.* pp. 21-27
- Auvinet, G., Juárez. M. y Valdez P., 2005, Caractérisation géostatistique du sol de la ville de Mexico, *Revue Française de Géotechnique*, Paris, France, Enero.
- Auvinet, G., Mellah R., Masrouri F. y Rodríguez, J.F., 2000, La méthode des éléments finis stochastiques en Géotechnique, *Revue Française de Géotechnique N° 93*, Paris, France, pp. 67-79.
- Bárcena, A. y Romo M. P., 1994. RADSH - Programa de computadora para analizar depósitos de suelos estratificados horizontalmente sujetos a excitaciones dinámicas aleatorias, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Bazzurro, P., Cornell, C. A., 2004. Ground-Motion Amplification in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94: 2090-2109.
- Bazzurro, P., y Cornell, C. A., 2004. Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94: 2110-2123
- Ben-Zion, Y., 1996. Stress, slip and earthquakes in models of complex single-fault systems incorporating brittle and creep deformations, *J. Geophys. Res.* 101, 5677-5706
- Benson, C. H. y Rashad, S. M., 1996. Enhanced Subsurface Characterization for Prediction of Contaminant Transport Using Co-Kriging, *Geostatistics for Environmental and*



- Geotechnical Applications, ASTM STP 1283, R. Mohan Srivastava, Shahrokh Rouhani, Marc V. Cromer, A. Ivan Johnson, Alexander J. Desbarats, Eds., American Society for Testing and Materials.
- Blume, J.A., 1980. Distance partitioning in attenuation studies. Pages 403-410 of: Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, vol.2
- Bolt, B. A., y Abrahamson, N. A., 1982. New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 72(6), 2307-2321
- Bommer, J. J., Abrahamson, N. A., 2006. Why do modern probabilistic seismic hazard analyses often lead to increased hazard estimates?, Bulletin of the Seismological Society of America, 96: 1967-1977
- Boore, D. M., Joyner, W. B., y Fumal, T. E., 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. Seismological Research Letters, 68(1), 128-153
- Campbell, K. W., y Bozorgnia, Y., 2000. New empirical models for predicting near-source horizontal, vertical, and V/H response spectra: Implications for design. In: Proceeding of the Sixth International Conference on Seismic Zonation
- Chapman, M. C., 1995. A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design, Bulletin of the Seismological Society of America, 85: 937-942
- Clark, I., 1979. Practical Geostatistics. Elsevier Publishing, New York.
- Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 58: 1583-1606
- Cornell, C. A., y Vanmarcke, E., 1969. The major influences on seismic risk, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 15-19 January
- Cramer, C. H., 2003. Site specific seismic hazard analysis that is completely probabilistic, Bulletin of the Seismological Society of America 93: 1841-1846
- Cromer, M. V., Rautman, C. A. y Zelinski, W. P., 1996. Geostatistical Simulation of Rock Quality Designation (RQD) to Support Facilities Design at Yucca Mountain, Nevada, Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications, ASTM STP 1283, R. Mohan Srivastava, Shahrokh Rouhani, Marc V. Cromer, A. Ivan Johnson, Alexander J. Desbarats, Eds., American Society for Testing and Materials.



- Crouse, C. B., y McGuire, J. W., 1996. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions. *Earthquake Spectra*, 12(3),407-439
- Darendeli, M. B. y Stokoe, K. H., II, 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Geotechnical Engineering Report GD01-1, University of Texas at Austin, Austin.
- Darendeli, M.B., 2001. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, 362 pp.
- Dawson, K. M. y Baise, L. G., 2005. Three-dimensional liquefaction potential analysis using geostatistical interpolation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 25, Issue 5, July, Pages 369-381.
- 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, ISSIVIIFE y SMMS, August 20, Mexico City, pp 1-7.
- Dixon, T. H., Norabuena, E. y Hotaling, L., 2003. Paleoseismology and global positioning system: earthquake-cycle effects and geodetic versus geologic fault slip rates in the eastern california shear zone. *Geology* 31, 55-58
- Electric Power Research Institute (EPRI), 1993. Guidelines for determining design basis ground motions, in Volume 2: Appendices for Ground Motion Estimation-Appendix 6.A: Probabilistic Model of Soil Profile Variability, EPRITR-102293.
- Esteva, L. y Ordaz M, 1989. Riesgo sísmico y espectros de diseño en la República Mexicana, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Esteva, L., 1967. Criteria for the construction of spectra for seismic design, 3rd Pan-American Symposium of Structures, Caracas, Venezuela, 3-8 July
- Esteva, L., 1970. Seismic risk and seismic design. Pages 142-182 of: Hansen, R. J. (ed), *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. The M.I.T. Press.
- Flores, O. y Romo M. P., 2001. Dynamic behavior of tailings, Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, USA, Proceedings on CD, Paper No. 1.64, ISBN 1-8870009-05-1.



