

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO PARA LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PRESENTA

Angélica Monserrat Buenrostro Orozco

Directores de Tesis: Dr. Hugón Juárez García

Dr. Alonso Gómez Bernal

México, CDMX

Septiembre 2017

Créditos Institucionales

Esta investigación fue elaborada en el área del Posgrado de Ingeniería Estructural de la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, bajo la dirección del Doctor Hugón Juárez García y el Doctor Alonso Gómez Bernal. Durante la realización de este trabajo, la autora de esta tesis recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT-587182).

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, a mi madre Raquel J. Orozco Miramontes, mis hermanos Rafael, Eliane y Leslie, y a Sergio por sus consejos que han servido en mi formación y el incondicional apoyo que me han brindado durante esta etapa de aprendizaje.

Agradezco a mis directores de tesis, Dr. Hugón Juárez García y Dr. Alonso Gómez Bernal, por sus asesorías, apoyo y confianza tan grande que me brindaron siempre. De igual manera agradezco a mis sinodales y/o revisores de tesis, Dr. Miguel Zamora Palacios y Dr. José Luis Rangel Núñez por los comentarios y sugerencias que me hicieron para mejorar el contenido de este trabajo.

A todos los excelentes profesores del Posgrado en Ingeniería Estructural, por su tiempo, sus consejos, asesorías y clases, que estoy segura servirán en mi vida profesional.

Al M. en C. Salvador Lazcano Díaz del Castillo, director de la empresa Suelo-Estructura, por su colaboración en este trabajo de investigación.

Por ultimo a la Universidad Autónoma Metropolitana, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por apoyarme económicamente, durante todo el posgrado.

Resumen

En esta investigación se lleva a cabo un análisis de peligro sísmico de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), localizada en la parte central del estado de Jalisco en el occidente del país, la cual está compuesta por 6 municipios, Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga y El Salto.

El estudio fue basado en un enfoque probabilista y se define con Espectros de Peligro Uniforme (EPU), para obtenerlos es necesario caracterizar fuentes sísmicas, y elegir modelos de atenuación para estas fuentes. En este trabajo se utilizan seis fuentes tipo falla de la zona de subducción de México y once fuentes tipo área o región de las cuales diez son para sismos someros y una para sismos profundos y por último se definen tres leyes de atenuación para las fallas elegidas. De esta forma se obtuvieron EPUs en terreno firme en cada punto de una malla con intersecciones a cada 10 km, en donde cada intersección es un punto.

Para este trabajo se estudian 18 perfiles de suelo de velocidad de onda de corte, ubicados en el poniente de la Zona Metropolitana de Guadalajara, donde se obtienen EPUs en terreno firme para cada uno de los 18 puntos, mediante el Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW).

Con los perfiles de suelo y un acelerograma escalado linealmente se obtuvieron funciones de transferencia y junto con los EPU interpolados, para los 18 puntos del poniente de la ZMG, se obtuvieron Espectros de Peligro Uniforme en la superficie o Espectros de Sitio elásticos. Estos espectros se compararon con los reglamentos de construcción vigentes de los municipios de Guadalajara y Zapopan; y con otras normatividades utilizadas en la zona de estudio.

Abstract

In this investigation, a seismic hazard analysis of the Metropolitan Area of Guadalajara (ZMG) is performed. The ZMG is located in the central part of the state of Jalisco in the west of the country, which is composed of 6 towns, Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga and El Salto.

The study was based on a probabilistic approach and is defined as Uniform Hazard Spectra (UHS), to obtain them it is necessary to characterize seismic sources, and choose attenuation models for these sources. In this work, six faults sources from the subduction zone of Mexico are used, and eleven area or region sources, of which ten are for shallow earthquakes and one for deep earthquakes and finally three attenuation models are defined for the faults chosen. In this way EPUs were obtained on firm ground at each point of a mesh with intersections every 10 km, where each intersection is a point

For this work, 18 ground wave velocity profiles are studied, this profiles are located in the west of the Metropolitan Area of Guadalajara, where EPUs are obtained on firm ground for each of the 18 points, using the Inverse Distance Weighting Method (IDW).

With the soil profiles and a linearly scaled accelerogram, transfer functions were obtained and, together with the interpolated EPUs, for the 18 points of the ZMG, surface Uniform Hazard Spectra or elastic Site Spectra were obtained. These spectra were compared to current building codes of Guadalajara and Zapopan; and with other regulations used in the study area.

Índice General

Agrad	ecimientos	
Resum	en	
Abstra	ct	
Indice	General	
Indice	de Figuras de Tables	
1.	Introducción. Obietivos y Alcances	1
11	Introducción	1
1.1.	1 Definición del peligro sísmico	י י ג
1.1	 Descrinción del análisis de peligro sísmico 	. J 2
1.1	 Descripcion del analisis de pengro sistineo Enfoque Determinista para el análisis de peligro sísmico 	. J 2
1.1	A Enfoque Probabilista para el análicis de peligro sísmico	. J 1
1.1		. +
1.2.	Antecedentes	. >
1.2	.1. Sismos históricos	. 5
1.3.	Objetivos	10
1.4.	Alcances	10
1.5.	Estructura de la Tesis	11
2.	Caracterización de las fuentes sísmicas para la ZMG 1	13
2.1.	Potencial sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	13
2.1	.1. Fuentes de tipo falla locales	13
2.1	.2. Fuentes de tipo falla en la zona de subducción de México	16
2.1	.3. Fuentes tipo área	21
2.2.	Modelos de Atenuación	25
3.	Características dinámicas del suelo	30
3.1.	Geología superficial de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	30
3.2.	Mapa de curvas de isoperíodos en la ZMG	31
3.3.	Velocidad de onda de corte (Vs)	35
3.	3.1. Pruebas geofísicas	36
3.4.	Perfiles de velocidad de onda de corte	37
4. 4.1.	Análisis de peligro sísmico	12 42
4.2.	Malla para interpolación de EPU (IDW)	46
4.3.	Desagregación del Peligro Sísmico	54
5.	Espectros de Peligro Uniforme con efectos locales	56

	5.1.	Acelerogramas existentes en la zona de estudio.	56
	5.2.	Interpolación de EPU	60
	5.3.	Espectros con efectos de sitio	64
6.		Análisis Comparativo con Espectros de Diseño	71
	6.1.	Análisis de la reglamentación para la ZMG	71
	6.2. (RCI	Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan DUMZ), 2003	76
	6.3.	PRODISIS, Manual de Obras Civiles de la CFE, 2015	76
	6.4.	Resumen de resultados de las comparaciones	79
Co	onclu	siones	83
Bi	bliog	rafía	87
A.		Introducción de una ley de atenuación en EZ-FRISK TM v7.65	93
B.		Descripción del Programa de Cómputo SHAKE-91_input	97
C.		Espectros de Peligro Uniforme para la ZMG	100
D.		Espectros de Respuesta de la zona de estudio	113
E.		Interpolación por el Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), Shepa	rd,
19	68		126
F.		Espectros de Peligro Uniforme (EPU) con efectos de sitio	138

Índice de Figuras

Figura 1.1. Placas Tectónicas que interactúan en el Territorio Mexicano (SSN, 2016)	1
Figura 1.2. Localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	2
Figura 1.3. Mapa sismotectónico de la costa del Bloque de Jalisco, zonas de ruptura de los grandes terremotos y brechas (gaps) sísmicos existentes (Núñez-Cornú, 2011) Figura 1.4. Mapa de Sismos Históricos respecto al Bloque de Jalisco (Núñez Cornú, 2011)	6 9
Figura 2.1. Bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, 2011) Figura 2.2. Geología estructural de la zona centro de occidente de México (Lazcano, 2001)	14 15
Figura 2.3. Localización de los segmentos de ruptura de subducción de la costa de México Figura 2.4. Fuentes tipo área para sismos someros usados para los casos estudiados	20 24
Figura 2.5. Regiones sismotectónicas intraplaca para sismos profundos	24
Figura 3.1. Mapa geológico de la ZMG (Ramírez et al., 1998)	30
Figura 3.2. Registros de vibración ambiental y sondeos geotécnicos (Ramírez <i>et al.</i> , 1997) Figura 3.3. Curvas de isoperíodo de la Zona Metropolitana de Guadalajara (Ramírez <i>et al.</i> , 1997)	32 32
Figura 3.4 Estaciones acelerográficas de la ZMG (Chávez 1993)	34
Figura 3.5. Mapa de zonificación de la ZMG (Ramírez <i>et al.</i> , 1998) Figura 3.6. Pasos para la obtención de velocidades de onda de corte de un suelo con la técnica de refracción de microtremores (ReMi) (Lazcano, 2007) Figura 3.7. Ubicación de sondeos realizados en el poniente de la ZMG (Lazcano,	35 37
2012) Figura 4.1. Localización de los diferentes puntos, usados en los casos de estudio, para la selección de radios de influencia de fuentes sísmicas Figura 4.2. Radios de influencia de segmentos de falla para un caso de estudio (Guadalaiara)	38 42 43
Figura 4.3. Radios de influencia para áreas de sismos someros para un caso de estudio (Guadalaiara)	43
Figura 4.4. Radios de influencia para áreas de sismos profundos para un caso de estudio (Guadalajara)	44
Figura 4.5. Espectros de peligro uniforme para tres radios en el punto "Guadalajara", las curvas R=200km y R=300 km se superponen	46
Figura 4.6. Trazo de malla de interpolación con intersecciones a cada 10 km (izquierda) y malla de interpolación definitiva con 24 puntos (derecha)	47
Figura 4.7. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-01, ubicado en el municipio de Tlajomulco	49
Figura 4.8. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-08, ubicado en el municipio de El Salto	49
Figura 4.9. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-09, ubicado en el municipio de Tonalá	50

Figura 4.10. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-12, correspondiente al municipio de Guadalajara	50
Figura 4.11. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-13, correspondiente al límite entre los municipios de Tlaquepaque y Guadalajara	51
Figura 4.12. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-17, correspondiente al municipio de Zapopan	51
Figura 4.13. Curvas de peligro por fuente sísmica para el punto ZMG-01, para un $Ts = 0.3 s$	52
Figura 4.14. Curvas de peligro por fuente sísmica para el punto ZMG-17, para un $Ts = 0.3 s$	53
Figura 4.15. Recurrencia de las fuentes sísmicas utilizadas para un r=500 km	53
Figura 4.16. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-01, para períodos 0.2 s, 0.75 s y 2 s	54
Figura 4.17. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-12, para períodos 0.2 s, 0.75 s y 2 s	55
Figura 4.18. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-17, para períodos 0.2 s, 0.75 s y 2 s	55
Figura 5.1. Acelerogramas elegidos, registrados en tres diferentes componentes: horizontal N-S (5.1.a), vertical (5.1.b) y horizontal E-O (5.1.c)	59
Figura 5.2. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación CICEJ Pozo 35m para los tres canales registrados Figura 5.3. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	59
estación "Arcos", en arenas jalosas Figura 5.4. Localización del punto 1 respecto a los puntos cercanos de la malla de interpolación	60 62
Figura 5.5. EPUs punto 1, producto de una interpolación (IDW)	62
Figura 5.6. Localización del punto 10 a los puntos cercanos de la malla de interpolación	63
Figura 5.7. EPUs punto 10. producto de una interpolación (IDW)	63
Figura 5.8. Perfil de suelo del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", modelado en SHAKE-91 input	65
Figura 5.9. Acelerograma semilla (a) y acelerograma ajustado a EPU-10 con spectral matching (b)	66
Figura 5.10. Ajuste de espectros por la técnica de Spectral Match	66
Figura 5.11. Acelerograma inicial (a) v acelerograma ajustado por un factor (b)	67
Figura 5.12. Espectro de respuesta ajustado por un factor de escalamiento	68
Figura 5.13. Funciones de transferencia para el punto 10, Colomos y Manuel M. Diéguez Figura 5.14. Comparación de EPU en la superficie, por ambas técnicas de escalamiento usadas	68 69
Figura 5.15. EPUs elásticos en la superficie para el perfil de "Colomos y Manuel M. Diéguez", registrados en la dirección E-O	70
Figura 5.16. EPUs elásticos en la superficie para el perfil de "Colomos y Manuel M. Diéguez", registrados en la dirección N-S	70
Figura 6.1. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 1, "Catedral de Guadalajara"	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.2. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 1, "Catedral de Guadalajara"	74
Figura 6.3. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez"	75
Figura 6.4. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez"	75
Figura 6.5. Comparación de Espectros de diseño del RCDUMZ, 2003, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas"	77
Figura 6.6. Comparación de Espectros de diseño del RCDUMZ, 2003, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas"	77
Figura 6.7. Comparación de los EPU del punto 1, "Catedral de Guadalajara", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas	78
Figura 6.8. Comparación de los EPU del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas	78
Figura 6.9. Comparación de los EPU del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas	79
Figura A.1. Apartado para introducir una nueva ley de atenuación	93
Figura A.2. Expression evaluator attenuation equation editor	94
Figura A.3. Código para definir el modelo de atenuación de García et al. (2005)	95
Figura A.4. Comparación EZ-FRISK TM v7.65 vs García <i>et al.</i> (2005). Para sismos intraplaca, para magnitudes de momento de 5.5, 6.5 y 7.5, con una profundidad al foco de H=50 km	96
Figura B.1. Creación de un archivo nuevo en SHAKE91_input	97
Figura B.2. Introducción de datos del perfil de suelo en soil profile	98
Figura B.3. Formato del input motion	99
Figura B.4. Apartados de Amplification Spectrum y Response Spectra	99 100
Figura C.1. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-01	100
Figura C.2. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-02	101
Figura C 4 Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-04	101
Figura C.5. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-05	102
Figura C.6. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-06	102
Figura C.7. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-07	103
Figura C.8. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-08	104
Figura C.9. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-09	104
Figura C.10. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-10	105
Figura C.11. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-11	105
Figura C.12. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-12	106
Figura C.13. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-13	106
Figura C.14. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-14	107
Figura C.15. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-15	107
Figura C.16. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-16	108
Figura C.17. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-17	108
Figura C.18. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-18	109
Figura C.19. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-19	109
Figura C.20. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-20	110

Figura C.21. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-21	110
Figura C.22. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-22	111
Figura C.23. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-23	111
Figura C.24. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-24	112
Figura D.1. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Arcos", en arenas jalosas	113
Figura D.2. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Cicej Superficie", en el estacionamiento del colegio (acelerogramas no registrados	
correctamente)	114
Figura D.3. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Cicej Pozo 9m"	114
Figura D.4. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Cicej Pozo 35m"	115
Figura D.5. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Ciudad Granja", en arenas jalosas	115
Figura D.6. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	
estación "Iardines del Sur" en arenas jalosas	116
Figura D 7. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	110
estación "Miravalle", en roca	116
Figura D 8. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	110
estación "Oblatos". en roca	117
Figure D. 0. Espectros de respueste del sisme del 00 de actubre de 1005, registrado en la	,
estación "Obras Públicas Zapopan" en arenas jalosas	117
Figura D 10 Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	11/
estación "Planetario" en arenas jalosas	118
Figura D 11 Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995 registrado en la	110
estación "Rotonda" en arenas jalosas	118
Figure D 12 Espectres de respueste del sisme del 00 de estubre de 1005, registrado en la	110
estación "San Rafael" en roca	110
$\mathbf{E}_{\text{res}} = \mathbf{D} 12 \mathbf{E}_{\text{res}} 12 12 \mathbf{E}_{\text{res}} 12 \mathbf{E}_{\text{re}$	11)
Figura D.13. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la	110
	119
Figura D.14. Espectros de respuesta del sismo del 11 de abril del 2012, registrado en la	100
estación "Colegio Cervantes", en suelo blando	120
Figura D.15. Espectros de respuesta del sismo del 22 de abril del 2013, registrado en la	
estación "Universidad Panamericana", en suelo blando	120
Figura D.16. Espectros de respuesta del sismo del 18 de abril del 2014, registrado en la	
estación "Colegio Cervantes", en suelo blando	121
Figura D.17. Espectros de respuesta del sismo del 18 de abril del 2014, registrado en la	
estación "Universidad Panamericana", en suelo blando	121
Figura D 18 Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la	
estación "Universidad Panamericana" en suelo blando	122
Eigune D 10. Europetrog de regruperte del signe del 15 de disignetre del 2015, registrado en la	122
rigura D.19. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la	122
	122
Figura D.20. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la	100
estacion "Universidad Panamericana", en suelo blando	123
Figura D.21. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la	
estación "Colegio Cervantes", en suelo blando	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura D.22. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Colegio Cervantes". en suelo blando	124
Figura D.23. Espectros de respuesta del sismo del 17 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando	124
Figura D.24. Espectros de respuesta del sismo del 17 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando	125
Figura E.1. Localización de los EPU conocidos y del punto desconocido Figura E.2. EPU interpolados para el punto 1, "Catedral de Guadalajara", para 4 períodos de	126
Figura E.3. EPU interpolados para el punto 2, "Biblioteca Pública Agua Azul", para 4 períodos de retorno.	129
Figura E.4. EPU interpolados para el punto 3, "Registro Civil Nº1", para 4 periodos de retorno	130
Figura E.5. EPU interpolados para el punto 4, "Fco. Javier Gamboa y Lerdo de Tejada", para 4 períodos de retorno	130
Figura E.6. EPU interpolados para el punto 5, "Hotel Riu", para 4 períodos de retorno	131
Figura E.7. EPU interpolados para el punto 6, "La Gran Plaza", para 4 períodos de retorno	131
Figura E.8. EPU interpolados para el punto 7, "Av. Patria y Guadalupe", para 4 periodos de retorno	132
Figura E.9. EPU interpolados para el punto 8, "Universidad Panamericana", para 4 períodos de retorno	132
Figura E.10. EPU interpolados para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", para 4 períodos de retorno	133
Figura E.11. EPU interpolados para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", para 4 períodos de retorno	133
Figura E.12. EPU interpolados para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", para 4 períodos de retorno.	133
Figura E.13. EPU interpolados para el punto 12, "Av. Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", para 4 períodos de retorno	134
Figura E.14. EPU interpolados para el punto 13, "Punto Sao Paulo", para 4 períodos de retorno.	135
Figura E.15. EPU interpolados para el punto 14, "Av. Patria y Eva Briseño", para 4 períodos de retorno	135
Figura E.16. EPU interpolados para el punto 15, "Av. Patria y Paseo Royal", para 4 períodos de retorno.	136
Figura E.17. EPU interpolados para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", para 4 períodos de retorno	136
Figura E.18. EPU interpolados para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", para 4 períodos de retorno	137
Figura E.19. EPU interpolados para el punto 18, "Nueva Biblioteca Pública", para 4 períodos de retorno	137
Figura F.1. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 1, "Catedral de Guadalajara" en el sentido E-O	138
Figura F.2. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 1, "Catedral de Guadalajara" en el sentido N-S.	139

Figura F.3. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 2, "Antigua Biblioteca Pública" en el sentido E-O
Figura F.4. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 2, "Antigua Biblioteca Pública" en el sentido N-S
Figura F.5. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 3, "Registro Civil N°1" en el sentido E-O
Figura F.6. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 3, "Registro Civil N°1" en el sentido N-S
Figura F.7. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 4, "Fco Javier Gamboa y Lerdo de Tejada" en el sentido E-O
Figura F.8. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 4, "Fco Javier Gamboa y Lerdo de Tejada" en el sentido N-S
Figura F.9. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 5, "Hotel RIU", en el sentido E-O
Figura F.10. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 5, "Hotel RIU", en el sentido N-S
Figura F.11. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 6, "La Gran Plaza", en el sentido E-O
Figura F.12. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 6, "La Gran Plaza", en el sentido N-S
Figura F.13. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 7, "Patria y Guadalupe", en el sentido E-O
Figura F.14. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 7, "Patria y Guadalupe", en el sentido N-S
Figura F.15.Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 8, "Universidad Panamericana", en el sentido E-O
Figura F.16.Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 8, "Universidad Panamericana", en el sentido N-S
Figura F.17. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", en el sentido E-O
Figura F.18. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", en el sentido N-S
Figura F.19. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", en el sentido E-O
Figura F.20. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", en el sentido N-S
Figura F.21. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", en el sentido E-O
Figura F.22. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", en el sentido N-S
Figura F.23. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 12, "Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", en el sentido E-O
Figura F.24. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 12, "Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", en el sentido N-S

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura F.25. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 13, "Punto Sao Paulo", en el sentido E-O	150
Figura F.26. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 13, "Punto Sao Paulo", en el sentido N-S	151
Figura F.27. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 14, "Patria y Eva Briseño", en el sentido E-O	151
Figura F.28. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 14, "Patria y Eva Briseño", en el sentido N-S	152
Figura F.29. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 15, "Patria y Paseo Royal Country", en el sentido E-O	152
Figura F.30. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 15, "Patria y Paseo Royal Country", en el sentido N-S	153
Figura F.31. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", en el sentido E-O	153
Figura F.32. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", en el sentido N-S	154
Figura F.33. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", en el sentido E-O	154
Figura F.34. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", en el sentido N-S	155
Figura F.35. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 18, "Nueva Biblioteca Pública", en el sentido E-O	155
Figura F.36. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 18, "Nueva Biblioteca Pública", en el sentido N-S	156

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Relación de sismos históricos en el Bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, 2011) y(Juárez et al., 1996)	6
Tabla 2.1. Tasas de recurrencia de los segmentos de falla para el peligro sísmico de la zona(Nishenko y Singh, 1987)	19
Tabla 2.2. Ubicación de segmentos de fallas sísmicas	20
Tabla 3.1. Comparación entre los períodos del suelo Ts, de las estaciones acelerográficas dela ZMG (Lazcano, 2012)	33
Tabla 3.2. Límites entre las zonas propuestas (Ramírez et al., 1998)	34
Tabla 3.3. Perfiles de velocidad de onda (Vs) contra profundidad (Lazcano, 2012 y 2016)	38
Tabla 3.4. Clasificación sísmica de tipo de suelo Vs ₃₀ (IBC, 2006)	40
Tabla 3.5. Clasificación sísmica Vs ₃₀ y períodos de los 18 sitios estudiados (Lazcano, 2012)	41
Tabla 4.1. Datos utilizados para el análisis de peligro sísmico de los casos de estudio	45
Tabla 4.2. Base de datos de los 24 puntos de la malla para obtener Espectros de Peligro Uniforme.	48
Tabla 5.1. Registros sísmicos para la Zona Metropolitana de Guadalajara, del sismo del 09de octubre de 1995. Fuente: Base Mexicana de Sismos Fuertes vol. 2	56
Tabla 5.2. Registros sísmicos para la Zona Metropolitana de Guadalajara del 2012 al 2015.Fuente: I de I UNAM	57
Tabla 5.3. Puntos de estudio para la interpolación de EPU	61
Tabla 6.1. Valores de Ta, Tb y r para diferentes tipos de suelos (Normas TécnicasComplementarias de Guadalajara, 1997)	72
Tabla 6.2. Comparación de PGA, Catedral de Guadalajara contra el Reglamento Orgánicodel Municipio de Guadalajara, 1997	79
Tabla 6.3. Comparación de PGA, Colomos y Manuel M. Diéguez contra el ReglamentoOrgánico del Municipio de Guadalajara, 1997	80
Tabla 6.4. Comparación de PGA, Paseo Valle Real y Federalistas contra el Reglamento deConstrucciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan, 2003	81
Tabla 6.5. Comparación de PGA, de EPU elásticos contra el PRODISISv4.1Tabla A.1. Expresiones para definir parámetros de un modelo de atenuación, por	81
código	95
Tabla E.1. Latitud y Longitud de los puntos de estudio	127
Tabla E.2. Interpolación de aceleraciones para 4 fuentes	128

1 Introducción, objetivos y alcances

1.1. Introducción

Los grandes temblores a lo largo de la costa del pacífico en el estado de Jalisco, son causados por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y de Rivera, bajo la placa de Norteamérica y por ello son conocidos como sismos de subducción (ver figura 1.1). La placa de Rivera, se desplaza bajo la placa Norteamericana en el estado de Jalisco con una velocidad relativa de 2.5 cm/año frente a la costa de Manzanillo. La frontera entre las placas de Rivera y de Norteamérica se estima que interseca la costa de México cerca de Manzanillo. Por otra parte, la velocidad relativa de la placa de Cocos con respecto al continente varía desde unos 5 cm/año cerca de Manzanillo hasta 7 cm/año en Chiapas (Ordaz, 2007).



Figura 1.1. Placas Tectónicas que interactúan en el Territorio Mexicano (SSN, 2016).

El 3 de junio de 1932, en la costa de Jalisco se registró el sismo de mayor magnitud del siglo XX, que ha ocurrido en México, con una magnitud de 8.2 y réplicas de 7.8 y 6.9 los días 18 y 22 de junio de 1932, respectivamente. Los tiempos de recurrencia estimados por Singh *et al.* (1985) para terremotos como los antes mencionados es de aproximadamente 77 años y considerando que durante el temblor del 9 de octubre de 1995, con magnitud Ms=7.6, se rompió apenas la mitad sur del área que se deslizó en 1932. La posibilidad de

CAPÍTULO 1

que ocurriera un evento similar al de 1995 en un período relativamente corto de tiempo fue muy alta, por lo que el del 22 de enero del 2003 ocurrió otro sismo en la costa de Armería no asociado al proceso de subducción (Núñez-Cornú *et al.*, 2004 y Juárez-García *et al.*, 1996). La complejidad de esta región tectónica se refleja en la existencia de estructuras desconocidas o no estudiadas capaces de generar terremotos de magnitud media como el ocurrido el 3 de diciembre de 1948 (M=7.0) cerca de las Islas Marías, este sismo generó daños en el estado de Jalisco.

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), se localiza en la parte central del estado de Jalisco en el occidente del país, está compuesta por 6 municipios interiores y 2 exteriores. Los 6 primeros son: Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque, Zapopan, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga y El Salto, y los dos exteriores son Juanacatlán e Ixtlahuacán de los membrillos. En este estudio solo se incluyeron los seis municipios interiores. En la figura 1.2 se muestra la localización de la ZMG, respecto a la República Mexicana.



Figura 1.2. Localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).

Aunque se han realizado algunos estudios relacionados con el peligro y la zonificación sísmica de la ZMG, se requiere actualizar la información, por lo que en este trabajo se llevara a cabo un análisis de peligro sísmico (McGuire, 2004 y EZ-FRISKv7.65).

1.1.1. Definición del peligro sísmico

El peligro sísmico es una medida de la frecuencia de la ocurrencia de sismos con cierta intensidad; se cuantifica con la frecuencia con que excede un cierto nivel de aceleración o desplazamiento espectral y depende de la tectónica del territorio y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en una región (Pérez *et al.*, 2005). Es un concepto básicamente sismológico y constituye el dato de entrada para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico y sus aplicaciones en la planificación urbana o el diseño sismorresistente (Herraiz, 1997).

1.1.2. Descripción del análisis de peligro sísmico

Un análisis de peligro sísmico envuelve una estimación cuantitativa de sismos ocurridos en un sitio en particular. El peligro sísmico se obtiene mediante enfoques deterministas y probabilistas. Ambos consideran la sismicidad como un fenómeno estacionario, y suponen que los sismos que ocurrirán en el futuro serán de las mismas características que los sucedidos en el pasado (Herraiz, 1997).

Al evaluar el peligro sísmico de un sitio en particular, se deben identificar todas las fuentes posibles de actividad sísmica, éstas serían una búsqueda de evidencia geológica: identificación de fallas, y tipo de actividad que registran; también la correlación entre la magnitud de sismos con la longitud, área de ruptura y desplazamientos de fallas mediante, correlaciones que permiten evaluar y predecir magnitudes de sismos esperados (Kramer, 1996).

1.1.3. Enfoque Determinista para el análisis de peligro sísmico

Los métodos deterministas analizan la sismicidad particular de cada zona sismogénica que afectan al lugar de estudio, con el objetivo de estimar el máximo sismo probable, a este sismo, se le conoce como sismo característico.

Un típico análisis de peligro sísmico determinista, se puede describir como un procedimiento de cuatros pasos (Reiter y Kramer, 1990):

CAPÍTULO 1

Paso 1.

Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir movimientos significativos de suelo en el sitio de estudio. La caracterización incluye la definición de la geometría de la falla, su potencial sísmico y parámetros internos.

Paso 2.

Selección del parámetro de distancia de la fuente del sitio, para cada zona de la fuente. En la mayoría de estos enfoques, esta distancia se puede definir como la distancia del epicentro o hipocentral más corta entre la zona de la fuente y el sitio de interés.

Paso 3.

Selección del sismo de control (el sismo esperado produce un fuerte nivel de movimiento), generalmente se expresa en términos de algún parámetro del movimiento del terreno en el sitio. La selección se hace comparando los niveles de movimiento producidos por sismos (identificados en el paso 1) asumiendo que ocurrirán en las distancias identificadas en el paso 2.

Paso 4.

El peligro sobre el sitio se define formalmente en términos de los movimientos del terreno provocados por el sismo de control. Estas características son descritas por uno o más parámetros del movimiento de los terrenos obtenidos de relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo. La aceleración pico, velocidad pico y las ordenadas del espectro de respuesta son comúnmente usadas para caracterizar el peligro sísmico (Inca, 2013).

El enfoque determinista aparenta ser un procedimiento simple, en algunos aspectos lo es, pero es difícil de estimar el sismo de control, ya que éste se basa en la historia de las intensidades y resultan en valores relativos de la región de donde se miden.

1.1.4. Enfoque Probabilista para el análisis de peligro sísmico

Un método probabilista provee un marco de referencia en el cual las incertidumbres pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas de una manera racional para proveer un panorama completo del peligro sísmico.

La metodología de un análisis probabilista fue desarrollada por Cornell (1968). Este método también utiliza cuatro pasos (Reiter y Kramer, 1990):

Paso 1.

Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, es idéntico al del método determinista, excepto que la probabilidad de la distribución de la ruptura de la localización de la fuente debe ser caracterizada. La descripción de la sismicidad debe incluir los parámetros que evalúan el proceso en el foco (principalmente, mecanismo y caída de esfuerzos); el tamaño (intensidad, magnitud, momento sísmico) y los que dan la localización espacio-temporal (coordenadas hipocentrales y hora origen). No puede olvidarse que la evaluación de la sismicidad es crítica y condiciona la validez de los análisis estadísticos posteriores (Herraiz, 1997).

Paso 2.

Caracterización de las relaciones de recurrencia. Se tendrá que establecer una relación de recurrencia la cual, especifique la tasa promedio sobre la cual un sismo de algún tamaño será excedido. Estas relaciones se usan para caracterizar la sismicidad de cada zona de la fuente. En esta etapa es necesario asegurar que los datos sean homogéneos, independientes y completos.

Paso 3.

Definición de las relaciones predictivas. El movimiento del terreno producido por sismos de cualquier tamaño y que puedan ocurrir en cualquier punto posible de cada zona de la fuente debe ser determinada con el uso de las relaciones predictivas. Las relaciones de predicción se obtienen empíricamente, mediante regresiones de mínimos cuadrados, u otras metodologías.

Paso 4.

Finalmente las incertidumbres en la localización del sismo, tamaño del sismo, y la predicción de los parámetros del movimiento del terreno, son combinaciones para obtener la probabilidad de que el parámetro del movimiento del terreno tal vez se exceda durante un particular período de tiempo.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Sismos históricos

En los últimos 160 años han ocurrido sismos muy importantes en el Bloque de Jalisco, que han afectado a los estados de Jalisco, Colima y Michoacán con magnitudes de 5.1 hasta 8.2. En la figura 1.3 se pueden observar las áreas de ruptura de estos sismos históricos.



Figura 1.3. Mapa sismotectónico de la costa del Bloque de Jalisco, zonas de ruptura de los grandes terremotos y brechas (gaps) sísmicos existentes (Núñez-Cornú, 2011).

En la tabla 1.1 se muestran los temblores ocurridos en estas regiones desde el año de 1567 hasta el 2003, y los daños provocados por estos.

Tabla 1.1. Sismos Históricos en Jalisco			
Número	Fecha	Magnitud Intensidad	Descripción
1	1567	-	En Amacueca se derrumbó y hundió el convento de la iglesia. En Zapotlán el Grande cayó la primera iglesia.
2	27/dic/1569	M≈ 7.5, I=IV	Derrumbe de Casas e iglesias en la rivera del Lago de Chapala. Hubo intensa actividad sísmica en la zona comprendida entre Zapotlán y Ameca
3	27/dic/1577	I=V	Asociado con erupción del volcán de Colima. Muchos daños y muerte en Zapotlán. En Guadalajara se desplomó la torre del templo de San Francisco.

Tabla 1.1	Relación de sismos históricos en el Bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, 2011 y Juárez-García et
	<i>al.</i> , 1996).

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCES

Número	Fecha	Magnitud Intensidad	Descripción
4	15/abril/1611	I=V	En Zapotlán y Zapotiltic fueron destruidos lo conventos franciscanos. Asociado a la actividad del volcán de Colima que entró en un fuerte período eruptivo el 29 de septiembre de 1611
5	26/agosto/1611	I=V	Destruyó la iglesia de Zapotlán y pocos días después (30 de agosto), hubo otro que derrumbó el hospital de la Purísima Concepción y otras fincas.
6	15/agosto/1711	M≈7.5, I=IV	Gran destrucción en Amacueca, Sayula y Zapotlán. Se sintió en Guadalajara.
7	22/oct/1743		Destrucción de muchas casas en Zapotlán
8	25/marzo/1806	M≈7.5, I=VI	Sismo al que siguieron intensas réplicas durante dos meses. Fuerte destrucción en Zapotlán (más de 200 casas) incluyendo daños a la parroquia y muchos muertos (más de 280). También hubo daños en Tuxpan, Tamazula, Sayula, Autlán, Amacueca y Guadalajara (grietas en Catedral, Palacio de Gobierno y otras construcciones). Hay informes erróneos de la caída de las torres de la catedral de Guadalajara.
9	31/mayo/1818	M≈7.7, I=VI	A pesar de que su magnitud fue de 7.7 y su epicentro se localizó a unos 175 km hacia el suroeste de Guadalajara, causó muchos daños y derrumbó las torres originales de la Catedral y agrietó dos de sus bóvedas. No fue sino hasta el período de 1851 a 1854 que se volvieron a construir las torres, y hasta la fecha han perdurado. Hubo fuertes destrozos, en varias poblaciones de Jalisco, pero sobre todo en la ciudad de Colima.
10	22/nov/1837	M≈7.7, I=VI	A este temblor se le llamo temblor de Santa Cecilia. Agrietó la fachada de la catedral de Guadalajara y otras edificaciones. Se sintió también en Zapotlán y en el sur de Jalisco.
11	02/oct/1847	M≈7, I=VI	Causo muchos derrumbes y muertes en Ocotlán, daños leves en Guadalajara y Zapotlán y se sintió hasta la Cd. De México.
12	11/Feb/1875	M≈7.5, I=VIII	Muy fuerte en San Cristóbal de la Barranca, en donde derribó la mayoría de las casas y causo alrededor de 50 muertos (la población era de 800). En Guadalajara no causó muerte pero, si fracturas en muchas casas y en los siguientes templos: Catedral, El Sagrario, La Merced, Santa Mónica, San Diego, Capilla de Jesús de la Compañía (Actual biblioteca Iberoamericana), Aránzazu, Mexicaltzingo, San Juan de Dios y San José de Análco. También hubo daños en el Palacio Municipal, el Liceo de niñas y el Instituto de Ciencias (Actual Preparatoria No. 1). Es el sismo posiblemente con mayor intensidad en Guadalajara, y el epicentro se ubicó a unos 55 km hacia el noreste. En San Cristóbal hubo fallas de taludes y posible licuación. El Ceboruco presentó fumarolas y arrojó algo de cenizas que cayeron en la zona de Ahuacatlán Tepic, Nay. Siguieron réplicas hasta septiembre del mismo año.

CAPÍTULO 1

Número	Fecha	Magnitud Intensidad	Descripción
13	09/marzo/1875	M=7.4, I=VI	Sismo que ocurrió en la Costa de Jalisco, por el rumbo de Autlán, cerca del epicentro del terremoto de 1932. En Guadalajara agravaron los daños a edificaciones causadas por el sismo del 11 de febrero y sus réplicas: los templos más dañados fueron: La Merced, San Diego, Aránzazu, Mexicaltzingo, Análco y Loreto.
14	22/marzo/1878	I=IV	Causó daños en San Cristóbal y se sintió fuerte en Guadalajara. Hubo réplicas leves hasta abril.
15	19/enero/1900	M=7.6, I=VII	Sismo destructor en Colima. Hubo daños en muchas poblaciones de Jalisco (Ocotlán, Sayula, Zapotlán, San Gabriel, Autlán, Unión de Tula y Mascota). En Guadalajara sufrieron daños los templos de El Sagrario, Sta. Ma. De Gracias, San Felipe, Santa Mónica, San Diego, Capilla de Jesús, San Sebastián de Análco y Mezquitán.
16	16/mayo/1900	M=7.1, I=III	Intensa Réplica del sismo del 19 de enero. Se sintió en varias poblaciones del sur de Jalisco hasta La Barca y Guadalajara, pero solo causó daños leves en Colima y Zapotlán.
17	07/junio/1911	M=7.8, I=V	Llamado temblor de Madero ya que ocurrió cuando el entró triunfante a la Cd. De México. Causó daños fuertes y muertes (35). También fue destructor en la región cercana a Zapotlán.
18	30/abril/1921	-	Daños en Autlán, Unión de Tula y Tuxcacuesco. Fuerte en Zacoálco y otras poblaciones de Jalisco.
19	03/junio/1932	M=8.2, I=VI	El sismo de mayor magnitud en México en el siglo XX. Su epicentro se ubicó en la costa de Jalisco, a unos 160 km de Guadalajara. Causo fuertes daños en Cihuatlán, Autlán y Mascota. Hubo réplicas fuertes (magnitudes desde 4 hasta 8). El 13 de junio entró en erupción el Volcán de Colima.
20	18/junio/1932	M=7.8, I=VI	Intensa Réplica del terremoto del 3 de junio. Destructor en el estado de Colima, sobre todo en Tecomán y en la capital del Estado. Un tsunami invadió Cuyutlán.
21	09/abril/1933	M=6.5, I=IV	Daños en Tenacatita y otros lugares de la costa de Jalisco (Autlán, Purificación). Se sintió fuerte en Colima.
22	30/nov/1934	M=7.2, I=IV	Sismo muy fuerte en la costa de Jalisco. Se sintió en Puerto Vallarta, Mascota y Autlán.

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCES

Número	Fecha	Magnitud Intensidad	Descripción
23	03/dic/1948	M=7.0	Epicentro en las Islas Marías, destruyó la colonia Penal.
24	30/enero/1973	M=7.4	Conocido como el terremoto de Colima, aunque en realidad ocurrió en el occidente de Michoacán, región poco poblada en esa época.
25	09/oct/1995	Ms=7.6, Mw=8.0, I=VI	Fuerte terremoto frente a las costas de Colima y Jalisco. Causó daños en éstas, especialmente en Manzanillo, Cihuatlán, Jaluco, Barra de Navidad, Tenacatita y Puerto Vallarta. Se sintió fuerte en Guadalajara (240 km del epicentro), pero causo daños menores.
26	22/enero/2003	Mw=7.4	Terremoto somero frente a la costa de Armería en Colima, fuertes daños en la Cd. De Colima en estructuras de mampostería y en localidades de Jalisco al oeste del volcán, su patrón de daños es muy diferente al de 1995.

Los sismos históricos mencionados en la tabla 1.1 se muestran en la figura 1.4. Los terremotos se localizan en relación con el bloque de Jalisco, se clasificaron mediante colores con base en la forma que se obtuvieron, sus magnitudes y daños; los números de color **rojo** son Tipo A, (datos instrumentales), los Tipo B se representan con color **azul** (datos instrumentales y descripciones macrosísmicas extensas), y por último los de color **verde** se obtuvieron mediante descripciones macrosísmicas limitadas.



Figura 1.4. Mapa de Sismos Históricos respecto al Bloque de Jalisco (Núñez Cornú, 2011).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar un estudio de peligro sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).

1.3.2. Para la Zona Metropolitana de Guadalajara, se presentan los siguientes objetivos específicos

- 1. Estudiar la sismicidad histórica de la zona de estudio.
- 2. Identificar las fuentes sísmicas que generan peligro sísmico para la ZMG.
- 3. Obtener Espectros de Peligro Uniforme (EPU), espectros producto de un análisis probabilístico del peligro sísmico, que se extraerán de curvas de peligro para cierta probabilidad de excedencia y parámetros sísmicos para la ZMG.
- 4. Calcular Espectros de Peligro Uniforme (EPU), con efectos de sitio locales.
- 5. Comparar las demandas sísmicas obtenidas, en este trabajo, con espectros de diseño de reglamentaciones y recomendaciones vigentes, por ejemplo con el programa de computo PRODISIS (CFE, 2015).

1.4. Alcances

- En este estudio se muestran 18 sondeos de suelo, con los que se obtienen propiedades del subsuelo, períodos y velocidades de onda de corte para la ZMG.
- Se definen fuentes tipo falla y área que contribuyen al peligro de la zona. Asimismo, relaciones de recurrencia y de atenuación para comenzar con el análisis de peligro sísmico.
- Se definen parámetros sísmicos con base en los EPU calculados, y se comparan con las demandas sísmicas de normatividades vigentes. Estos parámetros se podrán proponer en una futura actualización del Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara (1997). En el apartado de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo.

1.5. Estructura de la Tesis

Capítulo 1. Introducción, objetivos, y alcances. Es una introducción al tema de peligro sísmico, particularmente la descripción de los sismos históricos y sus daños en la zona estudiada, y los objetivos de esta tesis.

Capítulo 2. Caracterización de las fuentes sísmicas en la ZMG. Aquí se describe la actividad sísmica en México, y las fuentes consideradas en la definición del peligro en el sitio de estudio y los modelos de atenuación elegidos para las fallas usadas en el análisis.

Capítulo 3. Características dinámicas del suelo. En ese capítulo realiza una descripción general de la geología regional de la ZMG. Estudios de zonificación realizados anteriormente, y una descripción estratigráfica de sitios representativos de la zona del poniente de la ciudad que serán usados en el capítulo 5.

Capítulo 4. Análisis de peligro sísmico. Se presentan los Espectros de Peligro Uniforme, producto del análisis de peligro sísmico realizado junto con diferentes escenarios de un estudio de desagregación de las fallas.

Capítulo 5. Espectros de Peligro Uniforme (EPU), con efectos locales. Se describen los acelerogramas existentes en la ZMG, la metodología de interpolación (IDW), utilizada en este estudio, técnicas de escalamientos de acelerogramas, y funciones de transferencia obtenidas para realizar EPU's con efectos de sitio.

Capítulo 6. Análisis comparativo con espectros de diseño. Se comparan los EPU obtenidos en terreno firme y en superficie, con la normatividad vigente de la ciudad y otras normas actuales (CFE).

Conclusiones y trabajos futuros. Se mencionan las conclusiones del trabajo y actividades sugeridas a realizar en un tiempo futuro.

Dentro de la tesis se muestran también los siguientes anexos o apéndices:

Apéndice A. Introducción de una ley de atenuación en EZ-FRISKTMv7.65.

Apéndice B. Descripción del programa de cómputo SHAKE91_input.

Apéndice C. Espectros de Peligro Uniforme para la ZMG.

Apéndice D. Espectros de respuesta de la zona de estudio.

Apéndice E. Interpolación por el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), Shepard, 1968.

Apéndice F. Espectros de Peligro Uniforme (EPU) con efectos de sitio.

2 Caracterización de las fuentes sísmicas para la ZMG

2.1. Potencial sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)

En la evaluación del peligro sísmico es importante definir, los factores que influyen en la sismicidad de la región seleccionada, como aspectos geológicos y geotécnicos entre otros, y sobre todo, se debe de estudiar el potencial sísmico de las posibles fuentes que afecten a la zona de estudio. Antes de presentar las fuentes que afectan a la ZMG, se describe brevemente, la actividad sísmica existente en México descrita por Jaimes y Reinoso (2001):

Sismos de subducción. El mecanismo de falla principal de estos tipos de sismos es la falla inversa y se presenta a lo largo de los límites de convergencia de las placas. En México esta interacción se presenta entre las placas de Rivera y la de Norteamérica, y entre las placas de Cocos y de Norteamérica, la cual abarca la mayor parte de la costa del Pacífico, y finalmente entre las placas de Cocos y del Caribe.

Sismos de falla normal. Estos ocurren a profundidades mayores a 50 km y afectan sobre todo a las ciudades asentadas a lo largo de la faja volcánica. Estos sismos se localizan dentro de las placas oceánicas que se subducen bajo el continente.

Sismos de intraplaca. Son los sismos que se originan en el interior de la placa Norteamericana, a profundidades no mayores de los 30 km y por lo general presentan mecanismos de falla normal, pueden tener algunos mecanismos de tipo compresivo y también pueden estar asociados a volcanes.

Otros sismos significativos que han ocurrido en México, son los **Sismos Corticales**. Estos eventos ocurren dentro de la placa de Norteamérica, y son sismos Intraplaca muy superficiales.

2.1.1. Fuentes de tipo falla locales

Se ha podido estudiar el Bloque de Jalisco, el cual es la estructura bajo la que subduce la placa de Rivera. El Bloque está delimitado por la Trinchera Mesoamericana hacia el occidente, la zona del graben de Colima por la parte meridional y la zona del graben de Tepic-Zacoálco por la parte oriental. El bloque de Jalisco y sus principales fallas que las componen se pueden apreciar en la figura 2.1 de forma detallada y gráfica.



Figura 2.1. Bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, 2011).

Las principales estructuras tectónicas continentales más relevantes y de mayor impacto que se observan en el Bloque de Jalisco son:

- A. Graben de Tepic-Zacoálco. Estructura con una orientación NW, con un corredor aproximado de 50 km por 250 km, es uno de los brazos del sistema triple de rift en el oeste de México. Junto con el rift de Colima y la Faja Volcánica Transmexicana, que limita el bloque de Jalisco una porción del oeste de México, que puede moverse independientemente de Norteamérica (Martínez, 2011).
- **B. Graben de Chapala.** Esta estructura contiene el lago natural de Chapala a 1500 m de altitud, de 115 km de largo y de 10 a 25 km de ancho. El graben de Chapala se desarrolló en una falla transcurrente lateral izquierda dentro de la zona regional de falla Chapala-Tula E-W, el graben se extiende 90 km hacia el oriente del punto triple (Martínez, 2011).
- C. Graben de Colima. Estructura con anchura variable entre 20 y 60 km. El graben de Colima se divide en dos sectores, el graben norte, y el central. El graben está definido por fallas normales paralelas a su dirección, intersecta dos rifts: el de Zacoálco, al noreste, y al noroeste el rift de Citlala, para formar una unión triple, a unos 50 km al sur-suroeste de Guadalajara (Martínez, 2011).

En el apartado 1.2 del capítulo 1, se observaron los sismos históricos ocasionados por el bloque de Jalisco. Los ángulos de separación entre los tres graben principales son de 100°, 115° y 145°, medidos en sentido contrario a las agujas del reloj y desde el graben de Colima (Núñez-Cornú, 2011), (ver figura 2.2).



Figura 2.2. Geología estructural de la zona centro de occidente de México (Lazcano, 2001).

Se caracterizó el Bloque de Jalisco y se identificaron los sismos que originaron las estructuras sísmicas principales de éste, incluyendo los provocados por actividades volcánicas.

Zona de subducción de las placas de Cocos bajo la de Norteamérica.

Esta zona generó los siguientes sismos con magnitudes \geq 6.0: el del 07 de junio de 1911 con M=7.8, y el 30 de enero de 1973 con Ms=7.4.

Zona de Subducción de las placas de Rivera bajo el Bloque de Jalisco.

Esta zona generó los siguientes sismos con magnitudes ≥ 6.0 : el del 25 de marzo de 1806 con M=7.5?, el 31 de mayo de 1818 con M=7.7, el 22 de noviembre de 1837 con M=7.7, el del 11 de febrero de 1875 con M=7.5, los sismos del 19 de enero y 16 de mayo de 1900 M= 7.1 y 7.8 respectivamente, los sismos del 03 de junio y el 18 de junio de 1932 con Ms= 8.2 y 7.8, el 30 de noviembre de 1934 con M= 7.2 y el del 9 de octubre de 1995 con Ms=7.6, Mw=8.0.

Fallas Intraplaca.

- El graben Tepic-Zacoálco, generó los sismos del 27 de diciembre de 1568 con M=7.5?, y el del 11 de febrero de 1875 con M=7.5, pero una intensidad bastante grande de VIII.
- El graben de Colima, los sismos de 1612 y 1785 con magnitudes menores a 6.0 y el del 22 de enero del 2003 con Mw=7.4.
- El graben de Chapala, ocasionó los sismos de 1567 con M=?, y el del 2 de octubre de 1847 con M=7.1.

Actividad Volcánica.

- Volcán de Colima, generó los sismos del 27 de diciembre de 1577 con M=?, I=V y los del 15 de abril y 26 de agosto de 1611 con intensidades iguales a las del 1577.
- Volcán el Ceboruco, este volcán fue causante de sismos pequeños (M<5.0) en los años de 1567, 1832 y 1870.
- Volcán Jorullo, gracias a la actividad de este volcán se generó el sismo del año de 1769 también de una magnitud menor a 6.0.

2.1.2. Fuentes de tipo falla en la zona de subducción de México

Nishenko y Singh (1987) han estudiado los intervalos de recurrencia de sismos interplaca a lo largo de la zona de subducción de México, de los 13 segmentos (gaps) característicos del país, los segmentos que pudieran tener un gran impacto para la ZMG, se describen a continuación:

Michoacán

- Michoacán. Este segmento se encuentra en una longitud de 101.5°W a 103°W. Este segmento coincide con la intersección batimétrica de la zona de fractura de Orozco con la parte media de la trinchera Americana. La ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 1985, Ms=8.1, indica que este gap tiene un modelo de grandes movimientos poco frecuentes. Se identificó un evento previo, el 7 de junio de 1911 con Ms= 7.9. El tiempo de recurrencia estimado para sismos tan grandes en esta región es de aproximadamente 75 años.
- Colima. Este segmento se encuentra en la longitud de 103°W a 103.7°W. Sismos previos asociados a este segmento son los del 15 de abril de 1941 con Ms=7.9 y el del 30 de enero de 1973 con Ms=7.5. Las ondas de cuerpo para el evento de 1973 indican un modo de ruptura complejo.