- Frankel, A. D., Stephenson, W. J., Carver, D. L., Williams, R. A., Odum, J. K. y Rhea, S., 2007. Seismic hazard maps for Seattle, Washington, incorporating 3D sedimentary basin effects, nonlinear site response, and rupture directivity. U. S. Geological Survey Open File Report 2007-1175, 77 p.
- Galván, E. y Auvinet, G., 2004. Caracterización de la resistencia al corte en el suelo del fondo marino de la sonda de Campeche, Memorias XXII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, SMMS, Guadalajara, Vol. 1: 163-170.
- Galván, E. y Auvinet, G., 2011, Modelo geostadístico y geotécnico de la formación de emanaciones de hidrocarburos en el fondo marino del campo Cantarell, Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. 12, N° 2 (abril-junio 2011), Art. 590, ISSN 1405-7743 FI-UNAM, pp. 223-234, México D.F.
- Goderya, F. S., Dahab, M. F., Woldt, W. E. y Bogardi, I., 1996. Spatial Patterns of Field Measured Residual Soil Nitrate, Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications, ASTM STP 1283, R. Mohan Srivastava, Shahrokh Rouhani, Marc V. Cromer, A. Ivan Johnson, Alexander J. Desbarats, Eds., American Society for Testing and Materials.
- Goes, S. D. B., 1996. Irregular recurrence of large earthquakes: An analysis of historic and paleoseismic catalogs, J. Geophys. Res., 101(B3), 5739-5749, doi: 10.1029 /95JB03044.
- Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives, Geoderma, Volume 89, Issues 1-2, April 1999, Pages 1-45
- Gupta, I. D., 2002. The state of the art in seismic hazard analysis. Journal of Earthquake Technology, Paper No. 428, Vol. 39, No. 4, December, pp. 311-346
- Gutenberg, B. y Richter, C. F., 1954. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Hardin, B.O. y Drnevich, V.P., 1972, Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM6, June, pp. 603-624.
- Holzer, T.L., Bennett, M.J., Noce, T.E. y Tinsley, J.C. III, 2005, Statistical Distribution Sand Depth Dependence of Shear Wave Velocity, Earthquake Spectra, Volume 21, No. 1, pages 161-177, February, Earthquake Engineering Research Institute



- Huang, Y., Saleur, H., Sammis, C. y Sornette, D., 1998. Precursors, aftershocks, criticality and self-organized criticality. *Europhys. Letts* 41, 43-48.
- Hudson, M., Idriss, I. M., y Beikae, M., 1994. QUAD4M: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. Center for Geotechnical Modeling, Dep. of Civil and Env. Engng, University of California, Davis
- Idriss, I. M., Lysmer, J., Hwang, R., y Seed, H.B., 1973. QUAD4: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures. Report No. EERC 73-16, University of California, Berkeley, CA
- Isaaks, E. y Srivastava, R. M., 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Journel, A.G. y Huijbregts, Ch. J., 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M., 1988. Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. Pages 43-102 of: *Proceeding of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II*. Geotechnical Division, ASCE.
- Joyner, W. B., y Boore, D. M., 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2011-2038
- Juárez, M. y Auvinet, G., 2000. Caracterización geoestadística del subsuelo del valle de México, XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, SMMS, Oaxaca, Vol. 2, pp. 387-396, México.
- Juárez, M. y Auvinet, G., 2011. Contribución a la caracterización geotécnica de la zona norte de la cuenca de México, The 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto-Canada, October.
- Juárez, M., 2001, Aplicación de la geoestadística a la descripción del subsuelo del valle de México, Tesis de Maestría, ESIA-IPN, México.
- Klügel, J. U., 2008. Seismic Hazard Analysis - Quo vadis?, *Earth-Science Reviews*, Volume 88, Issues 1-2, May, Pages 1-32, ISSN 0012-8252
- León, J. L., Jaime A. y Rabago A., 1974. Propiedades dinámicas de los suelos, estudio preliminar. Informe interno del I de I UNAM.