Colima

• Colima. Este segmento se encuentra entre las longitudes de 103.7°W a 104.5°W. El gap de Colima es definido a base de las réplicas del sismo de Jalisco del 3 de junio de 1932 (Singh *et al.*, 1985) y cubre una zona de aproximadamente 60 km de longitud entre la zona del sismo de 1932 y el de 1973.

Jalisco

Jalisco. Entre las longitudes 104.3°W a 105.7°W. Los grandes sismos previos ocurridos en el estado de Jalisco fueron: el del 25 de marzo de 1806 con Ms=7.5; el del 31 de mayo de 1818 con Ms=7.7; el del 20 de enero y 16 de mayo de 1900 con Ms=7.6 y 7.1 respectivamente y los del 3 y 18 de junio de 1932 con Ms=8.1 y 7.8. El evento del 3 de junio de 1932 es uno de los eventos más grandes ocurridos en México hasta la fecha. Este sismo fue causado por una ruptura de la Placa de Rivera.

Guerrero

- Guerrero Central. Se encuentra entre las longitudes 100°W a 101°W. Sismos previos ocurridos en este segmento de Ms ≥ 7.5 fueron: el del 7 de abril 1845?, Ms=7.9; 24 de diciembre de 1899, Ms=7.7; 26 de marzo de 1908, Ms=7.8; 30 de julio de 1909, Ms=7.5 y el del 16 de diciembre de 1911, Ms=7.8. Esta zona tiene la mayor tasa de recurrencia a lo largo de la zona de subducción.
- Petatlán. Este segmento se encuentra entre las longitudes 101°W a 101.8°W; sismos ocurridos en esta región con Ms ≥ 7.5 se incluyen los del: 22 de febrero de 1943, con Ms=7.7; 14 de marzo de 1979, Ms=7.9. En este segmento existe una gran variedad en los modos de ruptura.

Los segmentos restantes, estudiados por Nishenko y Singh (1987), aportan una menor cantidad de peligro sísmico a la ZMG, pero es importante mencionarlos para tenerse en cuenta. Estos segmentos se mencionan a continuación.

Ometepec. Este segmento se encuentra entre las longitudes 98.2°W a 99.3°W. Sismos históricos relevantes ocurridos en este segmento se incluyen los del 2 de diciembre de 1980, Ms=7.5; 15 de abril de 1907, Ms=7.9; el del 23 de Diciembre de 1937, Ms=7.5; 14 de diciembre de 1950, Ms=7.3 y el del 7 de junio de 1982, Ms=6.9 y 7.0. Se estimó una recurrencia de un intervalo aproximado de 43 años para eventos con un Ms ≥ 7.5 para este segmento.

Acapulco-San Marcos. Entre las longitudes 99.3°W a 100°W. Sismos previos ocurridos se incluyen los del 4 de mayo de 1820?, Ms=7.6; 7 de abril de 1845?, Ms=7.9; 15 de abril de 1907, Ms=7.9 y el del 28 de julio de 1957 con Ms=7.7. Basado en la observación histórica se podría estimar una ocurrencia de un rango aproximado de 56 a 68 años para un evento con un Ms ≥ 7.7 entre los años del 2013 y 2024.

Oaxaca

- **Tehuantepec.** Se encuentra entre las longitudes 94°W a 95.2°W. Este gap es uno de los dos segmentos a lo largo del margen mexicano que se distinguen por no originar grandes sismos históricos. Este gap coincide con la intersección del Itsmo de Tehuantepec y la Trinchera Americana, y está cerca de la triple intersección de las placas de Norteamérica, Cocos y la del Caribe.
- Oaxaca Este. Entre las longitudes de 95.2°W a 96.4W. Sismos principales que han ocurrido en este segmento son los del 22 de marzo de 1928, Ms=7.7 y el del 23 de agosto de 1965 con Ms=7.8. Basado en estas fechas se estableció un tiempo de recurrencia de cada 37 años aproximadamente, para este segmento.
- Oaxaca Central. Este segmento está entre las longitudes 96.4°W a 97.7°W. Sismos grandes ocurridos a lo largo de este segmento se incluyen los del 11 de mayo de 1970, Ms=7.9; 17 de junio de 1928, Ms=8.0; 9 de octubre de 1928 con Ms=7.8 y el del 29 de noviembre de 1978, Ms=7.8. La región central de Oaxaca contiene dos zonas dentro de este segmento, uno entre las longitudes 96.4°W y 97.3°W y la segunda zona se encuentra entre 97.3°W y 97.7°W. Para la primera zona de los sismos históricos ya antes mencionados, se tendría una recurrencia relativa de ≥ 50 años, y para la otra zona, se estimó una probabilidad de recurrencia de 34, 59 y 86 por ciento para los siguientes 5, 10 y 20 años respectivamente; estos datos indicaron una recurrencia aproximada de 44 años para el segmento.
- Oaxaca Oeste. Entre las longitudes 97.7°W a 98.2°W. Sismos representativos ocurridos en este segmento son los del 5 de mayo de 1854, Ms=7.7; 2 de noviembre de 1894, Ms=7.4; 4 de agosto de 1928 con Ms=7.6 y el del 2 de agosto de 1968, Ms=7.4, basado en lo observado se estableció una recurrencia aproximada de 38 años para sismos de entre Ms=7.4 a 7.6.

La tabla 2.1 muestra las tasas de recurrencia y las características de los segmentos de fallas sísmicas (Nishenko y Singh, 1987). La localización de la geometría de los segmentos puede ser observada en la figura 2.3 de forma gráfica y en forma de datos, en la tabla 2.2 (Inca, 2013).

Segmento	Longitud	Ancho	Mo*10 ²⁷	Tasa de Recurrencia		Ms min	Ms max	Ms prom
	(km)	(km)	dyna-cm	veces/año	años			
Oaxaca-Este	137	80	1.7	0.027	37	7.4	7.8	7.6
Oaxaca- Central I	142	80	3.9-4.7	0.019	54	7.8	8.0	7.9
Oaxaca- Central II	172		1.8	0.018	56	7.4	7.8	7.6
Oaxaca- Oeste	37.5	80	1.0	0.026	38	7.4	7.7	7.55
Ometepec	120	80	5.8	0.059	17	7.0	7.9	7.45
Acapulco- San Marcos	113	80	3.3	0.018	56	7.2	7.9	7.55
Guerrero Central	139	80	2.0	0.019	54	7.1	7.9	7.5
Petatlán	102	80	1.7	0.028	36	7.6	7.7	7.65
Michoacán	133	80	3.8	0.014	74	7.3	8.1	7.7
Michoacán- Colima	54.05	80	2.5	0.0072	139	7.3	8.1	7.7
Colima	115	80	2.5-3.0	0.031	32	7.5	7.9	7.7
Jalisco	180	80	7.3	0.00877	114	7.1	8.2	7.65

Tabla 2.1. Tasas de recurrencia de los segmentos de falla para el peligro sísmico de la zona (Nishenko y
Singh, 1987).

CAPÍTULO 2



Figura 2.3. Localización de los segmentos de ruptura de subducción de la costa de México.

Segmento	Abreviación	Tipo de Falla	Tipo de Falla	Falla	Ubicación
Oaxaca- Tehuantepec	OAX-TH	Subducción	Inter-placa	Inversas	94°W a 95.2°W
Oaxaca-Este	OAX-E	Subducción	Inter-placa Inversas		95.2°W a 96.4°W
Oaxaca- Central I	OAX-CI	Subducción	Inter-placa	Inversas	96.4°W a 97.3°W
Oaxaca- Central II	OAX-CII	Subducción	Inter-placa	Inversas	97.3°W a 97.7°W
Oaxaca-Oeste	OAX-O	Subducción	Inter-placa	Inversas	97.7°W a 98.2°W
Ometepec	OM	Subducción	Inter-placa	Inversas	98.2°W a 99.3°W
Acapulco-San Marcos	ACA-SM	Subducción	Inter-placa	Inversas	99.3°W a 100°W
Guerrero Central	GRO-C	Subducción	Inter-placa	Inversas	100°W a 101°W
Petatlán	PE	Subducción	Inter-placa	Inversas	101°W a 101.8°W
Michoacán	MI	Subducción	Inter-placa	Inversas	101.5°W a 103°W
Michoacán- Colima	MI-CO	Subducción	Inter-placa	Inversas	103°W a 103.7°W
Colima	COL	Subducción	Inter-placa	Inversas	103.7°W a 104.5°W
Jalisco	JAL	Subducción	Inter-placa	Inversas	104.3°W a 105.7°W

Tabla 2.2. Ubicación de segmentos de fallas sísmicas.

2.1.3. Fuentes tipo área

2.1.3.1. Regionalización de Zúñiga et al. (1997)

El proyecto de peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe nació de la necesidad de producir mapas de riesgo sísmico homogéneos y consistentes que cubrieran a los territorios de los países ubicados en esta región, los cuales pudieran ser utilizados por agencias especializadas en evaluaciones de riesgo como, por cualquier persona interesada en conocer las características generales del riesgo sísmico para alguna región dentro de la zona.

Para facilitar la organización operativa del proyecto, la zona de cobertura global fue dividida en las siguientes regiones: México, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe. La zona de cobertura global abarca de los 70°S a los 33°N de latitud y de los 30°W a los 120°W de longitud. Dicha zona comprende toda la extensión territorial de Latinoamérica y Méx-8 el Caribe incluyendo la parte oceánica adyacente.

2.1.3.2. Antecedentes y procesos iniciales

Toda la compilación de datos sísmicos generalmente se divide en dos partes fundamentales, la que corresponde a los datos, basados en registros tomados por instrumentos de medición, que en México abarca desde principios del siglo pasado hasta la fecha, y aquella que se basa en datos, relacionados a daños y efectos, provenientes de crónicas y escritos y que cubre el período anterior a los instrumentos de medición. Las reseñas sobre sismos ofrecen abundante información que permite no solo identificar, localizar y datar los temblores, sino incluso cuantificar sus daños y estimar sus alcances (Zúñiga *et al.*, 1997).

2.1.3.3. Regionalización Sismotécnica.

El territorio de México se subdividió, de manera global, en unidades sismogenéticas con el propósito de estimar el riesgo, basándose en los datos de los catálogos instrumentales e históricos (crónicas y escritos).

El territorio de México se subdividió en 19 regiones principales (Zúñiga *et al.*, 1997), considerando las siguientes características:

- 1. La localización hipocentral de eventos de características similares.
- 2. Las características tectónicas comunes de la zona.
- 3. Los mecanismos focales y/o patrones de fallamiento.
- 4. Las características principales de la liberación de energía de los sismos dentro de cada región.
- 5. La historia sísmica de cada región.
- 6. Un criterio adicional fue el de reducir a un mínimo el número de regiones primarias de las cuales se pueda partir para lograr subdivisiones más refinadas en el futuro.
Las regiones que influyen a nuestra zona de estudio son las siguientes:

Región SUB1. Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción (profundidad < 40 km). Zona de transición de la convergencia entre las placas Rivera y Norteamericana (NOAM) a la convergencia Cocos-NOAM, incluyendo la mayor parte de la zona costera del estado de Jalisco y costa occidental del estado de Jalisco y la costa occidental del estado de Colima. La periodicidad de los eventos que ocurren en esta región es menor que la de las demás regiones de subducción hacia el este. Esto se puede deber a la edad de la litosfera oceánica en esta región ya que es más joven que la de la placa de Cocos. Su potencial sísmico, sin embargo, es mayor que el del resto de la placa de Rivera al oeste.

Es importante destacar que en esta zona ocurrió el sismo del 3 de junio de 1932 ya antes mencionado con una magnitud Ms = 8.2. Otros eventos de importancia son los ocurridos el 01 de enero de 1900 (Ms = 7.4) y el 30 de noviembre de 1934 (Ms = 7.0).

Región RIV3. Zona de eventos interplaca de subducción somera. Interface Rivera-NOAM. En esta región comprende de la escasa y difusa actividad de la sección occidental de la interface Rivera-NOAM. No se ha determinado aún la razón por la cual existe una drástica variación en sismicidad al compararse con la zona de la trinchera hacia el este (zona SUB1).

Región IN1. Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia (40 km < h < 120 km). Relacionados a la interface Cocos-NOAM. Esta zona comprende la sección profunda de la zona de subducción y corresponde a la extensión de las zonas SUB1 y SUB2. Los eventos que ocurren en esta zona muestran mecanismos focales de falla normal, con sus ejes de máxima tensión en la dirección paralela al echado de la placa subducida. Los sismos se localizan dentro de las placas de Rivera y Cocos en el rango de la profundidad entre los 40 y los 200 km.

Región RIV1. Zona de eventos interplaca someros de fallamiento normal principalmente, interface Pacífico–Rivera. Esta zona delimita a los sismos que ocurren en la Dorsal del Pacífico Este como parte de la interface entre las placas Pacífico y Rivera. Su mecanismo es principalmente de falla normal.

Región RIV2. Zona de eventos interplaca someros de fallamiento de rumbo principalmente, interface Pacífico-Rivera. Esta región corresponde a la frontera sur de la Placa de Rivera. Debido a que es un régimen de falla transformada, los mecanismos de los sismos son principalmente de Rumbo.

Región SUB2. Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos-NOAM. Esta zona corresponde a la zona de mayor acoplamiento entre Cocos y NOAM y comprende las áreas conteras de los estados de Colima, Michoacán, Guerrero y el

Occidente de Oaxaca. Esta zona presenta la más alta periodicidad de temblores de magnitud M>7.0.

Región BB. Zona de eventos intraplaca (NOAM) someras, provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin). Esta región comprende a los eventos de baja magnitud que ocurren en los estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. Existe una ligera tendencia de alineamiento para los epicentros catalogados en la dirección norte-sur. Las magnitudes de los eventos son menores a los 5.0 grados.

Región MVB. Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros (h<40km), dentro de la provincia tectónica del Eje Volcánico Mexicano (Mexican Volcanic Belt). Esta zona comprende los eventos que ocurren en la parte somera de la placa continental, asociados principalmente a esfuerzos tensionales. Estos mismos esfuerzos están relacionados con la ubicación de la Faja o Cinturón Volcánico Mexicano. Existen, sin embargo, algunos sismos localizados muy próximos a los eventos de falla normal, que muestran fallamiento inverso.

Entre los sismos ocurridos el siglo antepasado, provocado por esta región, se encuentra el evento del 11 de febrero de 1875, ubicado cercano a la Cd. De Guadalajara. Se le estimó a este evento una magnitud de 7.1, y debido tanto a su proximidad a la Cd. De Guadalajara como a su poca profundidad, el riesgo relacionado a otro evento similar, deberia considerarse con cuidado.

Región NAM. Esta zona es de eventos intraplaca (NOAM) someros. Esta región comprende la actividad somera (profundidad menor a 40 km), que tiene lugar en la placa continental al sur de la Faja Volcánica Mexicana. La mayoría de los eventos son de fallamiento normal.

Región BC1. Esta zona comprende la actividad asociada a los eventos someros intraplaca en el área de Baja California. Estos eventos muestran un modo de fallamiento variable. Los eventos más grandes no alcanzan magnitudes mayores a los 6.0 grados. Sin embargo son susceptibles de causar daño a algunas poblaciones de la península.

Región BAR. Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincias de Cuencas y Sierras-Fisura del Río Bravo. Los eventos se caracterizan por su poca profundidad, baja magnitud y escasa frecuencia de ocurrencia. La mayor magnitud registrada para los eventos de la zona es 6.4.

En la figura 2.4., se pueden observar las fuentes sismogénicas tipo área de sismos someros intraplaca e interplaca, usados en este estudio. Se muestra también en la figura 2.5, las fallas tipo área en la zona del pacífico del país, para sismos profundos.



Figura 2.4. Fuentes tipo área para sismos someros usados para los casos estudiados.



Figura 2.5. Regiones sismotectónicas intraplaca para sismos profundos.

2.2. Modelos de Atenuación

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber que intensidad se presentaría en el sitio, si en la i-ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las ecuaciones que relacionan magnitud, posición relativa de la fuente-sitio e intensidad, se les conoce como leyes de atenuación. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia entre el foco sísmico y el sitio. Se considera que las intensidades sísmicas relevantes son las ordenadas del espectro de respuesta Sa (seudoaceleraciones, 5% del amortiguamiento crítico), cantidades que son aproximadas proporcionales a las fuerzas laterales de inercia que se generan en las estructuras durante sismos y que dependen del período natural de vibrar (Ordaz *et al.*, 2007). Se evaluaron 5 leyes de atenuación, de acuerdo a las fuentes sismogénicas incluidas en nuestro análisis de peligro sísmico, y a los datos que se utilizaron para formular cada una de estas leyes, principalmente sismos de subducción en México. Los modelos se describen a continuación:

2.2.1. Youngs et al. (1997) (YOU-1997).

Este modelo fue desarrollado por RR. Youngs, S.J. Chiou, W.J.Silva y J.R. Humphrey. Presentan una relación de atenuación para sismos de subducción, y sismos provocados por fallas de inter-placa e intraplaca, con magnitudes de momento mayores a 5.0 y distancias de 10 a 500 km.

Los sismos provocados por las zonas de subducción de tipo inter-placa son provocados por fallas inversas de ángulos pequeños en la interfase de la placa subducente u oceánica (placas de Cocos y Rivera) y la placa que se desplaza por debajo de la oceánica (placa de Norteamérica).

Los sismos de origen intraplaca ocurren en el interior de la placa que subduce por encima de una falla normal, con un ángulo de inclinación grande.

Las relaciones de atenuación fueron desarrolladas para aceleraciones pico (PGA) de zonas de subducción que son evaluadas mediante análisis de regresiones aleatorias de datos empíricos. Las constantes son determinadas por un análisis que incluye coeficientes de las relaciones de atenuación seleccionados para grupos de referencia y parámetros que representan perturbaciones de otros 5 grupos de referencias, $C_1 a C_5$ (Youngs *et al.*, 1997).

En esta ley de atenuación se usa una base de datos de registros internacionales y dentro de ella se encuentran, 23 registros de sismos fuertes en México desde el año de 1962 a 1985; 12 registros son de Oaxaca, 47 de Guerrero, 17 de Playa Azul y 45 de Michoacán.

La ecuación que define esta ley para roca está dada por:

 $ln SA(T) = 0.2418 + 1.414 M + C_1(T) + C_2(T) * (10 - M)^3 + C_3(T) * ln(rrup + 1.7818 e^{0.554} M) + 0.00607 H + 0.3836 ZT$ (2.1)

Desviación estándar = $C_4 + C_5 M$

(2.2)

Donde:

SA(T) = aceleración espectral normalizada en g, calculada para el período T en estudio.

T = período en segundos.

 $C_1(T), C_2(T), C_3(T), C_4(T), C_5(T) =$ dependientes del período T, obtenidos por medio de regresión de datos dados por Youngs *et al.* (1997).

M = magnitud de momento.

H= profundidad en km.

ZT = tipo de falla; usar 0 para falla interplaca y 1 para falla intraplaca.

rrup = distancia más cercana a la ruptura en km o distancia hipocentral. El intervalo de distancias es de 10 a 500 km.

2.2.2. García et al. (2005) (GA-2005).

Por D. García, S.K. Singh, M. Herraíz, M. Ordaz y J.F. Pacheco. Este modelo fue desarrollado para sismos inslab o intraplaca de las costas de México (falla normal, profundidad intermedia), para sitios sobre roca firme, el número de eventos sísmicos que se utilizaron fueron 16 a distancias locales y regionales de hasta 400 km, con momentos de magnitud (Mw) entre 5.2 y 7.4 y profundidades focales (H) entre 35 y 138 km; ya que se encontraron dependencias entre las aceleraciones máximas del terreno y las profundidades focales (García *et al.*, 2005).

La ecuación que define esta ley para roca se define como:

 $\log SA(T) = C_1(T) + C_2(T) M_W + C_3(T) R - C_4(T) \log(R) + C_5(T) H + \sigma$ (2.3)

Donde:

SA(T) = aceleración espectral horizontal para 5% de amortiguamiento en cm/s2.

T = período en segundos.

 M_W = magnitud de momento.

H = profundidad al foco en kilómetros.

 $C_1(T) + C_2(T) + C_3(T) + C_4(T) + C_5(T) = \text{constantes}$ definidas por un análisis de regresión al conjunto de datos dependientes de cada período en García *et al.* (2005).

R = es la distancia promedio de la distancia a la superficie de falla en km, definida por $R = (R2c/d + \Delta 2)1/2$, donde Rc/d, es la distancia más cercana a la superficie de falla para eventos con Mw > 6.5, o la distancia hipocentral para el resto y $\Delta = 0.0075 \times 100.507 M_W$, el cual es un término de saturación de la fuente definido por Atkinson y Boore (2003).

 σ = desviación estándar.

2.2.3. Arroyo et al. (2010) (ARR-2010).

Este modelo se desarrolló por D. Arroyo, D. García, M. Ordaz, M. A. Mora y S. K. Singh. Se derivaron relaciones de atenuación para componentes horizontales de pseudoaceleraciones de espectros de respuesta para sismos interplaca en México en roca (Clase B en la clasificación NEHRP) en la región de la costa.

El modelo resultante tiene una precisión similar a los modelos derivados de bases de datos regionales y mundiales de zonas de subducción. Los resultados de este modelo revelan que la relación de atenuación en México tiende a ser más fuerte que las relaciones de atenuación mundiales para grandes eventos; y predicen éstas relaciones para grandes sismos a grandes distancias de la fuente a diferencia de como se podrían considerar para modelos globales.

Estos autores usaron registros de sismos interplaca con $M_w \ge 5.0$ ocurridos entre 1985 y 2004 a lo largo de la costa del pacífico entre los estados de Colima y Oaxaca. Este estudio está enfocado en magnitudes y distancias hipocentrales de interés ingenieril, con $M_w \ge 6.5$ y R < 150-200 km y para eventos pequeños con $M_w \le 5.5$ y distancias lejanas R > 100 km.

Se compilaron 418 registros de 40 sismos interplaca, obtenidos de 56 estaciones localizadas entre 20 y 400 km. Se seleccionaron solo el 66% de la información total que tuvieran una aceleración mayor de 0.1 Hz.

Para un modelo circular de fuente finita en zonas de subducción la ecuación se define como:

$$lnSA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T) M_W + \alpha_3(T) ln \left[\frac{E_1(\alpha_4(T)R) - E_1(\alpha_4(T)\sqrt{R^2 + ro^2})}{ro^2} \right]$$
(2.4)

Donde:

SA(T) = aceleración espectral horizontal para 5% de amortiguamiento calculada para T.

 $\alpha_i(T)$ = son coeficientes determinados atreves de un análisis de regresión.

R = distancia más cercana a la superficie de falla en km.

ro = radio equivalente a una falla circular y se define como: $ro^2 = 1.4447 \times 10-5 \ e2.3026$ M_W

 M_W = magnitud de momento.

 E_1 = integral exponencial, obtenida mediante métodos numéricos dada por: $E_1 = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$

2.2.4. Gómez-Bernal et al. (2003). (GO-2003).

Se desarrolló por A. Gómez-Bernal, M. A. Lecea y H. Juárez-García. Este modelo presenta una relación empírica de atenuación para aceleraciones máximas del suelo, para sismos interplaca, e intraplaca con Mw > 6.0, y para distancias entre 20 y 600 km. Se han desarrollado relaciones empíricas para estimar PGA, como una función de magnitud, distancia, mecanismos de falla, y categorías de sitio basado en 600 registros de 25 sismos en zonas activas en México. Estas relaciones se desarrollaron por análisis de regresión usando técnicas en dos pasos.

Para esta investigación se seleccionaron solo 17 eventos ocurridos entre 1979 y 1999 en la zona de subducción del pacífico del país, todos ellos con una magnitud mayor a 6.0. El modelo de regresión usado con base en la distancia a la falla para terreno firme y roca está dado por:

$$\log A = b - \log(DX + c) - kDX \tag{2.5}$$

Donde:

A = es el parámetro de interés, PGA o PGV.

b = es un factor de contrapeso para cada uno de los sismos y se define como: $b = aM_W + dH + e_1S_1 + e_2S_2 + e_3S_3 + f + \varepsilon$.

k = es un coeficiente asignado para cada parámetros sísmico, para *PGA 0.0015* y para *PGV 0.003*.

c = es un coeficiente que toma en cuenta la saturación de las amplitudes debido a la proximidad de la fuente, que considera una distancia efectiva que incrementa con la magnitud y es propuesto como: $c = 0.0055 \times 100.525 M_W$.

 M_W = magnitud de momento.

R = es la distancia más cercana a la superficie de falla en km.

H= profundidad al foco en km.

 $a, d, e_1, e_2, e_3, f =$ son coeficientes determinados mediante análisis de regresión.

 $S_1, S_2, S_3 =$ son factores que toman en cuenta el tipo de falla, se usa 1 para el tipo de falla en estudio y 0 para los demás.

 ε = Desviación estándar.

2.2.5. Gómez et al. (2005). (GO-2005).

Este modelo se desarrolló por C. Gómez, M. Ordaz, y A. Tena. Se utilizaron análisis de regresión lineal en dos etapas para aceleración y desplazamiento, esta ley se creó a base de registros sísmicos de seis estados de la Costa Mexicana del Pacífico entre los años de 1960 a 1999, fueron más de 4000 acelerogramas, para más de 300 sismos, para magnitudes de momento mayores o iguales a 4.5 para sismos de subducción. De los 4000 acelerogramas se tomaron 1983 para 108 sismos de 95 estaciones de registro. De las 95 estaciones 7 corresponden a Chiapas, 6 a Colima, 51 a Guerrero, 19 a Jalisco, 14 a Michoacán, 6 al límite entre Michoacán y Guerrero y 6 a Oaxaca. Las profundidades focales de los sismos están entre los 5 y 80 km.

Las leyes de atenuación aplicando el método de regresión en dos etapas para la aceleración se describen a continuación:

$$log a = 2.308 + 0.780 M_W - 0.844 lnR - 0.004 R$$

$$log a = 1.237 + 1.519 M_W - 0.0313 M_W - 0.844 lnR - 0.004 R$$
(2.6)
(2.7)

Donde:

a = Aceleración máxima (PGA).

 M_W = Magnitud de Momento.

R = Distancia más cercana a la superficie de falla en km.

Las leyes de atenuación de Gómez *et al.* (2005) y Gómez-Bernal *et al.* (2003), no se incluyen para el análisis, pues estas consideran la aceleración máxima del suelo (PGA). Debido a la falta de información acelerográfica de sismos de gran magnitud, este estudio obtendrá aceleraciones espectrales (SA), teniendo como resultado, diferentes EPU's en función del período y la pseudoaceleración.

3.1. Geología superficial de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)

La ZMG se ubica dentro de una cuenca semi elíptica cuyas dimensiones van desde 22 km hasta 33 km (Saborío, 1995). La cuenca está limitada topográficamente por cerros lomeríos que alcanzan 250m sobre el nivel medio de la cuenca, mientras que la parte central presenta pendientes suaves y desniveles menores. Al Norte y Noreste de la cuenca, el rio Santiago ha labrado un profundo cañón que limita bruscamente la cuenca (Ramírez-Centeno *et al.*, 1998).

En las faldas de las montañas circundantes afloran rocas de origen ígneo extrusivo, mientras que en la zona central de la cuenca se tienen grandes depósitos de materiales piroclásticos. También se pueden encontrar algunos rellenos de materiales aluviales provenientes del intemperismo de las rocas ígneas periféricas. La roca basáltica es de origen más reciente y cubre grandes extensiones. La mayor parte de los depósitos de la cuenca son de origen piroclástico que en algunos casos han sido transportados y redepositados por el agua y viento. En ocasiones se les encuentra mezclados con depósitos lacustres, o sedimentos como las calizas. El lecho rocoso de los depósitos piroclásticos es de origen riolítico y basáltico. También pueden encontrarse en algunas zonas una serie de tobas y brechas que son visibles en el cañón formado por el río Santiago, (figura 3.1) y tiene origen en antiguas corrientes de agua tributarias del río Lerma-Santiago (Ramírez *et al.*, 1998).



Figura 3.1. Mapa geológico de la ZMG (Ramírez et al., 1998).

Él subsuelo de la ciudad de Guadalajara es muy uniforme y está constituido por depósitos de arenas y gravas de granulometría variada, formada principalmente por arenas pumíticas (Ramírez *et al.*, 1997). En los estratos de arenas se observan distintos porcentajes de limos, y se localiza el lecho rocoso a profundidades que oscilan desde 0m a 100m (Chávez, 1993).

La granulometría fluctúa desde suelos finos hasta gravas, el tamaño de las partículas son de aprox. 0.5 a 7.5 cm, pasando por el intervalo de las arenas (malla No. 200 a malla No. 4). Sin embargo, el intervalo de partículas predominante en el subsuelo de Guadalajara son arenas y finos poco a medianamente plásticos (limites líquidos y plástico variables 25 a 40 y 0 a 18) (Lazcano, 2004).

3.2. Mapa de curvas de isoperíodos en la ZMG

Con el objetivo de estudiar con mayor detalle algunas de las características dinámicas de la respuesta del suelo en la ZMG, en 1997 se realizó un estudio donde se obtuvieron mapas de curvas de isoperíodos (Ramírez *et al.*, 1997). En este trabajo se estudiaron las características geotécnicas por medio de 60 estudios de mecánica de suelos distribuidos en la ZMG, (ver figura 3.2), obtenidos mediante estudios de Penetración Estándar cuya profundidad explorada oscila entre 1.8 y 16.6 m.

Se realizaron mediciones de la vibración ambiental en 134 sitios de la ZMG, mostrados en la figura 3.6, con el objetivo de determinar el período de vibración del suelo en zonas donde no se tuvo información geotécnica para complementar, y poder trazar curvas de isoperíodos.

El período fundamental se realizó mediante la técnica de Nakamura (1989). La técnica propone un procedimiento aproximado para remover los efectos de la fuente de excitación de la vibración ambiental, basada en la modificación de la función de transferencia convencional de un sitio. Nakamura establece que la vibración generada por fuentes locales genera ondas Rayleigh que afectan tanto los movimientos horizontales como verticales en la superficie (Ramírez *et al.*, 1997).

Con los períodos de vibración del suelo obtenidos tanto con vibración ambiental como con el estudio de la información geotécnica recopilada, fue posible trazar el mapa de curvas de isoperíodo donde se pueden identificar curvas para 0.20s a 0.80s (ver figura, 3.3).



Figura 3.2. Registros de vibración ambiental y sondeos geotécnicos (Ramírez et al., 1997).





Se puede observar que en la zona del oriente correspondiente a los municipios de Tonalá, Tlaquepaque y Guadalajara de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), tiene períodos del suelo menores a los 0.40 s, principalmente en los sectores Libertad, Reforma, parte del sector Juárez e Hidalgo. Cabe destacar que esta zona coincide con el área de depósitos de arenas y gravas cuya profundidad no excede a los 20 m.

También se analizaron los períodos fundamentales de vibración de los Acelerogramas registrados por la Red Acelerográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara (RAZGM), en todas sus estaciones durante el sismo ocurrido el 9 de octubre de 1995 en las costas de Jalisco y Colima, (ver figura 3.4). En la tabla 3.1, se muestran estos períodos comparados, con los obtenidos mediante el estudio de vibración ambiental hecho para este análisis.

Los períodos del suelo obtenidos por el análisis de vibración ambiental y el análisis de acelerogramas, se utilizaron en este estudio para comparar los resultados obtenidos en el capítulo 5.

Estación Acelerográfica	Ts (seg) sismo 09/10/1995	Ts (seg) Vibración ambiental
Obras Públicas	0.29 - 0.32	0.36
Arcos	0.57 - 0.63	0.51
Jardines del Sur	0.66 - 0.78	0.66
Rotonda	0.45 - 0.48	0.40
Miravalle	0.33 - 0.48	0.22
Planetario	-	0.12
Oblatos	0.15	0.21
San Rafael	0.10 - 0.18	0.16
Colegio	0.40 - 0.41	0.42
Ciudad Granja	0.86 - 1.04	0.70
Tonalá	-	0.24

Tabla 3.1. Comparación entre los períodos del suelo Ts, de las estaciones acelerográficas de la ZMG
(Lazcano, 2012).



Figura 3.4. Estaciones acelerográficas de la ZMG (Chávez, 1993).

3.2.1. Mapa de zonificación sísmica

Mediante las curvas de isoperíodos obtenidos por Ramírez *et al.* (1997), se propuso un mapa de zonificación sísmica. El criterio utilizado para esta zonificación fue la de distinguir los períodos naturales de vibración; estableciendo tres tipos de suelos: firme, intermedio y blando, con diferentes límites para distinguirlos, como se muestra en la tabla 3.2.

Zona	Intervalo de Ts (seg)
Firme o tipo A	Ts < 0.40
Intermedia o tipo B	$0.80 \geq Ts \geq 0.40$
Blanda o tipo C	0.80 < Ts

Tabla 3.2. Límites entre las zonas propuestas, (Ramírez et al., 1998).

Las curvas de 0.40 y 0.80 segundos fueron el punto de partida para establecer estos límites ya que 0.40 fue la media entre estas. Se pueden distinguir tres tipos de zonas en donde se ajustaron los límites entre las zonas al trazo de calles y avenidas con el objeto de hacer práctico su uso, este mapa de zonificación se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Mapa de zonificación de la ZMG (Ramírez et al., 1998).

3.3. Velocidad de onda de corte (Vs)

La determinación de la velocidad de propagación de las ondas de corte (Vs) es de gran utilidad en la geotecnia, que con este valor se puede: 1) Determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G), 2) Inferir densidad en campo, 3) Estimar el estado de esfuerzos, 4) Estimar la cementación natural y/o 5) Evaluar la alteración de una muestra (Stokoe *et al.*, 1989). La relación entre la velocidad de onda y el módulo de cortante está dada por la ecuación (3.1):

$$G = \rho V s^2$$
(3.1)

Donde:

 ρ = densidad

Vs= velocidad de onda de corte

Como las deformaciones causadas por las pruebas geofísicas son muy pequeñas, el módulo de cortante que se obtiene con la Vs determinada con dichas pruebas, es el valor máximo (Go), y sufre una degradación mayor o menor, dependiendo del suelo y de la deformación inducida. Este tipo de comportamiento de materiales se le conoce como elástico no-lineal, está asociado con suelos y rocas blandas (Matthews *et al.*, 1996).

3.3.1. Pruebas geofísicas

A partir de la década de 1960, en el campo de la geotecnia se han ido incorporando gradualmente diversas pruebas geofísicas, de tipo sísmico y eléctrico. Las pruebas geofísicas sísmicas de campo que principalmente se usan en geotecnia son: refracción sísmica, downhole, crosshole y diversos métodos de onda de superficie (Lazcano, 2007). En este estudio solo se tratará la refracción sísmica de microtremores, que se describe a continuación:

3.3.1.1 Refracción de Microtremores (ReMi) (Louie, 2001)

Esta técnica analiza las ondas sísmicas con una técnica que permite separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y finalmente determina la variación de la velocidad de onda de corte (Vs) a profundidad. Para la realización de esta prueba se coloca un tendido lineal con 12 o más geófonos, y el registro de la vibración ambiental (microtremores) y superficial (inducida) se realiza con un sismógrafo digital. Los geófonos se conectan a un sismógrafo, en donde se registra la llegada de las ondas elásticas. Conocida la distancia desde la fuente de vibración hasta los geófonos y el tiempo, obtenidos de los sismogramas, es posible determinar la velocidad de propagación de las ondas. Una ventaja adicional de esta técnica es que se pueden detectar estratos blandos entre estratos con rigideces altas. Los pasos para obtener las Vs de los estratos del suelo buscados de Lazcano (2007) se describen a continuación:

Paso 1. Una vez registradas las frecuencias de la vibración ambiental, se debe generar un **espectro de velocidad de frecuencias contra tardanzas (p-f)**, este espectro se detecta con el primer modo de vibrar de las ondas de Rayleigh, donde se escogen manualmente puntos de dispersión en la frontera inferior, que sirven para el proceso de inversión, mostradas en el paso 1 de la figura 3.6.

Paso 2. Después del espectro p-f se determina la gráfica de **períodos contra velocidades de fase de la onda Rayleigh**, (ver paso 2, figura 3.6.) La velocidad de fase (V_F) es la distancia que viaja una onda en un ciclo.

Paso 3. Mediante un modelo interactivo con la gráfica de períodos contra velocidad obtenida en el paso anterior, se traza la curva de dispersión y con ella se establecen los espesores de los **diferentes estratos y la velocidad de onda de corte (Vs)**, en forma de un perfil unidimensional como se observa en el paso 3 de la figura 3.6.



Paso 1. Espectro (p-f), con puntos para el modelado de dispersión Paso 2. Ajuste de Curvas de dispersión



Paso 3. Perfil unidimensional de (Vs), contra profundidad obtenido interactivamente con la curva de dispersión del punto 2.

3.4. Perfiles de velocidad de onda de corte

La empresa Suelo-Estructura S.C., colaboró en esta investigación proporcionando información geotécnica de algunas zonas de la ZMG. Antes de presentar esa información se describe de forma breve en qué consisten las pruebas mecánicas y las pruebas geofísicas para la caracterización del suelo, tomando en cuenta que las ultimas fueron las que se utilizaron para este estudio.

Los perfiles de velocidad de onda se determinaron mediante la técnica de refracción de microtremores, descrita en el apartado anterior. Los perfiles se obtuvieron de 18 sitios localizados en el poniente de la ZMG, mostrados en la figura 3.7.

Figura 3.6. Pasos para la obtención de velocidades de onda de corte de un suelo con la técnica de refracción de microtremores (ReMi) (Lazcano, 2007).



Figura 3.7. Ubicación de sondeos realizados en el poniente de la ZMG (Lazcano, 2012).

En la tabla 3.3, se muestran los perfiles de velocidad de onda de corte (Vs) contra profundidad (m) y los períodos (Ts) de cada uno de estos puntos, donde se puede notar que los perfiles estratigráficos están formados por depósitos piroclásticos, constituidos por arenas pumíticas y en algunos estratos se pueden encontrar limos o gravas hasta llegar en algunas zonas a la roca (basalto o ignimbrita).

Número	Ubicación	Municipio	Estratos	1	2	3	4	5	6
			Profundidad (m)	0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 22	22 - 32	> 32
1	Catedral de	Guadalajara	Vs (m/s)	152.00	186	396.00	262.00	443.00	880.00
	Guadalajara	j.	y (kN/m3)	12.60	14.10	15.00	14.10	16.60	17.20
			T (s) 30m			0	.47		
Antigua	Antigua	Guadalaiara	Profundidad (m)	0 - 4	4 - 9	9 - 25	> 25		
2	Biblioteca		Vs (m/s)	180.00	123.00	309.00	1300.00		
	Publica (Agua Azul)		y (kN/m3)	14.10	12.40	14.80	17.40		
	(^A gua ^A zui)		Ts (s) 30m		0.45				
3 Registro No.1			Profundidad (m)	0 - 1.5	1.5 - 10	10 - 32	> 32		
	Registro Civil	Guadalajara	Vs (m/s)	143.00	298.00	363.00	1260.00		
	No.1		y (kN/m3)	12.50	14.80	14.80	17.30		
			Ts (s) 30m	0.41					

Número	Ubicación	Municipio	Estratos	1	2	3	4	5	6
			Profundidad	0 - 4.5	4.5 -	11 -	> 50		
4 Gamboa y Lerdo de	Fco. Javier Gamboa v		(m) Va (m/a)	154	11	50	850.00		
	Lerdo de	Guadalajara	VS(M/S)	134	309	382.00	830.00		
	Tejada		γ (KIN/IIIS) Ta (a) 20m	12.0	14./	14.70	17.20 58		L
			IS (S) SUM Profundidad		0.30				
	Hotel Riu Plaza Lápaz		(m)	0 - 5	5 - 13	53	53 - 54	> 54	
5	Mateos v	Guadalajara	Vs (m/s)	180	290	450.00	235.00	950.00	
	Lázaro	Ū	y (kN/m3)	14.00	14.8	16.10	14.80	17.20	
	Cárdenas		Ts (s) 30m			0	.60		
	Contro		Profundidad	0 - 5	5 - 11	11 -	> 57		
	comercial,	7	(III) Vs (m/s)	165	290	575.00	1000.00		
0	La Gran	Lapopan	v (kN/m3)	13.2	14.8	16.30	17.30		
	Plaza		Ts (s) 30m	10.2	1.10	0.	.52		·
			Profundidad	0.2	2 12	12 -	> 11		
			(m)	0-5	3 - 12	44	/ 44		
7	Patria y	Zanonan	Vs (m/s)	167	217	596.00	1200.00		
	Guadalupe	F	γ (kN/m3)	13.2	14.5	16.40	17.30		
			Ts (s) 30m		0.45				
	Universidad	Zapopan	Profundidad (m)	0 - 6	6 - 11	11 - 24	24 - 62	> 62	
8 Panamerica	Panamericana		Vs (m/s)	175	260	420.00	610.00	860.00	
	Campus Gdl, Cd Grania		y (kN/m3)	13.4	14.6	16.10	16.50	17.00	
	j		Ts (s) 30m		0.63				
	I án an Madaaa	Zapopan	Profundidad (m)	0 - 3	3 - 11	11 - 25	25 - 85	> 62	
9	v Mariano		Vs (m/s)	185	260	445.00	450.00	800.00	
	Otero		y (kN/m3)	13.40	14.60	16.20	16.20	17.00	
			Ts (s) 30m	0.80					
	Colomos y		Profundidad (m)	0 - 3	3 - 9	9 - 31	> 31		
10	Manuel M.	Guadalajara	Vs (m/s)	188	253	399	1400		
	Diéguez		y (kN/m3)	13.5	14.5	16.00	17.30		
			Ts (s) 30m			0.	.37		
Eulogio Parra 11 y Pablo Casals		Profundidad (m)	0 - 1.5	1.5 - 4.5	4.5 - 7.5	7.5 - 60	> 60		
	y Pablo	Guadalajara	Vs (m/s)	95	215	255	570	1000	
	Casals		y (kN/m3)	12.5	14.3	14.50	16.40	17.10	
			Ts (s) 30m		1	0	.53		
P	Pablo Norudo		Profundidad (m)	0 - 2	2 - 9	9 - 34	> 34		
	y Paseo	Guadalajara	Vs (m/s)	158	220	420	950		
	Jacarandas		y (kN/m3)	13.1	14.5	16.10	17.00		
			Ts (s) 30m	0.41					

Número	Ubicación	Municipio	Estratos	1	2	3	4	5	6
	Punto Sao		Profundidad (m)	0 - 1	1 - 4	4 - 9	>9		
13 Paulo, Prol.	Paulo, Prol.	Guadalajara	Vs (m/s)	95	225	339	1400		
	Av. Americas v Sao Paulo	9	y (kN/m3)	12.5	14.5	15.20	17.20		
	y Sao I auto		Ts (s) 30m			0	.16		
			Profundidad (m)	0 - 2	2 - 6.5	6.5 - 10	10 - 17	> 17	
14	Patria y Eva	Zapopan	Vs (m/s)	123	180	250	612	1900	
	Briseno		y (kN/m3)	12.9	14.5	14.70	16.50	17.30	
			Ts (s) 30m			0.	.26		
	Patria v Paseo	Zapopan	Profundidad (m)	0 - 4	4 - 14	14 - 46	>46		
15 Royal	Royal		Vs (m/s)	180	448	513.00	1200.00		
	Country		γ (kN/m3)	14.50	15.40	16.10	17.10		
			Ts (s) 30m		0.43				
	Pasao Valla	Zapopan	Profundidad (m)	0 - 2	2 - 5	5 - 10.5	10.5 - 38	> 38	
16	Real y		Vs (m/s)	111	196	607	696	1200	
	Federalistas		γ (kN/m3)	12.5	14.6	16.30	16.40	17.10	
			Ts (s) 30m	0.33					
			Profundidad (m)	0 - 2.5	2.5 - 8.5	8.5 - 23	23 -72	> 72	
17	Periférico y	Zapopan	Vs (m/s)	216	289	445	624	1900	
	Laureles		γ (kN/m3)	14.60	14.70	16.20	16.60	17.40	
			Ts (s) 30m		0.57				
Nu	Nueva Biblioteca		Profundidad (m)	0 - 3	3 - 8	8 - 14	14 - 37	> 37	
18	Pública,	Zapopan	Vs (m/s)	144	280	350	367	1000	
	Periférico y		y (kN/m3)	13.10	14.70	15.50	15.50	17.00	
]	Parres Arias		Ts (s) 30m		0.47				

En la tabla 3.4 se describe la clasificación sísmica para cualquier terreno de acuerdo al reglamento americano IBC (2006); el cual se basa en los valores promedio de velocidad de onda de corte en los 30 m superficiales (Vs₃₀).

Tipo	Vs30 (m/s)	Descripción				
Α	> 1500	Roca dura				
В	760 - 1500	Roca				
С	360-760	Roca blanda y suelo muy denso				
D	180-360	Suelo rígido				
Е	< 180	Suelo blando				
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)					

Los estudios de velocidad de onda proporcionados por Lazcano (2012 y 2016), (tabla 3.5), los clasificó con base en la tabla anterior y con los valores promedio de velocidad de onda de corte en los 30 m superficiales y con la profundidad inferida de la roca con un Vs > 720 m/s. Se clasificaron los sitios con base en el IBC (2006), debido a que es una herramienta usada en la ciudad de Guadalajara. Se obtuvo el período fundamental (Ts), mediante los datos de Vs prom y la altura de los estratos del suelo, con la fórmula 3.2:

$$\Gamma s = 4*H / Vs \text{ prom}$$
(3.2)

Donde:

H= espesor del depósito de suelos

Vs prom = Velocidad de onda de corte promedio en el depósito de suelos.

Sitio	Vs30 (m/s)	IBC	Prof. Roca (m)	Ts(s)
1	262	D	31	0.47
2	260	F	25	0.45
3	318	D	32	0.41
4	311	D	50	0.58
5	324	D	54	0.6
6	357	D	60	0.52
7	339	D	45	0.45
8	321	D	62	0.63
9	339	D	84	0.8
10	329	D	31	0.37
11	353	D	60	0.53
12	319	D	33	0.41
13	557	С	9	0.16
14	425	С	17	0.26
15	395	С	46	0.43
16	424	С	38	0.33
17	396	С	72	0.57
18	301	D	37	0.47
Promedio	351.67	D	43.67	0.47

Tabla 3.5. Clasificación sísmica Vs_{30} y períodos de los 18 sitios estudiados (Lazcano, 2012).

Los períodos de los suelos en esta área de la ZMG varían desde 0.16 hasta 0.8 segundos, con un valor promedio de 0.47s. Estos datos junto con los resultados de velocidad de onda de corte de cada uno de los estratos de los 18 puntos serán utilizados en el capítulo 5 para obtener funciones de transferencia que nos ayudaran a obtener Espectros de Peligro Uniforme en la superfície o Espectros de sitio.

4 Análisis de peligro sísmico

4.1. Casos de estudio para diferentes radios de influencia

En este capítulo se presentan resultados de Espectros de Peligro Uniforme (EPU), calculados para el promedio de tres relaciones de atenuación y para períodos de retorno de 20 años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, que representan probabilidades de excedencia respectivamente, del 91.8%, 67.1%, 39.3%, 10%, 5%, 2% de ocurrir en 50 años (vida útil de una edificación en México), para la selección de un radio de influencia en la zona de estudio.

Se localizaron los centros históricos de cada uno de los 6 municipios de la ZMG (ver figura 4.1), y se trazaron radios de influencia de fuentes de fallas para cada uno de estos puntos de localización. Los radios que se usaron, fueron distancias de: 200 km, 300km, y 500 km.



Figura 4.1. Localización de los diferentes puntos, usados en los casos de estudio, para la selección de radios de influencia de fuentes sísmicas.

Los tres círculos de influencia se definen para observar y estudiar las variantes de las diferentes fallas que se encuentran en estos radios, de manera que se pueda discutir la influencia de los segmentos y áreas de falla sobre los Espectros de Peligro Uniforme (Inca, 2013). En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran el trazo de estos radios, en el centro de Guadalajara, que es uno de los puntos seleccionados para este estudio.



Figura 4.2. Radios de influencia de segmentos de falla para un caso de estudio (Guadalajara).



Figura 4.3. Radios de influencia para áreas de sismos someros para un caso de estudio (Guadalajara).

ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO



Figura 4.4. Radios de influencia para áreas de sismos profundos para un caso de estudio (Guadalajara).

Se trazaron estos radios para cada uno de los puntos seleccionados y se estableció una base de datos para alimentar al programa de cómputo EZ-FRISKv7.65, desarrollado por Risk Engineering Inc. Este software nos ayudará a realizar un análisis de peligro sísmico basado en la metodología de Cornell (1968) y McGuire (2004). Los datos se muestran en la tabla 4.1.

Las leyes de atenuación que se seleccionaron, se consideraron para los siguientes tipos de fallas:

- Youngs *et al.* (1997) (YOU-1997). Se utilizó para fallas de tipo interplaca e intraplaca.
- García *et al.* (2005) (GA-2005). Se utilizó para fallas de tipo semiprofundas a profundas tipo intraplaca.
- Arroyo *et al.* (2010) (ARR-2010). Se consideró para eventos en la costa de tipo interplaca.

En la figura 4.5 se muestra una comparación entre los tres radios de influencia para los puntos de ejemplo, GDL-200, GDL-300 y GDL-500, para las tres relaciones de atenuación, donde se utilizó el promedio de éstas. Ya que, se consideran todas las fallas o fuentes sísmicas que puedan ocasionar un peligro a la zona elegida. Para cada radio se obtuvo un EPU para períodos de retorno y probabilidad de excedencia antes mencionadas (20 años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, que representan probabilidades de excedencia respectivamente, del 91.8%, 67.1%, 39.3%, 10%, 5%, 2%, en 50 años).

Número Nombre Municipio Latitud Longitud Suelo Onda de	Modelos de Atenuación	
Corte Vs30 Fuentes Falla Fuentes Area		
1 GDL- Guadalaiara 20.6766° -103.3467° Firme 760 m/s COL ML-CO IAL INI-C, INI-B, IN-A, SUB1, VOL	OUL1997 GA-2005 ARR-2010	
200 Culturing a 2007 Table 700 ms COL, MI-CO, MI SUB2, BB, MVB	00-1577, 0H-2005, Hill-2010	
2 GDL- Guadalaiara 20.6766° -103.3467° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, VOL	OUL1997 GA-2005 ARR-2010	
300 Guidanijara 20.0700 105.5707 Tante 700 m3 MI SUB1, SUB2, MVB, BB, NAM	00-1577, 0H-2005, HILL-2010	
3 GDL- Guadalaiara 20.6766° -103.3467° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, VOL	OU-1997 GA-2005 ARR-2010	
500 Subling Source 105 67 Table 106 mb MI, PE, GRO-C SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2,	00 1000, 011 2000, 1141 2010	
4 ZAP- Zaponan 20.6866° -103.3508° Firme 760 m/s COL MI-CO JAL IN1-C, IN1-B, IN-A, SUB1, VOL	OU-1997 GA-2005 ARR-2010	
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200	00 1557, 011 2005, 114t 2010	
5 ZAP- Zaponan 20.6866° -103.3508° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, VOL	OU-1997 GA-2005 ARR-2010	
300 Jup Part Broot Line Port Mi SUB1, SUB2, MVB, BB, NAM		
6 ZAP- Zapopan 20.6866° -103.3508° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
500 Lappen Discos Land With PE, GRO-C SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2,		
7 TLAQ- Tlaquepaque 20.6354° -103.3053° Firme 760 m/s COL, MI-CO, JAL INI-C, INI-B, IN-A, SUBI, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
200 SUB2, BB, MVB	100 1007, 011 2000, 114(-2010	
8 TLAQ- TLAQ- TLAQ- 20.6354° -103.3053° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
300 MI SUB1, SUB2, MVB, BB, NAM		
9 TLAQ- Tlaquepaque 20.6354° -103.3053° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, INI-C, INI-B, INI-A, RIV3, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
500 · · · · MI, PE, GRO-C SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2,		
10 TON- Tonalá 20.6473° -103.2673° Firme 760 m/s COL, MI-CO, JAL INI-C, INI-B, IN-A, SUBI, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
11 10N- Tonalá 20.6473° -103.2673° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, INI-6,	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
300 MI SUBJ,		
12 10N- Tonalá 20.6473° -103.2673° Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, INI-5, INI-6,	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
TI AL		
13 200 Tajomulco 20.4737° -103.4479° Firme 760 m/s COL, MI-CO, JAL SUB2 DB AUD YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
TI AL		
14 300 Tlajomulco 20.4737° -103.4479° Finne 760 m/s MK, COL, MCO, MCD, MCD, MCD, MCD, MCD, MCD, MCD, MCD	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
TI AL		
15 500 Tiajomulco 20.4737° -103.4479° Firme 760 m/s MI PE GRO-C SUBI MVR BR RIVI RIV2 YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
SAL		
16 200 El Salto 20.5196° -103.1784° Firme 760 m/s COL, MI-CO, JAL SUB2 BB MVB YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
SAL JAL COL MI-CO IN1-C IN1-B IN1-A RIV3		
17 300 El Salto 20.5196° -103.1784° Firme 760 m/s ML SUR1 SUR2 MVR RR NAM YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
ALL OCLATICO INI-C. INI-B. INI-A. RIV3.		
18 SAL- El Salto 20.5196º -103.1784º Firme 760 m/s JAL, COL, MI-CO, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, YOU	OU-1997, GA-2005, ARR-2010	
SUU MI, PE, GRO-C SUB2		

Fabla 4.1. Datos utilizados	para el análisis	de peligro si	ísmico de los	casos de estudio.
-----------------------------	------------------	---------------	---------------	-------------------

En la comparación de EPU (ver figura 4.5), se puede observar que para los radios de 200 km y 300 km se empalman o sobreponen los resultados, muy probablemente porque alguna falla que se encuentre entre esas distancias, sea la que ocasione un mayor peligro a la zona estudiada. También se aprecia que los datos obtenidos para el radio de 500 km aumentan ligeramente, al de las otras dos distancias, en los períodos de 0 a 0.5 s. Por lo que se tomó la decisión, de utilizar un radio de 500 km, para el análisis de peligro sísmico de cada uno de los puntos, de la malla que se obtendrá para la Zona Metropolitana de Guadalajara.



Figura 4.5. Espectros de peligro uniforme para tres radios en el punto "Guadalajara", las curvas R=200 km y R=300 km se superponen.

4.2. Malla para interpolación de EPU (IDW)

Se realizó una malla de puntos con el fin de obtener una microzonificación de la Zona Metropolitana de Guadalajara y calcular Espectros de Peligro Uniforme a una distancia específica en cada una de estas intersecciones. Para elegir esta distancia se basó en la investigación realizada por Inca (2013), que mediante el método de Interpolación de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), concluyó, que se podía tener una buena aproximación de los EPU desconocidos, con distancias menores o iguales a 15 y 30 km debido a las cortas distancias entre ellas. En el apéndice D, se muestra con detalle cómo se obtiene un EPU desconocido de la malla de interpolación.

Para este estudio se tomó una distancia arbitraria de 10 km debido a que la extensión territorial de la ZMG no es muy grande. Por lo que se decidió refinar esta malla de esa forma y en consecuencia obtener resultados con buenas aproximaciones para la interpolación. En la figura 4.6 (izquierda), se observa esta malla, donde se localizaron 62 puntos para poder trazar la cuadricula.



Figura 4.6. Trazo de malla de interpolación con intersecciones a cada 10 km (izquierda) y malla de interpolación definitiva con 24 puntos (derecha).

Se identificaron los puntos que se encuentran dentro de los 6 municipios de la ZMG, (gris oscuro), quedando así, un total de 24 puntos para este estudio, como se observa en la figura 4.6 (derecha). A estos puntos se les asignó una clave para distinguirlos y se obtuvieron sus ubicaciones exactas para el análisis, se tomó un radio de influencia de fuentes de fallas de 500 km, y se consideró una velocidad de onda de corte del suelo a 30m (Vs30), de 760 m/s, para suponer un terreno firme o tipo roca, para cada uno de los puntos. Y por último se les asignó una relación de atenuación a cada falla seleccionada dentro del radio de influencia.

Se definió una base de datos al igual que en el proceso de selección de radio de influencia, para introducirlos al programa de computo EZ-FRISK v7.65 y tener como resultado Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme, para cada punto de intersección en la malla. Los datos de los 24 puntos, se recopilaron en la tabla 4.2, donde pueden ser observados.

	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Tipo de Suelo	Velocidad de Onda de Corte Vs30	Radio de Influencia			
Nº								Fuentes Falla	Fuentes Área	Modelos de Atenuación
1	ZMG-01	Tlajomulco	20.3737	-103.3956	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM	
2	ZMG-02	Tlajomulco	20.4648	-103.4905	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
3	ZMG-03	Tlajomulco	20.464	-103.3947	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
4	ZMG-04	Tlajomulco	20.4631	-103.2988	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
5	ZMG-05	Tlajomulco	20.556	-103.5855	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
6	ZMG-06	Tlajomulco	20.5552	-103.4896	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
7	ZMG-07	Tlajomulco	20.5543	-103.3937	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
8	ZMG-08	El Salto	20.5534	-103.2978	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
9	ZMG-09	Tonalá	20.5525	-103.2019	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
10	ZMG-10	Zapopan	20.6463	-103.5847	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM	
11	ZMG-11	Zapopan	20.6455	-103.4887	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM	
12	ZMG-12	Guadalajara	20.6446	-103.3928	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
13	ZMG-13	Guadalajara- Tlaquepaque	20.6437	-103.2968	Firme	760 m/s	500 km JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MV2		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010	
14	ZMG-14	Tonalá	20.6427	-103.2009	Firme	760 m/s	500 km	500 km JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB1, BC-1, N		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
15	ZMG-15	Zapopan	20.7367	-103.5838	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
16	ZMG-16	Zapopan	20.7358	-103.4879	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
17	ZMG-17	Zapopan	20.735	-103.3918	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
18	ZMG-18	Guadalajara	20.734	-103.2958	Firme	760 m/s	500 km	A JAL, COL, MI-CO, MI-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
19	ZMG-19	Zapopan	20.827	-103.583	Firme	760 m/s	500 km	500 km JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, 8 MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, B6		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
20	ZMG-20	Zapopan	20.8262	-103.487	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
21	ZMG-21	Zapopan	20.8253	-103.3909	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM,BAR	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
22	ZMG-22	Zapopan	20.9173	-103.5822	Firme	760 m/s	500 km	0 km JAL, COL, MI-CO, IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, MI, PE, GRO-C BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM, BAR		YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
23	ZMG-23	Zapopan	20.9165	-103.4860	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1,NAM,BAR	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010
24	ZMG-24	Zapopan	20.9156	-103.3899	Firme	760 m/s	500 km	JAL, COL, MI-CO, MI, PE, GRO-C	IN1-C, IN1-B, IN1-A, RIV3, SUB1, MVB, BB, RIV1, RIV2, SUB2, BC-1, NAM, BAR	YOU-1997, GA-2005, ARR-2010

En las figuras 4.7 a 4.12, se muestran los Espectros de Peligro Uniforme, obtenidos mediante el análisis de peligro sísmico, realizado para los puntos: ZMG-01, ZMG-08, ZMG-09, ZMG-12, ZMG-13 y ZMG-17. Como una muestra representativa de cada uno de los municipios que constituyen a la Zona Metropolitana de Guadalajara. Los 24 EPU de la malla, se pueden consultar dentro del apéndice C.



Figura 4.7. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-01, ubicado en el municipio de Tlajomulco.



Figura 4.8. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-08, ubicado en el municipio de El Salto.



Figura 4.9. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-09, ubicado en el municipio de Tonalá.



Figura 4.10. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-12, correspondiente al municipio de Guadalajara.



Figura 4.11. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenidos para el punto ZMG-13, correspondiente al límite entre los municipios de Tlaquepaque y Guadalajara.



Figura 4.12. EPUs promedio de las tres relaciones de atenuación, obtenido para el punto ZMG-17, correspondiente al municipio de Zapopan.

Las aceleraciones máximas para todo los EPU, se ubican en los períodos bajos (0s a 0.5s), ya que se obtuvieron para terreno firme o roca, donde aproximadamente este tipo de suelo corresponde a períodos menores a 0.5 segundos.

Con estos EPU obtenidos se observa que el punto ZMG-01 (figura 4.7), es donde se tienen mayores aceleraciones espectrales. Este punto se encuentra en Tlajomulco, y es el más cercano a las costas de Colima y de Jalisco. Por lo que, es muy probable que ese sea el motivo de las ordenadas de pseudoaceleración de mayor amplitud.

En el EPU obtenido para el punto ZMG-17 en Zapopan (figura 4.12), las aceleraciones espectrales son menores que los demás puntos mostrados, ya que se encuentra más alejado a la costa, siendo el caso contrario al punto ZMG-01 (figura 4.7). Para elegir que período de retorno (Tr) asignarle a las estructuras tipo B, en el municipio de Zapopan, sería importante considerar que en el año de 1875 (ver tabla 1.1), ocurrió uno de los sismos con mayor intensidad, en San Cristóbal de la Barranca, municipio muy cercano a Zapopan.

En las figuras 4.13 y 4.14, se muestran las contribuciones que cada falla aporta, al peligro sísmico de los puntos ZMG-01 y ZMG-17 para un período de 0.3 segundos. Se muestran estos dos puntos ya que son los que presentaron aceleraciones mayores y menores respectivamente, de los 6 puntos antes mencionados.







Figura 4.14. Curvas de peligro por fuente sísmica para el punto ZMG-17, para un Ts = 0.3 s.

En ambos casos se aprecia que las fallas que aportan un mayor peligro, son las fallas interplaca del Gap de Colima y de Jalisco y la falla tipo área IN1-A; siendo los eventos de subducción los más importantes a considerar para este análisis. La figura 4.15, muestra la recurrencia anual de las fuentes sísmicas usadas para un r=500 km y la magnitud de momento que pueden tener los eventos causados por estas fallas.



Figura 4.15. Recurrencia de las fuentes sísmicas utilizadas para un r=500 km.

4.3. Desagregación del peligro sísmico

La desagregación del peligro sísmico, es una manera efectiva de identificar diferentes escenarios de eventos (expresados en términos de distancia – magnitud), que contribuyen al peligro sísmico de un sitio. El escenario de la contribución de los eventos al peligro sísmico de un sitio, C (M, R), puede ser obtenido mediante la determinación de la distancia a la fuente (r) desde el sitio, (Filiatrault *et al.*, 1998). Este proceso muestra la contribución a la frecuencia anual de excedencia de acuerdo a la magnitud, distancia y parámetros de desviación estándar de las relaciones de atenuación. Si el valor de aceleración ocurre en el lugar de interés para la evaluación de la amenaza, ciertas magnitudes, distancias y valores de desviación contribuyen a dicha aceleración más que otros. El proceso de desagregación muestra estas contribuciones relativas. Es posible analizar la variación de tres parámetros magnitud, distancia y densidad de probabilidad (Kramer, 1996).

Se realizó la desagregación del peligro sísmico para cada uno de los 24 puntos de la malla, para las tres relaciones de atenuación promedio, para un r=500 km, para un período de retorno Tr=475 años, ya que es el período de retorno asociado a un espectro de diseño básico para estructuras tipo B. Se consideraron períodos de vibración de 0.2 s, 0.75 s y 2.0 s. Se eligieron estos períodos por el número de niveles que tienen aproximadamente la mayoría de las edificaciones que se encuentran en la ZMG.

En las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se muestran los resultados de la desagregación con los parámetros mencionados en el párrafo anterior, para los puntos ZMG-01, ZMG-12 y ZMG-17, respectivamente. Se muestra la desagregación de estos tres puntos debido a que son los que tienen valores de aceleraciones espectrales, mayores, medios y menores respecto a los demás puntos analizados.



Figura 4.16. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-01, para períodos 0.2s, 0.75s y 2s.



Figura 4.17. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-12, para períodos 0.2s, 0.75s y 2s.



Figura 4.18. Desagregación del peligro sísmico (M y R) para el punto ZMG-17, para períodos 0.2s, 0.75s y 2s.

Se observa una magnitud promedio de 8.4 a 8.7. Las distancias promedio que arrojan para los tres puntos son diferentes por la localización en la que se encuentran. Por el tipo de magnitud que indica, y las distancias promedio. Las fuentes sísmicas que están ocasionando un mayor peligro a la ZMG, son las de las costas de Jalisco y de Colima. Estos resultados sirvieron para corroborar lo que se había observado en las curvas de peligro por fuente sísmica. En todos los puntos de la malla se observaron resultados muy similares a estos, por lo que estas características particulares producto de la desagregación, nos ayudaron, en la búsqueda de acelerogramas en el siguiente capítulo.

5 Espectros de Peligro Uniforme (EPU) con efectos locales

5.1. Acelerogramas existentes en la zona de estudio

La desagregación del peligro sísmico obtenida en el capítulo 4, nos sirvió como parámetro para la búsqueda de acelerogramas, que estos a su vez, nos ayudarán a obtener la amplificación de los efectos locales, de las ondas de cuerpo del suelo de la zona estudiada. La investigación se realizó en la Base Mexicana de Sismos Fuertes (BMSF) volumen 2. La cual tiene todos los acelerogramas registrados en la República Mexicana desde el año, 1960 a 1999. Los acelerogramas que se revisaron fueron los registrados por la Red Acelerográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara (RAZGM), mencionada en el capítulo 3. También se encontraron registros, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (I de I UNAM), para registros de la ZMG en los años del 2012 al 2015. En las tablas 5.1 y 5.2 se pueden observar respectivamente la base de datos de cada una de estas búsquedas.

Tabla 5.1. Registros sísmicos para la Zona Metropolitana de Guadalajara, del sismo del 09 de octubrede 1995. Fuente: Base Mexicana de Sismos Fuertes vol. 2.

Fecha Sismo	Hora Sismo (UTC)	Magnitud	Institución	Entidad	Clave Estación	Nombre Estación	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 1 (N90W)	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 2 (V)	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 3 (N00W)
09/10/1995	15:36:33	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	ARCS	ARCOS	24.35	12.21	20.78
09/10/1995	15:36:31	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	C1CI	CICEJ SUPERFICIE	84.69	11.09	19.13
09/10/1995	03:36:30	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	C2CI	CICEJ POZO 9M	17.12	9.43	18
09/10/1995	15:36:31	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	C3CI	CICEJ POZO 35M	6.46	5.96	6.96
09/10/1995	15:36:34	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	CGRA	CIUDAD GRANJA	16.33	11.01	16.39
09/10/1995	15:36:31	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	JARS	JARDINES DEL SUR	23.69	12.82	23.91
09/10/1995	15:36:35	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	MIRV	MIRAVALLE	7.41	7.7	6.91
09/10/1995	15:36:38	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	OBLA	OBLATOS	7.88	5.96	9.34

Fecha Sismo	Hora Sismo (UTC)	Magnitud	Institución	Entidad	Clave Estación	Nombre Estación	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 1 (N90W)	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 2 (V)	Aceleración máx (cm/s**2) Canal 3 (N00W)
09/10/1995	15:36:38	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	OBLA	OBLATOS	7.88	5.96	9.34
09/10/1995	15:36:38	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	OPZA	OBRAS PÚBLICAS ZAPOPAN	20.5	10.92	19.38
09/10/1995	15:36:34	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	PLAN	PLANETARIO	5.67	6.86	8.6
09/10/1995	15:36:34	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	ROTO	ROTONDA	17.39	9.02	17.23
09/10/1995	15:36:42	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	SNRA	SAN RAFAEL	5.86	5.83	6.92
09/10/1995	15:36:38	Mb=6.5/Ms= 7.3/Mc=7.5	I de I- GUAD	JAL	TONA	TONALÁ	7.33	6.74	5.51

Tabla 5.2. Registros sísmicos para la Zona Metropolitana de Guadalajara del 2012 al 2015. F	uente: I de
I UNAM.	

Fecha Sismo	Hora Sismo (UTC)	Magnitud	Institución	Entidad	Clave Estación	Nombre Estación	Aceleración máx (cm/s**2)
11/04/2012	22:55:10	M= 6.4	I de I-UNAM	JAL	GDLC	COLEGIO CERVANTES	7.18
22/04/2013	01:16:34	M= 5.8	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	1.79
18/04/2014	14:27:23	M= 7.2	I de I-UNAM	JAL	GDLC	COLEGIO CERVANTES	7.21
18/04/2014	14:27:23	M= 7.2	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	8.49
15/12/2015	16:09:23	M= 4.4	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	31.58
15/12/2015	16:32:35	M= 3.6	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	4.05
15/12/2015	17:49:48	M= 3.9	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	14.81
15/12/2015	16:09:23	M= 4.4	I de I-UNAM	JAL	GDLC	COLEGIO CERVANTES	15.55
15/12/2015	17:49:48	M= 3.9	I de I-UNAM	JAL	GDLC	COLEGIO CERVANTES	6.7
17/12/2015	07:59:12	M= 4.1	I de I-UNAM	JAL	GDLC	COLEGIO CERVANTES	7.25
17/12/2015	07:59:12	M= 4.1	I de I-UNAM	JAL	GDLP	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	17.28

Se procesaron todos los datos, para las tres componentes (vertical, horizontal N-S, horizontal E-O) y se corrigieron por línea base con el programa de computo SeismoSignal, 2016, con un filtro tipo Butterworth con una frecuencia baja de 0.10 hz y una frecuencia alta de 25 hz, para obtener espectros de respuesta con 5% de amortiguamiento. En el
apéndice D, se pueden consultar los espectros de respuesta de los acelerogramas, de las tablas 5.1 y 5.2.

Las características que se tomaron en cuenta para elegir un registro, fueron las siguientes:

- Acelerogramas registrados en alguna estación acelerográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara.
- Registros de sismos con magnitud > 7.
- Acelerogramas de sismos ocurridos en la costa del pacífico, con características similares, al sismo de 1932.
- Acelerogramas registrados en terreno firme o roca.

La instrumentación sísmica de la ciudad de Guadalajara es escasa, pero se tomó la decisión de utilizar el registro de la estación: CICEJ Pozo 35m, del sismo 9 de octubre de 1995, el cual reunió con todas las características deseadas. En la figura 5.1 se muestran los acelerogramas registrados en tres canales.



CAPÍTULO 5



Figura 5.1. Acelerogramas elegidos, registrados en tres diferentes componentes: horizontal N-S (5.1.a), vertical (5.1.b) y horizontal E-O (5.1.c).

En la figura 5.2, se muestran los espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento de los acelerogramas mostrados en la figura 5.1. La característica principal de la estación, es que se encuentra en un pozo a 35 m bajo el Colegio de Ingenieros del Estado de Jalisco, esto para obtener un registro en roca. También se puede observar que la señal en los tres registros es muy semejante, aunque para este estudio solo se trabajó con el sentido horizontal.



Figura 5.2. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "CICEJ Pozo 35m" para los tres canales registrados.

También se muestra en la figura 5.3 los espectros de respuesta obtenidos para los acelerogramas registrados en la estación ARCOS, del sismo 9 de octubre de 1995 en Manzanillo, Colima. Esta estación es la que cuenta con el registro de mayor aceleración de la base de datos usados en este estudio (tabla 5.1 y 5.2).



Figura 5.3. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Arcos", en arenas jalosas.

5.2. Interpolación de EPU

Para obtener espectros de sitio, son necesarias las aceleraciones espectrales en terreno firme de un punto en específico, en este caso para los puntos de los perfiles de suelo (perfil de velocidad de onda de corte hasta el terreno firme) (tabla 3.1).

En la tabla 5.3 se presentan los 18 sitios estudiados para determinar sus Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme, utilizando el Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), de Shepard (1968).

Número	Ubicación	Municipio	Latitud	Longitud	Número	Ubicación	Municipio	Latitud	Longitud
1	Catedral de Guadalajara	Guadalajara	20.677	-103.347	10	Colomos y Manuel M. Dieguez	Guadalajara	20.692	-103.371
2	Antigua Biblioteca Pública (Agua Azul)	Guadalajara	20.662	-103.350	11	Eulogio Parra y Pablo Casals	Guadalajara	20.688	-103.390
3	Registro Civil No.1	Guadalajara	20.691	-103.348	12	Pablo Neruda y Paseo Jacarandas	Guadalajara	20.692	-103.408
4	Fco. Javier Gamboa y Lerdo de Tejada	Guadalajara	20.671	-103.377	13	Punto Sao Paulo, Prol. Av. Américas y Sao Paulo	Guadalajara	20.702	-103.376
5	Hotel Riu Plaza, López Mateos y Lázaro Cárdenas	Guadalajara	20.666	-103.394	14	Patria y Eva Briseño	Zapopan	20.711	-103.394
б	Centro comercial, La Gran Plaza	Zapopan	20.674	-103.405	15	Patria y Paseo Royal Country	Zapopan	20.706	-103.414
7	Patria y Guadalupe	Zapopan	20.662	-103.424	16	Paseo Valle Real y Federalistas	Zapopan	20.721	-103.436
8	Universidad Panamericana, campus Gdl, Cd. Granja	Zapopan	20.681	-103.443	17	Periferico y Laureles	Zapopan	20.739	-103.405
9	López Mateos y Mariano Otero	Zapopan	20.647	-103.405	18	Nueva Biblioteca Pública, Periférico y Parres Arias	Zapopan	20.738	-103.381

Tabla 5.3. Puntos de estudio para la interpolación de EPUs.

Se realizó una interpolación para cada punto, para cuatro períodos de retorno, 100 años, representando aceleraciones para estructuras tipo C. 475 años, para estructuras tipo B. 975 años para estructuras tipo A, y 2475 años para estructuras especiales (estructuras de mayor importancia). En la figura 5.4, se muestra la localización del punto 1, "Catedral de Guadalajara", respecto a los EPU de la malla.

ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME CON EFECTOS LOCALES



Figura 5.4. Localización del punto 1 respecto a los puntos cercanos de la malla de interpolación.

Con el método de Ponderación de Distancia Inversa (método detallado en el apéndice E), se obtuvieron los EPU de este punto, para los cuatro períodos de retorno descritos en el párrafo anterior, estos se muestran en la figura 5.5. En el apéndice E, se puede consultar cada EPU (IDW), de cada punto analizado, para cada período de retorno y/o probabilidad de excedencias usadas.





CAPÍTULO 5

Otro punto que se muestra es el número 10, Colomos y Manuel M. Diéguez, esta ubicación es la más cercana a la estación que registró el sismo utilizado para este análisis. La localización respecto a los EPU de la malla de interpolación se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6. Localización del punto 10 a los puntos cercanos de la malla de interpolación.

En la figura 5.7, se observa a detalle las aceleraciones espectrales de los EPU (IDW), del punto número 10 en terreno firme.





5.3. Espectros con efectos de sitio

Las características esfuerzo-deformación de los suelos son, no-lineales y en algunos casos, pueden influenciar en la respuesta dinámica de un sitio cuando éste es sometido a movimientos sísmicos intensos. La naturaleza de los efectos locales puede estimarse de diferentes maneras, una de éstas consiste en proponer modelos del suelo y por medio de análisis teóricos, determinar parámetros de amplificación. También se pueden hacer comparaciones entre mediciones registradas en puntos con diferentes condiciones, o bien la estimación de amplificación puede basarse en las mediciones simultáneas en la superficie y en algún punto dentro del subsuelo (Gómez-Bernal *et al.*, 2007).

5.3.1. Funciones de Transferencia

Una función de transferencia es la relación de amplificación que hay entre la base (terreno firme o roca) y la superficie libre. Para determinar funciones de transferencia de nuestros suelos, se requieren ecuaciones de onda, que puedan obtener la amplificación entre 2 estratos, sus deformaciones y aceleraciones (Gómez-Bernal *et al.*, 2007).

Para esta investigación, se desea obtener la respuesta del suelo suponiendo propagación de onda de cortante, unidimensional en la dirección vertical, para lo cual existen diferentes estrategias, entre las cuales resaltan los métodos lineal, lineal-equivalente, y no lineal, donde por medio de los dos últimos es posible tomar en cuenta el comportamiento no lineal del depósito de suelo.

En este trabajo, se determina la función de transferencia con el método lineal equivalente, mediante el programa de cómputo de libre acceso, SHAKE-91_input (Idris y Sun, 1992), versión 2013.

El método lineal equivalente, puede tener una aproximación muy buena de los efectos no lineales del suelo en la respuesta, llevando a cabo una secuencia de análisis lineales, que consideran valores constantes del módulo de rigidez de la relación de amortiguamiento.

Para obtener la amplificación del suelo, se modelaron las siguientes características de los 18 perfiles de suelo (tabla 3.1): velocidad de onda de corte, peso volumétrico y amortiguamiento de cada estrato. También es necesario proporcionar para cada capa de depósito del suelo, las curvas de degradación del módulo de cortante G. En este estudio se utilizaron las curvas generales (arena, arcillas y roca) del programa SHAKE-91, debido a que la información geotécnica del suelo que se tiene de la ZMG fue insuficiente, para modificar estas curvas. En la figura 5.8 se muestra un ejemplo de un perfil de Vs del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", que fue introducido al SHAKE-91_input.



Figura 5.8. Perfil de suelo del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", modelado en SHAKE-91_input.

5.3.1. Ajuste de Acelerogramas

Después de modelar los estratos del suelo, se debe aplicar un movimiento o excitación en la base del depósito del suelo, en este caso el terreno firme (Vs>760m/s²). El acelerograma que se usará es el antes mencionado en las figuras 5.1 y 5.2, registrado en la estación CICEJ Pozo 35m, con aceleraciones máximas de 6.46, 5.96 y 6.96 cm/s², para los canales N90W, V y N00W, respectivamente. Como se puede observar las aceleraciones son muy pequeñas por lo que la señal se deberá escalar al EPU, de cada punto.

Para este estudio se realizaron dos técnicas de ajustes de espectros y se compararon, para decidir, cuál era el más apropiado para este análisis. El primero método fue la técnica de Ajuste de Espectros (Spectral Match), el cual implica modificar el contenido de las frecuencias de los registros sísmicos utilizados (inicial) o registros semilla, hasta que logren empatar con el espectro deseado (objetivo) teniendo así un espectro y/o acelerograma ajustado. Esta metodología se desarrolló por Al Atik y Abrahamson (2010), la cual se implementó en el programa de computo RspMatch 2009 (Inca, 2013). En este estudio se utilizó el apartado de Spectral Matching del programa EZ-FRISKv7.65, donde se incluye la metodología mencionada en el párrafo anterior. En la figura 5.9 (a), se muestra el

acelerograma semilla de la estación CICEJ Pozo 35m en el sentido E-O, y en la figura 5.8 (b) el acelerograma después del ajuste.



Figura 5.9. Acelerograma semilla (a) y acelerograma ajustado a EPU-10 con spectral matching (b).

En la figura 5.10 se muestra el espectro elástico ajustado al EPU-10, para un Tr= 475 años, llamado espectro objetivo, con el espectro inicial del acelerograma semilla.





CAPÍTULO 5

El otro método utilizado, es el de escalamiento por amplitud, mucho más simple que realizar un spectral match. El método consiste en un escalamiento lineal, que implica utilizar un factor de escala en el registro inicial, para que el espectro de respuesta del registro, tenga la misma aceleración que el EPU objetivo. En este caso el acelerograma inicial se ajustó a la aceleración en el período cero del EPU objetivo. Como ejemplo, para el EPU-10 se tiene una aceleración de 0.178 g (aceleración deseada), en el período cero. Por lo que el acelerograma se deberá multiplicar por un factor de 26.157, para llegar a la aceleración deseada. En la figura 5.11 (a), se observa el acelerograma inicial registrado en la estación CICEJ Pozo 35m sentido E-0, y en la figura 5.11 (b), se encuentra este acelerograma ajustado por el factor de 26.157.



Figura 5.11. Acelerograma inicial (a) y acelerograma ajustado por un factor (b).

En la figura 5.12, se puede observar el ajuste de los espectros de los registros anteriormente mostrados con la técnica de amplitud, donde lo que se cuida en esta técnica es ajustar la aceleración y no las frecuencias.



Figura 5.12. Espectro de respuesta ajustado por un factor de escalamiento.

Se utilizaron los dos registros (E-O y N-S) para realizar el análisis del método lineal equivalente, obtener una función de transferencia y por ende un EPU en la superficie o espectro de sitio elástico.

En la figura 5.13 se observa una comparación entre las dos funciones transferencia, obtenidas por los dos métodos de escalamiento usados para un período de retorno de 475 años, para el perfil de suelo del punto 10, Colomos y Manuel M. Diéguez.





CAPÍTULO 5

Como se puede observar son muy parecidas las dos funciones. El primer modo se encuentra en el período del suelo, que en este caso es de 0.37 s, o una frecuencia de 2.70 hz y en ambos casos el primer modo tiene una amplificación aproximada de 4. Esto quiere decir, que la respuesta que hay en la roca (EPU), se amplificará 4 veces en la superficie, debido a las características geofísicas del subsuelo en cuestión. En la figura 5.14 se observa una comparación de los EPU con efectos de sitio. En esta figura, un espectro se obtiene con el acelerograma ajustado con la técnica spectral matching y se filtra directamente a la superficie. El otro espectro mostrado es el ajustado linealmente por un factor, y la función de transferencia producto de esta filtración que fue mostrado en la figura 5.13 con una línea punteada azul, es multiplicada por el EPU (IDW) interpolado para terreno firme de este punto, ambos para un período de retorno Tr=475 años.



Figura 5.14. Comparación de EPU en la superficie, por ambas técnicas de escalamiento usadas.

Se puede apreciar que los resultados son aproximadamente parecidos, pero en el ajuste de espectro que se hizo por la técnica spectral matching, se observa que es ligeramente menor la respuesta, debido a que en esta técnica lo que se cuida es el contenido de frecuencias de una manera mayor que las aceleraciones, por lo que existe una pequeña perdida de datos, que incluso es visible desde la figura 5.10.

Gracias a este caso de estudio se llegó a la conclusión de usar para los 18 perfiles de suelo que se tienen de la ZMG, el segundo método de escalamiento por amplitud. Usando para todos los casos el acelerograma registrado en la estación CICEJ Pozo 35m, en las dos componentes horizontales N-S y E-O. Obteniendo funciones de transferencia diferentes para cada EPU, con diferentes períodos de retorno, y multiplicando directamente esta función con el EPU (IDW) en terreno firme. En la figura 5.15 se muestran los espectros de

sitio o los EPU con efectos de sitio para el punto 10 de Colomos y Manuel M. Diéguez, con la técnica de escalamiento elegida, para períodos de retorno de 100, 475, 975 y 2475 años, en el sentido E-O. Y en la figura 5.16 se muestran los mismos espectros que en la figura 5.14 pero en el sentido N-S. Ambos casos muestran espectros elásticos completamente "transparentes" y sin ninguna reducción. En el apéndice F se pueden consultar los Espectros de Peligro Uniforme en la superficie, elásticos para los 18 puntos analizados en los dos sentidos del registro. En el capítulo 6, se realizará una serie de comparaciones con algunos de los EPU de este apéndice.



Figura 5.15. EPUs elásticos en la superficie para el perfil de "Colomos y Manuel M. Diéguez", registrados en la dirección E-O.



Figura 5.16. EPUs elásticos en la superficie para el perfil de "Colomos y Manuel M. Diéguez", registrados en la dirección N-S.

6 Análisis comparativo con espectros de diseño

6.1. Análisis de la reglamentación para la ZMG

Se analizó la reglamentación actual y anterior de la ciudad de Guadalajara, y la del municipio de Zapopan ya que se realizará una serie de comparaciones con los EPU obtenidos en este estudio con la normativa vigente de los municipios.

- Reglamento de Construcciones y de los Servicios Urbanos para el Municipio de Guadalajara, 1947.
 - El reglamento del 47, se basó principalmente en el reglamento del RCDF-42
 - Se incluyen combinaciones de cargas con sismo.
 - No contiene algún coeficiente sísmico, ni espectros de diseño, y ningún apartado de normas técnicas en sismo.
- Reglamento de Construcciones para el Municipio de Guadalajara, 1969.
 - Se basa en el RCDF-66.
 - De igual forma que el reglamento del 47, no se incluye un apartado con normas técnicas para sismo, por lo tanto no se mencionan coeficientes sísmicos, ni espectros de diseño.
- Reglamento de Construcciones para el Municipio de Guadalajara, 1988.
 - Se incluye un apartado de normas técnicas por sismo, donde se incluye un coeficiente símico de pseudoaceleración de c=0.24 g, para estructuras de tipo B.

6.1.2. Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara (ROMG), 1997

Normas Técnicas Complementarias de Guadalajara, Diseño por Sismo, 1997

Las Normas Técnicas Complementarias de Guadalajara de 1997, es la reglamentación vigente en esta ciudad que establece, los efectos sísmicos mínimos que se deben de considerar para el diseño, construcción, reparación y refuerzo de las construcciones. Los procedimientos y limitaciones para el diseño de estructuras son determinados mediante las características del sitio, ocupación, configuración, sistema estructural y altura.

Espectros para diseño sísmico

Cuando se aplique un análisis dinámico modal en las estructuras es necesario calcular la ordenada del espectro de pseudoaceleraciones para diseño sísmico, Sa, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, por:

Sa=(1+1.5T/Ta)*c/2.5	para T < Ta
Sa=c	para $T \le T \le Tb$
Sa=c*(Tb/T) ^r	para T > Tb

Donde T es el período natural. T, Ta y Tb están expresados en segundos, c es el coeficiente sísmico, y r un exponente del tipo de suelo en que se halla la estructura. Los valores Ta, Tb y r dependen de las características del suelo del sitio. Los valores se pueden obtener de la tabla 6.1:

Tabla 6.1. Valores de Ta, Tb y r para diferentes tipos de suelos, (Normas Técnicas Complementarias
de Guadalajara, 1997).

Tipo de Suelo	Та	Tb	r
Ι	0.15	0.50	2/3
II	0.15	0.80	2/3
III	0.20	1.10	2/3

Donde los tipos de suelos se clasifican de la siguiente forma:

 A) Roca o material similar caracterizado por una velocidad de propagación de ondas de corte mayor que 700 metros por segundo.

B) Suelos medio-densos a densos o medio-rígidos a rígidos, con profundidad a la roca menor que 50 metros, caracterizado por una velocidad de propagación de ondas de corte entre 400 y 700 metros por segundo.

 II) A) Un perfil de suelo predominante medio-denso a denso o medio-rígido a rígido, con profundidad mayor que 50 metros, caracterizado por una velocidad de propagación de ondas de corte entre 400 y 700 metros por segundo.

B) Suelos medio-densos con profundidad mayor que 8 metros y menor que 35 metros, caracterizado por una velocidad de propagación de ondas de corte entre 150 y 400 metros por segundo.

 III) A) Suelos granulares poco densos o poco rígidos
B) Un perfil de suelo que contenga más de 6 metros de arcilla blanda a mediarígida pero no más de 12 metros de arcilla blanda.

El coeficiente sísmico para estructuras tipo B se toma igual a c=0.36; para las estructuras del subgrupo A1 y del subgrupo A2 se incrementa en un 50% el coeficiente sísmico, quedando como c=0.54; y para las estructuras del subgrupo A3 se incrementara en 30%, utilizando entonces un c=0.468. Para fines de diseño las fuerzas sísmicas se podrán reducir dividiéndolas por un factor reductivo Q'.

Q'=Qpara $T \ge Ta$ o si se desconoce TQ'= 1+ (T / Ta) (Q-1)para T < Ta</td>

ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESPECTROS DE DISEÑO

Si en el diseño existen irregularidades verticales se multiplicará por 0.8 el valor de Q', excepto cuando también existen irregularidades horizontales en cuyo caso Q' se multiplicara por 0.75. Se realizó una serie de comparaciones con este reglamento, y con los EPU en terreno firme y espectros de sitio obtenidos en este trabajo, para los puntos de la Catedral de Guadalajara (Latitud: 20.677, Longitud: -103.347), y Colomos y Manuel M. Diéguez (Latitud: 20.692, Longitud -103.371), ambos ubicados en el municipio de Guadalajara. Los EPU en terreno firme y en superficie (filtrados), para ejemplificarlos como un espectro de diseño, se les aplicó una meseta y fueron afectados por un factor de sobrerresistencia de 2, ya que la comparación se hará con espectros de diseño, que aunque estos últimos se obtengan sin un Q', eso no nos indica que son totalmente "transparentes". En las figuras 6.1 y 6.2 se muestran las comparaciones realizadas de los EPU en superficie o filtrados y en terreno firme, respectivamente, para estructuras de tipo "Especiales", "A" y "B" del punto 1, "Catedral de Guadalajara", con los espectros de diseño del ROMG, 1997 para estructuras de tipo "A3", "A1 y A2" y "B", de terrenos tipo I y II que son equiparables a los EPU en terreno firme y en la superficie de la "Catedral de Guadalajara", respectivamente. Los EPU en superficie son en sentido N-S (el registro mayor).



Figura 6.1. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 1, "Catedral de Guadalajara".



Figura 6.2. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 1, "Catedral de Guadalajara".

Como se observan en las figuras 6.1 y 6.2, las aceleraciones de la reglamentación del municipio de Guadalajara son las mismas para cada tipo de estructuras, variando solo la meseta, dependiendo el tipo de terreno. Quedando por debajo los resultados obtenidos de los EPU para terreno firme y por arriba los de la superficie o filtrados. Cabe notar que para el EPU con efectos de sitio de Tr=2475 años de la figura 6.1, su respuesta comienza a reducirse en vez de amplificarse, ya que la no linealidad del suelo provoca esta reducción en este punto. Es importante tener en cuenta estas reducciones para una propuesta futura del Reglamento de este Municipio.

En las figuras 6.3 y 6.4, se puede observar una segunda comparación que se realizó con el Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara, 1997, contra el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", para los mismos tipos de estructuras y suelos que en el punto anterior, ya que las características geotécnicas de la superficie de este punto son equiparables con las características de los suelos tipo II que describe el ROMG, 1997, para la figura 6.4. Se puede apreciar en estas comparaciones, que al igual que la comparación realizada para la "Catedral de Guadalajara", los espectros de diseño quedan por debajo de los EPUs, con efecto de sitio, y por arriba de los EPUs en terreno firme, dejando en claro que el ROMG, 1997, no se tomaron en cuenta los efectos de sitio de la ciudad de Guadalajara.



Figura 6.3. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez".



Figura 6.4. Comparación de espectros de diseño del ROMG, 1997, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez"

6.2. Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan (RCDUMZ), 2003

Se analizó, la reglamentación por sismo vigente del municipio de Zapopan, el cual incluye las mismas especificaciones que el ROMG, 1997. Estas especificaciones se ilustran en el **artículo 111** del cuerpo principal, que nos indica lo siguiente:

El coeficiente sísmico, C, es el cociente de la fuerza cortante horizontal que debe considerarse, que actúa en la base de la construcción por efecto del sismo, entre el peso de éste sobre dicho nivel. El coeficiente sísmico para las construcciones clasificadas como del grupo B en el artículo 73 se tomara igual a 0.36, a menos que se emplee el método simplificado de análisis, en cuyo caso se aplicaran los coeficientes que fijen las "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo". Para las estructuras del subgrupo A1 y del subgrupo A2 se incrementa un 50% el coeficiente sísmico, quedando c=0.54, y para las estructuras del subgrupo A3 se incrementara en 30%. Para calcular la ordenada SA, se utilizan las especificaciones descritas en el apartado 6.1.2, de este capítulo.

Se realizaron algunas comparaciones con los Espectros de diseño del RCDUMZ, 2003, para estructuras tipo "A3", "A1 y A2" y "B", de terreno tipo I y los EPU en terreno firme y en superficie para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas" (Latitud: 20.7209, Longitud: -103.4361), para estructuras tipo "Especiales", "A" y "B". En esta comparación los EPU en superficie pertenecen al terreno tipo I, del reglamento de Guadalajara y Zapopan. En las figuras 6.5 y 6.6 se muestran estas comparaciones.

6.3. PRODISIS, Manual de Obras Civiles de la CFE, 2015

Se utilizó el programa de computo PRODISISv4.1, realizado por el Manual de Obras Civiles de la CFE (CFE, 2015), para obtener Espectros de Peligro Uniforme en suelo firme o roca. Las coordenadas con las que se alimentó al programa, fueron las de los puntos, Catedral de Guadalajara (Latitud: 20.677, Longitud: -103.347), Colomos y Manuel M. Diéguez (Latitud: 20.692, Longitud -103.371) y Paseo Valle Real y Federalistas (Latitud: 20.7209, Longitud: -103.4361). Se obtuvieron espectros para períodos de retorno de 100 años, 475 años, 975 años, 2475 años, para cada uno de estos puntos. Los parámetros sísmicos, varían para cada punto y para cada período de retorno, por lo que los espectros que se obtengan con este programa de cómputo, serán directamente comparados, con los EPU en terreno firme o roca obtenidos en esta investigación para los mismos períodos de retorno. A ninguno de los EPU se les aplicó alguna sobrerresistencia ni una meseta ya que los resultados que arroja el PRODISISv4.1, son "transparentes", y no modificados.

En las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran las comparaciones de los EPU en terreno firme de la "Catedral de Guadalajara", "Colomos y Manuel M. Diéguez" y "Paseo Valle Real" y Federalistas, respectivamente, contra los obtenidos en PRODISISv4.1. Donde es posible

notar que los EPU en roca obtenidos en PRODISIS, son menores que los conseguidos en este estudio. A pesar que en las recomendaciones del MDOC 2015, se indica que los espectros de respuesta en roca para un período de retorno específico, son espectros realizados con un enfoque probabilista, la diferencia de las ordenadas espectrales podría darse, en la metodología y/o criterios utilizados en la obtención de estos EPU.



Figura 6.5. Comparación de Espectros de diseño del RCDUMZ, 2003, con los EPU obtenidos en superficie (filtrados) del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas".



Figura 6.6. Comparación de Espectros de diseño del RCDUMZ, 2003, con los EPU obtenidos en terreno firme del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas".



Figura 6.7. Comparación de los EPU del punto 1, "Catedral de Guadalajara", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas.



Figura 6.8. Comparación de los EPU del punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas.



Figura 6.9. Comparación de los EPU del punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", contra los EPU obtenidos en PRODISISv4.1, para las mismas coordenadas.

6.4. Resumen de resultados de las comparaciones

En el siguiente apartado se muestra un resumen de resultados de las comparaciones realizadas en los apartados 6.1, 6.2 y 6.3 de este capítulo. Donde se podrán observar las aceleraciones pico de terreno (PGA) de cada espectro comparado anteriormente. Es importante recalcar que las comparaciones que se realizaron con los reglamentos de Zapopan y Guadalajara fueron ejemplos, para tener una muestra de cómo sería el resultado de reducir un espectro elástico. En la tabla 6.2 se pueden notar los PGA de los EPUs reducidos de la "Catedral de Guadalajara" contra el Reglamento Orgánico Municipal de Guadalajara, 1997.

Tabla 6.2. Comparación de PGA, Catedral de Guadalajara contra el Reglamento Orgánico delMunicipio de Guadalajara, 1997.

PGA de los EPU reducidos en roca de la Catedral de Guadalajara contra ROMG, 1997				
PGA(g)	EPU	ROMG, 1997 (Terreno I)		
Tipo B	0.21	0.36		
Tipo A/A1, A2	0.26	0.54		
Tipo Especiales/A3	0.33	0.468		

PGA de los EPU reducidos en superficie de la Catedral de Guadalajara contra ROMG, 1997				
PGA(g)	EPU	ROMG, 1997 (Terreno II)		
Tipo B	0.72	0.36		
Tipo A/A1, A2	0.78	0.54		
Tipo Especiales/A3	0.71	0.468		

En la tabla 6.3 se muestran los PGA de los EPU reducidos de "Colomos y Manuel M. Diéguez" con el ROMG, 1997. Donde se puede observar que a pesar de ser muy parecidos los valores en roca con los de la "Catedral de Guadalajara", es importante tomar como referencia este punto, ya que tiene amplificaciones mayores, que los de la Catedral, debido a la amplificación de las ondas del suelo en este punto. También se pueden observar en la tabla 6.4, los PGA de Paseo Valle Real y Federalistas contra la normatividad vigente del municipio de Zapopan, RCDUMZ, 2003.

Tabla 6.3. Comparación de PGA, Colomos y Manuel M. Diéguez contra el Reglamento Orgánico delMunicipio de Guadalajara, 1997.

PGA de los EPU reducidos en roca de Colomos y Manuel M. Diéguez contra ROMG, 1997				
PGA(g)	EPU	ROMG, 1997 (Terreno I)		
Tipo B	0.21	0.36		
Tipo A/A1, A2	0.26	0.54		
Tipo Especiales/A3	0.32	0.468		
PGA de los EPU reducidos en superficie de Colomos y Manuel M. Diéguez contra ROMG, 1997				
PGA de los EPU reduci Manuel M. Diég	dos en super uez contra R	ficie de Colomos y OMG, 1997		
PGA de los EPU reduci Manuel M. Diég PGA(g)	dos en super uez contra R EPU	ficie de Colomos y OMG, 1997 ROMG, 1997 (Terreno II)		
PGA de los EPU reduci Manuel M. Diég PGA(g) Tipo B	dos en super uez contra R EPU 0.7	rficie de Colomos y OMG, 1997 ROMG, 1997 (Terreno II) 0.36		
PGA de los EPU reduci Manuel M. Diég PGA(g) Tipo B Tipo A/A1, A2	dos en super uez contra R EPU 0.7 0.92	rficie de Colomos y OMG, 1997 ROMG, 1997 (Terreno II) 0.36 0.54		

PGA de los EPU reducidos en roca de Paseo Valle Real y Federalistas contra RCDUMZ, 2003				
PGA(g)	EPU	RCDUMZ, 2003 (Terreno I)		
Tipo B	0.21	0.36		
Tipo A/A1, A2	0.26	0.54		
Tipo Especiales/A3	0.32	0.468		
PGA de los EPU reducidos en superficie de Paseo Valle Real y Federalistas contra RCDUMZ, 2003				
PGA(g) EPU RCDUMZ, 2003 (Terreno I)				
Tipo B	0.6	0.36		
Tipo A/A1, A2	0.76	0.54		
Tipo Especiales/A3	0.98	0.468		

Tabla 6.4. Comparación de PGA, Paseo Valle Real y Federalistas contra el Reglamento de
Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan, 2003.

Este punto es muy ambiguo ya que los EPU en roca y en superficie entran en la misma categoría de suelo, de los reglamentos de Guadalajara y de Zapopan. Lo ideal sería actualizar la clasificación de suelos, con base en estudios más recientes, para no encontrarse esta clase de incongruencia. En la tabla 6.5, se puede observar las aceleraciones pico del terreno, de los EPU elástico obtenidos para los tres puntos antes comparados contra el programa de computo PRODISISv4.1 de la CFE.

Tabla 6.4. Comparación de PGA, de EPU elásticos contra PRODISISv4.1.

PGA de los EPU transparentes en roca de la Catedral de Guadalajara contra PRODISIS, 2015				
PGA(g)	EPU	PRODISISv4.1		
Tr =100 años	0.24	0.10		
Tr=475 años	0.43	0.23		
Tr=975 años	0.52	0.33		
Tr=2475 años	0.66	0.53		
PGA de los EPU transparentes en roca de Colomos y Manuel M. Diéguez contra PRODISIS, 2015				
PGA(g) EPU PRODISISv4.1				
Tr=100 años	0.24	0.10		
Tr=475 años	0.42	0.23		
Tr=975 años	0.52	0.33		
Tr=2475 años	0.65	0.54		

PGA de los EPU transparentes en roca de Paseo Valle Real y Federalistas contra PRODISIS, 2015				
PGA(g)	EPU	PRODISISv4.1		
Tr=100 años	0.23	0.10		
Tr=475 años	0.42	0.23		
Tr=975 años	0.51	0.34		
Tr=2475 años	0.64	0.54		

Conclusiones y trabajos futuros

Conclusiones

- Se estudió el peligro sísmico para la Zona Metropolitana de Guadalajara, ubicada en el estado de Jalisco. Se realizó una microzonificación, mediante una malla, con intersecciones a cada 10 km, en donde cada intersección es un punto. Para cada punto se obtuvo un Espectro de Peligro Uniforme (EPU), para diferentes períodos de retorno y/o probabilidades de excedencia (ver apéndice C). Se asoció un EPU de un período de retorno específico, para el diseño de un tipo de estructura, quedando un Tr=100 años como equivalente a un espectro de diseño de estructuras de tipo "C", un Tr=475 años a las estructuras tipo "B", un Tr=975 años a las estructuras tipo "A" y las tipo "Especiales", equivalentes a un Tr=2475 años.
- Se estudió la sismicidad histórica del estado de Jalisco, la cual nos permitió establecer un panorama en la identificación de fuentes sísmicas, con base en al análisis de daños que se realizó de sismos pasados en la región.
- Se han identificado y caracterizado diferentes fuentes sísmicas que puedan generar un posible peligro sísmico a la Zona Metropolitana de Guadalajara. Se estableció un radio de influencia de 500 km, el cual nos ayudó a establecer que fuentes sísmicas quedarían dentro de este radio. Se estudiaron 13 segmentos para la zona de subducción en la costa del pacífico (Nishenko y Singh, 1987), de los cuales 6 de ellos se tomaron como relevantes para causar algún impacto en el peligro de nuestra zona de estudio. También se estudiaron 19 regiones sismogenéticas de la República Mexicana (Zúñiga *et al.*, 1997), y se tomaron en cuenta 11 áreas de fallas de las 19 estudiadas. No se encontró la localización exacta y el tamaño de las fallas locales, por lo cual no fueron incluidas en este trabajo, pero se en las áreas se incluyen algunas.
- Se eligieron 3 modelos de atenuación: Youngs *et al.* (1997), García *et al.* (2005), Arroyo *et al.* (2010).
- Se estudió la geología y topografía del sitio, donde se revisó que la ZMG se encuentra rodeada de un relieve volcánico, por lo cual, se formaron materiales

piroclásticos a lo largo del tiempo. Y gran parte de la extensión territorial de la zona la cubren rocas como andesitas, latitas de origen basáltico al igual que rocas ígneas.

- Se estudiaron 18 perfiles de suelo proporcionados por el despacho Suelo-Estructura, S.C., obtenidos por la técnica de Refracción de Microtremores (ReMi), (Louie, 2011), localizados en la parte poniente de la ZMG.
- Se obtuvieron 24 Espectros de Peligro Uniforme, para las tres relaciones de atenuación elegidas promedio, para períodos de retorno de 20 años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, que representan probabilidades de excedencia respectivamente, del 91.8%, 67.1%, 39.3%, 10%, 5%, 2% de ocurrir en 50 años (vida útil de una estructura), representados en el apéndice C. Se realizó un estudio de desagregación del peligro sísmico en términos de magnitud sísmica y distancia a la fuente, para seleccionar un acelerograma adecuado para trabajar con él y obtener espectros de sitio.
- Se realizó una búsqueda de acelerogramas del sitio, donde se encontraron 2 bases de datos importantes, la primera en la Base Mexicana de Sismos Fuertes (BMSF) volumen 2, donde se encontraron los acelerogramas registrados en el sismo del 9 de octubre de 1995, en las estaciones activas de esos años de la ZMG. La otra base de datos que se encontró y analizó fue la de los sismos registrados en los años del 2012 al 2015 por las dos estaciones activas actualmente en la zona estudiada, operadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (I de I UNAM).
- Se eligió un registro en particular con las características que se buscaban de la desagregación del peligro sísmica. El registro fue el de la estación CICEJ POZO 35m, del sismo 9 de octubre de 1995 en Manzanillo, Colima. Debido a que el registro presentaba aceleraciones muy pequeñas, se realizaron técnicas de escalamiento, para crecer los acelerogramas. La primera técnica que se probó fue el Ajuste de Espectros de Acelerogramas (Spectral Match), el cual modifica el contenido de frecuencias de los registros sísmicos hasta lograr empatar el espectro deseado, en este caso el EPU de un punto deseado, teniendo así espectros ajustados. La otra técnica utilizada y elegida para escalar el acelerograma fue por Amplitud. Esta técnica consistió en escalar linealmente el acelerograma al EPU, multiplicando por un factor dado que la aceleración máxima del acelerograma, coincidiera con la aceleración en el período cero de un EPU determinado o EPU objetivo.
- Se realizaron interpolaciones de EPU de los 18 estudios de perfil de velocidad de onda de corte (ver apéndice E), descritos en el capítulo 3, para períodos de retorno de 100, 475, 975 y 2475 años; con el Método de Ponderación de Distancia Inversa

(IDW), (Shepard, 1968), y con ayuda de los EPU ya existentes en la malla de puntos. Esta malla y la metodología de interpolación usadas en este trabajo, pueden ser implementadas, en alguna actualización del Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara, como ayuda para uso público. Como por ejemplo las metodologías ya existentes del programa de computo PRODISIS, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015) y el programa SASID de las Normas Técnicas del Distrito Federal (2017).

- Se obtuvieron 144 funciones de transferencia con el método lineal equivalente empleando el programa SHAKE-91_input (Idris y Sun, 1992). Para este estudio se utilizaron los 18 perfiles de velocidad de onda de corte del suelo del poniente de la ZMG y un acelerograma escalado linealmente al EPU interpolado de la ubicación exacta de cada uno de los perfiles.
- Con las funciones de transferencia y los EPU interpolados (IDW), se lograron obtener 144 Espectros de Peligro Uniforme en la superficie o Espectros de sitio elásticos (ver apéndice F). Los EPU con efectos de sitio se obtuvieron multiplicando la función de transferencia del punto para un Tr específico, por un EPU interpolado para el mismo período de retorno. Se obtuvieron espectros para 4 períodos de retorno: Tr=100 años, Tr=475 años, Tr=975 años y para un Tr=2475 años, para dos direcciones horizontales del registro.
- Se realizaron comparaciones para tres puntos (Catedral de Guadalajara, Colomos y Manuel M. Diéguez y Paseo Valle Real y Federalistas), de los 18 puntos obtenidos en sitio, con la normatividad vigente del municipio de Zapopan y Guadalajara (ver figuras 6.1 a 6.6). Para poder hacer una comparación directa se tomaron los espectros de los reglamentos (RCDUMZ, 2003 y ROMG, 1997), sin un factor de ductilidad reducido, y se compararon con los obtenidos de los EPU en superficie. Se tomaron tres puntos en donde la respuesta de aceleración espectral en la superficie fuera diferentes. Los tres EPU elegidos, se utilizaron como ejemplo para reducirlos por un valor de sobrerresistencia de 2 y aplicarle una meseta, la cual cubre las aceleraciones máximas del espectro y el período del suelo. De esta forma se pudieron comparar los espectros de diseño de los reglamentos con los EPU reducidos. Las comparaciones también se realizaron con el programa de computo PRODISISv4.1, 2015. Se utilizaron los EPU en terreno firme elásticos, de los tres puntos, para poder ser comparados con los espectros que arroja PRODISIS (ver figuras 6.7 a 6.9), donde fue posible notar que los EPUs obtenidos en PRODISIS, tienen una aceleración menor a los obtenidos en este estudio. La diferencia de las ordenadas espectrales podría darse, en la metodología y criterios utilizados para la obtención de EPUs en PRODISIS.

CONCLUSIONES

- No es posible realizar comparaciones con espectros de respuesta de sismos de gran magnitud, debido a la falta de información acelerográfica. Para poder realizar alguna comparación con estos espectros de respuesta, se necesitan aceleraciones mayores a las que se tienen, por lo que se tendría que recurrir a algún procedimiento de ajuste de espectros (Spectral Match), lo cual no es correcto en su totalidad para una comparación, ya que el acelerograma se ajustaría directamente al EPU deseado y no existiría una comparación como tal.
- Es notable que los espectros de diseño de ambos reglamentos analizados en esta investigación (RCDUMZ, 2003 y ROMG, 1997), necesitan una actualización y este estudio podrá ofrecer parámetros para continuar con la investigación y proponer coeficientes sísmicos adecuados para cada zona, de una forma detallada como por ejemplo, los incluidos en el apartado del apéndice A de las NTC-DS-DF, 2004.

Trabajos Futuros

- Se debe considerar incluir en forma más detallada las fuentes locales, realizando una investigación mucho más exhaustiva de éstas, ya que son fallas activas y muy cercanas a la Zona Metropolitana de Guadalajara. Aunque en las fuentes sísmicas tipo área y tipo falla, que se incluyen en este trabajo abarcan estas fallas según la caracterización realizada mediante sismos históricos, no se describe en su totalidad cuales fallas locales se engloban ni sus extensiones.
- Se debe ampliar la cantidad de estudios geotécnicos y geofísicos en la región, para proponer una zonificación del suelo con base en los estudios de velocidad de onda de corte actualizados de la zona.
- Se deben refinar las características del suelo para modificar las curvas de degradación del módulo G y amortiguamiento, del suelo de la ZMG, para obtener funciones de transferencia. Ya que para este estudio, se tomaron los modelos generales de arena, arcilla y roca del SHAKE-91. Es importante tener en cuenta que en la ZMG se pueden encontrar este tipo de materiales, pero de origen pumítico por lo que pueden llegar a comportarse diferente.

Bibliografía

Al Atik, L. y Abrahamson, N., (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, vol. 26 (3), páginas 601–617.

Alcocer S. y Klingner R., (2006). El sismo de Tecomán, México del 21 de enero de 2003. *Informe de la SMIS. EERI dentro de la serie Aprendiendo de los sismos.*

Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. y Singh, S., (2010). Strong ground motion relations for mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, vol.14, páginas 769-785. ISSN 1383-4649.

Atkinson, G. M. y Boore, D. M., (2003). Empirical ground-motion relations for subductionzone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93(4), páginas 1703-1729.

Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, (2000). Comité de la Base Nacional de datos de Sismos Fuertes, vol. 2, CD-ROM.

CFE, (2015). Diseño por Sismo. *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad*. Instituto de Investigaciones Eléctricas de la CFE.

Cornell, C. A., (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58(5), páginas 1583–1606.

Chávez, M., (1993). Red acelerográfica de la Zona Metropolitana de Guadalajara (RAZGM). *Memorias de X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco.*

Dowrick, D. J., (2009). Earthquake resistant design and risk reduction. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN 9780470747018.

Figueroa, J., (1970). Catálogo de sismos ocurridos en la república mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, vol. 272, página 88.

Filiatrault, A., Tremblay, R., Christopoulos, C., Folz, B. y Pettinga, D., (1998). Elements of earthquake engineering and structural dynamics. *Presses Internationales Polytechnique*. Tercera edición.

BIBLIOGRAFÍA

García, D., Singh, S.K., Herraíz, M., Ordaz, M. y Pacheco, J. F., (2005). Inslab earthquakes of central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.95 (6), páginas 2272-2282.

Gómez-Bernal, A., Juárez-García, H. y Arellano E., (2003). Estimación de parámetros de riesgo sísmico en Guerrero en función de las diferentes zonas sismogénicas. *Mem. XIV Congreso Nacional de Ing. Sísmica*. León, Gto.

Gómez-Bernal, A., Juárez-García, H. y Gama A., (2007). Amplificación sísmica en Chilpancingo, Guerrero, *Reporte de Investigación No. 456*.

Gómez-Bernal, A., Lecea, M. y Juárez-García, H., (2012). Empirical attenuation relationship for arias intensity in Mexico and their relation with the damage potential. *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal.

Gómez, S. C., Ordaz, S. M., Tena, C. A., (2005). Leyes de atenuación en desplazamiento y aceleración para el diseño sísmico de estructuras con aislamiento en la costa del pacífico. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*. México.

Google, (2017). Google Earth. http://earth.google.com/, (ultimo acceso, julio, 2017).

Herraiz, S.M., (1997). Conceptos básicos de sismología para ingenieros.

IBC (International Building Code), (2006).

Idriss, I. M. y Sun, J. I., (1992). SHAKE-91, University of California, Davis, California.

IIEG, (2015). Diagnóstico del municipio. *Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco, Guadalajara*.

Inca, E., (2013). Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Ometepec y otras ciudades aledañas del estado de Guerrero. *Tesis para obtener grado de Maestría*. Universidad Autónoma Metropolitana, México.

IINGEN-UNAM, (2017). Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana (En línea), http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Default.aspx (último acceso el día 31 de julio del 2017).

Jaimes, T. M. A. y Reinoso, A. E., (2001). Peligro sísmico en la ciudad de México debido a sismos de subducción, falla normal e intraplaca. *Memorias XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.

Joyner, W. B. y Boore, D. M., (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 83(2), páginas 469–487.

Juárez-García, H., Guerrero, J., Gama, A. y Hurtado, F., (1996). Geological Aspects of the October, 9, 1995, Manzanillo, Mexico, Earthquake. *Learning From Earthquakes Project, EERI special earthquake report, National Science Foundation Grant #BCS-9215158.*

Kelleher, J. A. y McCann, W. R., (1976). Buoyant zones, great earthquakes of subduction, J. Geophys. Res. 81, páginas 4885-4908.

Kramer, S. L., (1996). Geotechnical earthquake engineering. *Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Upper Saddle River*, NJ: Prentice Hall, c1996, vol. 1.

Kramer, S. y Stewart, J., (2004). *Earthquake Engineering. From Engineering Seismology* to Performance-Based Engineering, Capítulo 4: Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. CRC Press. Editado por Bozorgnia, Y. y Bertero, V. V.

Lazcano, S., (2001). Sismicidad histórica de Guadalajara, Jal. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ing. Sísmica*, Guadalajara, Jalisco.

Lazcano, S., (2004). Contexto histórico y geotécnico de Guadalajara. *Memorias de la XXII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Guadalajara, Jal.

Lazcano, S., (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. Academia de Ingeniería, México.

Lazcano, S., (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *Memo XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.

Lazcano, S., (2016). Cimentación de la Catedral de Guadalajara: enseñanzas y retos. *Memorias del XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Mérida, Yucatán. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.

Louie J.N., (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremors arrays, bull. *Seismological Soc. America*, vol. 91, páginas 347-364.

Martínez L. M., (2011). Estudio sísmico de la estructura cortical en el bloque de Jalisco a partir de registros locales del proyecto MARS. *Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias de la Tierra, UNAM*.

Matthews, M. C., Hope, V. S. y Clayton, C. R. I., (1996). The use of surface waves in the determination of ground stiffnes profiles, *Proc. Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, London*, vol. 19, páginas 84-95.

Mayne, P. W., (2001). Stress-strain-strength-flow, parameters from enhanced in situ tests. *Proc. Int. Conf. on In-Situ, Measurements of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia*, páginas 27-48.

McGuire, R. K., (2004). Seismic hazard and risk analysis. *Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA*.

Nakamura, Y., (1989). A method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Q. R. of RTRI*, vol. 30, N°1.

Nishenko, S. y Singh, S., (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interpolate earthquakes along the mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.77 (6), páginas 2095-2114.

NTC, (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño del Distrito Federal.

Núñez Cornú, F. J., Reyes-Dávila G. A., Rutz-López., M., Trejo-Gómez, R., Camarena-García, A. y Ramírez-Vázquez, C. A., (2004). The 2003 Armería, Mexico Earthquake (Mw 7.4): Mainshock and early aftershocks. *Seismological Research Letters*, vol. 75 (6), páginas 506-605. 2004. ISSN 0895-0695.

Núñez Cornú, F. J., (2011). Peligro Sísmico en el Bloque de Jalisco, México. *Física de la Tierra* Vol. 23 Núm. 1 (2011), páginas 199-299.

Ordaz, M., Pérez R. L. y Velázquez J., (2007). Definición de sismos máximos para el diseño sísmico de estructuras. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.

Pérez, A., Ordaz M. y Yamin L., (2005). Método Alternativo para el cálculo de espectros de peligro uniforme considerando efectos de sitio (MADEES). *Memorias XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.

Ramírez-Centeno, M., Martín Del Campo, R., Calvillo, F., Suarez, O., Ramos, A., López, A., Rivero, F. y Ruiz-Sandoval, M., (1997). Mapas de curvas de isoperíodo de la Zona Metropolitana De Guadalajara, Jalisco. *Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver., México, 1997*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.

Ramírez-Centeno, M., Ruiz-Sandoval, M., Rivero, F. y Martín Del Campo, R., (1998). Zonificación sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Reporte de Investigación Universidad, Autónoma Metropolitana, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.*

RCDUMZ, (2003). Reglamento de Construcciones y Desarrollo Urbano del Municipio de Zapopan.

RCSUMG, (1947). Reglamento de Construcciones y de los Servicios Urbanos para el Municipio de Guadalajara.

RCMG, (1969). Reglamento de Construcciones para el Municipio de Guadalajara.

RCMG, (1988). Reglamento de Construcciones para el Municipio de Guadalajara.

Reiter, L., (1990). Earthquake hazard analysis: issues and insights. *Columbia University Press*.

Risk-Engineering, (2011). Manual de usuario Ez-Frizk v7.62. Risk Engineering, Inc., Golden, Colorado, USA.

ROMG, (1997). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo para Guadalajara. *Reglamento Orgánico del Municipio de Guadalajara*, páginas 11-16.

Saborío, U. J., (1995). Algunas características del subsuelo de la ciudad de Guadalajara, Jal., México. *Facultad de Ingeniería. Universidad de Guadalajara*.

SeismoSignal, (2016). Earthquake Engineering Software Solutions. Disponible en: *http://www.seismosoft.com/seismosignal*.

Shepard, D., (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, páginas 517–524. ACM.

Singh, S., Ponce, L. y Nishenko, S., (1985). The Great Jalisco, Mexico earthquakes of 1932: subduction of the Rivera plate, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 75, páginas 1301-1313.

SSN, (2016). Catálogo de sismos fuertes. (En línea). Servicio Sismológico Nacional, México. Disponible en *http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/fuertes.jsp* (último acceso el día 08 de diciembre del 2016).

Stokoe, K.H. II, Rix, G. J. y Nazarias, S., (1989). In-situ seismic testing with surface waves, *Proc. 12th Int, Conf. Soil Mech. Fond. Engr., Río de Janeiro, Brazil*, 1, páginas 331-334.

Youngs, R., Chiou, S.-J., Silva, W. y Humphrey, J., (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, vol. 68(1), páginas 58-73.

Zúñiga, R., Suarez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V., (1997). Peligro sísmico en Latinoamérica y el caribe. *Reporte Final IPGH*, Capitulo 2, México.

Apéndice A

Introducción de una ley de atenuación en EZ-FRISKTM v7.65

A.1. Definición de una ley de Atenuación

Para el análisis de peligro sísmico, el programa de cómputo que se empleó, fue el EZ-FRISKTM v7.65 de Risk Engineering Inc., el cual tiene tres módulos de análisis: Análisis de peligro sísmico (Seismic Hazard Analysis), Ajuste de Acelerogramas (Spectral Matching Study) y el Análisis de la Respuesta del Suelo (Site Response Study). En este apéndice se indicará como se debe de introducir una ley de atenuación que no se encuentre precargada en el apartado de análisis de peligro sísmico.

1. *User's attenuation equations.* Este apartado nos sirve para definir una relación de atenuación nueva, por lo cual es importante localizar esta pestaña, desde el menú desplegable *Explorer* como se indica en la figura A.1. En este ejemplo se mostrará como introducir y calibrar la ley de atenuación de García *et al.* (2005).



Figura A.1. Apartado para introducir una nueva ley de atenuación.
Se puede definir una ley de atenuación por dos métodos en este apartado. El primero es mediante un código que describe las ecuaciones y variables utilizadas en el modelo de atenuación. Este código se introduce en el editor de evaluación de ecuaciones, *expression evaluator attenuation equation editor*. El segundo método consiste en introducir la ley en formato de Tabla o base de datos, los cuales pueden ser importados desde Excel. En este apéndice solo se mostrará el primer método. Si se requiere utilizar el segundo método se puede consultar el apartado, "Descripción del programa EZ-FRISK^{TM"}, ubicado en el apéndice D, de la Tesis de Grado de Maestría de Inca, 2013.

2. *Expression evaluator attenuation equation editor*. Una vez dentro de *User's attenuation equations*, seleccionamos el menú *New...* el cual nos abrirá una nueva ventana donde elegiremos un método de introducción de Ley de Atenuación, tal como se muestra en la figura A.2.



Figura A.2. Expression evaluator attenuation equation editor.

En seguida, se desplegará una ventana en donde se podrá introducir el código que definirá la ley de atenuación (ver figura A.3). El lenguaje que se utiliza en el editor, es el lenguaje tipo "C", combinado con expresiones para definir parámetros sísmicos, los cuales se pueden observar en la tabla A.1.

INTRODUCCIÓN DE UNA LEY DE

ATENUACIÓN EN EZ-FRISKTM V7.65

xpression Evaluator Attenu	ation Equation Editor	×	×	
Formula Site Parameters	Equation Parameters Coefficents			
The formula must assign val parameters, equation parar	ues to In'Y and sigmaLnY , based on rupture metrics, site neters and coefficients, and intrinsic functions.			
delta=0.00750*10^(0.507 R=(Rd^2+delta^2)^(0.5)	ማለም/); ;	^ Validate	ne Required None	
lnY=((C1+C2*Mw+C3*R-C sigmaLnY=sigma_total;	4%log(R) +C5*Zcoe +sigma_total)%ln(10))+ln(981);		site parameters	
		~		
Rupture metrics	Dip - The dip angle in degrees of the rupture surface. If the angle is less than 90 degrees, the rupture dip $ \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $	Insert		
Site parameters	Vs30 (m/s) - Shear wave velocity averaged over top 30 m $$\sim$$	Insert		
Equation parameters	~	Insert		
Equation coefficients (vary by spectral period)	C1 ~	Insert		
Functions	acos 🗸	Insert		
Constants	e v	Insert		
	Aceptar Cancelar Aplic	ar Ayuda		

Figura A.3. Código para definir el modelo de atenuación de García et al. (2005).

Tabla A.1. Expresiones para definir parámetros de un modelo de atenuación, por código.

Meqn	The earthquake magnitude value in the scale choosen for the attenuation equation
Mw	The earthquake magnitude value in the moment magnitude scale
Mblg	The earthquake magnitude value in the Mblg scale.
Reqn	The distance as choosen for the attenuation, in kilometers
Rjb	The Joyner- Boore distance, in kilometers, which is the closest distance to the vertical surface projection of the rupture.
Rcl	The closest distance to the rupture surface, in kilometers.
Rcoe	The distance to the rupture center-of-energy, in kilometers
Rx	The horizontal perpendicular distance to the top of the rupture (this is a signed metric).
Rhpbor	The horizontal perpendicular distance to the bottom of the rupture (this is a signed metric).
Zcl	The depth of the closest point on the rupture surface to the site, in kilometers
Ztor	The depth of the top of the rupture, in kilometers.
Zbor	The depth of the bottom of the rupture, in kilometers.
Zcoe	The depth of the rupture center of energy, in kilometers.
Wrup	The width of the rupture surface, in kilometers.

Dip	The dip angle in degrees of the rupture surface. If the angle is less than 90 degrees, the rupture dips toward the site.
Fow	The overhanding wall factor. It has a value of 1 if the site is considered over the hanging wall of the rupture.
Fows	The overhanging wall side factor. It has a value of 1 if the site is on the same side of the rupture trace as the hanging wall.
Frv	The reverse faulting factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is reverse.
Fro	The reverse-oblique factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is reverse-oblique.
Fss	The strike-slip factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is strike-slip
Fno	The normal-oblique factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is normal-oblique.
Fnm	The normal factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is normal.
Fslab	The subduction slab factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is subduction intra-slab.
Fintf	The subduction interface factor. It has a value of 1 if the fault mechanism is subduction interface.

3. View attenuation plot. Si se desea calibrar la ley de atenuación para saber si se introdujo de manera correcta, se puede ingresar al menú View attenuation plot, al cual hay que introducirle ciertas variables y parámetros característicos de nuestro modelo, para que pueda ser graficado y a su vez comparado. En la figura A.4 se muestra un ejemplo.



Figura A.4. Comparación EZ-FRISKTM v7.65 vs García *et al.* (2005). Para sismos intraplaca, para magnitudes de momento de 5.5, 6.5 y 7.5, con una profundidad al foco de H=50 km

Apéndice B

Descripción del programa de cómputo SHAKE-91_input

B.1. SHAKE-91_input

El programa de computo SHAKE91_input es el programa SHAKE-91 (Idris y Sun, 1992), con una interfaz gráfica que facilita la entrada de datos, el cual utiliza la metodología del método lineal equivalente descrito en el capítulo 5. En este apéndice se describe en forma breve y practica como utilizar este programa, para obtener funciones de transferencia y/o una respuesta en la superficie o en cualquier estrato de un perfil de suelo deseado.

B.1.1. Introducción de datos

Para crear un archivo nuevo, en el menú *File*, se oprime en *New*, y se puede comenzar a introducir los datos del perfil estudiado (ver figura B.1).

New Chr.	-N Jack			Acriter of	· Laura	(m)								
Open Chill	5 100	_			apine'se	Thistees	Dier Holize	Depres	6		Ve.			
at Type i	Tates.			1.1	4			1 10		1.93	1 -1000	E Save Ani	Dates	-1494
		1	est and Apply	-4 Me	ienal 7	Trickness (N) Shia	Midulus (ket) lost	al Damping Glassmaty V	hit Weight (kil)	Va (M/sec))	Save Act.	Outringging		I have been
	Manual	1		1.1	- 4		3.8628+03	0.6600	8.1080	1000				
-	Address			2			11666+03	1.0005	1.1258	805				
-	_				- 2	12	3 04448-03	0.9909	8,4250	600				
a state of						14	3.503(e+0)	0.0500	4.1355	851				
				1.1		12	2.8620e+03	4 6500	E 1285	1200	4			
						12	3.88294+90	0.0960.	11 (250	1000				
		_		1.		12	4.68728+01	-0.0900	E-1050	110				
				1.1		10	4 88728+00	4.5500	12 1296	1123				
					- 2	11	1 82304-03	0.0000	\$1000 A	1300	-			
				10.00		0	8.42304-01	9.0500	1,100	1300				
					- 5		7.81208-02	2 0500	51000	1400				
				10			7.81398-01	0.0000	1,009	1400				
				10	- 2	10	81808-00	0.0000-	8.1300	1940				
				11.1		13	a moneyala.	1.0000	E 1300	1005				
		_		10		12	103054-04	9 9969	8,1397	4900				
						10	1.20214-04	0.0500	1.1300	1000				
				1 "			Lands-Dr	0.0100	1400	8000	-	-		
A Matter				Amplian	- Landry	~		- Factor Spectrum				NAME ADDRESS OF		
-	4	DANAGE	ber	Layer T		17		Layers	1		L.	**	1	t
a famal	server.		1.00	1000				branne.	1		De	any i		
	1965	# altheater Lines	- 1	Transmission in the local division in the lo				Norther of Values	101				0.00	
94	4290	Automas	1.1	Ser		9.48					11-		David Die	
ai Fred	25	Tag of Subleyer,		Rath of Ety	alconient for	offerer Strair to Mare	ran Stan	-Subayer for which S	Nai Sheek in Sh	et are Compil	et & Sevel-			
		angent	-17	Rome	their	Number of		Sheep.	42		Tax.	47	1.00	
144		-		and street a		in some	and the second s			- 17				Sales Similar 2 New Array
×						Incas Asia		married and	1004 1800	1.000	an information			

Figura B.1. Creación de un archivo nuevo en SHAKE91_input.

APÉNDICE B

Las propiedades del suelo se introducen en el apartado de *Soil Profile*, donde se indican el número de estratos que se tienen en el perfil estudiado. Se debe de introducir el tipo de material que se tiene en cada estrato con un número. Los materiales se enumeran en la parte izquierda de la interfaz. El programa tiene precargadas, las arcillas, arenas y rocas de una forma general. Los datos que se tienen que incluir son: un amortiguamiento cualquiera, que será iterado en el análisis, su peso volumétrico en ksf, y la velocidad de onda de corte en ft/seg, y de forma inmediata se calcula el módulo de cortante, (ver figura B.2). Los apartados *Save ACC* y *Outcrop*, indican si se querrá la respuesta del suelo en ese estrato, por lo general se seleccionan en la base y en la superficie del suelo.

VateRes	dyfederalistas 1	UNRW	1	1	bér ef Layers Material	5 Thistean	Stear Hobics	Dangerg		Unit Weight	Ve.		~	
oi Type	Harrist:		/		.2	8.56		0.05		0.0796	364.17	Save Acc	Detores	Apply .
		1	year brait	1.4	Material 1	hickness (%) She	e Modulus (Rof) (Initi	al Damping (decimal) 5	we Weight (ksf	Vs (to/sec)	leve Acc. O	utoropping		and the second
-				1	2	8.5600	327.6500	0.0500	0.079	364.1700	1	1		Allow Subbell
-	Material			-2,	2	8.0400	1190	0.0500	0.092	643,0400	0	. 0		
and in				2	3	18.2400	1.2785e-04	0.0500	0 103	19915e-03				
incia.				11.5		90.2290	1.00000+04	0.0500	0.100	228356+05				
							-		-	-				
								-	-	-				
t Votor				- Lega	katine Saerthu			- Planer Settion		_	T Press	nei Toestra		
Notor -	604,1	page_ald Se	Seec	- Angel Lay	scature Salerthu rei 1			Paular Saesture Layers		_	- Restrict	nas forcha		
l Votor I Votor Format	6.09 <u>(</u> .)	page, eld se	Select 0.045	- Angel Lay Lay	kcation Solerthu ner 1 ner 2	8		Paurer Spectrum Layers Banators	-		Resor Lave Deep	nee faectra 19	1	
Notor Bistor Format W	609 <u>1</u> ,0 (8412.10) 2826	a to have	Select 0.045 3	Legili Lej Lej	katun bierthu er 1 er 2	5		Fourier Saestrum Layers Bendlems Manders of Values In Daglar	1		Resolution Salest Despise	nei Spectra 9	1 188 0 892 0 892	
Noton Bottom Pormat W	6695,3 (8192.8) 2928 4298	prov_sild to: at a statuse Lines Act Per Line	Seect 0.045 3 8	Legit Leg Press	kason Soethu er 1 er 2 ercy ep	5 7 6.121		Pourer Sections Layers Bentans Rundser of Values To Dopon	1		Restar Large Darge	ne forth 9 19 19	1 255 O 842 O 842	
Notor Notor Famili NV NA a freq	6095.3 (JANG) 3026 4098	ALL PARTY OF ALL P	Seect 0.045 3 6 5	- Angel Lay Press - Rate o	kason toertou er t er 2 ency ep r Eouvaiert (r	5 7 6 12 7	and Gran	Pauver Santtvon Layes Bentes Mansler of Valaes to Sopal Santyer för velck S	niciji New Girens in S	ner are Compute	Reaso Layer Despi Osciel	ne torcha n ng 17 - @ moriz - 1	1 085 0.1642 () Here2	
Boton Busion Parmat W BA I Freed Lab	609(,) (IPER) 5026 4098 100	ating a fill on at it of instance Lines Acc Per Line Top at Sulliver where estima is applied	5#ect 0.045 3 6 5	Angli Lin Trea S Refer Q Ov	katon toethu er 1 er 2 ercy ep r Couvaient o out Stree	5 7 6.12 Nors State to Mar- Norskor of Norskor	and the set	Planter Sattsum Layers Bentans Mander of Valas- to Satger Sateger for velocit S Dress	n 100 Teor Dress in 13 43	ner avs Computer	Resolution Large Dampi Grant E & Savet m	ner breten 9 19 19 ænov2 1 44	1 015 0.1642 () 1642	
Notion Distore Parmat W NA a Free Auto or	609(J) (JHEE) 3926 4096 190 6	recented on di K of location Acc Per Line The of Ballware where making a septed	5mmg 8.045 3 6 5	- Angelt Las Frees 9 - Rate ⊂ 20 Ou	tation Sector er 1 er 2 ency ty tr Eouvaint (r tyut Street	5 1 0.12 North Date to Hate Number of Metations		Pauver Spectrum Layers Berdinne Handher at Valaes Tar Dague Swanger for vehich So Direns	100 100 100 10	nen we Compute Star	Resol Sere Dampi Oran U Seret e	na Spectra 19 19 19 19 19 (March 2) 48	t 935 O Sw2 : O sw2 See	a Band & Not Area

Figura B.2. Introducción de datos del perfil de suelo en soil profile.

B.1.2. Acelerograma.

Para poder obtener una respuesta en la superficie del suelo es necesario introducir un acelerograma en el apartado del programa *Input Motion*. El acelerograma debe de tener un formato especial para que se pueda cargar al programa. El input debe de tener un máximo de 4096 datos, para que estos puedan ser leídos. Se debe de tener un formato, 8f10.6, que significa, que los datos de aceleración se deben de acomodar en 8 columnas con 6 decimales. Se pueden incluir comentarios, en la parte superior del input. El número de renglones se indicaran cuando se seleccione el input deseado, junto con un delta t definido. El formato del archivo puede introducirse como *.txt*. En la figura B.3, se muestra un ejemplo de un input con el formato ideal para ser leído por el programa. Una vez que se tenga el archivo es importante guardarlo en la carpeta de *Input_Motion*, incluida en la librería del programa.

🧾 cicej_pozo_n90: Bloc de notas	
Archivo Edición Formato Ver Ayuda	
"Cicej pozo n90"	
"Total No. of Points:,"3926,"@ DT =",	0.045
"Peak Acceleration (g) =",0.006166799)
-0.000040 -0.000010 0.000000 0.000	030 -0.000090 -0.000010 0.000010 0.000010
0.000110 -0.000040 -0.000010 -0.000	020 -0.000080 -0.000030 0.000120 0.000060
-0.000030 -0.000010 0.000040 -0.000	050 0.000020 0.000030 -0.000040 0.000080
0.000010 -0.000070 -0.000110 0.000	100 0.000050 0.000020 -0.000010 0.000080
-0.000060 -0.000020 -0.000020 0.000	070 -0.000080 0.000040 0.000010 -0.000050
0.000110 -0.000060 -0.000020 0.000	010 -0.000020 0.000050 -0.000030 0.000050
-0.000090 0.000050 0.000000 -0.000	070 -0.000010 -0.000010 -0.000060 0.000010
0.000050 -0.000040 -0.000010 0.000	030 0.000020 -0.000090 0.000030 0.000070
0.000070 -0.000050 0.000110 0.000	110 -0.000090 0.000040 -0.000050 -0.000110
0.000080 -0.000070 -0.000130 0.000	130 -0.000150 0.000020 -0.000060 0.000010
-0.000170 0.000050 0.000060 0.000	030 0.000040 0.000110 -0.000090 -0.000070
0.000070 0.000030 -0.000110 -0.000	060 0.000130 0.000060 -0.000010 0.000160
-0.000050 0.000000 0.000110 0.000	0040 0.000010 -0.000010 0.000130 -0.000030
-0.000120 0.000120 -0.000100 0.000	140 0.000000 -0.000080 0.000060 -0.000020
0.000070 -0.000030 -0.000030 -0.000	0040 0.000010 0.000120 -0.000050 0.000130
0.000000 0.000030 0.000050 -0.000	030 0.000000 0.000060 -0.000040 -0.000110
-0.000050 -0.000070 -0.000110 -0.000	070 -0.000030 0.000020 0.000070 -0.000110
-0.000120 0.000000 0.000020 0.000	110 0.000080 -0.000030 0.000000 0.000100
0.000060 -0.000090 0.000060 0.000	010 -0.000040 -0.000070 0.000010 -0.000060
-0.000070 0.000070 0.000000 -0.000	130 0.000070 -0.000070 0.000030 -0.000160
0.000160 0.000000 -0.000090 0.000	060 0.000070 -0.000130 -0.000030 0.000010
0.000030 0.000040 0.000040 -0.000	110 0.000100 0.000010 -0.000080 -0.000180
-0.000280 -0.000040 -0.000010 -0.000	220 -0.000030 0.000050 0.000110 0.000050
0.000140 -0.000030 -0.000110 -0.000	120 0.000040 0.000040 0.000100 -0.000140
0.000080 0.000150 0.000090 0.000	180 -0.000030 -0.000160 -0.000030 0.000060
0.000020 0.000130 0.000040 0.000	160 0.000210 0.000200 0.000020 0.000130
0.000110 0.000110 -0.000090 -0.000	210 0.000030 0.000070 -0.000080 -0.000280
-0.000020 0.000100 0.000260 0.000	070 -0.000150 0.000000 0.000080 0.000070
-0.000190 -0.000090 0.000030 0.000	150 0.000120 0.000050 0.000050 0.000220
0.000330 -0.000130 -0.000460 -0.000	350 -0.000140 0.000300 0.000020 0.000050
0.000150 0.000510 0.000280 -0.000	070 -0.000040 -0.000500 -0.000260 0.000410
0.000100 -0.000500 0.000050 0.000	020 -0.000020 0.000480 -0.000030 -0.000750
0.000210 0.000370 -0.000520 -0.000	310 -0.000600 -0.000460 -0.000430 -0.000370
-0.000220 0.000680 -0.000280 -0.000	970 -0.000340 -0.000190 0.000610 0.000150

Figura B.3. Formato del input motion.

En el apartado *Amplification Spectrum*, se puede indicar entre que estratos se requiere la amplificación o función de transferencia. Al igual que en el apartado de *Response Spectra*, se puede sugerir en que estrato se requiere la respuesta ya amplificada (ver figura B.4). Los demás apartados se actualizan en automático al ingresar los datos.

Another spect		-	Kourer Spectrum		المحفق ا	contae Spectra		
Layer 1	5	_	Layers	1 1	1.	ayers .		
Layer 2	e 2 1 ency 6.125		testes.	Serations 1		eses	2.05	
Trequency			E-Culput	1920	DINTY BINUS OF		re Onire	
Rate of Four-serve	The Party is the	10730	Subleyer for which	h Shear Streak or Stran	are Computed & Saved			
Deter Stee	Number of berations		Stream	+0	Shale	46	Carlo Diversi & Dure Antonio	
	Shan Rate	0.5	Striese RV	1802 1500	Strain NV	1505 1500	Carly cover a rest rest for	

Figura B.4. Apartados de Amplification Spectrum y Response Spectra.

APÉNDICE B

Al oprimir el botón de *Save Model and Run Analisis*, se corre el modelo arrojando los resultados en formato de texto y Matlab, por lo cual es importante asegurase de tener instalada la paquetería de dicho programa.

Apéndice C

Espectros de Peligro Uniforme para la ZMG

C.1. Espectros de Peligro Uniforme (EPU)

En el capítulo 4, se obtuvo un EPU para cada punto de la malla de interpolación establecida para la Zona Metropolitana de Guadalajara, para períodos de retorno de 20 años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, que representan probabilidades de excedencia respectivamente, del 91.8%, 67.1%, 39.3%, 10%, 5%, 2% en 50 años. En este apéndice se presentan los EPU obtenidos del análisis de peligro sísmico calculado en terreno firme, para los 24 puntos de la ZMG.



Figura C.1. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-01.



Figura C.2. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-02.



Figura C.3. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-03.



Figura C.4. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-04.



Figura C.5. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-05.



Figura C.6. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-06.



Figura C.7. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-07.



Figura C.8. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-08.



Figura C.9. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-09.



Figura C.10. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-10.



Figura C.11. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-11.



Figura C.12. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-12.



Figura C.13. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-13.



Figura C.14. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-14.



Figura C.15. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-15.



Figura C.16. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-16.



Figura C.17. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-17.



Figura C.18. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-18.



Figura C.19. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-19.



Figura C.20. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-20.



Figura C.21. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-21.



Figura C.22. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-22.



Figura C.23. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-23.



Figura C.24. Espectros de Peligro Uniforme en terreno firme para el punto ZMG-24.

Apéndice D

Espectros de respuesta de la zona de estudio

D.1. Espectros de Respuesta

En el capítulo 5, se mostraron bases de datos, de acelerogramas de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dentro de este apéndice se presentan los espectros de respuesta elásticos, de cada uno de los registros descritos en las tablas 5.1 y 5.2 del capítulo 5 (BMSF e I de I UNAM), para las tres direcciones del registro, con un 5% de amortiguamiento.



Figura D.1. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Arcos", en arenas jalosas.



Figura D.2. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "CICEJ Superficie", en el estacionamiento del colegio (acelerogramas no registrados correctamente).



Figura D.3. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "CICEJ Pozo 9m".



Figura D.4. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "CICEJ Pozo 35m".



Figura D.5. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Ciudad Granja", en arenas jalosas.



Figura D.6. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Jardines del Sur", en arenas jalosas.



Figura D.7. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Miravalle", en roca.



Figura D.8. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Oblatos", en roca.



Figura D.9. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Obras Públicas Zapopan", en arenas jalosas.



Figura D.10. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Planetario", en arenas jalosas.



Figura D.11. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Rotonda", en arenas jalosas.



Figura D.12. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "San Rafael", en roca.



Figura D.13. Espectros de respuesta del sismo del 09 de octubre de 1995, registrado en la estación "Tonalá", en roca.

APÉNDICE D



Figura D.14. Espectros de respuesta del sismo del 11 de abril del 2012, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando.



Figura D.15. Espectros de respuesta del sismo del 22 de abril del 2013, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.



Figura D.16. Espectros de respuesta del sismo del 18 de Abril del 2014, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando.



Figura D.17. Espectros de respuesta del sismo del 18 de abril del 2014, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.



Figura D.18. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.



Figura D.19. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.



Figura D.20. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.



Figura D.21. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando.



Figura D.22. Espectros de respuesta del sismo del 15 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando.



Figura D.23. Espectros de respuesta del sismo del 17 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Colegio Cervantes", en suelo blando.



Figura D.24. Espectros de respuesta del sismo del 17 de diciembre del 2015, registrado en la estación "Universidad Panamericana", en suelo blando.

Apéndice E

Interpolación por el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), Shepard, 1968

E.1. Descripción del método

El método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW), se utilizó en esta investigación para obtener Espectros de Peligro Uniforme de los 18 sitios donde se localizaron los estudios de perfiles de suelo, descritos en el capítulo 3. En este apéndice se describirá el método con un ejemplo, y se incluyen los 4 EPU interpolados de cada punto de los 18.

• Es necesario ubicar el punto deseado y los puntos de la malla que se encuentran a su alrededor como se observa en la figura E.1 e identificar su latitud y longitud de cada punto como se muestra en la tabla E.1.



Figura E.1. Localización de los EPU conocidos y del punto desconocido.

Epu desconocido	Nombre	Latitud	Longitud	
7	Patria y Guadalupe	20.662	-103.424	
N° de Epu Conocido	Nombre	Latitud	Longitud	
1	ZMG-11	20.646	-103.489	
2	ZMG-12	20.645	-103.393	
3	ZMG-16	20.736	-103.488	
4	ZMG-17	20.735	-103.392	

Tabla E.1. Latitud y Longitud de los puntos de estudio.

- El siguiente paso es determinar las distancias de cada punto conocido hacia el punto que se quiere conocer.
- Una vez que se tienen las distancias entre las coordenadas, se debe calcular el factor de ponderación de distancia inversa, de cada punto i de interpolación con la ecuación B.1, para lo cual se halla el inverso de la distancia de cada punto elevado a una potencia (p) que varía de 2 hasta un valor que depende del grado de aproximación que se requiera, de esta manera se obtendrá el peso de cada fuente (Inca, 2013).

$$Wi(x) = \frac{1}{d(x,xi)^p}$$
(B.1)

Ya que se tienen los pesos de cada punto, se procede a obtener el factor de ponderación de distancia como se observa en la ecuación B.2. este factor se multiplicara por cada valor de aceleración de cada punto y la sumatoria de estos valores darán como resultado un EPU (IDW) (ver ecuación B.3). en la tabla B.2 se muestra un ejemplo de la interpolación realizada para cuatro fuentes.

$$Factor_{IDW} = \sum_{i=0}^{N} \frac{Wi(x)}{\sum_{j=0}^{N} Wj(xj)}$$
(B.2)

$$U_{(X)} = \sum_{i=0}^{N} Factor_{IDW} * U_i$$
(B.3)

N° de Epu Conocido	Nombre	Latitud	Longitud	Distancia entre puntos (km)	Wi(x)	Factor (IDW)
1	ZMG-11	20.646	-103.489	7.030	0.0004	0.0716
2	ZMG-12	20.645	-103.393	3.750	0.0051	0.8839
3	ZMG-16	20.736	-103.488	10.540	0.0001	0.0142
4	ZMG-17	20.735	-103.3918	8.710	0.0002	0.0304
Potencia P	4			$\Sigma =$	0.0057	

Período de Retorno 475 años										
Probabilidad de excedencia 10% en 50 años										
	Sa (g)									
Período T(s)	EPU (ZMG-11)	EPU (ZMG-12)	EPU (ZMG-16)	EPU (ZMG-17)	EPU IDW (7)					
0.01	0.194	0.187	0.179	0.173	0.186					
0.05	0.262	0.251	0.241	0.231	0.251					
0.10	0.348	0.334	0.321	0.308	0.334					
0.20	0.452	0.436	0.419	0.405	0.436					
0.30	0.455	0.441	0.422	0.409	0.441					
0.40	0.440	0.428	0.410	0.398	0.427					
0.50	0.433	0.422	0.404	0.394	0.421					
0.75	0.334	0.327	0.314	0.307	0.326					
1.00	0.260	0.255	0.245	0.241	0.254					
2.00	0.153	0.151	0.145	0.142	0.150					
3.00	0.093	0.091	0.088	0.086	0.091					
4.00	0.070	0.068	0.065	0.064	0.068					

E.2. EPU (IDW)

Con el método antes descrito, se obtuvieron Espectros de Peligro Uniforme (EPU) interpolados, para períodos de retorno de 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años, para los 18 puntos donde se calcularon espectros de sitio. Estos EPU (IDW), se muestran a continuación.


Figura E.2. EPU interpolados para el punto 1, "Catedral de Guadalajara", para 4 períodos de retorno.



Figura E.3. EPU interpolados para el punto 2, "Biblioteca Pública Agua Azul", para 4 períodos de retorno.







Figura E.5. EPU interpolados para el punto 4, "Fco. Javier Gamboa y Lerdo de Tejada", para 4 períodos de retorno.



Figura E.6. EPU interpolados para el punto 5, "Hotel Riu", para 4 períodos de retorno.



Figura E.7. EPU interpolados para el punto 6, "La Gran Plaza", para 4 períodos de retorno.



Figura E.8. EPU interpolados para el punto 7, "Av. Patria y Guadalupe", para 4 períodos de retorno.



Figura E.9. EPU interpolados para el punto 8, "Universidad Panamericana", para 4 períodos de retorno.



Figura E.10. EPU interpolados para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", para 4 períodos de retorno.



Figura E.11. EPU interpolados para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", para 4 períodos de retorno.



Figura E.12. EPU interpolados para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", para 4 períodos de retorno.



Figura E.13. EPU interpolados para el punto 12, "Av. Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", para 4 períodos de retorno.







Figura E.15. EPU interpolados para el punto 14, "Av. Patria y Eva Briseño", para 4 períodos de retorno.

INTERPOLACIÓN POR EL MÉTODO DE PONDERACIÓN DE DISTANCIA INVERSA (IDW), SHEPARD, 1968



Figura E.16. EPU interpolados para el punto 15, "Av. Patria y Paseo Royal", para 4 períodos de retorno.



Figura E.17. EPU interpolados para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", para 4 períodos de retorno.



Figura E.18. EPU interpolados para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", para 4 períodos de retorno.





Apéndice F

Espectros de Peligro Uniforme (*EPU*) con efectos de sitio

F.1. Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en la superficie

En el capítulo 5, se presentaron técnicas de escalamiento aplicadas a los acelerogramas, para obtener funciones de transferencia y en consecuencia espectros de sitio. En este apéndice se muestran los Espectros de Peligro Uniforme (EPU), elásticos en la superficie, con efectos de sitio para los 18 sondeos de la ZMG, descritos en el capítulo 3, para períodos de retorno de 100 años, 475 años, 975años y 2475 años, para las dos direcciones horizontales del acelerograma registrado en la estación CICEJ-Pozo 35m, descrito en el capítulo 5.



Figura F.1. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 1, "Catedral de Guadalajara" en el sentido E-O.



Figura F.2. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 1, "Catedral de Guadalajara" en el sentido N-S.



Figura F.3. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 2, "Antigua biblioteca Pública" en el sentido E-O.



Figura F.4. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 2, "Antigua biblioteca Pública" en el sentido N-S.



Figura F.5. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 3, "Registro Civil Nº1" en el sentido E-O.



Figura F.6. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 3, "Registro Civil Nº1" en el sentido N-S.







Figura F.8. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 4, "Fco Javier Gamboa y Lerdo de Tejada" en el sentido N-S.







Figura F.10. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 5, "Hotel RIU", en el sentido N-S.







Figura F.12. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 6, "La Gran Plaza", en el sentido N-S.



Figura F.13. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 7, "Patria y Guadalupe", en el sentido E-O.



Figura F.14. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 7, "Patria y Guadalupe", en el sentido N-S.



Figura F.15. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 8, "Universidad Panamericana", en el sentido E-O.



Figura F.16. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 8, "Universidad Panamericana", en el sentido N-S.



Figura F.17. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", en el sentido E-O.



Figura F.18. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 9, "López Mateos y Mariano Otero", en el sentido N-S.



Figura F.19. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", en el sentido E-O.



Figura F.20. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 10, "Colomos y Manuel M. Diéguez", en el sentido N-S.



Figura F.21. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", en el sentido E-O.



Figura F.22. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 11, "Eulogio Parra y Pablo Casals", en el sentido N-S.



Figura F.23. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 12, "Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", en el sentido E-O.



Figura F.24. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 12, "Pablo Neruda y Paseo Jacarandas", en el sentido N-S.



Figura F.25. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 13, "Punto Sao Paulo", en el sentido E-O.



Figura F.26. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 13, "Punto Sao Paulo", en el sentido N-S.



Figura F.27. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 14, "Patria y Eva Briseño", en el sentido E-O.



Figura F.28. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 14, "Patria y Eva Briseño", en el sentido N-S.



Figura F.29. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 15, "Patria y Paseo Royal Country", en el sentido E-O.



Figura F.30. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 15, "Patria y Paseo Royal Country", en el sentido N-S.



Figura F.31. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", en el sentido E-O.



Figura F.32. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 16, "Paseo Valle Real y Federalistas", en el sentido N-S.



Figura F.33. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", en el sentido E-O.



Figura F.34. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 17, "Periférico y Av. Laureles", en el sentido N-S.



Figura F.35. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 18, "Nueva Biblioteca Pública", en el sentido E-O.



Figura F.36. Espectros de Peligro Uniforme con efectos de sitio, para el punto 18, "Nueva Biblioteca Pública", en el sentido N-S.