- Lermo, J. y Chávez-García F. J., 1994. Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, pp 413-423.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., y Seed, H.B., 1975. FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems. Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, CA
- Marsal, R. J. y Graue R., 1969. El subsuelo del Lago de Texcoco. Volumen Nabor Carrillo.
- Marsal, R. J. y Mazari M., 1959, El subsuelo de la ciudad de México, Publicado por la UNAM en segunda edición en 1969.
- Mayoral, J. M., Osorio, L. y Romo, M. P., 2008b. Microzonificación sísmica de la zona del Ex-Lago de Texcoco, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Mayoral, J. M., Romo, M. P. y Osorio, L., 2006. Estudios de campo y laboratorio llevados a cabo para la caracterización geo-sísmica en la zona del Lago de Texcoco, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Mayoral, J. M., Romo, M. P. y Osorio, L., 2008a. Seismic parameters characterization at Texcoco lake, Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 28, Issue 7, Pages 507-521, July
- Mayoral, J. M., Romo, M. P., Mendoza, M. J., Osorio, L., Cardona, L. C., Vázquez, R. E., Morales, R., López, L., Martínez, S. y Flores, O., 2006. Diseño de la Cimentación de la Subestación Eléctrica Lago I, Informe del IIUNAM elaborado para Luz y Fuerza del Centro (LFC).
- Mayoral, J. M., Romo, M. P., Osorio, L. y Flores, F., 2009. Implicaciones del hundimiento regional del subsuelo en el valle de México y acciones sísmicas en el comportamiento del revestimiento primario del túnel de la Línea 12 del Metro. Reporte para Dirección General de Proyecto Metro, GDF. Junio. Instituto de Ingeniería, UNAM
- Mayoral, J. M., Romo, P. R., Mendoza, M. J. y Osorio, L., 2011. Revisión del diseño geotécnico y geosísmico del puente Punta Santa Fe, Informe de Avance 3. Elaborado para la Dirección General de Obras Concesionadas, Secretaría de Obras y Servicios, GDF, Controladora Vía Rápida Poetas, S.A.P.I. de C.V., IXE Banco, S. A., Fideicomiso F/835, UNAM, Instituto de Ingeniería, México. Noviembre.



- McGuire, R. K., 1976. FORTRAN computer program for seismic risk analysis. U.S. Geological Survey 76-67 Open-File Rept.
- McGuire, R. K., 1977. Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 5,211-234.
- McGuire, R. K., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85: 1275-1284
- Medina, Z., 2001, Interpretación geotadística de los resultados de exploraciones geotécnicas, Tesis de Maestría, UNAM, México.
- Mendoza, M. J., Ortega U., Ibarra E., Romo M. P., Mayoral J. M. y Calderón C. O., 2006. Diseño geotécnico de la cimentación de las torres y postes de transmisión de la línea 230 kv Lago I - Madero, de Luz y Fuerza del Centro, Informe del IIUNAM elaborado para Luz y Fuerza del Centro (LFC), Diciembre.
- Miller, S. M. y Kannengieser, A. J., 1996. Geostatistical Characterization of Unsaturated Hydraulic Conductivity Using Field Infiltrometer Data, *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*, ASTM STP 1283, R. Mohan Srivastava, Shahrokh Rouhani, Marc V. Cromer, A. Ivan Johnson, Alexander J. Desbarats, Eds., American Society for Testing and Materials.
- Myers, D. E. 1987. Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations. *Water Resources Research*. 23(3): 283(93).
- Nishenko, S. P., Singh, S. K., 1987. Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Ordaz, M., 2004. Some integrals useful in probabilistic seismic hazard analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94: 1510-1516
- Ordaz, M., y Reyes, C., 1999. Earthquake hazard in Mexico City: Observations versus computations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89: 1379-1383
- 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*, 2, 107 123
- Ovando, E., Flores, M., Ortiz, R., Rojas, E. y Valderrama, Y. V., 2006. Diseño geotécnico de la cimentación de las torres y postes de transmisión de la línea 400 kV Derivación-



- Lago I, de Luz y Fuerza del Centro, Informe del IIUNAM elaborado para Luz y Fuerza del Centro (LFC), Diciembre.
- Pérez-Rocha, Sánchez-Sesma, Ordaz, Singh y Reinoso, 2000. Strong ground motion prediction at México City, Proceedings 12WCEE, New Zealand, paper 2693.
- Petitgas, P., 1996. Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data 5: 114-142. In: B. A. Megrey & E. Mosknes, (E). Computers and Fisheries Research. Chapman-Hall, Londres.
- Rascón, Ch. O., 1964. Espectros de temblores en el valle de México considerando la viscosidad del suelo. Tesis de maestría, Fac. de Ingeniería, UNAM, Div. del Doctorado.
- RCDF, 2004. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Administración Pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno, Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismos, México.
- Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis. Issues and Insights. Columbia University Press, New York.
- Reséndiz, D. y Zonana, J., 1969. La estabilidad a corto plazo de excavaciones a cielo abierto en la arcilla de la ciudad de México. Volumen Nabor Carrillo.
- Reséndiz, D., Nieto, J. A. y Figueroa, J., 1967. The elastic properties of saturated clays from field and laboratory measurements. Memorias del 3er COPAMIF.
- Reyes, C., 1999. El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado, Febrero
- Romo, M. P, Mayoral, J. M., Mendoza, M. J., Osorio, L., Flores, F. y Ramírez, J., 2009. Revisión de criterios de diseño geotécnico para la construcción del Viaducto Bicentenario, Estado de México, Tramo 3. Informe elaborado para el Sistema de Autopistas, Aeropuertos, Servicios Conexos y Auxiliares del Estado de México (SAASCAEM) y Viaducto Bicentenario, S. A. de C. V. (Grupo OHL).
- Romo, M. P. y Jaime, A., 1986. Características dinámicas de las arcillas del Valle de México y análisis de respuesta de sitio, Reporte Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Abril
- Romo, M. P., 1976. Soil-structure interaction in a random seismic environment, PhD dissertation, University of California, Berkeley



- Romo, M. P., 1995. Clay Behavior, Soil Response and Soil Structure Interaction Studies in Mexico City. Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Luis Missouri, USA, Vol 2, pp 1039-1051
- Romo, M. P., Auvinet, G., Ovando, E., Mendoza, M. J., Taboada, V. M., Lermo, J. y Mooser, F., 2001. Estudios de Ingeniería Geotécnica para el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el ex-Lago de Texcoco y en Zapotlán De Juárez (Primera Edición), Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe Técnico elaborado para Aeropuertos y Servicios Auxiliares (18 Anexos), México, D.F., Julio.
- Romo, M. P., Jaime, A. y Taboada, V., 1989. Comportamiento cíclico de arcilla normalmente consolidada de la ciudad de México, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México
- Romo, M. P., Mendoza, M. J., Botero, E., Flores, O., Mayoral, J. M. y Osorio, L., 2012. Estudios para la verificación de la seguridad estructural y geotécnica del monumento del Bicentenario de la Independencia de México: "Estela de Luz". Aspectos geotécnicos, Informe Final. Informe elaborado para la I.I.I. Servicios, S. A. de C. V. Abril.
- Romo, M.P., 1990. Comportamiento dinámico de las arcillas de la ciudad de México y su repercusión en la ingeniería de cimentaciones. Memorias, El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de Cimentaciones a Cinco años del Sismo, SMMS, pp 83-94.
- Rosenblueth, E. y Ordaz, M., 1987. Use of seismic data from similar regions, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 15, 619- 634.
- Rosenblueth, E. y Ovando, E., 1990. Riesgo sísmico en el valle de México: una perspectiva geotécnica, El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, S. C. , México, D. F.
- Rosenblueth, E. y Ovando, E., 1991. Geotechnical lessons from Mexico City and other recent earthquakes, Proc. Second Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earth. Engng. and Soil Dynamics, vol II, 1799-1811, Univ. of Missouri, Rolla



- Rosenblueth, E., 1987. Modelos probabilísticos de la ocurrencia de temblores, Memorias del Simposio Generación, Propagación y Efectos de Temblores, SMMS, SMIS, SMF, UGM, abril
- Rosenblueth, E., Ordaz, M., Sanchez-Sesma, F. J., y Singh, S. K., 1989. The Mexico earthquake of september 19, 1985, design spectra for Mexico's Federal District, *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, p.p. 273-291.
- Rüttener, E., Egozcue, J., Mayer R. D. y Mueller, S., 1996. Bayesian estimation of seismic hazard for two sites in Switzerland. *Nat Hazards*, 14, 165-178
- Sammis, C. G., Sornette, D. y Saleur, H., 1996. Complexity and earthquake forecasting in reduction and predictability in natural disasters, *SFU Studies in the Sciences of Complexity*, Vol XXV, edited by Rundie, J. B., Klein, W., and Turcotte, D. L., 143-156, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Samper, F.J. y Carrera, J., 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Santoyo, E., 1969. Cambios en la resistencia al corte de las arcillas del Lago Texcoco debido a consolidación y a exploraciones. Volumen Nabor Carrillo.
- Santoyo, E., 1981. Exploración geotécnica de la zona instrumentada cercana a la Lumbrera No. 6, DGCOH, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, TJNAM, proyecto 9187.
- Schnabel, B., Lysmer, J., y Seed, H. B., 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, College of Engineering, University of Berkeley, CA. Rep., No. EERC 72-12
- 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
- Seed, H. B., Dickenson, S. E., y Mok, C. M., 1993. Recent lessons regarding seismic response analysis of soft and deep clay sites. Seminar Proc., Seismic design and retrofit of bridges, U.C. Berkeley, EERC, Caltrans, June
- Seed, H. B., Idriss, M. I. y Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 109(3): pp 458-82.



- Seed, H.B., Pamukcu, S., and Chancy, R. 1975. Earthquake Effects on Soil-Foundation Systems. Foundation Engineering Handbook. Second Edition. Edited by Hsai-Yang Fang.
- Singh, S. K. y Ordaz, M., 1994. Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual. CENAPRED.
- Singh, S. K., Mena, E., Castro, R. y Carmona, C., 1987. Empirical prediction of groundmotion in Mexico City from coastal earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 77(5), 1862-1867
- Singh, S. K., Rodríguez, M. y Espíndola, J. M., 1984. A catalog of shallow earthquake of Mexico from 1900 to 1981. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 74, No. 1, pp. 267-279
- Singh, S. K., Rodriguez, M. y Esteva, L., 1983. Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone, Bull. Seism. Soc. Am. 73, 1779- 1796
- Stirling, M. W., Wesnousky, S. G., y Shimazaki, K., 1996. Fault-trace complexity, cumulative slip, and the shape of the magnitude-frequency distribution for strike-slip faults: a global survey, Geophys. J. Int. 124, 833-868
- Sun, J. I., Golesorkhi, R. y Seed, H. B., 1988. Dynamic and damping ratios for cohesive soils, Report No. EERC 88-15, University of California, Berkeley
- Thompson, E. M., Baise, L. G. y Kayen, R. E., 2007. Spatial correlation of shear-wave velocity in the San Francisco Bay Area sediments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 27, Issue 2, February, Pages 144-152
- Thomson-Haskell, N. A., 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media, Bull Seism Soc Am, vol. 43, pp 17-34.
- Trifunac, M. D. y Lee, V. W., 1987. Direct Empirical Scaling of Response Spectral Amplitudes from Various Site and Earthquake Parameters. Report NUREC/CR 4903. U.S. Nuclear Regulatory Commission 1, 341 pp.
- Valdez, P. y Auvinet, G., 2003. Spatial variability of the marine soil in the Gulf of Mexico, Proceedings Offshore Technology Conference, Houston, USA.
- Vucetic, M. y Dobry, R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response, Journal of Geotech. Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1.



- Wackernagel, H., 1995. *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications.* Springer-Verlag, Berlín.
- Warrick, A. W., Myers, D. E. y Nielsen, D. R., 1986. *Geostatistical Methods Applied to Soil Science. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods-* Agronomy Monograph 9: 53 - 81.
- Wesnousky, S. G., 1994. The Gutenberg Richter or characteristic earthquake distribution, Which is it?. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1940-1959
- Yeats, R., Sieh, K. y Allen, C., 1997. *The Geology of Earthquakes,* Oxford University Press, New York , 567 pp.
- Youngs, R. R. y Coppersmith, K. J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75: 939-964
- Zeevaert, L., 1973. *Foundation engineering for difficult subsoil conditions.* Ed. Van Nostrand Reinhold, Nueva York. Caps 5 y 12.
- Zúñiga, R. y Guzmán, M., 1994. *Main seismogenic source zones in Mexico,* Technical Report, Seismic Hazard Project, IPGH.



ANEXO A: CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO

