



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE LAS ESTRUCTURAS

**“Peligro sísmico y espectros de respuesta esperados en la ciudad
de Morelia”**

T E S I S

Como requisito parcial para obtener el título de

Maestro en Ingeniería en el Área de las Estructuras

Presenta

Ing. Aldair Estrada Cortez

Director de tesis

Dr. José Manuel Jara Guerrero

Morelia, Mich. marzo de 2023

Resumen

México es uno de los países con mayores afectaciones debidas a desastres naturales, los temblores son uno de ellos. El país se sitúa en la periferia del cinturón de fuego, nombre alusivo a la gran cantidad de volcanes y de sismos ocurridos en toda esa zona. La sociedad mexicana y principalmente los profesionistas en el área han tenido el reto de estudiar a fondo el origen de los temblores, el comportamiento dinámico del suelo, el comportamiento dinámico de las estructuras, y aunado a esto, lamentablemente aprender de los errores cometidos en construcciones pasadas, generando así un conocimiento empírico de la situación. En el área del peligro sísmico, se ha logrado tener grandes avances en el país, principalmente en la Ciudad de México, no obstante, un gran reto para la ingeniería sísmica en el país es determinar el riesgo y peligro sísmico para todo el país, principalmente iniciando con las capitales de los estados, por ser los sitios de mayor desarrollo urbano. Es por esto, que el trabajo aquí presentado es de suma importancia para la ciudad de Morelia, capital situada en uno de los estados con mayor actividad sísmica del país, y que crece a pasos agigantados. El estudio se realizó con la metodología de la Evaluación Probabilística de Peligro Sísmico (EPPS), considerando la incertidumbre de las variables que intervienen y asignado a ellas densidades de probabilidad. Para cuantificar el peligro sísmico en los distintos suelos de Morelia, se usaron 255 registros sísmicos de 40 diferentes temblores registrados en las 11 estaciones sísmicas de la Red Sísmica Nicolaita (RSN), gracias a estos registros fue posible calcular espectros de respuesta, de Fourier, y cocientes espectrales. Los acelerogramas se registran en las direcciones que se encuentran los sensores de en las estaciones sísmicas, que en la RSN son norte-sur, este-oeste y vertical. Sin embargo, no necesariamente estas son las direcciones que producen las mayores respuestas espectrales. Por ello, se determinaron también espectros ROT_{50} y ROT_{100} . Se utilizó también información de diversos sondeos de penetración estándar hechos en la ciudad, con los cuales se obtuvieron cocientes espectrales que coincidieron razonablemente con la información recabada por la RSN. Con los cocientes espectrales obtenidos y las tasas de excedencia calculadas para terreno firme, se calcularon Espectro de Peligro Uniforme (EPU) para los diversos tipos del suelo de la ciudad, cuyas envolventes permiten proponer Espectros de Diseño, siguiendo la metodología descrita en los reglamentos del país.

Palabras clave: Cociente espectral, H/V, Velocidades de onda, Riesgo sísmico, Tasa de excedencia.

Abstract

Mexico is one of the countries with the greatest effects due to natural disasters as earthquakes. The country is on the periphery of the ring of fire, reflecting the large number of volcanoes and earthquake occurrences in the entire area. Mexican society and mainly professionals in the area have had the challenge of studying the earthquakes origin, the soil dynamic behavior, the dynamic behavior of structures, and additionally, learn from deficient constructions, generating empirical knowledge. In the area of seismic hazard, great progress has been made in the country, mainly in Mexico City; however, a great challenge for seismic engineering in the country is to determine the risk and seismic hazard for the entire country, starting with the state capitals that have the greatest urban development. This work is quite relevant for the city of Morelia, the capital of one of the states of Mexico with the highest seismic activity in the country and growing very fast. The study was carried out using the Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) methodology, considering the uncertainty of the variables involved and assigning probability densities to them. To quantify the seismic hazard in the different soils of Morelia, 255 seismic records of 40 different tremors recorded on the 11 seismic stations of the Nicolaita Seismic Network (RSN) were used. The seismic records allowed to compute response spectra, Fourier spectra, and spectral ratios. The accelerograms were recorded in the north-south, east-west and vertical directions. However, these are not necessarily the directions that produce the largest spectral responses. Therefore, ROT50 and ROT100 spectra were also determined. Various standard penetration studies carried out in the city were also used to assess transfer functions, which reasonably coincided with the information collected by the RSN. Using the spectral quotients and the exceedance rates calculated for firm ground, the Uniform Hazard Spectrum (UHS) was calculated for various soil types in the city, whose envelopes allowed to propose Design Spectra, following the methodology described in the seismic regulations of the country.

Agradecimientos

A Dios todopoderoso que mantuvo la fe y esperanza en mí de realizar este sueño de mi vida y poder cumplirlo.

A mis queridos Padres que desde su adolescencia decidieron salir de sus pueblos natales para superarse en todo sentido, con el objetivo de darle a su familia un mejor futuro y vaya que lo consiguieron con todo y las adversidades que la vida les puso. Nos apoyaron en todo momento y nos dieron la mejor herencia que pueda existir, el estudio. Por esto y más les agradezco.

A mi mamá Erendira (abuelita), la persona más adorable que existe, siempre ha estado detrás de nosotros al pendiente de todo, tan dadivosa de amor con sus nietos, siempre le agradeceré toda la vida y siempre estará en mi corazón mi amada “amacita”, doy gracias a Dios que este presenciando este gran logro en mi vida.

A mi abuelita María que desafortunadamente no pudo ver a sus nietos crecer, pero sin duda sé que se siente orgullosa de nosotros desde el cielo.

A mis hermanos con los que he vivido mucho tiempo y muchas experiencias juntos, son mis grandes mejores amigos desde la infancia, los llevo en mi corazón y son una gran motivación para mí.

A mi novia Analy, quien se ha vuelto alguien muy importante en mi vida, es una gran motivación para dar lo máximo en mi día a día, doy gracias a Dios que ella haya llegado a mi vida, porque sin duda es parte fundamental de la obtención de mi grado académico como ingeniero y en un futuro (primero Dios) como maestro en ingeniería.

A toda mi familia extendida (tíos, primos, sobrinos) con los que he vivido grandes momentos y que, a pesar de la supuesta lejanía familiar, hemos estado unidos en buenos y malos momentos.

A todos los grandes amigos que me han dado la vida, que me animan en todo momento y que sin duda sienten felicidad por haber logrado algo que para mí se veía imposible.

A mi asesor de tesis, el Dr. José Manuel Jara Guerrero, por dirigir este trabajo tan enérgicamente, tener el tiempo y la paciencia de lidiar con las diferentes adversidades que se presentan en la elaboración de una tesis, y sobre todo darme la dicha de trabajar conjuntamente con él, alguien a quien admiro y respeto.

Al Dr. Guillermo Martínez Ruíz, que me dio la oportunidad de demostrarme a mí mismo, que tengo la capacidad de realizar y cumplir mis sueños, sin esa oportunidad yo no estaría aquí escribiendo todo esto.

Al M. I. Rodolfo Gaytán Rodríguez por ser el encargado de la Red Sísmica Nicolaita, sin su labor este trabajo no hubiera sido posible.

A la Facultad de Ingeniería Civil y su posgrado, por permitirme estudiar la licenciatura y posteriormente la maestría.

A mi Alma Mater la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo que cuenta con un gran nivel académico y hace que sus estudiantes y profesionistas egresados digan con orgullo “#SoyNicolaita”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por brindar el apoyo motivacional para que estudiantes como yo, estudiemos un posgrado de calidad en nuestro país natal.

Contenido

Objetivo general.....	24
Objetivos particulares	24
Introducción	24
1. Sismicidad en México y estudios de peligro sísmico	26
1.1. Tipos de fuentes sísmicas en México	27
1.1.1. Fallas por subducción.....	28
1.1.2. Fallas normales	32
1.1.3. Fallas locales.....	35
1.2. Estudios de peligro sísmico	38
1.2.1. Metodología para estimar el peligro sísmico	39
2. Fuentes sísmicas con impacto en Morelia y descripción de la Red Sísmica Nicolaita.....	49
2.1. Fuentes sísmicas con impacto en Morelia	49
2.2. Descripción de la Red Sísmica Nicolaita.....	53
3. Proceso numérico de registros sísmicos de la Red Sísmica Nicolaita.....	56
3.1. Corrección por línea base.....	57
3.2. Filtrado de registros.	59
3.3. Aceleraciones máximas del suelo PGA.	60
3.4. PGA vs leyes de atenuación.....	68
4. Cocientes espectrales y espectros de respuesta en los sitios de la red	75
4.1. Espectros de respuesta en los sitios de la red	75
4.1.1 Mapas de intensidades de PSA (gals)	105
4.1.2 Espectros de respuesta rotados obtenidos en la red (ROT).....	121
4.2. Espectros de Fourier.	129
4.3. Cocientes espectrales	139
4.4. Períodos fundamentales del suelo en Morelia	193
5. Evaluación del peligro sísmico de Morelia.	200
5.1. Identificación y localización de fuentes sismogénicas.....	200
5.2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas	204
5.3. Leyes de atenuación.....	211
5.4. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme	213
5.4.1. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme en Roca	213
5.4.2. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme en los suelos de Morelia	217

5.5. Desagregación del Peligro Sísmico	224
6. Propuestas de espectros de diseño sísmico de Morelia.....	237
6.1. Espectros de diseño elásticos de acuerdo con los reglamentos de construcción vigentes en el país.	237
6.2. Parámetros para la elaboración de espectros de diseño en la Ciudad de Morelia 240	
6.3. Espectros de diseño	246
6.4. Intensidades máximas esperadas en Morelia para 475, 1000 y 2500 años de periodo de retorno.....	253
6.5. Programa para obtener espectros de diseño en Morelia.....	265
CONCLUSIONES	267
APÉNDICES	269
APÉNDICE A	269
Revisión Bibliográfica.....	326

Índice de Figuras

Figura 1.1 Temblores con magnitud > 7.0 en zona de subducción del mundo, que forman el cinturón volcánico. Figura tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_Fuego_del_Pac%C3%ADfico#/media/Archivo:EQs_1900-2013_worldseis.png , consultada el día 22 de agosto del 2021.	26
Figura 1.2 Mapa de la república clasificado por peligro y vulnerabilidad ante temblores calculado por CENAPRED. Los estados con riesgo alto, son los que se encuentran cercanos a la zona de subducción y a la falla transformante en el caso de Baja California. Tomada de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html , consultada el día 22 de agosto del 2021.	27
Figura 1.1.1 Interacción de placas en México. Las placas de cocos y de Rivera se deslizan debajo de la placa de Norteamérica. Figura tomada de https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Mapa-de-las-placas-tectonicas-que-interactuan-en-Mexico-Las-flechas-rojas_fig7_336409467 , consultada el día 22 de agosto del 2021.	28
Figura 1.1.2 Frontera de convergencia y su proceso, la placa oceánica se introduce debajo de la placa continental. Figura tomada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Subduction-en.svg , consultada el día 22 de agosto del 2021.	29
Figura 1.1.3 Epicentros de los terremotos de subducción descritos anteriormente.	32
Figura 1.1.4 El sismo de 1985 fue producto de una falla interplaca, el temblor del 2017 fue causa de una falla intraplaca. (Figura tomada de Ferrari, 2017).	33
Figura 1.1.5 Epicentros de los temblores de fallamiento normal.	35
Figura 1.1.6 Delimitación del EVTM, se observa cómo es oblicuo y transversal al país desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. Figura tomada de https://www.researchgate.net/figure/Mapa-general-del-area-de-estudio-FVTM-Faja-Volcanica-Trans-Mexicana-CVM-Campo_fig1_344482565 , consultada el día 07 de septiembre del 2021.	36
Figura 1.1.7 Epicentro de temblores de corteza descritos anteriormente.	38
Figura 1.2.1 Distribución de probabilidad uniforme de la distancia de la fuente sísmica al sitio.	40
Figura 1.2.2 Distribución de probabilidad exponencial truncada para magnitudes.	41
Figura 1.2.3 Proceso de ocurrencia de temblores de subducción en México en el período (1900-2021). Se observa como la ocurrencia de temblores con magnitud mayor a 7 decae bruscamente, truncando la distribución exponencial.	42
Figura 1.2.4 Procedimiento para determinar el peligro sísmico de un sitio. (Figura tomada de García, A. et al. 2012).	48
Figura 2.1.1 Subzonas de fuentes de subducción en el país.	49
Figura 2.1.2 Fuentes de intraplaca en el país.	50
Figura 2.1.3 Fuentes superficiales que afectan a la ciudad de Morelia.	51

Figura 2.1.4 Mapa de Morelia con ubicación de fallas geológicas. Figura tomada de Garduño-Monroy, et al. (2001).	52
Figura 2.1.5 Falla de la Paloma. Se puede observar los deslizamientos en el talud, lo que comprueba la presencia de actividad sísmica. Figura modificada de Garduño-Monroy, et al. (2001). Falla de la Colina. Se extiende de NE a SO, con la mancha urbana no es tan notable desde la fotografía satelital. Figura modificada de Garduño-Monroy, et al. (2001).	53
Figura 2.2.1 En la parte izquierda se observa la antena GPS y en la derecha la Consola Basalto. (UMSNH).	54
Figura 2.2.2 Localización de las estaciones de la Red Sísmica Nicolaita en la ciudad de Morelia.	54
Figura 3.1 Ubicación de los sismos registrados en la RSN.	57
Figura 3.1.1 Algoritmo de corrección por línea base polinomial de grado 2.	58
Figura 3.1.2 Aceleración, velocidad y desplazamiento corregido y sin corregir de la componente N-S, de la estación CMIC, del sismo de Coalcomán del 19 de septiembre del 2022. Se observa cómo es notoria en los desplazamientos la corrección.	59
Figura 3.2.1 Comparación entre un registro sin filtrar y filtrado. Se observa como el registro original cuenta con demasiado ruido en tiempos bajos, lo que se puede considerar como movimiento ajeno al sismo, del lado derecho se muestra el mismo registro filtrado para 15 Hz, donde se elimina en gran parte el ruido ajeno al sismo. El registro usado es del sismo de Petatlán del 06 de abril del 2020 para la estación de Luz Alou en su componente Norte – Sur.	60
Figura 3.3.1 PGA de la combinación media cuadrática de las componentes horizontales, del sismo de Acapulco del 07/09/2019 registrado en la RSN.	61
Figura 3.3.2 PGA de la combinación media cuadrática de las componentes horizontales, del sismo de Coalcomán del 19/09/2022 registrado en la RSN.	62
Figura 3.3.3 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Acapulco del 07/09/2021.	63
Figura 3.3.4 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Altamirano del 12/08/2022.	63
Figura 3.3.5 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Coalcomán del 19/09/2022.	64
Figura 3.3.6 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Coalcomán del 22/09/2022.	64
Figura 3.3.7 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Crucecita del 23/06/2020.	65
Figura 3.3.8 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Huetamo del 03/03/2019.	65
Figura 3.3.9 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Lázaro Cárdenas del 19/04/2022.	66
Figura 3.3.10 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Morelia del 21/01/2020.	66

Figura 3.3.11 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Nueva Italia del 16/06/2019.	67
Figura 3.3.12 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Zitácuaro del 05/04/2022.	67
.....	68
Figura 3.4.1 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Arroyo et al. (2010). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.....	70
Figura 3.4.2 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Youngs et al. (1997). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas. ...	71
Figura 3.4.3 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Zhao et al. (2006). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.	72
Figura 3.4.4 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de García et al. (2012). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.....	73
Figura 3.4.5 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Abrahamson y Silva (1997). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.	74
Figura 4.1.1 Código de Matlab para la obtención de los espectros de respuesta por el método de la aceleración lineal de Newmark.	77
.....	96
Figura 4.1.2 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Acapulco del 07/12/2021. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.....	107
Figura 4.1.3 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Altamirano del 12/08/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.	108
Figura 4.1.4 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Coalcomán del 19/09/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.	110
Figura 4.1.5 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Coalcomán del 22/09/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.	111
Figura 4.1.6 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Crucecita del 23/06/2020. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.....	113
Figura 4.1.7 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Huetamo del 03/03/2019. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.....	114

Figura 4.1.8 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Lázaro Cárdenas del 19/04/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.	116
Figura 4.1.9 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Morelia del 23/01/2020. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.....	117
Figura 4.1.10 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Nueva Italia del 16/06/2019. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.	119
Figura 4.1.11 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Zitácuaro del 05/04/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.....	120
Figura 4.1.2 Matriz de rotación. Figura tomada de Gül y Takin (2021).	121
Figura 4.1.21 Espectros de desplazamiento (cm) rotados con ángulo α de 0°-90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD00, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con los registros originales de la estación sísmica.	122
Figura 4.1.22 Espectros de pseudo velocidad (cm/s) rotados con ángulo α de 0°-90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con la posición de origen del acelerómetro.....	123
Figura 4.1.23 Espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) rotados con ángulo α de 0°-90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con la posición de origen del acelerómetro.....	123
Figura 4.1.24 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación CMIC.	124
Figura 4.1.25 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación CU.	124
Figura 4.1.26 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación INIRENA.	125
Figura 4.1.27 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación LUZ ALOU.	125
Figura 4.1.28 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s ²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación MEDICINA.	126

Figura 4.1.29 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación PEDREGAL.	126
Figura 4.1.30 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación PSICOLOGÍA.....	127
Figura 4.1.31 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación SAN NICOLÁS.....	127
Figura 4.1.32 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación SCT.	128
Figura 4.1.33 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación UVAQ.	128
Figura 4.1.34 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación VETERINARIA.....	129
Figura 4.2 Código usado para calcular los espectros de Fourier.....	130
Figura 4.3. 1a Cocientes espectrales de los espectros de respuesta de la RSN, todos respecto de la estación INIRENA. PROMEDIO.....	140
Figura 4.3.1b Cocientes espectrales de los espectros de respuesta de la RSN, todos respecto de la estación INIRENA. MEDIANA.....	140
Figura 4.3.2 (a) Ubicación de las estaciones sísmicas usadas en CDMX. (b) Cocientes espectrales en Zona A (suelo duro). (c) Cocientes espectrales en Zona B (suelo de transición). (d) Cocientes espectrales en Zona C (suelo de transición y semiblando). Figuras tomadas de Ruíz y Rodríguez (2020).	142
Figura 4.3.3 Espectros de Fourier sin suavizar (izquierda), y espectros de Fourier suavizados (derecha) con la técnica de Konno y Ohmachi (1998). Ambas figuras muestran los espectros de Fourier de la estación CMIC, componente horizontal en combinación RMS.	144
Figura 4.3.4 Cocientes H/V obtenidos en la estación CMIC.	145
Figura 4.3.5 Cocientes H/V obtenidos en la estación CU.	145
Figura 4.3.6 Cocientes H/V obtenidos en la estación INIRENA.	146
Figura 4.3.7 Cocientes H/V obtenidos en la estación Luz Alou.	146
Figura 4.3.8 Cocientes H/V obtenidos en la estación Medicina.	146
Figura 4.3.9 Cocientes H/V obtenidos en la estación Pedregal.	147
Figura 4.3.10 Cocientes H/V obtenidos en la estación Psicología.	147
Figura 4.3.11 Cocientes H/V obtenidos en la estación San Nicolás.	147
Figura 4.3.12 Cocientes H/V obtenidos en la estación SCT.	148

Figura 4.3.13 Cocientes H/V obtenidos en la estación UVAQ.	148
Figura 4.3.14 Cocientes H/V obtenidos en la estación Veterinaria.	148
Figura 4.3.15 Localización de Sondeos de pruebas de penetración estándar. Figura tomada de ISSGEO (2021).	150
Figura 4.3.16 Distancia entre los sondeos de penetración estándar y la estación de la RSN más cercana.	151
Figura 4.3.17 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	152
Figura 4.3.18 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	153
Figura 4.3.19 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 03; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	154
Figura 4.3.20 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 04; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	155
Figura 4.3.21 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 05; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	156
Figura 4.3.22 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 06; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) Perfil de velocidades de onda (m/s).	157
Figura 4.3.23 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 07; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	158
Figura 4.3.24 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021).	159
Figura 4.3.25 Localización de Sondeos de pruebas de penetración estándar. Figura tomada de SIObl (2012).	160
Figura 4.3.26 Distancia entre los sondeos de penetración estándar y las estaciones de la RSN más cercanas.	160
Figura 4.3.27 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SE-01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	161
Figura 4.3.28 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SE-02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	162
Figura 4.3.29 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	163
Figura 4.3.30 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	164
Figura 4.3.31 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-03; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	165

Figura 4.3.32 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-04; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	166
Figura 4.3.33 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-05; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	167
Figura 4.3.34 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-06; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	168
Figura 4.3.35 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-07; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	169
Figura 4.3.36 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012).....	170
Figura 4.3.36 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012).....	170
Figura 4.3.37 Ubicación de los sondeos reportados en Mier et al. (1968). Se muestran también las estaciones de la RSN para ver la cercanía que hay entre los sondeos y estaciones.	171
Figura 4.3.38 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-1; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	172
Figura 4.3.46 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-9; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	180
Figura 4.3.47 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-10; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	181
Figura 4.3.48 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-11; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	182
Figura 4.3.49 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-12; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	183
Figura 4.3.50 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-13; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).	184
Figura 4.3.51 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos de Mier et al. (1968).....	185
Figura 4.3.52 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021). La línea gruesa es la media geométrica. El pico máximo se encuentra a una frecuencia de 4.29 Hz.	188

Figura 4.3.53 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012). La línea gruesa es la media geométrica. El pico máximo se encuentra a una frecuencia de 8.62 Hz.	189
Figura 4.3.54 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos de las diferentes zonas reportadas en Mier et al. (1968).	189
Figura 4.3.55 Espectros de respuesta promedio en superficie libre usando todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021) y espectros promedio de los registros de las estaciones de PSICOLOGÍA y de INIRENA (suelo firme).	190
Figura 4.3.56 Espectros de respuesta promedio en superficie libre usando todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012) y espectros promedio de los registros de las estaciones LUZ ALOU e INIRENA (suelo firme).	190
Figura 4.3.57 Relación H/V de los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012), y de la medición de vibración ambiental.	193
Figura 4.4.1 Mapa de isoperíodos de vibrar del suelo (T_s) de los diferentes suelos de las estaciones sísmicas de la RSN.	194
Figura 4.4.2 Localización de mediciones y sondeos reportados en Jara et al. (1994). ..	196
Figura 4.4.3 Curvas de isoperíodos reportadas en Jara et al. (1994).	196
Figura 4.4.4 Zonificación sísmica reportada en Jara et al. (1994).	197
Figura 4.4.5 Curvas de isoperíodos reportadas. Modificada de Jara et al. (1994).	197
Figura 4.4.5 Curvas de isoperíodos calculados con base en los sondeos reportados en Mier et al. (1968).	198
Figura 4.4.6 Curvas de isoperíodos calculados con base en los sondeos reportados en Mier et al. (1968).	199
Figura 5.1.4 Zonas de fallas superficiales. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	201
Figura 5.1.5 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	201
Figura 5.1.3 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	201
Figura 5.1.1 Zonas de subducción. Temblores $M_w < 7$. Circulo denota el radio de 500 km de la ciudad de Morelia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	201
Figura 5.1.2 Zonas de subducción. Temblores característicos $M_w > 7$. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	201
Figura 5.1.3 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	202
Figura 5.1.4 Zonas de fallas superficiales. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	202
Figura 5.1.5 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	203

Figura 5.2.1 Epicentros de temblores costeros de $4 < M_w < 7$ de 1900 - 2022. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.	206
Figura 5.2.5 Epicentros de temblores superficiales del EVTm de 1858 – 2012 reportados por Bayona, Suárez y Ordaz (2017). Figura tomada de Bayona, Suárez y Ordaz (2017).	206
Figura 5.2.4 Epicentros de temblores superficiales de $M_w > 4$ de 1975 – 2022.	206
Figura 5.2.3 Epicentros de temblores intraplaca de $M_w > 4$ de 1900 – 2022.....	206
Figura 5.2.2 Epicentros de temblores característicos de $M_w > 7$ de 1900 - 2022. La numeración con borde negro denota la magnitud de los temblores, con borde azul la numeración de la fuente.	206
Figura 5.2.3 Epicentros de temblores intraplaca de $M_w > 4$ de 1900 – 2022.....	207
Figura 5.2.4 Epicentros de temblores superficiales de $M_w > 4$ de 1975 – 2022.	207
Figura 5.2.5 Epicentros de temblores superficiales del EVTm de 1858 – 2012 reportados por Bayona, Suárez y Ordaz (2017). Figura tomada de Bayona, Suárez y Ordaz (2017).	208
Figura 5.2.6 Modelo de la fuente sísmica de subducción Michoacán-Guerrero. Proceso de Gutenberg y Richter en el software R-CRISIS.	210
Figura 5.2.7 Modelo de la fuente sísmica de subducción Michoacán. Proceso de temblor característico en el software R-CRISIS.....	210
Figura 5.3.3 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997) para el caso más desfavorable para una fuente de fallamiento local.	211
Figura 5.3.1 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de Arroyo et al. (2010) para el caso más desfavorable para una fuente de subducción.....	211
Figura 5.3.2 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de García et al. (2005) para el caso más desfavorable para una fuente de profundidad intermedia.....	212
Figura 5.3.3 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997) para el caso más desfavorable para una fuente de fallamiento local.	212
Figura 5.4.1 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 100 años.....	214
Figura 5.4.3 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 475 años.....	214
Figura 5.4.6 Espectros de Peligro Uniforme en Roca para los diferentes períodos de retorno.	214
Figura 5.4.5 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 2500 años.....	214
Figura 5.4.4 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 1000 años.....	214

Figura 5.4.2 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 250 años.....	214
Figura 5.4.3 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 475 años.....	215
Figura 5.4.4 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 1000 años.....	215
Figura 5.4.5 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos Te. La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 2500 años.....	216
Figura 5.4.6 Espectros de Peligro Uniforme en Roca para los diferentes períodos de retorno.....	216
Figura 5.4.7 Espectros de Peligro Uniforme en Roca para un período de retorno de 100 años y una vida útil de 10 años.....	217
Figura 5.4.7 Densidad lognormal para los cocientes espectrales de la estación CMIC para PGA.....	218
Figura 5.4.8 Densidad lognormal para los cocientes espectrales de la estación CMIC para PGA.....	221
Figura 5.4.9 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 100 años.....	222
Figura 5.4.11 Espectros de Peligro Uniforme las diversas zonas de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 475 años.....	222
Figura 5.4.11 Espectros de Peligro Uniforme las diversas zonas de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 2500 años.....	222
Figura 5.4.12 Espectros de Peligro Uniforme las diversas zonas de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 1000 años.....	222
Figura 5.4.10 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 250 años.....	222
Figura 5.4.11 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 475 años.....	223
Figura 5.4.12 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 1000 años.....	223
Figura 5.4.13 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 2500 años.....	224
Figura 5.5.1 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, PGA.....	226
Figura 5.5.2 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.05 s.....	226
Figura 5.5.3 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.1 s.....	227

Figura 5.5.4 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.15 s.....	227
Figura 5.5.5 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.20 s.....	228
Figura 5.5.6 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.25 s.....	228
Figura 5.5.7 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.30 s.....	229
Figura 5.5.8 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.35 s.....	229
Figura 5.5.9 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.40 s.....	230
Figura 5.5.10 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.45 s.....	230
Figura 5.5.11 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.50 s.....	231
Figura 5.5.12 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.75 s.....	231
Figura 5.5.13 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 1 s.....	232
Figura 5.5.14 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 1.5 s.....	232
Figura 5.5.15 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 2 s.....	233
Figura 5.5.16 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 2.5 s.....	233
Figura 5.5.17 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 3 s.....	234
Figura 5.5.18 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 3.5 s.....	234
Figura 5.5.19 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 4 s.....	235
Figura 5.5.20 Espectros de Peligro Uniforme desagregados por fuente sísmica para un Tr de 475 años.....	235
Figura 6.2.1 Contorno de la zona sísmica IA para la ciudad de Morelia.	241
Figura 6.2.2 Contorno de la zona sísmica IB para la ciudad de Morelia.	242
Figura 6.2.3 Contorno de la zona sísmica II para la ciudad de Morelia.	243
Figura 6.2.4 Delimitación de las zonas IB (izquierda) y II (derecha) tomando como base las curvas de isoperíodos del suelo de la ciudad.....	243

Figura 6.3.1 Espectro de diseño elástico para la zona IA con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (T_r) de 475 años.	247
Figura 6.3.2 Espectro de diseño elástico para la zona IB con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (T_r) de 475 años.	248
Figura 6.3.3 Espectro de diseño elástico para la zona II con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (T_r) de 475 años.	248
Figura 6.3.4 Espectros de diseño elástico para las zonas IA y IB y espectros propuestos en CFE (2015) y NTC-RCM (2019) para zona I. T_r 475 años y $\zeta = 5\%$	249
Figura 6.3.5 Espectro de diseño para la zona II y espectro propuesto en NTC-RCM (2019) para zona II. T_r 475 años y $\zeta = 5\%$	250
Figura 6.3.6 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona IA.	251
Figura 6.3.7 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona IB.	251
Figura 6.3.8 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona II.	252
Figura 6.3.9 Espectros de diseño elástico para las tres zonas sísmicas de la ciudad de Morelia. T_r 475 años.	252
Figura 6.4.1 Espectros de respuesta promedios de la estación INIRENA, escalados a los espectros de diseño en roca para un T_r de 475, 1000 y 2500 años.	254
Figura 6.4.2 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	255
Figura 6.4.3 Intensidades de PSA (T_e 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	255
Figura 6.4.4 Intensidades de PSA (T_e 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	256
Figura 6.4.5 Intensidades de PSA (T_e 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	256
Figura 6.4.6 Intensidades de PSA (T_e 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	257
Figura 6.4.7 Intensidades de PSA (T_e 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 475 años.	257
Figura 6.4.8 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.	258
Figura 6.4.9 Intensidades de PSA (T_e 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.	258
Figura 6.4.10 Intensidades de PSA (T_e 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.	259
Figura 6.4.11 Intensidades de PSA (T_e 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.	259

Figura 6.4.12 Intensidades de PSA (Te 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.....	260
Figura 6.4.13 Intensidades de PSA (Te 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.....	260
Figura 6.4.14 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.	261
Figura 6.4.15 Intensidades de PSA (Te 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.....	261
Figura 6.4.16 Intensidades de PSA (Te 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.....	262
Figura 6.4.17 Intensidades de PSA (Te 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.....	262
Figura 6.4.18 Intensidades de PSA (Te 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.....	263
Figura 6.4.19 Intensidades de PSA (Te 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.....	263
Figura 6.5.1 Interfaz gráfica del programa ESDISMO.	266
Figura 6.5.2 Datos generados en el libro de Excel “Espectros diseño.xlsx” al exportar los datos del programa ESDISMO.....	266

Índice de Tablas

Tabla 2.2.1	Coordenadas geográficas de las estaciones de la Red Sísmica Nicolaita.....	55
Tabla 3.1	Sismos registrados en la Red Sísmica Nicolaita en el periodo de 1995-2022 ..	56
Tabla 3.3.1	Acercaciones máximas del suelo PGA de sismos registrados en la RSN. Valores medios cuadráticos (RMS) de PGA.	61
Tabla 3.4.1	Sismos de subducción registrados en la RSN. Se agrupan con magnitudes similares.	68
Tabla 3.4.2.	Sismos de intraplaca registrados en la RSN.	72
Tabla 4.1.1	Espectros de respuesta de media cuadrática de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 1995, La Mira 1996, y La Mira 1997.....	78
Tabla 4.1.2	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 1997, Huetamo 1998, y Cd. Hidalgo 1998.	79
Tabla 4.1.3	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Zihuatanejo 1999, Atoyac 2007, y Petatlán 2014.....	80
Tabla 4.1.4	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 2014, Tecpán 2 2014, y Pinotepa 2018.....	81
Tabla 4.1.5	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Pinotepa 2018, Cd. Hidalgo 2019, y Huetamo 2019.....	82
Tabla 4.1.6	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2019, Pinotepa 2019, y Nueva Italia 2019.	83
Tabla 4.1.7	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Morelia 2020, Coyuca 2020, y Guacamayas 2020.....	84
Tabla 4.1.8	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 2020, Crucecita 2020, y San Marcos 2021.	85
Tabla 4.1.9	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Guacamayas 2021, Coalcomán 2021, y Acapulco 2021.....	86
Tabla 4.1.10	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 2022, Zitácuaro 2022, y Lázaro Cárdenas 2022.....	87
Tabla 4.1.11	Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2022, Morelia 2022, y Petatlán 2022.....	88

Tabla 4.1.12 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 19/09/2022, Tecomán 2022, y Coalcomán 20/09/2022.....	89
Tabla 4.1.13 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 20/09/2022, y Coalcomán 22/09/2022.....	90
Tabla 4.1.14 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 11/12/2022.	91
Tabla 4.1.15 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 1995, La Mira 1996, y La Mira 1997. Componente vertical.....	92
Tabla 4.1.16 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 1997, Huetamo 1998, y Cd. Hidalgo 1998. Componente vertical.	93
Tabla 4.1.17 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Zihuatanejo 1999, Atoyac 2007, y Petatlán 2014. Componente vertical.....	94
Tabla 4.1.18 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 2014, Tecpán 2 2014, y Pinotepa 2018. Componente vertical.	95
Tabla 4.1.19 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Pinotepa 2018, Cd. Hidalgo 2019, y Huetamo 2019. Componente vertical.	96
Tabla 4.1.20 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2019, Pinotepa 2019, y Nueva Italia 2019. Componente vertical.	97
Tabla 4.1.21 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Morelia 2020, Coyuca 2020, y Guacamayas 2020. Componente vertical.....	98
Tabla 4.1.22 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 2020, Crucecita 2020, y San Marcos 2021. Componente vertical.....	99
Tabla 4.1.23 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Guacamayas 2021, Coalcomán 2021, y Acapulco 2021. Componente vertical.	100
Tabla 4.1.24 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 2022, Zitácuaro 2022, y Lázaro Cárdenas 2022. Componente vertical.....	101
Tabla 4.1.25 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2022, y Morelia 2022. Componente vertical.	102

Tabla 4.1.26 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 19/09/2022, Tecomán 2022, y Coalcomán 20/09/2022. Componente vertical.	103
Tabla 4.1.27 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 20/09/2022, Coalcomán 22/09/2022, y Tecomán 23/09/22. Componente vertical.	104
Tabla 4.1.28 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 11/12/2022. Componente vertical.	105
Tabla 4.2.1 Espectros de Fourier de las estaciones de CMIC, CU e INIRENA. Combinación RMS de las componentes horizontales.	131
Tabla 4.2.2 Espectros de Fourier de las estaciones de LUZ ALOU, MEDICINA y PEDREGAL. Combinación RMS de las componentes horizontales.	132
Tabla 4.2.3 Espectros de Fourier de las estaciones de PSICOLOGÍA, SAN NICOLÁS, y SCT. Combinación RMS de las componentes horizontales.	133
Tabla 4.2.4 Espectros de Fourier de las estaciones UVAQ, y VETERINARIA. Combinación RMS de las componentes horizontales.	134
Tabla 4.2.5 Espectros de Fourier de las estaciones de CMIC, CU e INIRENA. Componente vertical.	135
Tabla 4.2.6 Espectros de Fourier de las estaciones de LUZ ALOU, MEDICINA y PEDREGAL. Componente vertical.	136
Tabla 4.2.7 Espectros de Fourier de las estaciones de PSICOLOGÍA, SAN NICOLÁS, y SCT. Componente vertical.	137
Tabla 4.2.8 Espectros de Fourier de la estación UVAQ, y VETERINARIA. Componente vertical.	138
Tabla 4.3.1 Relaciones propuestas entre la velocidad de onda de corte V_s (m/s) y el número de golpes N , de la prueba de penetración estándar.	151
Tabla 4.3.2 Coordenadas de los sondeos reportados en Mier et al. (1968).	171
Tabla 4.3.3 Períodos de vibrar del suelo (T_{vs30}) de los diferentes sondeos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021).	191
Tabla 4.3.4 Períodos de vibrar del suelo (T_{vs30}) de los diferentes sondeos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012).	192
Tabla 4.3.5 Períodos de vibrar del suelo (T_{vs30}) de los diferentes sondeos realizados por Mier et al. (1968).	192
Tabla 4.4.1 Períodos de vibrar del suelo (T_s) y frecuencias fundamentales (F_n) de los diferentes suelos de las estaciones sísmicas de la RSN.	194
Tabla 4.4.2 Períodos de vibrar del suelo (T_s) de las mediciones de vibración ambiental (Jara et al. 1994).	195
Tabla 4.4.2 Períodos de vibrar del suelo (T_s) calculados con base en los sondeos de Mier et al. (1968).	198

Tabla 5.1.1 Fuentes sismogénicas con impacto en Morelia mostradas en las figs. 5.1.1 – 5.1.5.	201
Tabla 5.1.1 Fuentes sismogénicas con impacto en Morelia mostradas en las figs. 5.1.1 – 5.1.5.	203
Tabla 5.2.2 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de temblores característicos.	206
Tabla 5.2.3 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de temblores característicos.	206
Tabla 5.2.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de Gutenberg y Richter.	206
Tabla 5.2.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de Gutenberg y Richter.	208
Tabla 5.2.2 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de temblores característicos.	209
Tabla 5.2.3 Parámetros de sismicidad de las fuentes superficiales locales.	209
Tabla 5.4.1 Valores de la mediana de cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.	219
Tabla 5.4.2 Valores de la desviación estándar de cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.	220
Tabla 5.4.3 Valores del parámetro mediana (primer momento) para la densidad lognormal de los cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.	220
Tabla 5.4.4 Valores del parámetro desviación estándar (segundo momento) para la densidad lognormal de los cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.	221
Tabla 5.5.1 Porcentaje de participación de las fuentes sísmicas que aportan al peligro sísmico de la ciudad de Morelia.	225
Tabla 6.1.1 Valores de λ , ε y τ en función de T_s	238
Tabla 6.1.2 Valores de los períodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño de CFE (2015)	239
Tabla 6.1.3 Valores de la aceleración máxima del terreno y del coeficiente sísmico (1/g), los períodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño de las NTC-RCM (2019).	240
Tabla 6.2.1 Valores de a_0 para las tres zonas sísmicas de Morelia y diferentes períodos de retorno. La segunda columna indica el periodo de retorno; la tercera, el valor de a_0 obtenido a partir del EPU; la cuarta, el valor de la mediana de los espectros ROT_{100} respecto a los espectros de respuesta; la última columna es el valor de a_0 amplificado (producto de la tercera columna por la cuarta).	244
Tabla 6.2.2 Valores de c para las tres zonas de Morelia y los diferentes períodos de retorno	245
Tabla 6.2.3 Valores de T_a , T_b , T_c , r , k y n para las tres zonas de Morelia.	246

Tabla 6.3.1 Porcentajes de incremento de a_0 de los espectros propuestos con respecto a CFE (2015) y NTC-RCM (2019).....	250
Tabla 6.3.2 Porcentajes de incremento de c de los espectros propuestos con respecto de CFE (2015) y NTC-RCM (2019).....	250
Tabla 6.4.1 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 475 años.	254
Tabla 6.4.2 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 1000 años.	254
Tabla 6.4.3 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 2500 años.	254

Objetivo general

Evaluar el peligro sísmico de la Ciudad de Morelia considerando las características del movimiento del terreno en Morelia ante eventos sísmicos registrados, que proporcione las bases para proponer espectros de diseño en la ciudad.

Objetivos particulares

Analizar y procesar los registros sísmicos de la Red Sísmica Nicolaita para determinar las características dinámicas de los suelos de la ciudad con base en la obtención de espectros de respuesta, espectros de Fourier y cocientes espectrales.

Identificar las zonas de mayor y menor amplificación de ondas del terreno, y evaluar las zonas de Morelia más vulnerables ante acciones sísmicas.

Determinar curvas de tasa de excedencia anual y espectros de peligro uniforme en la ciudad de Morelia, incorporando todas las fuentes sísmicas con potencialidad de generar daños en las estructuras.

Introducción

Los terremotos son de los fenómenos naturales que más impactan en el mundo. Causan pérdidas humanas y económicas que pueden llegar a desaparecer comunidades, afectar ciudades y tener consecuencias económicas devastadoras en un país. Los sismos generan el movimiento del suelo que deforma a las estructuras y produce daños que en ocasiones alcanzan el colapso. Por ello, los reglamentos de diseño continuamente se actualizan buscando que se construyan estructuras cada vez más capaces de soportar fenómenos naturales salvaguardando la vida de las personas.

Según cifras de la base de datos sobre eventos de emergencia (EM-DAT) a cargo del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED), de todas las personas afectadas (4,459 millones) por un desastre natural en el período de 1998-2017, el 3% (125 millones) fueron por sismo siendo el cuarto fenómeno natural que mayores víctimas genera, solo por detrás de las inundaciones, sequías y tormentas. En términos del número de víctimas mortales, los temblores son el desastre natural que mayor cobro de vidas tiene. El 56% de pérdida de vidas (747,234 personas) fueron a causa de un terremoto, lo que muestra el alto índice de mortalidad en su relación muertes-personas afectadas. Esto expone la alta vulnerabilidad sísmica que hay en muchas poblaciones que no se encuentran preparadas para enfrentar un sismo.

Existe también un fuerte contraste entre los desastres naturales en países desarrollados y preparados, con los países subdesarrollados y sin cultura sísmica como es el caso de Nueva Zelanda y Haití. En el año 2010 ocurrió un sismo de la misma magnitud (7) en ambos

países; en Haití fallecieron 222,570 personas y 3,400,000 fueron afectadas, mientras que en Nueva Zelanda no hubo víctimas mortales fueron afectadas 300,000 personas. Este ejemplo muestra que es posible mitigar el número de víctimas mortales, de personas afectadas y de pérdidas económicas mejorando la reglamentación, teniendo estricto control de proyectos y construcciones, preparando y manteniendo actualizados a los ingenieros y arquitectos y, en general, mejorando la cultura sísmica de un país.

En el tema de pérdidas económicas ocasionadas por desastres naturales en ese período de 1998-2017, los temblores ocupan el segundo lugar detrás de las tormentas. Se perdieron \$661 millones de dólares estadounidenses en reconstrucción y reparación de daños alrededor del mundo.

Siguiendo con las cifras consultadas en la base de datos EM-DAT, en México en los últimos 120 años por consecuencia de los temblores hubo 4,145,170 de personas afectadas, de las cuales, 118,275 se quedaron sin hogar, 40,980 tuvieron lesiones y 12,180 fallecieron. El sismo del 19 de septiembre de 1985 fue el evento que mayor número de pérdidas humanas causó, un total de 9500 personas. En los últimos 120 años el país tuvo pérdidas económicas de \$ 14,543,400.00 de dólares estadounidenses.

Estos datos muestran la importancia que tiene la ingeniería sísmica en los países con movimientos telúricos. Un estudio de peligro sísmico permite determinar la intensidad esperada en los suelos de un sitio por la ocurrencia de temblores en el futuro. También, proporciona espectros de peligro uniforme que son la base para proponer espectros de diseño que se establecen en los reglamentos para diseñar sísmicamente a las estructuras.

Morelia cuenta con historial sísmico de eventos cercanos a la capital michoacana, como es el sismo del 19 de junio de 1858, un temblor que causó severos daños en Morelia.

Por ello, es importante cuantificar el peligro sísmico esperado en la ciudad de Morelia, para estar mejor preparados ante estos fenómenos. Conocer mejor el comportamiento esperado de los suelos en futuros sismos permitirá contar con parámetros de diseño que garanticen una seguridad mínima de las construcciones y adicionalmente, conducir acciones de prevención ante la ocurrencia de temblores que afecten a la ciudad.

La evaluación de daños estructurales en estructuras sometidas a una excitación sísmica requiere el seguimiento de una metodología que evalúa cuantitativa y cualitativamente la estructura. El contar con una red de instrumentación sísmica en el sitio de evaluación es de gran ayuda para realizar dicha estimación. Gracias a la instrumentación sísmica: se tiene el registro de las coordenadas donde se originó el movimiento (epicentro); se conocen las fuentes sísmicas y sus posibles áreas de ruptura; puede calcularse la energía liberada (Magnitud); genera información valiosa del comportamiento dinámico del suelo. Estos son descubrimientos que han sido grandes avances para la ingeniería sísmica y que son la base de la estimación de peligro sísmico de un sitio.

1. Sismicidad en México y estudios de peligro sísmico

México es uno de los países del mundo con gran actividad sísmica, que ha sido la causa de catástrofes para los mexicanos y derrames económicos en el país. Se encuentra en el perímetro del cinturón de fuego, formado por la división de las placas continentales con las placas oceánicas donde se registran los temblores más fuertes del mundo. Debajo de la placa norteamericana (donde se encuentra México), se introducen las placas de cocos y de Rivera (sub-placas oceánicas) dentro de la corteza del continente. En el norte del país (Baja California norte y sur) existe un deslizamiento lateral de una placa respecto a la otra generando una falla de transformación. Esta falla continúa hacia los Estados Unidos dando origen a la falla de San Andrés.

Los impactos entre las diferentes placas que se encuentran en territorio mexicano son la causa de diversas fuentes sísmicas que afectan a algunas regiones del país.

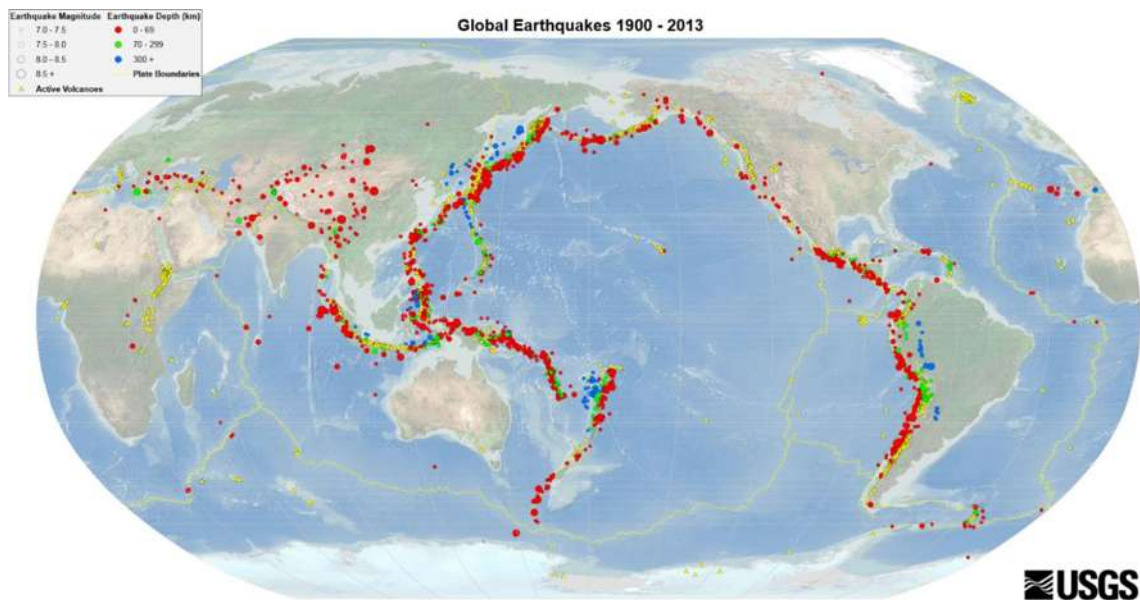


Figura 1.1 Temblores con magnitud > 7.0 en zona de subducción del mundo, que forman el cinturón volcánico. Figura tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_Fuego_del_Pac%C3%ADfico#/media/Archivo:EQs_1900-2013_worldseis.png , consultada el día 22 de agosto del 2021.



Figura 1.2 Mapa de la república clasificado por peligro y vulnerabilidad ante temblores calculado por CENAPRED. Los estados con riesgo alto, son los que se encuentran cercanos a la zona de subducción y a la falla transformante en el caso de Baja California. Tomada de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html> , consultada el día 22 de agosto del 2021.

1.1. Tipos de fuentes sísmicas en México

La subducción de una placa debajo de otra origina los siguientes tipos de fuente sísmica: fallas por subducción, fallas normales y fallas locales. Más adelante se describirá brevemente cada una de estas fuentes sísmicas.

Otra fuente sísmica es la falla de transformación localizada en el norte del país, que se divide en dos grupos de fallas: fallas de borde y fallas peninsulares.

Se ha estudiado recientemente otro tipo de temblores llamados silenciosos. Estos eventos liberan muy poca tensión de la placa continental pero aún existe la incógnita si este tipo de liberación de energía aumenta o disminuye el peligro sísmico.

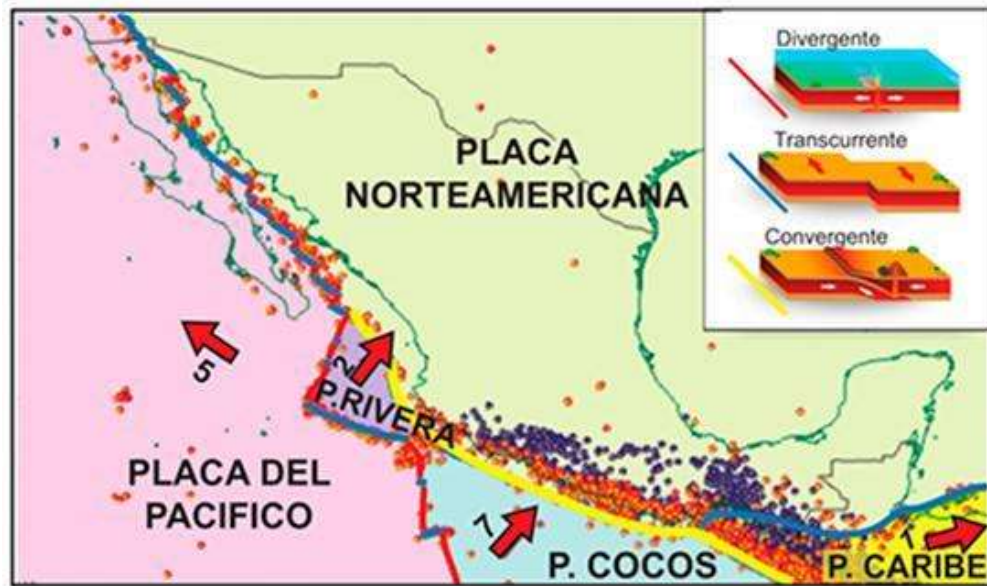


Figura 1.1.1 Interacción de placas en México. Las placas de cocos y de Rivera se deslizan debajo de la placa de Norteamérica. Figura tomada de https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Mapa-de-las-placas-tectonicas-que-interactuan-en-Mexico-Las-flechas-rojas_fig7_336409467 , consultada el día 22 de agosto del 2021.

1.1.1. Fallas por subducción

La placa oceánica se introduce debajo de la placa norteamericana debido a que es de menor espesor que la placa continental. Al momento que la fricción cede entre las dos placas, la corteza es sacudida generando un temblor.

En México las fallas de subducción ocurren al sureste y este del país entre Jalisco y el Golfo de Tehuantepec. Varios investigadores que han estudiado esta zona de subducción del país han llegado a la conclusión de que los movimientos sísmicos se generan en trece subzonas independientes entre sí, y que la magnitud máxima que se puede originar en éstas, considerando el área de ruptura, está limitada a 8.4.

La placa de Rivera tiene un área menor que la placa de cocos. No obstante, el temblor más fuerte de la época reciente del país fue generado en la costa de Jalisco con una magnitud estimada de entre 8.2 y 8.4.

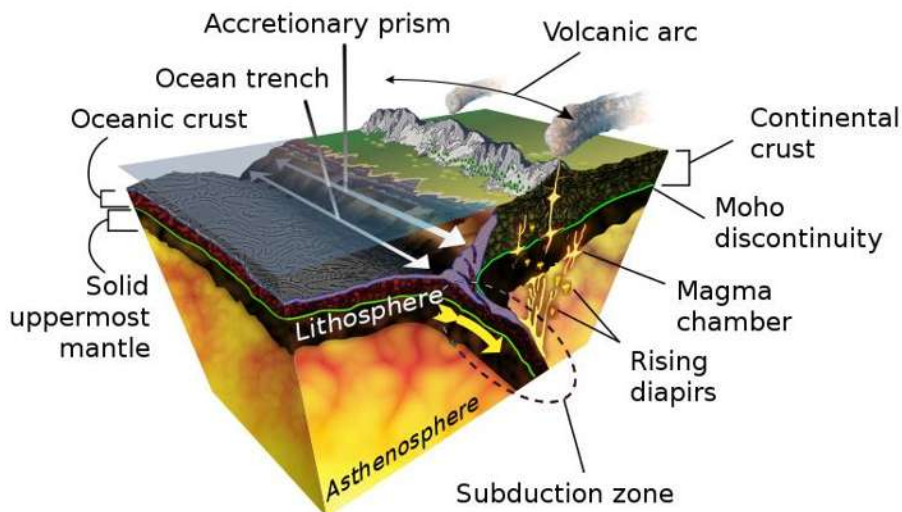


Figura 1.1.2 Frontera de convergencia y su proceso, la placa oceánica se introduce debajo de la placa continental. Figura tomada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Subduction-en.svg> , consultada el día 22 de agosto del 2021.

Temblores históricos de fallas por subducción.

La mayoría de temblores que ocurren en el país son de interplaca, que son los sismos de mayor magnitud por su área de ruptura. La máxima profundidad del hipocentro de los temblores de subducción se encuentra entre 40-50 km. La placa de cocos pierde inclinación y se vuelve casi horizontal dentro del país en la zona de la costa de Guerrero. Por ello, en esta región, los temblores de interplaca pueden ocurrir hasta máximo 150 km dentro del país.

Entre los temblores más catastróficos y de mayor magnitud generados en la fuente sísmica de subducción en el país, se encuentran:

7 de junio de 1911

De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN) el 7 de junio de 1911 misma fecha en que Francisco I. Madero entraba victorioso a la ciudad de México, ocurrió un fuerte temblor de magnitud aproximada de 7.8 en la costa de Michoacán. 116 personas perdieron la vida, destruyó 250 casas, Ciudad Guzmán quedó devastada y dañó iglesias en la CDMX (Silva, L 2019). El epicentro fue estimado en las coordenadas 17°30'N, -102°30'W, y su hipocentro a una profundidad de 33 km.

3 de junio de 1932

Según datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) el terremoto del 3 de junio de 1932 fue localizado en las costas de Jalisco (19.5°N, -104.25°W) a una profundidad de 33 km, con una magnitud de 8.2 convirtiéndose en el sismo de mayor magnitud del siglo XX en el

país. Fue seguido de dos eventos de magnitud 7.8 y 6.9 los días 18 y 22 de junio del mismo año.

Estos sismos son caracterizados por los tsunamis que provocaron al tener su hipocentro bajo el lecho marino.

El evento principal del 3 de junio afectó en demasía a Manzanillo y Cuyutlán provocando la muerte de 400 personas, y centenas de casas dañadas, el movimiento telúrico no fue la causa directa del daño sufrido. Se generó un tsunami provocando inundaciones de 3 m de altura en estos municipios, fue tan grande el tsunami que logro generar mareas altas en Hawái, Sánchez & Farreras (1993).

El sismo del 18 de junio ocurrió en otra área de ruptura a la del evento principal por consiguiente no fue una réplica sino otro evento independiente. Causó graves daños en Tecmán, Colima y Guadalajara, Jalisco.

Sánchez & Farreras (1993) describen los daños de estos sismos y sus tsunamis. Mencionan que el temblor del 22 de junio de 1932 generó un tsunami devastador para Cuyutlán, Colima. Una ola de más de 10 m de altura dejo sin vida a más de 75 personas y más de 100 se reportaron heridas. Los hoteles y todo tipo de construcción cerca de la playa fueron destruidos totalmente.

28 de julio de 1957

Terremoto con epicentro cerca de Acapulco con magnitud 7.8 y coordenadas 17°06'N, -99°06'W. Su hipocentro se localizó a una profundidad de 33 km. Afectó casas y edificios de la Ciudad de México, derribó el Ángel de la Independencia y el pavimento se levantó en algunos sitios de acuerdo con el S.S.N. Según datos de la base de datos del CRED 160 personas fallecieron.

30 de enero de 1973

Temblor de magnitud 7.6 con epicentro en Coalcomán, Michoacán (18°24'N, -103°01'W) presentándose un mecanismo de falla inverso, con una profundidad de 24 km. Se percibió con mayor intensidad en Manzanillo, Colima por esa razón se conoce como “el temblor de Colima de 1973”, Se registraron 56 muertos y cuantiosos daños según un reporte del gobierno local.

14 de marzo de 1979

Sismo en Petatlán, Guerrero con magnitud de 7.6 localizado en las coordenadas 17°45'N, -101°15'46" W, generó daños graves en la Ciudad de México destruyendo la Universidad Iberoamericana y afectó edificios que no soportarían terremotos posteriores como el de 1985.

19 de septiembre de 1985

El temblor del 19 de septiembre de 1985 fue un evento de magnitud 8.1 con epicentro en El Habillal, Michoacán, con coordenadas 18.190°N y -102.533°W y profundidad de 27.9 km. La zona de ruptura fue de 170 km de largo por 50 km de ancho, Sánchez & Farreras (1993).

Desde el “temblor de Madero” de 1911 la costa de Michoacán no liberaba energía suficiente para generar un sismo de gran magnitud, Estas zonas de las placas que son sísmicamente

activas, pero tardan años en liberarse, se les conoce como brechas sísmicas, llamando así a esta zona, antes del temblor de 1985, como la brecha sísmica de Michoacán.

Este evento cobró aproximadamente más de 9500 vidas y afectó a 2,130,204 personas. Dejó pérdidas económicas de aproximadamente \$4,104,000 U.S. Siendo el sismo con mayores pérdidas humanas en la historia reciente del país y por ende el más catastrófico. La ciudad más afectada fue la ciudad de México por las características del tipo de suelo con el que cuenta, así como por la densidad poblacional que hay en la capital del país. Se registraron aceleraciones máximas del terreno en el intervalo de 20-168 gals, siendo la estación de la SCT la de mayor aceleración. El movimiento fue más intenso en la zona IIIb de la ciudad de México, Jara (1986).

Jara (1986) reporta que el período dominante fue de 2–3 seg., afectó a edificios pequeños y medianos, en su mayoría edificios de 3-15 niveles. Se reportaron 265 edificios colapsados o severamente dañados que contaban con problemas de concepción estructural como lo son: torsión, irregularidad en planta y elevación, golpeteo con edificios vecinos, planta baja flexible, y carga viva excesiva.

9 de octubre de 1995

A 10 km al sureste de Manzanillo, Colima ocurrió un temblor de magnitud 8, con epicentro en las coordenadas 18°59'N, -104°14'W e hipocentro a una profundidad de 25 km. Silva, L. (2019) describe que un Tsunami de 5 m de altura dejó miles de damnificados en la costa de Colima y Jalisco, colapso de un hotel de Melaque, se cuartearon edificios históricos en Guadalajara y en Cd. De México se sintió, pero no generó daños.

7 de septiembre de 2021

El Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo de magnitud 7.1 el día 7 de septiembre de 2021, localizado a 11 km al sureste de Acapulco, Guerrero. El hipocentro se localizó en las coordenadas 16.82°N, -99.78°W, a una profundidad de 10 km. Fue sentido en los estados de Guerrero, Morelos, Puebla, Michoacán, Oaxaca, Querétaro, Guanajuato, Estado de México y Ciudad de México con diferentes niveles de intensidad, la mayor intensidad percibida fue cerca del epicentro.



Figura 1.1.3 Epicentros de los terremotos de subducción descritos anteriormente.

1.1.2. Fallas normales

Estas fallas nacen por la introducción de las placas oceánicas debajo de la placa continental. La placa oceánica se desplaza dentro de la placa continental con cierto ángulo de inclinación, adentrándose al país para después fracturarse a profundidades mayores de 45 km, y generar así un temblor, que en ocasiones puede estar cerca de ciudades con alta densidad de habitantes.

En la zona del Estado de Guerrero, existe la peculiaridad de que la placa de cocos (placa subducida) se desplaza horizontalmente por debajo de la corteza continental, a una distancia de 250 km desde la trinchera de la costa hasta el centro del país. Después, la placa se introduce con gran pendiente y se fractura a 500 km de profundidad. Esto fue observado gracias a la instrumentación sísmica del Observatorio de Tectónica de Caltech (TO) en su Experimento de Subducción Mesoamericano (MASE), al realizar una tomografía sísmica con datos de su red sismográfica (MASE). Esto explica porque en esta zona del país, los temblores de intraplaca cercanos a la costa son de poca profundidad, lo que hace que la placa de cocos tenga una geometría inusual. Lo anterior también justifica la orientación del eje volcánico Trans-mexicano, que no es paralelo a la costa del Pacífico.

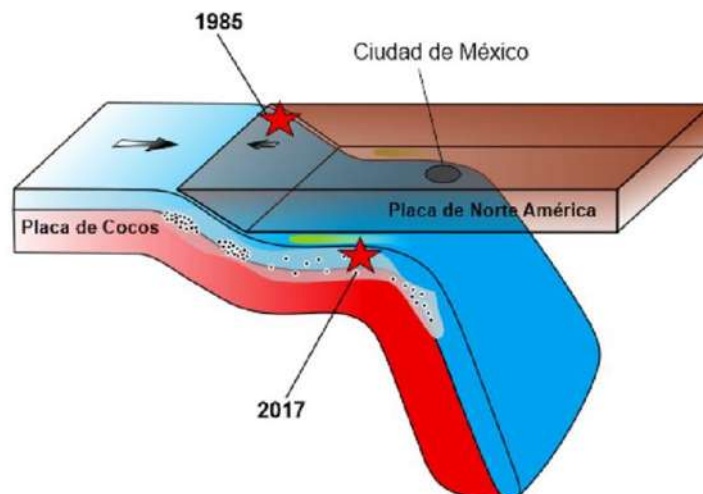


Figura 1.1.4 El sismo de 1985 fue producto de una falla interplaca, el temblor del 2017 fue causa de una falla intraplaca. (Figura tomada de Ferrari, 2017).

Temblores históricos más importantes de fallamiento normal

Los siguientes eventos han sido generados en la fuente sísmica intraplaca.

19 de junio de 1858

Singh et al. (1996) sugieren que el temblor de Morelia en 1858 fue originado en una falla normal cerca del epicentro de los terremotos del 6 de junio de 1964 (Mw 7.3) ($18^{\circ}01'N$, $-100^{\circ}46'W$, H 50 Km) y del 23 de mayo de 1994 (5.7) ($18^{\circ}00'N$, $-100^{\circ}60'W$, H 50 Km). Se concluye lo anterior, después de hacer un análisis con mapas isosísmicos, descartando la falla local por el motivo del decaimiento de las ondas del suelo, que es más acelerado en un foco de poca profundidad que en un foco de profundidad intermedia. Por ello, si el terremoto fuera de falla local, los autores comentan que no se explicarían los daños que sufrió la CDMX.

16 de diciembre de 1911

Temblor de magnitud de 7.5 originado a 36 km al sur de Técpan, Guerrero. El hipocentro fue localizado en las coordenadas $16^{\circ}54'N$, $-100^{\circ}42'W$ a una profundidad de 50 km. Fue el último sismo en presentarse en la brecha de Guerrero, hasta el evento ocurrido recientemente del 7 de septiembre de 2021.

7 de agosto de 1925

En Nueva Italia, Michoacán ocurrió un temblor de magnitud 6.7, con hipocentro ubicado en las coordenadas $19^{\circ}N$, $-102^{\circ}W$ a una profundidad de 100km. Se sintió principalmente en Jalisco y Michoacán, siendo un sismo importante para la ciudad de Morelia debido a la cercanía del epicentro que es de aproximadamente 105 km.

14 de enero de 1931

Un terremoto de magnitud 7.8 que golpeó fuertemente al estado de Oaxaca, con epicentro en Miahuatlán, Oaxaca. El hipocentro se ubicó en las coordenadas 16.34° latitud, -96.87°

longitud, a una profundidad de 40 km. Sigüenza S. (2017) en su relato “Oaxaca. Los eternos segundos de una sismicidad histórica” describe las afectaciones en la población tras este sismo histórico. La mitad de la ciudad de Oaxaca fue destruida, la gente pasó hambre, cólera, miseria y migración masiva especialmente a la Ciudad de México. Las iglesias, casas y los edificios se dañaron gravemente, el cementerio de San Miguel sufrió daños que dejó expuestos los restos de fallecidos por la epidemia del cólera morbus de 1860.

20 de junio de 1942

Un evento de magnitud 6.7 ocurrió a 43 km al norte de Huetamo, Michoacán. El hipocentro fue localizado en las coordenadas 19°N, -101°W a una profundidad de 100 km. El Temblor ocurrió a tan solo 70 km de la ciudad de Morelia y no hay reportes de afectaciones.

06 de julio de 1964

38 km al suroeste de Ciudad Altamirano, Guerrero se presentó un evento sísmico de magnitud 7.2 con hipocentro en coordenadas 18°N, -100°46'W a una profundidad de 55km. Se presentaron intensidades de VII y VIII cerca del epicentro, y en ciudades como Morelia, Chilpancingo, Toluca y Cuernavaca una intensidad de V y VI, aproximadamente.

24 de octubre de 1980

En Acatlán de Osorio ocurrió un temblor de magnitud 7.1 con hipocentro en las coordenadas 18°10'N, -98°13'W a una profundidad de 65 km. De acuerdo con cifras de CENAPRED hubo 35 mil damnificados, y algunos hospitales, iglesias, edificaciones colapsaron. En Huajuapán de León, Oaxaca, 90% de las construcciones tuvieron algún tipo de daño.

7 de septiembre de 2017

El terremoto más grande de fallamiento normal y de todo el país junto al sismo de Jalisco de 1932, fue el del 7 de septiembre del 2017 localizado a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas, con una magnitud de 8.2. El hipocentro tuvo coordenadas 14.761°N y -94.103° W, a una profundidad de 45.9 km y a una distancia de 80 km de la trinchera del pacífico. Afectó principalmente a los estados de Oaxaca y Chiapas, 98 personas fallecieron y hubo pérdidas económicas de aproximadamente 2 millones de dólares estadounidenses.

19 de septiembre de 2017

Terremoto del 19 de septiembre de 2017 en Axochiapan, Morelos. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó el sismo con magnitud de 7.1, localizado a 120 km de la Ciudad de México donde causó daños graves. El hipocentro se localizó a una profundidad de 55 km y a una distancia de 250 km de la trinchera, por lo que lo hace un sismo intraplaca, en las coordenadas 18°19'N, -98°40'W. Según datos de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 369 personas perdieron la vida y 256 millones de personas fueron afectadas por el sismo. De acuerdo con cifras del CRED (Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres), se tuvo una pérdida económica de \$6,000,000 de dólares estadounidenses, por lo que es el temblor que mayor pérdida económica ha generado al país.

En términos estructurales 1,094 edificios fueron catalogados con daño en la Ciudad de México, de los cuales 77 terminaron con daño grave o en colapso (De Anda et al., 2019). Fue un sismo que afectó edificaciones de entre uno y ocho niveles. La zona IIIa de la ciudad

de México fue la más afectada y los espectros de respuesta de este evento resultaron mayores que el espectro de diseño de las NTC-2004 para períodos menores a dos segundos. En las zonas más blandas (IIlc y IIId) la respuesta fue menor a la del sismo de 1985 (Torres, 2017).

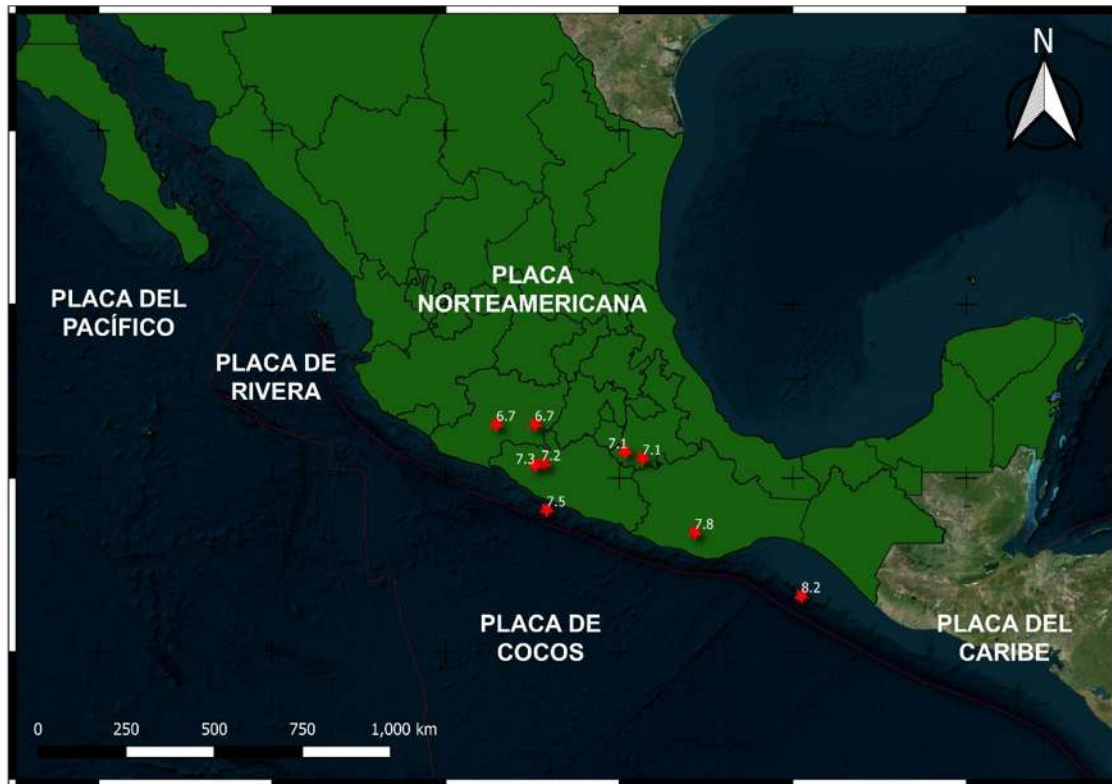


Figura 1.1.5 Epicentros de los temblores de fallamiento normal.

1.1.3. Fallas locales

Los volcanes nacen cuando la placa subducida sufre presiones y temperaturas altas al acercarse al manto, esto ocurre por lo general a 100 km por debajo de la corteza terrestre, generando que el manto expulse magma violentamente. El nacimiento de estos volcanes provoca tensión en la corteza, lo cual genera las fallas locales que son de poca profundidad.

Las fallas de subducción generan ejes volcánicos que por lo general son paralelos a la falla de subducción a unos 100 km hacia el interior de la trinchera. En México existe la peculiaridad de que el Eje Volcánico Trans-mexicano (EVTM) es oblicuo siendo único en el mundo. Esta peculiaridad se da gracias a que la placa de cocos no genera su eje volcánico a 100 km de distancia, lo produce hasta 300 km de la trinchera y como la placa de cocos está en medio de dos placas “normales”, el EVTMT es oblicuo por estas razones. Todo esto se sustenta en la instrumentación del proyecto MASE, mencionada anteriormente.

La corteza se deforma continuamente y en los últimos cinco siglos se han generado siete sismos de magnitud mayor a 6.5, con epicentros, por lo regular, cercanos a ciudades con población densa.

El EVTm se extiende a lo largo de más 1000 km desde el océano pacífico hasta el golfo de México, dividiéndose en occidente, centro y oriente. Las fallas locales, al ser superficiales, suelen producir sismos de menor intensidad. No obstante, esta fuente sísmica generó el segundo temblor que mayores vidas ha cobrado en México, el sismo de Jalapa de 1920.

Existen tres sismos importantes generados por este tipo de fuente: el sismo de Acambay de 1912, el temblor de Jalapa de 1920 y posiblemente el temblor de 1858 ubicado al sur de Morelia.

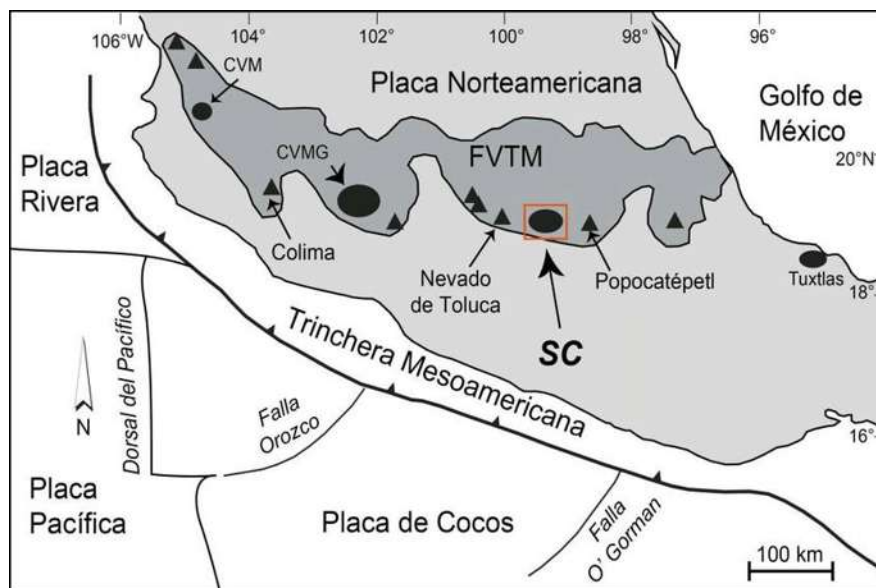


Figura 1.1.6 Delimitación del EVTm, se observa cómo es oblicuo y transversal al país desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. Figura tomada de https://www.researchgate.net/figure/Mapa-general-del-area-de-estudio-FVTm-Faja-Volcanica-Trans-Mexicana-CVM-Campo_fig1_344482565, consultada el día 07 de septiembre del 2021.

Temblores históricos más importantes en el centro del EVTm

En occidente el EVTm se divide en tres graben; graben de Chapala, Ameca-San Marcos y Colima. Existe el historial de dos temblores de magnitud > 6.5 en esta zona del EVTm:

27 de diciembre de 1568

El temblor grande de 1568 que fue nombrado así por Fray Antonio Tello, causó daños a edificios, iglesias y conventos, con una magnitud de 7.2 ± 0.2 y ubicado el epicentro al NO del Lago de Chapala, con coordenadas $20^{\circ}18'N$, $-103^{\circ}17'W$, Suárez et al. (2019).

19 de junio de 1858

El terremoto del 19 de junio de 1858 (terremoto de Santa Juliana). Fue un sismo destructivo que se sintió y causó daños importantes estructuralmente hablando en muchas ciudades del estado de Michoacán; Morelia, Pátzcuaro, Charo, Indaparapeo, Ario de rosales, Tacámbaro, Uruapan, Apatzingán y Los Reyes; así como en la CDMX.

Figueroa (1987) y Suárez et al. (2019) consideran que fue un temblor cortical dentro del EVTMM descartando la fuente de falla normal, ya que Morelia no ha rebasado grandes intensidades MMI > VI ante un evento sísmico de intraplaca. Otra razón es la distancia del epicentro sugerido por Singh et al. (1996), que se encuentra a 200km de ciudades como Morelia y Pátzcuaro generó intensidades estimadas de VIII o mayor. Los sismos con epicentro > 200 km no han afectado en demasía a estas ciudades históricamente además de que ciudades más cercanas al sur de este epicentro no tuvieron intensidades mayores a VI.

Suárez et al. (2019) ubicaron y cuantificaron la magnitud del sismo siguiendo un método de inversión propuesto por Bakun y Wentworth (1997), dando como resultado un epicentro 25 km al sureste de Morelia en Tzitzio, Michoacán (19°30'N, -101°W), y con una magnitud de 7.6 ± 0.3 convirtiéndose en el temblor de mayor magnitud del EVTMM.

No hay completa certeza aún en definir qué tipo de falla fue la causante de este gran sismo, es por eso que en este trabajo se describe este temblor en ambos tipos de fuente, porque de lo que sí hay seguridad es que afectó a la ciudad de Morelia, la ciudad protagonista de este trabajo.

11 de febrero de 1875

El terremoto del 11 de febrero de 1875 fue localizado al noroeste del EVTMM (21°06'N, 103°11'W) con una magnitud de 7.0 ± 0.2 . Generó una destrucción parcial del pueblo de San Cristóbal de la Barranca y causó también daños menores en la ciudad de Guadalajara.

19 de noviembre de 1912

El terremoto del 19 de noviembre de 1912 en Acambay con magnitud de 6.9, tuvo origen en las fallas de la fosa de Acambay en coordenadas 19°36'N, -99°54'W. Generó destrozos en Acambay y causó daños menores en la CDMX, siendo uno de los eventos sísmicos más conocidos del EVTMM.

3 de enero de 1920

Un sismo con magnitud de 6.4, localizado en Xalapa, Veracruz (19.27°N, -97.08°W). Es caracterizado por ser el sismo de corteza que mayores pérdidas humanas causó, según datos del CRED fueron 648 personas las fallecidas tras este evento. Generó graves daños en Xalapa, Veracruz, una avalancha de lodo provocada por el mismo temblor, sepultó varias poblaciones.

22 de febrero de 1979

El sismo del 22 de febrero de 1979 en Maravatío (19°59'N, -100°13'W) es el último temblor de magnitud considerable (5.3) que ha ocurrido en el EVTMM, causando solo daños moderados.

21 de enero de 2020

El Servicio Sismológico Nacional reportó un temblor de magnitud 4 al noroeste de Morelia, en coordenadas 19.8°N, -101.22°W y una profundidad de 5 km.



Figura 1.1.7 Epicentro de temblores de corteza descritos anteriormente.

1.2. Estudios de peligro sísmico

Desde la antigüedad se ha buscado entender la naturaleza de los fenómenos naturales para actuar a tiempo y contar con acciones preventivas ante un posible desastre natural. Con el pasar del tiempo se han logrado predecir varios de estos fenómenos, pero no así con los terremotos en los que existe todavía mucha incertidumbre respecto a su potencialidad, su tiempo de ocurrencia y su localización.

Reconociendo la incertidumbre en el fenómeno, los estudios de peligro sísmico en la actualidad son invariablemente de tipo probabilista. Diversos autores (Esteva, 1967; Cornell, 1968; McGuire, 2004) describen los componentes de la metodología de evaluación probabilística de peligro sísmico (EPPS). El objetivo de estos trabajos es obtener las intensidades esperadas en un sitio por la ocurrencia de futuros sismos, tomando en cuenta: el tipo de fuentes sísmicas que pueden afectar al sitio en estudio, magnitudes de todos los sismos históricos de dichas fuentes, recurrencia de estos eventos, y la distancia entre los epicentros y el sitio en estudio. Un estudio de peligro sísmico arroja como resultado

espectros de peligro uniforme (EPU) para cada tasa de excedencia requerida, o bien su inverso, el periodo de retorno. Los EPU son la base para proponer espectros de diseño para el sitio en estudio, teniendo así parámetros para diseñar sísmicamente las estructuras.

Cuando no existe incertidumbre en las variables asociadas a este fenómeno, se puede realizar un estudio determinista. Sin embargo, aún no hay manera de contar con variables deterministas para el proceso de ocurrencia de sismos. De esta forma un estudio determinista para estimar el peligro sísmico se basa en los valores máximos que las variables pueden alcanzar, como lo es la magnitud máxima y la distancia mínima de la fuente al sitio, obteniendo así el valor máximo de intensidad esperada para el sitio y posteriormente el Espectro Máximo Creíble (EMC). Una de las desventajas de este estudio es que solo proporciona la intensidad máxima, sin dar información del número de veces que esta intensidad puede ser excedida en un lapso de tiempo, en otras palabras, sin poder recurrir al período de retorno que es de mucha utilidad en el diseño sísmico de estructuras.

1.2.1. Metodología para estimar el peligro sísmico

La EPPS es aplicada con la misma metodología alrededor del mundo, solo cambian aspectos que son característicos de cada sitio en particular, como es el modelo de ocurrencia de temblores, la distribución de probabilidad de cada variable aleatoria y las leyes de atenuación (ecuaciones de predicción del movimiento del terreno) (Esteva, 1967; Cornell, 1968; McGuire, 2004).

Como cada país tiene sus características particulares, se describirá la metodología empleada en México, en especial en la parte central-occidente y sur-occidente del país.

Los pasos que se describen a continuación son los pasos definidos en: Jara & Jara (2007); Torres (2015); y García, et al. (2012).

Identificación y localización de fuentes sismogénicas

El primer paso consiste en localizar y caracterizar las fuentes sismogénicas que puedan afectar al sitio en estudio, y se propone una distribución de probabilidad de la distancia que hay entre la fuente y el sitio, por lo general esta distribución, si no se cuenta con más información, es uniforme para cada fuente (ecuación 1.1 y figura 1.2.1).

$$P_R(r | R_s, R_i) = \frac{1}{R_s - R_i} \quad (1.1)$$

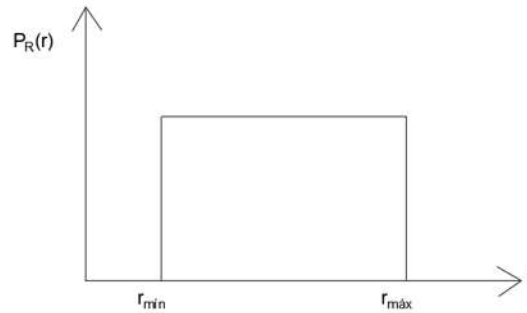


Figura 1.2.1 Distribución de probabilidad uniforme de la distancia de la fuente sísmica al sitio.

Procesos de ocurrencia

Se determina la sismicidad de la fuente haciendo uso de catálogos de registros sísmicos (actuales e históricos) para definir: la densidad de probabilidad de la magnitud de temblores, la frecuencia de los sismos para diferentes magnitudes, su proceso temporal de ocurrencia y su respectiva densidad de probabilidad. Obteniendo así la tasa de excedencia de magnitudes.

La ocurrencia de los temblores regularmente se modela como un proceso Poisson. Gutenberg y Richter (1954) definieron una relación que describe la forma de las tasas de excedencia de la magnitud de temblores en el mundo (ecuación 1.2), a excepción de temblores característicos que más adelante se definirán.

$$\log_{10} N(m) = a - bm \quad (1.2)$$

donde:

$N(m)$ = Tasa anual de excedencia de la magnitud “m”.

a = Logaritmo del número total de sismos que alcanzan o exceden la magnitud m.

b = Pendiente del logaritmo que decae en forma lineal.

Para tener confiabilidad en los datos recopilados de catálogos y para fines de ingeniería, el modelo de Gutenberg-Richter se acota entre un límite inferior y uno superior. El límite inferior considera que el registro de sismos históricos (antes de contar con instrumentos para registrar los temblores) es confiable para magnitudes mayores a 4. El límite superior, aunque no requiere ser acotado, se sabe que la magnitud máxima está condicionada hasta cierto valor dependiente del área de ruptura. De esta manera Cornell y Vanmarcke (1969) proponen el modelo truncado de Gutenberg-Richter que queda definido con la siguiente expresión:

$$\lambda(m) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_u}}{-e^{-\beta m_0} - e^{-\beta m_u}} \quad (1.3)$$

donde:

$\lambda(m)$ = Tasa de excedencia de magnitudes.

λ_0 = Número de temblores con magnitud mayor o igual que m_0 .

β = Pendiente descendente de la curva de tasa de excedencia de magnitudes.

m_0 = Magnitud mínima relevante.

m_u = Magnitud máxima que puede generarse en la fuente.

La distribución de probabilidad (densidad acumulada) de la magnitud es:

$$P_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta m}}{1 - e^{-\beta(m_0 - m_u)}} \quad (1.4)$$

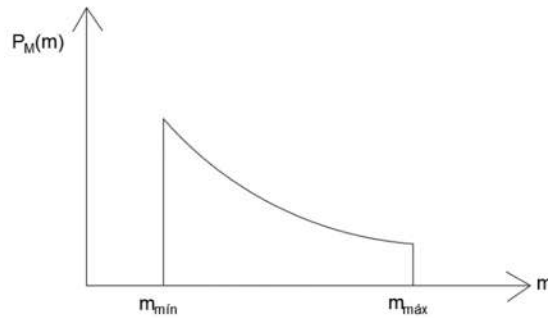


Figura 1.2.2 Distribución de probabilidad exponencial truncada para magnitudes.

El proceso de ocurrencia de Poisson tiene independencia del tiempo, se conoce a este proceso con “falta de memoria”. El tiempo entre temblores tiene distribución exponencial (ecuación 1.5).

$$P_T = [t | \lambda(m)] = \lambda(m) e^{-[\lambda(m)t]} \quad (1.5)$$

El proceso de Gutenberg y Richter (1954) estima muy bien las tasas de excedencia de magnitudes para temblores de subducción acotados en $4 < M < 7$, pero sobrestima la tasa de recurrencia de sismos de magnitud mayor a 7, ya que estos temblores en la zona costera del país son poco frecuentes, esto hace que la pendiente del proceso de ocurrencia

disminuya bruscamente y la distribución de probabilidad no sea exponencial (figura 1.2.2). A estos temblores se les denomina “temblores característicos” (Jara y Rosenblueth, 1988).

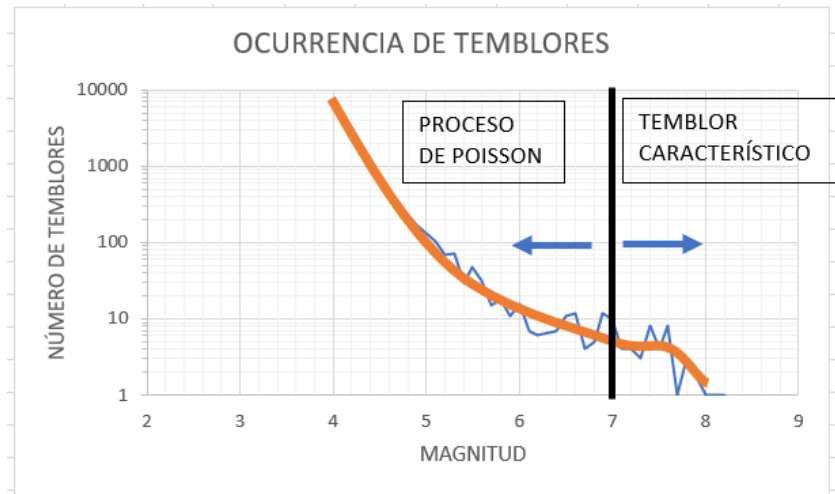


Figura 1.2.3 Proceso de ocurrencia de temblores de subducción en México en el período (1900-2021). Se observa como la ocurrencia de temblores con magnitud mayor a 7 decae bruscamente, truncando la distribución exponencial.

Jara y Rosenblueth (1988) determinaron que entre las densidades de probabilidad lognormal, Weibull, gamma y Gaussiana inversa, la mejor distribución de probabilidad para describir el proceso de los temblores característicos es la lognormal (ecuación 1.6).

$$P_T(t | t_0) = \frac{1}{kt\sqrt{2\pi\sigma_{\ln t}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{\ln t}^2}(\ln t - \ln m_t)^2} \quad (1.6)$$

donde:

$$k = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma_{\ln t}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{\ln t}^2}(\ln t - \ln m_t)^2} \quad (1.7)$$

$P_T(t|t_0)$ = Densidad de probabilidad del tiempo entre temblores dado t_0 .

t = Tiempo entre temblores característicos.

t_0 = Tiempo transcurrido desde la ocurrencia del último temblor característico.

m_t = Mediana del tiempo entre temblores característicos.

$\sigma_{\ln t}$ = Desviación estándar del logaritmo de t .

k = Constante que considera el tiempo t_0 que ha transcurrido en una zona sin generarse un temblor característico.

Existe una relación entre la magnitud esperada y el tiempo transcurrido sin temblar, Jara y Rosenblueth (1988) propusieron la siguiente expresión:

$$E[M | t] = \max(M_0, 5.36 + 0.621 \ln t) \quad (1.8)$$

donde:

$E[M|t]$ = Esperanza de la magnitud del temblor característico dado el tiempo transcurrido desde la última ocurrencia de un temblor característico.

M_0 = Magnitud mínima del proceso del temblor característico.

Gómez (2007) con base en información más actualizada, propone otros valores en los parámetros que definen la esperanza de la magnitud.

$$E[M | t] = \max(M_0, 4.71 + 0.757 \ln t) \quad (1.9)$$

La tasa de excedencia de la magnitud para los temblores característicos es:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\Phi\left[\frac{M_u - EM}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{M - EM}{\sigma}\right]}{\Phi\left[\frac{M_u - EM}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{M_0 - EM}{\sigma}\right]}, M_0 \leq M \leq M_u \quad (1.10)$$

donde:

λ_0 = Número de temblores con magnitud mayor o igual que M_0 .

M_u = Magnitud máxima esperada en la falla.

EM = Esperanza de la magnitud.

M_0 = Magnitud del umbral.

σ = Desviación estándar de la distribución de probabilidad de la magnitud.

Φ = Densidad normal acumulada.

Modelos de atenuación

Para conocer la intensidad del movimiento del suelo (aceleración, velocidad o desplazamiento) en sitios donde se desea evaluar el peligro sísmico, es necesario recurrir a modelos matemáticos que relacionen características del movimiento máximo del suelo con parámetros de la fuente sísmica como la magnitud y distancia epicentral. A estos modelos se les conoce como leyes de atenuación.

Con el fin de estimar con menor incertidumbre la intensidad máxima del suelo ante un evento sísmico se han desarrollado leyes de atenuación para diferentes países y tipos de fuentes sísmicas, en su mayoría para terreno duro. En México las leyes de atenuación más

utilizadas para evaluar el peligro sísmico en la zona centro-occidente y sur-occidente son las siguientes:

Para temblores costeros (subducción), Arroyo et al. (2010) trabajaron con 40 eventos sísmicos costeros registrados en 53 estaciones, obteniendo así una ley de atenuación en roca de SA, haciendo una regresión con el teorema de Bayes (ecuación 1.11). Dicha ley de atenuación es la actualmente usada en el Manual de Obras Civiles (M.O.C.) de la CFE (2015).

$$\ln[SA(T)] = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M_w + \alpha_3(T) \ln \left\{ \frac{E_1[\alpha_4(T)R] - E_1[\alpha_4(T)\sqrt{R^2 + r_0^2}]}{r_0^2} \right\} \quad (1.11)$$

donde,

R = Distancia más cercana del sitio en estudio a la superficie de falla.

M_w = Magnitud de momento sísmico.

α_1 , α_2 , α_3 y α_4 son coeficientes que dependen del periodo en que se esté evaluando SA, descritos en tablas por Arroyo et al. (2010).

r_0 = Radio de la falla circular (ecuación 1.12).

E_1 = Función exponencial integral (ecuación 1.13).

$$r_0 = 1.4447 \times 10^{-5} (e^{3.45387 M_w})^{\frac{2}{3}} \quad (1.12)$$

$$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -\ln(x) - \gamma + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} x^i}{i+1!} \quad (1.13)$$

γ es la constante de Euler, igual a 0.5772156649...

También para temblores de subducción Youngs et al. (1997) presentan una ley de atenuación para los rangos de distancia y magnitud, de 10 a 5 km, y $M > 5$, respectivamente.

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{up} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H \quad (1.14)$$

donde,

y = Aceleración espectral para 5 % de amortiguamiento en función del periodo T.

M = Magnitud de momento sísmico.

r_{rup} = Distancia más cercana a la ruptura (km).

H = Profundidad (km).

Para temblores dentro del continente de profundidad intermedia (intraplaca), Zhao et al. (2006) propusieron un modelo de atenuación para temblores de fallamiento normal y de corteza, recopilando información de registros en Japón (ecuación 1.14). Es la ley de atenuación usada por el M.O.C. (2015) de la CFE para sismos intraplaca.

$$\log_e(y) = aM_w + bx - \log_e(r) + e(h - h_c)\delta_h + S_{SL} \log_e(x) + C_R + n \quad (1.15)$$

donde,

$$r = x + ce^{(dM_w)} \quad (1.16)$$

y = Aceleración espectral para 5 % de amortiguamiento en función del periodo T.

M_w = Magnitud de momento sísmico.

x = Distancia al centroide de la ruptura (km).

h = Profundidad focal (km), cuando $h > 125$ km, $h = 125$ km.

h_c = Profundidad constante de 15 km.

$\delta_h = 1$ cuando $h \geq h_c$ y 0 de lo contrario.

S_{SL} = Término modificado para la trayectoria de magnitud, dependiente del periodo T.

C_R = Coeficiente en función del tipo de suelo, dependiente del periodo T.

n = Variable que toma en cuenta el error para eventos intraplaca.

a, b, c, d y e son constantes determinadas por la regresión para cada periodo T.

Todas las variables son descritas en tablas por Zhao et al. (2006).

También García et al. (2005) obtuvieron una ley de atenuación para temblores intraplaca, con base en un análisis de 16 temblores de fallamiento normal, la expresión se muestra a continuación:

$$\log \gamma = c_1 + c_2 M_w + c_3 R - c_4 \log R + c_5 H + \sigma \quad (1.17)$$

$$R = \sqrt{R_{cld}^2 + \Delta^2} \quad (1.18)$$

donde,

γ = PSA en cm/s^2 .

M_w = Magnitud de momento.

R = distancia promedio a la superficie de falla en kilómetros.

R_{cld} = Distancia mínima a la superficie de falla para temblores con $M_w > 6.5$, o distancia hipo central para el resto de casos.

Δ = término de saturación de fuente cercana, definido por Atkinson & Boore (2003), $0.0075(10)^{0.507-M_w}$.

H = profundidad focal en kilómetros.

$C_{1,2,3,4,5}$ = coeficientes obtenidos del análisis de regresión, definidos por los autores.

$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2}$ desviación estándar residual (variabilidad aleatoria).

σ_r = variabilidad intra evento.

σ_e = variabilidad inter evento.

En el caso de temblores superficiales, el M.O.C. (2015) usa la ley de atenuación propuesta por Abrahamson y Silva (1997), que fue obtenida con base en 853 registros sísmicos (ecuación 1.18).

$$\ln Sa(g) = f_1(M, r_{rup}) + Ff_3(M) + HWf_4(M, r_{rup}) + Sf_s(pga_{rock}) \quad (1.19)$$

donde,

Sa = Aceleración espectral en términos de la gravedad.

M = Magnitud de momento sísmico.

r_{rup} = Distancia mínima a la ruptura (km).

F = Factor de tipo de falla (1 para falla inversa, 0 de lo contrario).

HW y S son variables de efectos del sitio.

Todos los parámetros son descritos en tablas por los autores.

Cuantificación del peligro sísmico

Para calcular la probabilidad de excedencia de una aceleración en el sitio se debe tener recopilada ya toda la información y obtención de todos los parámetros de la fuente, de los procesos de ocurrencia y de las leyes de atenuación. La probabilidad de exceder una aceleración dada $P(A>a)$, se calcula haciendo uso del teorema de probabilidad total (ecuación 1.19).

$$P(A > a) = \int \int \int \int_{A M R T} P_{A|M,R}(a) P_M(m|t) P_R(r) P_T(t) dt dr dm da \quad (1.20)$$

donde:

$P(A>a)$ = Probabilidad que la aceleración A sea mayor que a.

$P_{A|M,R}(a)$ = Densidad de probabilidad de la aceleración dado M y R.

$P_M(m|t)$ = Densidad de probabilidad de la magnitud dado el tiempo de ocurrencia del temblor.

$P_R(r)$ = Densidad de probabilidad de la distancia.

$P_T(t)$ = Densidad de probabilidad del tiempo.

La densidad de la aceleración dada una magnitud y distancia, es por lo regular una distribución lognormal (ecuación 1.20):

$$P_{A|M,R}(a) = \frac{1}{a\sigma_{\ln a}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{\ln a}^2}(\ln a - \ln m_a)^2} \quad (1.21)$$

donde:

a = Aceleración máxima del terreno.

m_a = Mediana de la aceleración.

$\sigma_{\ln a}$ = Desviación estándar del logaritmo de la aceleración.

El peligro sísmico se expresa en términos de la tasa de excedencia, que define el número de veces que en promedio una intensidad es excedida en cierto tiempo. La tasa de excedencia es la probabilidad de excedencia de la aceleración multiplicada por la tasa de ocurrencia anual (ecuación 1.21). Para varias fuentes sísmicas, cada una de ellas se multiplica por un peso P_{ij} (ecuación 1.22), que es función del área de cada fuente sismogénica, para finalmente realizar la suma de todas ellas y obtener la tasa de excedencia en el sitio de estudio (ecuación 1.23).

$$\lambda(A > a) = \nu_i \int \int \int \int_A P_{A|M,R}(a) P_M(m|t) P_R(r) P_T(t) dt dr dmda \quad (1.22)$$

$$\lambda_i(a) = \sum_j P_{ij} \lambda(A > a) \quad (1.23)$$

$$\lambda(a) = \sum_{i=1}^{nf} \lambda_i(a) \quad (1.24)$$

La figura 1.2.4 muestra esquemáticamente el proceso que se sigue para realizar un estudio de peligro sísmico probabilista. Como mínimo se debe llevar a cabo lo siguiente: (1) consultar catálogos de temblores para determinar parámetros de ocurrencia de los eventos sísmicos; (2) analizar registros sísmicos en el lugar de estudio (si existe instrumentación sísmica); (3) determinar características de las fuentes sísmicas que afectan el lugar, obteniendo los parámetros del proceso de ocurrencia de cada fuente; (4) seleccionar leyes de atenuación de los movimiento del terreno o espectrales y finalmente (5) determinar las tasas de excedencia de intensidades del terreno o para diferentes periodos estructurales. El inverso de la tasa de excedencia se conoce como período de retorno y es más utilizado en los códigos de diseño por ser medido en años. Para complementar un estudio de peligro sísmico, se generan espectros de peligro uniforme (EPU) para cada periodo de retorno. Los EPU proporcionan valores espectrales para cada periodo T cuyas ordenadas tienen todas ellas la misma tasa de excedencia y son con frecuencia envolvente de ellos los que se proporcionan en los reglamentos como espectros de diseño.

El procedimiento de su cálculo es por medio de la obtención de tasas de excedencia para cada periodo T en segundos, usando leyes de atenuación de los espectros de respuesta calculados en el sitio de estudio, con base en los registros sísmicos del lugar.

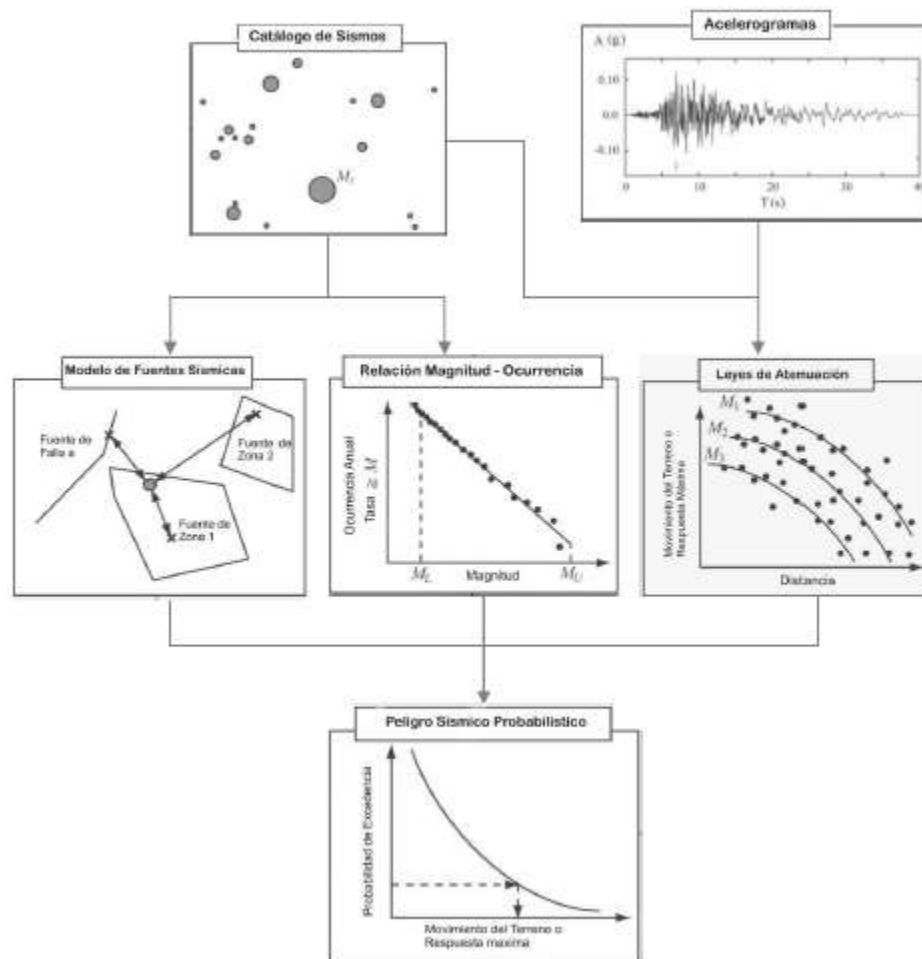


Figura 1.2.4 Procedimiento para determinar el peligro sísmico de un sitio. (Figura tomada de García, A. et al. 2012).

2. Fuentes sísmicas con impacto en Morelia y descripción de la Red Sísmica Nicolaita

2.1. Fuentes sísmicas con impacto en Morelia

Morelia es la capital de uno de los estados con mayor actividad sísmica del país, prueba de ello es el sismo más trágico en México que tuvo epicentro en las costas de Michoacán. Las fuentes sísmicas que impactan a la ciudad de Morelia son las de fallamiento inverso (fuente de subducción), fallamiento normal (temblores intraplaca), fallas superficiales (temblores de corteza) y las fallas locales que se encuentran en la ciudad de Morelia.

Fuente de subducción

Los temblores originados en la fuente de subducción que pueden afectar considerablemente a la ciudad, son en su mayoría los que tienen epicentro en las costas de Michoacán, Jalisco, Colima y Guerrero, debido fundamentalmente a la distancia epicentral de estos eventos con la ciudad de Morelia. Este tipo de temblores son los de mayor frecuencia y magnitud. Morelia se encuentra a distancias de entre 150 y 250 km de estos posibles epicentros, por lo cual la amplitud de las ondas sísmicas se atenúa considerablemente en su trayecto. La figura 2.1.1 muestra un conjunto de 14 subzonas en las que se dividió la zona de subducción del Pacífico mexicano para llevar a cabo el estudio de peligro sísmico del Diseño por Sismo del MOC de la Comisión Federal de Electricidad (MOC, 2015).



Figura 2.1.1 Subzonas de fuentes de subducción en el país.

Fuente intraplaca

Los epicentros posibles de los sismos de fallamiento normal ocurren más cerca de las ciudades del centro del país, por lo tanto, son de mayor peligro para algunas capitales de la República Mexicana. Prueba de ello es el sismo del 19 de septiembre de 2017 que afectó considerablemente a la CDMX. En Morelia, fue percibido con una intensidad de IV y V en la escala de Mercalli modificada. En Michoacán ocurrieron dos sismos de magnitud de 6.7 en el siglo XX (Nueva Italia y Huetamo) a distancias de 105 y 70 km respectivamente de la ciudad de Morelia, no hubo mayores afectaciones, pero se cuenta con ese historial sísmico, convirtiéndose en una fuente potencialmente dañina para la capital del estado.

Otros temblores importantes originados en esta fuente sísmica son: los sismos del; 16 de diciembre de 1911 (Guerrero), 7 de agosto de 1925 (Nueva Italia, Mich.), 14 de enero de 1931 (Oaxaca), 6 de julio de 1964 (Cd. Altamirano, Guerrero), y el 7 de septiembre de 2017 (Pijijiapan, Chiapas).



Figura 2.1.2 Fuentes de intraplaca en el país.

Fuente de corteza (EVTM)

Los temblores que también podrían ocasionar daños a la infraestructura de la ciudad de Morelia y sus alrededores, son los producidos superficialmente en la corteza en fuentes sísmicas originadas por el EVT. Estos terremotos son menos frecuentes que los anteriores y de menor magnitud, sin embargo, por la localización geográfica de estas fuentes, pueden ser peligrosos para varias ciudades del centro de México. Particularmente para la ciudad de Morelia es relevante el sismo del 19 de junio de 1858, que se estima ocurrió a una distancia de 25 km al sureste de Morelia (referencia...). Este temblor afectó zonas del centro histórico de la capital incluyendo algunos templos importantes como la catedral y el exconvento de San Agustín. Si un evento como este ocurriera ahora,

considerando que la ciudad ha crecido exponencialmente, los daños serían mucho mayores.

Algunos otros eventos sísmicos originados en estas fallas son: los sismos del; 27 de diciembre de 1568 (Lago de Chapala), 11 de febrero de 1875 (Jalisco), 19 de noviembre de 1912 (Acambay), y el 22 de febrero de 1979 (Maravatío).



Figura 2.1.3 Fuentes superficiales que afectan a la ciudad de Morelia

Fuentes locales

Localmente la ciudad de Morelia cuenta con siete fallas geológicas, de las cuales dos son potencialmente sísmicas, debido a que cuentan con una orientación similar al sistema de falla Morelia-Acambay. (Garduño-Monroy, et al. 2001). Estas fallas son: la falla de la colina que afecta a varias colonias del norte de la ciudad; y la falla de la paloma localizada al sur de la ciudad (figuras 2.1.4-2.1.5). Garduño-Monroy, et al. (2001) estudiaron y describieron estas dos fallas de la forma siguiente:

La falla de la paloma que se encuentra en dirección E-O con una extensión aproximada de 14 km (Suter, 2016), provoca un desnivel de 200 m entre la mesa de Santa María y la depresión (zona del relieve terrestre situada a una altura inferior que las regiones circundantes) de Morelia. Cerca de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDATU). Se encontró un suelo desplazado 50 cm por una falla normal. En la zona de Ocolusen también se encontraron suelos desplazados por un fallamiento normal. Es considerada falla sísmica por los deslizamientos que ha provocado en la zona de ruptura; en toda la extensión de la falla existen tres deslizamientos importantes: deslizamiento SEDUE, deslizamiento Campestre y de Ocolusen.

La falla de la colina es una estructura geológica de dirección NE-SW con una extensión aproximada de 4.81 km, y ya es considerada como falla de tipo normal por INEGI. Forma un contrapendiente en las lavas del Cerro del Quinceo hacia el SW. Se considera

sísmicamente activa debido a que está cortando a lavas donde se han encontrado restos de edad histórica (Garduño-Monroy, V. et al. 2001).

La falla se prolonga desde la colina hasta manantiales y presenta un hundimiento con tasa vertical de 4 a 6 cm anuales. La zona de influencia es variable; en la zona de Tres puentes-la Colina, es de 20 m hacia ambos lados; en López Mateos, es de 15 m; y en Manantiales de 20 m.

Hasta la fecha, se han demolido 53 casas de Infonavit la Colina y Manantiales, se estima una pérdida de 12 millones de pesos, todo ocasionado por esta falla (Garduño-Monroy, V, et al, 2001).

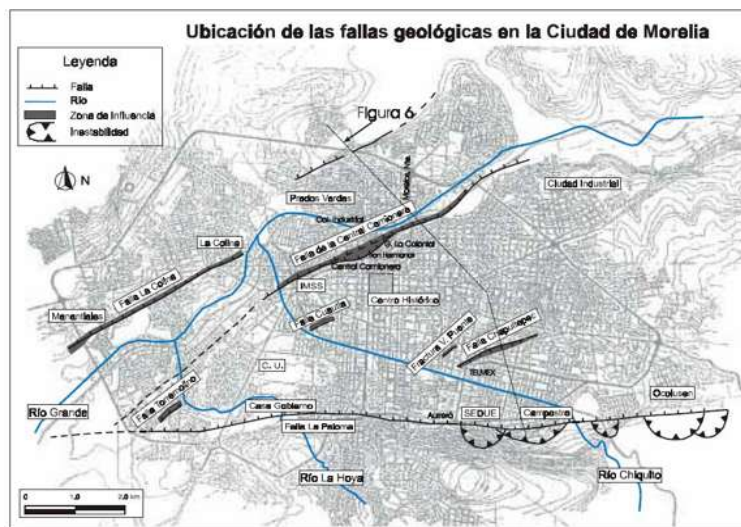


Figura 2.1.4 Mapa de Morelia con ubicación de fallas geológicas. Figura tomada de Garduño-Monroy, et al. (2001).



Figura 2.1.5 Falla de la Paloma. Se puede observar los deslizamientos en el talud, lo que comprueba la presencia de actividad sísmica. Figura modificada de Garduño-Monroy, et al. (2001). Falla de la Colina. Se extiende de NE a SO, con la mancha urbana no es tan notable desde la fotografía satelital. Figura modificada de Garduño-Monroy, et al. (2001).

2.2. Descripción de la Red Sísmica Nicolaita.

Como se mencionó anteriormente, la ciudad de Morelia puede verse afectada por tres potenciales tipos de fallas sísmicas, lo cual la hace una ciudad vulnerable sísmicamente. Para mejorar el conocimiento sísmico de un sitio, una de las primeras acciones que deben realizarse es el contar con instrumentos capaces de registrar los movimientos del terreno durante la ocurrencia de temblores. Morelia cuenta con una de las mejores redes sísmicas del país gracias a la instrumentalización que se concluyó en el año de 2019.

En años pasados ya se contaba con tres acelerómetros localizados en distintos puntos de la ciudad, pero fue hasta el 19 de septiembre del 2019 que se inauguró formalmente la Red Sísmica Nicolaita (RSN) con la adición de siete nuevas estaciones sísmicas localizadas en distintos puntos estratégicos de la ciudad. Para 2022 se incorporó una nueva estación sísmica en el fraccionamiento Villas del Pedregal, siendo ahora 11 estaciones sísmicas en la RSN.

El contar con registros del movimiento del terreno en la ciudad ante distintos sismos, genera una información muy valiosa que coadyuva a reducir las incertidumbres propias de los estudios de peligro sísmico, particularmente en sitios con suelos que no puedan clasificarse como terreno firme.

Instrumentación

La instrumentación consta de consolas modelo Basalto con acelerómetros integrados en tres direcciones ortogonales y con la capacidad de ser consultadas en forma remota. Cuentan con una antena GPS para mantener actualizado el reloj.



Figura 2.2.1 En la parte izquierda se observa la antena GPS y en la derecha la Consola Basalto. (UMSNH).

Ubicación de los instrumentos de la Red Sísmica Nicolaita

La figura 2.2.2 muestra la ubicación de las diez estaciones sísmicas dentro de la ciudad de Morelia, y la tabla 2.1 presenta cada estación con sus coordenadas geográficas de localización.



Figura 2.2.2 Localización de las estaciones de la Red Sísmica Nicolaita en la ciudad de Morelia.

Tabla 2.2.1 *Coordenadas geográficas de las estaciones de la Red Sísmica Nicolaita*

No.	SISMO	COORDENADAS		ELEVACIÓN (M)
		LATITUD	LONGITUD	
1	CMIC	19.685	-101.235	1890
2	CU	19.690	-101.204	1913
3	INIRENA	19.690	-101.250	1900
4	LUZ ALOU	19.690	-101.163	1919
5	MEDICINA	19.695	-101.179	1918
6	PEDREGAL	19.685	-101.304	1952
7	PSICOLOGÍA	19.719	-101.187	1905
8	SAN NICOLÁS	19.703	-101.195	1924
9	SCT	19.711	-101.233	1915
10	UVAQ	19.675	-101.181	2062
11	VETERINARIA	19.697	-101.166	1934

3. Proceso numérico de registros sísmicos de la Red Sísmica Nicolaita.

La Red Sísmica Nicolaita (RSN) como se mencionó en el capítulo anterior es muy joven, sin embargo, las tres estaciones más antiguas de la RSN cuentan con registros de algunos sismos en el periodo de 1995-2014. Para años posteriores a 2019 (año en que se inaugura la RSN) ya se cuenta con registros de sismos de magnitud considerable desde el punto de vista de la ingeniería, en las distintas estaciones de la RSN.

Estos registros sísmicos generan información valiosa con la que se obtienen espectros de respuesta, cocientes espectrales, espectros de Fourier, etc. Todo esto es de suma importancia para el avance en la mitigación del riesgo sísmico de la ciudad de Morelia.

En la tabla 3.1 se presentan los sismos registrados en la RSN con los que se trabajó en este capítulo; se muestra el lugar del epicentro, fecha, coordenadas epicentrales, tipo de fuente sísmica, magnitud de momento M_w y la distancia epicentral a la ciudad de Morelia.

Tabla 3.1 Sismos registrados en la Red Sísmica Nicolaita en el periodo de 1995-2022

No.	LOCALIDAD	FECHA			EPICENTRO			FALLAMIENTO	MAGNITUD M_w	DIST. (KM)	LEY DE ATENUACIÓN
		DÍA	MES	AÑO	LATITUD (N/+)	LONGITUD (W/-)	PROFUNDIDAD (KM)				
1	HUETAMO	20	DICIEMBRE	1995	18.43°	101.16°	30	SUBDUCCIÓN	5.3	140.95	ARROYO et al. (2010)
2	LA MIRA	25	ENERO	1996	18.39°	102.23°	21	SUBDUCCIÓN	5.3	181.33	ARROYO et al. (2010)
3	LA MIRA	11	ENERO	1997	18.34°	102.58°	40	SUBDUCCIÓN	7.1	209.46	ARROYO et al. (2010)
4	PETATLAN	21	DICIEMBRE	1997	17.14°	101.24°	5	SUBDUCCIÓN	5.5	284.48	ARROYO et al. (2010)
5	HUETAMO	20	ABRIL	1998	18.37°	101.21°	66	NORMAL	5.9	147.57	ZHAO et al. (2006)
6	CD. HIDALGO	9	MAYO	1998	14.35°	91.38°	40	SUBDUCCIÓN	5.5	1202.01	ARROYO et al. (2010)
7	ZIHUATANEJO	28	DICIEMBRE	1999	18.02°	101.68°	82	NORMAL	6.1	193.26	ZHAO et al. (2006)
8	ATOYAC	13	ABRIL	2007	17.13°	100.38°	34	SUBDUCCIÓN	5.6	298.38	ARROYO et al. (2010)
9	PETATLAN	18	ABRIL	2014	17.01°	101.46°	18	SUBDUCCIÓN	7.2	300.18	ARROYO et al. (2010)
10	TECPAN	8	MAYO	2014	16.99°	100.92°	10	SUBDUCCIÓN	6.5	302.59	ARROYO et al. (2010)
11	TECPAN	10	MAYO	2014	17.04°	100.89°	10	SUBDUCCIÓN	6.1	297.38	ARROYO et al. (2010)
12	PINOTEPA	16	FEBRERO	2018	16.25°	98.03°	12	SUBDUCCIÓN	7.2	509.52	ARROYO et al. (2010)
13	PINOTEPA	19	FEBRERO	2018	16.25°	97.77°	10	SUBDUCCIÓN	6	528.04	ARROYO et al. (2010)
14	CD. HIDALGO	1	FEBRERO	2019	14.56°	94.48°	62	NORMAL	6.5	1089.02	ZHAO et al. (2006)
15	HUETAMO	3	MARZO	2019	18.38°	101.44°	10	SUBDUCCIÓN	5.6	148.68	ARROYO et al. (2010)
16	ALTAMIRANO	21	MARZO	2019	18.25°	101.02°	63	NORMAL	4.8	162.05	ZHAO et al. (2006)
17	PINOTEPA	22	ABRIL	2019	16.00°	98.55°	7	SUBDUCCIÓN	5.5	497.93	ARROYO et al. (2010)
18	NVA ITALIA	16	JUNIO	2019	18.55°	101.75°	10	SUBDUCCIÓN	5.2	140.06	ARROYO et al. (2010)
19	MORELIA	21	ENERO	2020	19.80°	101.22°	5	LOCAL	4	12.15	ABRAHAMSON et al. (1997)
20	COYUCA	30	ENERO	2020	16.68°	100.23°	17	SUBDUCCIÓN	5.3	350.94	ARROYO et al. (2010)
21	GUACAMAYAS	12	FEBRERO	2020	18.34°	101.84°	66	NORMAL	4.7	379.59	ZHAO et al. (2006)
22	PETATLÁN	6	MARZO	2020	17.29°	101.36°	12	SUBDUCCIÓN	5	268.29	ARROYO et al. (2010)
23	CRUCECITA	23	JUNIO	2020	15.57°	96.09°	5	SUBDUCCIÓN	7.5	710.20	ARROYO et al. (2010)
24	SAN MARCOS	19	MARZO	2021	16.48°	98.93°	10.7	SUBDUCCIÓN	5.7	430.95	ARROYO et al. (2010)
25	GUACAMAYAS	29	ABRIL	2021	18.20°	102.20°	9.5	SUBDUCCIÓN	4.9	187.49	ARROYO et al. (2010)
26	COALCOMÁN	10	MAYO	2021	18.68°	102.72°	66.5	NORMAL	5	116.34	ZHAO et al. (2006)
27	ACAPULCO	7	SEPTIEMBRE	2021	16.76°	99.95°	15	SUBDUCCIÓN	7.1	328.07	ARROYO et al. (2010)
28	HUETAMO	3	ENERO	2022	18.43°	101.11°	47	NORMAL	4.6	144.59	ZHAO et al. (2006)
29	ZITÁCUARO	5	ABRIL	2022	19.35°	100.67°	5	LOCAL	4.4	67.57	ABRAHAMSON et al. (1997)
30	LÁZARO CARDENAS	19	ABRIL	2022	17.77°	101.9°	15	SUBDUCCIÓN	5	226.70	ARROYO et al. (2010)
31	ALTAMIRANO	12	AGOSTO	2022	18.28°	100.98°	56	NORMAL	5.1	159.60	ZHAO et al. (2006)
32	MORELIA	13	AGOSTO	2022	19.74°	101.09°	5	LOCAL	4	12.58	ABRAHAMSON et al. (1997)
33	PETATLÁN	13	SEPTIEMBRE	2022	17.45°	100.99°	28	SUBDUCCIÓN	5	250.75	ARROYO et al. (2010)
34	COALCOMÁN	19	SEPTIEMBRE	2022	18.22°	103.29°	15	SUBDUCCIÓN	7.7	273.55	ARROYO et al. (2010)
35	TECOMÁN	20	SEPTIEMBRE	2022	18.27°	103.74°	13	SUBDUCCIÓN	5.8	309.81	ARROYO et al. (2010)
36	COALCOMÁN	20	SEPTIEMBRE	2022	17.98°	103.21°	16	SUBDUCCIÓN	4.8	284.16	ARROYO et al. (2010)
37	COALCOMÁN	20	SEPTIEMBRE	2022	18.14°	103.25°	12	SUBDUCCIÓN	5.4	275.73	ARROYO et al. (2010)
38	COALCOMÁN	22	SEPTIEMBRE	2022	18.01°	103.18°	12	SUBDUCCIÓN	6.9	279.57	ARROYO et al. (2010)
39	TECOMÁN	23	SEPTIEMBRE	2022	18.36°	103.76°	10	SUBDUCCIÓN	5.2	308.11	ARROYO et al. (2010)
40	TECPÁN	11	DICIEMBRE	2022	17.13°	100.64°	14.1	SUBDUCCIÓN	6	291.52	ARROYO et al. (2010)



Figura 3.1 Ubicación de los sismos registrados en la RSN.

3.1. Corrección por línea base.

Para utilizar la información registrada por los acelerógrafos se deben hacer varias correcciones, una de ellas es la corrección por línea base. El objetivo es cumplir con el requerimiento físico de obtener un registro con desplazamiento y velocidad final nulos al terminar el evento sísmico.

Para este procedimiento todos los registros en sus componentes N-S, E-O y vertical fueron corregidos por línea base haciendo uso de Matlab donde se generó un algoritmo para el ajuste polinomial de grado 2. En la figura 3.1.1. se muestra dicho algoritmo, y en la figura 3.1.2. Se muestran las gráficas de la comparativa de aceleración, velocidad y desplazamiento corregida y sin corregir para el sismo de Coalcomán del 19 de septiembre del 2022 en la componente N-S de la estación de Ciudad Universitaria, Morelia.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - disp('CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE DE REGISTROS')
4 - disp('ESCRIBA LOS DATOS DEL REGISTRO SÍSMICO EN EL ARCHIVO REGISTROS.xlsx DE EXCEL')
5
6 - %LECTURA DE REGISTROS
7 - t=xlsread('REG_ACAPULCO 07-09-2021.xlsx','REGISTRO','A3:A100000');
8 - a=xlsread('REG_ACAPULCO 07-09-2021.xlsx','REGISTRO','B3:B100000');
9 - dt=t(2)-t(1);
10 - tf=size(t);
11 - %Polinomio grado 2 para la corrección
12 - pcel=polyfit(t,a,2);
13 - A0=pcel(1)*t.^2+pcel(2)*t+pcel(3);
14 - %Aceleración corregida
15 - ACORR=a-A0;
16 - xlsxwrite('REG_ACAPULCO 07-09-2021.xlsx',ACORR,'REGISTRO','G3:G100000');
17 - V(1,1)=0;
18 - D(1,1)=0;
19 - for i=1:tf-1
20 -     V(i+1)=V(i)+a(i)+a(i+1)*(dt/2); %Velocidad sin corregir
21 -     D(i+1)=D(i)+V(i)*dt+a(i)*(dt^2/3)+a(i+1)*(dt^2/6); %Desplazamiento sin corregir
22 - end
23
24 - VCORR(1,1)=0;
25 - DCORR(1,1)=0;
26 - for i=1:tf-1
27 -     VCORR(i+1)=VCORR(i)+(ACORR(i)+ACORR(i+1)*(dt/2)); %Velocidad corregida
28 -     DCORR(i+1)=DCORR(i)+VCORR(i)*dt+(ACORR(i)*(dt^2/3)+ACORR(i+1)*(dt^2/6)); %Aceleración corregida
29 - end
30
31 - figure
32 - subplot(3,1,1);
33 - plot(t,ACORR,'r');
34 - hold on;
35 - plot(t,a,'g');
36 - xlabel('Tempo (s)')
37 - ylabel('a(cm/s^2)')
38 - title('Historia de aceleraciones');
39 - grid on;
40 - legend('Acel corregida','Acel No corregida')
41 - subplot(3,1,2);
42 - plot(t,VCORR,'r');
43 - hold on;
44 - plot(t,V,'g');
45 - xlabel('Tempo (s)')
46 - ylabel('v(cm/s)')
47 - title('Historia de velocidades');
48 - grid on;
49 - legend('Vel corregida','Vel No corregida')
50 - subplot(3,1,3);
51 - plot(t,DCORR,'r');
52 - hold on;
53 - plot(t,D,'g');
54 - xlabel('Tempo (s)')
55 - ylabel('d(cm)')
56 - title('Historia de desplazamientos');
57 - grid on;
58 - legend('Desp corregido','Desp No corregido')

```

Figura 3.1.1 Algoritmo de corrección por línea base polinomial de grado 2.

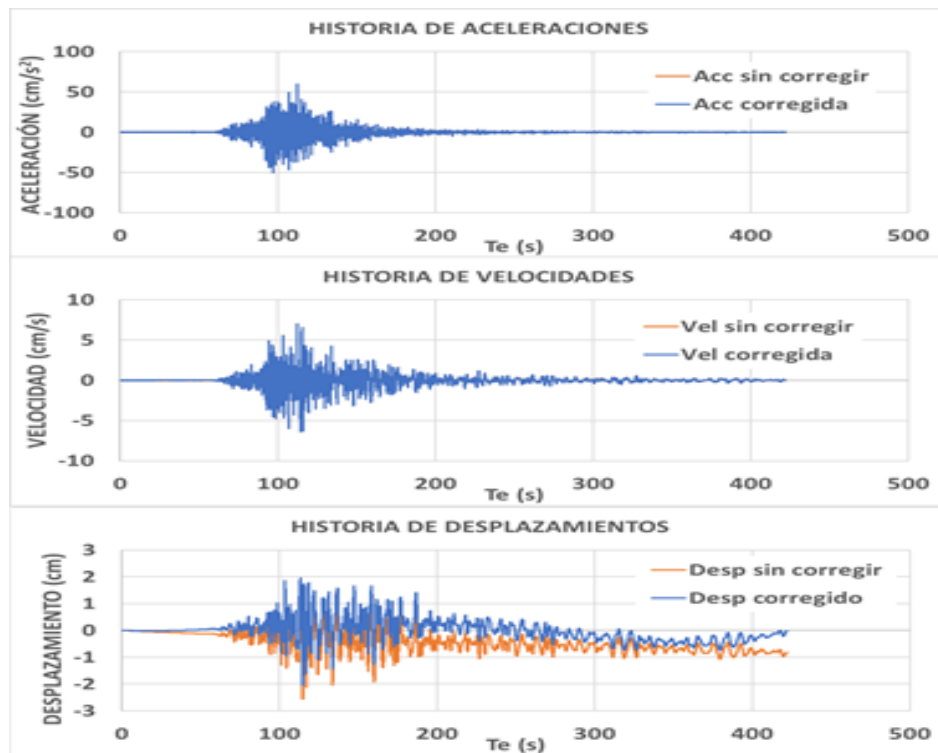


Figura 3.1.2 Aceleración, velocidad y desplazamiento corregido y sin corregir de la componente N-S, de la estación CMIC, del sismo de Coalcomán del 19 de septiembre del 2022. Se observa cómo es notoria en los desplazamientos la corrección.

3.2. Filtrado de registros.

Las redes sísmicas como la RSN se localizan en ocasiones en sitios cercanos a vialidades o calles donde el tráfico de automóviles y camiones es intenso. Cuando el umbral de disparo es bajo, los instrumentos registran este ruido en cierto intervalo de frecuencias que generalmente se presenta para frecuencias altas mayores que 15 Hz ($T=0.07s$). Para eliminar esta información de los registros, se recurre a un filtrado del tipo Butterworth de pasa bajas para frecuencias de 15-20 Hz. Esto significa que al aplicar al registro original este filtro, se eliminan las frecuencias mayores al valor seleccionado, quitando del registro el ruido producido por el paso de vehículos. La figura 3.2.1 muestra un registro sin filtrar y un registro modificado al aplicar un filtro pasa baja para una frecuencia $f=15$ Hz.

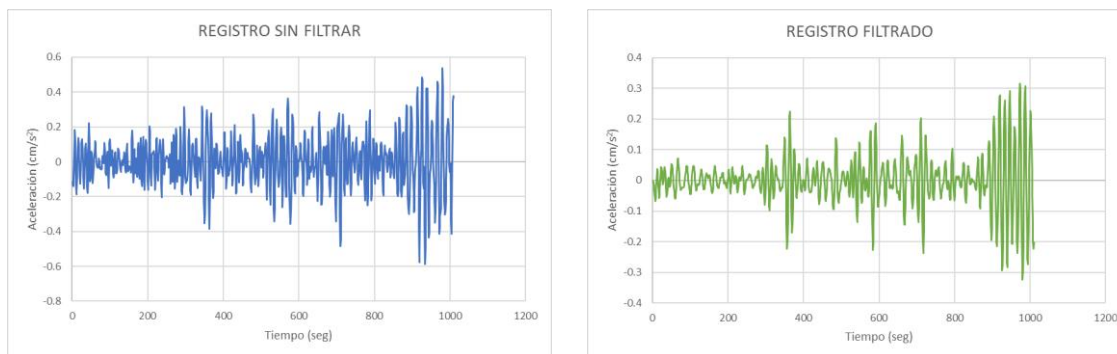


Figura 3.2.1 Comparación entre un registro sin filtrar y filtrado. Se observa como el registro original cuenta con demasiado ruido en tiempos bajos, lo que se puede considerar como movimiento ajeno al sismo, del lado derecho se muestra el mismo registro filtrado para 15 Hz, donde se elimina en gran parte el ruido ajeno al sismo. El registro usado es del sismo de Petatlán del 06 de abril del 2020 para la estación de Luz Alou en su componente Norte – Sur.

3.3. Aceleraciones máximas del suelo PGA.

Las aceleraciones máximas del suelo (PGA) registradas en la RSN son relativamente pequeñas a excepción de dos sismos que hasta el momento han sido los que mayor intensidad han generado en la ciudad de Morelia, estos sismos son: sismo de Acapulco del 7 de septiembre del 2021, de subducción de magnitud $M_w=7.1$, terremoto que se registró exitosamente en diez estaciones sísmicas de la RSN; el segundo sismo fue el de Coalcomán del 19 de septiembre del 2022, de subducción de magnitud $M_w=7.7$, movimiento registrado en las once estaciones de la RSN (tabla 3.3.1).

El valor máximo de PGA de la tabla 3.3.1 corresponde al sismo de Coalcomán para la estación sísmica del CMIC. Como comparación, la estación CMEN (localizada en coordenadas 19.29°N , -99.10° , en la colonia Xochimilco, zona III d de la Ciudad de México) del Instituto de Ingeniería de la UNAM tuvo un PGA de 46.07 gals (IINGEN, 2022), la cual es menor a la registrada en CMIC de 57.35 gals. El temblor de Coalcomán mostró amplificaciones del movimiento del suelo donde se encuentra la estación sísmica del CMIC, ya que las demás estaciones registraron valores de PGA cercanos a 10 gals.

Tabla 3.3.1 Aceleraciones máximas del suelo PGA de sismos registrados en la RSN. Valores medios cuadráticos (RMS) de PGA.

No.	SISMO	MEDIA CUADRÁTICA PGA ^{MÁX} (CM/S ²)										
		CMIC	CU	INIRENA	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
1	HUETAMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.48	-
2	LA MIRA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.09	-
3	LA MIRA	-	14.65	-	10.92	-	-	-	-	-	-	-
4	PETATLAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.18	-
5	HUETAMO	-	6.00	-	-	-	-	-	-	-	12.28	-
6	CD. HIDALGO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.74	-
7	ZIHUATANEJO	-	4.25	-	-	-	-	-	-	-	7.84	-
8	ATOYAC	-	2.85	-	-	-	-	-	-	-	4.95	-
9	PETATLAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.71	-
10	TECPAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.38	-
11	TECPAN	-	5.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	PINOTEPA	-	7.50	-	4.23	5.61	-	-	-	-	4.69	-
13	PINOTEPA	-	1.00	-	-	0.72	-	-	-	-	0.65	-
14	CD. HIDALGO	0.46	0.48	0.28	-	0.56	-	-	-	-	-	-
15	HUETAMO	3.16	1.21	0.76	-	1.11	-	1.72	0.91	0.61	0.93	0.99
16	ALTAMIRANO	1.12	0.52	0.21	-	0.60	-	0.80	0.46	-	0.41	0.40
17	PINOTEPA	0.72	0.48	0.20	1.11	0.83	-	-	-	-	-	-
18	NVA ITALIA	3.88	1.28	0.97	1.27	1.45	-	1.94	1.21	0.85	1.33	0.87
19	MORELIA	0.60	1.84	-	2.37	2.33	-	0.36	0.53	-	0.55	1.48
20	COYUCA	0.54	0.46	0.21	-	0.40	-	0.48	-	0.20	-	-
21	GUACAMAYAS	1.11	0.60	0.18	-	0.50	-	1.45	0.83	0.19	0.55	0.62
22	PETATLÁN	-	0.47	0.30	1.22	0.57	-	0.80	-	0.27	0.42	0.51
23	CRUCECITA	-	5.79	5.78	2.59	5.14	-	3.71	5.81	4.11	4.31	3.36
24	SAN MARCOS	-	0.91	0.38	1.43	0.90	-	0.93	0.51	0.49	0.53	0.47
25	GUACAMAYAS	0.98	0.61	0.21	0.97	0.53	-	0.80	0.53	0.25	0.59	0.44
26	COALCOMÁN	0.89	0.45	0.21	-	0.43	-	-	-	0.23	-	-
27	ACAPULCO	30.85	11.16	4.65	7.12	11.74	-	9.75	7.79	6.62	10.64	7.28
28	HUETAMO	1.82	0.32	0.22	1.35	-	-	-	1.51	0.11	-	-
29	ZITÁCUARO	4.93	2.32	0.66	4.51	3.65	-	2.35	3.10	0.74	1.90	1.63
30	LÁZARO CARDENAS	7.25	1.23	1.09	1.79	1.68	-	-	1.13	1.02	1.68	1.69
31	ALTAMIRANO	-	1.43	0.58	1.14	1.57	0.66	1.65	0.93	0.51	0.89	1.01
32	MORELIA	0.97	1.13	-	-	0.88	-	1.27	-	0.19	-	1.03
33	PETATLÁN	5.85	1.05	0.49	1.33	1.56	0.49	1.12	0.79	0.41	0.84	0.90
34	COALCOMÁN	57.35	13.62	8.32	10.84	12.03	8.18	14.16	8.59	8.61	10.76	9.67
35	TECOMÁN	4.14	1.04	0.81	-	0.89	0.83	1.75	0.65	0.57	0.79	0.77
36	COALCOMÁN	3.11	0.48	0.24	-	0.50	-	0.66	0.43	0.40	-	-
37	COALCOMÁN	2.68	0.70	0.28	2.84	0.77	0.48	1.22	0.43	0.32	0.42	0.48
38	COALCOMÁN	39.85	9.23	4.51	5.96	7.16	6.21	9.02	5.42	4.62	6.56	4.90
39	TECOMÁN	4.33	1.06	0.46	2.53	1.46	0.63	3.32	0.69	0.43	0.72	0.66
40	TFCPÁN	7.12	2.37	0.91	-	1.68	1.12	2.66	1.28	1.04	1.59	1.28

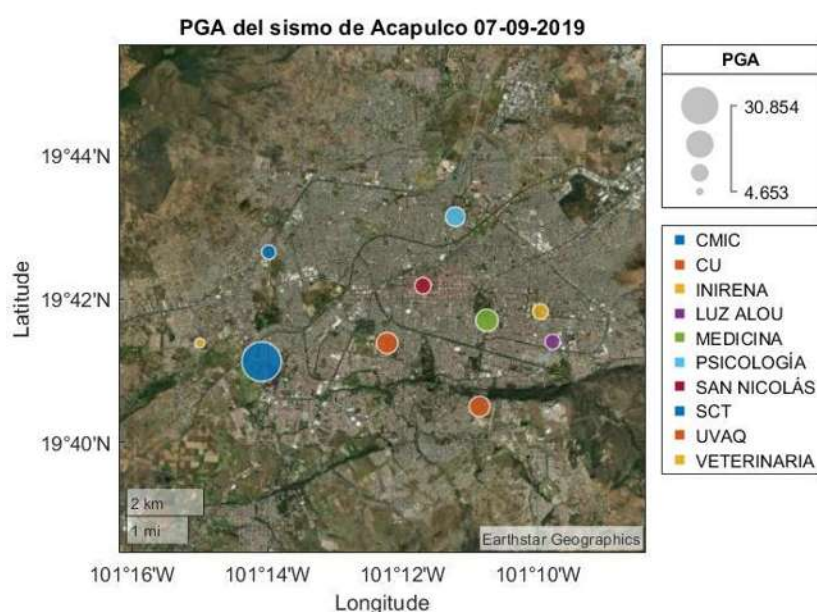


Figura 3.3.1 PGA de la combinación media cuadrática de las componentes horizontales, del sismo de Acapulco del 07/09/2019 registrado en la RSN.

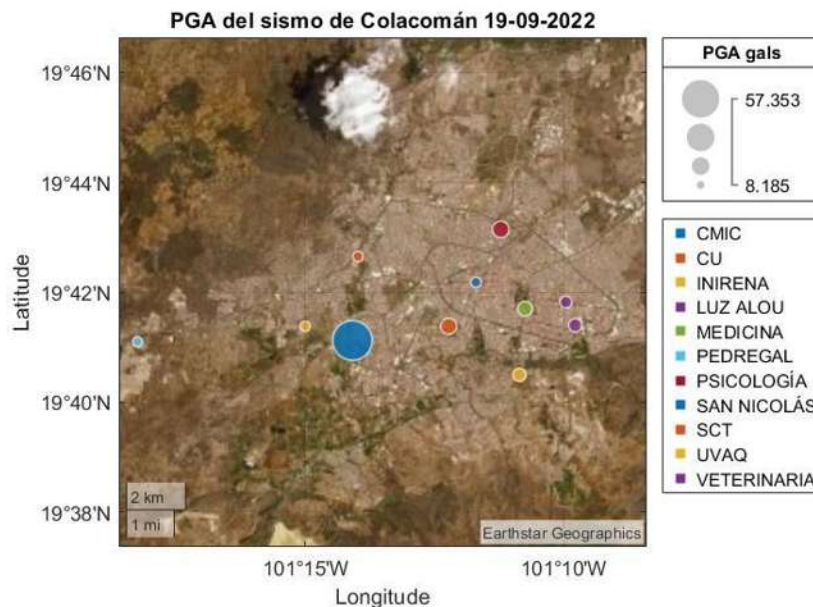


Figura 3.3.2 PGA de la combinación media cuadrática de las componentes horizontales, del sismo de Coalcomán del 19/09/2022 registrado en la RSN.

Mapas de intensidades de PGA

Para una representación visual de las intensidades de PGA (gals) de la combinación RMS de las componentes horizontales que se han registrados en la RSN se utilizó el software QGIS de código abierto y gratuito. Con el uso de métodos de interpolación se obtienen los mapas de calor y las curvas de nivel para diferentes sismos. Estos sismos son los que presentaron mayores intensidades de PGA y PSA en la ciudad y son de gran ayuda, para visualizar las zonas de la ciudad con mayores demandas sísmicas.

En las figuras 3.3.3 – 3.3.11 se muestran los mapas de intensidades de PGA para los sismos de:

- Acapulco 7/09/2021
- Altamirano 12/08/2022
- Coalcomán 19/09/22
- Coalcomán 22/09/22
- Crucecita 23/06/20
- Huetamo 3/03/19
- Lázaro Cárdenas 19/04/22
- Morelia 21/01/20
- Nueva Italia 16/06/19
- Zitácuaro 5/04/22

MAPA DE INTENSIDADES DE PGA REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE ACAPULCO DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2021. Mw 7.1, R= 328 KM, SUBDUCCIÓN.

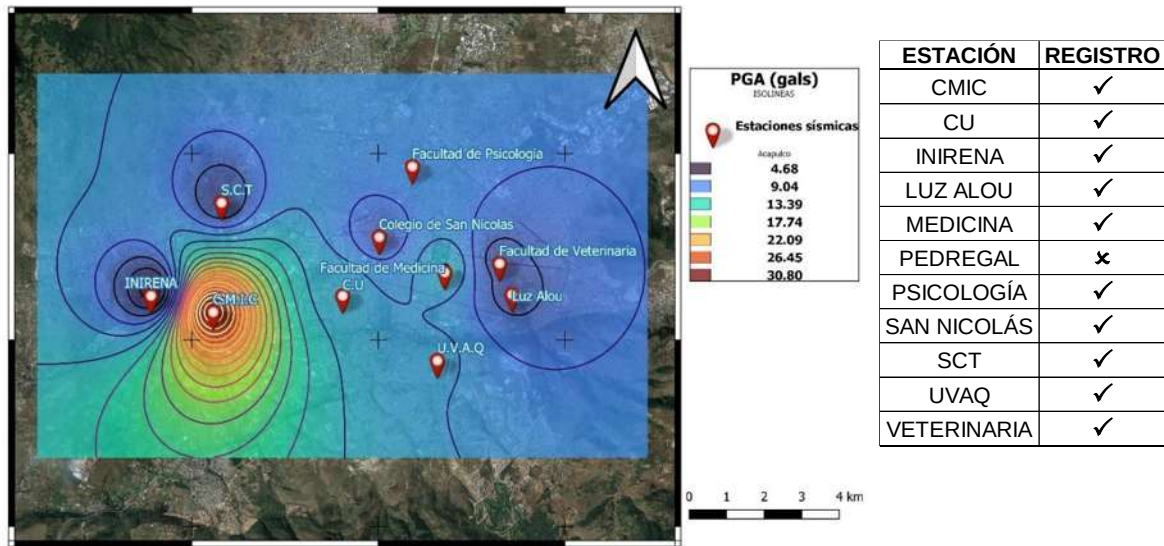


Figura 3.3.3 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Acapulco del 07/09/2021.

MAPA DE INTENSIDADES DE PGA REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE ALTAMIRANO DEL 12 DE AGOSTO DE 2022. Mw 5.1, R= 159.6 KM, INTRAPLACA.

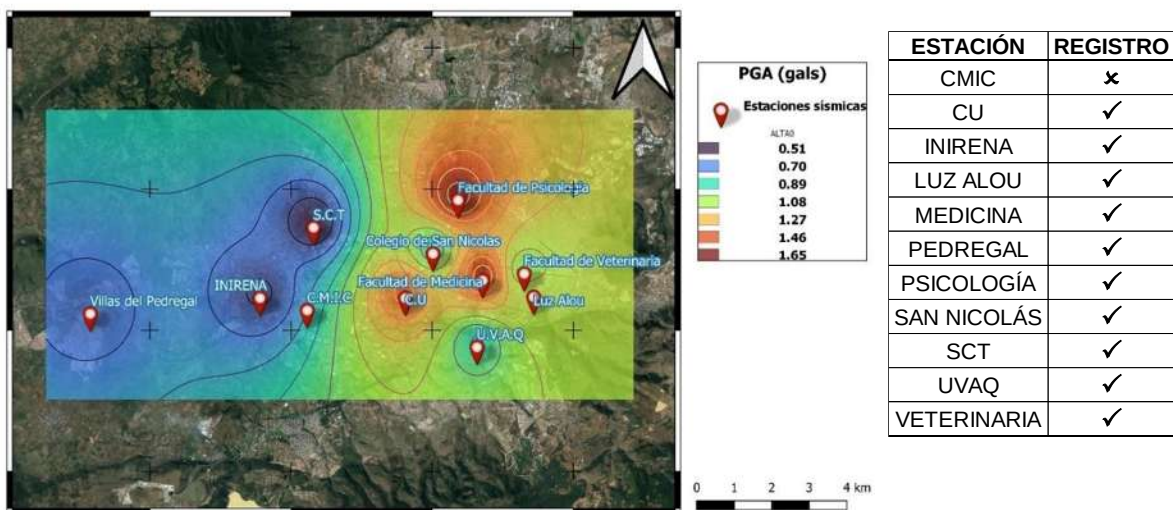


Figura 3.3.4 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Altamirano del 12/08/2022.

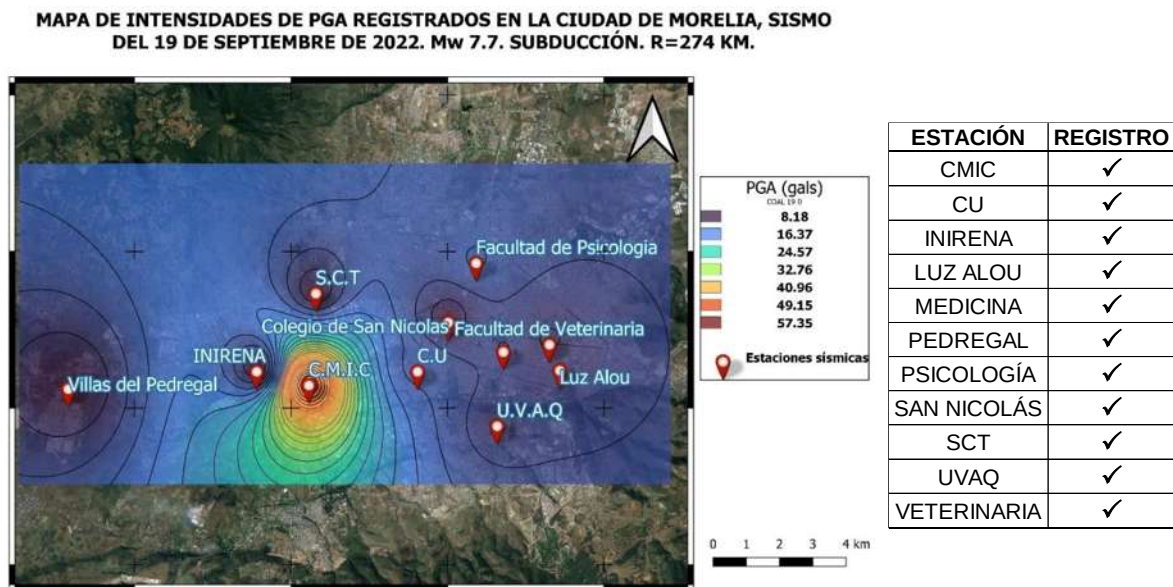


Figura 3.3.5 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Coalcomán del 19/09/2022.

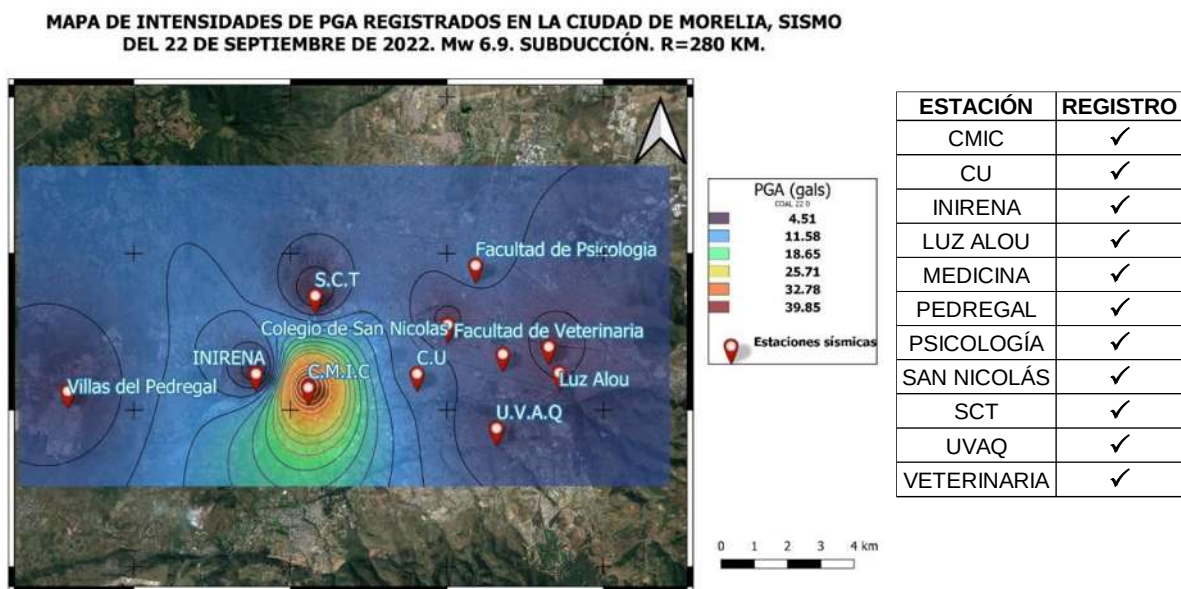


Figura 3.3.6 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Coalcomán del 22/09/2022.

MAPA DE INTENSIDADES DE PGA REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE CRUECITA DEL 23 DE JUNIO DE 2020. Mw 7.5, R= 710.20 KM, SUBDUCCIÓN.

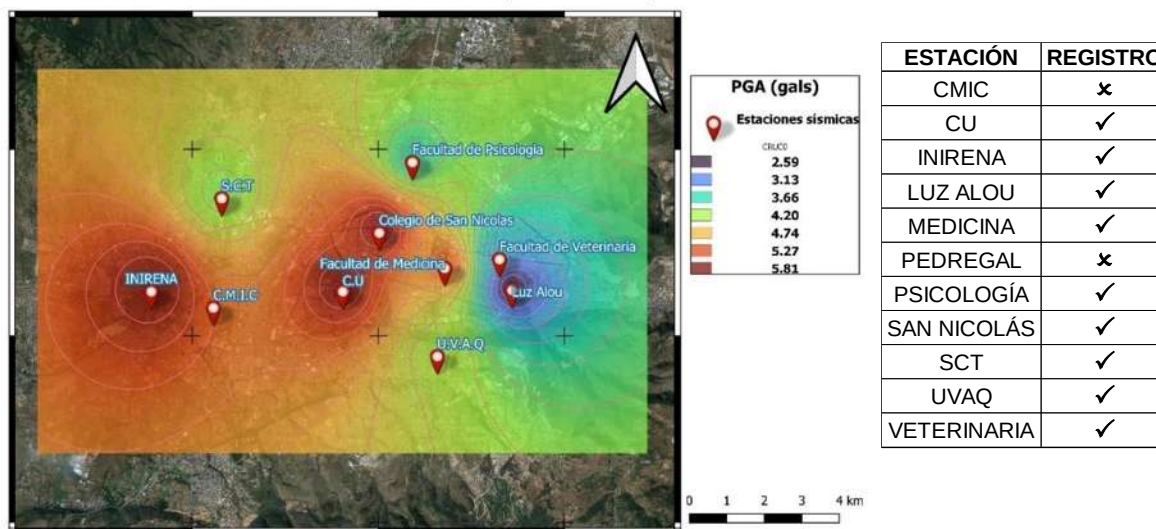


Figura 3.3.7 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Crucecita del 23/06/2020.

MAPA DE INTENSIDADES DE PGA REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE HUETAMO DEL 3 DE MARZO DE 2019. Mw 5.6, R= 148.68 KM, SUBDUCCIÓN.

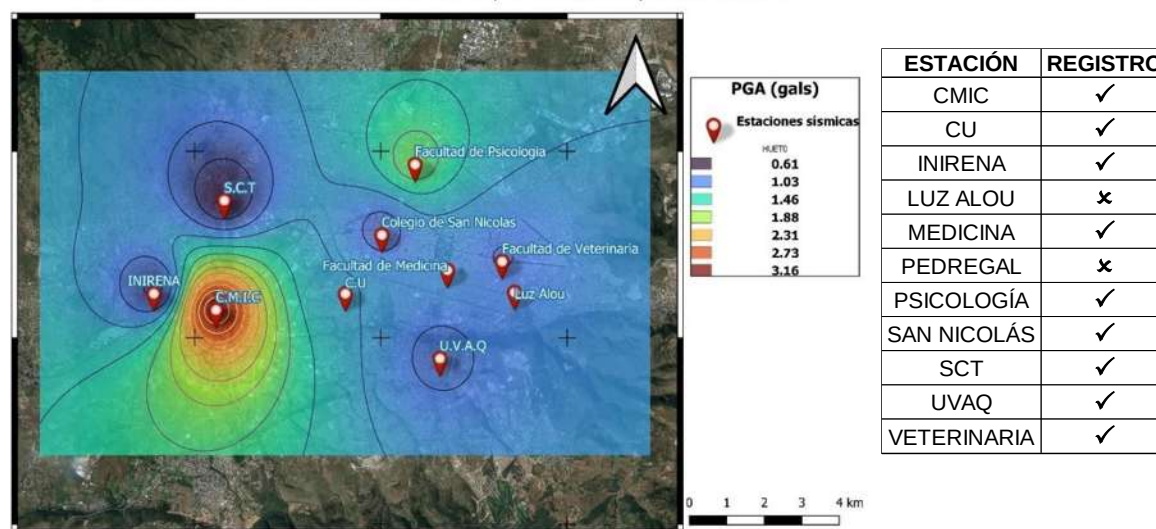


Figura 3.3.8 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Huetamo del 03/03/2019.

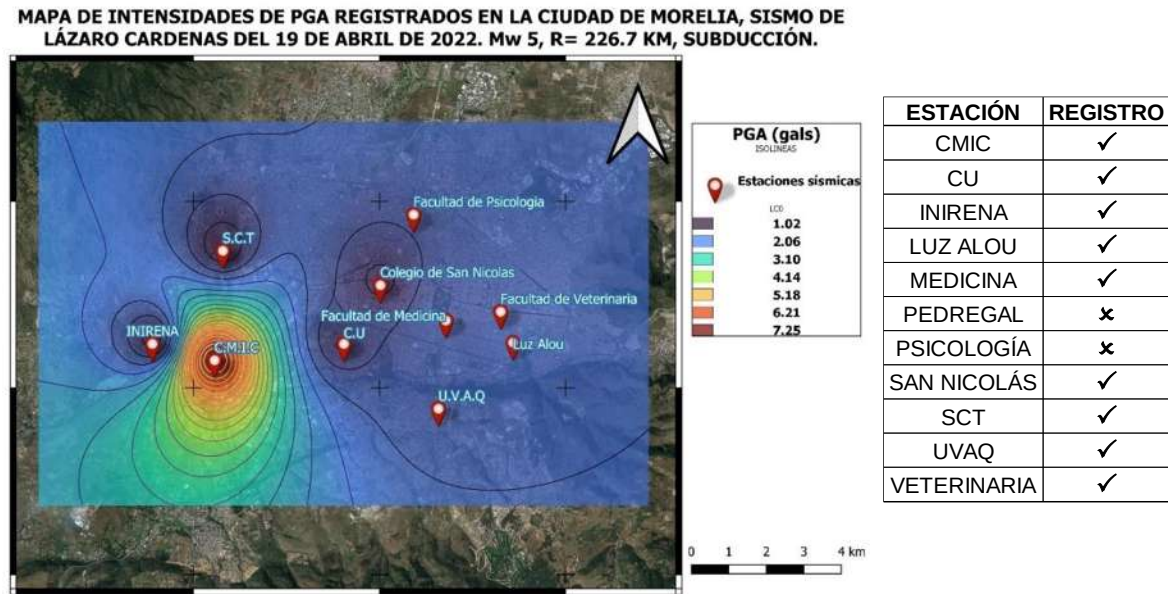


Figura 3.3.9 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Lázaro Cárdenas del 19/04/2022.

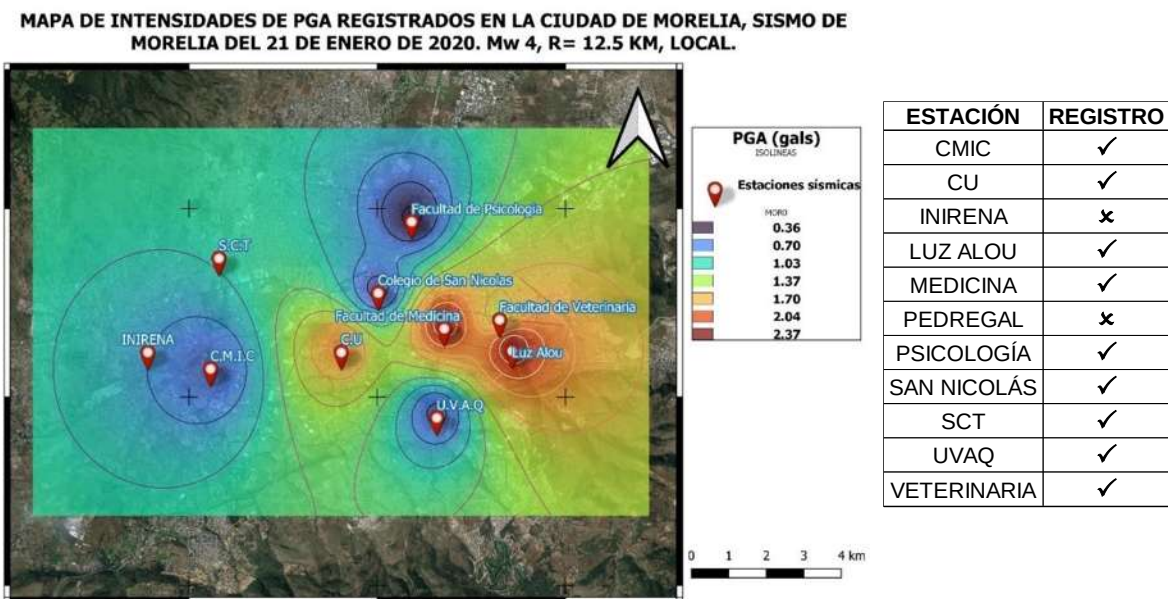


Figura 3.3.10 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Morelia del 21/01/2020.

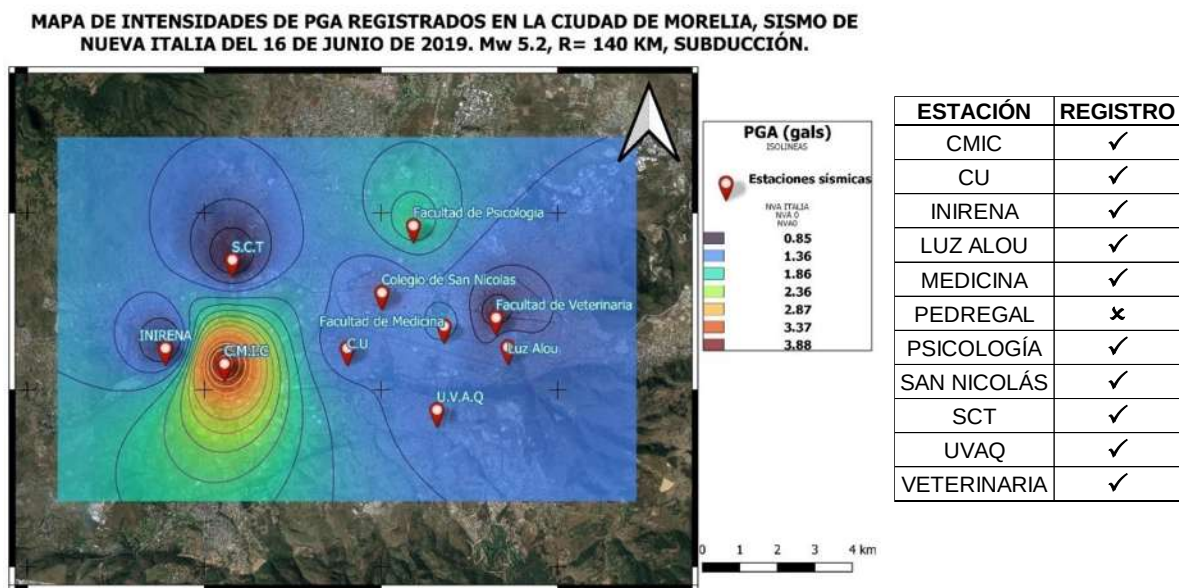


Figura 3.3.11 Mapa de intensidades de PGA (gals) de registradas en la RSN del sismo de Nueva Italia del 16/06/2019.

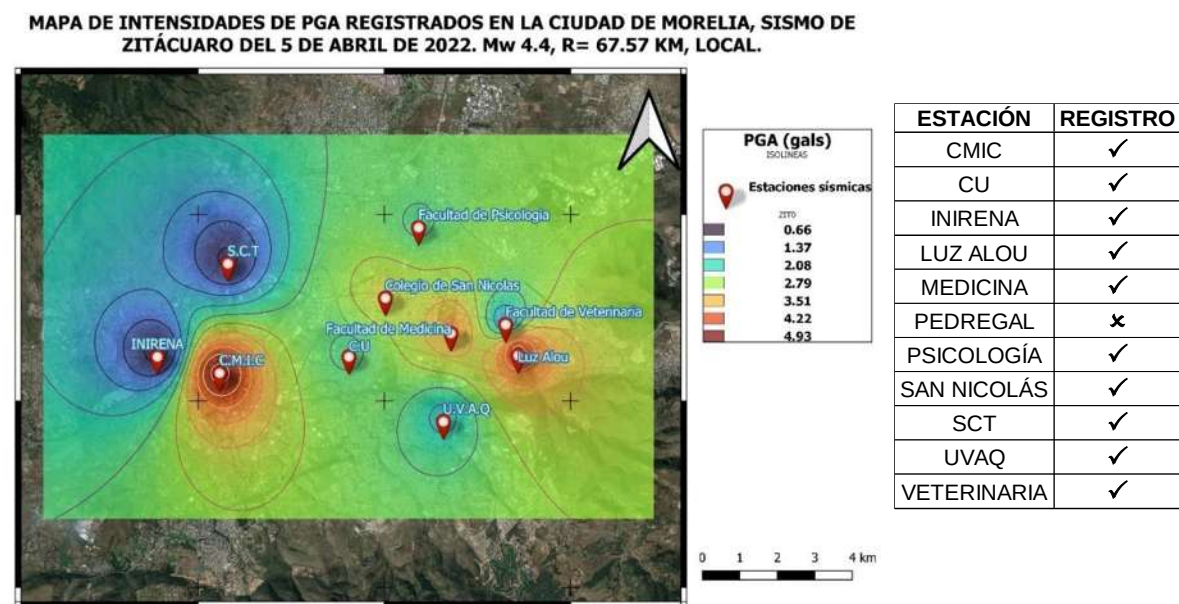


Figura 3.3.12 Mapa de intensidades de PGA (gals) registradas en la RSN del sismo de Zitácuaro del 05/04/2022.

Estos mapas de calor nos demuestran gráficamente algunos puntos que deben resaltarse: los sismos de subducción se amplifican en la zona de la estación CMIC, que es el suelo de más flexible de los sitios donde están las estaciones sísmicas en la ciudad; los sismos de intraplaca y de fuente superficial generan intensidades mayores en las zonas de terreno más rígido, debido fundamentalmente a las altas frecuencias que contienen este tipo de temblores. La mayoría de los mapas presentan valores de PGA pequeños, a excepción de los sismos de Acapulco y de Coacomán.

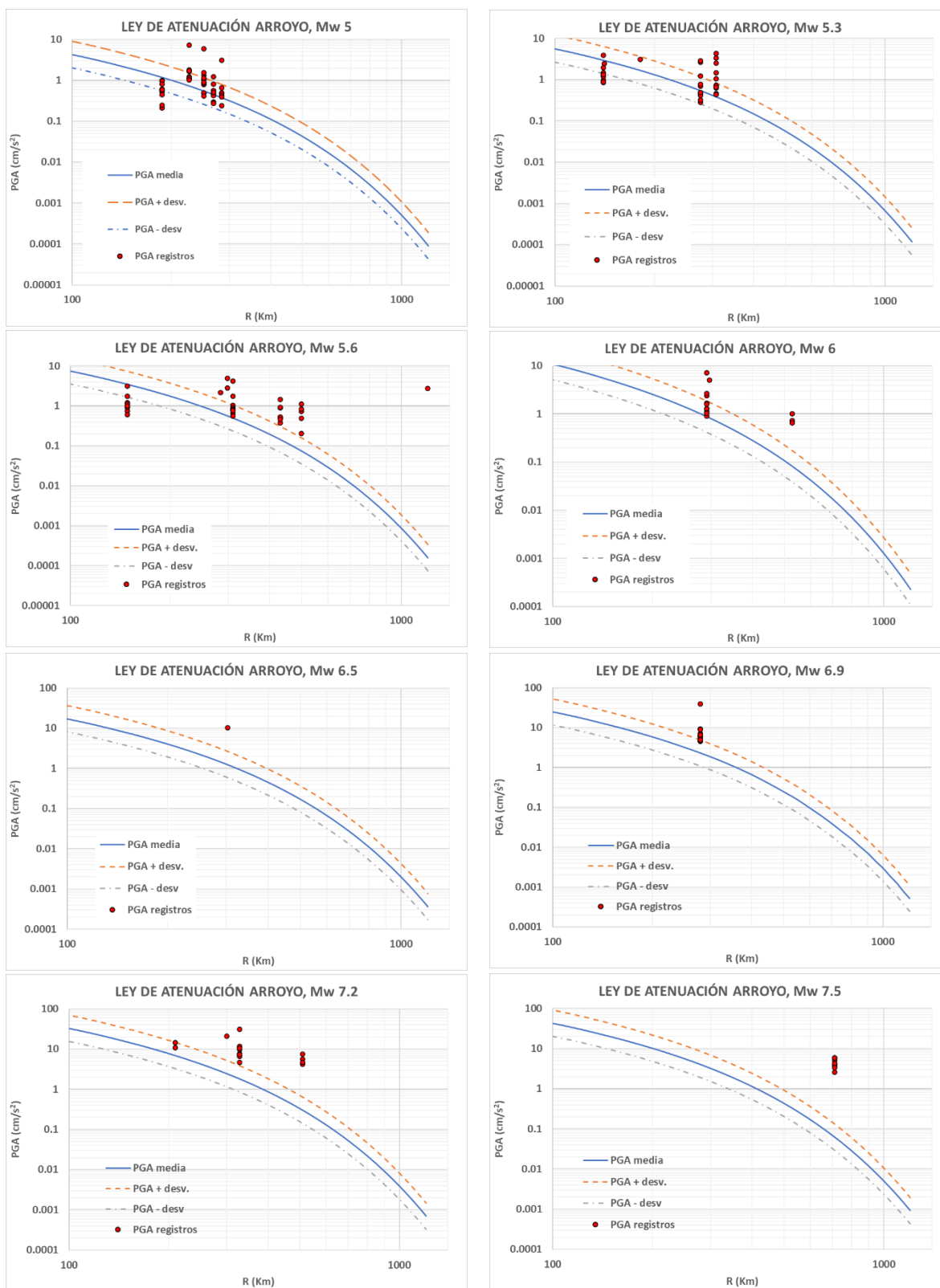
3.4. PGA vs leyes de atenuación.

Como ejercicio de comparación, se comparan los PGA registrados en Morelia y con los PGA estimados con las leyes de atenuación más usadas en la región para los distintos tipos de fuentes sísmicas (descritas en el capítulo 1).

Para los sismos de subducción se usarán las leyes de atenuación de Arroyo et al. (2010) y de Youngs et al. (1997). Los sismos registrados se agrupan como función de la magnitud y se comparan con los modelos de atenuación para esa magnitud. Cada punto de las figuras muestra la aceleración registrada en cada una de las estaciones sísmicas de la RSN y se presenta el valor medio de la ley de atenuación y las curvas del valor medio más y menos una desviación estándar (tabla 3.4.1).

Tabla 3.4.1 Sismos de subducción registrados en la RSN. Se agrupan con magnitudes similares.

SISMO	MAGNITUD	DIST	MAGNITUD PROM.
PETATLAN	5.00	268.29	5.00
LÁZARO CARDENAS	5.00	226.70	
PETATLÁN	5.00	250.75	
COALCOMÁN	4.80	284.16	
GUACAMAYAS	4.90	187.49	
NVA ITALIA	5.20	140.06	5.30
HUETAMO	5.30	140.95	
LA MIRA	5.30	181.33	
COALCOMÁN	5.40	275.73	
COYUCA	5.30	350.94	
TECOMÁN	5.20	308.11	
PETATLAN	5.50	284.48	5.60
PINOTEPA	5.50	497.93	
CD. HIDALGO	5.50	1202.01	
HUETAMO	5.60	148.68	
ATOYAC	5.60	298.38	
TECOMÁN	5.80	309.81	
SAN MARCOS	5.70	430.95	
PINOTEPA	6.00	528.04	6.00
TECPÁN	6.10	297.38	
TECPÁN	6.00	291.52	
TECPÁN	6.50	302.59	6.50
COALCOMÁN	6.90	279.57	6.90
LA MIRA	7.10	209.46	7.20
ACAPULCO	7.10	328.07	
PETATLAN	7.20	300.18	
PINOTEPA	7.20	509.52	
CRUCECITA	7.50	710.20	7.50
COALCOMÁN	7.70	273.55	7.70



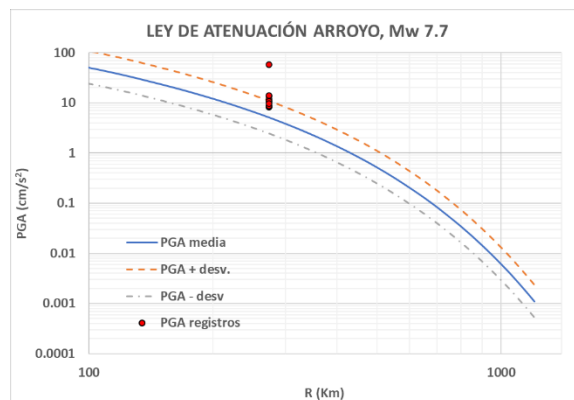
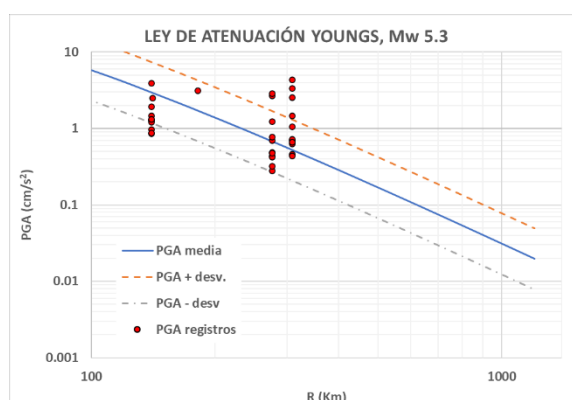
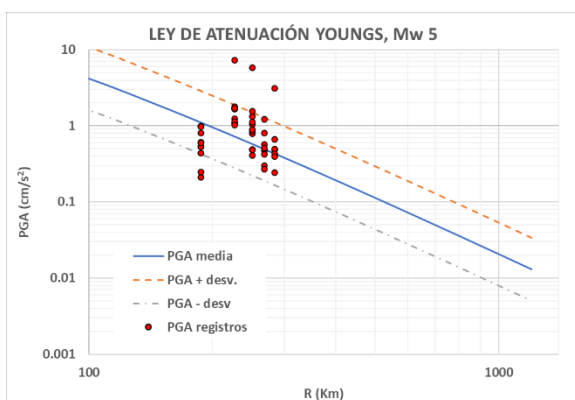


Figura 3.4.1 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Arroyo et al. (2010). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.

En las figuras 3.4.1. se grafican los modelos de atenuación para valores medios, medios más una desviación estándar y medios menos una desviación estándar. El modelo de atenuación de Arroyo et al. (2010) se encuentra acotado a magnitudes mayores a 5.5 ($M_w > 5.5$) y a distancias de hasta 400 km ($R < 400$ km). Por ello, no hay buena correlación entre los PGA de las estaciones fuera de estos intervalos de distancia y magnitud. Para magnitudes $M_w > 5$ y distancias $R < 400$ km los PGA se encuentran dentro del modelo de atenuación, lo que indica que sí es aplicable para la ciudad de Morelia esta ley de atenuación.

En las figuras 3.4.2 se comparan los PGA de los sismos de subducción registrados en la RSN con el modelo de atenuación de Youngs et al. (1997), los valores presentan mejor correlación, probablemente debido a que el modelo de Youngs et al. (1997) se encuentra acotado a magnitudes mayores de 5 ($M_w > 5$) y a distancias menores de 500 km ($R < 500$ km).



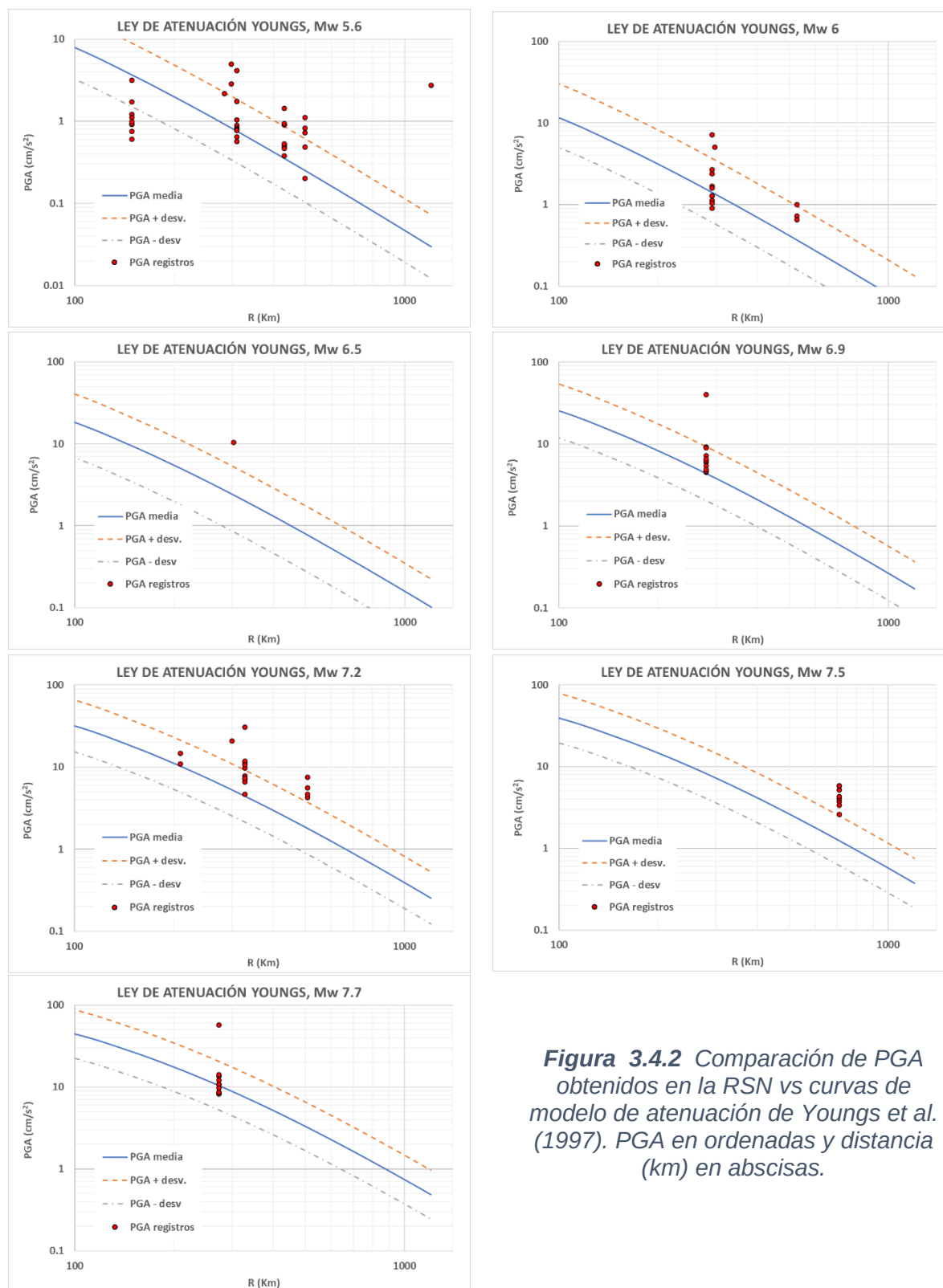


Figura 3.4.2 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Youngs et al. (1997). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.

Para los temblores de intraplaca las leyes de atenuación usadas son la de Zhao et al. (2006) y de García et al. (2012). Se tiene registro de ocho sismos de esta fuente sísmica, los cuales se subdividieron en cuatro grupos de acuerdo a su magnitud. Ver tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2. Sismos de intraplaca registrados en la RSN.

SISMO	MAGNITUD	DIST	MAGNITUD PROM.
HUETAMO	5.9	147.57	6
ZIHUATANEJO	6.1	193.26	
CD HIDALGO	6.5	1089.24	6.5
ALTAMIRANO	4.8	162.05	4.8
GUACAMAYAS	4.7	379.59	
COALCOMAN	5	116.34	
HUETAMO	4.6	144.59	5.1
ALTAMIRANO	5.1	159.60	

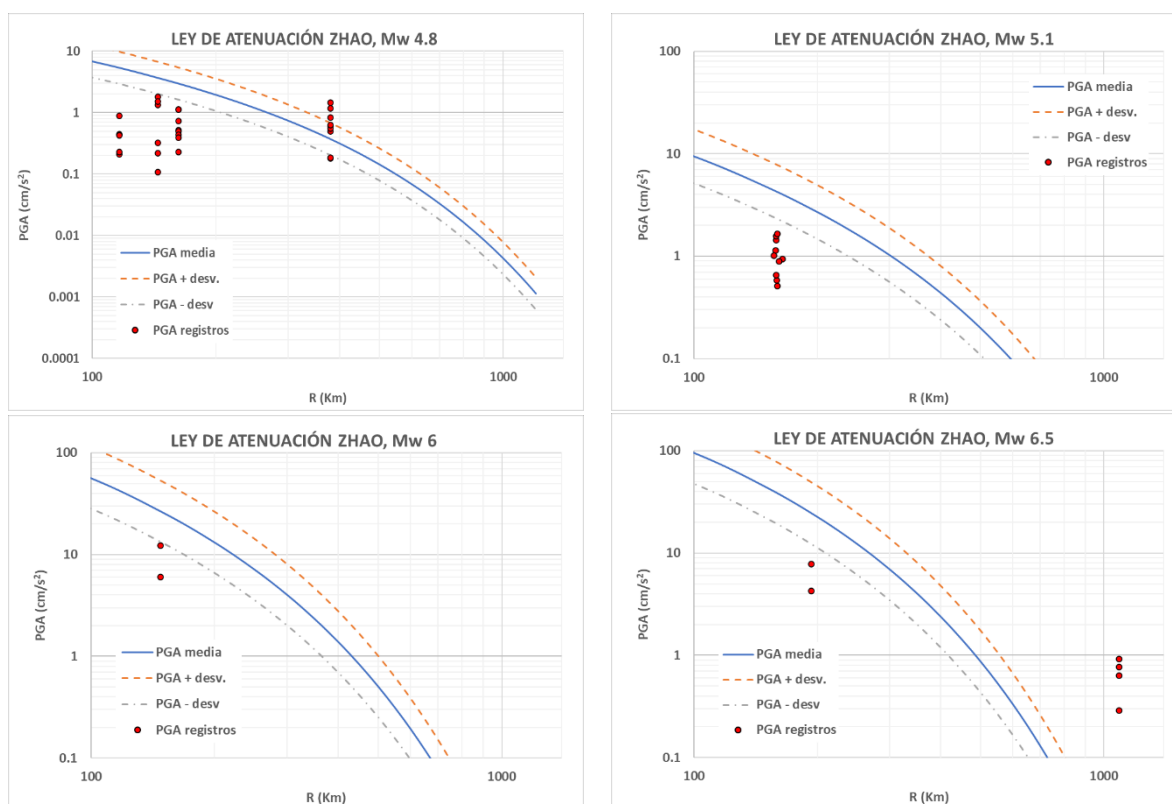


Figura 3.4.3 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Zhao et al. (2006). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.

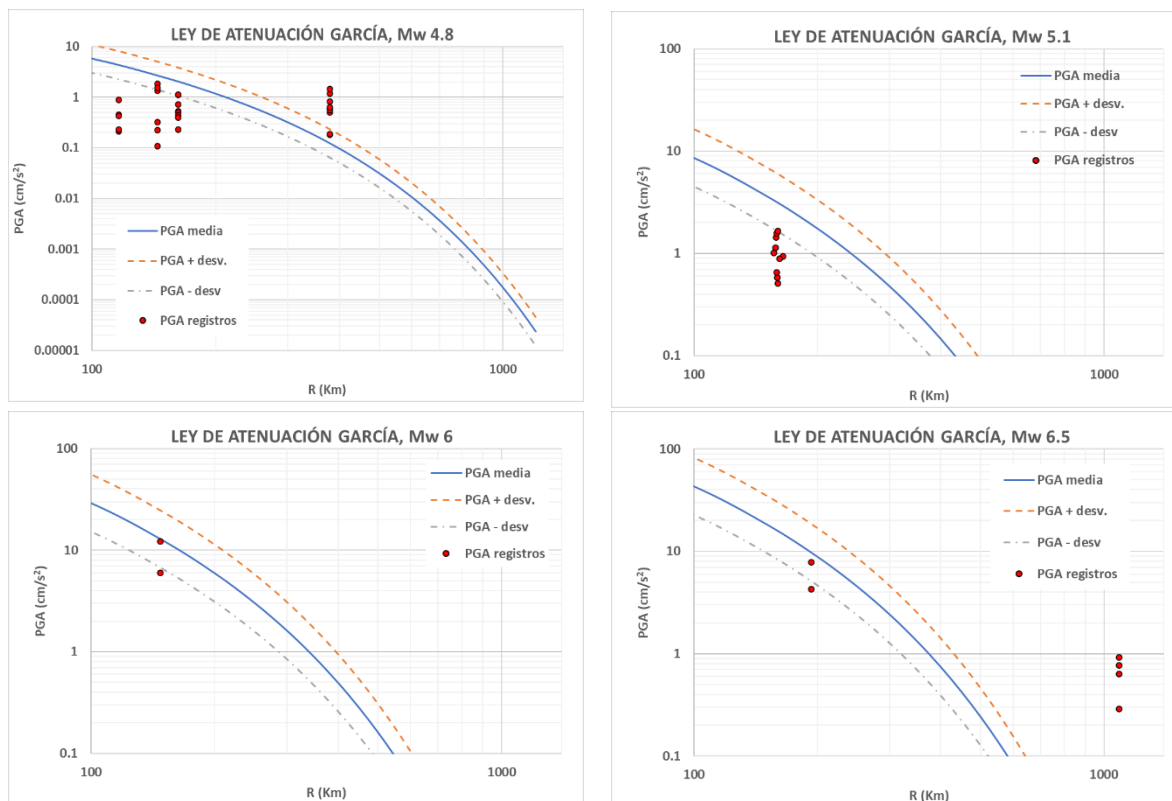


Figura 3.4.4 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de García et al. (2012). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.

Ambas leyes de atenuación son muy parecidas y los PGA registrados se posicionan muy cerca de las líneas (valores medios, medios más una desviación estándar y medios menos una desviación estándar) de los dos modelos de atenuación. La correlación es menor que para los temblores de interplaca debido a que las leyes de atenuación de la fuente intraplaca se propusieron con un número mucho menor de sismos registrados.

En el caso de los dos temblores locales registrados en la RSN se utilizó la ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997). Son sismos registrados de magnitudes pequeñas (Mw 4 y 4.4) y a distancias muy cercanas ya que sus epicentros fueron en las ciudades de Morelia y de Zitácuaro respectivamente, por tanto, la ley de atenuación considera que se esperaría un PGA mayor al registrado en la RSN como se muestra en la figura 3.4.5. La ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997) es válida para temblores corticales de magnitudes mayores a 4.5 ($M_w > 4.5$).

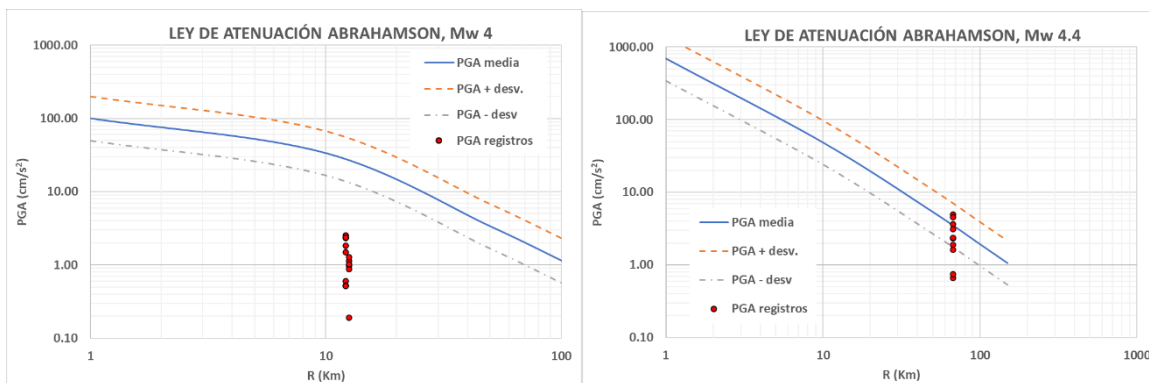


Figura 3.4.5 Comparación de PGA obtenidos en la RSN vs curvas de modelo de atenuación de Abrahamson y Silva (1997). PGA en ordenadas y distancia (km) en abscisas.

4. Cocientes espectrales y espectros de respuesta en los sitios de la red

Actualmente, se cuenta con el registro de 40 temblores en la RSN (255 registros totales en todas las diferentes estaciones), se trabajó con ellos para obtener sus espectros de respuesta y de Fourier para las componentes N-S y E-O. Posteriormente se calcularon espectros de respuesta de la media cuadrática (RMS, ec. 4) de cada sismo y estación. En algunos casos también se estimó la media geométrica (M_{GEOM} , ec. 4.1)

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (4)$$

$$x_{M_{GEOM}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n} \quad (4.1)$$

Con los espectros de respuesta de cada sismo, se determinará la estación que regularmente registra menor intensidad sísmica. Dicha estación será de utilidad para obtener los cocientes espectrales y así evaluar las zonas de mayor amplificación de la ciudad.

4.1. Espectros de respuesta en los sitios de la red

Un espectro de respuesta es una gráfica de la respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad (S1GDL) para diferentes periodos de vibración T_n , o frecuencia circular ω_n o frecuencia cíclica f_n . Los espectros son una herramienta muy útil para la ingeniería sísmica, ya que es una aproximación de la intensidad que genera un sismo sobre estructuras de diferentes periodos.

Los registros, una vez corregidos por corrección de línea base y filtrados (capítulo 3), se procesan para determinar espectros de respuesta. Para ello, se implementó un algoritmo en Matlab utilizando el método de Newmark de la aceleración lineal. (Figura 4.1.1).

Se consideró un amortiguamiento ξ del 5%, un incremento del período ΔT_n de 0.02, y un período máximo $T_{nm\acute{a}x}$ de 5 segundos.

```
%Ingresar el registro de aceleraciones del terreno en el documento
%"ESPECTROS.xlsx" en la hoja "DATOS"

clc
clear all
disp('Método de Newmark sistemas lineales de 1GDL')
disp('ESCRIBA LOS DATOS DEL REGISTRO SISMICO EN EL ARCHIVO ESPECTROS.xlsx DE EXCEL')
op=input('Escriba que método quiere usar, Aceleración constante (1) o Aceleración lineal (2) ');

fTn=5;
dTn=0.02;
pan=5;
u0=0;
v0=0;

as=xlsread('CREG_HUETAMO 03-01-2022.xlsx','DATOS N-S','B3:B112000');
mt=xlsread('CREG_HUETAMO 03-01-2022.xlsx','DATOS N-S','A3:A112000');
dt=mt(2)-mt(1);
lt=length(mt);
tf=mt(lt);

pa=pan/100;
Tn=0:dTn:fTn;
umax1=[];
vmax1=[];
amax1=[];
psv1=[];
psal=[];
psag1=[];

if op==2
disp('Método de aceleración lineal ')
for j=1:length(Tn)
    wn=2*pi/Tn(j);
    G=1/2;
    B=1/6;
    a1=1/(B*dt^2)+2*pa*wn*G/(B*dt);
    a2=1/(B*dt)+2*pa*wn*(G/B-1);
    a3=(1/(2*B)-1)+2*pa*wn*dt*(G/(2*B)-1);
    k1=wn^2+a1;
    t=0:dt:tf;

    u(1)=u0;
    v(1)=v0;
    a(1)=-as(1)-2*pa*wn*v(1)+wn^2*u(1);

    np=length(t);
    for i=1:np-1
        p1(1+i)=-as(1+i)+a1*u(i)+a2*v(i)+a3*a(i);
        u(i+1)=p1(1+i)/k1;
        v(i+1)=(3/dt)*(u(i+1)-u(i))-2*v(i)-dt*a(i)/2;
        a(i+1)=(6/dt^2)*(u(i+1)-u(i))-(6*v(i)/dt)-2*a(i);
    end
    umax=max(abs(u));
    vmax=max(abs(v));
    amax=max(abs(a));
    psv=umax*wn;
    psa=umax*wn^2;
    psag=psa/980.665;
    umax1=[umax1 umax];
    vmax1=[vmax1 vmax];
    amax1=[amax1 amax];
    psv1=[psv1 psv];
    psal=[psal psa];
    psag1=[psag1 psag];
    psal(1)=max(abs(as));
    psag1(1)=psal(1)/980.665;
end
```

```

amax1(1)=max(abs(as));
psv1(1)=0;
end
Tn;
umax1;
vmax1;
amax1;
psv1;
psagl;
subplot(5,1,1)
plot(Tn,umax1)
grid on
xlabel('t (s)')
ylabel('desplazamiento (cm)')
subplot(5,1,2)
plot(Tn,vmax1)
xlabel('t (s)')
ylabel('velocidad (cm/s)')
subplot(5,1,3)
plot(Tn,amax1)
xlabel('t (s)')
ylabel('aceleración (cm/s^2)')
subplot(5,1,4)
plot(Tn,psv1)
xlabel('t (s)')
ylabel('pseudovelocidad (cm/s)')
subplot(5,1,5)
plot(Tn,psagl)
xlabel('t (s)')
ylabel('pseudoaceleración (cm/s^2)')
Tnlt=transpose(Tn);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',Tnlt,'ESPECTROS N-S','B38')
umaxlt=transpose(umax1);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',umaxlt,'ESPECTROS N-S','C38')
vmaxlt=transpose(vmax1);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',vmaxlt,'ESPECTROS N-S','D38')
amaxlt=transpose(amax1);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',amaxlt,'ESPECTROS N-S','E38')
psvlt=transpose(psv1);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',psvlt,'ESPECTROS N-S','F38')
psaglt=transpose(psagl);
xlswrite('CREG HUETAMO 03-01-2022.xlsx',psaglt,'ESPECTROS N-S','G38')
end

```

Figura 4.1.1 Código de Matlab para la obtención de los espectros de respuesta por el método de la aceleración lineal de Newmark.

A continuación, se muestran los espectros de respuesta de desplazamiento (cm), pseudo velocidad (cm/s) y pseudo aceleración (cm/s²) para cada uno de los sismos registrados en la RSN. Estos espectros son las intensidades (RMS) de las direcciones N-S y E-O (componentes horizontales).

Espectros de respuesta componente horizontal

Tabla 4.1.1 Espectros de respuesta de media cuadrática de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 1995, La Mira 1996, y La Mira 1997.

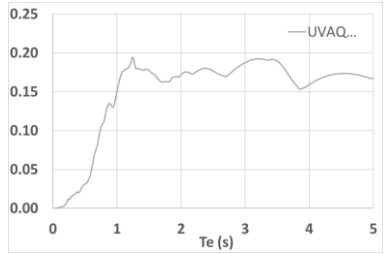
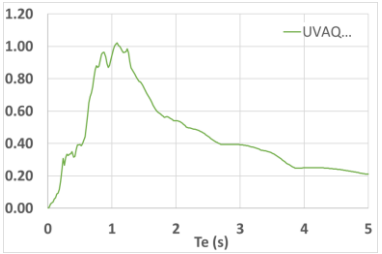
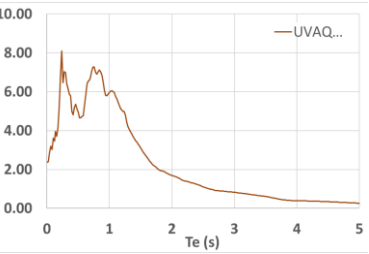
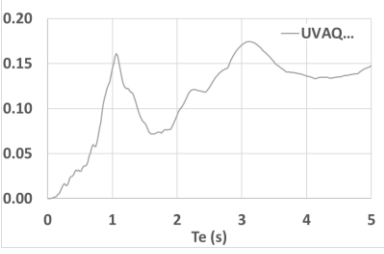
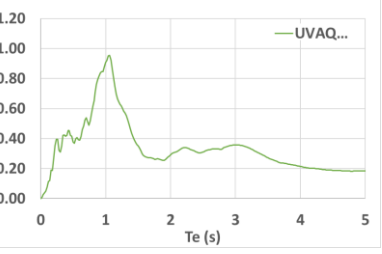
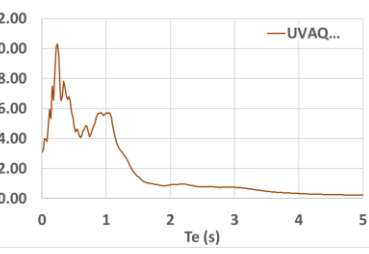
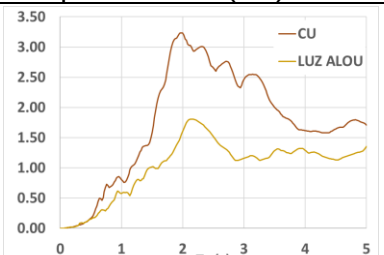
Huetamo; M=5.3; Fecha: 20/12/1995	Dist. epicentral: 140.95 km Profundidad: 30 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
La Mira; M=5.3; Fecha: 25/01/1996	Dist. epicentral: 181.33 km Profundidad: 21 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
La Mira; M=7.1; Fecha: 11/01/1997	Dist. epicentral: 209.46 km Profundidad: 40 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.2 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 1997, Huetamo 1998, y Cd. Hidalgo 1998.

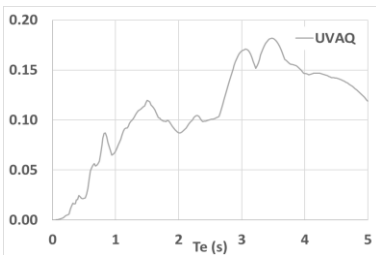
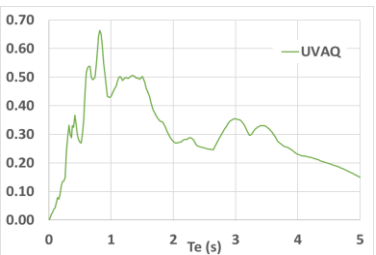
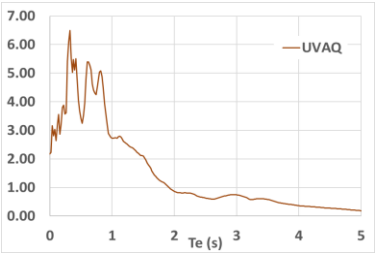
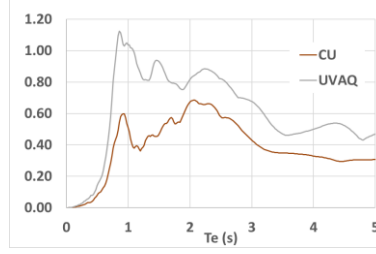
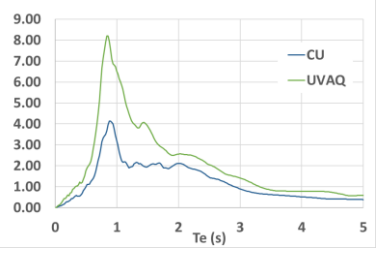
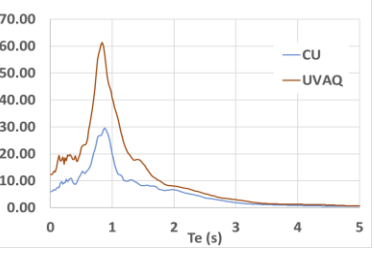
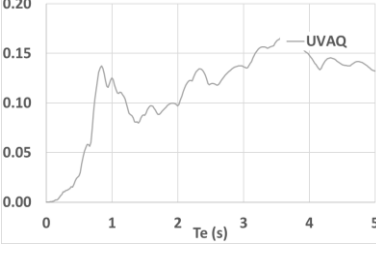
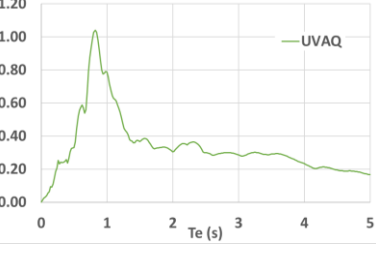
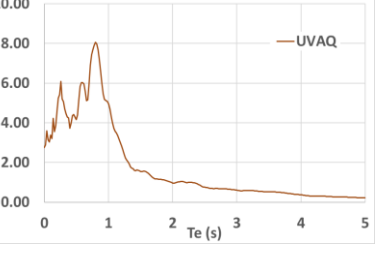
Petatlán; M=5.5; Fecha: 21/12/1997	Dist. epicentral: 284.48 km Profundidad: 5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Huetamo; M=5.9; Fecha: 20/04/1998	Dist. epicentral: 147.57 km Profundidad: 66 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Cd. Hidalgo; M=5.5; Fecha: 09/05/1998	Dist. epicentral: 1202.01 km Profundidad: 40 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.3 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Zihuatanejo 1999, Atoyac 2007, y Petatlán 2014.

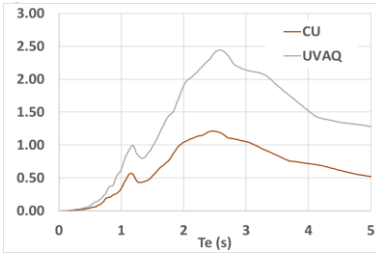
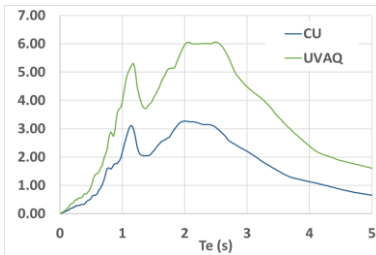
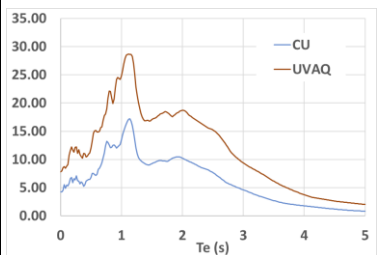
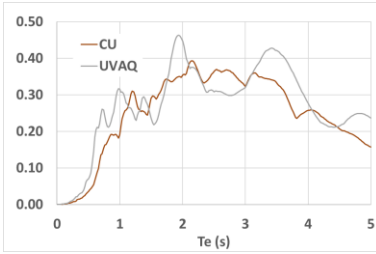
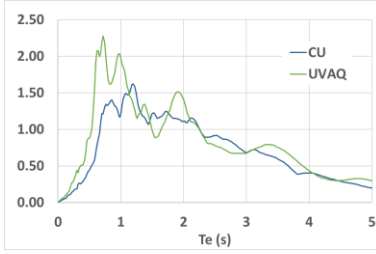
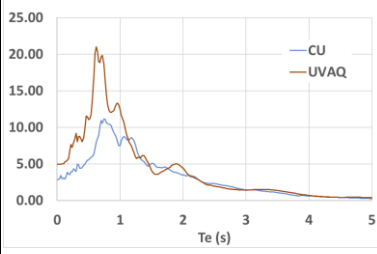
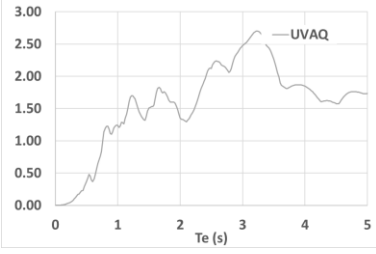
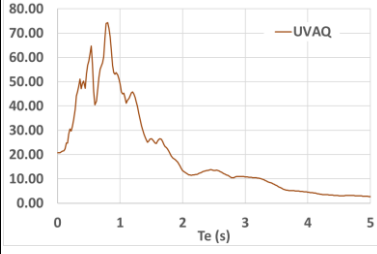
Zihuatanejo; M=6.1; Fecha: 28/12/1999	Dist. epicentral: 193.26 km Profundidad: 82 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Atoyac; M=5.6; Fecha: 13/04/2007	Dist. epicentral: 298.38 km Profundidad: 34 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Petatlán; M=7.2; Fecha: 18/04/2014	Dist. epicentral: 300.18 km Profundidad: 18 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.4 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 2014, Tecpán 2 2014, y Pinotepa 2018.

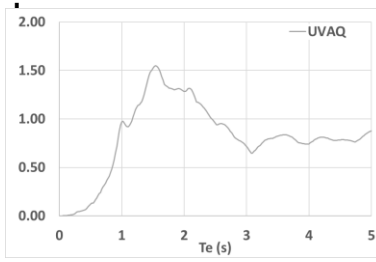
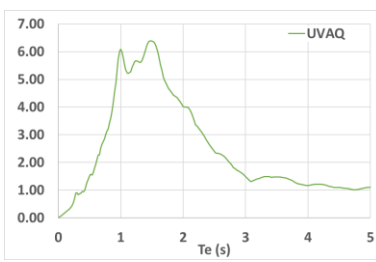
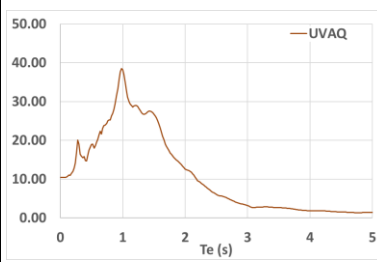
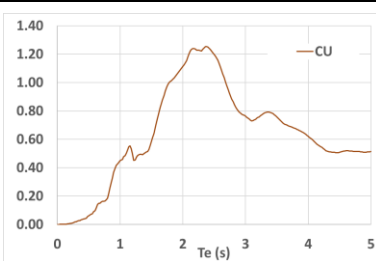
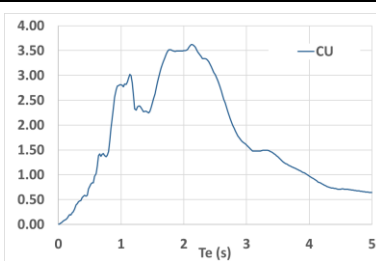
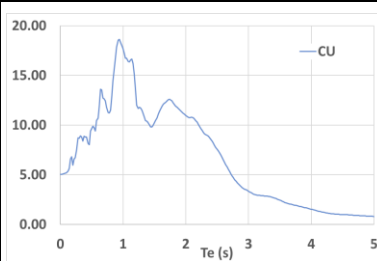
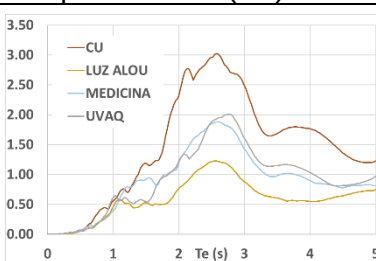
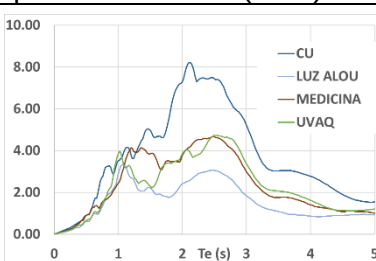
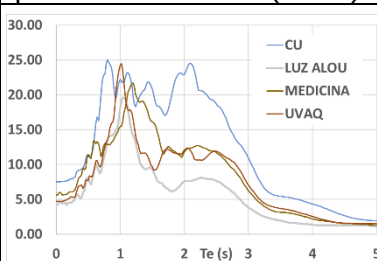
Tecpán; M=6.5; Fecha: 08/05/2014	Dist. epicentral: 302.59 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Tecpán; M=6.1; Fecha: 10/05/2014	Dist. epicentral: 297.38 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Pinotepa; M=7.2; Fecha: 16/02/2018	Dist. epicentral: 509.52 km Profundidad: 12 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.5 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Pinotepa 2018, Cd. Hidalgo 2019, y Huetamo 2019.

Pinotepa; M=6; Fecha: 19/02/2018	Dist. epicentral: 528.04 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Cd. Hidalgo; M=6.5; Fecha: 01/02/2019	Dist. epicentral: 1089.02 km Profundidad: 62 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Huetamo; M=5.6; Fecha: 03/03/2019	Dist. epicentral: 148.68 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.6 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2019, Pinotepa 2019, y Nueva Italia 2019.

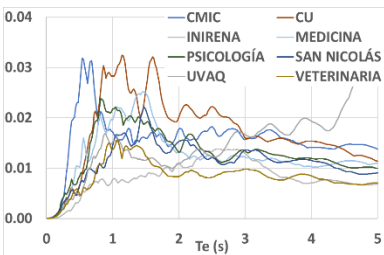
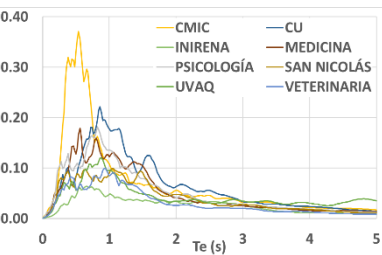
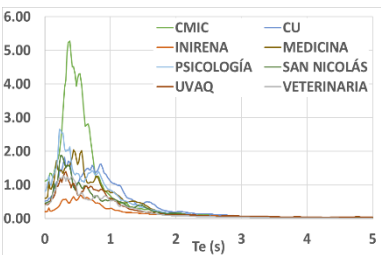
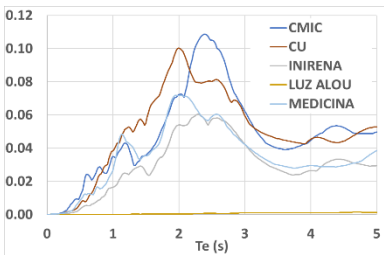
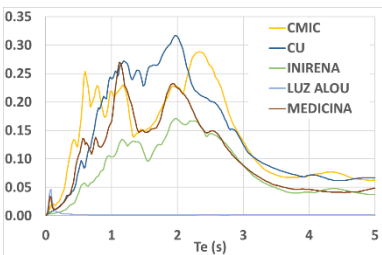
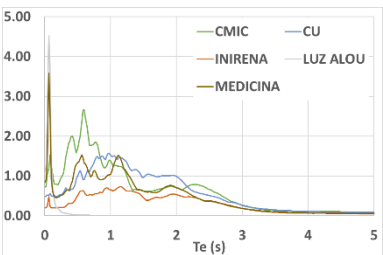
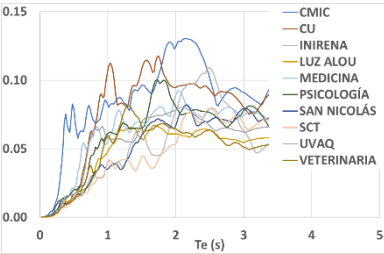
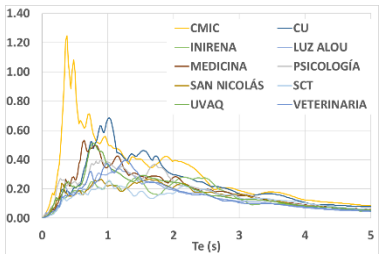
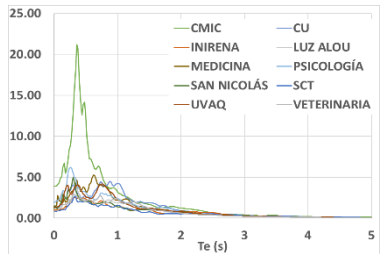
Altamirano; M=4.8; Fecha: 21/03/2019	Dist. epicentral: 162.05 km Profundidad: 63 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Pinotepa; M=5.5; Fecha: 22/03/2019	Dist. epicentral: 49.93 km Profundidad: 7 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Nueva Italia; M=5.6; Fecha: 16/06/2019	Dist. epicentral: 140.06 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.7 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Morelia 2020, Coyuca 2020, y Guacamayas 2020.

Morelia; M=4; Fecha: 21/01/2020	Dist. epicentral: 12 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Coyuca; M=5.3; Fecha: 30/01/2020	Dist. epicentral: 350.94 km Profundidad: 17 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Guacamayas; M=4.7; Fecha: 12/02/2020	Dist. epicentral: 379.59 km Profundidad: 66 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.8 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 2020, Crucecita 2020, y San Marcos 2021.

Petatlán; M=5; Fecha: 06/04/2020	Dist. epicentral: 268.29 km Profundidad: 12 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Crucecita; M=7.5; Fecha: 23/06/2020	Dist. epicentral: 710.20 km Profundidad: 5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
San Marcos; M=5.7; Fecha: 19/03/2021	Dist. epicentral: 430.95 km Profundidad: 10.7 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.9 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Guacamayas 2021, Coalcomán 2021, y Acapulco 2021.

Guacamayas; M=4.9; Fecha: 29/04/2021	Dist. epicentral: 187.49 km Profundidad: 9.5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Coalcomán; M=5; Fecha: 10/05/2021	Dist. epicentral: 116.34 km Profundidad: 66.5 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Acapulco; M=7.1; Fecha: 07/09/2021	Dist. epicentral: 328.07 km Profundidad: 15 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.10 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 2022, Zitácuaro 2022, y Lázaro Cárdenas 2022.

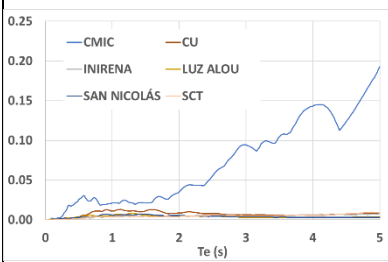
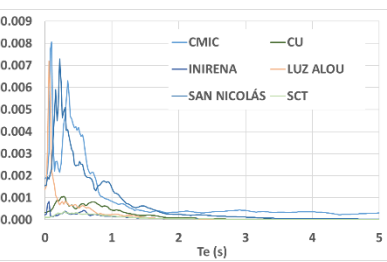
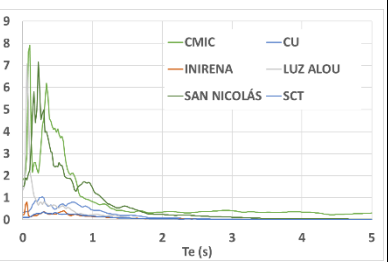
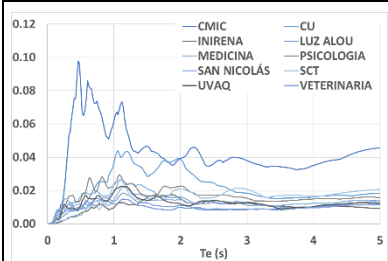
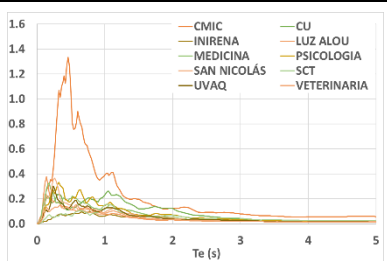
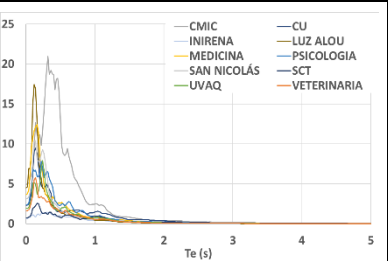
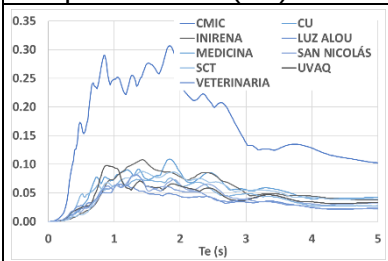
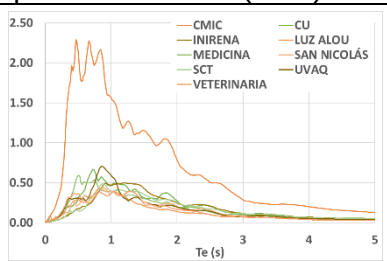
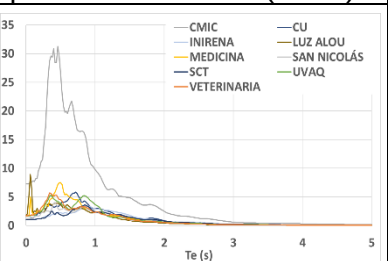
Huetamo; M=4.6; Fecha: 03/01/2022	Dist. epicentral: 144.59 km Profundidad: 47 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Zitácuaro; M=4.4; Fecha: 05/04/2022	Dist. epicentral: 67.57 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Lázaro Cárdenas; M=5; Fecha: 19/04/2022	Dist. epicentral: 226.67 km Profundidad: 15 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.11 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoacceleration registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2022, Morelia 2022, y Petatlán 2022.

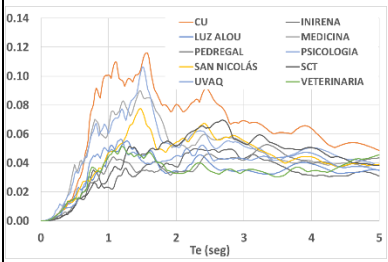
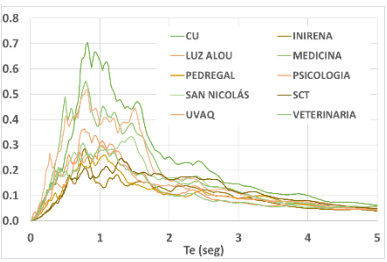
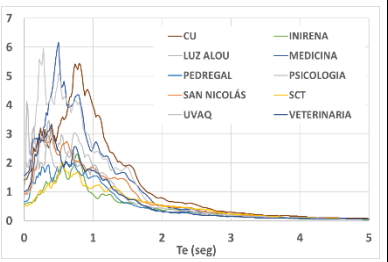
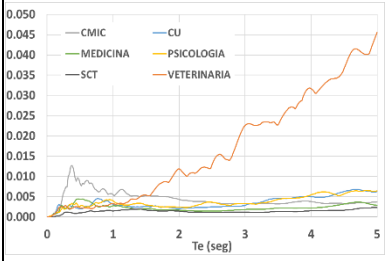
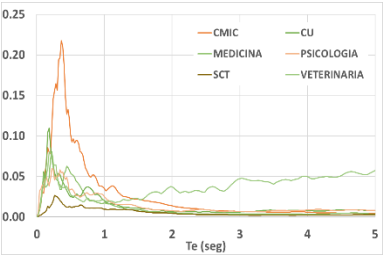
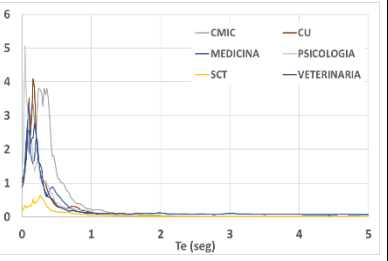
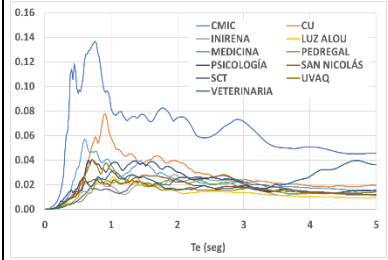
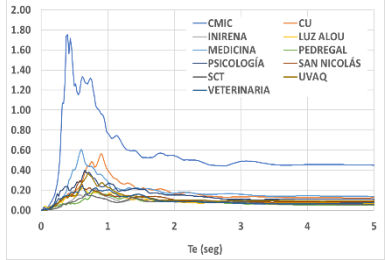
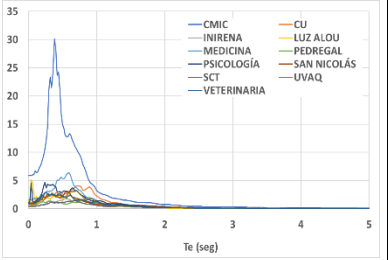
Altamirano; M=5.1; Fecha: 12/08/2022	Dist. epicentral: 159.60 km Profundidad: 56 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
		
Morelia; M=4; Fecha: 13/08/2022	Dist. epicentral: 12.58 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
		
Petatlán; M=5; Fecha: 13/09/2022	Dist. epicentral: 250.75 km Profundidad: 28 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.12 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 19/09/2022, Tecomán 2022, y Coalcomán 20/09/2022.

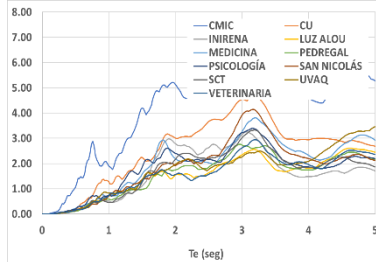
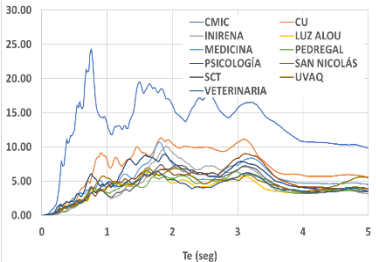
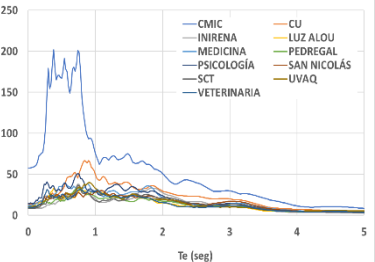
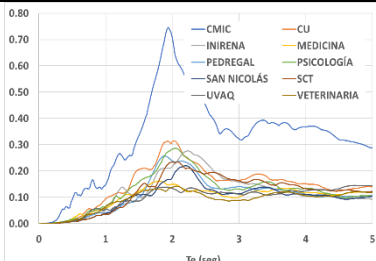
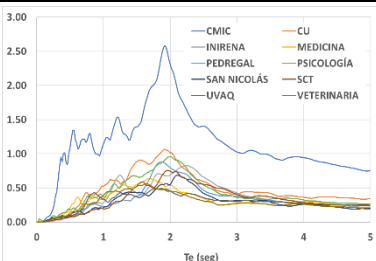
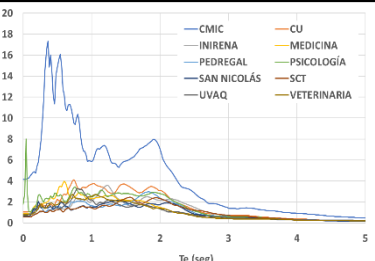
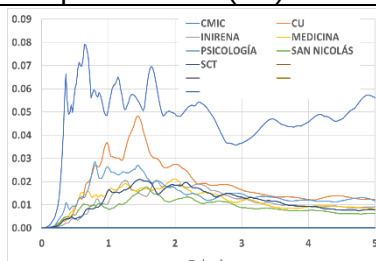
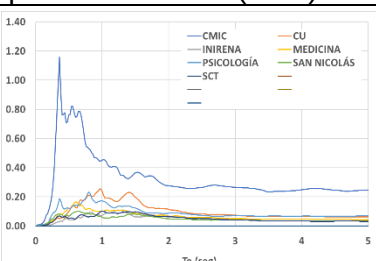
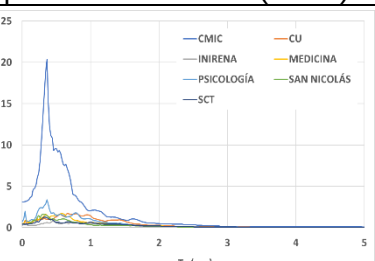
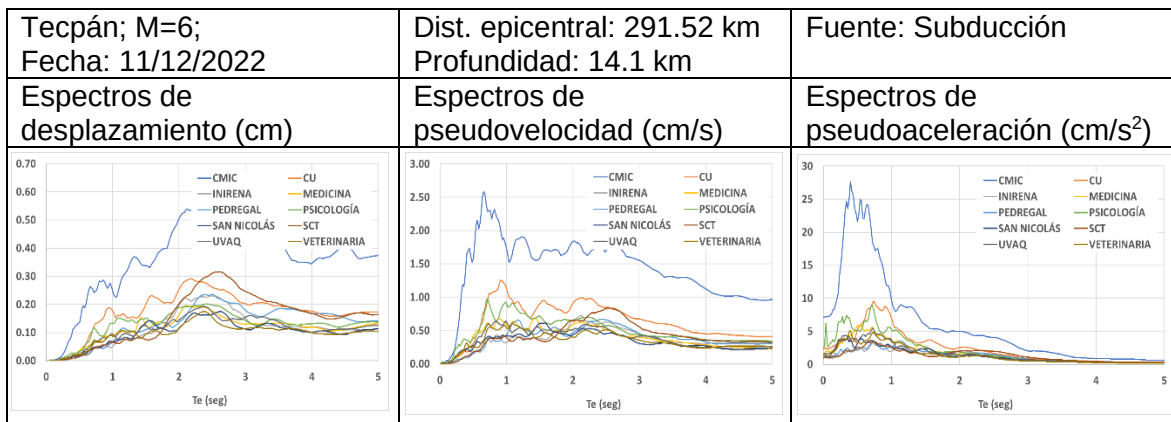
Coalcomán; M=7.7; Fecha: 19/09/2022	Dist. epicentral: 273.55 km Profundidad: 15 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Tecomán; M=5.8; Fecha: 20/09/2022	Dist. epicentral: 309.81 km Profundidad: 13 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Coalcomán; M=4.8; Fecha: 20/09/2022 05:43	Dist. epicentral: 284.16 km Profundidad: 16 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.13 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 20/09/2022, y Coalcomán 22/09/2022.

Coalcomán; M=5.4; Fecha: 20/09/2022 14:04	Dist. epicentral: 275.73 km Profundidad: 12 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Coalcomán; M=6.9; Fecha: 22/09/2022	Dist. epicentral: 279.57 km Profundidad: 12 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Tecomán; M=5.2; Fecha: 23/09/2022	Dist. epicentral: 308.11 km Profundidad: 10 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.14 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 11/12/2022.



De los espectros de respuesta que se muestran en las tablas 4.1.1 – 4.1.14, se obtiene información y datos relevantes del movimiento del suelo ante una excitación sísmica y de la respuesta de un sistema de un grado de libertad (S1GDL). La estación “CMIC” presenta las mayores amplificaciones de intensidad en la gran mayoría de los registros sísmicos, dicha estación se ubica en una zona de la ciudad que tiende a inundarse en épocas de fuertes precipitaciones debido a su alto contenido de arcillas y/o material orgánico.

A escasos kilómetros de la estación “CMIC” se encuentra la estación “INIRENA” la cual presenta los valores mínimos de intensidad. Esta estación servirá de base para obtener los cocientes espectrales de todas las estaciones respecto a ella.

Las amplitudes de mayor intensidad en el dominio del tiempo que se observa en los espectros de respuesta, dependen del origen del sismo y de la distancia del epicentro a las estaciones sísmicas. Los sismos de campo lejano (subducción) presentan picos máximos en periodos (T_e) altos, mientras que los sismos de originados en las fuentes de intraplaca y locales, generan espectros con picos en periodos cortos.

Los sismos de subducción (interplaca), tienen intensidades espectrales máximas en el intervalo de T_e de 0.5-2 s; los sismos de intraplaca presentan respuestas máximas en el intervalo de 0.06-1 segundos, y los sismos locales, en el intervalo de 0.06-0.30 segundos.

Las estaciones de INIRENA, LUZ ALOU y PSICOLOGÍA presentan algunas amplitudes espectrales altas en periodos muy bajos, que no suelen producir las fuentes sísmicas. Por ello, se realizó un filtrado de frecuencias altas de 15-25 Hz. No obstante, algunos acelerogramas producen amplitudes espectrales en periodos muy bajos, lo que probablemente se deba a que son terrenos duros con periodos fundamentales muy pequeños.

En general, las intensidades espectrales son relativamente bajas, debido a que el historial de registros sísmicos es en su mayoría de temblores con magnitudes pequeñas ($M_w < 7$). El sismo de Coalcomán del 19 de septiembre de 2022 generó las mayores intensidades

sísmicas hasta ahora registradas en Morelia y afortunadamente se cuenta con el registro en todas las estaciones sísmicas de la red. Nuevamente, existe una importante amplificación espectral en la estación CMIC, respecto a todas las demás estaciones.

En las tablas siguientes se muestran los espectros de respuesta de intensidades para la componente vertical de todos los sismos registrados hasta el momento en la RSN.

Espectros de respuesta componente vertical

Tabla 4.1.15 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 1995, La Mira 1996, y La Mira 1997. Componente vertical.

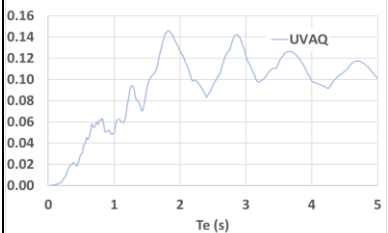
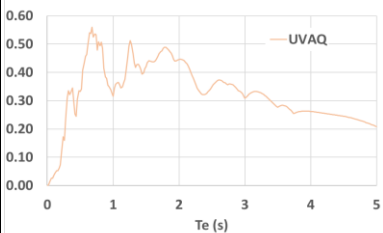
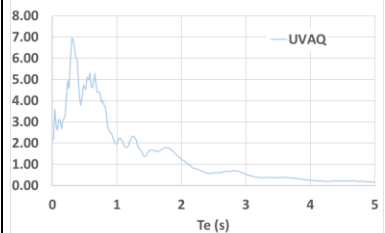
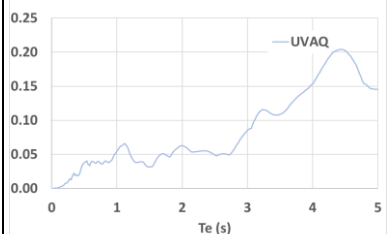
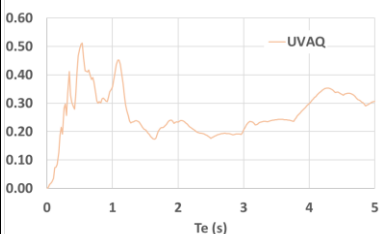
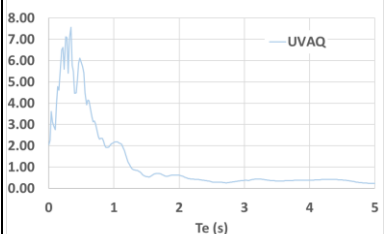
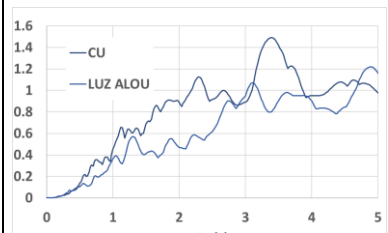
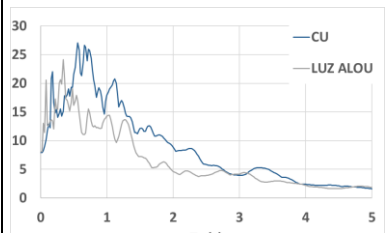
Huetamo; M=5.3; Fecha: 20/12/1995	Dist. epicentral: 140.95 km Profundidad: 30 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
La Mira; M=5.3; Fecha: 25/01/1996	Dist. epicentral: 181.33 km Profundidad: 21 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
La Mira; M=7.1; Fecha: 11/01/1997	Dist. epicentral: 209.46 km Profundidad: 40 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.16 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 1997, Huetamo 1998, y Cd. Hidalgo 1998. Componente vertical.

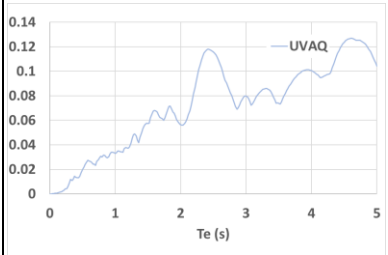
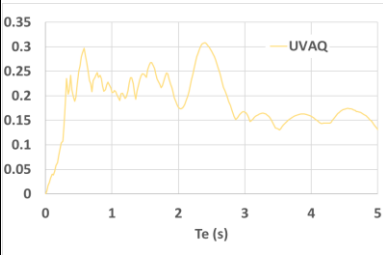
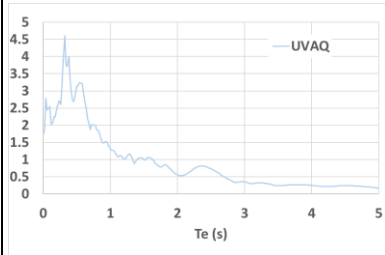
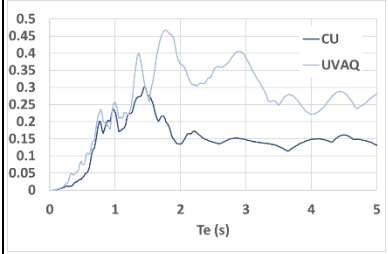
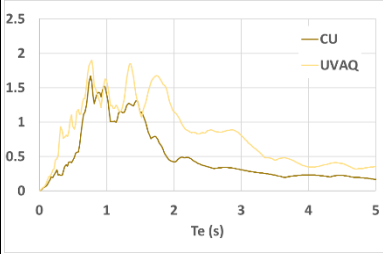
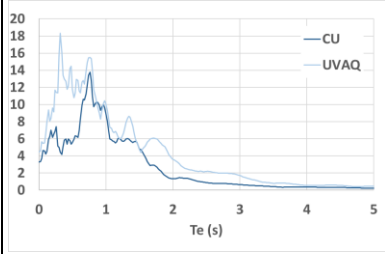
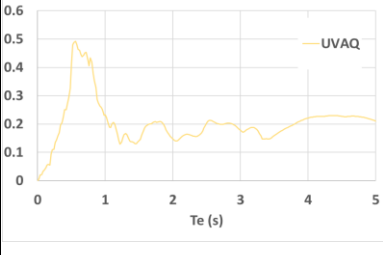
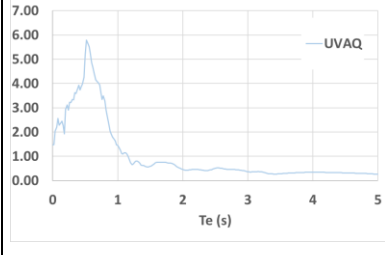
Petatlán; M=5.5; Fecha: 21/12/1997	Dist. epicentral: 284.48 km Profundidad: 5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Huetamo; M=5.9; Fecha: 20/04/1998	Dist. epicentral: 147.57 km Profundidad: 66 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Cd. Hidalgo; M=5.5; Fecha: 09/05/1998	Dist. epicentral: 1202.01 km Profundidad: 40 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.17 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Zihuatanejo 1999, Atoyac 2007, y Petatlán 2014. Componente vertical.

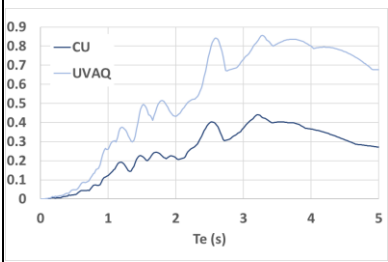
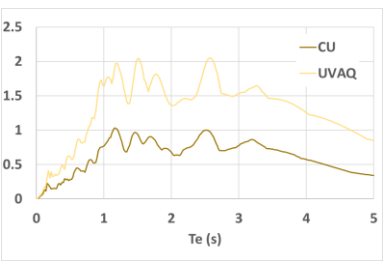
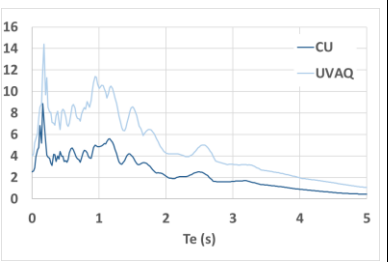
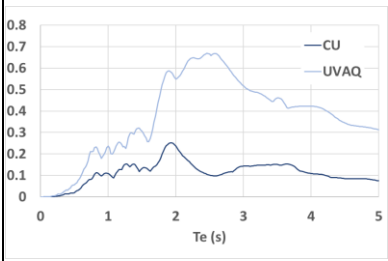
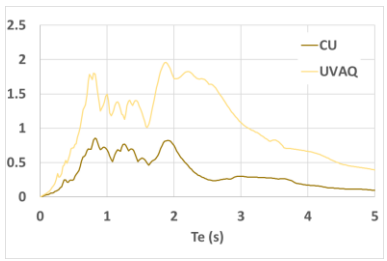
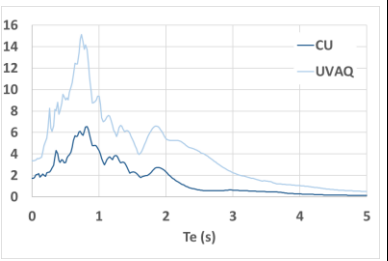
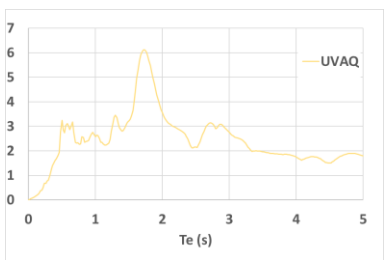
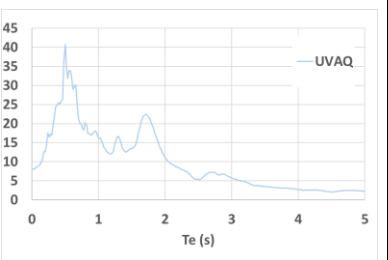
Zihuatanejo; M=6.1; Fecha: 28/12/1999	Dist. epicentral: 193.26 km Profundidad: 82 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Atoyac; M=5.6; Fecha: 13/04/2007	Dist. epicentral: 298.38 km Profundidad: 34 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Petatlán; M=7.2; Fecha: 18/04/2014	Dist. epicentral: 300.18 km Profundidad: 18 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.18 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 2014, Tecpán 2 2014, y Pinotepa 2018. Componente vertical.

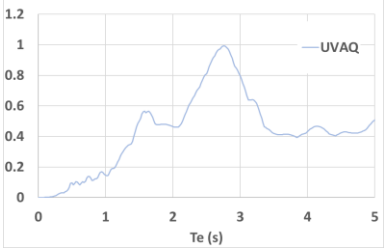
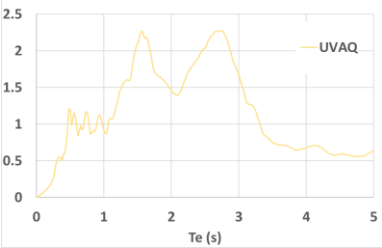
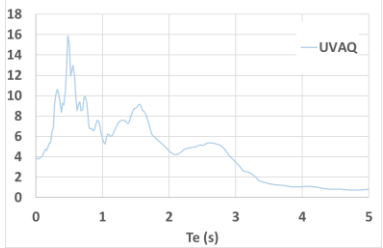
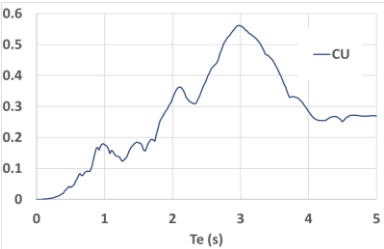
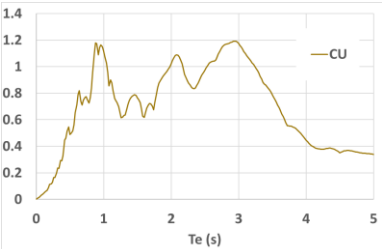
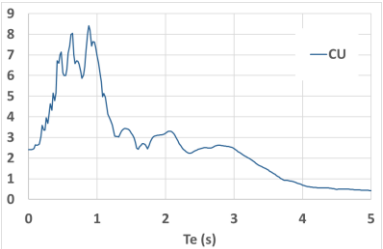
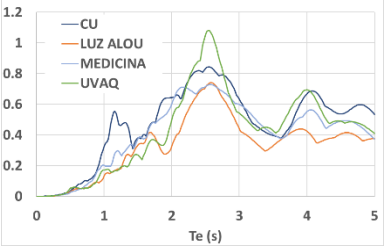
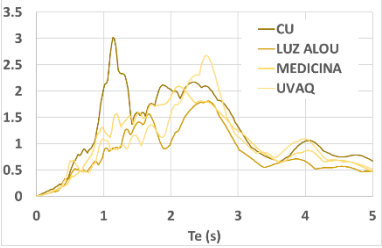
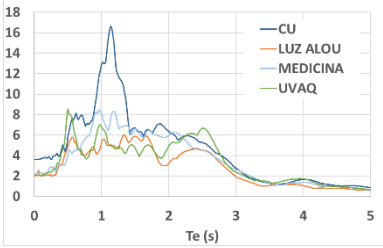
Tecpán; M=6.5; Fecha: 08/05/2014	Dist. epicentral: 302.59 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Tecpán; M=6.1; Fecha: 10/05/2014	Dist. epicentral: 297.38 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		
Pinotepa; M=7.2; Fecha: 16/02/2018	Dist. epicentral: 509.52 km Profundidad: 12 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
		

Tabla 4.1.19 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Pinotepa 2018, Cd. Hidalgo 2019, y Huetamo 2019. Componente vertical.

Pinotepa; M=6; Fecha: 19/02/2018	Dist. epicentral: 528.04 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Cd. Hidalgo; M=6.5; Fecha: 01/02/2019	Dist. epicentral: 1089.02 km Profundidad: 62 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Huetamo; M=5.6; Fecha: 03/03/2019	Dist. epicentral: 148.68 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.20 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2019, Pinotepa 2019, y Nueva Italia 2019. Componente vertical.

Altamirano; M=4.8; Fecha: 21/03/2019	Dist. epicentral: 162.05 km Profundidad: 63 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Pinotepa; M=5.5; Fecha: 22/03/2019	Dist. epicentral: 49.93 km Profundidad: 7 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Nueva Italia; M=5.6; Fecha: 16/06/2019	Dist. epicentral: 140.06 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.21 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoacceleration registrados en la RSN para los sismos de; Morelia 2020, Coyuca 2020, y Guacamayas 2020. Componente vertical.

Morelia; M=4; Fecha: 21/01/2020	Dist. epicentral: 12 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
Coyuca; M=5.3; Fecha: 30/01/2020	Dist. epicentral: 350.94 km Profundidad: 17 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
Guacamayas; M=4.7; Fecha: 12/02/2020	Dist. epicentral: 379.59 km Profundidad: 66 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)

Tabla 4.1.22 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Petatlán 2020, Crucecita 2020, y San Marcos 2021. Componente vertical.

Petatlán; M=5; Fecha: 06/04/2020	Dist. epicentral: 268.29 km Profundidad: 12 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Crucecita; M=7.5; Fecha: 23/06/2020	Dist. epicentral: 710.20 km Profundidad: 5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
San Marcos; M=5.7; Fecha: 19/03/2021	Dist. epicentral: 430.95 km Profundidad: 10.7 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.23 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Guacamayas 2021, Coalcomán 2021, y Acapulco 2021. Componente vertical.

Guacamayas; M=4.9; Fecha: 29/04/2021	Dist. epicentral: 187.49 km Profundidad: 9.5 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Coalcomán; M=5; Fecha: 10/05/2021	Dist. epicentral: 116.34 km Profundidad: 66.5 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Acapulco; M=7.1; Fecha: 07/09/2021	Dist. epicentral: 328.07 km Profundidad: 15 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.24 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Huetamo 2022, Zitácuaro 2022, y Lázaro Cárdenas 2022. Componente vertical.

Huetamo; M=4.6; Fecha: 03/01/2022	Dist. epicentral: 144.59 km Profundidad: 47 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Zitácuaro; M=4.4; Fecha: 05/04/2022	Dist. epicentral: 67.57 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Lázaro Cárdenas; M=5; Fecha: 19/04/2022	Dist. epicentral: 226.67 km Profundidad: 15 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.25 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Altamirano 2022, y Morelia 2022. Componente vertical.

Altamirano; M=5.1; Fecha: 12/08/2022	Dist. epicentral: 159.60 km Profundidad: 56 km	Fuente: Intraplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Morelia; M=4; Fecha: 13/08/2022	Dist. epicentral: 12.58 km Profundidad: 5 km	Fuente: Local
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Petatlán; M=5; Fecha: 13/09/2022	Dist. epicentral: 250.75 km Profundidad: 28 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

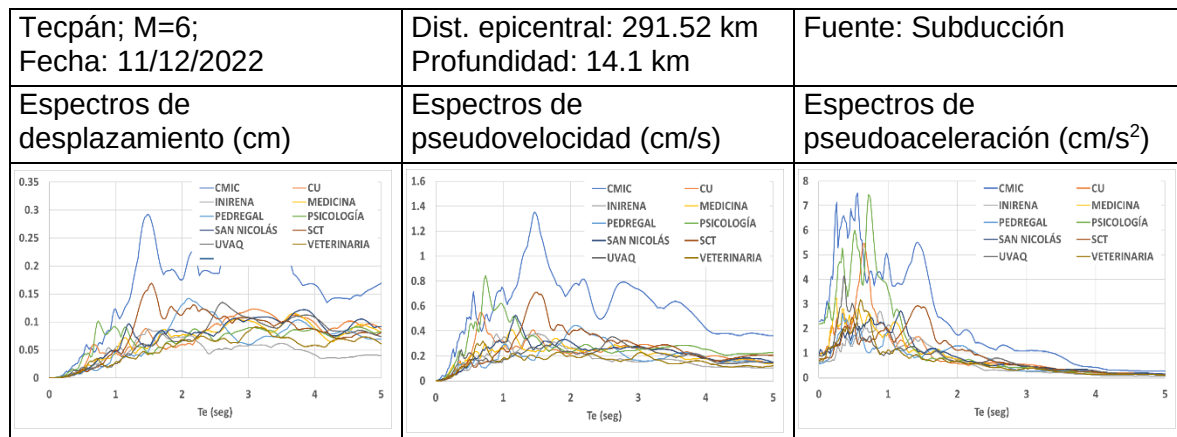
Tabla 4.1.26 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocity and pseudoacceleration registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 19/09/2022, Tecomán 2022, y Coalcomán 20/09/2022. Componente vertical.

Coalcomán; M=7.7; Fecha: 19/09/2022	Dist. epicentral: 273.55 km Profundidad: 15 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
Tecomán; M=5.8; Fecha: 20/09/2022	Dist. epicentral: 309.81 km Profundidad: 13 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)
Coalcomán; M=4.8; Fecha: 20/09/2022 05:43	Dist. epicentral: 284.16 km Profundidad: 16 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocity (cm/s)	Espectros de pseudoacceleration (cm/s ²)

Tabla 4.1.27 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Coalcomán 20/09/2022, Coalcomán 22/09/2022, y Tecomán 23/09/22. Componente vertical.

Coalcomán; M=5.4; Fecha: 20/09/2022 14:04	Dist. epicentral: 275.73 km Profundidad: 12 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Coalcomán; M=6.9; Fecha: 22/09/2022	Dist. epicentral: 279.57 km Profundidad: 12 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)
Tecomán; M=5.2; Fecha: 23/09/2022	Dist. epicentral: 308.11 km Profundidad: 10 km	Fuente: Subducción
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectros de pseudovelocidad (cm/s)	Espectros de pseudoaceleración (cm/s ²)

Tabla 4.1.28 Espectros de respuesta de desplazamiento, pseudovelocidad y pseudoaceleración registrados en la RSN para los sismos de; Tecpán 11/12/2022. Componente vertical.



En las tablas 4.1.15 – 4.1.28 se muestran los espectros de respuesta de la componente vertical, estos espectros nos dan un indicio de la mucha o poca relevancia que puede tener la componente vertical. Por lo general son espectros de menores ordenadas espectrales respecto a la componente horizontal, pero en ocasiones puede estar muy cerca e inclusive por encima.

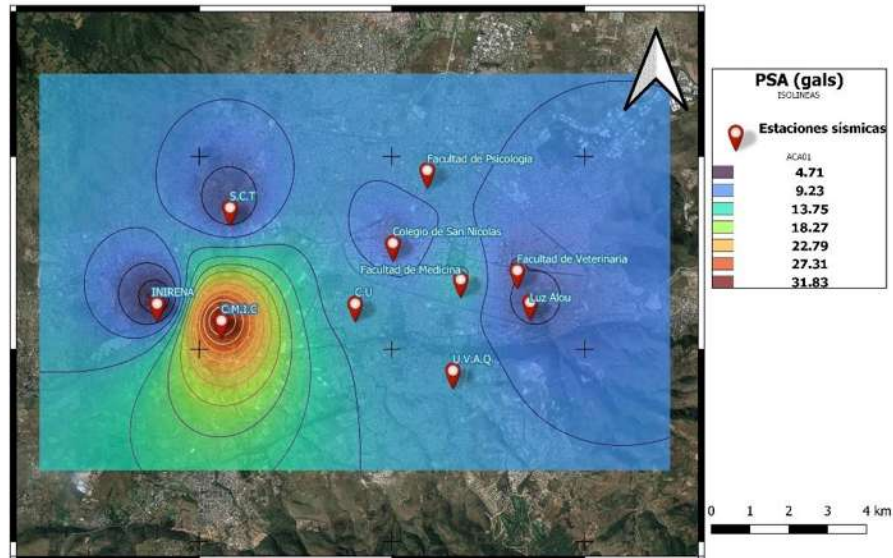
4.1.1 Mapas de intensidades de PSA (gals)

Las estaciones sísmicas de la RSN se ubicaron en un mapa para interpolar, en mapas de calor y curvas de nivel, los valores de PSA para periodos T_e de 0.1, 0.3 y 1 s. Se escogieron estos periodos por ser la zona espectral de los acelerogramas registrados con mayor intensidad. Se utilizaron los mismos temblores que se presentaron en el capítulo 3.3. En las figuras 4.1.2 – 4.1.11 se muestran los mapas de intensidades de PSA para los sismos de:

- Acapulco 7/09/2021
- Altamirano 12/08/2022
- Coalcomán 19/09/22
- Coalcomán 22/09/22
- Crucecita 23/06/2020
- Huetamo 3/03/2019
- Lázaro Cárdenas 19/04/2022
- Morelia 21/01/2020
- Nueva Italia 16/06/2019
- Zitácuaro 5/04/2022

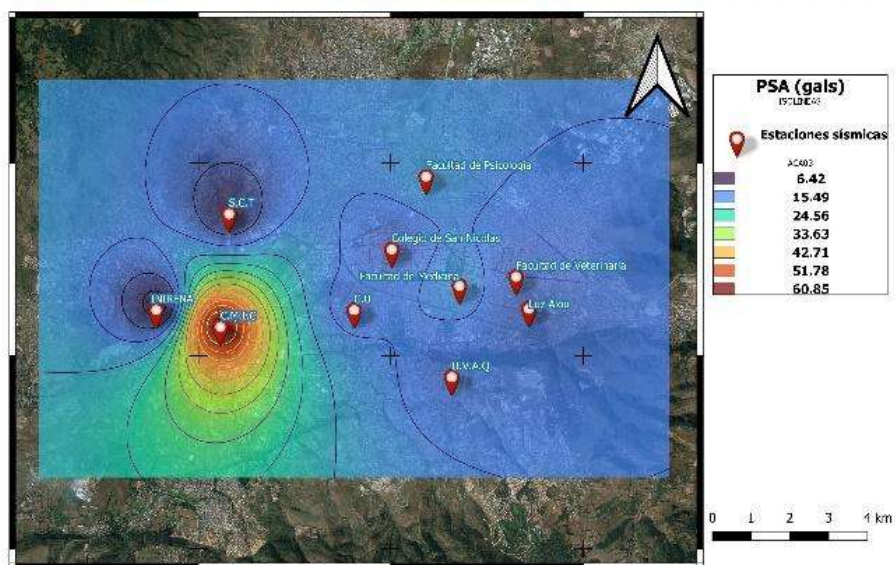
MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE ACAPULCO DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2021. Mw 7.1, R= 328 KM, SUBDUCCIÓN.

a)



MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE ACAPULCO DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2021. Mw 7.1, R= 328 KM, SUBDUCCIÓN.

b)



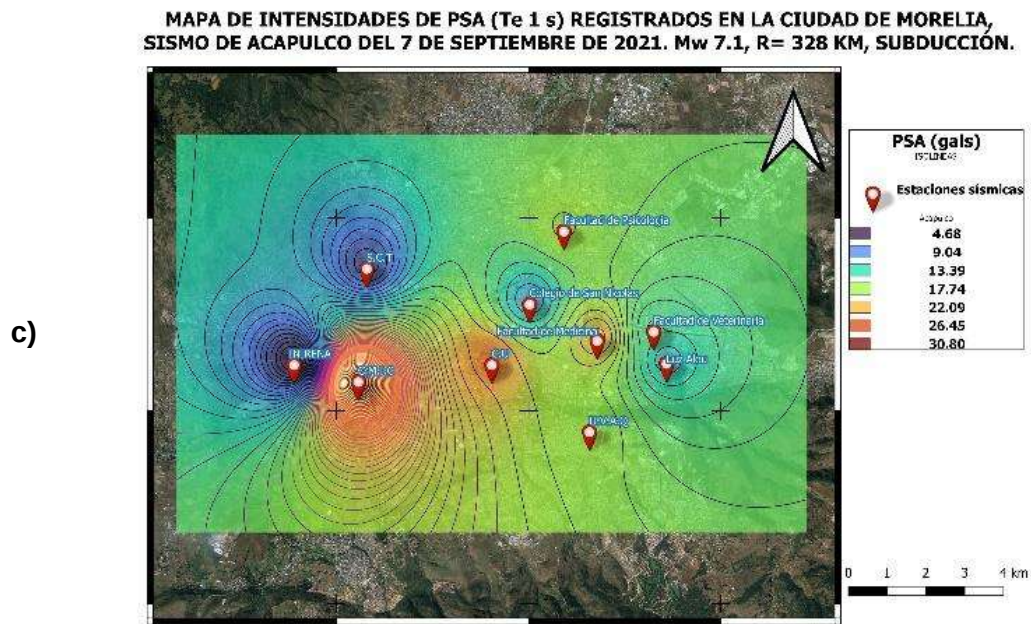
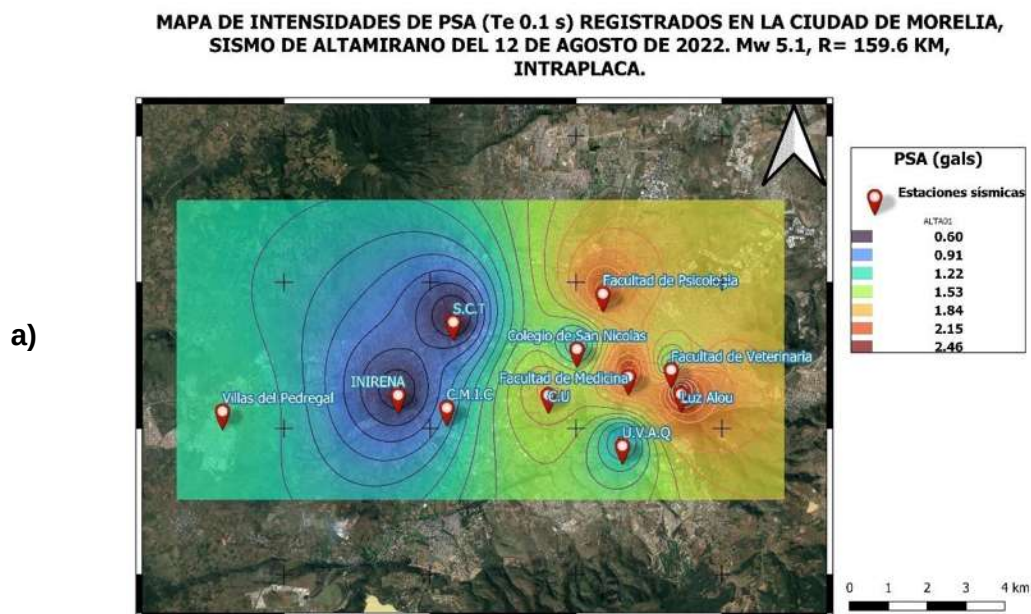
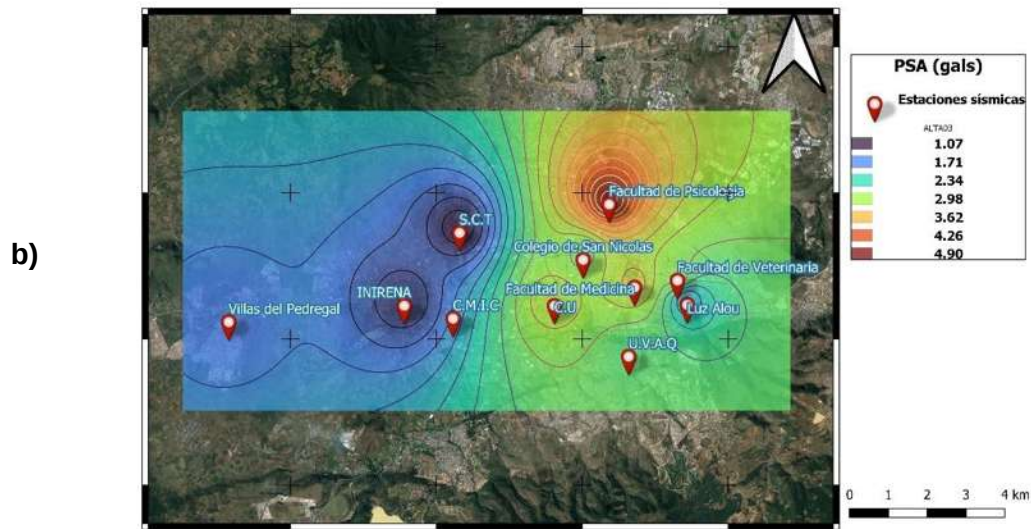


Figura 4.1.2 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Acapulco del 07/12/2021. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.



**MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA,
SISMO DE ALTAMIRANO DEL 12 DE AGOSTO DE 2022. Mw 5.1, R= 159.6 KM,
INTRAPLACA.**



**MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA,
SISMO DE ALTAMIRANO DEL 12 DE AGOSTO DE 2022. Mw 5.1, R= 159.6 KM,
INTRAPLACA.**

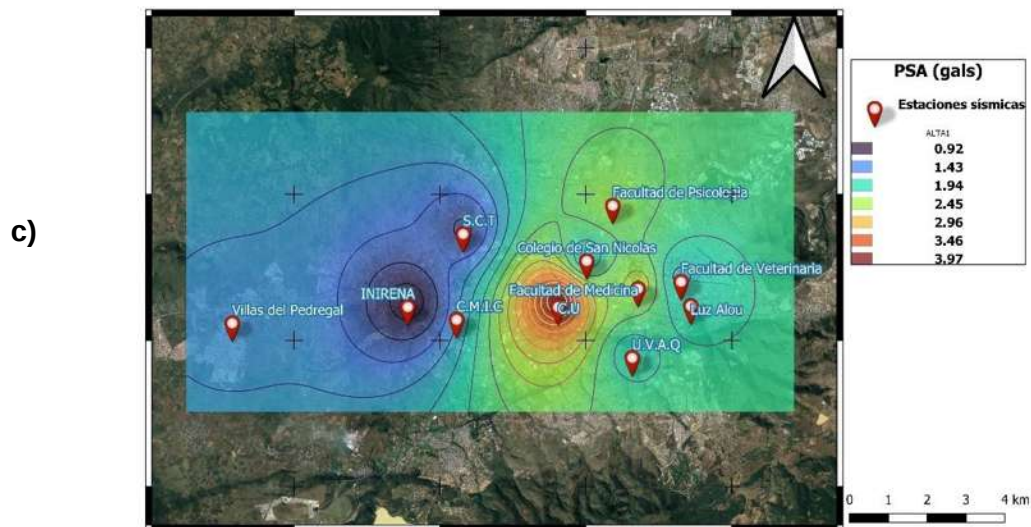
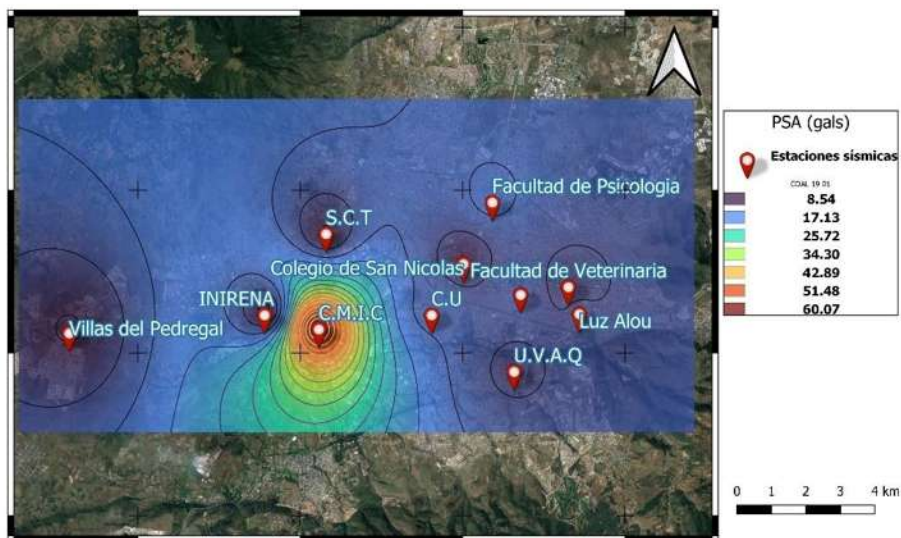


Figura 4.1.3 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Altamirano del 12/08/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

**MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA,
SISMO DE COALCOMÁN DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2022. Mw 7.7. SUBDUCCIÓN.
R=274 KM.**

a)



**MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA,
SISMO DE COALCOMÁN DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2022. Mw 7.7. SUBDUCCIÓN.
R=274 KM.**

b)

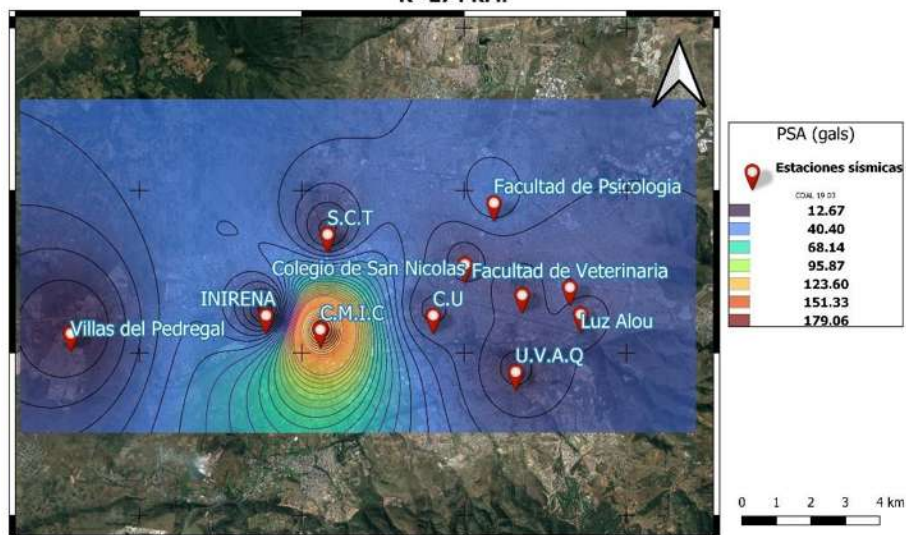




Figura 4.1.4 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Coacomán del 19/09/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.



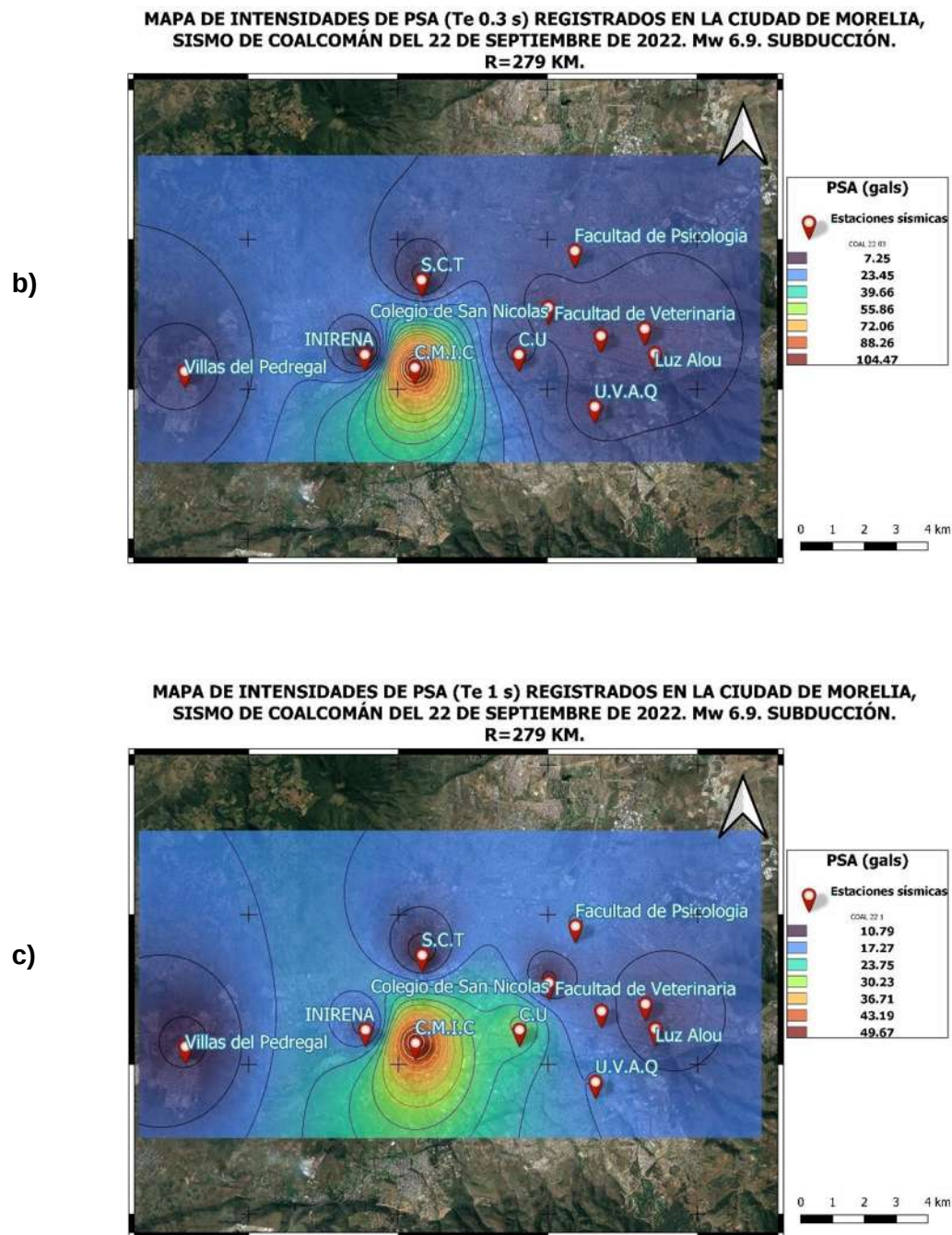
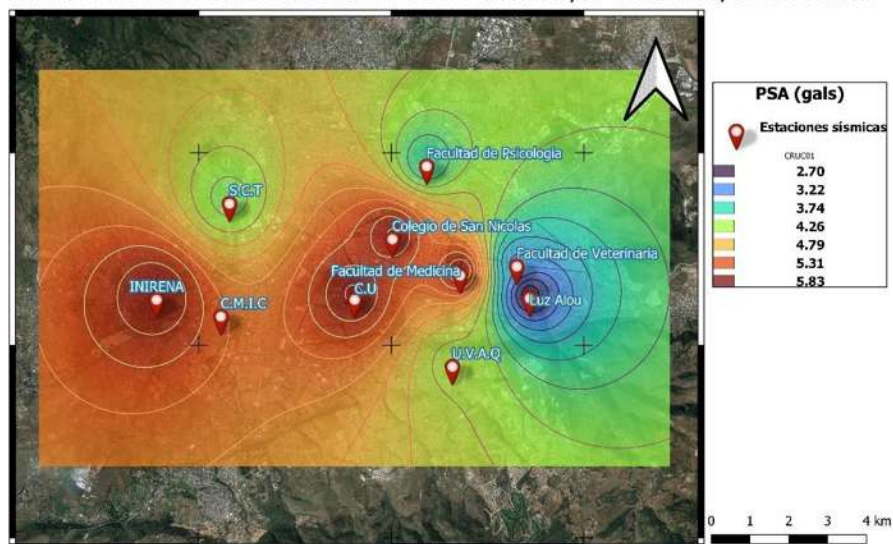


Figura 4.1.5 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Coacomán del 22/09/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

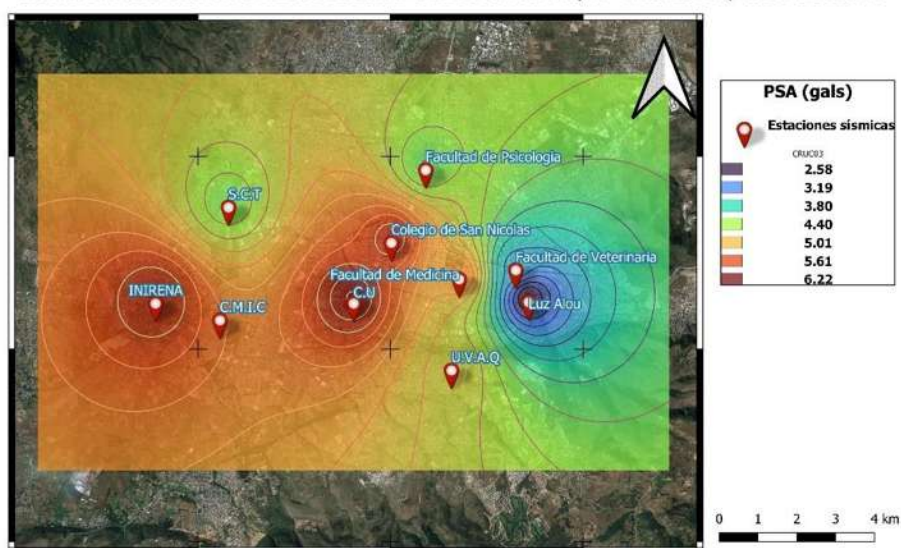
MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE CRUECITA DEL 23 DE JUNIO DE 2020. Mw 7.5, R= 710.20 KM, SUBDUCCIÓN.

a)



MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE CRUECITA DEL 23 DE JUNIO DE 2020. Mw 7.5, R= 710.20 KM, SUBDUCCIÓN.

b)



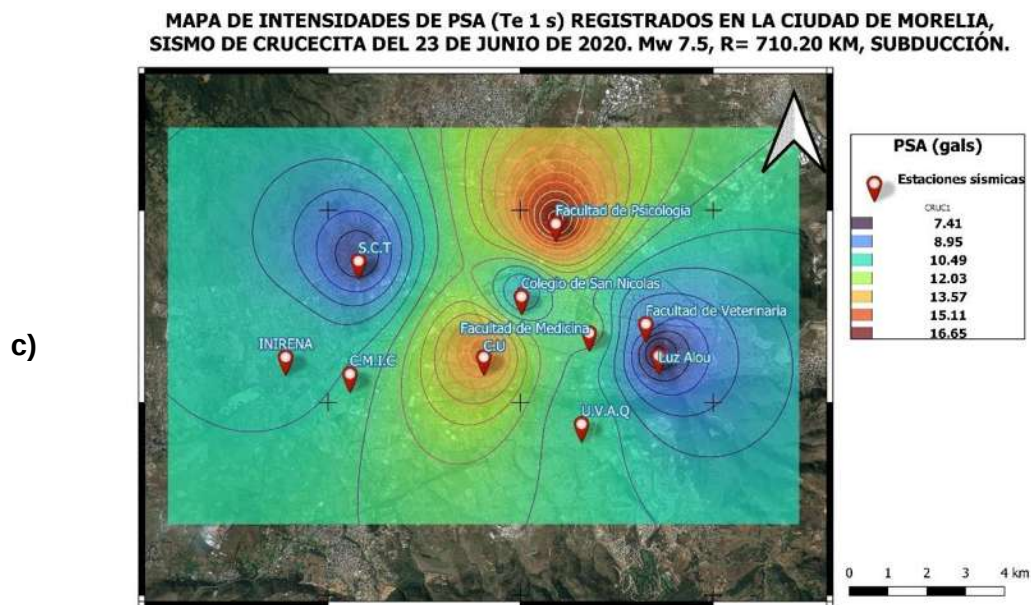
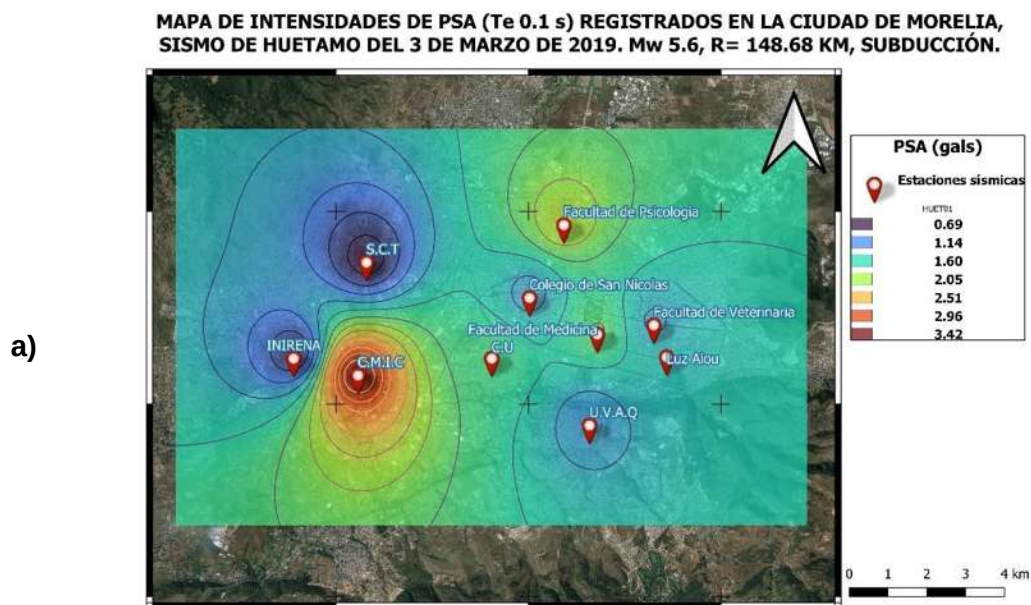


Figura 4.1.6 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Crucecita del 23/06/2020. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.



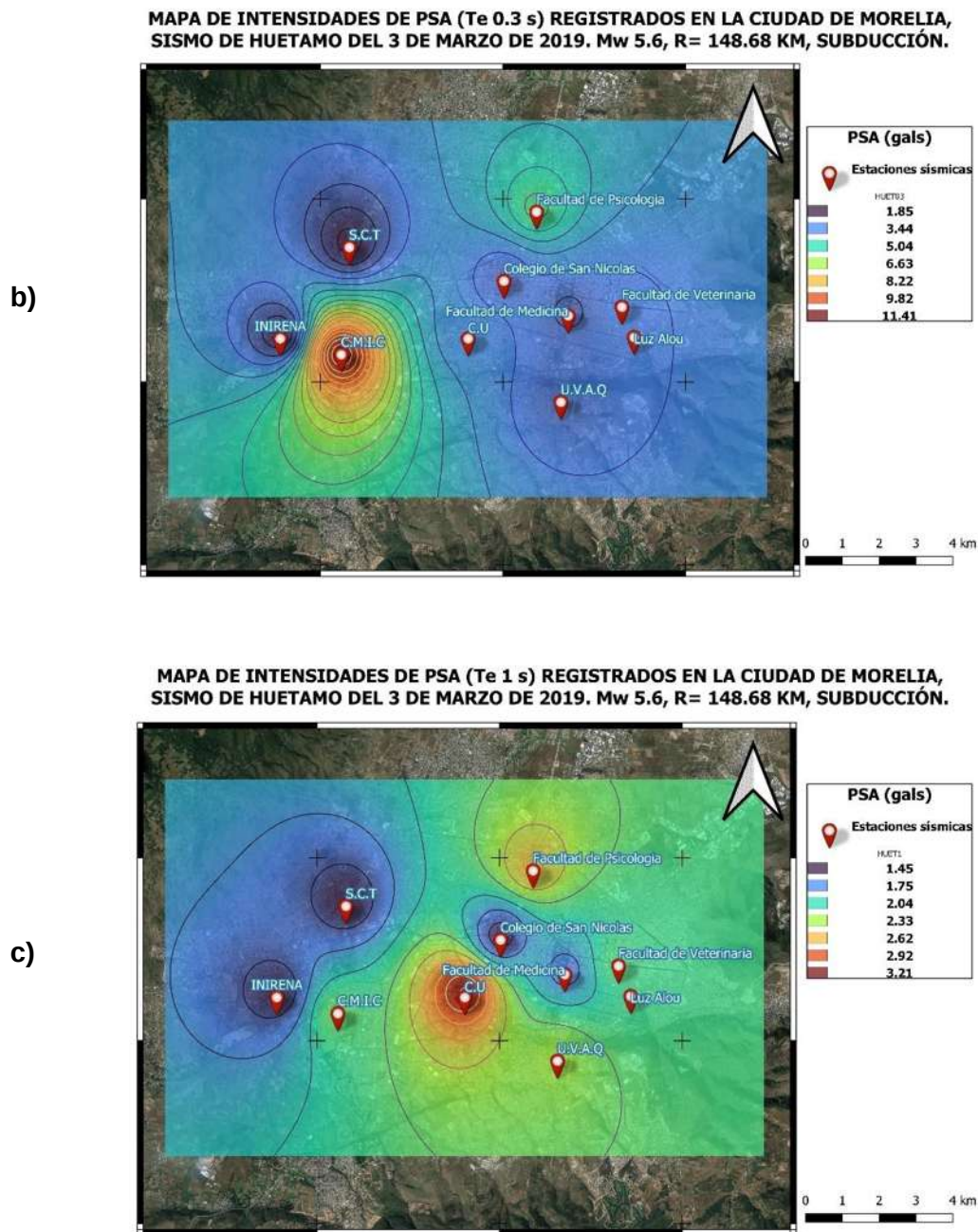
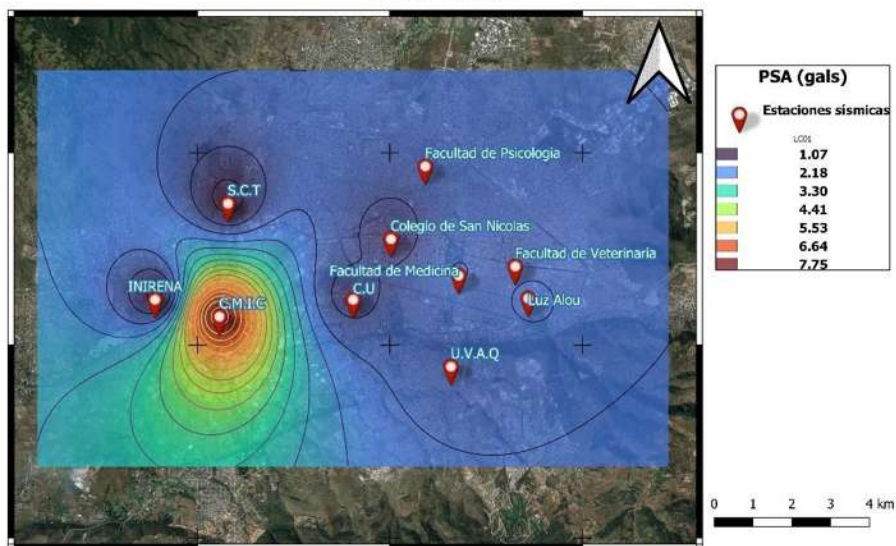


Figura 4.1.7 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Huetamo del 03/03/2019. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

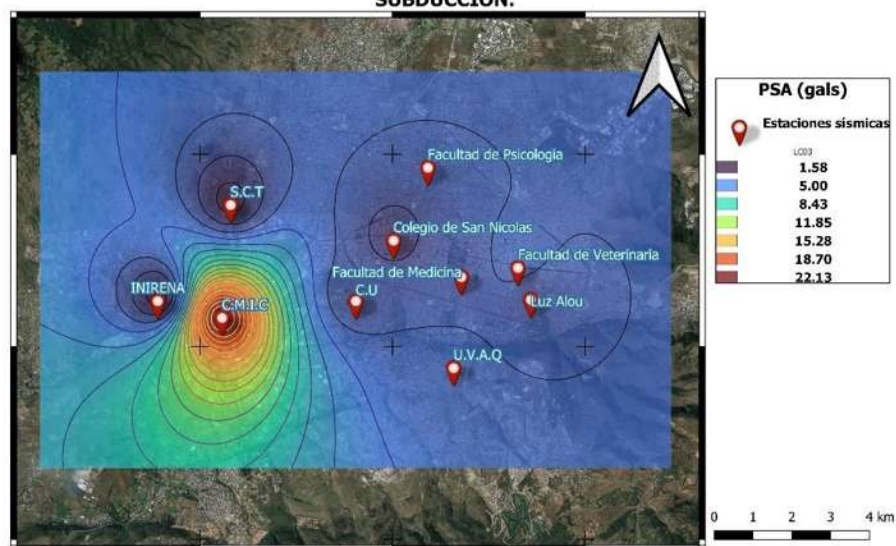
MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE LÁZARO CARDENAS DEL 19 DE ABRIL DE 2022. Mw 5, R= 226.7 KM, SUBDUCCIÓN.

a)



MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE LÁZARO CARDENAS DEL 19 DE ABRIL DE 2022. Mw 5, R= 226.7 KM, SUBDUCCIÓN.

b)



c)

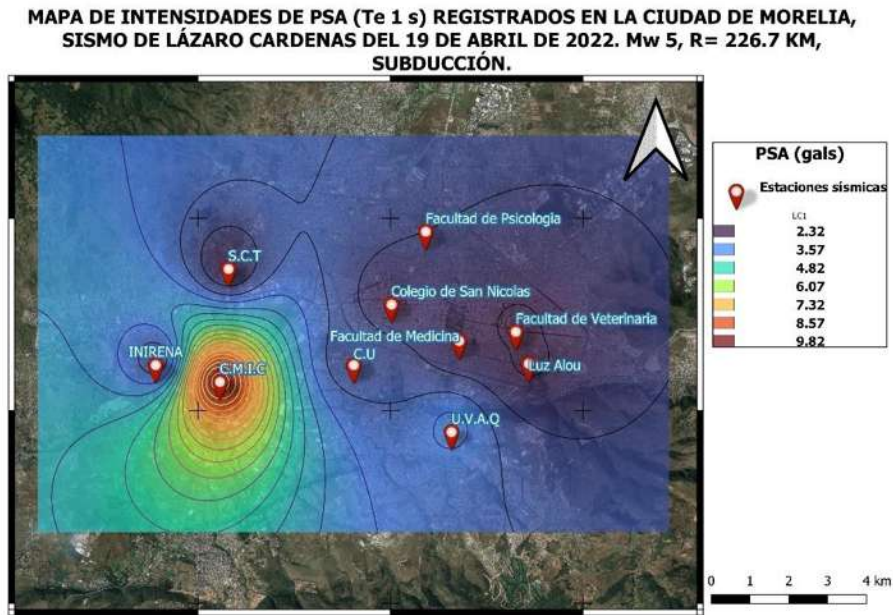
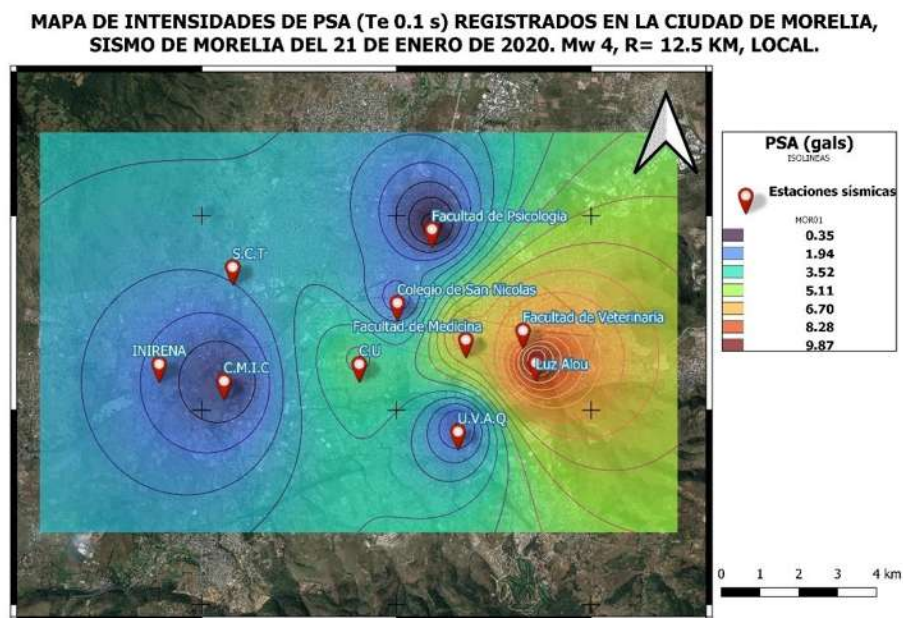


Figura 4.1.8 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Lázaro Cárdenas del 19/04/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

a)



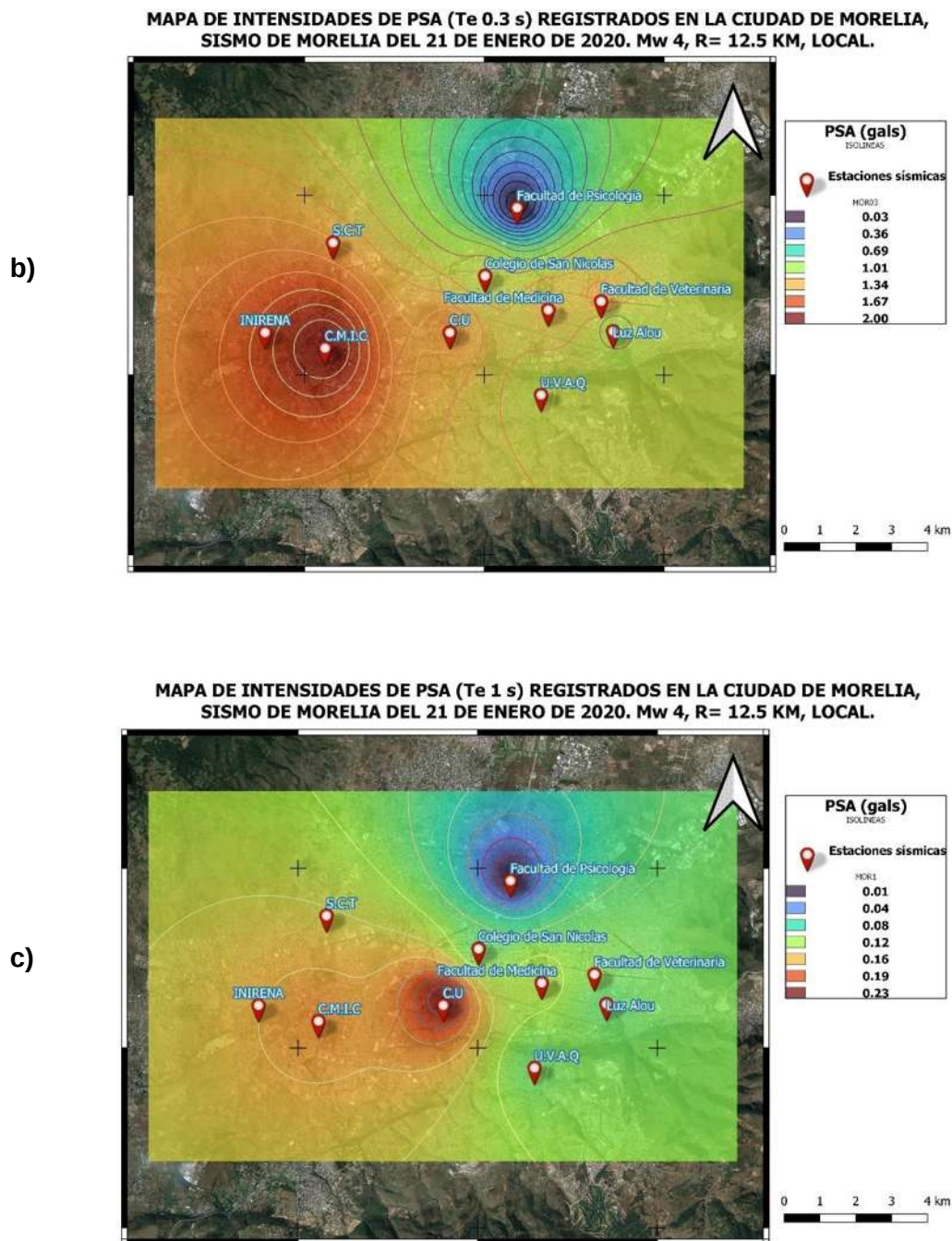
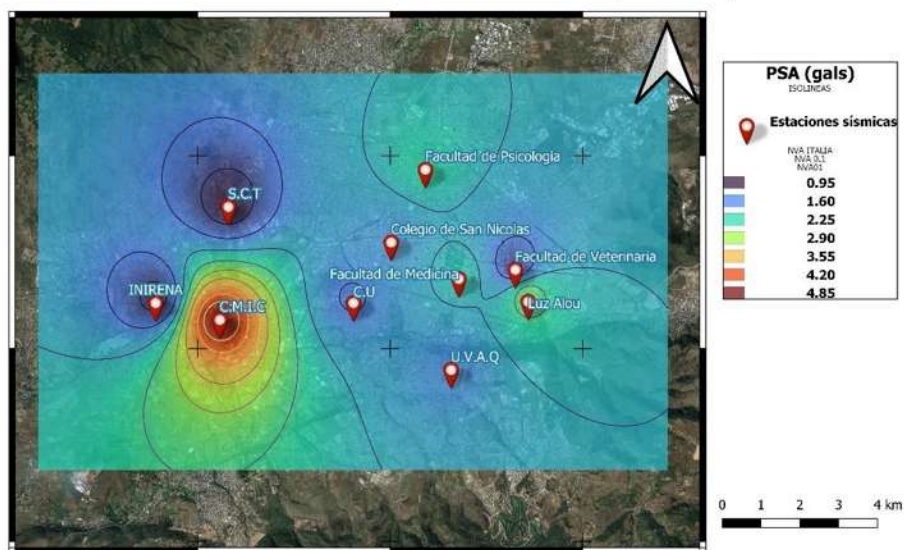


Figura 4.1.9 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Morelia del 23/01/2020. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

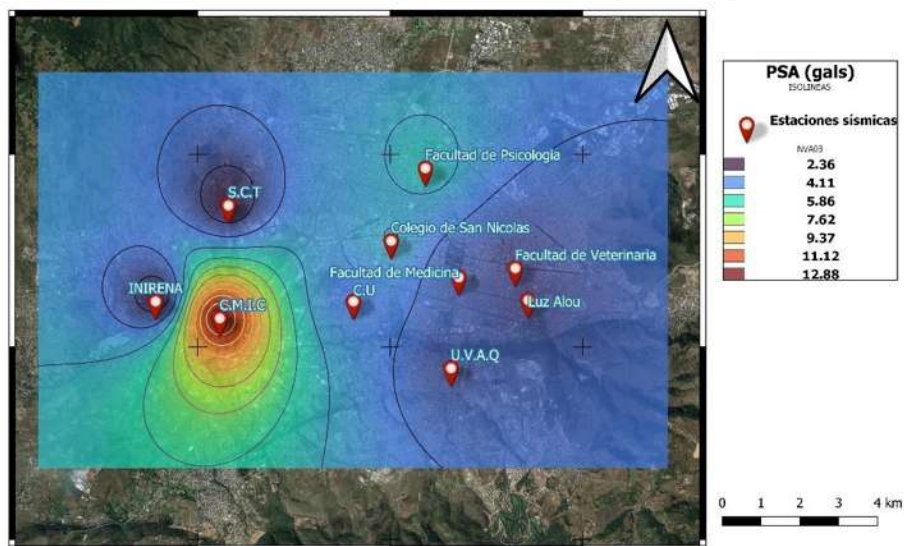
MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.1 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE NUEVA ITALIA DEL 16 DE JUNIO DE 2019. Mw 5.2, R= 140 KM, SUBDUCCIÓN.

a)



MAPA DE INTENSIDADES DE PSA (Te 0.3 s) REGISTRADOS EN LA CIUDAD DE MORELIA, SISMO DE NUEVA ITALIA DEL 16 DE JUNIO DE 2019. Mw 5.2, R= 140 KM, SUBDUCCIÓN.

b)



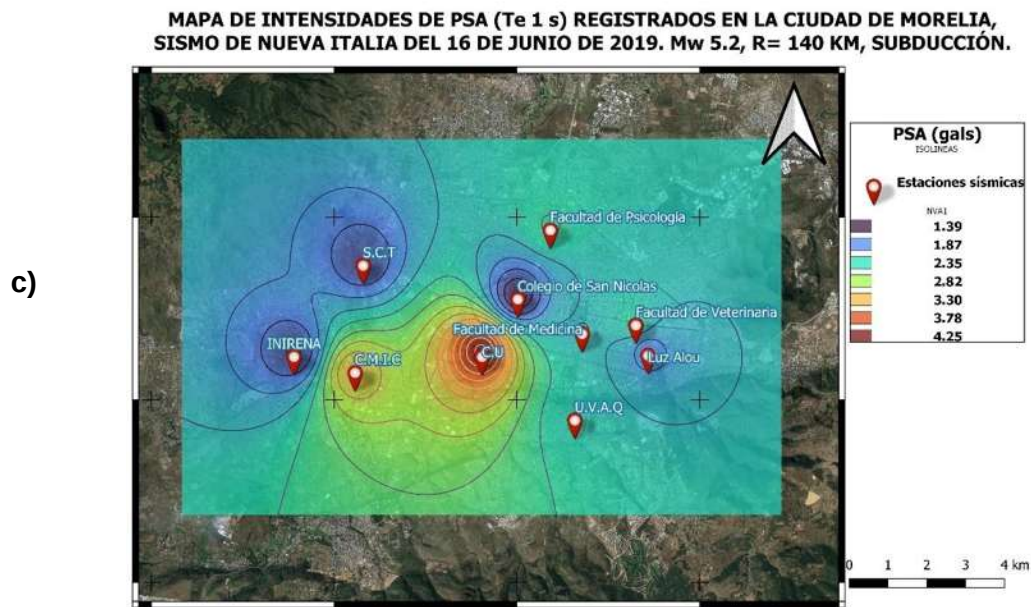
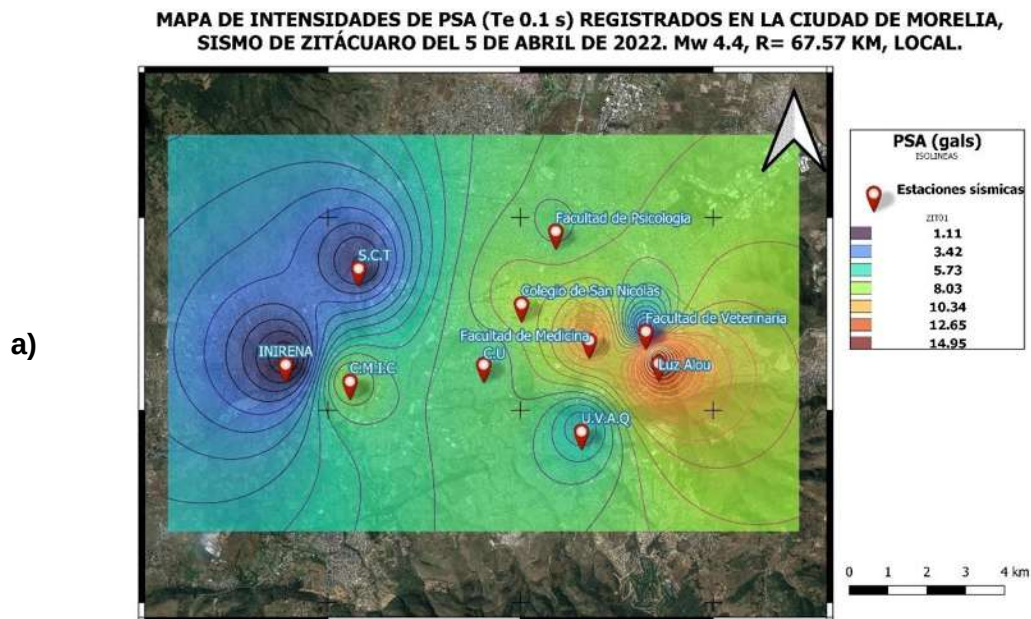


Figura 4.1.10 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Nueva Italia del 16/06/2019. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.



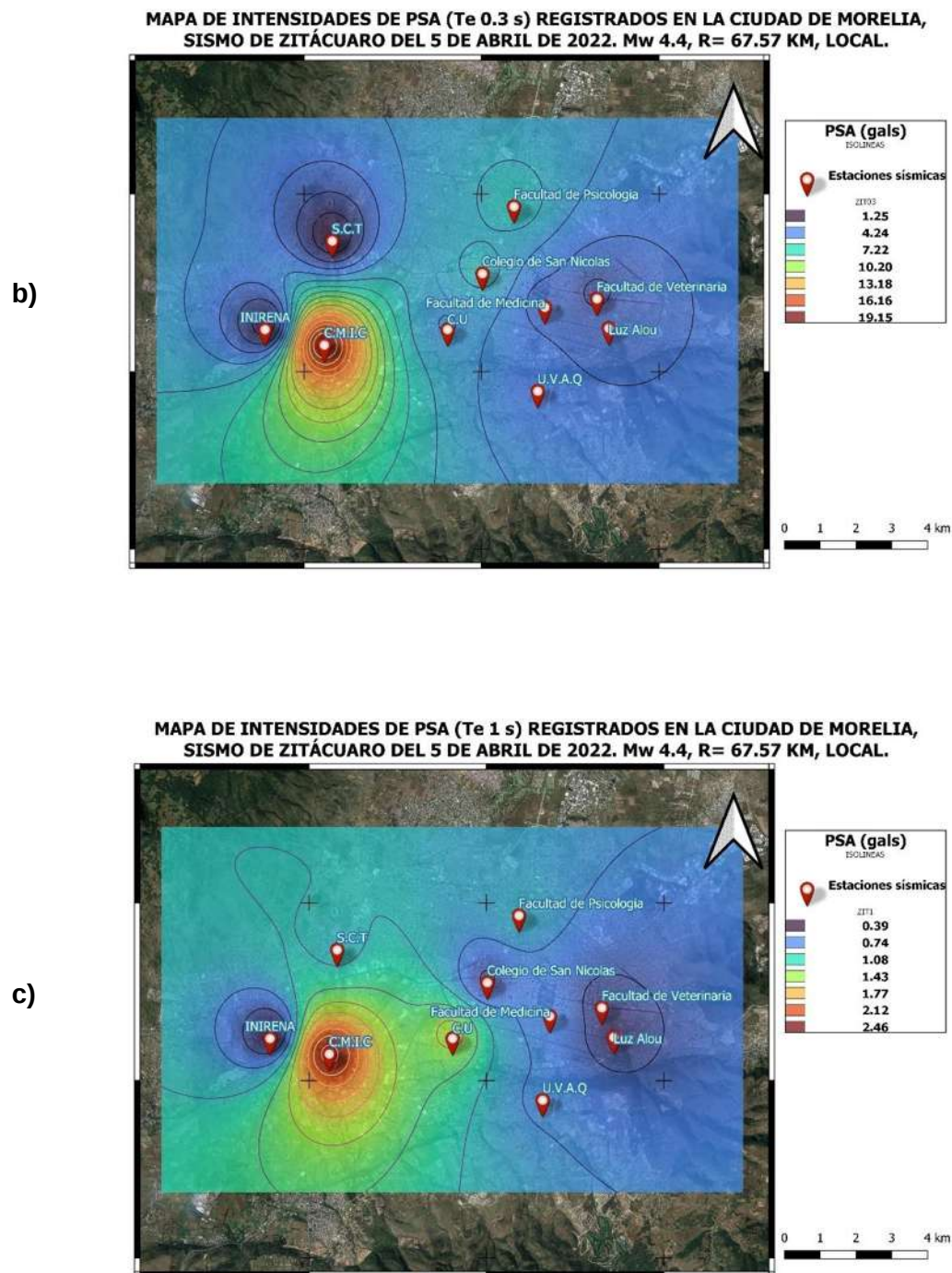


Figura 4.1.11 Mapa de intensidades de PSA (gals) registrados en la RSN, del sismo de Zitácuaro del 05/04/2022. a) PSA asociado a un período de 0.1 segundos, b) PSA asociado a un período de 0.3 segundos, y c) PSA asociado a un período de 1 segundo.

Para los temblores costeros, los mapas de interpolación (Figs. 4.1.2 – 4.1.11) muestran mayor intensidad en toda la zona cercana a la estación CMIC, lo cual es característico de ese tipo de terrenos (periodos mayores a 0.4 s). Al tratarse de un temblor de campo lejano

para la ciudad de Morelia, los acelerogramas contienen frecuencias bajas (periodos altos), que el suelo de la zona donde se encuentra la estación CMIC amplifica las ondas, originando amplitudes mayores respecto a las demás estaciones (donde la mayoría tiene períodos fundamentales de 0.1 – 0.25 s).

Caso contrario ocurre para los temblores con epicentros más cercanos (intraplaca y locales), donde se suelen presentar mayores intensidades en periodos cortos, como es el caso de la estación de Luz Alou.

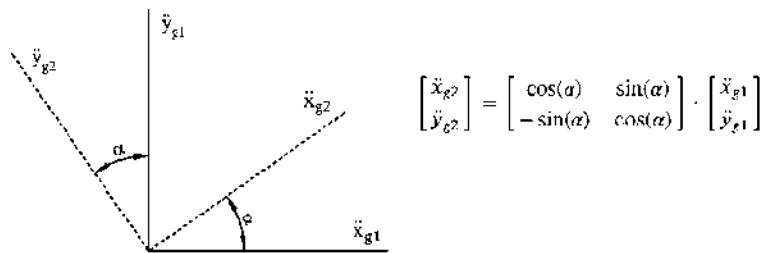
4.1.2 Espectros de respuesta rotados obtenidos en la red (ROT)

Los sensores horizontales de un acelerómetro normalmente se alinean con las direcciones Norte – Sur y Este – Oeste. No obstante, estas direcciones no necesariamente son las de mayor respuesta del movimiento telúrico. Para obtener el registro sísmico en otras direcciones se puede rotar vectorialmente el registro original en un plano 2D.

Para realizar este proceso se siguieron las recomendaciones de Gül y Takin (2021) que se describen a continuación:

En la figura 4.1.2 se indican las direcciones de las aceleraciones $\ddot{x}_{g1}$ y $\ddot{y}_{g1}$, aceleraciones originales que se supone registró el instrumento en dos ejes ortogonales. $\ddot{x}_{g2}$ y $\ddot{y}_{g2}$ son aceleraciones modificadas para un ángulo α . Este paso se repite n veces dependiendo del incremento $\Delta\alpha$ que se seleccione; en este trabajo se usó un intervalo de 1° .

La ecuación 4.1.1 es la media cuadrática espectral ($Sa_{RMS}(T)$), que depende de las pseudo aceleraciones $Sa_x(T)$ y $Sa_y(T)$; la ecuación 4.1.2 obtiene la envolvente máxima ($Sa_{RotD100}(T)$) de todas las ordenadas de pseudo aceleraciones de todas las combinaciones posibles que se realicen para cada valor de α ; la ecuación 4.1.3 indica la mediana de la ordenada de pseudo aceleración ($Sa_{RotD50}(T)$); y la ecuación 4.1.4 expresa la ordenada de pseudo aceleración mínima ($Sa_{RotD0}(T)$).



$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{g2} \\ \ddot{y}_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_{g1} \\ \ddot{y}_{g1} \end{bmatrix}$$

Figura 4.1.2 Matriz de rotación. Figura tomada de Gül y Takin (2021).

$$Sa_{RMS}(T) = \sqrt{\frac{Sa_x(T)^2 + Sa_y(T)^2}{2}} \quad (4.1.1)$$

$$Sa_{RotD100}(T) = \max_{\alpha} [Sa_{RMS}(T)] \quad (4.1.2)$$

$$Sa_{RotD50}(T) = \text{median}_{\alpha} [Sa_{RMS}(T)] \quad (4.1.3)$$

$$Sa_{RotD0}(T) = \min_{\alpha} [Sa_{RMS}(T)] \quad (4.1.4)$$

Se rotaron todos los registros sísmicos de la RSN y se calcularon sus respectivos espectros de respuesta (desplazamiento, pseudo velocidad y pseudo aceleración). Las figuras 4.1.21, 4.1.22 y 4.1.23 muestran los espectros de respuesta rotados en el intervalo de α $[0^\circ:1^\circ:90^\circ]$ de desplazamiento, pseudo velocidad y pseudo aceleración respectivamente. Al lado derecho de cada figura se muestra la comparación de los espectros RotD100 (envolvente máxima), RotD50 (envolvente mediana), RotD0 (envolvente mínima), y el espectro calculado con la posición original del acelerómetro. Estos espectros son los obtenidos en la estación CMIC, del sismo de Coalcomán del 19 de septiembre de 2022. Todos los demás espectros rotados se encuentran en el apéndice A.

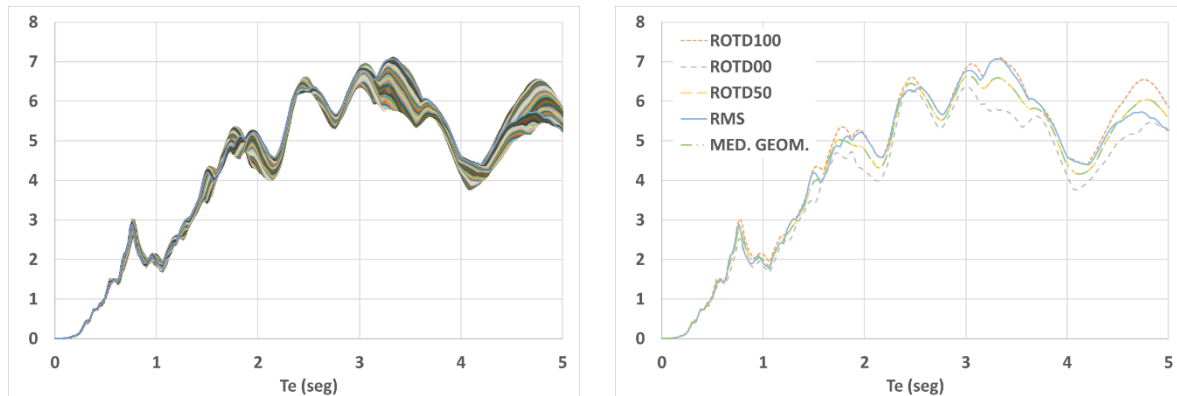


Figura 4.1.21 Espectros de desplazamiento (cm) rotados con ángulo α de 0° - 90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD00, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con los registros originales de la estación sísmica.

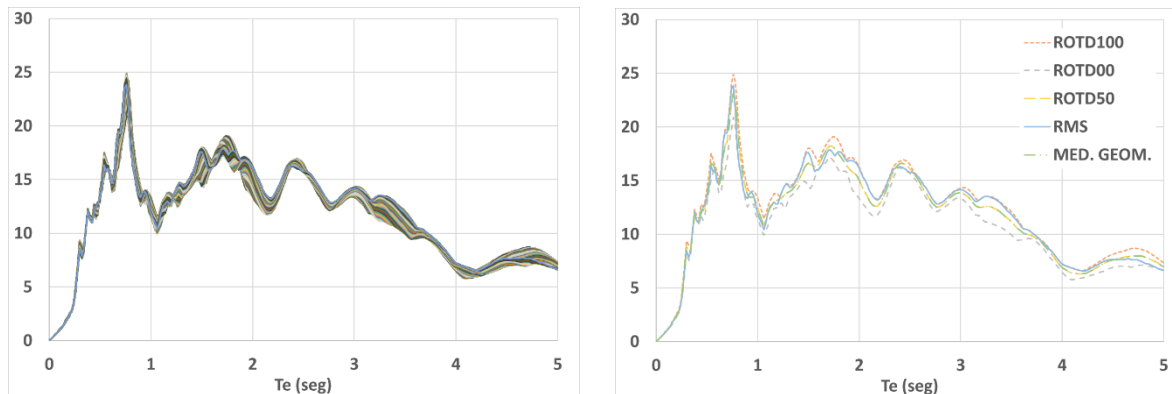


Figura 4.1.22 Espectros de pseudo velocidad (cm/s) rotados con ángulo α de 0° - 90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con la posición de origen del acelerómetro.

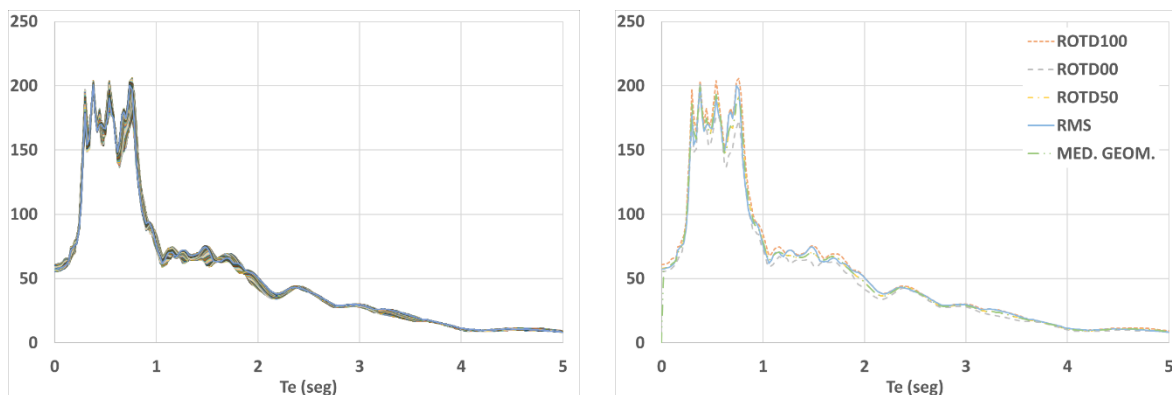


Figura 4.1.23 Espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) rotados con ángulo α de 0° - 90° (gráfica izquierda). Espectros de respuesta de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, espectro calculado (combinación RMS y Media geométrica) con la posición de origen del acelerómetro.

En las figuras 4.1.24 – 4.1.34 se muestra la mediana de los espectros de respuesta rotados, de todos los acelerogramas registrados, para cada estación sísmica. Estas figuras serán de gran ayuda para el capítulo 6, para definir el ancho de meseta de los espectros de diseño.

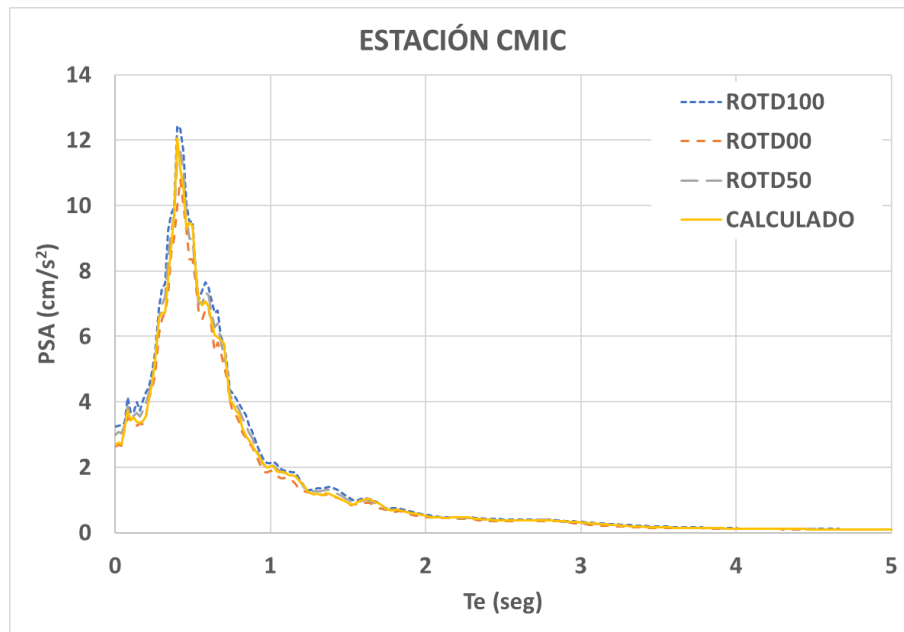


Figura 4.1.24 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación CMIC.

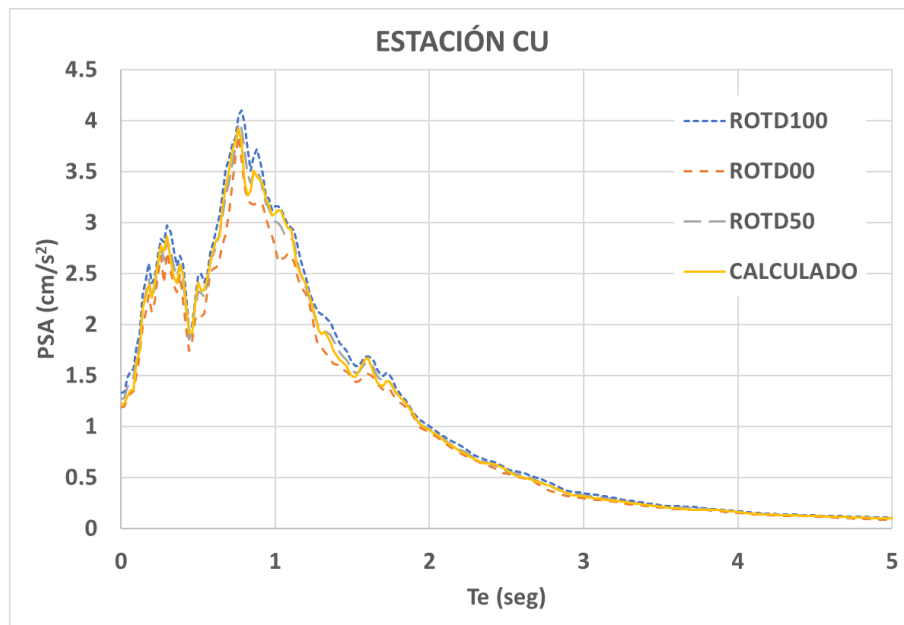


Figura 4.1.25 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación CU.

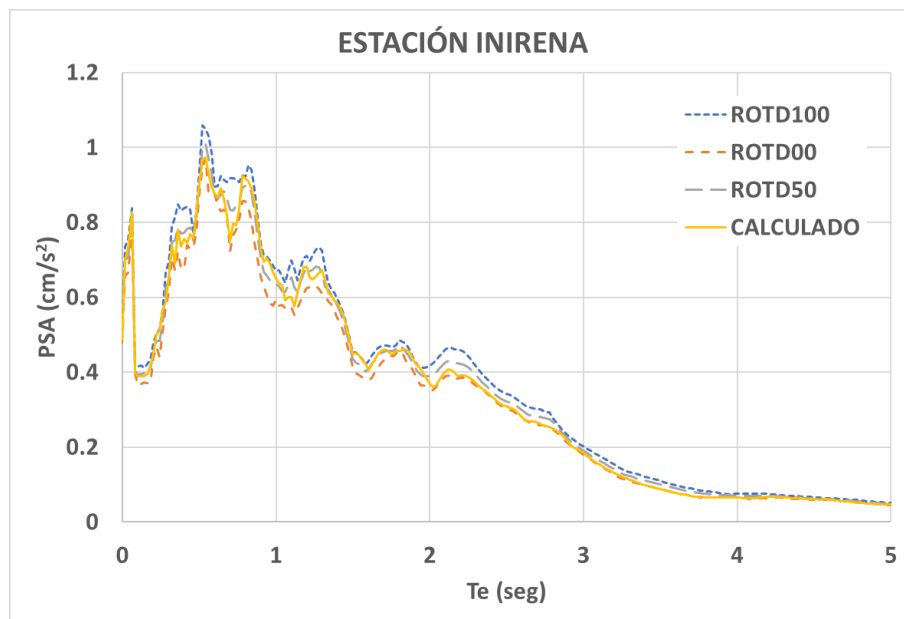


Figura 4.1.26 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación INIRENA.

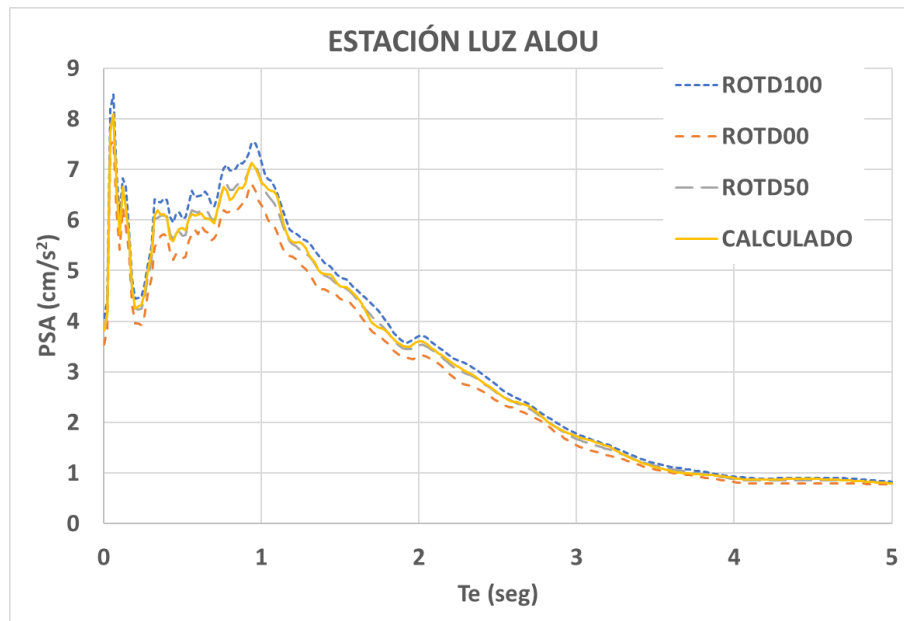


Figura 4.1.27 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s²) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación LUZ ALOU.

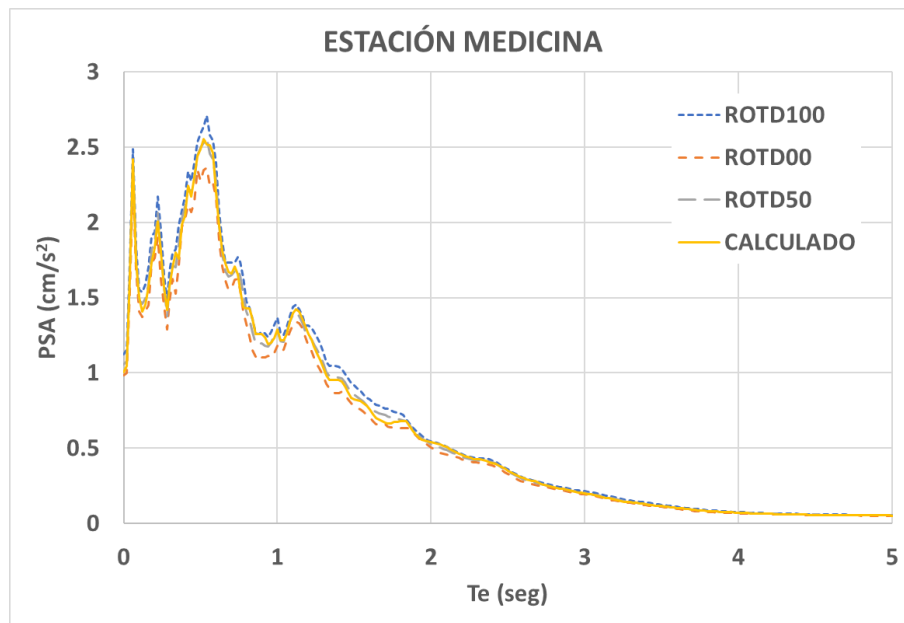


Figura 4.1.28 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación MEDICINA.

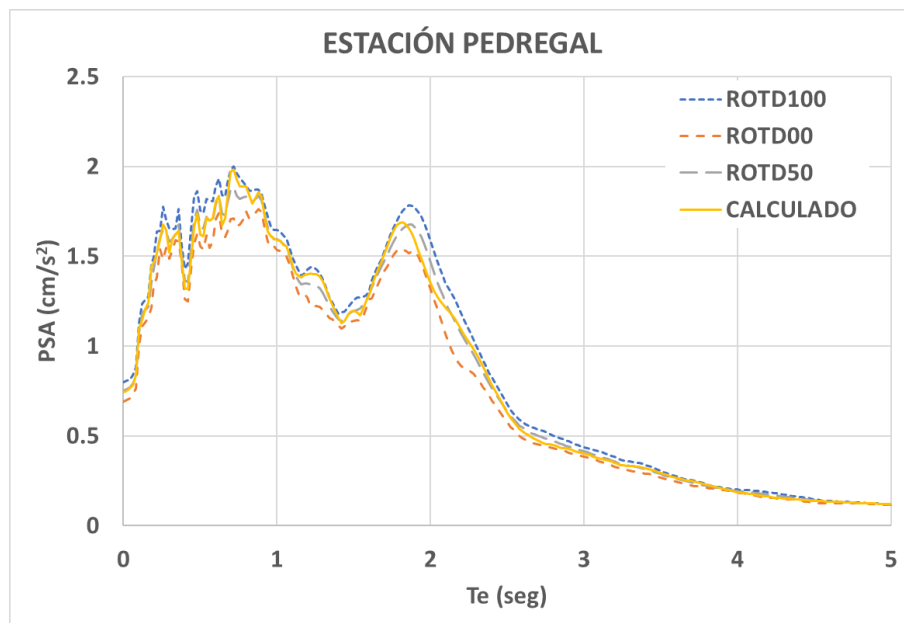


Figura 4.1.29 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación PEDREGAL.

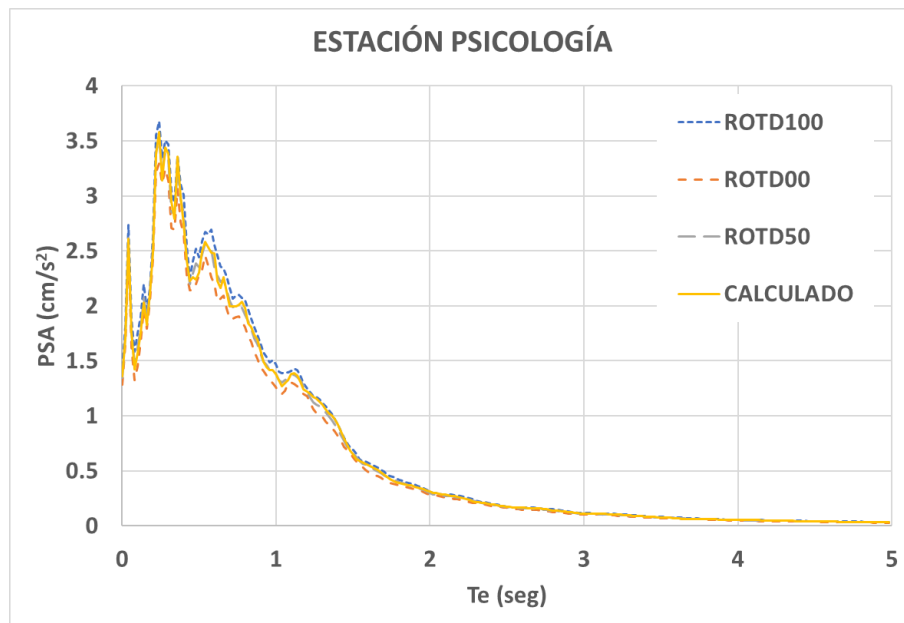


Figura 4.1.30 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación PSICOLOGÍA.

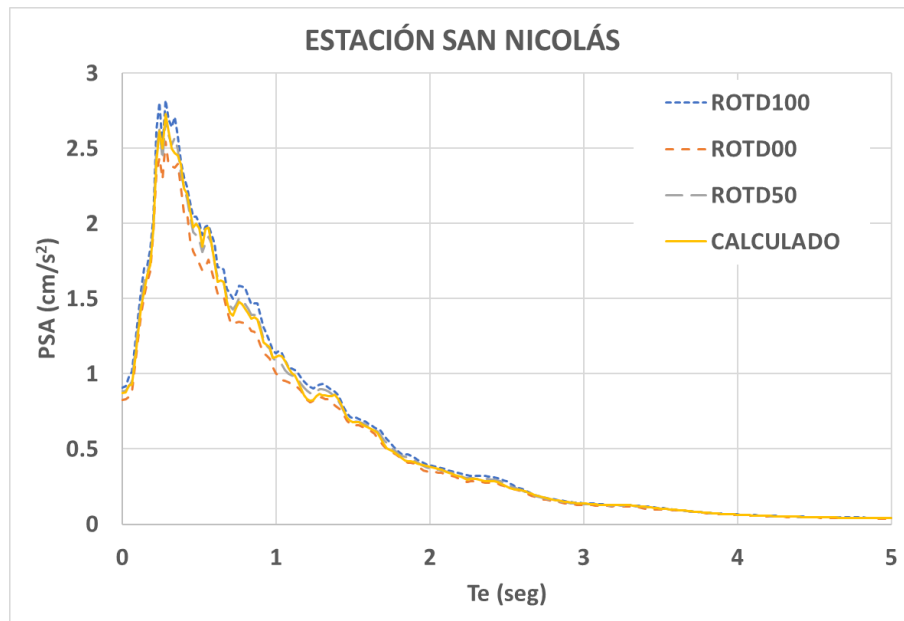


Figura 4.1.31 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación SAN NICOLÁS.

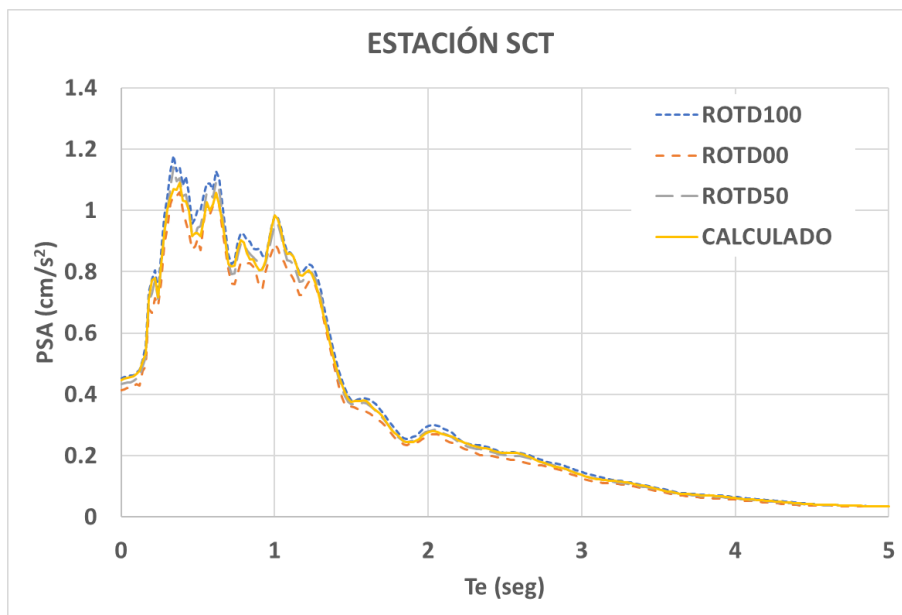


Figura 4.1.32 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación SCT.

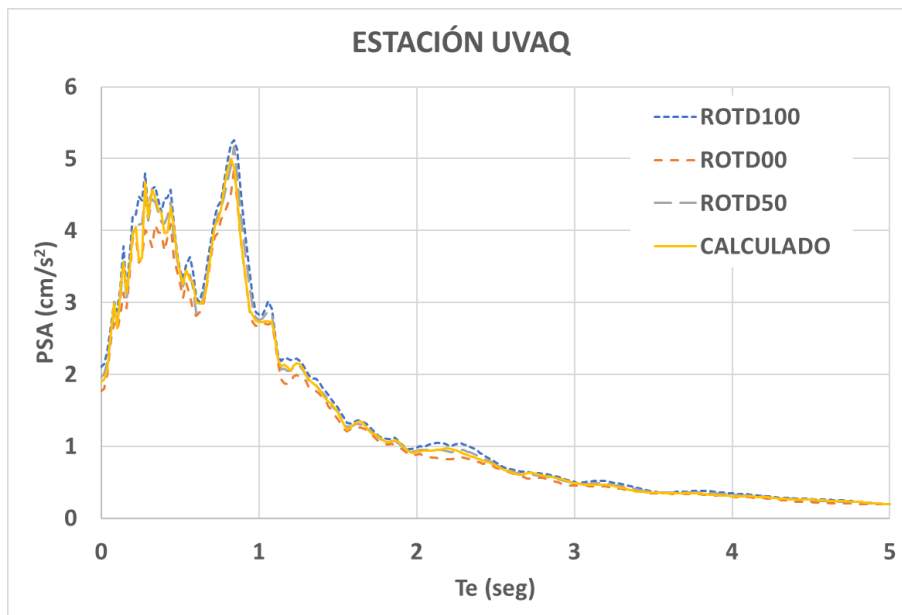


Figura 4.1.33 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación UVAQ.

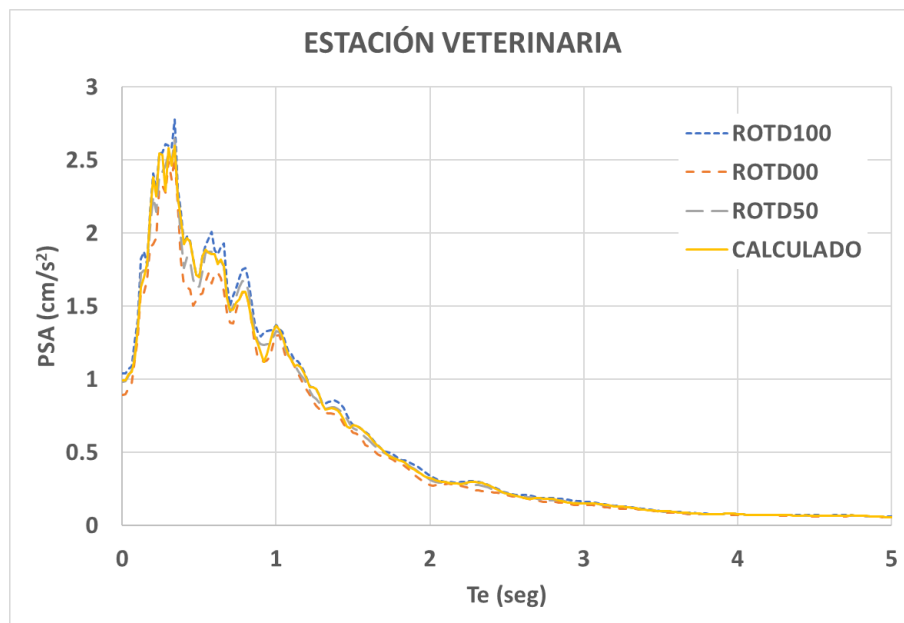


Figura 4.1.34 Mediana de todos los espectros de pseudo aceleración (cm/s^2) de las envolventes RotD100, RotD50, RotD0, y del espectro calculado con la combinación RMS de las componentes horizontales. Estación VETERINARIA.

Los espectros mostrados en las figs. 4.1.24 – 4.1.34 muestran la mediana espectral de todos los espectros obtenidos con la combinación RMS de las componentes horizontales; de los espectros rotados, el ROT100 denota la envolvente máxima y el ROT50 y ROT0 la mediana de los espectros y la envolvente mínima de los mismos, respectivamente

La estación CMIC como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, tiene mayores amplificaciones que las demás estaciones. Es por ello que la amplitud de los espectros de la estación CMIC (fig. 4.1.24) es mayor que en la de las figs. 4.1.25 – 4.1.35. Las figs. 4.1.26 y 4.1.32 muestran los espectros de las estaciones de INIRENA y SCT, que tienen las menores ordenadas de todas las estaciones, por lo que seguramente corresponden a sitios de terreno firme.

4.2. Espectros de Fourier.

Para obtener el espectro de Fourier se necesita aplicar la transformada de Fourier (FFT), la que transforma las señales sísmicas al dominio de la frecuencia. El espectro de Fourier es una gráfica que en el eje de las abscisas despliega la amplitud del movimiento registrado y en el eje de las ordenadas, la frecuencia en Hertz. A diferencia de los espectros de respuesta, en los espectros de Fourier solo interviene el registro sísmico sin ninguna participación de sistemas de un grado de libertad. Las frecuencias donde se encuentran las mayores amplitudes (picos) se puede interpretar como la frecuencia fundamental del movimiento en el terreno, que es muy importante respecto al movimiento esperado de las

estructuras construidas en ese sitio. También suelen aparecer amplitudes importantes para frecuencias propias del evento sísmico.

En la figura 4.2 se muestra el código de Matlab utilizado para calcular todos los espectros de Fourier de todos los registros capturados en la RSN. Las tablas 4.2.1 – 4.2.20 muestran la combinación RMS de los espectros de Fourier de las componentes horizontales (Norte-Sur y Este-Oeste), y de la componente vertical, para cada estación sísmica.

```
te=xlsread('REG_ATOYAC14.xlsx','Hoja1','A2:A100000');
ab=xlsread('REG_ATOYAC14.xlsx','Hoja1','B2:B100000');
%ab2=xlsread('FFT_REG_ACAPULCO 07-09-2021.xlsx','DATOS E-O','B3:B112000');

dt=te(3)-te(2); %incremento del tiempo del acelerograma
[na ttt]=size(ab); %na=numero de puntos del acelerograma
%[na ttt]=size(ab'); %na=numero de puntos de la señal senoidal generada
p1=log(na)/log(2);
p2=fix(p1); %parte entera de p1
if p2==p1 %caso cuando p1 es un número entero
    p=p1; %potencia para determinar el numero de puntos de la fft 2**p
else
    p=p2+1; %potencia para determinar el numero de puntos de la fft 2**p
end
np=2^p; %numero de puntos para la fft

%transformada rapida de Fourier señal ab (N-S)
tf1=fft(ab,np); %transformada de Fourier
fp=abs(tf1(1:np/2+1)*dt); %espectro de amplitudes de velocidad
tf2=abs(tf1);
ang=angle(tf1);
ff=ifft(tf1);
rf=tf1/np;
for k=1:np-1
    a(k)=2*real(tf1(k+1))/np;
    b(k)=-2*imag(tf1(k+1))/np;
end

%frecuencia circular hasta la que se desea graficar
ffin=120; %rad/s
nnn=ffin*np*dt/(2*pi);
numptos=fix(nnn);

%Grafica del espectro de amplitudes de Fourier ab
%plot (fa(1:numptos),fp(1:numptos))
figure(1)
plot (fc(1:numptos),fp(1:numptos))
%plot (fc(1:numptos),abs(tf1(1:numptos)))
title ('ESPECTRO DE AMPLITUDES DE FOURIER N-S')
grid on
xlabel ('Frecuencia de la carga')
ylabel ('Amplitud de la respuesta')
```

Figura 4.2 Código usado para calcular los espectros de Fourier.

Componente Horizontal

Tabla 4.2.1 Espectros de Fourier de las estaciones de CMIC, CU e INIRENA.
Combinación RMS de las componentes horizontales.

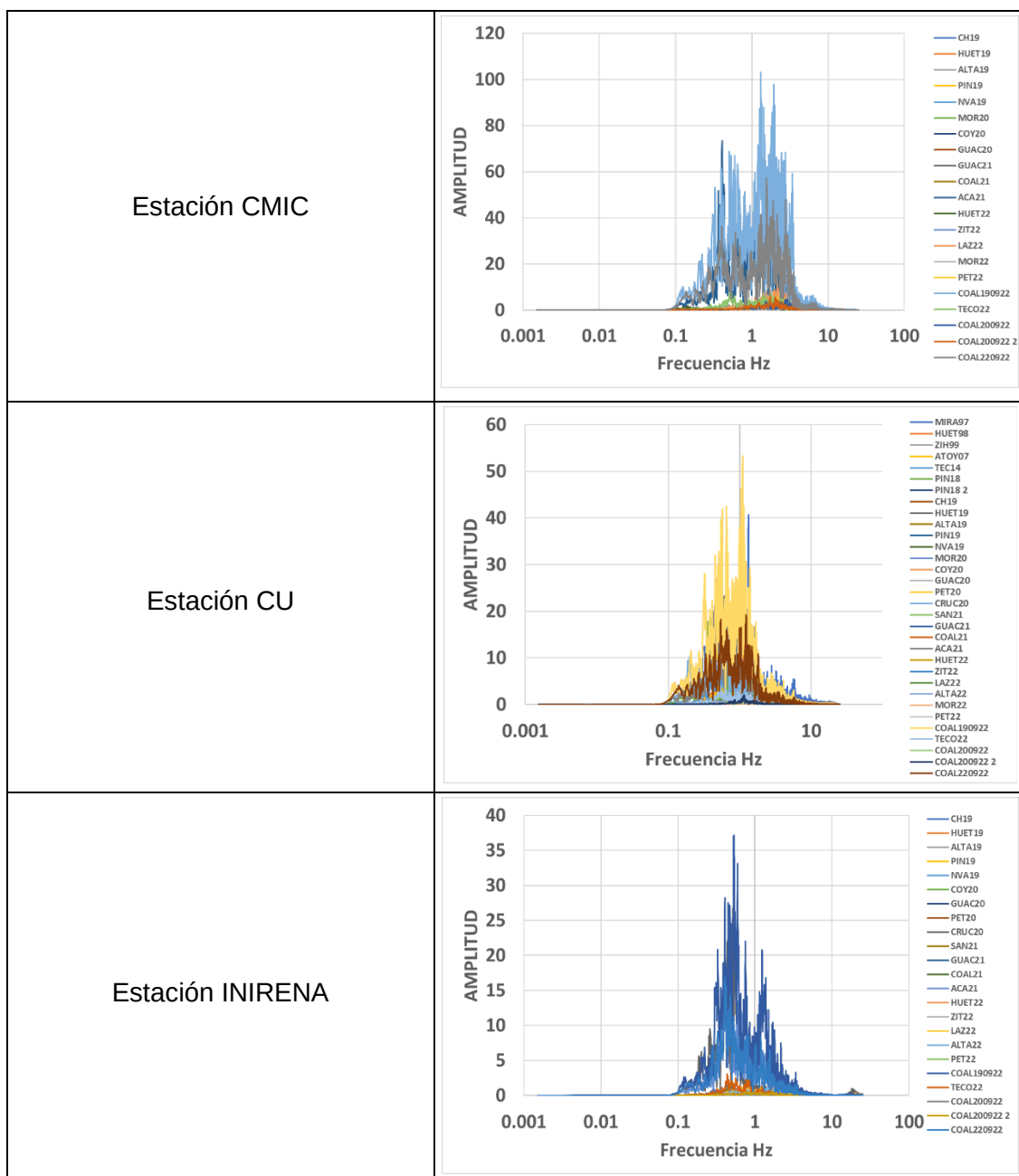


Tabla 4.2.2 Espectros de Fourier de las estaciones de LUZ ALOU, MEDICINA y PEDREGAL. Combinación RMS de las componentes horizontales.

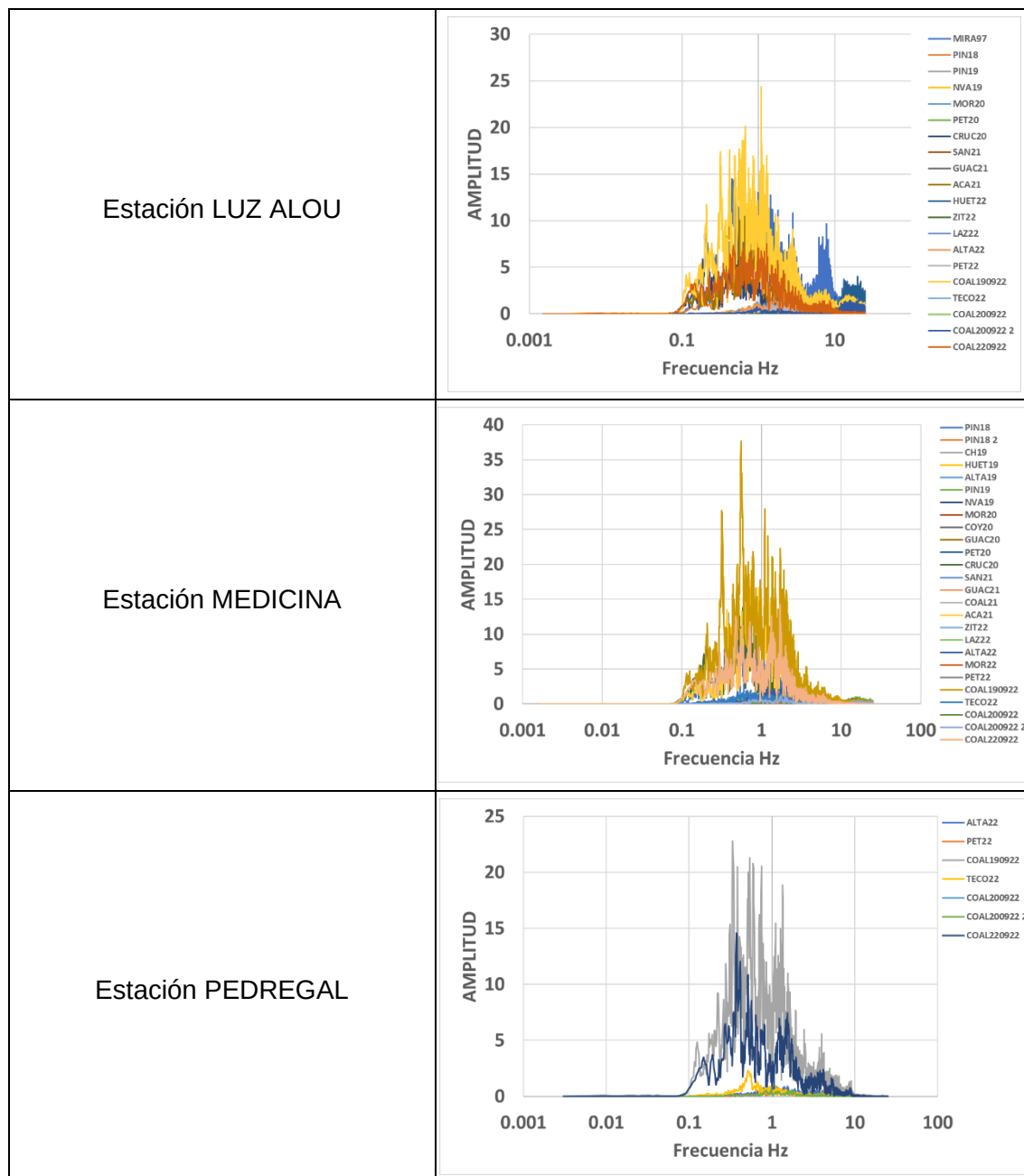


Tabla 4.2.3 Espectros de Fourier de las estaciones de PSICOLOGÍA, SAN NICOLÁS, y SCT. Combinación RMS de las componentes horizontales.

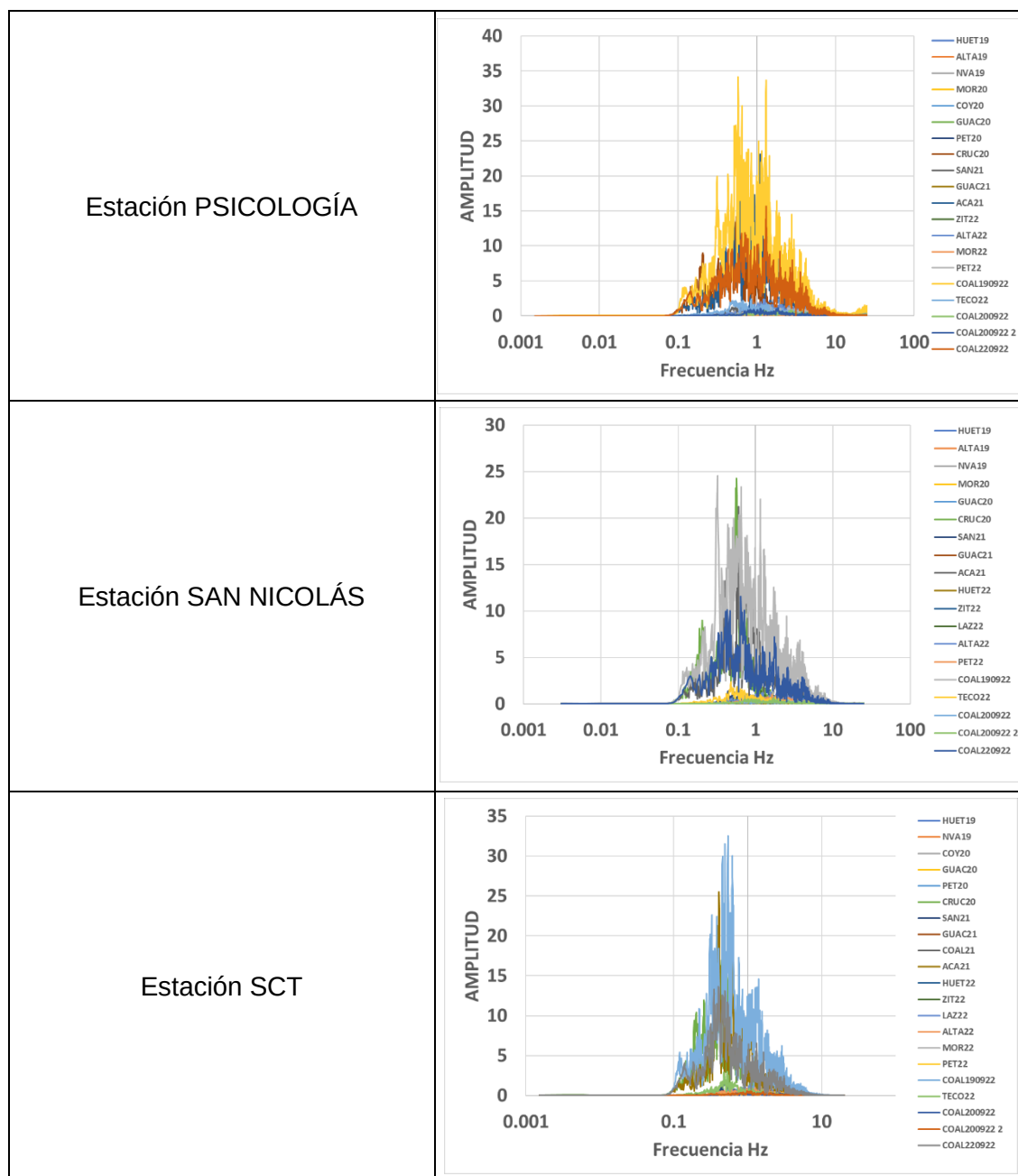
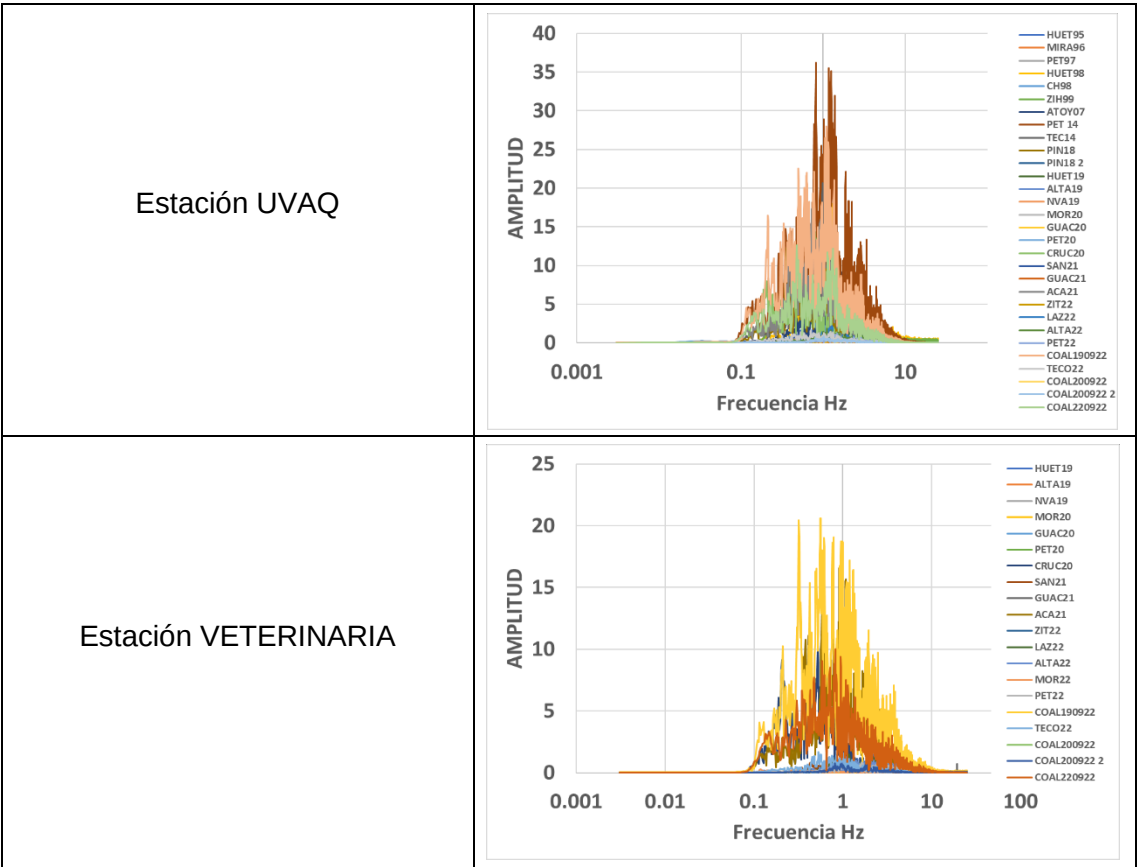


Tabla 4.2.4 Espectros de Fourier de las estaciones UVAQ, y VETERINARIA.
Combinación RMS de las componentes horizontales.



Los sismos de magnitud mayor de 7 que se han registrado en la RSN han sido temblores de subducción, esto quiere decir, que son sismos relativamente lejanos para la ciudad de Morelia. Por eso en los espectros de Fourier aparecen amplitudes grandes en frecuencias de 0.5 – 1 Hz. Para los sismos de otras fuentes cuyas magnitudes son menores, no se percibe claramente frecuencias con grandes amplitudes, pero se encuentran en un intervalo de frecuencias mayores (periodos más pequeños).

Componente Vertical

Tabla 4.2.5 Espectros de Fourier de las estaciones de CMIC, CU e INIRENA. Componente vertical.

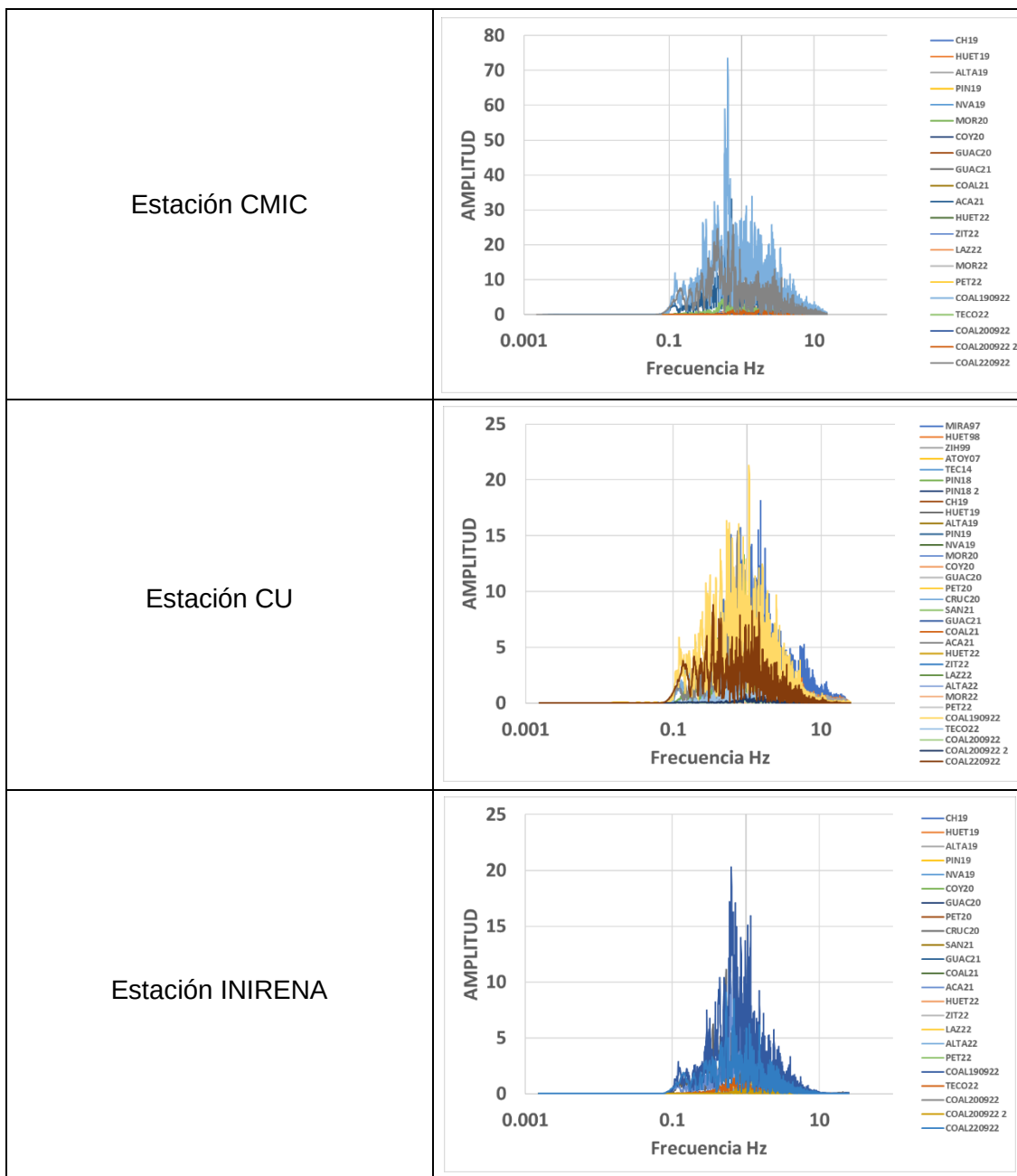


Tabla 4.2.6 Espectros de Fourier de las estaciones de LUZ ALOU, MEDICINA y PEDREGAL. Componente vertical.

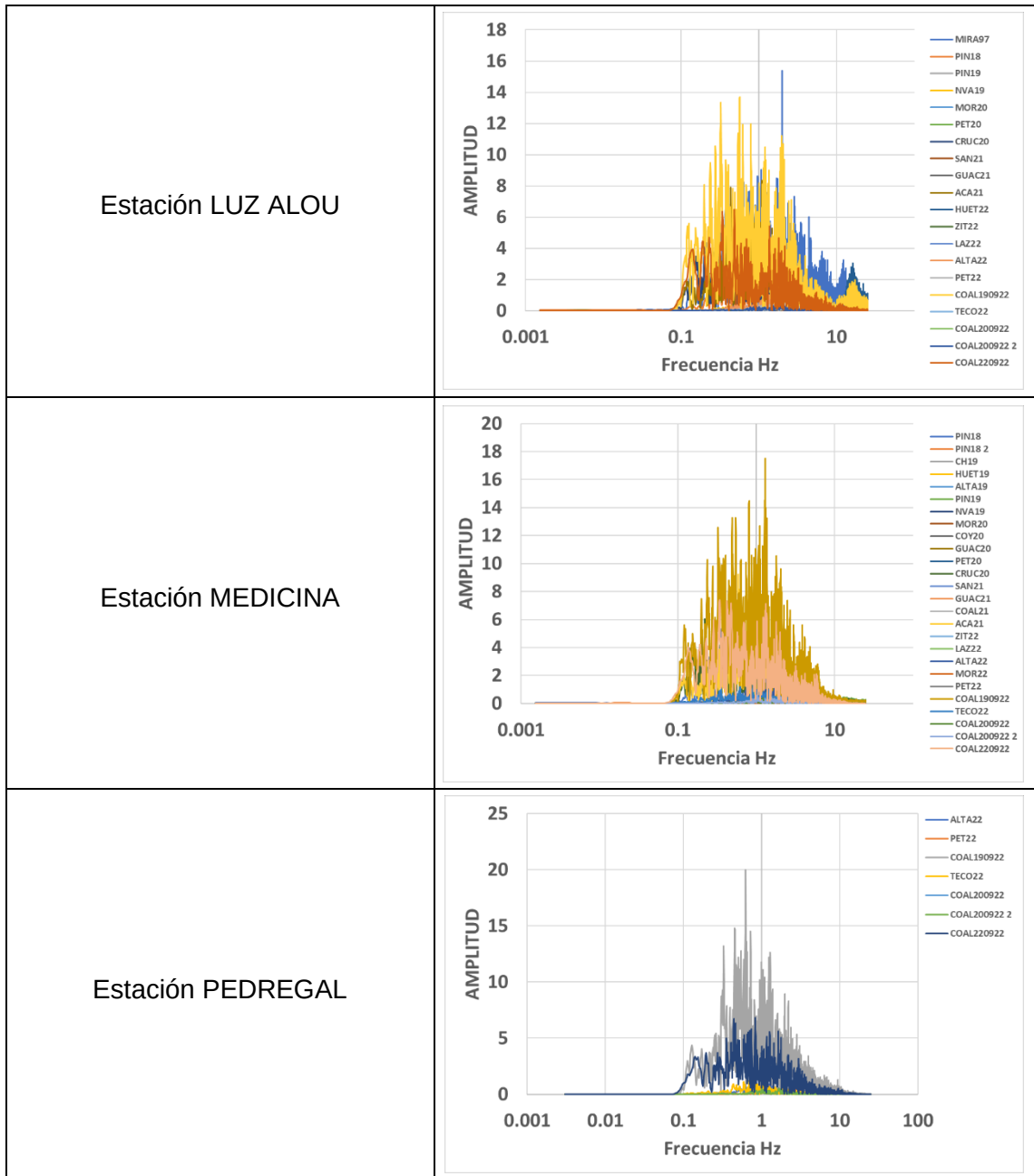


Tabla 4.2.7 Espectros de Fourier de las estaciones de PSICOLOGÍA, SAN NICOLÁS, y SCT. Componente vertical.

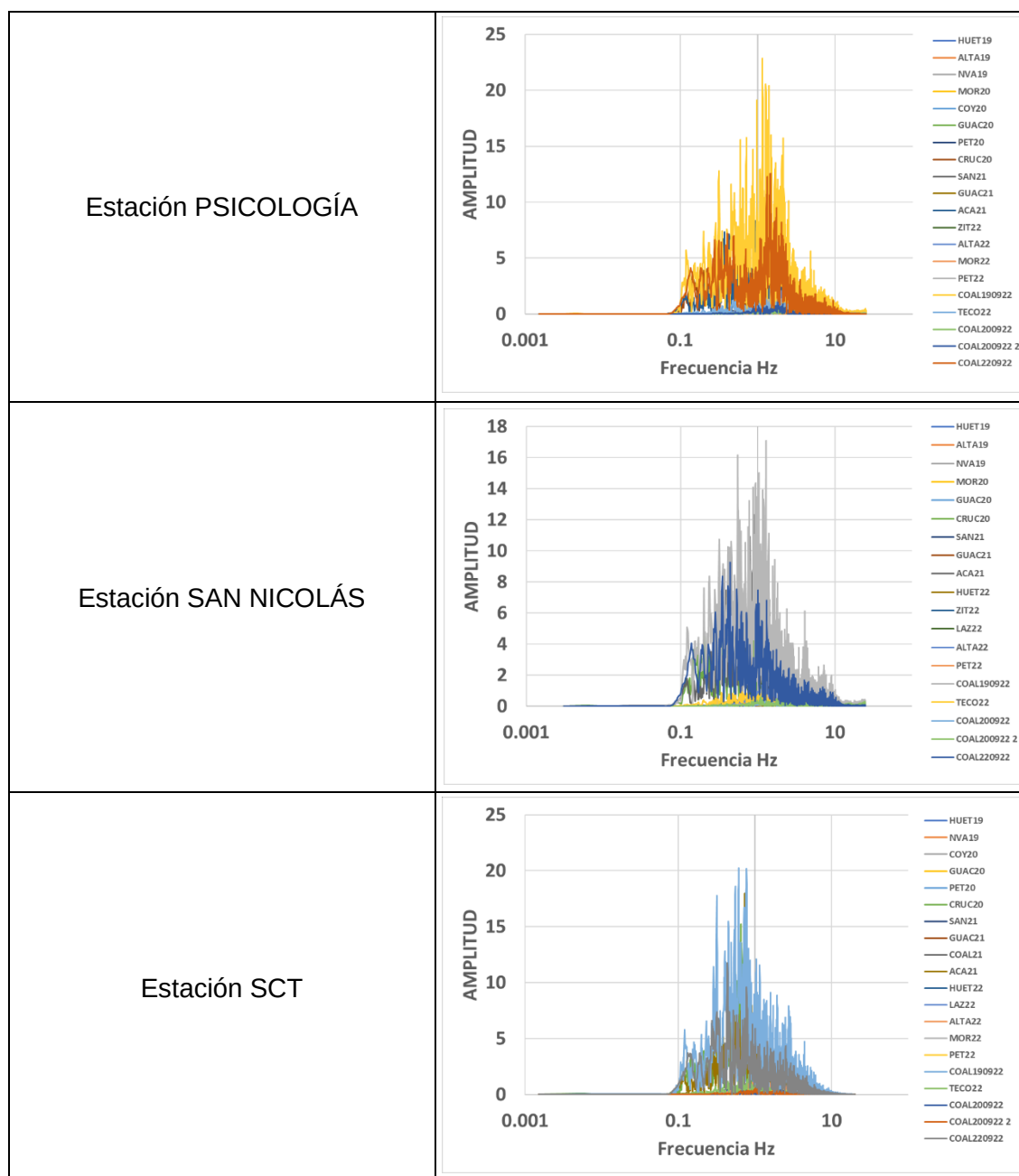
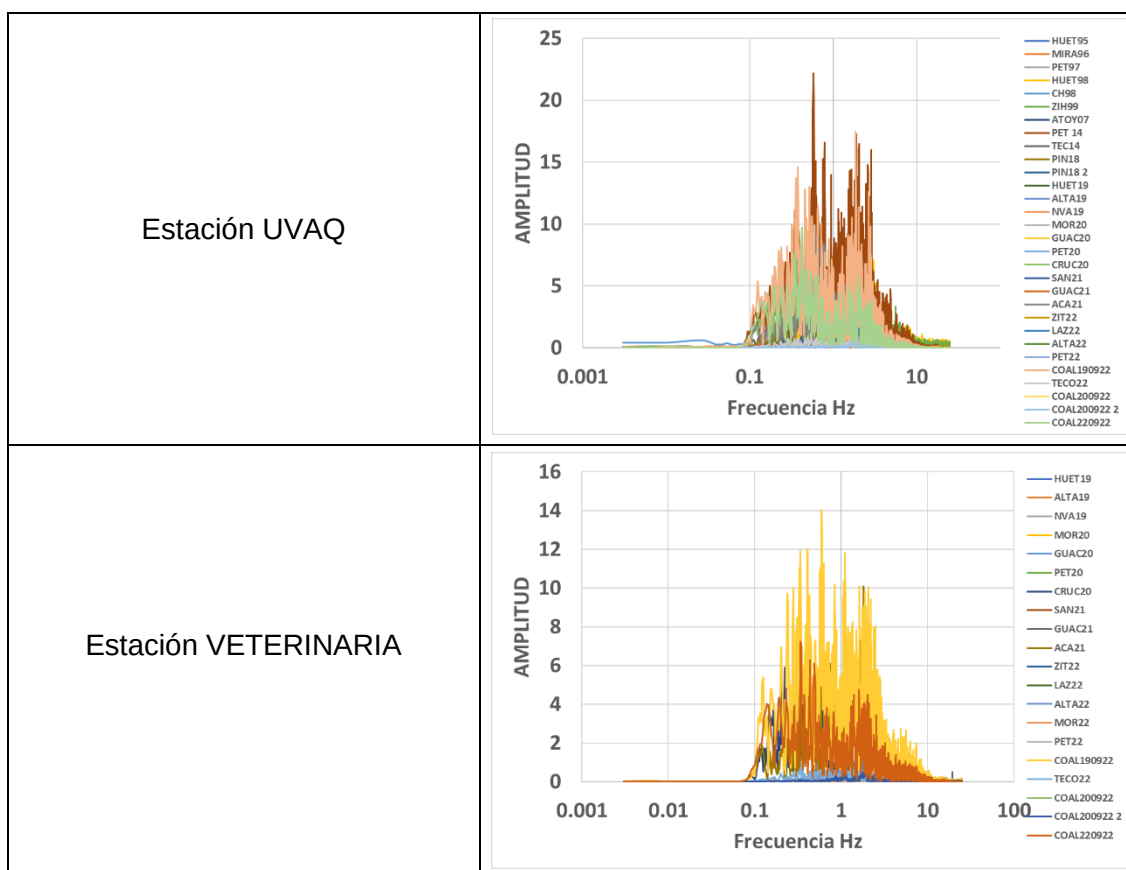


Tabla 4.2.8 Espectros de Fourier de la estación UVAQ, y VETERINARIA. Componente vertical.



4.3. Cocientes espectrales

El uso de cocientes espectrales es una de las mejores técnicas para estimar efectos de sitio. Borchardt (1970) los introdujo en la práctica después de evaluar los efectos de sitio en los sismos de San Francisco, California de 1906 y 1957. El autor fundamentó la técnica haciendo uso de la ecuación 4.3.1, donde las variables que intervienen son: efectos de la fuente, $s(t)$; efectos del trayecto entre la fuente y el sitio en interés, $p(t)$; y efectos de sitio, $h(t)$; donde la convulsión de los mismos es el registro sísmico $u(t)$. La ecuación 4.3.1 se transforma al dominio de la frecuencia para simplificarla en un producto (ecuación 4.3.2). Suponiendo que se cuenta con dos registros del mismo evento en estaciones distintas, pero relativamente cercanas entre ellas, al tratarse del mismo sismo los efectos de la fuente son los mismos, el trayecto será idéntico en ambos registros también, quedando únicamente como variable los efectos del sitio (ecuación 4.3.3).

$$u(t) = s(t) * p(t) * h(t) \quad (4.3.1)$$

$$U(f) = S(f)P(f)H(f) \quad (4.3.2)$$

$$\frac{U_2(f)}{U_1(f)} = \frac{S(f)P(f)H_2(f)}{S(f)P(f)H_1(f)} = \frac{H_2(f)}{H_1(f)} \quad (4.3.3)$$

Si se cuenta con un registro obtenido en roca o suelo firme, los efectos de sitio serán nulos o insignificantes, por lo que es conveniente normalizar todos los registros respecto a este registro. Este cociente espectral proporciona una estimación de la función de transferencia, es decir, la amplificación de los diferentes sitios.

Después de analizar los espectros de respuesta obtenidos en el capítulo 4.1, la estación de la RSN que menores aceleraciones del suelo presentó en los diferentes sismos registrados, es INIRENA que se ubica en las coordenadas 19.69 N, -101.25 W. Las intensidades registradas en esta estación y amplitudes de Fourier son muy pequeñas que se puede considerar terreno firme, por lo que todos los cocientes espectrales se obtendrán de esta estación sísmica.

Se calcularon cocientes espectrales de la media cuadrática de los espectros de respuesta de componentes horizontales de todas las estaciones, respecto a las ordenadas espectrales de la estación de INIRENA. La figura 4.3.1 muestra los cocientes espectrales promedio de las estaciones de la RSN. Las estaciones de Luz Alou (19.69 N, -101.163 W) y CMIC (19.685 N, -101.235 W) son las que mayores efectos de sitio presentan.

Luz Alou presenta una gran amplitud en periodos muy cortos de 0.06-0.1 s. La forma espectral de todos sus espectros de respuesta es muy similar, con picos en ese intervalo de periodos. Para periodos mayores, la amplitud espectral decae rápidamente, inclusive por debajo de INIRENA.

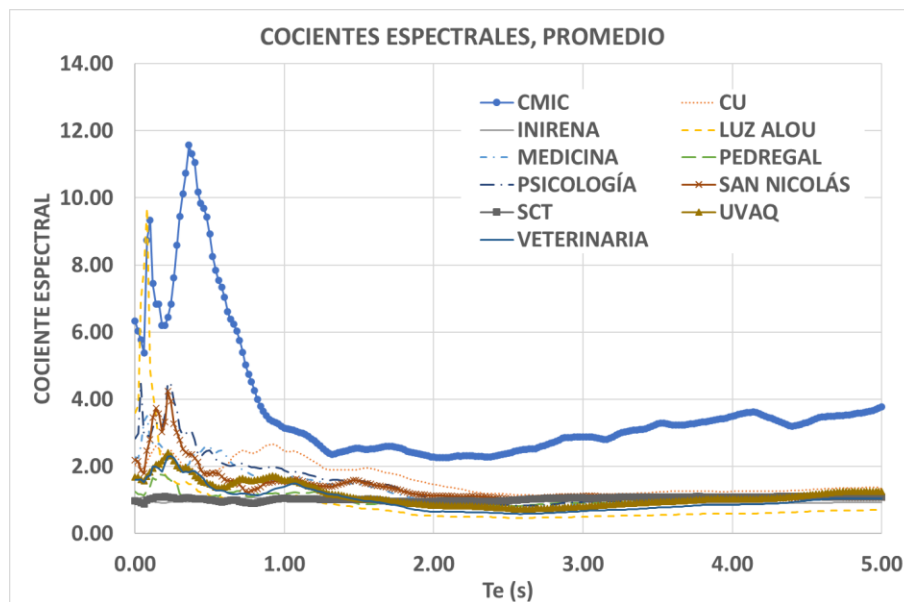


Figura 4.3. 1a Cocientes espectrales de los espectros de respuesta de la RSN, todos respecto de la estación INIRENA. PROMEDIO.

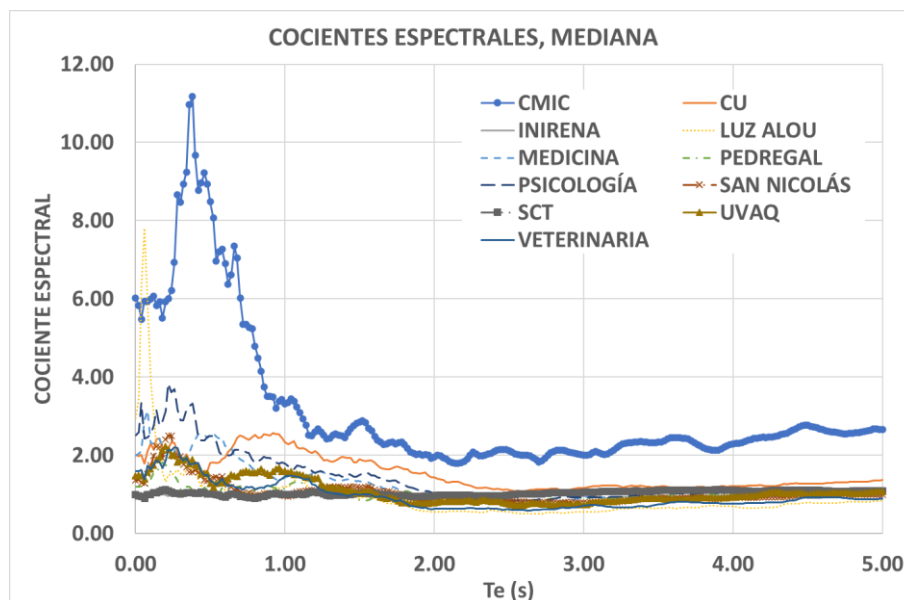


Figura 4.3.1b Cocientes espectrales de los espectros de respuesta de la RSN, todos respecto de la estación INIRENA. MEDIANA.

Por su parte, CMIC muestra amplitudes importantes entre 0.30-0.45 s, lo que sugiere un suelo de mayor flexibilidad que los suelos de las demás estaciones. La estación de San Nicolás (19.703 N, -101.195 W) es la siguiente en la amplitud de los cocientes espectrales, en periodos entre 0.14 s y 0.22 s; sin embargo, su amplitud es de alrededor del 50% de las que se presentan en Luz Alou y CMIC.

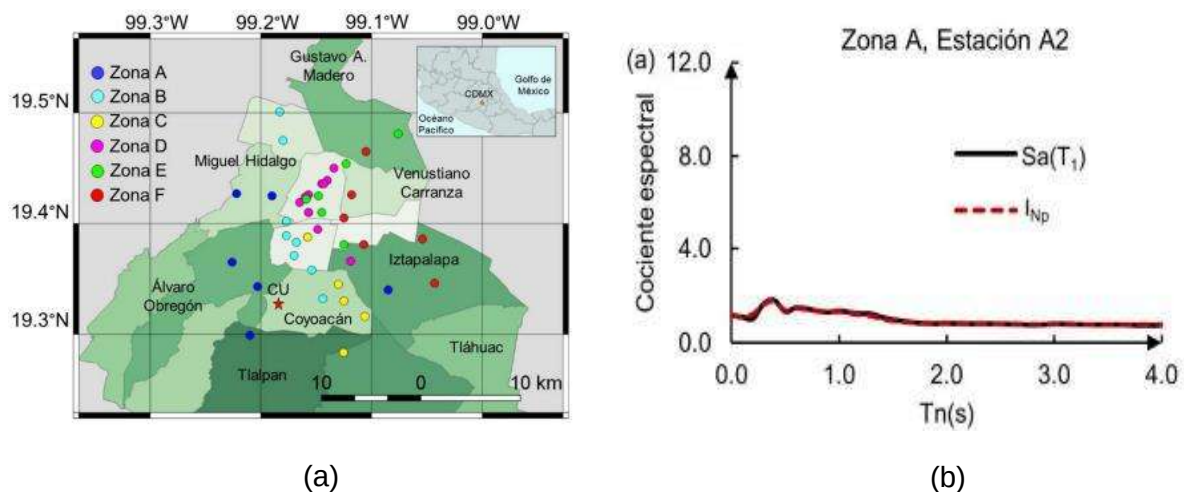
La estación de Psicología (19.719 N, -101.187 W) presenta amplificaciones similares a San Nicolás, con picos entre 0.14 s y 0.23 s. Medicina (19.695 N, -101.179 W) tiene amplificaciones en periodos de 0.08 s, 0.14 s y 0.48 s, siendo el mayor en 0.08 s. CU (19.69 N, -101.180 W) presenta amplificaciones para 0.14 s y 0.22 s, mientras UVAQ (19.675 N, -101.181 W) y Veterinaria (19.697 N, -101.166 W) muestran cocientes similares y picos importantes en 0.14 s y 0.22 s.

La estación de Villas del Pedregal (19.685 N, -101.187 W) cuenta con el registro de solamente un sismo por lo que su cociente espectral puede variar posteriormente; sus amplitudes son pequeñas y presenta picos importantes entre 0.12 – 0.36 s.

La estación que menor amplificación presentó respecto a INIRENA es SCT (19.711 N, -101.233 W). Sus amplitudes son muy pequeñas y presenta picos importantes en 0.14 s y 0.20 s. Todas las estaciones sísmicas presentan un pico de amplitud en periodos en el intervalo de 0.90 – 1.10 s.

Ruíz y Rodríguez (2020) muestran cocientes espectrales en la Ciudad de México (CDMX) de PSA de registros sísmicos en diferentes estaciones ubicadas en las distintas zonas de la ciudad. Las figs. 4.3.2a, 4.3.2b, 4.3.2c y 4.3.2d, ilustran: la ubicación de las estaciones sísmicas, cocientes espectrales en la zona A (terreno duro), cocientes espectrales en la zona B (transición), y cocientes espectrales de la zona C (transición y suelo blando). Esto se hace con la finalidad de comparar los cocientes calculados en este trabajo para la Ciudad de Morelia con los cocientes que se han obtenido en la CDMX en terreno duro y de transición, siendo estos los tipos de suelo que hay en Morelia.

Con excepción de las estaciones CMIC y Luz Alou, las amplitudes y la forma espectral de los cocientes de terreno duro (figs. 4.3.2b y 4.3.2c) son muy similares a los cocientes obtenidos en este trabajo para todas las estaciones, que presentan amplificaciones en el intervalo de 1 a 4 en periodos dominantes bajos. Las estaciones CMIC y LUZ ALOU tienen amplitudes máximas del orden de 10 – 12, que son muy comparables con los de la zona C de la CDMX (fig. 4.3.2d), pero no así en la forma espectral, para la zona C de la CDMX el cociente máximo se encuentra en un periodo T_e de 1.2 seg, mientras que para CMIC y LUZ ALOU para periodos T_e de 0.1 – 0.45 seg.



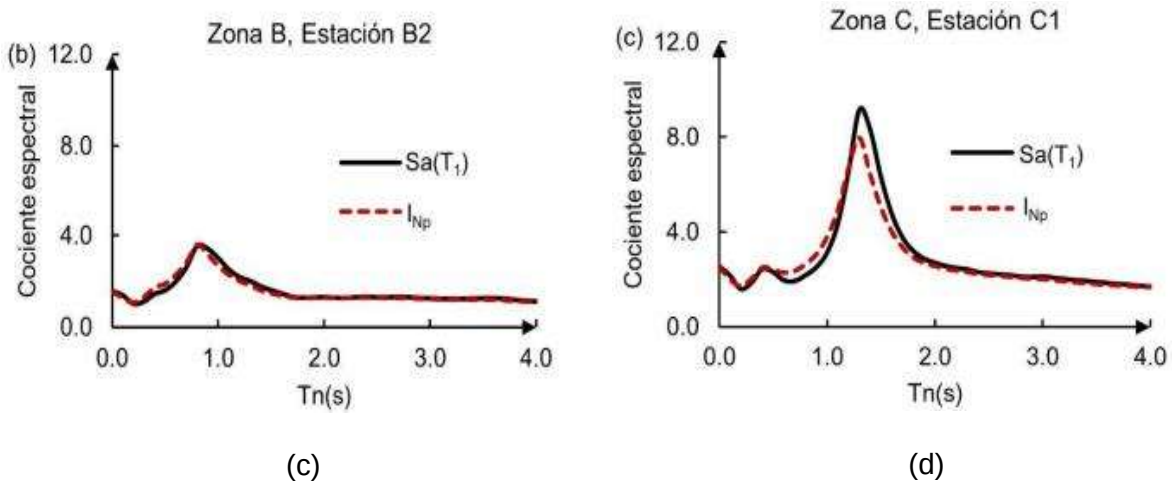


Figura 4.3.2 (a) Ubicación de las estaciones sísmicas usadas en CDMX. (b) Cocientes espectrales en Zona A (suelo duro). (c) Cocientes espectrales en Zona B (suelo de transición). (d) Cocientes espectrales en Zona C (suelo de transición y semiblando). Figuras tomadas de Ruíz y Rodríguez (2020).

Cocientes H/V

Esta técnica desconvoluciona la componente vertical de las componentes horizontales (Burdick y Langston, 1977; Langston, 1977) y permite evaluar la frecuencia del sitio, sin necesidad de una estación de referencia.

El desplazamiento registrado en el dominio del tiempo en las componentes vertical, radial y transversal está dado por ecuaciones 4.3.4, 4.3.5 y 4.3.6 (Langston, 1979):

$$D_V(t) = I(t) * S(t) * E_V(t) \quad (4.3.4)$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \quad (4.3.5)$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \quad (4.3.6)$$

donde $S(t)$ es la función temporal de la fuente sísmica de la onda incidente, $I(t)$ es la respuesta impulsional del instrumento del registro, las funciones $E_V(t)$, $E_R(t)$ y $E_T(t)$ son las respuestas impulsionales de la estructura sedimentaria bajo la estación para las componentes vertical, radial y transversal. Según Langston (1979) el registro de la componente vertical tiene frecuentemente la forma de la convolución de un único pulso con la respuesta instrumental; es decir, el desplazamiento registrado en la componente vertical es una aproximación de la convolución de la respuesta instrumental con la función de la fuente (ec. 4.3.7). Aceptando este comportamiento en las tres componentes, las funciones

que describen los efectos de amplificación para las componentes horizontales pueden obtenerse al dividir los registros horizontales con la componente vertical (ec. 4.3.8 y 4.3.9).

$$D_T(t) \cong I(t) * S(t) \quad (4.3.7)$$

$$E_R(f) \cong \frac{D_R(f)}{D_V(f)} \quad (4.3.8)$$

$$E_T(f) \cong \frac{D_T(f)}{D_V(f)} \quad (4.3.9)$$

Nakamura (1989) toma en cuenta la contribución de las ondas superficiales, considera que las ondas Rayleigh son las ondas predominantes en la energía sísmica propagada. Nakamura (1989) uso cuatros componentes de movimiento, las componentes horizontales y verticales tanto en campo libre como en la base del sedimento (H_S , H_B , V_S y V_B). La amplificación está dada por la razón de las componentes horizontales en campo libre sobre las componentes en la base del sedimento ($S_E(f)$, ec. 4.3.10). El espectro de la fuente que excita el movimiento en la superficie ($A_S(f)$) se obtiene del cociente de las componentes verticales en superficie libre sobre las componentes verticales en el sedimento (ec. 4.3.11). La función de amplificación queda finalmente como el cociente de $S_E(f)$ dividido por el espectro $A_S(f)$ (ec. 4.3.12).

$$S_E(f) = \frac{H_S(f)}{H_B(f)} \quad (4.3.10)$$

$$A_S(f) = \frac{V_S(f)}{V_B(f)} \quad (4.3.11)$$

$$S_M(f) = \frac{S_E(f)}{A_S(f)} = \frac{\frac{H_S(f)}{H_B(f)}}{\frac{V_S(f)}{V_B(f)}} = \frac{H_S(f)}{V_S(f)} \quad (4.3.12)$$

Finalmente se comprueba que estos cocientes H/V son adecuados para estimar funciones de transferencia locales en una misma estación, son útiles tanto en vibración ambiental como en registros sísmicos. El razonamiento de utilizar la componente vertical como referencia, es porque la componente vertical contiene fundamentalmente información de la fuente y el trayecto, pero no del sitio debido a que incluye principalmente ondas de compresión P, y estas ondas no presentan contrastes en los diferentes estratos del suelo.

Los espectros de Fourier muestran muchos picos que para el cálculo de los cocientes puede generar errores o mostrar los cocientes poco estéticos; Por ello, antes de realizar los cocientes H/V, se aplicó la técnica de suavizado de Konno y Ohmachi (1998). Esta técnica hace el suavizado de Fourier en una ventana de frecuencias con mismo intervalo hacia izquierda y derecha. La función propuesta por dichos autores es (ec. 4.3.13):

$$w(f, f_c) = \left(\frac{\sin \left(b \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) \right)}{b \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right)} \right)^4 \quad (4.3.13)$$

donde,
 f_c frecuencia central donde se realiza el suavizado,
 f es la frecuencia,
 b es el factor de suavizado que ajusta el ancho de w ,
 $w(f, f_c)$ es el suavizado.

Cuanto mayor sea b , menor intensidad habrá en el suavizado. En este trabajo se usó un valor de 40 que recomienda Konno y Ohmachi (1998). En la fig. 4.3.3 se observa la diferencia entre los espectros de Fourier de la estación CMIC sin suavizar y suavizada, usando esta técnica.

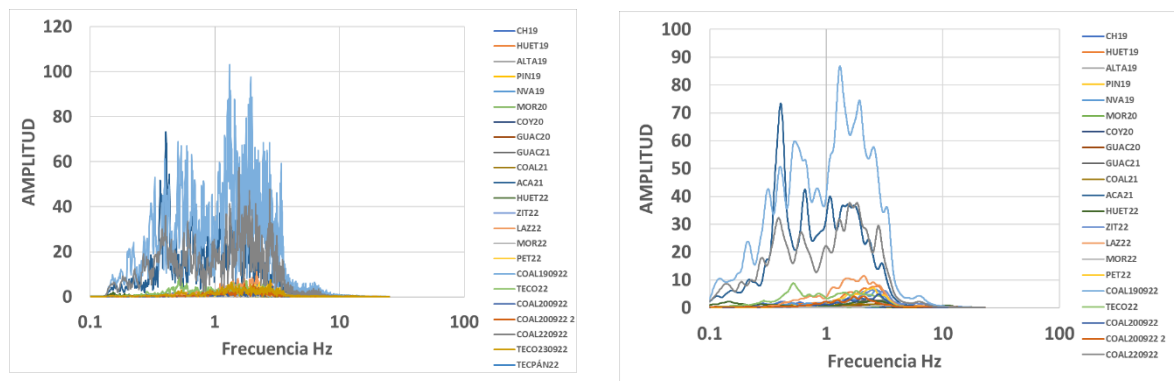


Figura 4.3.3 Espectros de Fourier sin suavizar (izquierda), y espectros de Fourier suavizados (derecha) con la técnica de Konno y Ohmachi (1998). Ambas figuras muestran los espectros de Fourier de la estación CMIC, componente horizontal en combinación RMS.

Para este trabajo se hizo uso de los cocientes H/V siguiendo la técnica de Nakamura (1989), una vez obtenidos y suavizados los espectros de Fourier de ambas componentes, se calcularon los cocientes y se promediaron para cada estación utilizando todos los registros sísmicos que existen en la RSN por estación. Las figuras 4.3.4 – 4.3.15 muestran los cocientes H/V de todos los sismos por estación y su media (línea gruesa).

La estación CMIC cuenta con un pico máximo en la frecuencia de 2.33 Hz (figura 4.3.4), que corresponde a un período de 0.42 s, lo cual concuerda muy bien con los cocientes espectrales de los espectros de respuesta de la figura 4.3.1. En la estación CU existen grandes amplitudes en frecuencias cercanas a 1 Hz; esto coincide con los picos cercanos a 1 segundo en la figura 4.3.1, sin embargo, el pico máximo en la misma figura es en 0.14 s, que se aproxima a la frecuencia de 6.11 Hz de la figura 4.3.5.

El espectro de H/V de la estación INIRENA confirma que el terreno donde se ubica la estación es suelo firme, ya que se presenta un pico máximo en 18 Hz que corresponde al período de 0.06.

La estación Luz Alou presenta un pico máximo en 9.20 Hz, su inverso es muy cercano al período del pico máximo que se presenta en la figura 4.3.1, de 0.08-0.11 segundos. Medicina tiene un pico máximo en 8.20 Hz, corresponde muy bien al segundo pico máximo de la figura 4.3.1, un período de 0.14 segundos.

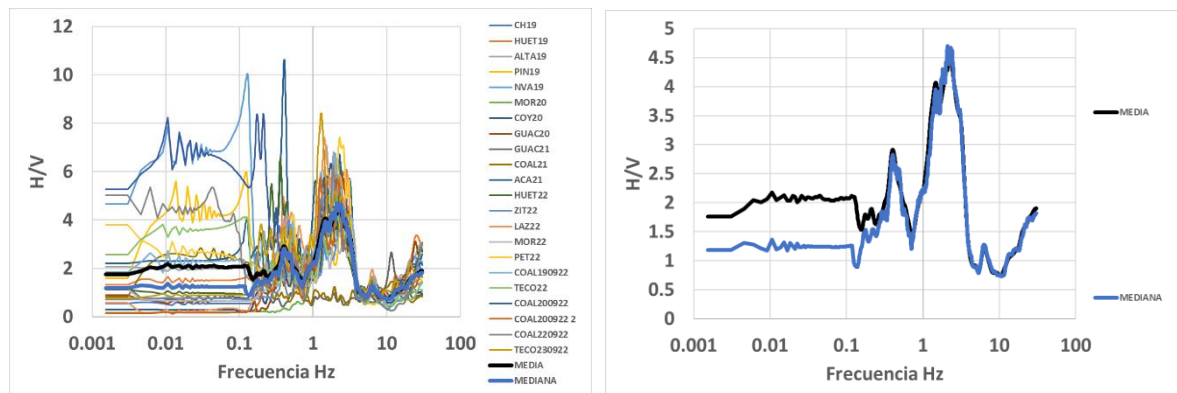


Figura 4.3.4 Cocientes H/V obtenidos en la estación CMIC.

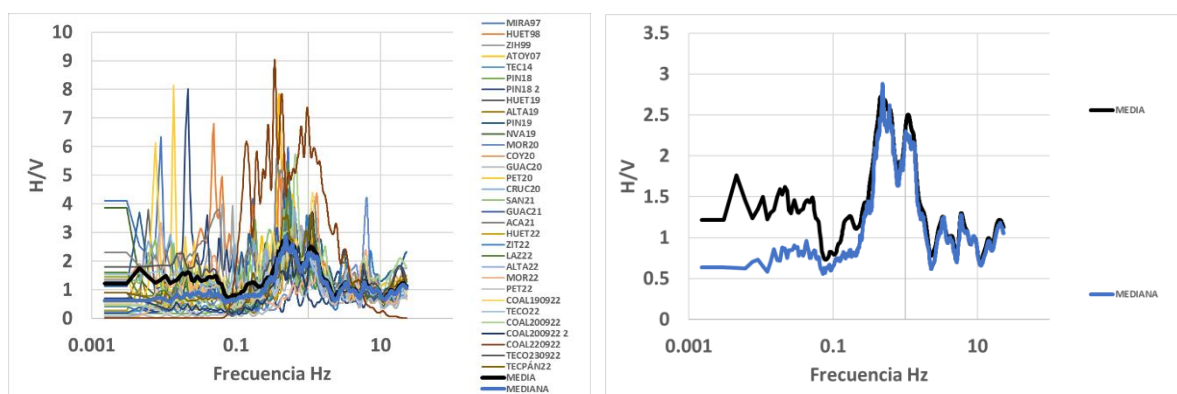


Figura 4.3.5 Cocientes H/V obtenidos en la estación CU.

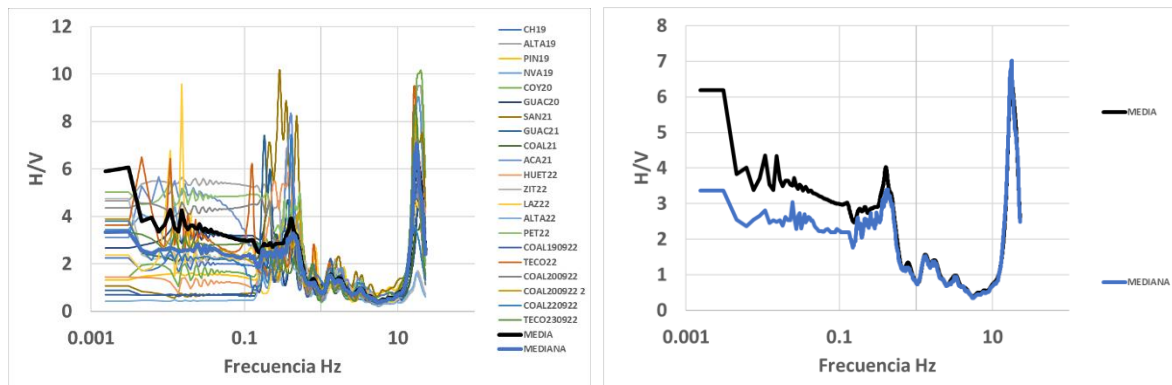


Figura 4.3.6 Cocientes H/V obtenidos en la estación INIRENA.

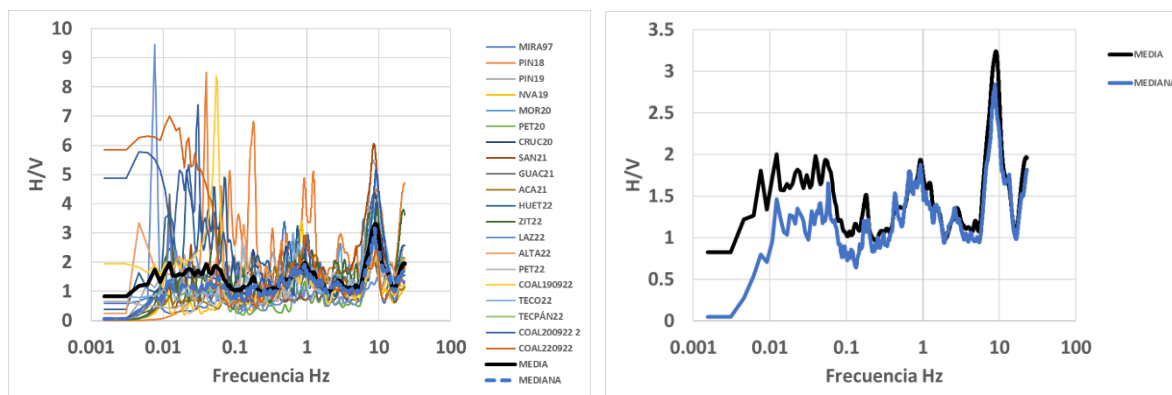


Figura 4.3.7 Cocientes H/V obtenidos en la estación Luz Alou.

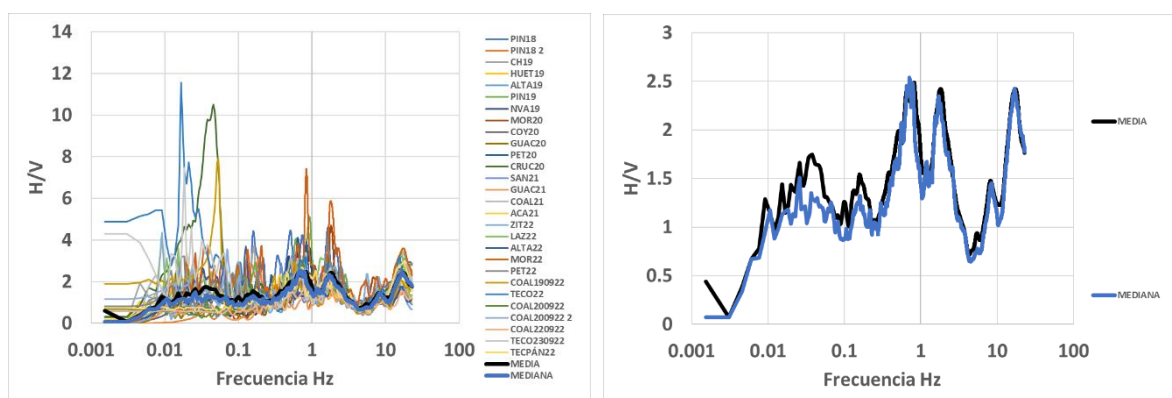


Figura 4.3.8 Cocientes H/V obtenidos en la estación Medicina.

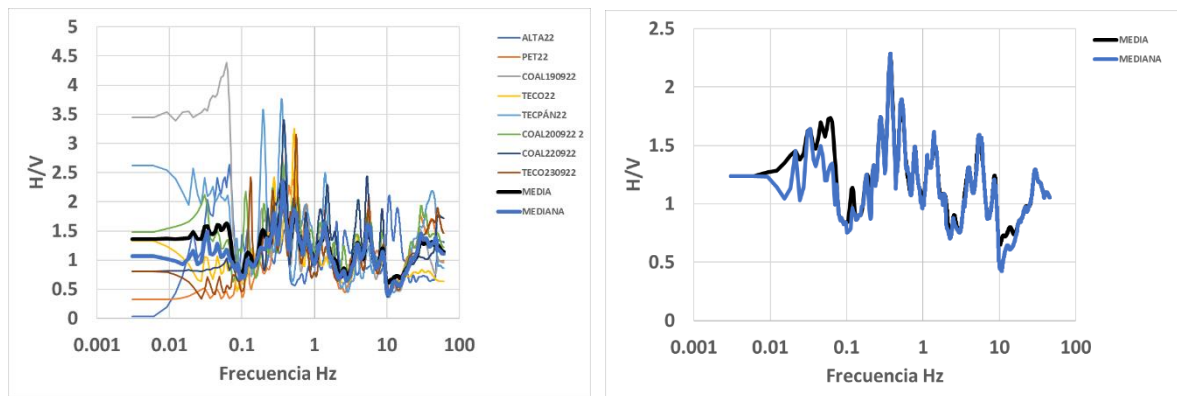


Figura 4.3.9 Cocientes H/V obtenidos en la estación Pedregal.

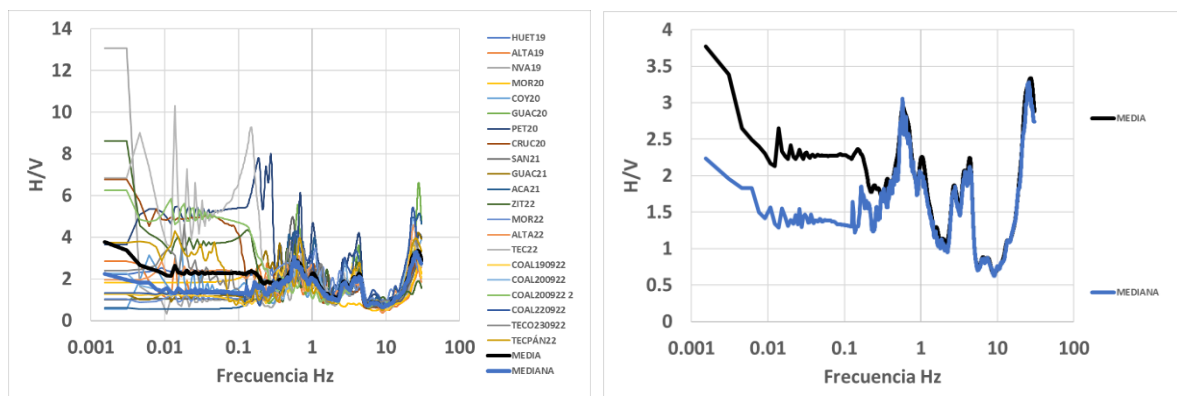


Figura 4.3.10 Cocientes H/V obtenidos en la estación Psicología.

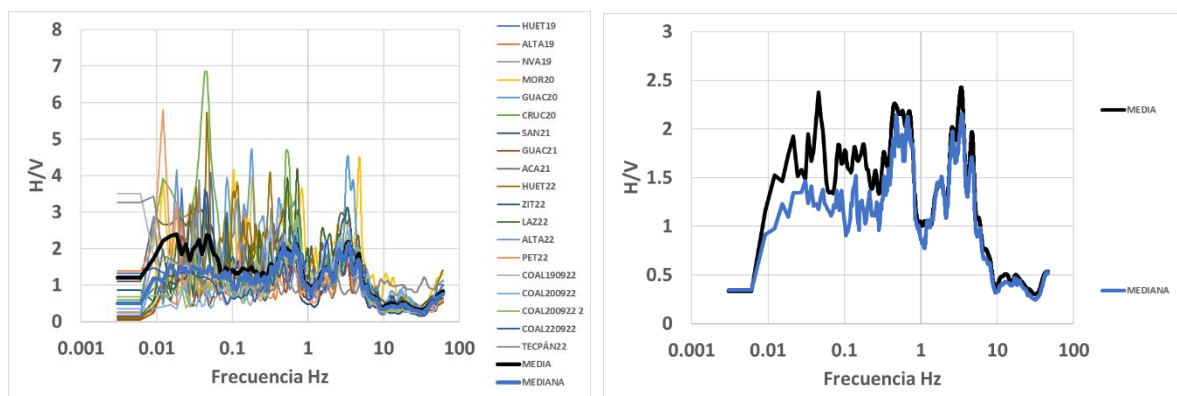


Figura 4.3.11 Cocientes H/V obtenidos en la estación San Nicolás.

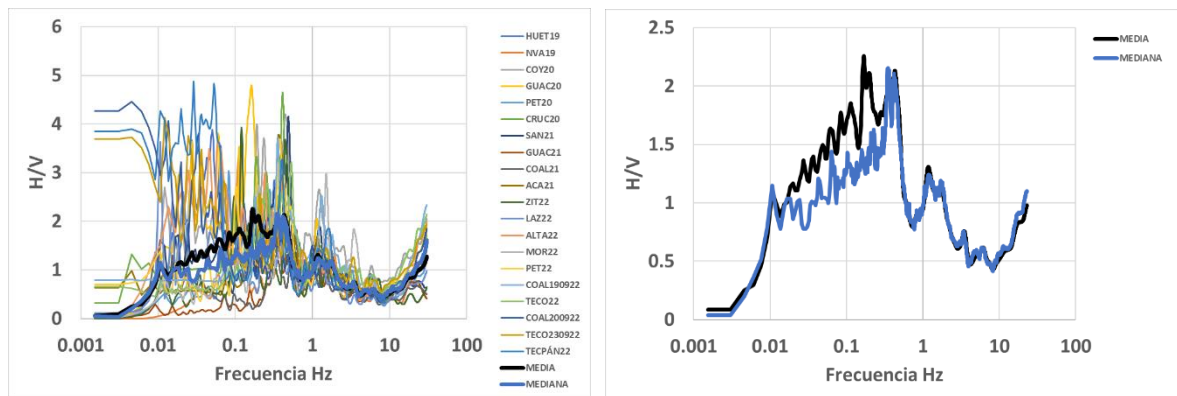


Figura 4.3.12 Cocientes H/V obtenidos en la estación SCT.

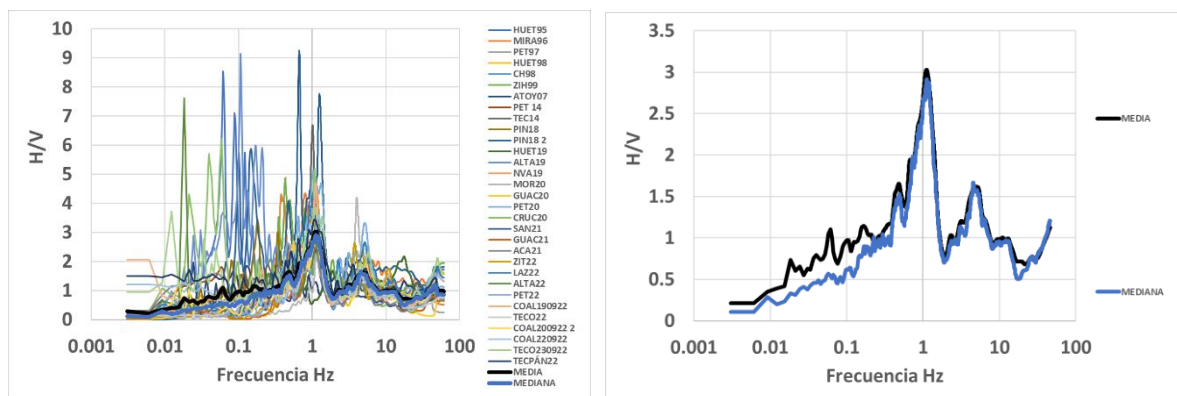


Figura 4.3.13 Cocientes H/V obtenidos en la estación UVAQ.

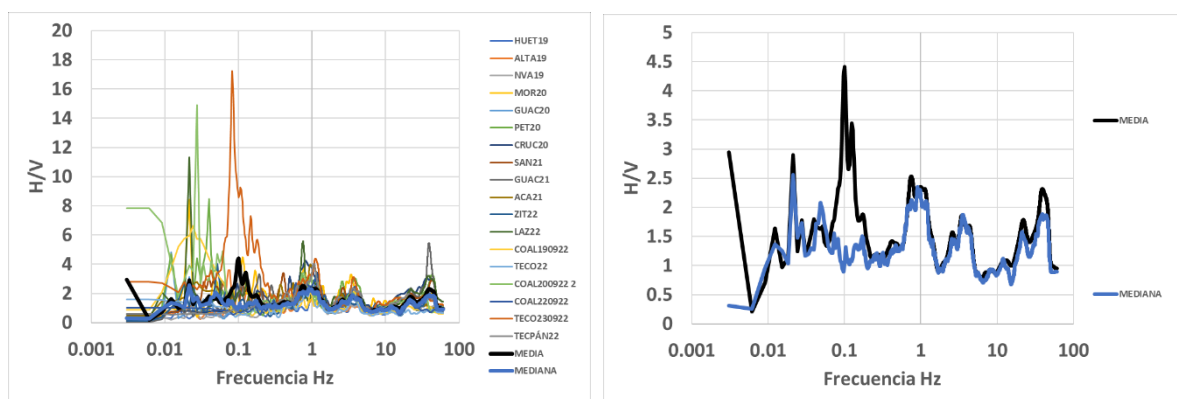


Figura 4.3.14 Cocientes H/V obtenidos en la estación Veterinaria.

La estación más nueva (Pedregal) de la RSN solamente tiene registrado seis sismos, por tanto, son resultados con mucha incertidumbre aún, presenta un pico en su espectro de

H/V (figura 4.3.9) en 3.90 Hz, que su inverso (período) tiene mucha semejanza al presentado en la figura 4.3.1, de 0.25 segundos.

En la estación Psicología se presenta un pico máximo en 27 Hz, es una frecuencia muy alta que puede descartarse como fundamental, un pico más razonable es el que se encuentra en una frecuencia de 4.43 Hz, su inverso coincide muy bien con el pico máximo de los cocientes de espectros de respuesta (figura 4.3.1).

San Nicolás presenta un pico máximo en 4.70 Hz, su inverso (0.22 segundos) concuerda con el obtenido en los cocientes de los espectros de respuesta. La segunda estación que menores intensidades ha presentado (SCT), también tiene una máxima importante en frecuencia alta de 6.22 Hz que concuerda muy bien con el período de 0.14 segundos de la figura 4.3.1.

Las estaciones UVAQ y Veterinaria tienen un pico razonable en 5.08 Hz y 4.43 Hz respectivamente que sus inversos coinciden muy bien con los picos obtenidos en la figura 4.3.1.

Es importante mencionar que en todas las estaciones se presentaron amplitudes relevantes en frecuencias de 1 Hz ($T_e=1$ s), lo que coincide con lo obtenido en los cocientes de los espectros de respuesta. Esta frecuencia podría estar asociada a los suelos de Morelia o al contenido de frecuencias de los eventos sísmicos lejanos que se han registrado en la RSN.

La gran similitud entre ambos métodos, permite concluir que los dos son confiables y de mucha utilidad para determinar las características dinámicas del movimiento del terreno. La ventaja de utilizar los espectros de respuesta (los cuales son más fáciles de obtener y se encuentran más familiarizados con el ingeniero estructural, por estar en el dominio del tiempo) es que resulta más sencillo calcular los cocientes espectrales; su desventaja, es la necesidad de una estación base ubicada en terreno firme y el contar con al menos dos estaciones sísmicas. El método de H/V por su parte, tiene como principal ventaja necesitar únicamente el registro de la estación para evaluar el contenido de frecuencias horizontales del sitio; su desventaja, es la complejidad y la necesidad de hacer más pasos matemáticos para su obtención.

Función de transferencia de perfiles estratigráficos

Existe otra metodología para estimar las propiedades dinámicas del movimiento del terreno basada en la determinación de funciones de transferencia. Si se cuenta con un perfil estratigráfico, es posible transferir una señal en terreno firme al sitio en estudio considerando los efectos de sitio. De acuerdo con los parámetros con que se cuente del perfil estratigráfico, se pueden aplicar diferentes métodos de análisis. Existen los métodos de: análisis lineal, en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo; equivalente lineal, en el dominio de la frecuencia (método aplicado en este trabajo); y análisis no lineal en el dominio del tiempo. Para elegir uno de estos métodos es necesario conocer los parámetros que el estudio geotécnico determinó del perfil estratigráfico.

Para fines de este trabajo se logró tener acceso a la información de tres estudios de mecánica de suelos (SIObl, 2012; ISSGEO, 2021; Mier et al., 1968) que realizaron sondeos

de penetración estándar en dos diferentes zonas de la ciudad. Ambos estudios proporcionan la estratigrafía del terreno y parámetros como: número de golpes de la prueba de penetración estándar, N ; clasificación SUCS; pesos volumétricos; y módulos de elasticidad.

Un parámetro fundamental para la obtención de funciones de transferencia en el intervalo lineal, es la velocidad de onda de corte V_s . En la literatura existen diversas fórmulas que correlacionan el número de golpes de la prueba de penetración estándar (N) con la velocidad de onda de corte (V_s); en este trabajo se utilizaron nueve expresiones para determinar un promedio de velocidad de onda de corte (tabla 4.3.1).

En el estudio de mecánica de suelos de ISSGEO (2021) se realizaron siete sondeos de penetración estándar (fig. 4.3.15), en la ubicación del cruce de salida a Salamanca, Periférico Paseo de la República, Morelia, Michoacán (latitud 19.72, longitud -101.19); la estación sísmica de la RSN más cercana al sitio en estudio es Psicología, que se encuentra a 300 m de distancia (fig. 4.3.16); esto quiere decir que los resultados que se obtengan usando esta metodología pueden ser comparables con los obtenidos en los métodos anteriores para la estación Psicología.

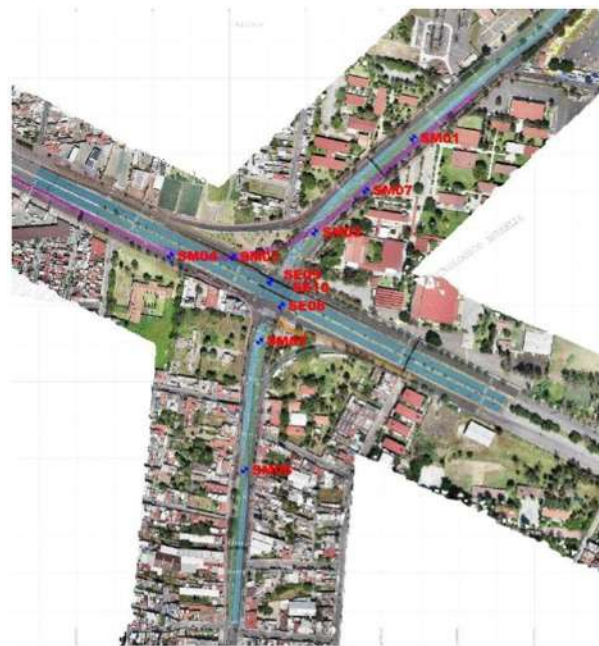


Figura 4.3.15 Localización de Sondeos de pruebas de penetración estándar. Figura tomada de ISSGEO (2021).



Figura 4.3.16 Distancia entre los sondeos de penetración estándar y la estación de la RSN más cercana.

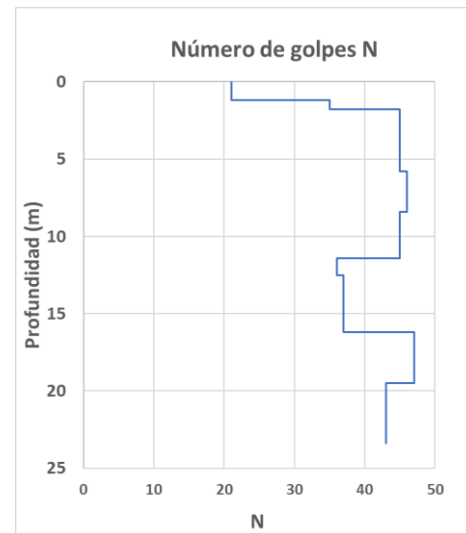
No.	Autor	Tipo de suelo	Correlación
1	Anbazhaga y Sitharam (2006)	Todo tipo de suelo	$V_s = 50N^{0.41}$
2	Hanumantharao y Ramana (2008)	Arena	$V_s = 79N^{0.434}$
		Arena limosa	$V_s = 86N^{0.42}$
		Todo tipo de suelo	$V_s = 82.6N^{0.43}$
3	Ünal (2009)	Todo tipo de suelo	$V_s = 58N^{0.39}$
		Arena	$V_s = 73N^{0.33}$
		Limo	$V_s = 60N^{0.36}$
		Arcilla	$V_s = 44N^{0.48}$
4	Maheswari, Boominathan y Dodagoudar (2009)	Todo tipo de suelo	$V_s = 95.64N^{0.301}$
5	Kumar, Anbazhagan y Sitharam (2010)	Arena	$V_s = 100.53N^{0.265}$
		Arcilla	$V_s = 89.31N^{0.358}$
		Todo tipo de suelo	$V_s = 73.381N^{0.489}$
6	Tsiambaos y Sabatakakis (2011)	Todo tipo de suelo	$V_s = 136.6N^{0.274}$
		Arcilla	$V_s = 140.1N^{0.29}$
		Limo	$V_s = 99.45N^{0.364}$
		Arena	$V_s = 92N^{0.341}$
7	Chatterjee y Choudhury (2013)	Todo tipo de suelo	$V_s = 78.21N^{0.377}$
		Arcilla	$V_s = 77.11N^{0.393}$
		Arena	$V_s = 54.82N^{0.53}$
		Limo	$V_s = 58.02N^{0.46}$
8	Fauzi, Irsyam, y Fauzi (2014)	Todo tipo de suelo	$V_s = 105.03N^{0.286}$
9	Kirar, Maheshwari, y Muley (2016)	Arena	$V_s = 100.N^{0.348}$
		Arcilla	$V_s = 94.4N^{0.379}$
		Todo tipo de suelo	$V_s = 99.5N^{0.345}$

Tabla 4.3.1 Relaciones propuestas entre la velocidad de onda de corte V_s (m/s) y el número de golpes N , de la prueba de penetración estándar.

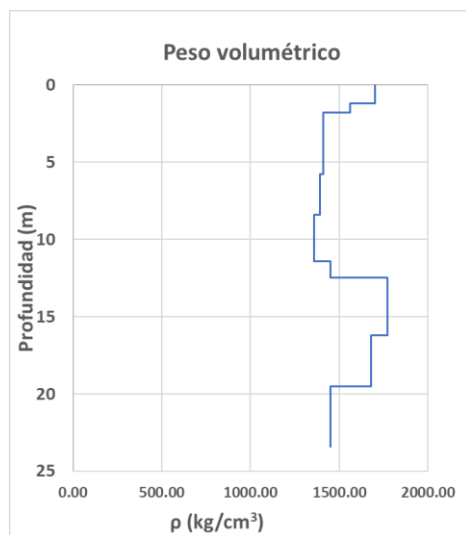
Se obtuvo la velocidad de onda de corte (V_s) con las expresiones (tabla 4.3.1) para todas las estratigrafías de los siete sondeos mixtos que se realizaron (figuras 4.3.17 – 4.3.25), y se define el perfil de V_s como la combinación RMS de las nueve fórmulas utilizadas.

SONDEO MIXTO SM-01				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	V_s (m/s)	
			MEDIA CUADRÁTICA	γ_{vol} (kg/cm ³)
0	CH	21	259.93	1700.00
1.2	CH	21	259.93	1700.00
1.2	MH	35	323.49	1560.00
1.8	MH	35	323.49	1560.00
1.8	SM	45	357.81	1410.00
5.8	SM	45	357.81	1410.00
5.8	SC	46	360.68	1390.00
8.4	SC	46	360.68	1390.00
8.4	SC	45	357.68	1360.00
11.4	SC	45	357.68	1360.00
11.4	SM	36	328.95	1450.00
12.5	SM	36	328.95	1450.00
12.5	SC	37	332.14	1770.00
16.2	SC	37	332.14	1770.00
16.2	SC	47	363.64	1680.00
19.5	SC	47	363.64	1680.00
19.5	SC	43	351.57	1450.00
23.4	SC	43	351.57	1450.00

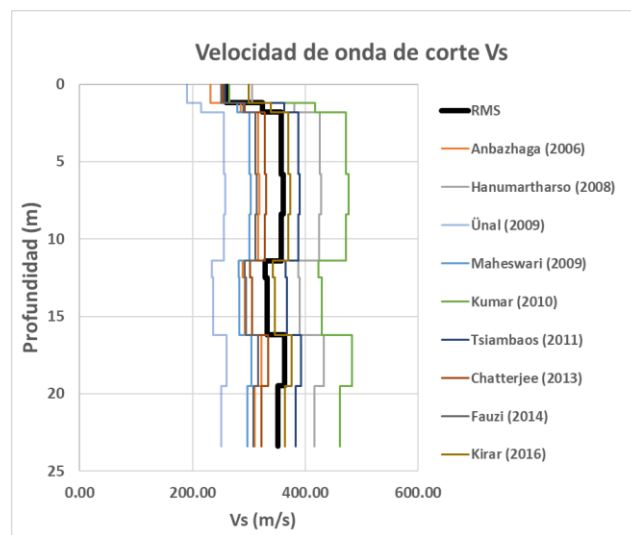
a)



b)



c)

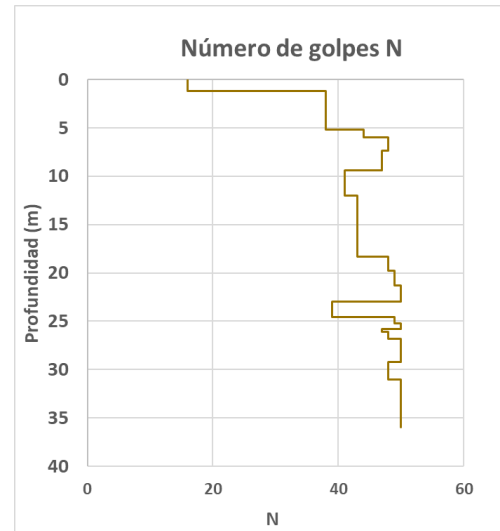


d)

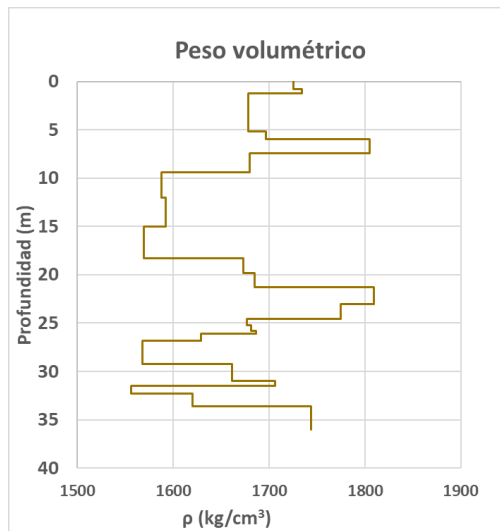
Figura 4.3.17 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-02				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s) MEDIA CUADRÁTICA	γ_{vol} (kg/cm ²)
0	MH	16	238.134	1725
0.8	MH	16	238.134	1725
0.8	CH	16	235.774	1734
1.2	CH	16	235.774	1734
1.2	SM	38	335.703	1678
5.2	SM	38	335.703	1678
5.2	CL	44	354.784	1697
6	CL	44	354.784	1697
6	SM	48	346.800	1805
7.4	SM	48	346.800	1805
7.4	MH	47	363.746	1680
9.4	MH	47	363.746	1680
9.4	MH	41	344.381	1588
12	SM	41	344.381	1588
12	SC	43	351.716	1592
15	SC	43	351.716	1592
15	SC	43	351.566	1569
18.3	SC	43	351.566	1569
18.3	SC	48	366.564	1673
19.8	SC	48	366.564	1673
19.8	SC	49	369.451	1685
21.3	SC	49	369.451	1685
21.3	SC	50	372.304	1809
23	SC	50	372.304	1809
23	SC	39	338.808	1775
24.6	SC	39	338.808	1775
24.6	SC	49	369.451	1677
25.2	SC	49	369.451	1677
25.2	SC	50+	720.000	1681
25.8	SC	50+	720.000	1681
25.8	SC	47	363.641	1686
26.1	SC	47	363.641	1686
26.1	SC	48	366.564	1629
26.8	SC	48	366.564	1629
26.8	SC	50+	720.000	1568
29.2	SC	50+	720.000	1568
29.2	SC	48	366.564	1661
31	SC	48	366.564	1661
31	SC	50	372.304	1706
31.5	SC	50	372.304	1706
31.5	SC	50+	720.000	1556
32.3	SC	50+	720.000	1556
32.3	SC	50+	720.000	1620
33.6	SC	50+	720.000	1620
33.6	SC	50+	720.000	1744
34.8	SC	50+	720.000	1744
34.8	SC	50+	720.000	1744
36	SC	50+	720.000	1744

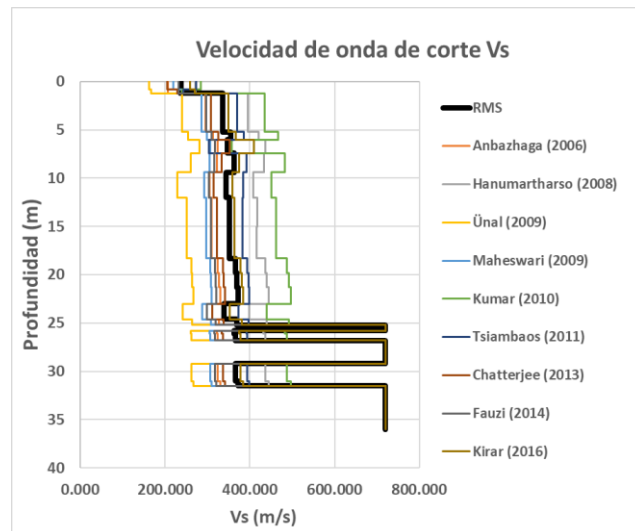
a)



b)



c)

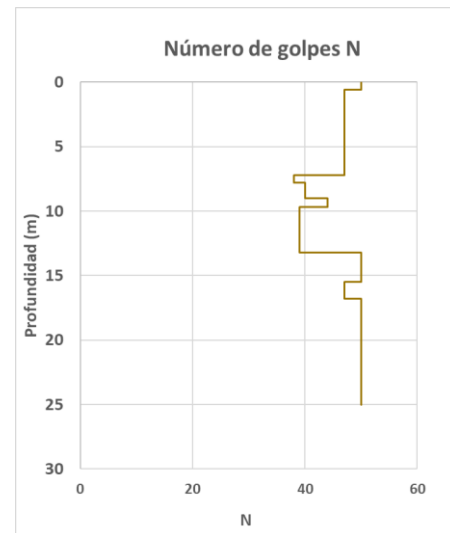


d)

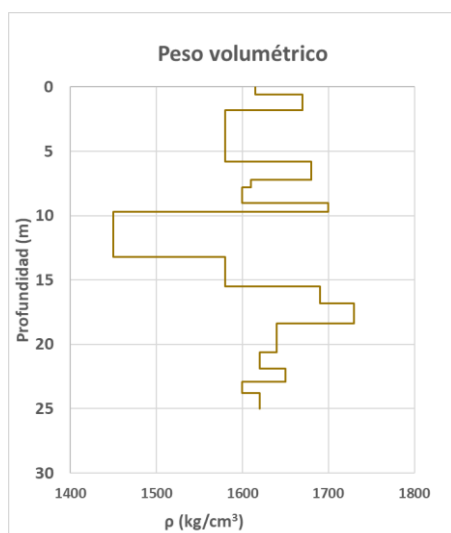
Figura 4.3.18 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-03				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			MEDIA CUADRÁTICA	γ_{vol} (kg/cm ²)
0	GP-GC	50+	720.00	1615
0.6	GP-GC	50+	720.00	1615
0.6	ML	47	363.56	1670
1.8	ML	47	363.56	1670
1.8	SM	47	363.75	1580
5.8	SM	47	363.75	1580
5.8	SM	47	363.75	1680
7.2	SM	47	363.75	1680
7.2	ML	38	334.17	1610
7.8	ML	38	334.17	1610
7.8	SM	40	342.25	1600
9	SM	40	342.25	1600
9	SM	44	354.78	1700
9.7	SM	44	354.78	1700
9.7	SC	39	338.81	1450
13.2	SC	39	338.81	1450
13.2	MH	50+	720.00	1580
15.5	MH	50+	720.00	1580
15.5	SC	47	720.00	1690
16.8	SC	47	720.00	1690
16.8	SC	50+	720.00	1730
18.4	SC	50+	720.00	1730
18.4	SC	50+	720.00	1640
20.6	SC	50+	720.00	1640
20.6	SC	50+	720.00	1620
21.9	SC	50+	720.00	1620
21.9	SC	50+	720.00	1650
22.9	SC	50+	720.00	1650
22.9	SC	50+	720.00	1600
23.8	SC	50+	720.00	1600
23.8	SC	50+	720.00	1620
25.01	SC	50+	720.00	1620

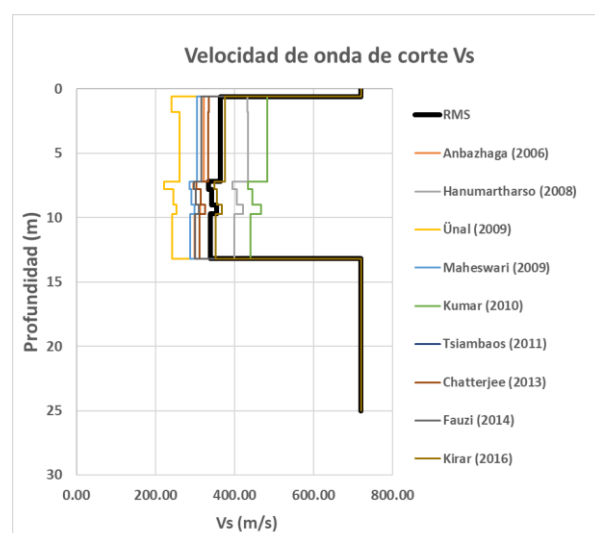
a)



b)



c)



d)

Figura 4.3.19 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 03; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-04				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γ_{vol} (kg/cm ²)
			MEDIA CUADRÁTICA	
0	GP-GC	48	366.56	1670
1.2	GP-GC	48	366.56	1670
1.2	CL	50	357.78	1670
5.2	CL	50	357.78	1670
5.2	SM	50+	720.00	1518
9.6	SM	50+	720.00	1518
9.6	ML	50+	720.00	1690
10	ML	50+	720.00	1690
10	SM	50+	720.00	1450
12.4	SM	50+	720.00	1450
12.4	SC	50+	720.00	1634
14.2	SC	50+	720.00	1634
14.2	SM	50+	720.00	1685
14.6	SM	50+	720.00	1685
14.6	SC	50+	720.00	1472
15.5	SC	50+	720.00	1472
15.5	SC	50+	372.30	1595
20.8	SC	50+	372.30	1595
20.8	SC	50+	372.30	1626
23.2	SC	50+	372.30	1626
23.2	SC	50+	720.00	1754
25.5	SC	50+	720.00	1754
25.5	SC	50+	720.00	1622
26.4	SC	50+	720.00	1622

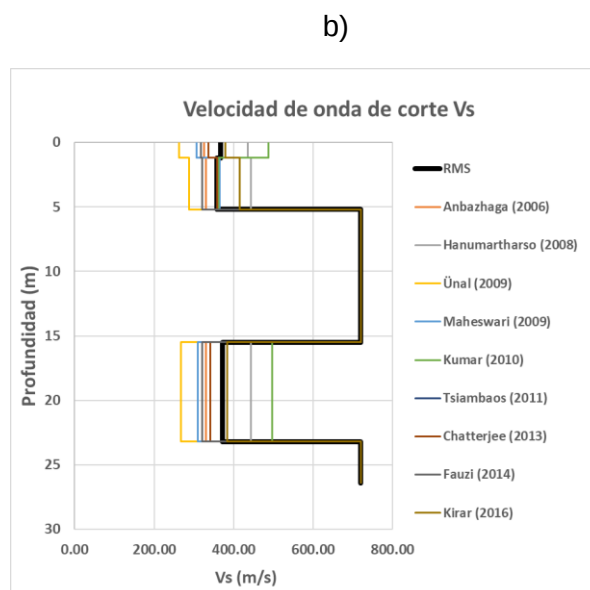
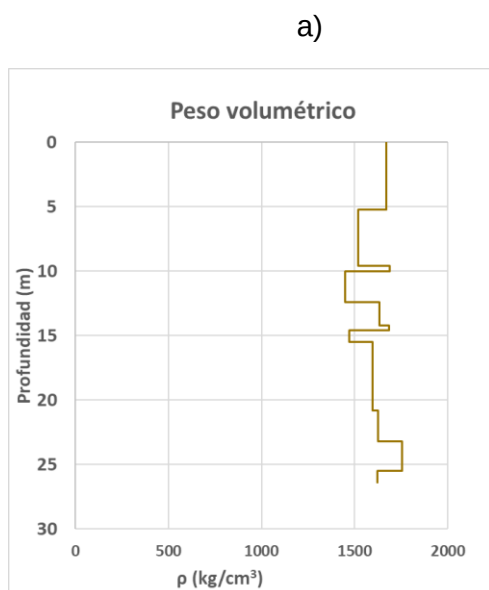
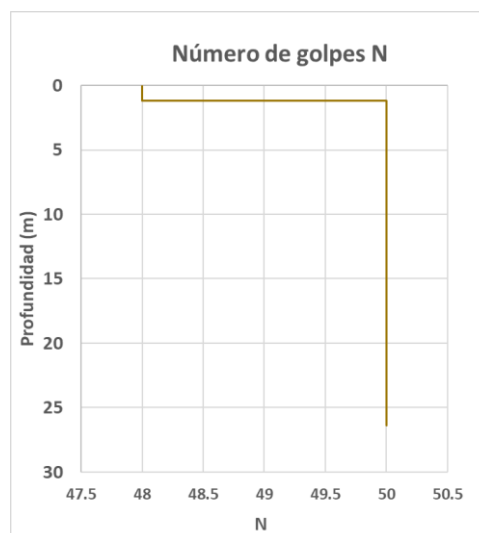
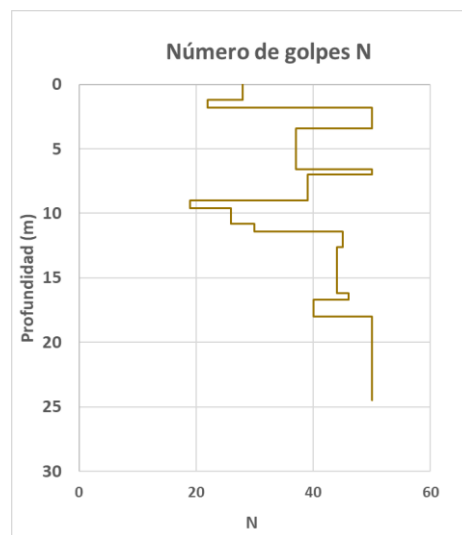


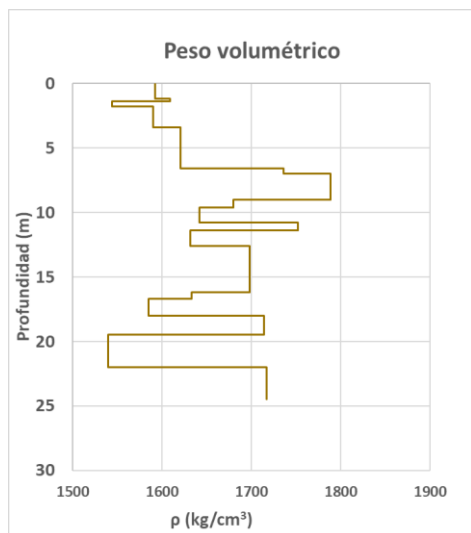
Figura 4.3.20 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 04; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-05				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γ_{vol} (kg/cm ²)
			MEDIA CUADRÁTICA	
0	CH	28	288.89	1592
1.2	CH	28	288.89	1592
1.2	SC	22	273.37	1609
1.4	SC	22	273.37	1609
1.4	MH	22	269.56	1544
1.8	MH	22	269.56	1544
1.8	MH	50	372.62	1590
3.4	MH	50	372.62	1590
3.4	MH	37	330.67	1621
6.6	MH	37	330.67	1621
6.6	SM	50+	720.00	1736
7	SM	50+	720.00	1736
7	SM	39	339.00	1789
9	SM	39	339.00	1789
9	SM	19	259.31	1680
9.6	SM	19	259.31	1680
9.6	SM	26	291.26	1642
10.8	SM	26	291.26	1642
10.8	SC	30	306.93	1752
11.4	SC	30	306.93	1752
11.4	SC	45	357.68	1632
12.6	SC	45	357.68	1632
12.6	SC	44	354.65	1698
16.2	SC	44	354.65	1698
16.2	SC	46	360.68	1633
16.7	SC	46	360.68	1633
16.7	SC	40	342.07	1585
18	SC	40	342.07	1585
18	SC	50+	720.00	1714
19.5	SC	50+	720.00	1714
19.5	SC	50+	720.00	1540
22	SC	50+	720.00	1540
22	SC	50+	720.00	1717
23.2	SC	50+	720.00	1717
23.2	SM	50+	720.00	1717
24.5	SM	50+	720.00	1717

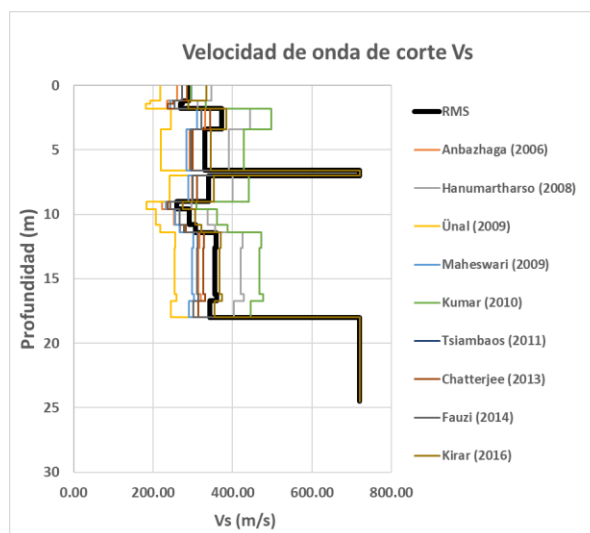


a)

b)



c)

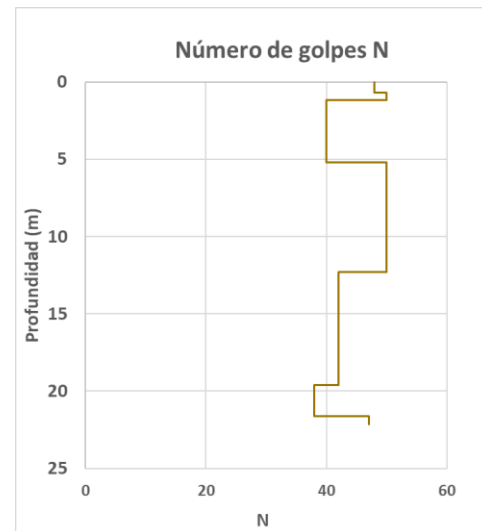


d)

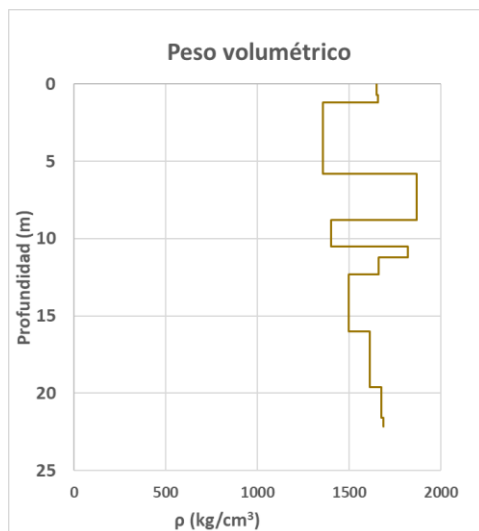
Figura 4.3.21 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 05; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-06				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			MEDIA CUADRÁTICA	γ_{vol} (kg/cm ²)
0	GP-GC	48	366.56	1650
0.7	GP-GC	48	366.56	1650
0.7	CH	50	357.78	1656
1.2	CH	50	357.78	1656
1.2	MH	40	342.25	1357
5.2	MH	40	342.25	1357
5.2	MH	50+	720.00	1355
5.8	MH	50+	720.00	1355
5.8	SM	50+	720.00	1867
8.8	SM	50+	720.00	1867
8.8	SM	50	372.30	1403
10.5	SM	50	372.30	1403
10.5	ML	50	372.38	1821
11.2	ML	50	372.38	1821
11.2	SM	50+	720.00	1662
12.3	SM	50+	720.00	1662
12.3	SM	42	348.44	1498
16	SM	42	348.44	1498
16	SM	42	348.44	1614
19.6	SM	42	348.44	1614
19.6	SC	38	335.50	1677
21.6	SC	38	335.50	1677
21.6	SC	47	363.64	1688
22.15	SC	47	363.64	1688

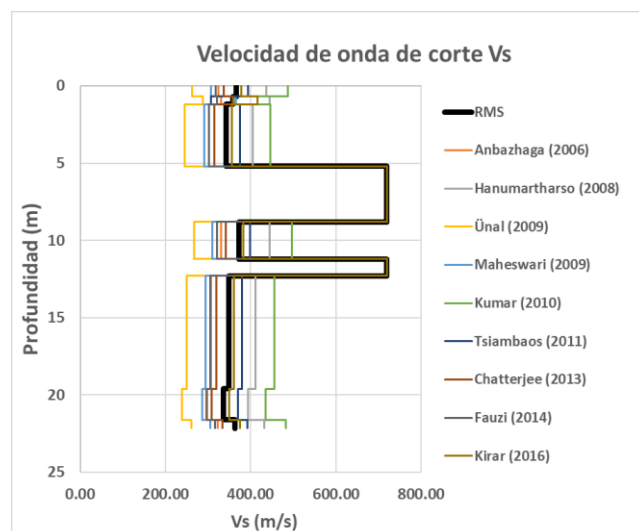
a)



b)



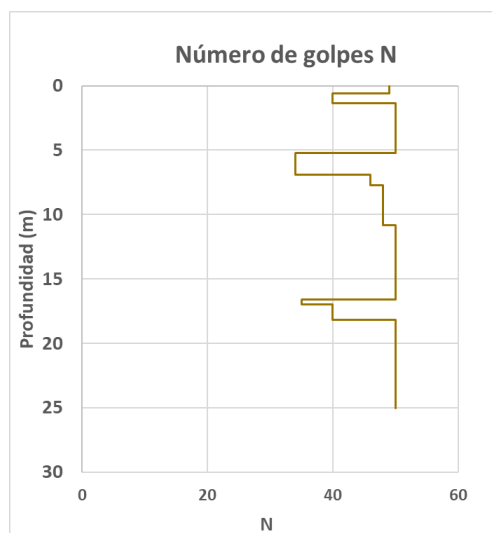
c)



d)

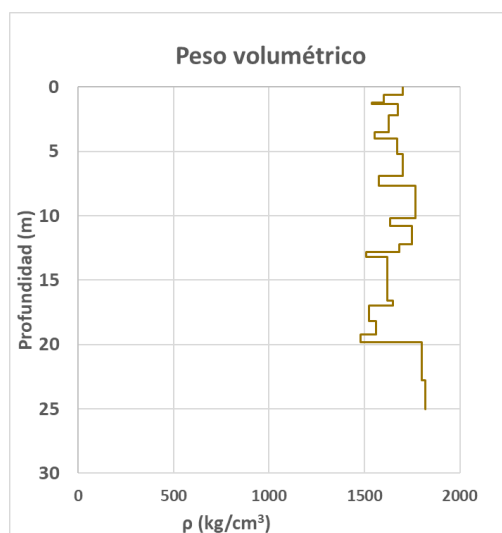
Figura 4.3.22 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 06; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) Perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-07				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γvol (kg/cm ²)
			MEDIA CUADRÁTICA	
0	GP-GM	49	349.43	1700
0.6	GP-GM	49	349.43	1700
0.6	SC	40	342.07	1600
1.2	SC	40	342.07	1600
1.2	CH	40	345.74	1537
1.35	CH	40	345.74	1537
1.35	SC	50+	720.00	1674
2.2	SC	50+	720.00	1674
2.2	SC	50	372.62	1626
3.5	SC	50	372.62	1626
3.5	SM	50+	720.00	1553
4	SM	50+	720.00	1553
4	SM	50+	720.00	1671
5.2	SM	50+	720.00	1671
5.2	SM	34	321.97	1699
6.9	SM	34	321.97	1699
6.9	SM	46	720.00	1575
7.7	SM	46	720.00	1575
7.7	SM	48	720.00	1767
10.2	SM	48	720.00	1767
10.2	ML	48	366.56	1635
10.8	ML	48	366.56	1635
10.8	SM	50+	720.00	1750
12.2	SM	50+	720.00	1750
12.2	SM	50+	720.00	1683
12.8	SM	50+	720.00	1683
12.8	MH	50+	720.00	1508
13.2	MH	50+	720.00	1508
13.2	SC	50+	720.00	1620
16.6	SC	50+	720.00	1620
16.6	SC	35	325.25	1650
17	SC	35	325.25	1650
17	MH	40	342.07	1522
18.2	MH	40	342.07	1522
18.2	SM	50+	720.00	1562
19.2	SM	50+	720.00	1562
19.2	ML	50+	720.00	1478
19.8	ML	50+	720.00	1478
19.8	SC	50+	720.00	1802
22.8	SC	50+	720.00	1802
22.8	SC	50	372.38	1820
25.02	SC	50	372.38	1820

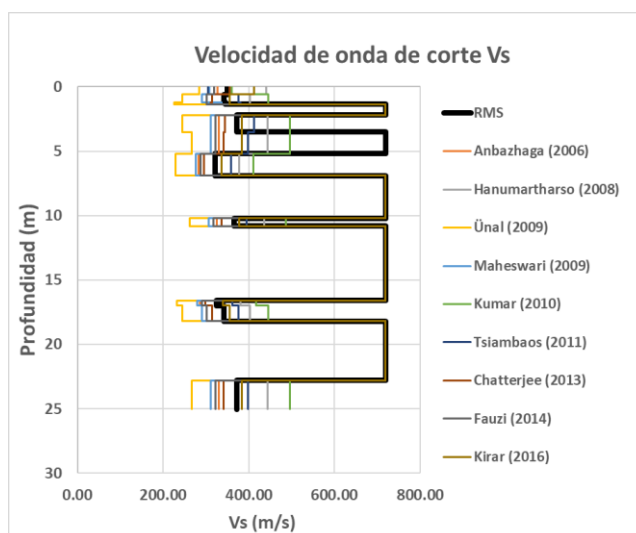


a)

b)



c)



d)

Figura 4.3.23 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto 07; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

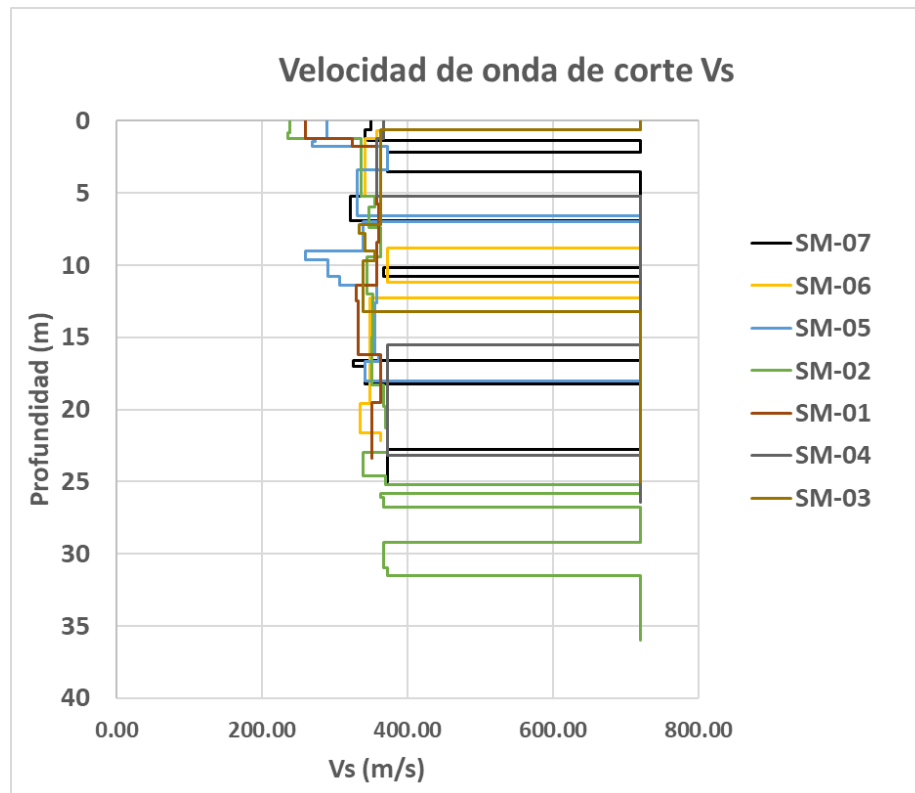


Figura 4.3.24 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021).

Después de calcular las velocidades de onda de corte (V_s) de los siete sondeos usando las diferentes correlaciones de la tabla 4.3.1, se obtuvieron velocidades entre 300 – 800 m/s, el criterio que se tomó cuando el número de golpes fue de 50 en capas menores de 30 cm fue de tomar una velocidad de onda de corte de 720 m/s, debido a que se trata de un suelo duro.

Por su parte en el estudio de mecánica de suelos de SIObl (2012) se realizaron siete sondeos de penetración estándar (fig. 4.3.25), en la ubicación del cruce de salida a Mil Cumbres, Periférico Paseo de la República, Pascual Ortiz de Ayala, Morelia, Michoacán (latitud 19.69, longitud -101.15). La estación sísmica de la RSN más cercana al sitio en estudio es Luz Alou, que se encuentra a 1.50 km de distancia (fig. 4.3.26), mientras que la estación Veterinaria se encuentra a 1.80 km del sitio en estudio. Por ello, los resultados que se obtengan usando esta metodología podrían ser comparables con los obtenidos en los métodos anteriores para la estación Luz Alou.



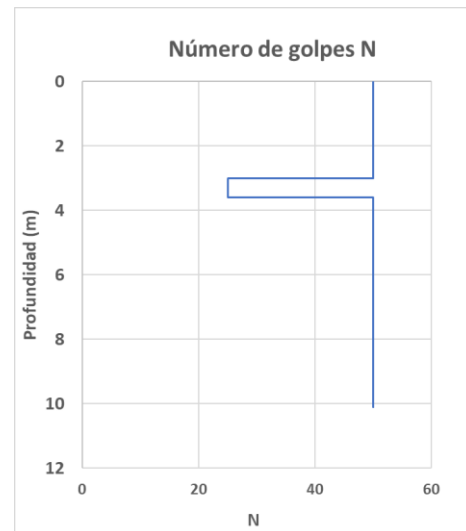
Figura 4.3.25 Localización de Sondeos de pruebas de penetración estándar. Figura tomada de SIObi (2012).



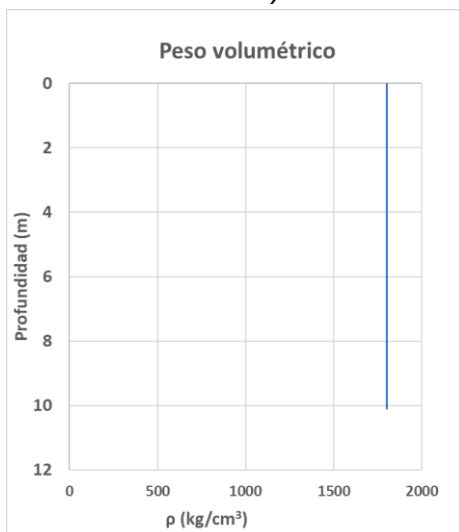
Figura 4.3.26 Distancia entre los sondeos de penetración estándar y las estaciones de la RSN más cercanas.

Se calculó la velocidad de onda de corte (V_s) con las expresiones (tabla 4.3.1) para todas las estratigrafías de los siete sondeos que se realizaron (figuras 4.3.27 – 4.3.35), y se define el perfil de V_s como la combinación RMS de las nueve fórmulas utilizadas.

SONDEO MIXTO SE-01				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			RMS	γ_{vol} (kg/cm ³)
0	SC	50	357.50	1800
0.6	SC	50	357.50	1800
0.6	SC	50	357.50	1800
1.2	SC	50	357.50	1800
1.2	SC	50	357.50	1800
1.8	SC	50	357.50	1800
1.8	SC	50	357.50	1800
2.4	SC	50	357.50	1800
2.4	SC	50	357.50	1800
3	SC	50	357.50	1800
3	SC	25	276.95	1800
3.6	SC	25	276.95	1800
3.6	SC	50	357.50	1800
4.2	SC	50	357.50	1800
4.2	SC	50	357.50	1800
4.8	SC	50	357.50	1800
4.8	ROCA	50+	720.00	1800
10.1	ROCA	50+	720.00	1800

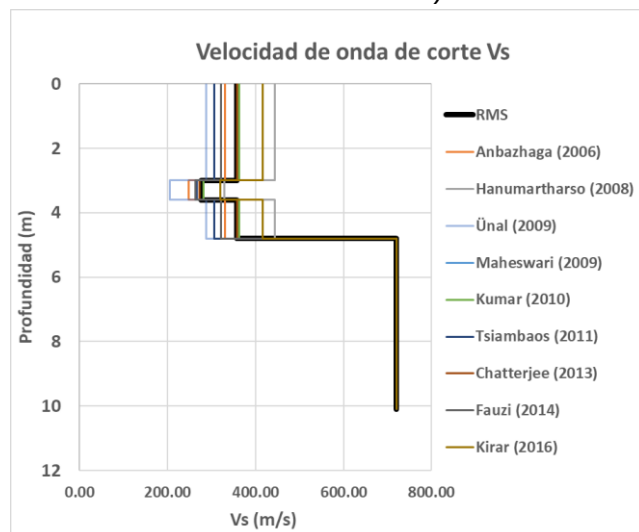


a)



c)

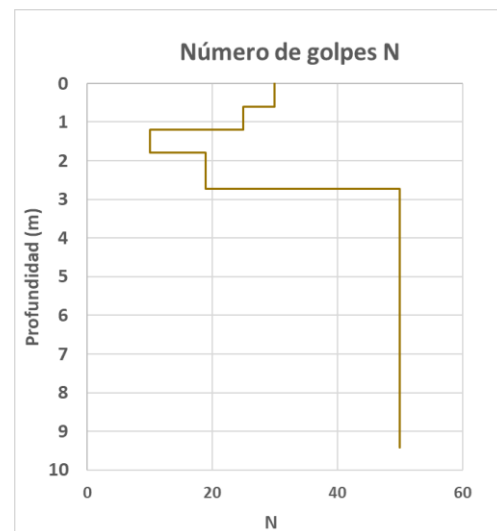
b)



d)

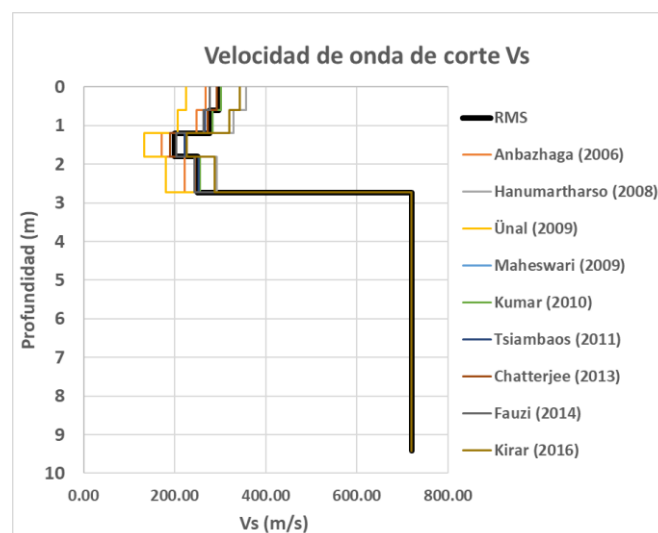
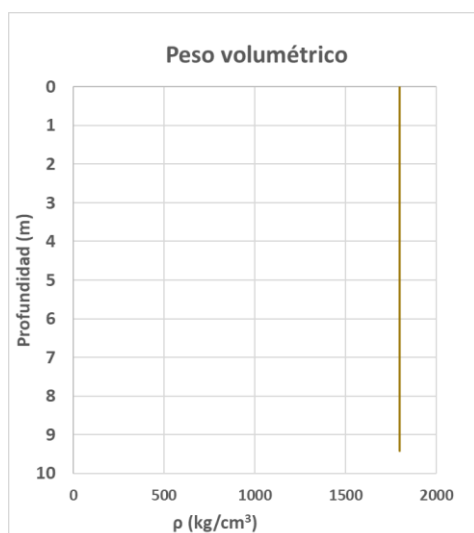
Figura 4.3.27 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SE-01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SE-02				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS	
0	CH	30	296.05	1800
0.6	CH	30	296.05	1800
0.6	CH	25	276.95	1800
1.2	CH	25	276.95	1800
1.2	CH	10	199.17	1800
1.8	CH	10	199.17	1800
1.8	CH	19	250.67	1800
2.73	CH	19	250.67	1800
2.73	GC	50+	720.00	1800
3	GC	50+	720.00	1800
3	GC	50+	720.00	1800
3.6	GC	50+	720.00	1800
3.6	TORBA	50+	720.00	1800
5.82	TORBA	50+	720.00	1800
5.82	ROCA	50+	720.00	1800
9.42	ROCA	50+	720.00	1800



a)

b)

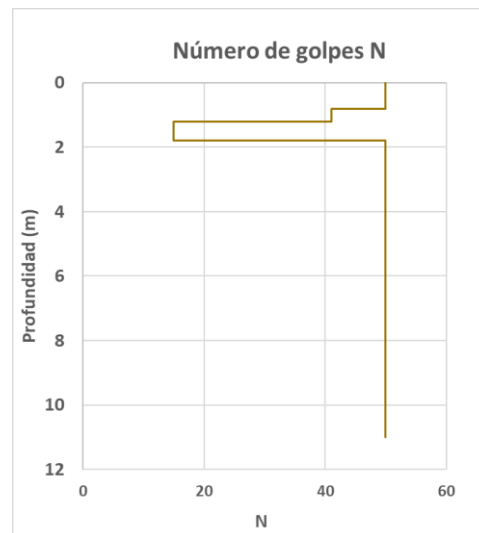


c)

d)

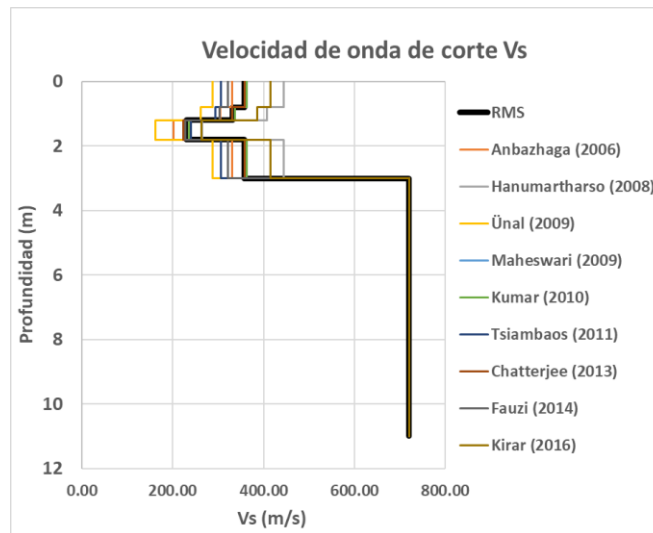
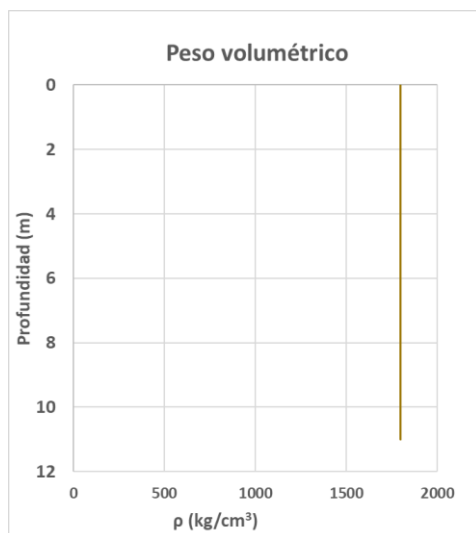
Figura 4.3.28 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SE-02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-01				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			RMS	γ_{vol} (kg/cm ³)
0	CH	50	357.50	1800
0.8	CH	50	357.50	1800
0.8	CH	41	332.14	1800
1.2	CH	41	332.14	1800
1.2	CH	15	230.18	1800
1.8	CH	15	230.18	1800
1.8	CH	50	357.50	1800
2.4	CH	50	357.50	1800
2.4	CH	50	357.50	1800
2.6	CH	50	357.50	1800
2.6	GC	50	357.50	1800
3	GC	50	357.50	1800
3	ROCA	50+	720.00	1800
11	ROCA	50+	720.00	1800



a)

b)



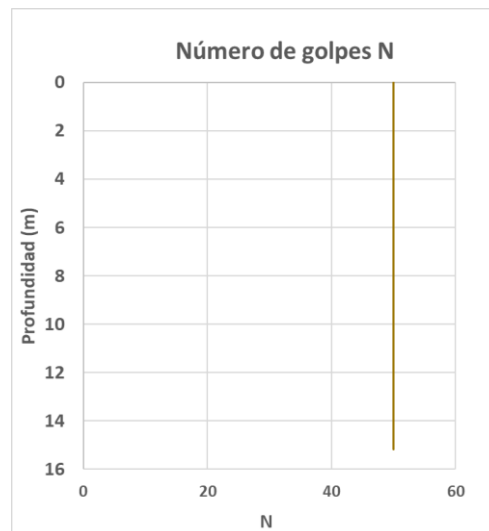
c)

d)

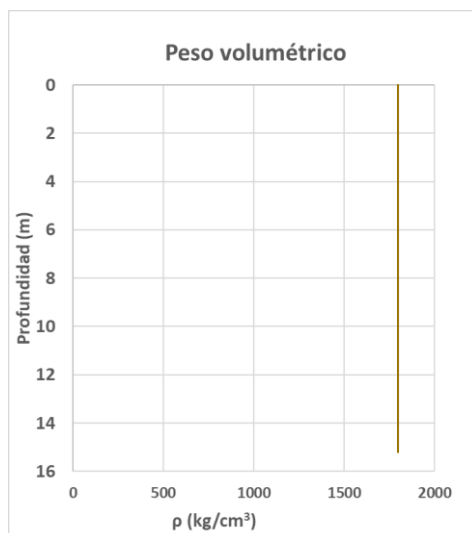
Figura 4.3.29 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-01; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-02				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			RMS	γ_{vol} (kg/cm ³)
0	ROCA	50+	720	1800
15.2	ROCA	50+	720	1800

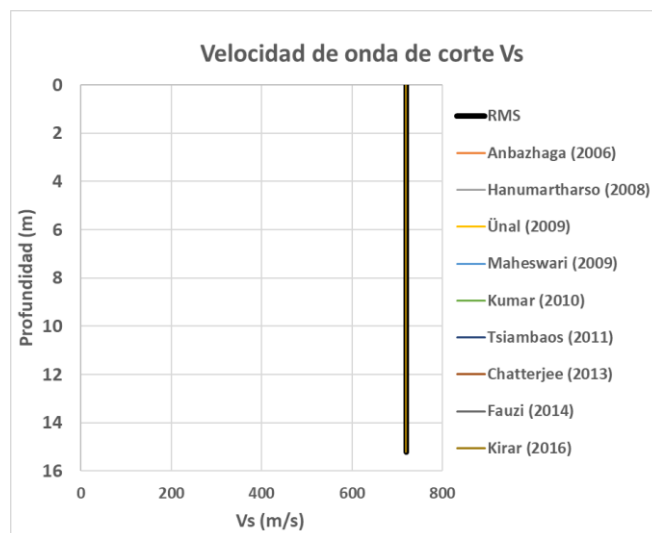
a)



b)



c)



d)

Figura 4.3.30 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-02; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

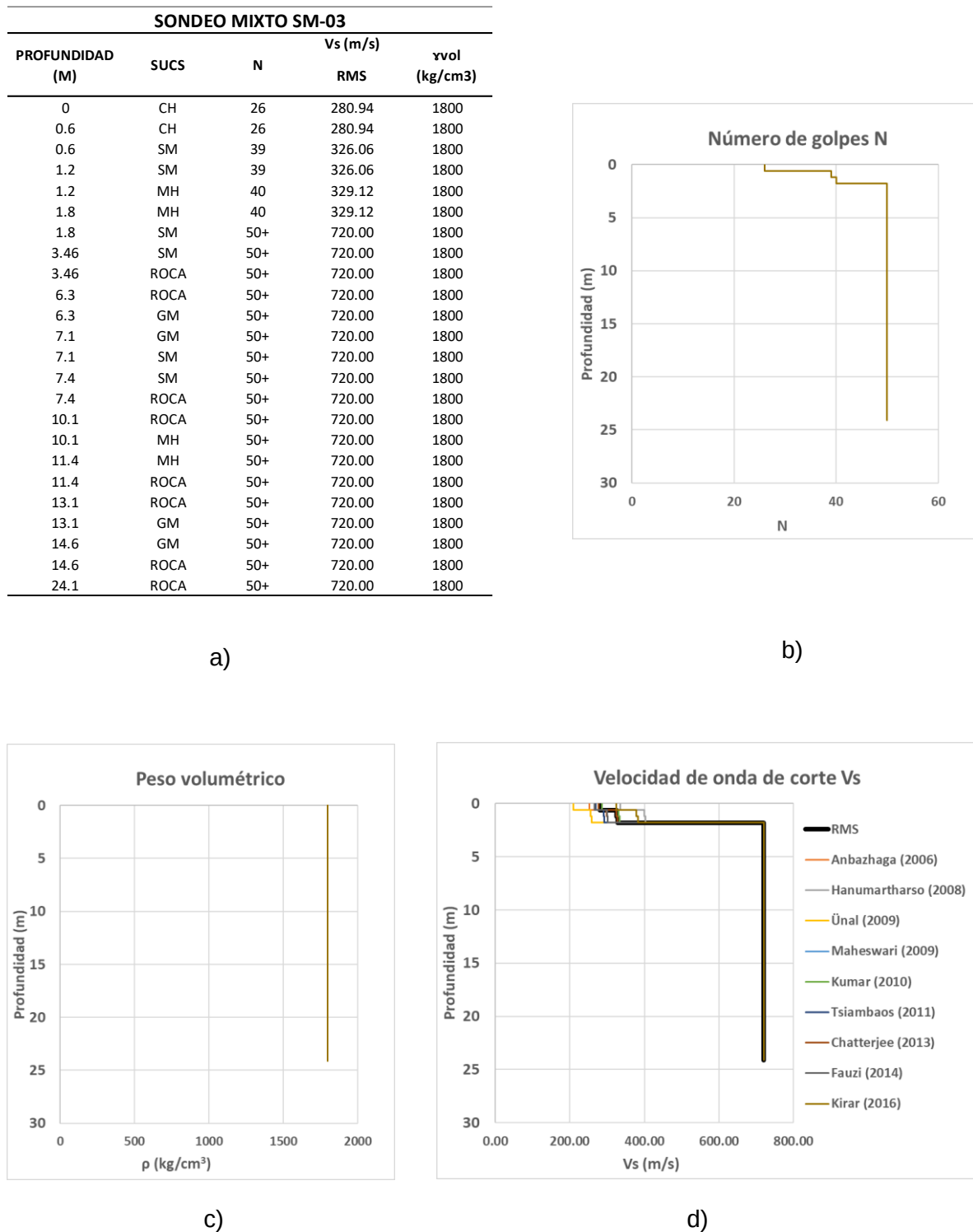
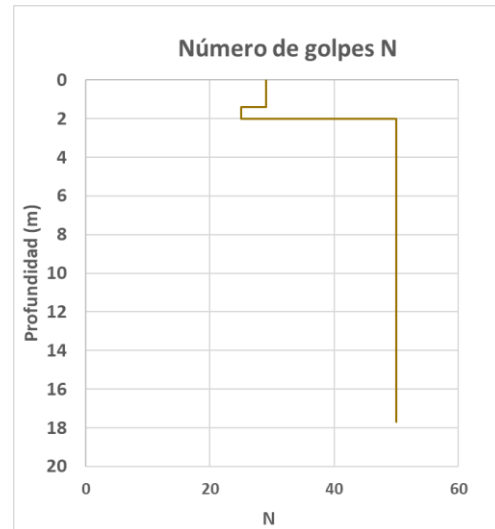


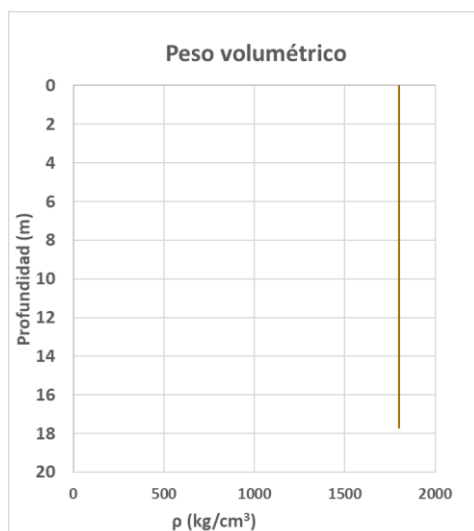
Figura 4.3.31 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-03; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-04				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS	
0	GM	29	292.39	1800
0.4	GM	29	292.39	1800
0.4	CH	29	292.39	1800
1.4	CH	29	292.39	1800
1.4	MH	25	276.95	1800
2	MH	25	276.95	1800
2	ROCA	50+	720.00	1800
17.7	ROCA	50+	720.00	1800

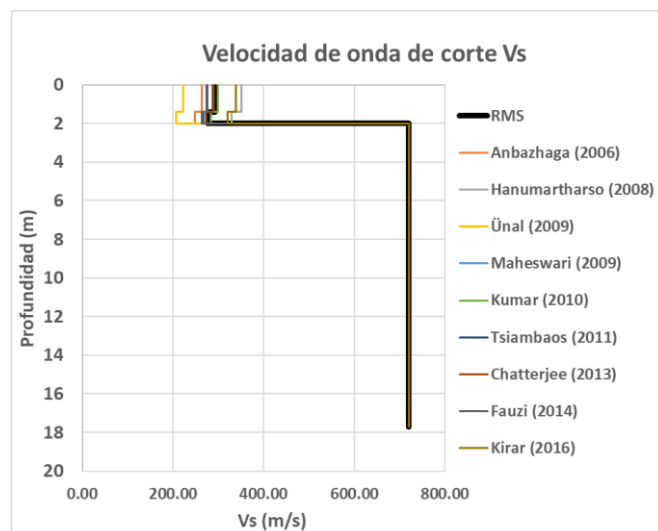
a)



b)



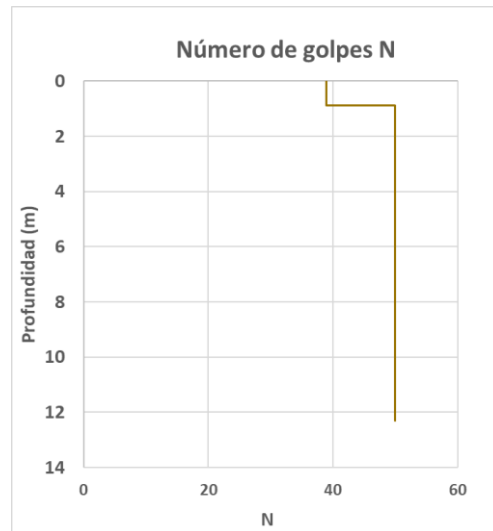
c)



d)

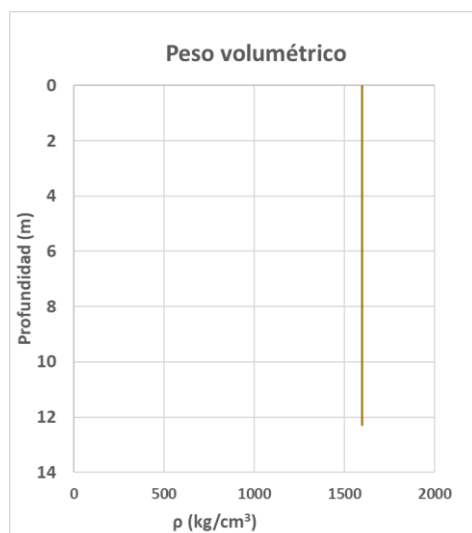
Figura 4.3.32 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-04; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-05				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS	
0	SM	39	326.06	1800
0.88	SM	39	326.06	1800
0.88	GC	50	357.50	1800
1.8	GC	50	357.50	1800
1.8	SM	50+	720.00	1800
2.4	SM	50+	720.00	1800
2.4	CL	50+	720.00	1800
5.4	CL	50+	720.00	1800
5.4	MH	50+	720.00	1800
6	MH	50+	720.00	1800
6	ROCA	50+	720.00	1800
12.3	ROCA	50+	720.00	1800

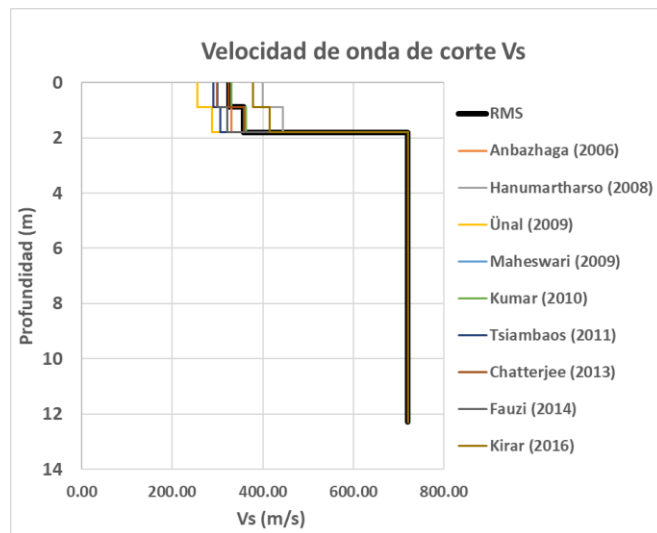


a)

b)



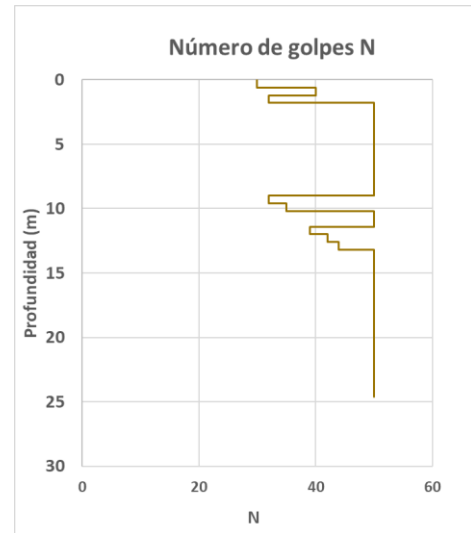
c)



d)

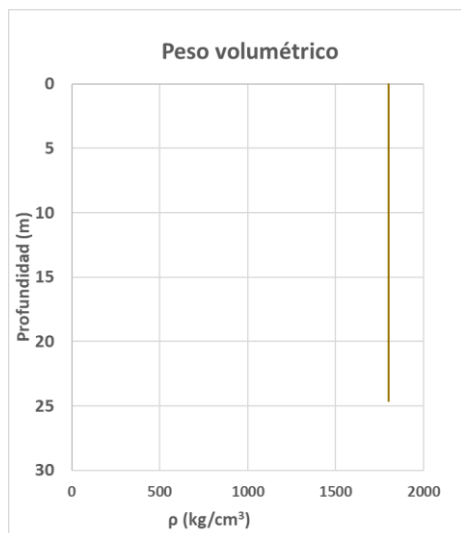
Figura 4.3.33 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-05; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-06				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			RMS	vvol (kg/cm3)
0	SC	30	296.05	1800
0.6	SC	30	296.05	1800
0.6	SC	40	329.12	1800
1.2	SC	40	329.12	1800
1.2	SC	32	303.15	1800
1.8	SC	32	303.15	1800
1.8	SC	50	357.50	1800
2.4	SC	50	357.50	1800
2.4	ML	50	357.50	1800
3	ML	50	357.50	1800
3	ML	50	357.50	1800
3.6	ML	50	357.50	1800
3.6	ML	50	357.50	1800
4.5	ML	50	357.50	1800
4.5	ROCA	50+	720.00	1800
6.5	ROCA	50+	720.00	1800
6.5	CL	50	357.50	1800
9	CL	50	357.50	1800
9	CL	32	303.15	1800
9.6	CL	32	303.15	1800
9.6	CL	35	313.30	1800
10.2	CL	35	313.30	1800
10.2	CL	50	357.50	1800
10.8	CL	50	357.50	1800
10.8	CL	50	357.50	1800
11.4	CL	50	357.50	1800
11.4	CL	39	326.06	1800
12	CL	39	326.06	1800
12	CL	42	335.12	1800
12.6	CL	42	335.12	1800
12.6	CL	44	340.94	1800
13.2	CL	44	340.94	1800
13.2	CL	50	357.50	1800
13.9	CL	50	357.50	1800
13.9	CL	50	357.50	1800
14.4	CL	50	357.50	1800
14.4	ML	50	357.50	1800
15	ML	50	357.50	1800
15	ML	50	357.50	1800
15.6	ML	50	357.50	1800
15.6	ML	50	357.50	1800
16.2	ML	50	357.50	1800
16.2	ML	50	357.50	1800
16.8	ML	50	357.50	1800
16.8	ML	50	357.50	1800
17.4	ML	50	357.50	1800
17.4	ML	50	357.50	1800
18.6	ML	50	357.50	1800
18.6	ROCA	50+	720.00	1800
24.6	ROCA	50+	720.00	1800

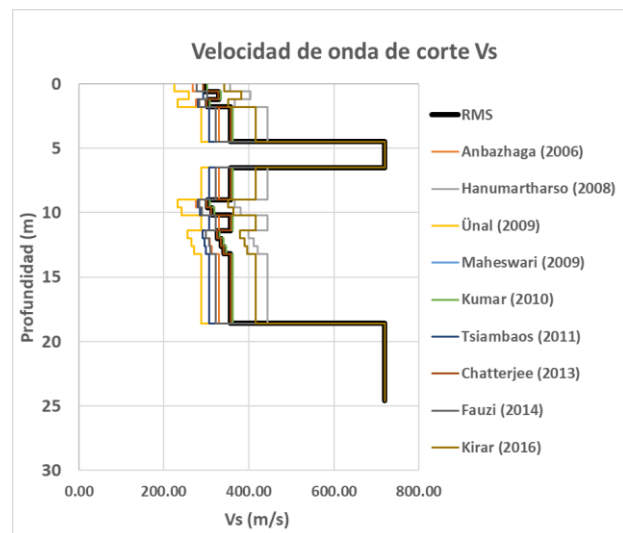


a)

b)



c)

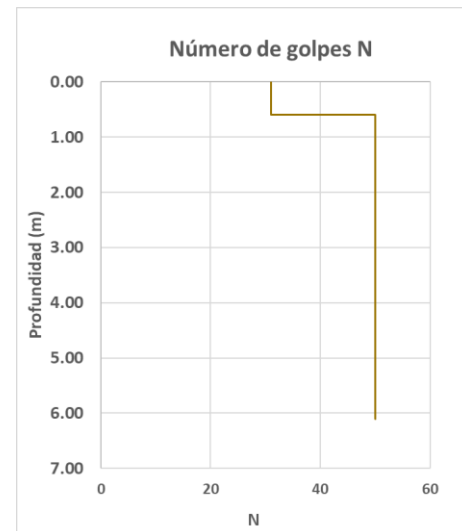


d)

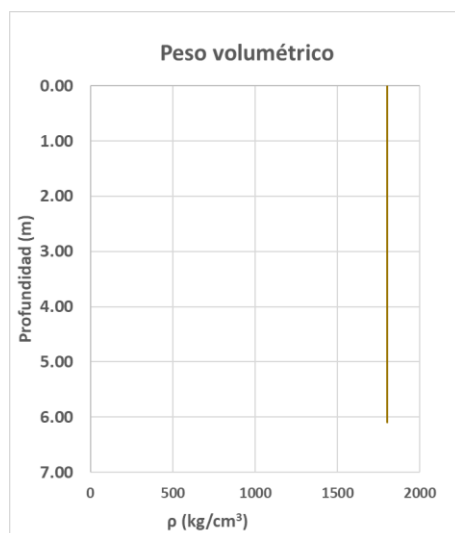
Figura 4.3.34 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-06; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

SONDEO MIXTO SM-07				
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	
			RMS	γ_{vol} (kg/cm ³)
0.00	ML	31	299.63	1800
0.60	ML	31	299.63	1800
0.60	ML	50	357.50	1800
1.20	ML	50	357.50	1800
1.20	ML	50	357.50	1800
1.70	ML	50	357.50	1800
1.70	ROCA	50+	720.00	1800
2.20	ROCA	50+	720.00	1800
2.20	ROCA	50+	720.00	1800
3.60	ROCA	50+	720.00	1800
3.60	ROCA	50+	720.00	1800
6.10	ROCA	50+	720.00	1800

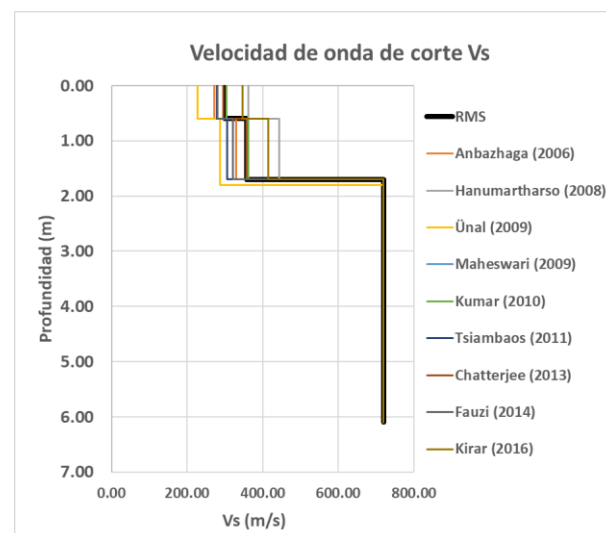
a)



b)



c)



d)

Figura 4.3.35 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto SM-07; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

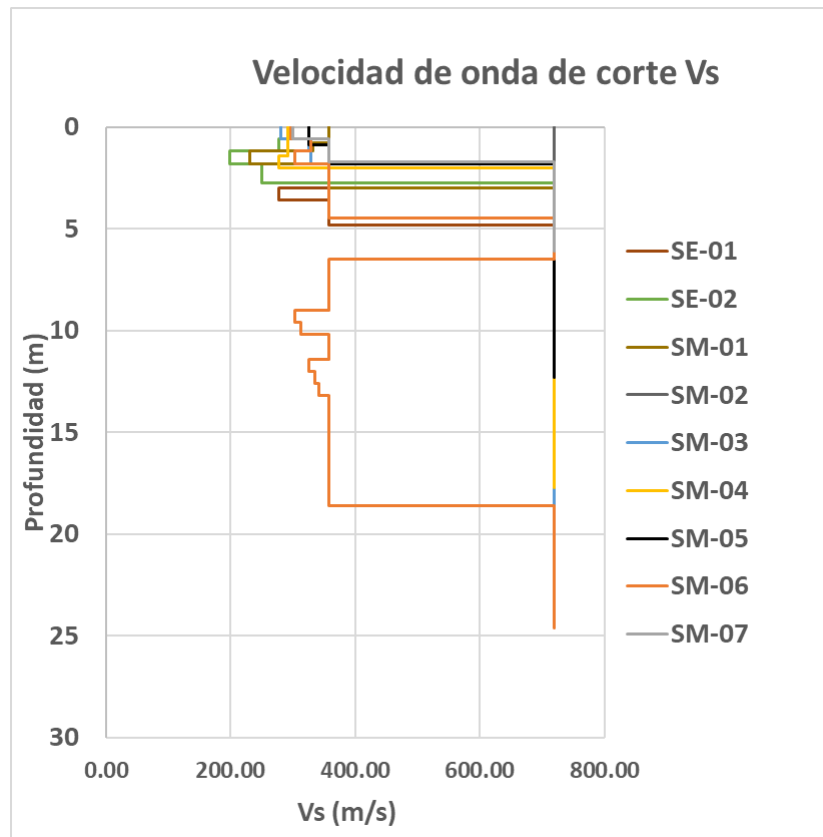


Figura 4.3.36 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012).

De acuerdo con el estudio de mecánica de suelos (SIOBI, 2012) y las correlaciones de velocidad de onda de corte y el número de golpes de las pruebas de penetración estándar, el suelo de esta zona es firme; a profundidades de 3 – 5 metros, la velocidad Vs estimada se encuentra en el intervalo de 200 - 300 m/s; a mayor profundidad $h > 5$ metros, existe suelo duro con $V_s > 720$ m/s. Las pruebas de penetración estándar mostraron que el número de golpes para penetrar menos de 30 cm en capas ya era mayor de 50, por lo que se procedió a penetrar con tubos o barriles de perforación NQ.

Por su parte Mier et al. (1968) realizaron 13 sondeos de penetración estándar en diferentes zonas de la ciudad (ver tabla 4.3.2 y fig. 4.3.37). Se realizó el mismo procedimiento para obtener las velocidades de ondas de corte (V_s) de las diferentes estratigrafías reportadas. Procesar esta información es de mucha utilidad con fines comparativos de los períodos del suelo entre estas 13 zonas y los sitios de ubicación de las estaciones sísmicas de la red. En las figs. 4.3.37 – 4.3.50 se ilustran los perfiles estratigráficos de los 13 sondeos.

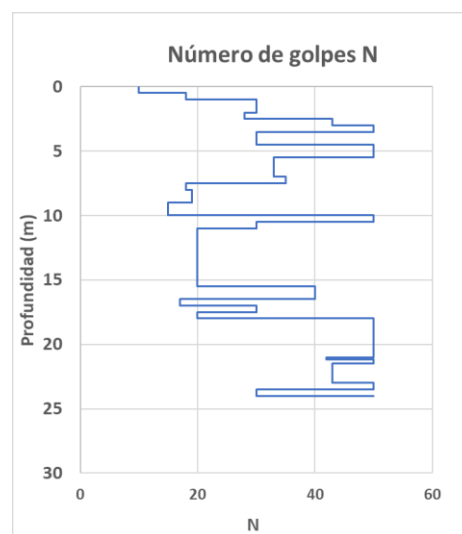
Tabla 4.3.2 *Coordenadas de los sondeos reportados en Mier et al. (1968).*

SONDEO	UBICACIÓN		
	LUGAR	LATITUD	LONGITUD
S-1	BOSQUE	19.699	-101.178
S-2	CATEDRAL	19.702	-101.192
S-3	CLUB CAMPESTRE	19.682	-101.160
S-4	CU	19.690	-101.205
S-5	SAL. CHARO	19.710	-101.164
S-6	C.F.E VENTURA	19.684	-101.180
S-7	ISSSTE	19.728	-101.181
S-8	ISSSTE II	19.729	-101.184
S-9	ISSSTE III	19.729	-101.180
S-10	DR. MIGUEL SILVA	19.720	-101.180
S-11	AV. MICH - AV. NOCU	19.705	-101.2
S-12	IMSS I	19.704	-101.202
S-13	IMSS II	19.703	-101.202



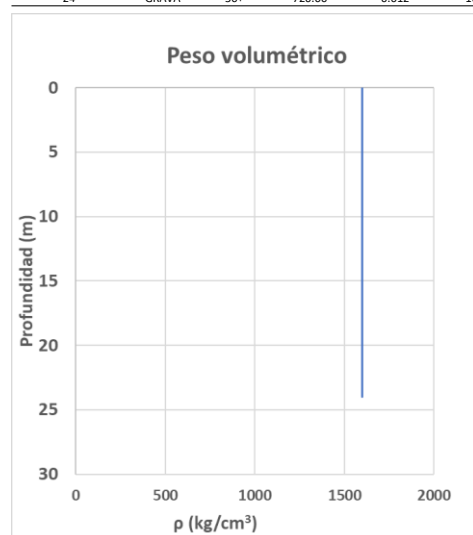
Figura 4.3.37 *Ubicación de los sondeos reportados en Mier et al. (1968). Se muestran también las estaciones de la RSN para ver la cercanía que hay entre los sondeos y estaciones.*

S-1 BOSQUE					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)		γvol (kg/cm3)
			RMS	% AMORTIGUAMIENTO	
0	CL	10	194.89	0.043	1600
0.5	CL	10	194.89	0.043	1600
0.5	CL	18	241.66	0.034	1600
1	ML	18	241.66	0.034	1600
1	ML	30	291.34	0.029	1600
2	ML	30	291.34	0.029	1600
2	ML	28	284.07	0.029	1600
2.5	ML	28	284.07	0.029	1600
2.5	ML	43	332.36	0.025	1600
3	ML	43	332.36	0.025	1600
3	ML	50+	720.00	0.012	1600
3.5	ML	50+	720.00	0.012	1600
3.5	ML	30	291.34	0.029	1600
4.5	ML	30	291.34	0.029	1600
4.5	ML	50+	720.00	0.012	1600
5.5	SM	50+	720.00	0.012	1600
5.5	SM	33	301.68	0.028	1600
7	SM	33	301.68	0.028	1600
7	SM	35	720.00	0.012	1600
7.5	SM	35	720.00	0.012	1600
7.5	SM	18	241.66	0.034	1600
8	SM	18	241.66	0.034	1600
8	SM	19	246.49	0.034	1600
9	S	19	246.49	0.034	1600
9	S	15	226.06	0.037	1600
10	S	15	226.06	0.037	1600
10	S	50	351.22	0.024	1600
10.5	S	50	351.22	0.024	1600
10.5	S	30	291.34	0.029	1600
11	MH	30	291.34	0.029	1600
11	MH	20	251.16	0.033	1600
15.5	MH	20	251.16	0.033	1600
15.5	MH	40	323.68	0.026	1600
16.5	MH	40	323.68	0.026	1600
16.5	MH	17	236.66	0.035	1600
17	MH	17	236.66	0.035	1600
17	MH	30	291.34	0.029	1600
17.5	MH	30	291.34	0.029	1600
17.5	MH	20	251.16	0.033	1600
18	MH	20	251.16	0.033	1600
18	MH	50+	720.00	0.012	1600
21	MH	50+	720.00	0.012	1600
21	MH	42	329.51	0.025	1600
21.2	MH	42	329.51	0.025	1600
21.2	ML	50+	720.00	0.012	1600
21.5	ML	50+	720.00	0.012	1600
21.5	ML	43	332.36	0.025	1600
23	ML	43	332.36	0.025	1600
23	ML	50+	720.00	0.012	1600
23.5	ML	50+	720.00	0.012	1600
23.5	ML	30	291.34	0.029	1600
24	GRAVA	30	291.34	0.029	1600
24	GRAVA	50+	720.00	0.012	1600
24	GRAVA	50+	720.00	0.012	1600

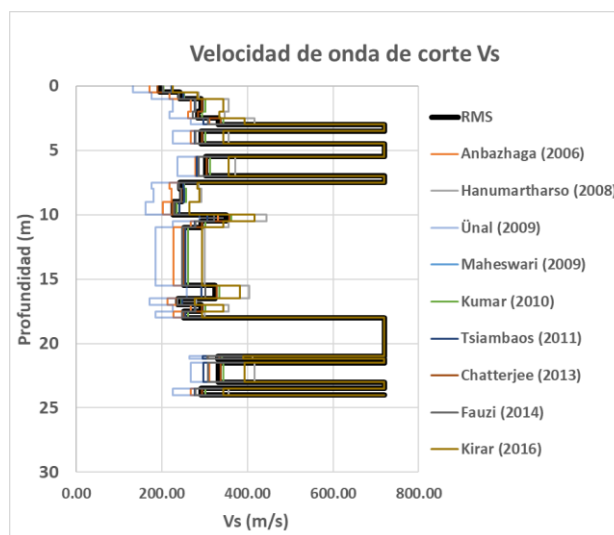


a)

b)



c)



d)

Figura 4.3.38 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-1; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

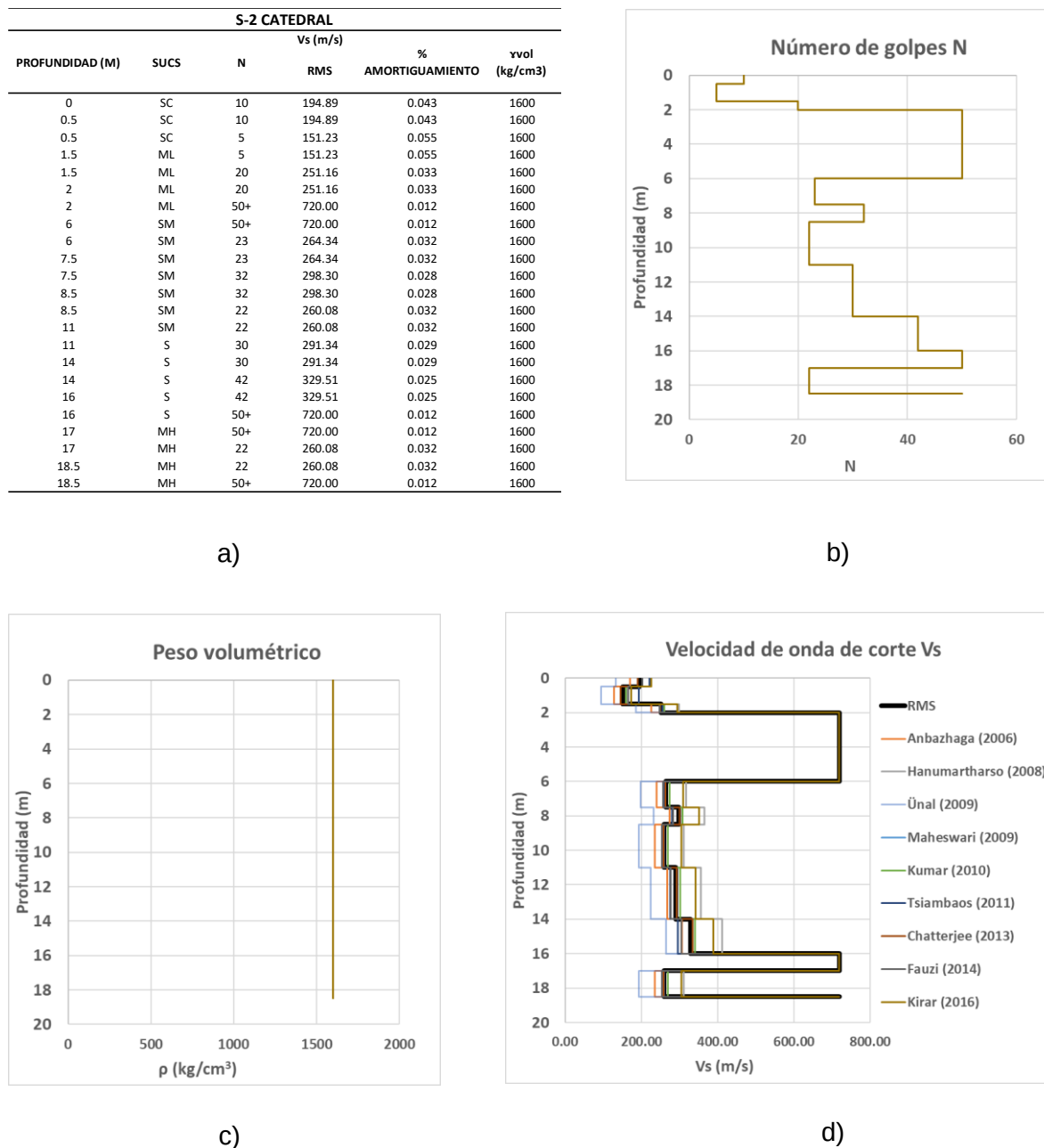
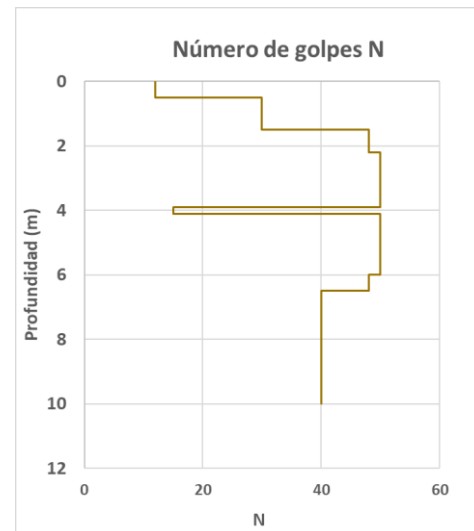


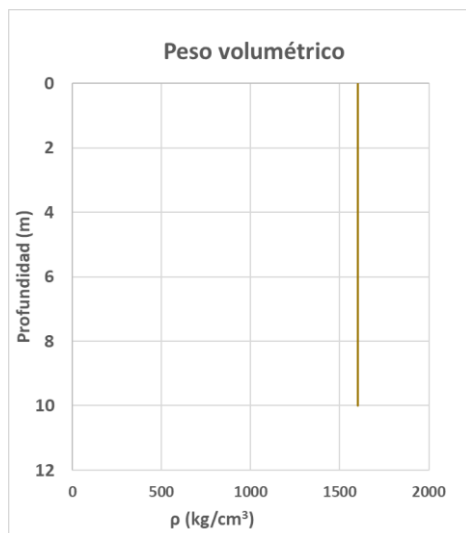
Figura 4.3.39 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-2; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-3 CLUB CAMPESTRE					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γvol (kg/cm ³)
			RMS		
0	CH	12	208.34	0.040	1600
0.5	CH	12	208.34	0.040	1600
0.5	CH	30	291.34	0.029	1600
1.5	CH	30	291.34	0.029	1600
1.5	CH	48	346.01	0.024	1600
2.2	CH	48	346.01	0.024	1600
2.2	CH	50+	720.00	0.012	1600
3.9	CH	50+	720.00	0.012	1600
3.9	CH	15	226.06	0.037	1600
4.1	CH	15	226.06	0.037	1600
4.1	CH	50+	720.00	0.012	1600
6	CH	50+	720.00	0.012	1600
6	CH	48	346.01	0.024	1600
6.5	CL	48	346.01	0.024	1600
6.5	CL	40	323.68	0.026	1600
10	CL	40	323.68	0.026	1600

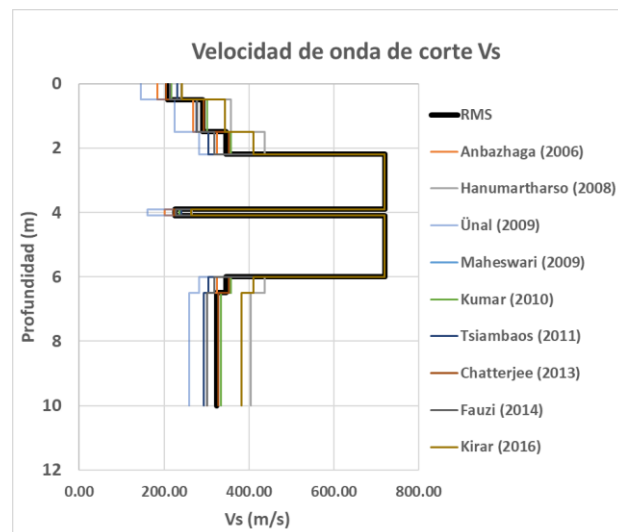
a)



b)



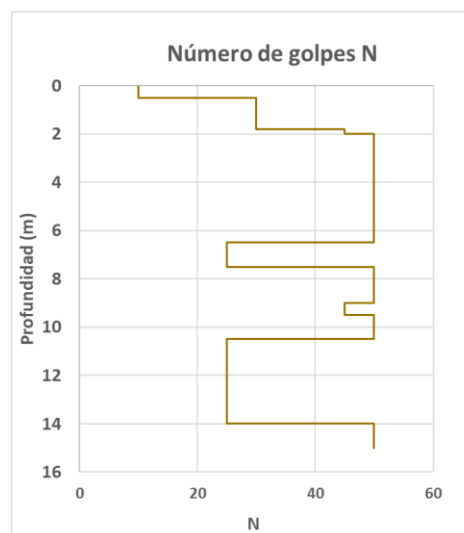
c)



d)

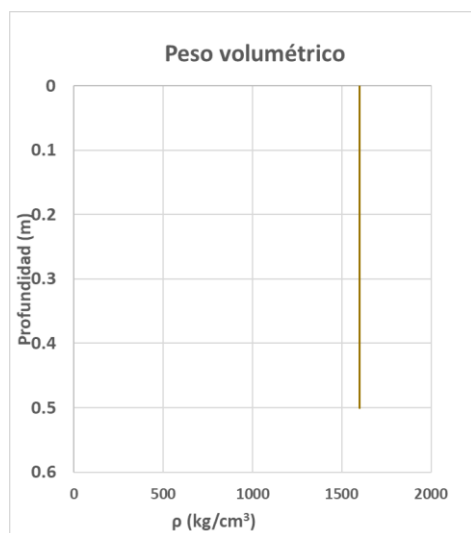
Figura 4.3.40 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-3; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-4 CU					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)		γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS	% AMORTIGUAMIENTO	
0	MH	10	194.89	0.043	1600
0.5	MH	10	194.89	0.043	1600
0.5	MH	30	291.34	0.029	1601
1.8	MH	30	291.34	0.029	1602
1.8	MH	45	337.94	0.025	1603
2	MH	45	337.94	0.025	1604
2	MH	50+	720.00	0.012	1605
6.5	CL	50+	720.00	0.012	1606
6.5	CL	25	272.53	0.031	1607
7.5	CL	25	272.53	0.031	1608
7.5	CL	50+	720.00	0.012	1609
9	CL	50+	720.00	0.012	1610
9	CL	45	337.94	0.025	1611
9.5	CL	45	337.94	0.025	1612
9.5	CL	50+	720.00	0.012	1613
10.5	CH	50+	720.00	0.012	1614
10.5	CH	25	272.53	0.031	1615
14	CH	25	272.53	0.031	1616
14	CH	50+	720.00	0.012	1617
15	CH	50+	720.00	0.012	1618

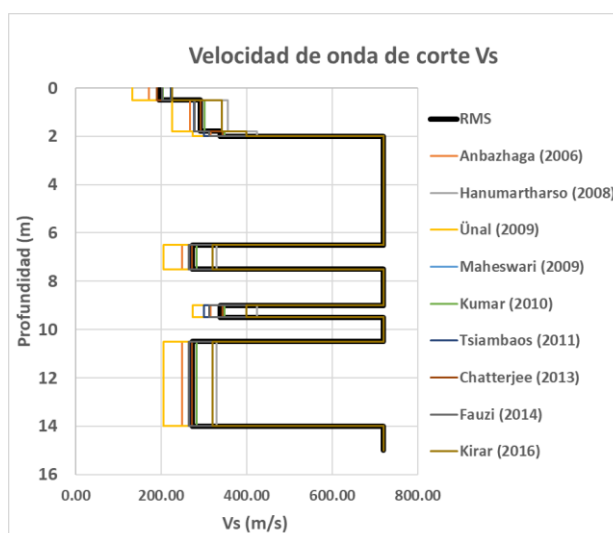


a)

b)



c)



d)

Figura 4.3.41 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-4; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

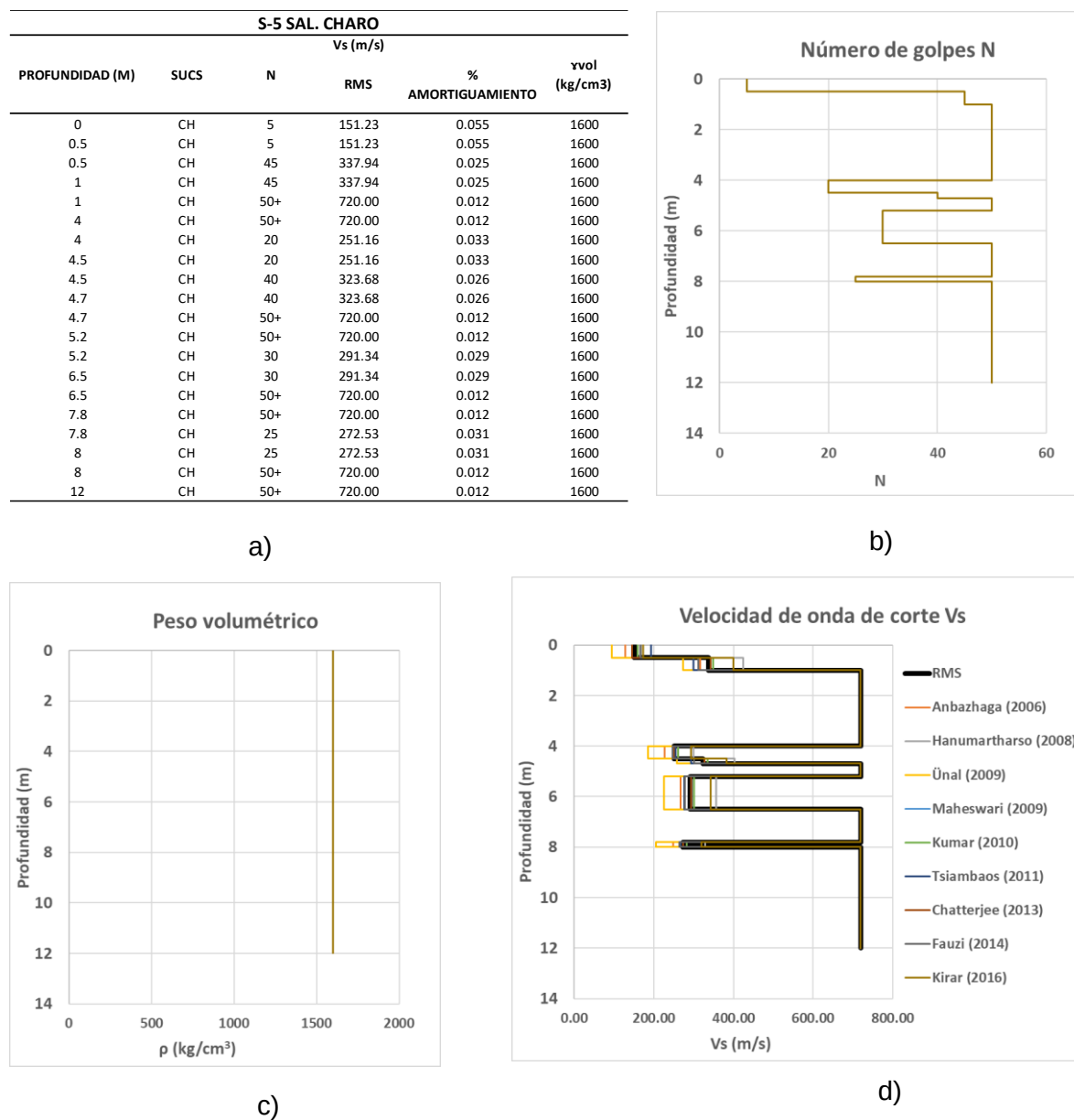


Figura 4.3.42 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-5; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

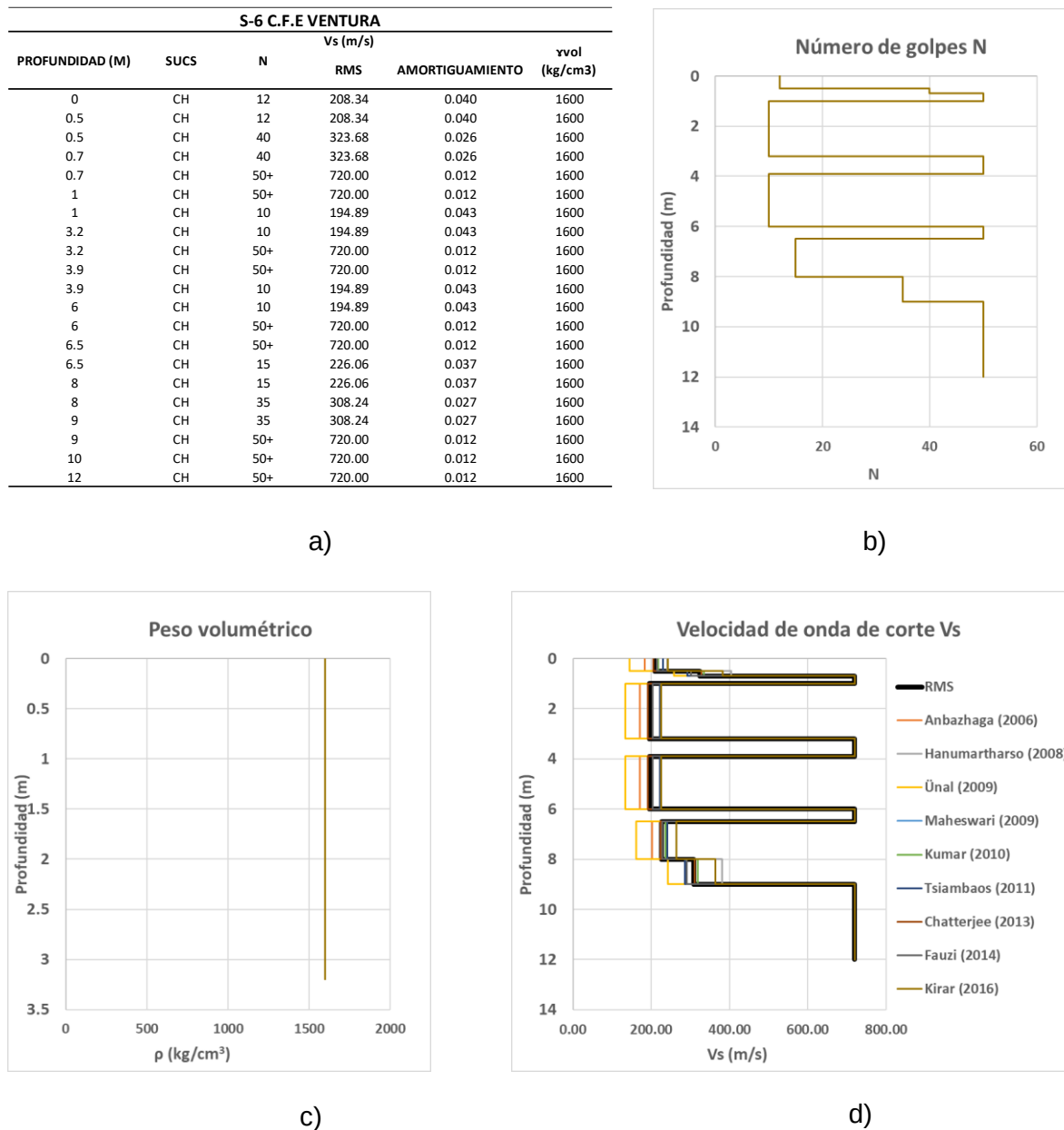
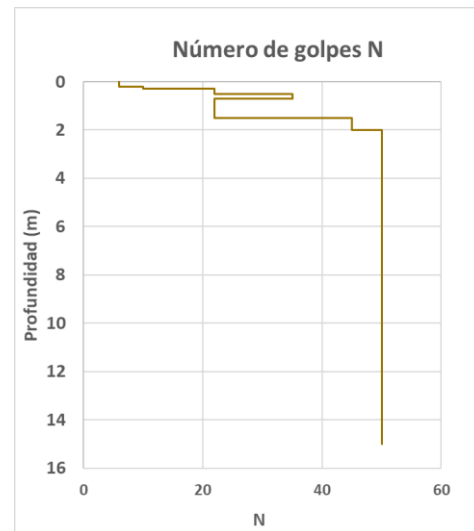


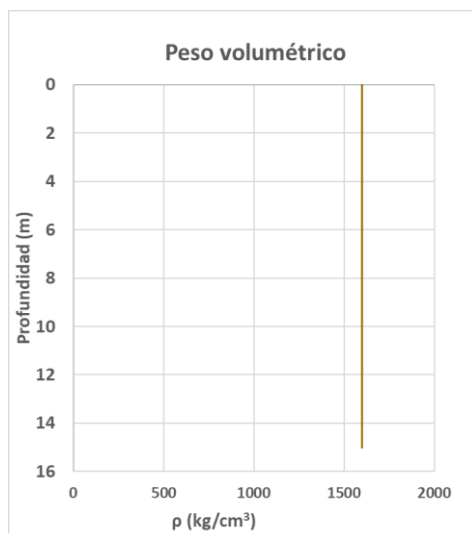
Figura 4.3.43 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-6; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-7 ISSSTE					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS		
0	MH	6	161.66	0.052	1600
0.2	MH	6	161.66	0.052	1600
0.2	MH	10	194.89	0.043	1600
0.3	MH	10	194.89	0.043	1600
0.3	MH	22	260.08	0.032	1600
0.5	MH	22	260.08	0.032	1600
0.5	MH	35	308.24	0.027	1600
0.7	MH	35	308.24	0.027	1600
0.7	MH	22	260.08	0.032	1600
1.5	MH	22	260.08	0.032	1600
1.5	MH	45	337.94	0.025	1600
2	MH	45	337.94	0.025	1600
2	MH	50+	720.00	0.012	1600
15	MH	50+	720.00	0.012	1600

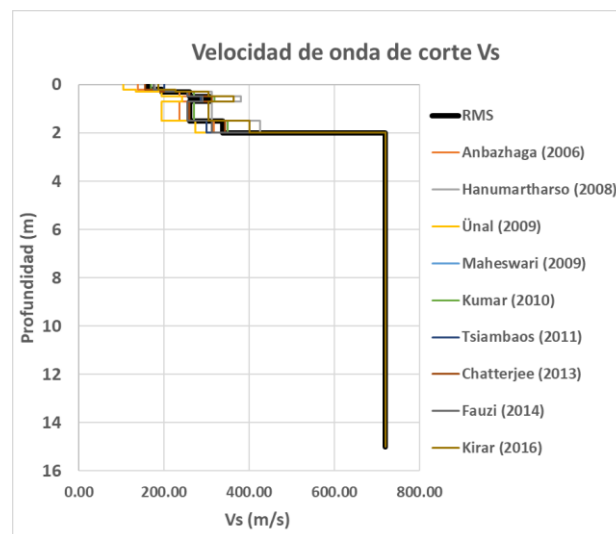
a)



b)



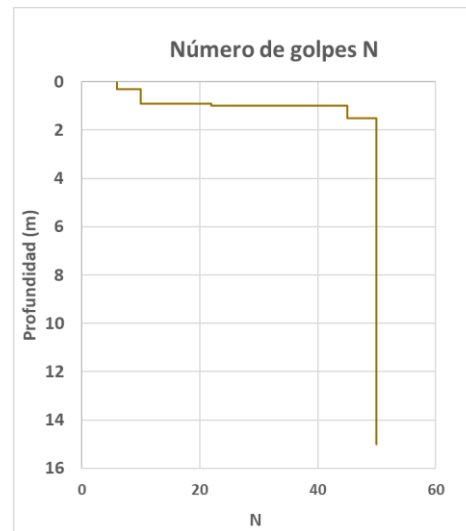
c)



d)

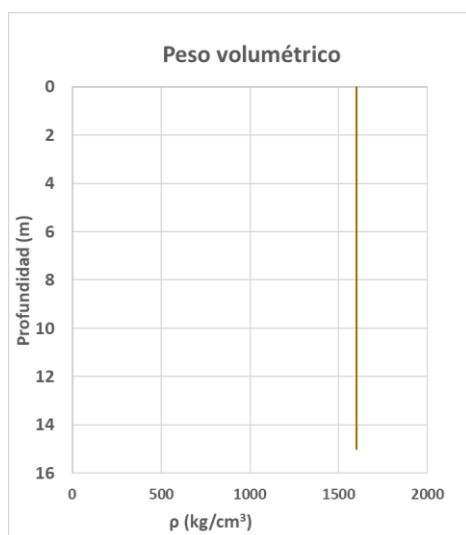
Figura 4.3.44 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-7; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-8 ISSSTE					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS		
0	MH	6	161.66	0.052	1600
0.3	MH	6	161.66	0.052	1600
0.3	MH	10	194.89	0.043	1600
0.9	MH	10	194.89	0.043	1600
0.9	MH	22	260.08	0.032	1600
1	MH	22	260.08	0.032	1600
1	MH	45	337.94	0.025	1600
1.5	MH	45	337.94	0.025	1600
1.5	MH	50+	720.00	0.012	1600
15	MH	50+	720.00	0.012	1600

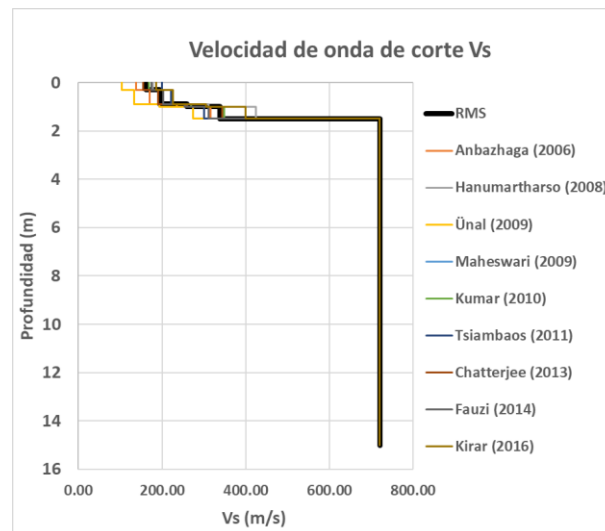


a)

b)



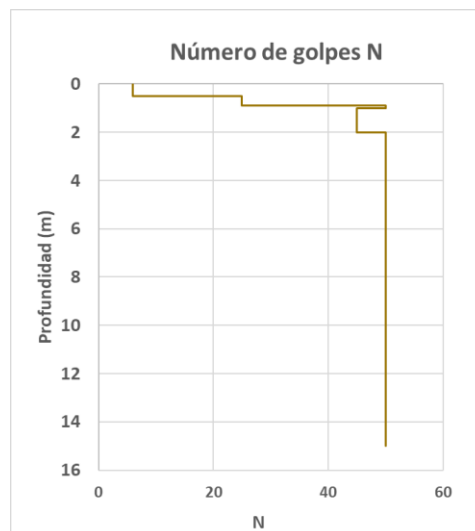
c)



d)

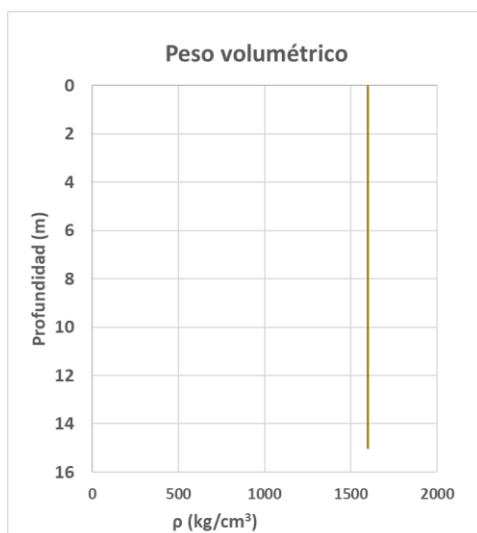
Figura 4.3.45 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-8; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-9 ISSSTE					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS		
0	MH	6	161.66	0.052	1600
0.5	MH	6	161.66	0.052	1600
0.5	MH	25	272.53	0.031	1600
0.9	MH	25	272.53	0.031	1600
0.9	MH	50	351.22	0.024	1600
1	MH	50	351.22	0.024	1600
1	CH	45	337.94	0.025	1600
2	CH	45	337.94	0.025	1600
2	MH	50+	720.00	0.012	1600
15	MH	50+	720.00	0.012	1600

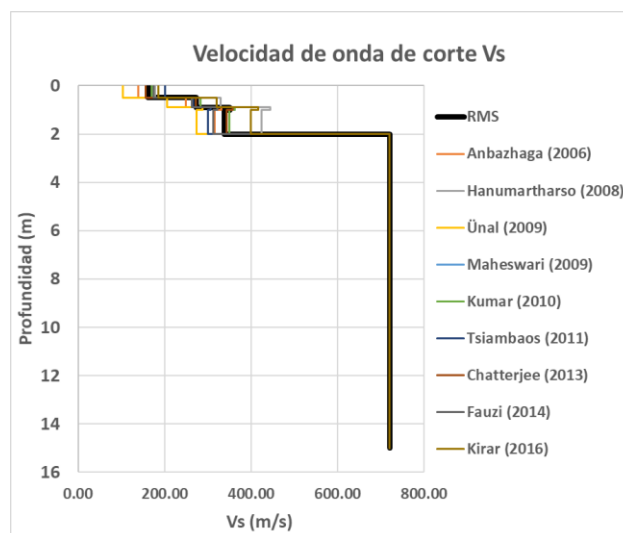


a)

b)



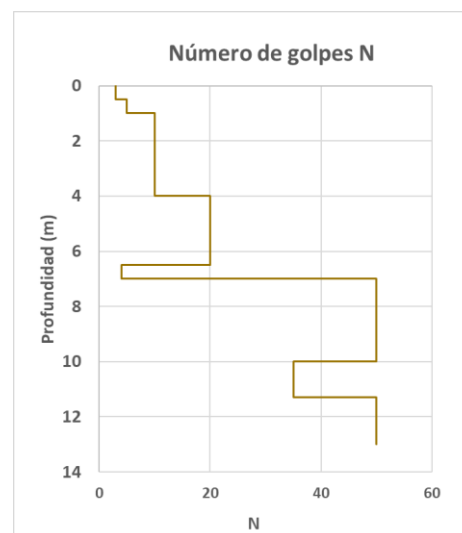
c)



d)

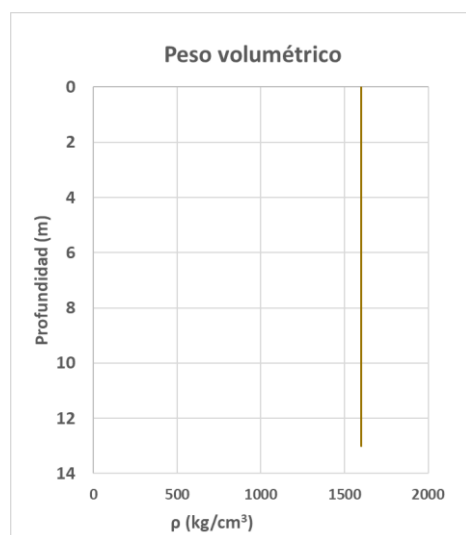
Figura 4.3.46 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-9; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-10 DR. MIGUEL SILVA					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS		
0	CH	3	125.44	0.066	1600
0.5	CH	3	125.44	0.066	1600
0.5	CH	5	151.23	0.055	1600
1	CH	5	151.23	0.055	1600
1	CH	10	194.89	0.043	1600
4	CH	10	194.89	0.043	1600
4	CH	20	251.16	0.033	1600
6.5	CH	20	251.16	0.033	1600
6.5	CH	4	139.37	0.060	1600
7	CH	4	139.37	0.060	1600
7	CH	50+	720.00	0.012	1600
10	CH	50+	720.00	0.012	1600
10	CH	35	308.24	0.027	1600
11.3	CH	35	308.24	0.027	1600
11.3	CH	50+	720.00	0.012	1600
13	CH	50+	720.00	0.012	1600

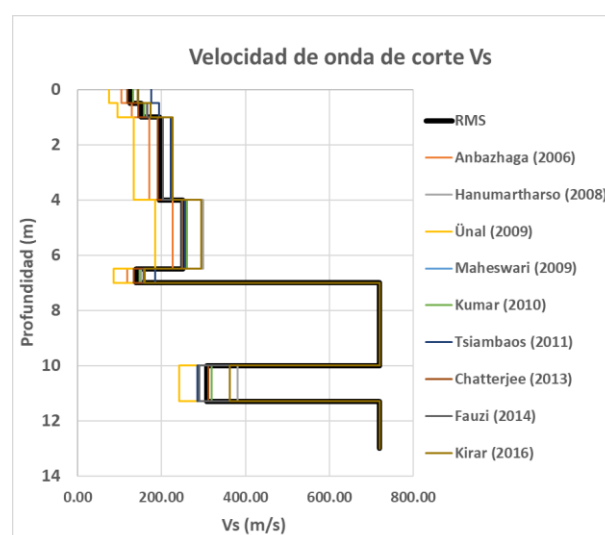


a)

b)



c)

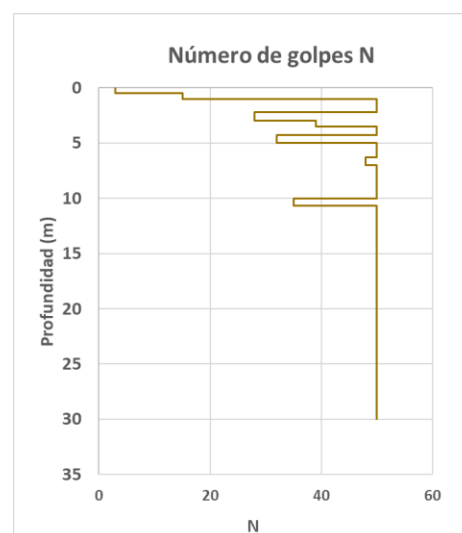


d)

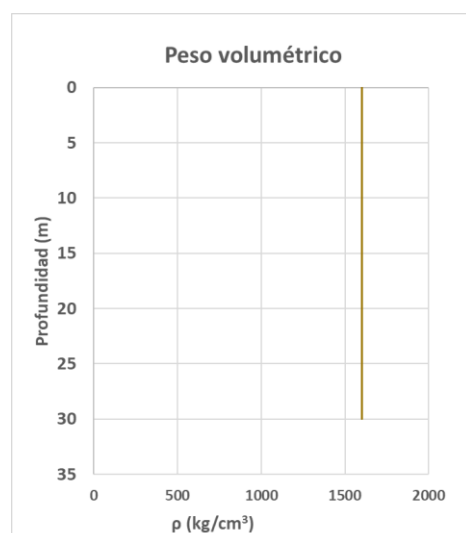
Figura 4.3.47 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-10; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-11 AV. MICHOACÁN - AV. NOCUPÉTARO					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)		γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS	AMORTIGUAMIENTO	
0	CH	3	125.44	0.066	1600
0.5	CH	3	125.44	0.066	1600
0.5	CH	15	226.06	0.037	1600
1	CH	15	226.06	0.037	1600
1	MH	50+	720.00	0.012	1600
2.2	MH	50+	720.00	0.012	1600
2.2	MH	28	284.07	0.029	1600
3	MH	28	284.07	0.029	1600
3	MH	39	320.69	0.026	1600
3.5	MH	39	320.69	0.026	1600
3.5	MH	50+	720.00	0.012	1600
4.3	MH	50+	720.00	0.012	1600
4.3	MH	32	298.30	0.028	1600
5	MH	32	298.30	0.028	1600
5	MH	50+	720.00	0.012	1600
6.3	MH	50+	720.00	0.012	1600
6.3	MH	48	346.01	0.024	1600
7	MH	48	346.01	0.024	1600
7	MH	50+	720.00	0.012	1600
10	MH	50+	720.00	0.012	1600
10	MH	35	308.24	0.027	1600
10.7	MH	35	308.24	0.027	1600
10.7	MH	50+	720.00	0.012	1600
30	MH	50+	720.00	0.012	1600

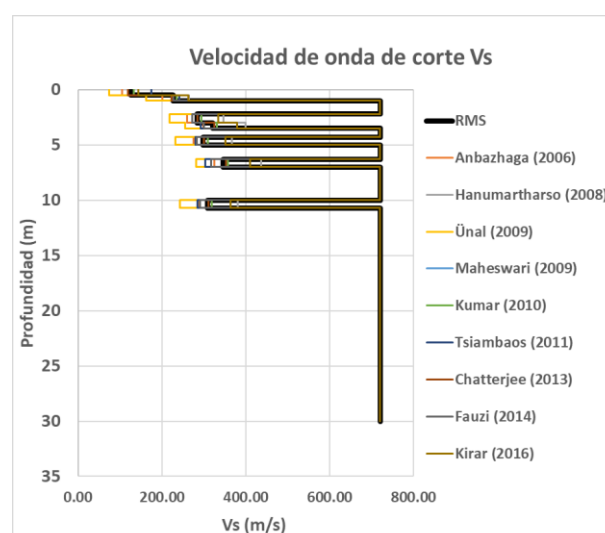
a)



b)



c)

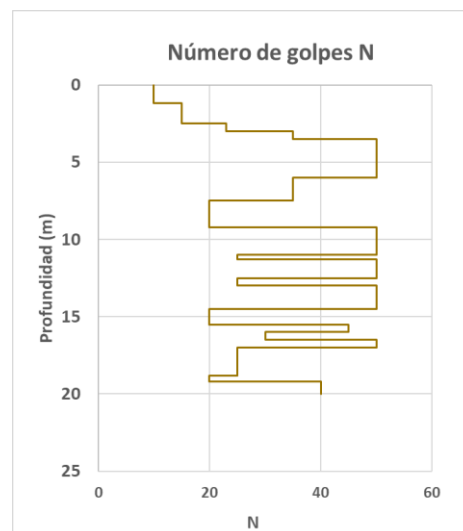


d)

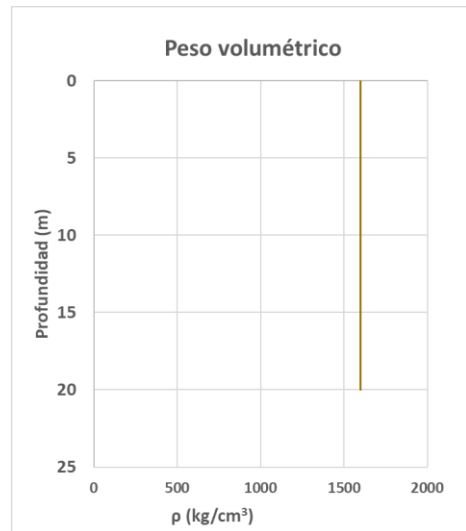
Figura 4.3.48 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-11; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-12 IMSS NOCUPÉTARO I					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s)	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
			RMS		
0	CH	10	194.89	0.043	1600
1.2	CH	10	194.89	0.043	1600
1.2	CH	15	226.06	0.037	1600
2.5	MH	15	226.06	0.037	1600
2.5	MH	23	264.34	0.032	1600
3	MH	23	264.34	0.032	1600
3	MH	35	308.24	0.027	1600
3.5	MH	35	308.24	0.027	1600
3.5	MH	50	351.22	0.024	1600
6	MH	50	351.22	0.024	1600
6	MH	35	308.24	0.027	1600
7.5	MH	35	308.24	0.027	1600
7.5	MH	20	251.16	0.033	1600
9.2	MH	20	251.16	0.033	1600
9.2	MH	50+	720.00	0.012	1600
11	MH	50+	720.00	0.012	1600
11	MH	25	272.53	0.031	1600
11.3	MH	25	272.53	0.031	1600
11.3	MH	50+	720.00	0.012	1600
12.5	MH	50+	720.00	0.012	1600
12.5	MH	25	272.53	0.031	1600
13	MH	25	272.53	0.031	1600
13	MH	50+	720.00	0.012	1600
14.5	MH	50+	720.00	0.012	1600
14.5	MH	20	251.16	0.033	1600
15.5	MH	20	251.16	0.033	1600
15.5	ML	45	337.94	0.025	1600
16	ML	45	337.94	0.025	1600
16	ML	30	291.34	0.029	1600
16.5	ML	30	291.34	0.029	1600
16.5	ML	50+	720.00	0.012	1600
17	ML	50+	720.00	0.012	1600
17	ML	25	272.53	0.031	1600
18.8	ML	25	272.53	0.031	1600
18.8	ML	20	251.16	0.033	1600
19.2	ML	20	251.16	0.033	1600
19.2	ML	40	323.68	0.026	1600
20	ML	40	323.68	0.026	1600

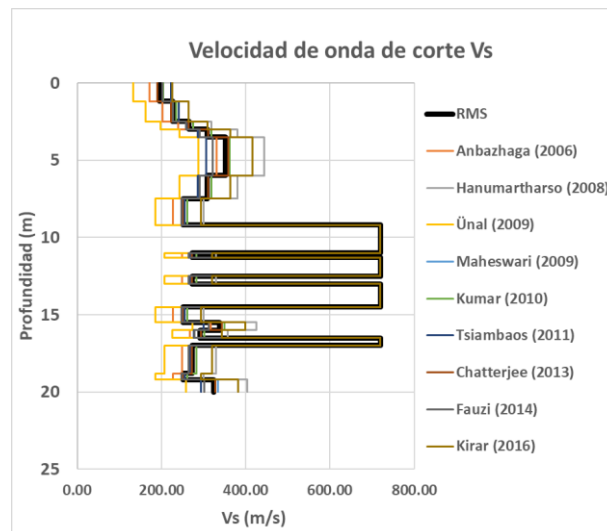
a)



b)



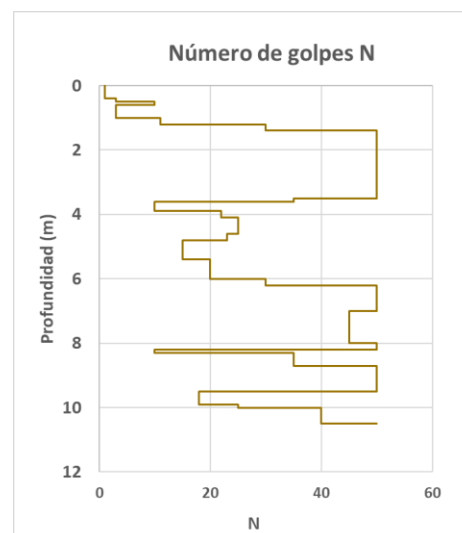
c)



d)

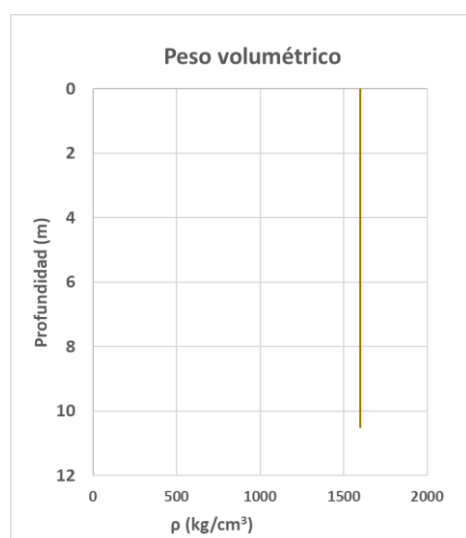
Figura 4.3.49 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-12; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

S-13 IMSS NOCUPÉTARO II					
PROFUNDIDAD (M)	SUCS	N	Vs (m/s) RMS	AMORTIGUAMIENTO	γ_{vol} (kg/cm ³)
0	MH	1	83.92	0.099	1600
0.4	MH	1	83.92	0.099	1600
0.4	MH	3	125.44	0.066	1600
0.5	MH	3	125.44	0.066	1600
0.5	MH	10	194.89	0.043	1600
0.6	MH	10	194.89	0.043	1600
0.6	MH	3	125.44	0.066	1600
1	MH	3	125.44	0.066	1600
1	MH	11	201.81	0.041	1600
1.2	MH	11	201.81	0.041	1600
1.2	MH	30	291.34	0.029	1600
1.4	MH	30	291.34	0.029	1600
1.4	MH	50+	720.00	0.012	1600
3.5	MH	50+	720.00	0.012	1600
3.5	MH	35	308.24	0.027	1600
3.6	MH	35	308.24	0.027	1600
3.6	MH	10	194.89	0.043	1600
3.9	MH	10	194.89	0.043	1600
3.9	MH	22	720.00	0.012	1600
4.1	MH	22	720.00	0.012	1600
4.1	MH	25	272.53	0.031	1600
4.6	MH	25	272.53	0.031	1600
4.6	MH	23	720.00	0.012	1600
4.8	MH	23	720.00	0.012	1600
4.8	MH	15	226.06	0.037	1600
5.4	CH	15	226.06	0.037	1600
5.4	CH	20	251.16	0.033	1600
6	CH	20	251.16	0.033	1600
6	CH	30	291.34	0.029	1600
6.2	CH	30	291.34	0.029	1600
6.2	CH	50+	720.00	0.012	1600
7	CH	50+	720.00	0.012	1600
7	CH	45	337.94	0.025	1600
8	CH	45	337.94	0.025	1600
8	CH	50	351.22	0.024	1600
8.2	CH	50	351.22	0.024	1600
8.2	CH	10	194.89	0.043	1600
8.3	CH	10	194.89	0.043	1600
8.3	CH	35	308.24	0.027	1600
8.7	CH	35	308.24	0.027	1600
8.7	CH	50+	720.00	0.012	1600
9.5	CH	50+	720.00	0.012	1600
9.5	CH	18	241.66	0.034	1600
9.9	CH	18	241.66	0.034	1600
9.9	CH	25	272.53	0.031	1600
10	CH	25	272.53	0.031	1600
10	CH	40	323.68	0.026	1600
10.5	CH	40	323.68	0.026	1600
10.5	CH	50	351.22	0.024	1600

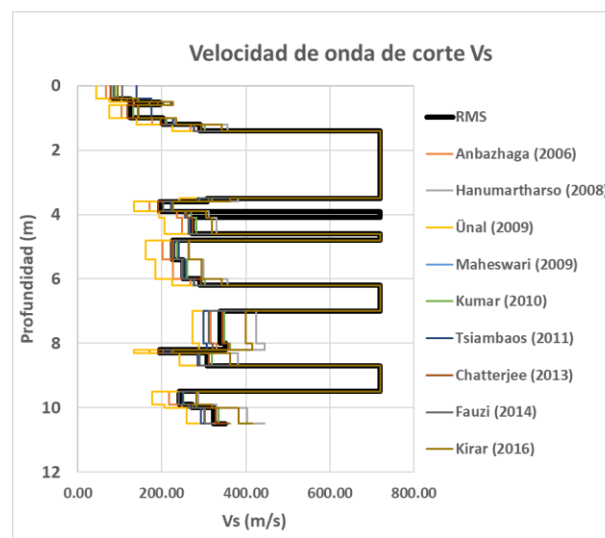


b)

a)



c)



d)

Figura 4.3.50 a) Parámetros obtenidos del sondeo mixto S-13; b) perfil del número de golpes; c) perfil estratigráfico del peso volumétrico; d) perfil de velocidades de onda (m/s).

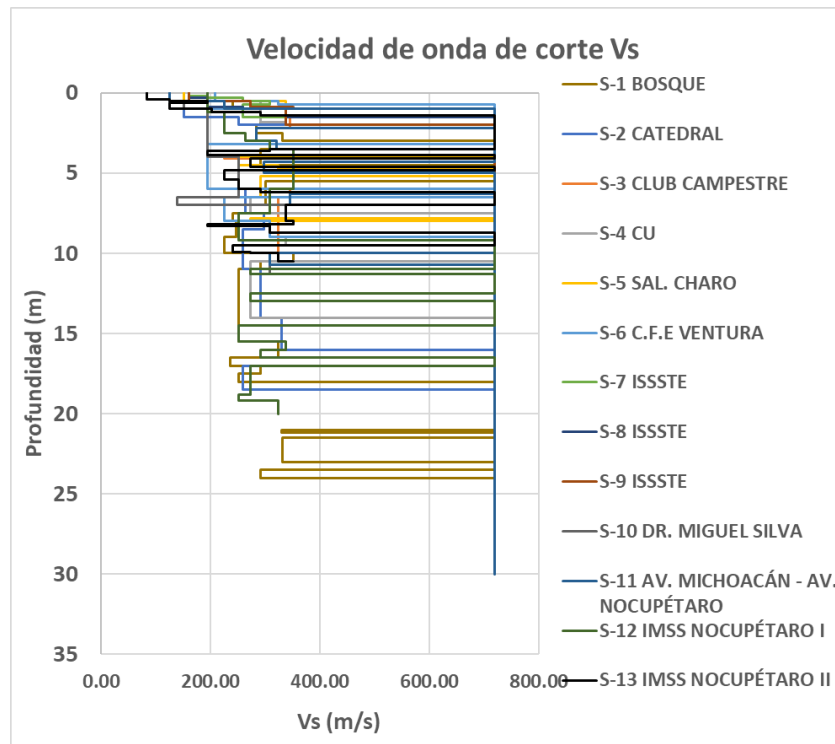


Figura 4.3.51 Perfil de velocidades de onda de corte (m/s) de todos los sondeos mixtos de Mier et al. (1968).

Estimada la velocidad de onda de corte de los diferentes estratos y sondeos de los estudios de mecánica de suelos, permite aplicar el método de análisis lineal para obtener la respuesta espectral considerando los efectos de sitio. En este trabajo se aplica el método equivalente lineal en el dominio de la frecuencia utilizado en el software SeismoSoil v.1.3 (Seed e Idris, 1970; Assimaki y Kausel, 2002). Dicho programa para este método requiere: el perfil estratigráfico; Velocidades de onda de corte en m/s; densidad en kg/cm^3 ; y amortiguamiento del suelo. Como los estudios de suelos, SIOBI (2012) y Mier et al. (1968) no reportan la densidad ni amortiguamiento del suelo, se siguieron las recomendaciones del manual del usuario del software en uso, que se muestran a continuación:

❖ Cálculo del amortiguamiento $\xi = 1/(2Q_s)$, donde $Q_s =$

- $0.06V_s$, cuando $V_s \leq 1000 \text{ m/s}$
- $0.04V_s$, cuando $1000 \text{ m/s} < V_s < 2000 \text{ m/s}$
- $0.16V_s$, cuando $V_s \geq 2000 \text{ m/s}$

❖ Densidad $\rho =$

- 1.6 g/cm^3 , cuando $V_s < 200 \text{ m/s}$
- 1.8 g/cm^3 , cuando $200 \text{ m/s} \leq V_s < 800 \text{ m/s}$
- 2.0 g/cm^3 , cuando $V_s \geq 800 \text{ m/s}$

Correlaciones obtenidas de Archuleta y Liu (2004) usadas en el programa.

Para las propiedades no lineales del suelo en la generación de las curvas $G/G_{\max}$ y de amortiguamiento se usó el modelo de Darendeli (2001) que está integrado en el programa SeismoSoil v1.3, el cual escoge valores por default para las fórmulas de Darendeli (2001), ecuaciones 4.3.13 – 4.3.14:

$$\begin{aligned}\gamma_r &= \left(\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3} \right) * \sigma_o^{\phi_4} \\ a &= \phi_5 \\ D_{\min} &= \left(\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8} \right) * \sigma_o^{\phi_9} * \left[1 + \phi_{10} * \ln(f) \right] \\ b &= \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N)\end{aligned}\tag{4.3.13}$$

Donde:

- γ_r , esfuerzo de referencia en %,
- a , coeficiente de curvatura,
- $D_{\min}$, relación de amortiguamiento del material de pequeña deformación,
- b , coeficiente de escalamiento,
- σ_o , es la presión media efectiva de confinamiento (atm),
- PI , Índice de plasticidad en %,
- OCR , 1.0 normalmente consolidado,
- N , número de ciclos (10),
- f , 1 Hz,
- $\Phi_1=0.0352$, $\Phi_2=0.0010$, $\Phi_3=0.3246$, $\Phi_4=0.3483$, $\Phi_5=0.9190$, $\Phi_6=0.8005$, $\Phi_7=0.0129$, $\Phi_8=-0.1069$, $\Phi_9=-0.2889$, $\Phi_{10}=0.2919$, $\Phi_{11}=0.6329$, y $\Phi_{12}=-0.0057$.

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

$$D_{\text{Masin } g} = c_1 D_{\text{Masin } g, a=1.0} + c_2 D_{\text{Masin } g, a=1.0}^2 + c_3 D_{\text{Masin } g, a=1.0}^3 (\%)$$

$$D_{\text{Masin } g, a=1.0} = \frac{100}{\pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln \left(\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_r} \right)}{\gamma^2} - 2 \right] (\%) \quad (4.3.14)$$

$$D = b * \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^{0.1} * D_{\text{Masin } g} + D_{\min}$$

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

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

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

Donde:

- $G/G_{\max}$, módulo de corte normalizado,
- γ_r , esfuerzo cortante en %,
- D , amortiguamiento de material escalado.

Una vez definidos todos los parámetros que el programa SeismoSoil v1.3 requiere, se ingresan los registros sísmicos de interés que para este caso se trata de una familia de 23 acelerogramas registrados en la estación INIRENA. Se selecciona esta estación por ser la que menores amplitudes ha registrado en los eventos sísmico, lo que indica ser un terreno firme.

El software genera las funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia. Con ello, se transfieren los 23 registros sísmicos de terreno firme a la superficie libre de los distribuidores viales del Tecnológico y de Mil Cumbres, y de las zonas de los sondeos de Mier et al. (1968).

En las figuras 4.3.52 y 4.3.53 se muestran los cocientes espectrales de todos los sondeos para las zonas de salida Salamanca y salida Mil Cumbres, respectivamente. La línea gruesa indica la media geométrica de todos los sondeos, el pico máximo en salida Salamanca está en una frecuencia de 4.29 Hz; su inverso, el período dominante del suelo es $T_s=0.22$ s (fig. 4.3.52). En la salida Mil Cumbres su frecuencia de vibrar es de 8.62 Hz y su período de 0.11 segundos (fig. 4.3.53). Estas frecuencias y períodos coinciden con los calculados utilizando los métodos descritos anteriormente.

La fig. 4.3.54 muestra los cocientes espectrales de las 13 zonas de la ciudad donde se realizaron SPT (Mier et al. (1968). Los picos indican las frecuencias dominantes de estos suelos.

Para los estudios de los distribuidores viales de la ciudad, las Figuras 4.3.55 y 4.3.56 comparan los espectros promedio obtenidos de dos maneras: (a) multiplicando los espectros de respuesta de la estación de INIRENA por la función de transferencia obtenida

con los sondeos del sitio y posteriormente promediando los espectros, y (b) promediando los espectros de respuesta de las señales sísmicas de la estación sísmica más cercana al distribuidor (Psicología para la salida a Salamanca y Luz Alou para la salida a Mil Cumbres).

El espectro transferido de suelo duro a superficie libre del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021), coincide con la forma espectral del promedio de todos los espectros de la estación de Psicología, con ordenadas un poco mayores (Fig. 4.3.55). Por su parte, el espectro en la superficie libre del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012), coincide en las ordenadas espectrales, pero no así en la forma espectral (Fig. 4.3.56). Debe señalarse que, aunque la estación sísmica Luz Alou es la más cercana al distribuidor vial de la salida a Mil Cumbres, esta se encuentra a una distancia de alrededor de 1.5 km medida en línea recta.

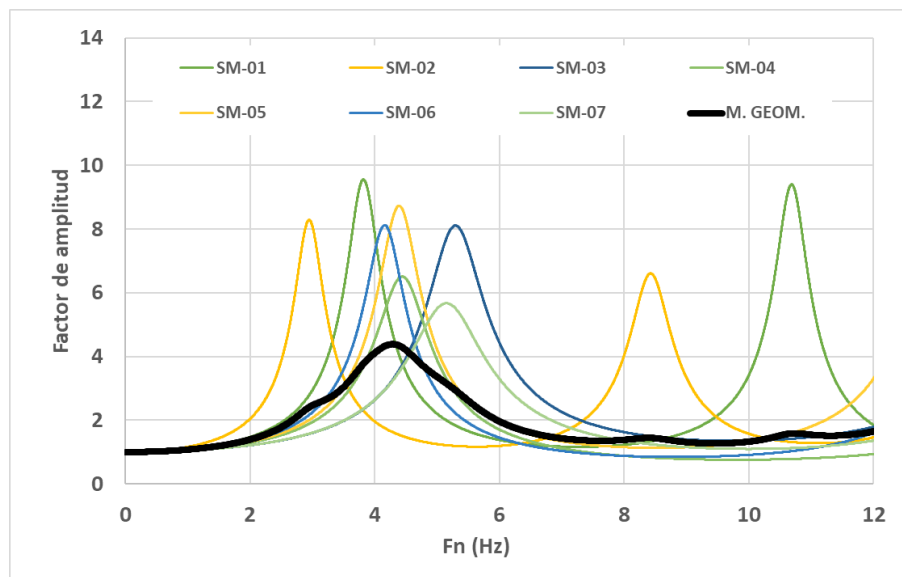


Figura 4.3.52 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021). La línea gruesa es la media geométrica. El pico máximo se encuentra a una frecuencia de 4.29 Hz.

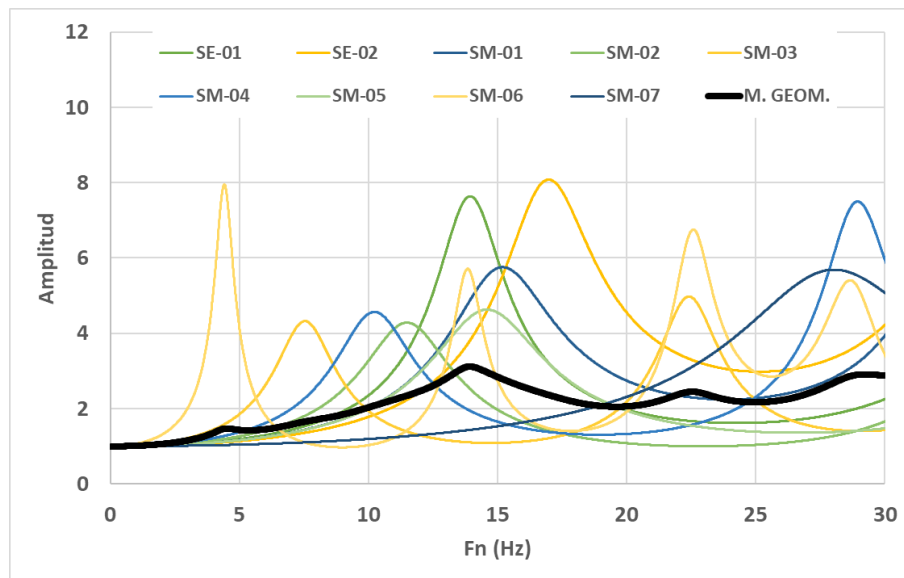


Figura 4.3.53 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012). La línea gruesa es la media geométrica. El pico máximo se encuentra a una frecuencia de 8.62 Hz.

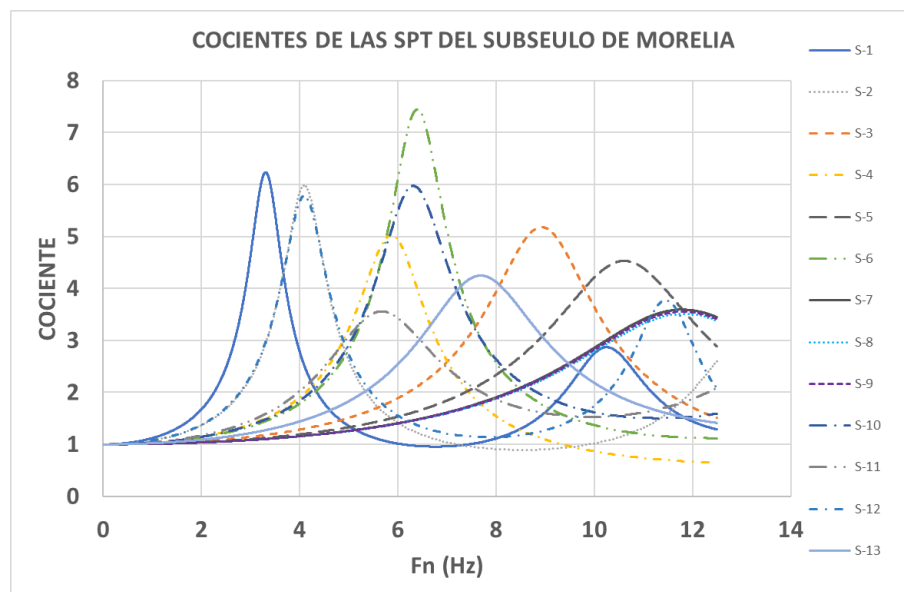


Figura 4.3.54 Cocientes espectrales de todos los sondeos mixtos de las diferentes zonas reportadas en Mier et al. (1968).

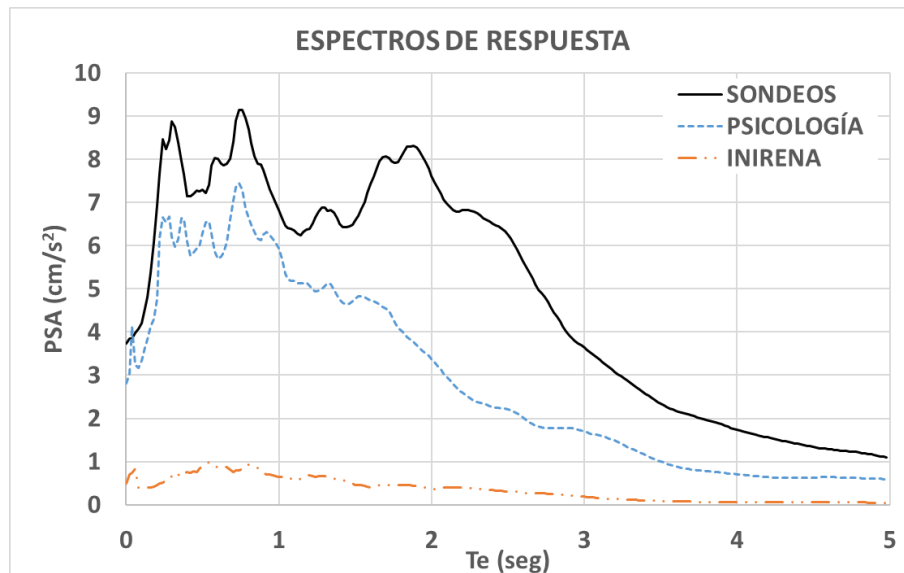


Figura 4.3.55 Espectros de respuesta promedio en superficie libre usando todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021) y espectros promedio de los registros de las estaciones de PSICOLOGÍA y de INIRENA (suelo firme).

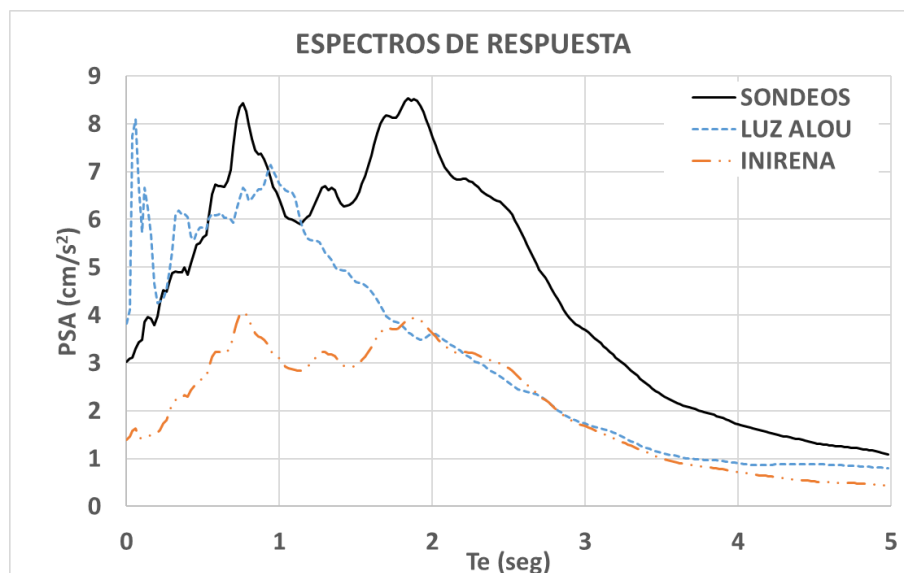


Figura 4.3.56 Espectros de respuesta promedio en superficie libre usando todos los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012) y espectros promedio de los registros de las estaciones LUZ ALOU e INIRENA (suelo firme).

Para calcular la velocidad de onda de corte del suelo a una profundidad de 30 metros (V_{s30}), se utilizó la ecuación 4.3.15 (Boore, 2004; usada también en el Código Internacional European Eurocode 8, EC-8, 2004). Estas se calcularon con las velocidades de onda de

corte de los diferentes sondeos en los estudios de mecánica de suelos de ISSGEO, 2021; SIOBI, 2012; y Mier et al. 1968.

Usando la ecuación 4.3.16, propuesta por Zhao y Hua Xu (2013), se correlaciona la velocidad de onda de corte del suelo a una profundidad de 30 metros (V_{s30}) con su correspondiente periodo de vibrar (T_{Vs30}). Las tablas 4.3.3 y 4.3.4 muestran el promedio (media), la media cuadrática (RMS) y la media geométrica (M_{Geom}) de los periodos obtenidos con esta ecuación.

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (4.3.15)$$

$$T_{Vs30} = \frac{120}{V_{s30}} \quad (4.3.16)$$

Tabla 4.3.3 *Períodos de vibrar del suelo (T_{Vs30}) de los diferentes sondeos del distribuidor vial Tecnológico (ISSGEO, 2021).*

DIST. VIAL SAL. SALAMANCA					
SONDEO	Vs 30 (m/s)	T_{Vs30} (seg)	MEDIA T_{Vs30} (seg)	RMS T_{Vs30} (seg)	M. GEOM. T_{Vs30} (seg)
SM-01	441.84	0.27	0.19	0.21	0.16
SM-02	388.36	0.31			
SM-03	679.41	0.18			
SM-04	668.08	0.18			
SM-05	572.29	0.21			
SM-06	3217.02	0.04			
SM-07	756.62	0.16			

Tabla 4.3.4 *Períodos de vibrar del suelo (T_{Vs30}) de los diferentes sondeos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBI, 2012).*

DIST. VIAL SAL. MIL CUMBRES					
SONDEO	V_s 30 (m/s)	T_{Vs30} (seg)	MEDIA	RMS T_{Vs30}	M. GEOM.
			T_{Vs30} (seg)	(seg)	T_{Vs30} (seg)
SE-01	1410.05	0.09	0.11	0.12	0.10
SE-02	1484.6	0.08			
SM-01	1462.24	0.08			
SM-02	1421.05	0.08			
SM-03	815.86	0.15			
SM-04	1043.11	0.12			
SM-05	1510.9	0.08			
SM-06	506.48	0.24			
SM-07	2680.85	0.04			

Tabla 4.3.5 *Períodos de vibrar del suelo (T_{Vs30}) de los diferentes sondeos realizados por Mier et al. (1968).*

SONDEO	UBICACIÓN LUGAR	ESTACIÓN CERCANA	T_{Vs30} (seg)
S-1	BOSQUE	MEDICINA	0.30
S-2	CATEDRAL	SAN NICOLAS	0.24
S-3	CLUB CAMPESTRE	LUZ ALOU	0.10
S-4	CU	CU	0.15
S-5	SAL. CHARO	VETERINARIA	0.10
S-6	C.F.E VENTURA	MEDICINA	0.17
S-7	ISSSTE	PSICOLOGÍA	0.10
S-8	ISSSTE II	PSICOLOGÍA	0.10
S-9	ISSSTE III	PSICOLOGÍA	0.10
S-10	DR. MIGUEL SILVA	PSICOLOGÍA	0.19
S-11	AV. MICH - AV. NOCU	SAN NICOLAS	0.21
S-12	IMSS I	SAN NICOLAS	0.25
S-13	IMSS II	SAN NICOLAS	0.15

Usando esta técnica de Zhao y Hua Xu (2013) los períodos coinciden razonablemente con los picos máximos que se obtienen: usando las técnicas de cocientes espectrales de espectros de respuesta y cocientes H/V.

Medición de vibración ambiental

Para verificar el periodo que se presenta en la tabla 4.3.4 del distribuidor vial de Salida Mil Cumbres, se realizó también una medición localizada en el sondeo SM-01 (Fig. 4.3.29) del

estudio de mecánica de suelos de SIObl (2012). Se registraron diez minutos de vibración ambiental en las componentes Norte - Sur, Este - Oeste y Vertical. Se utilizó la técnica de cocientes espectrales H/V descrita anteriormente, y se llegaron a resultados similares a los mostrados en la tabla 4.3.4 y en la fig. 4.3.36. En la fig. 4.3.57 se muestra la relación H/V de la vibración ambiental y la obtenida con los sondeos de mecánica de suelos de SIObl (2012), ambos cocientes presentan el pico máximo en frecuencias cercanas a 9 Hz. La medición de vibración ambiental corrobora los valores obtenidos con las velocidades de ondas utilizadas en el software SeismoSoil.

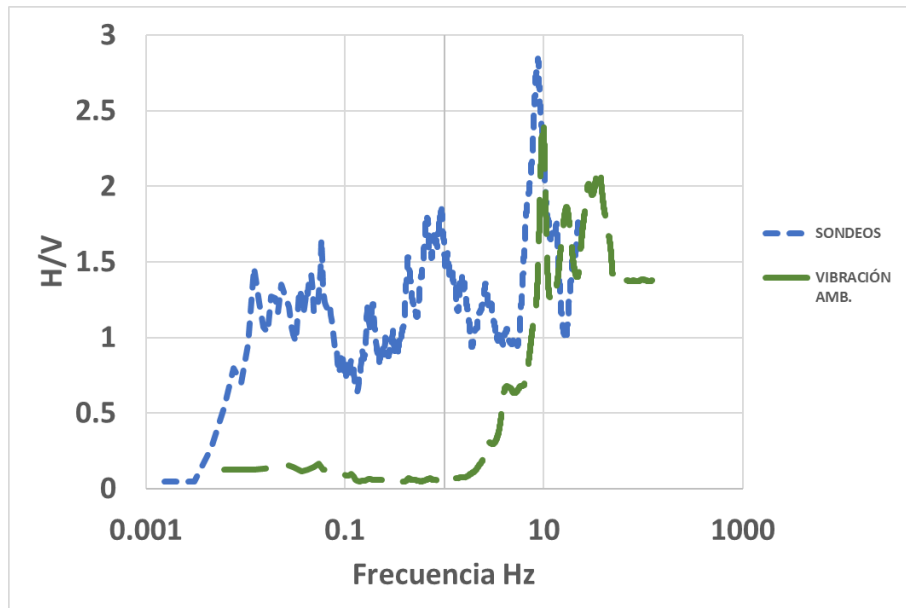


Figura 4.3.57
Relación H/V de los sondeos mixtos del distribuidor vial Mil Cumbres (SIOBl, 2012), y de la medición de vibración ambiental.

4.4 Períodos fundamentales del suelo en Morelia

Con los espectros de respuesta, de Fourier, y con los cocientes espectrales, se obtienen los periodos y frecuencias fundamentales de vibrar del suelo para las once zonas de la RSN en Morelia.

La tabla 4.4.1 muestra los periodos y frecuencias fundamentales obtenidos. La estación CMIC cuenta con el periodo más alto (T_s en el intervalo de 0.36-0.42 s); por su parte INIRENA, tiene el período más bajo ($T_s=0.06$ s). El periodo calculado usando cocientes espectrales, cocientes H/V, cocientes de las pruebas SPT, y los períodos de velocidad de onda de corte a 30 m, concuerdan satisfactoriamente. En la estación PEDREGAL, se usaron únicamente seis registros sísmicos.

La figura 4.4.1 muestra el mapa de interpolación de isoperiodos de vibrar del suelo de la ciudad de Morelia utilizando los valores obtenidos con los cocientes H/V.

Tabla 4.4.1 *Períodos de vibrar del suelo (T_s) y frecuencias fundamentales (F_n) de los diferentes suelos de las estaciones sísmicas de la RSN.*

Estación	Te (seg)				Fn (Hz)			
	Cociente E. R.	Cociente H/V	SPT	V _{S30}	Cociente E. R.	Cociente H/V	SPT	V _{S30}
CMIC	0.36	0.43	-	-	2.78	2.32	-	-
CU	0.14	0.16	-	-	7.14	6.11	-	-
INIRENA	0.06	0.06	-	-	16.67	17.92	-	-
LUZ ALOU	0.08	0.11	0.08	0.11	12.50	9.16	12.50	9.09
MEDICINA	0.14	0.12	-	-	7.14	8.18	-	-
PEDREGAL*	0.25	0.26	-	-	4.00	3.90	-	-
PSICOLOGÍA	0.22	0.23	0.23	0.21	4.55	4.43	4.29	4.76
SAN NICOLÁS	0.22	0.21	-	-	4.55	4.70	-	-
SCT	0.14	0.16	-	-	7.14	6.22	-	-
UVAQ	0.22	0.20	-	-	4.55	5.08	-	-
VETERINARIA	0.22	0.23	-	-	4.55	4.43	-	-

*Estación con ocho registros sísmicos

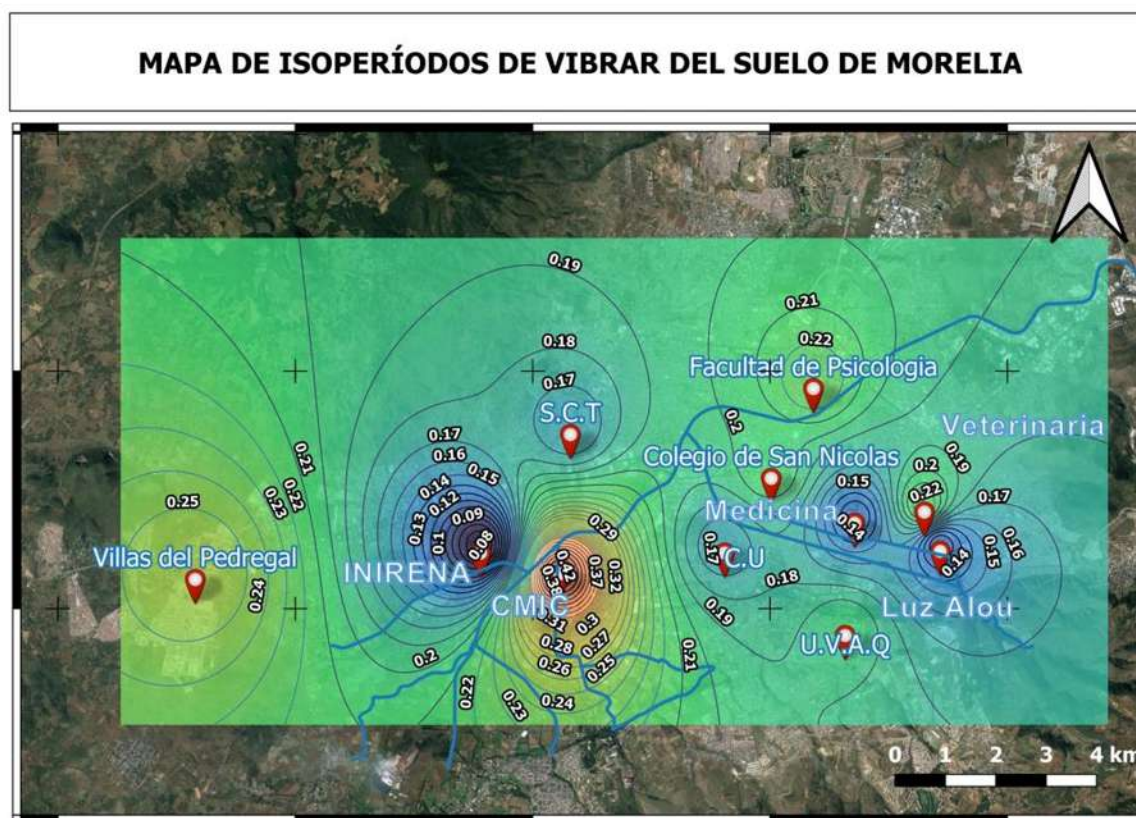


Figura 4.4.1 *Mapa de isoperíodos de vibrar del suelo (T_s) de los diferentes suelos de las estaciones sísmicas de la RSN.*

Como antecedentes de zonificación sísmica de Morelia, Jara et al. (1994) efectuaron 84 mediciones de vibración ambiental en diferentes zonas de la ciudad con la finalidad de obtener los períodos de vibrar del suelo de las diferentes zonas de Morelia y una posible

zonificación del suelo. En la tabla 4.4.2 se muestran los períodos calculados por Jara et al. (1994) y en la fig. 4.4.2 el contorno de Morelia con las zonas estudiadas.

En las figs. 4.4.3 y 4.4.4, se muestra la curva de isoperiodos y la zonificación sísmica de Morelia respectivamente, reportadas en Jara et al. (1994). Como ejercicio de comparación entre los periodos obtenidos en este trabajo y los reportados en Jara et al. (1994), se hizo un mapa de calor de los isoperiodos de la tabla 4.4.2 en el software QGIS (fig. 4.4.5). En algunas zonas de Morelia los periodos coinciden, como lo son las zonas de las estaciones de CMIC (0.42 s en ambos trabajos), Psicología, UVAQ y Veterinaria (0.22 – 0.30 s en ambos trabajos), pero en las demás estaciones existe una gran diferencia, que puede deberse a la diferencia entre utilizar registros sísmicos y mediciones de vibración ambiental. Podría también haber influido la consolidación de los suelos entre 1994 y la época actual.

Tabla 4.4.2 *Períodos de vibrar del suelo (T_s) de las mediciones de vibración ambiental (Jara et al. 1994).*

No.	T (seg)	No.	T (seg)	No.	T (seg)	No.	T (seg)
1	0.33	22	0.44	43	0.30	64	0.38
2	0.29	23	0.48	44	---	65	0.39
3	0.33	24	0.54	45	0.28	66	0.53
4	0.40	25	0.48	46	0.42	67	0.34
5	0.33	26	0.27	47	0.32	68	0.38
6	0.30	27	0.28	48	0.42	69	0.32
7	0.43	28	0.31	49	0.31	70	0.24
8	0.33	29	0.33	50	0.35	71	0.48
9	0.29	30	0.28	51	0.37	72	0.48
10	0.43	31	0.29	52	0.35	73	0.56
11	0.38	32	---	53	0.43	74	0.42
12	0.44	33	0.27	54	0.38	75	0.28
13	0.43	34	0.34	55	0.39	76	0.30
14	0.38	35	0.33	56	0.35	77	0.36
15	0.29	36	0.44	57	0.39	78	0.32
16	0.54	37	0.36	58	0.38	79	0.35
17	0.49	38	0.51	59	0.46	80	0.38
18	0.28	39	0.50	60	0.35	81	0.30
19	0.45	40	0.39	61	---	82	0.58
20	0.27	41	0.37	62	0.29	83	0.41
21	0.48	42	0.38	63	0.37	84	0.31

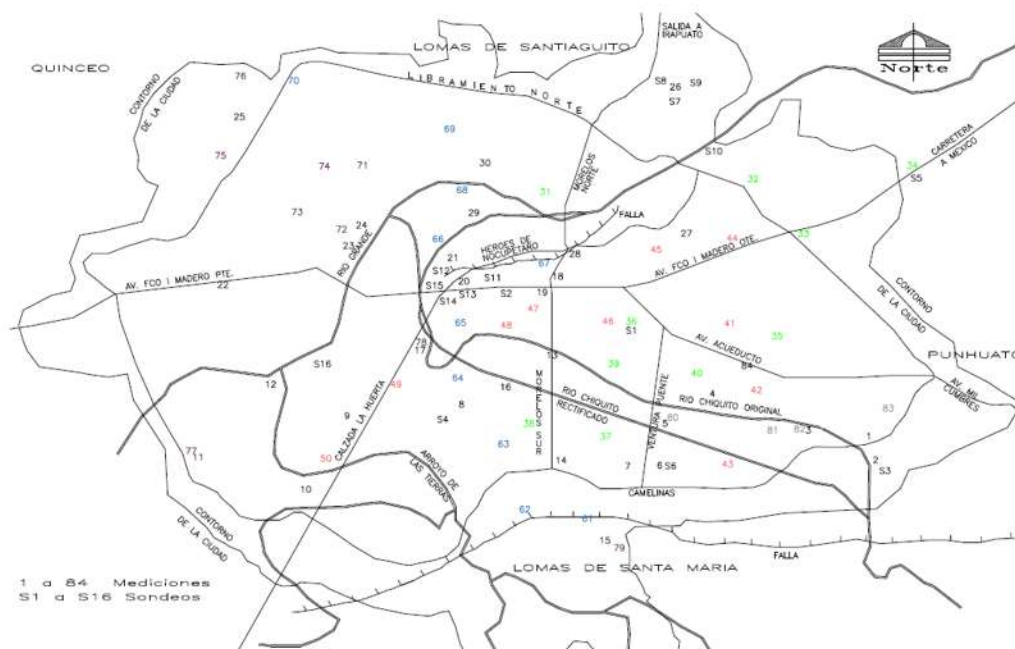


Figura 4.4.2 Localización de mediciones y sondeos reportados en Jara et al. (1994).

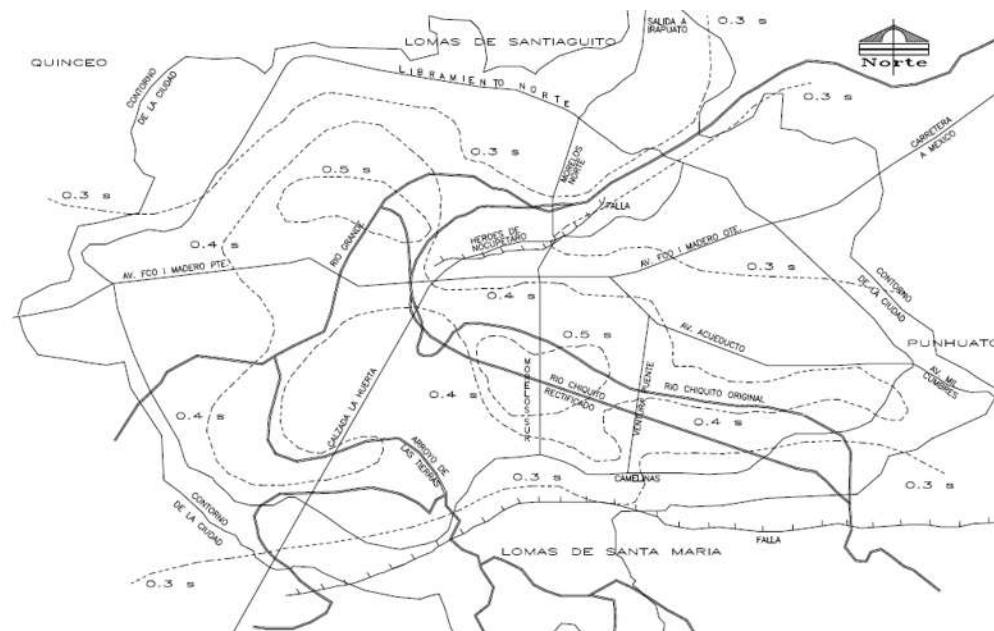


Figura 4.4.3 Curvas de isoperíodos reportadas en Jara et al. (1994).

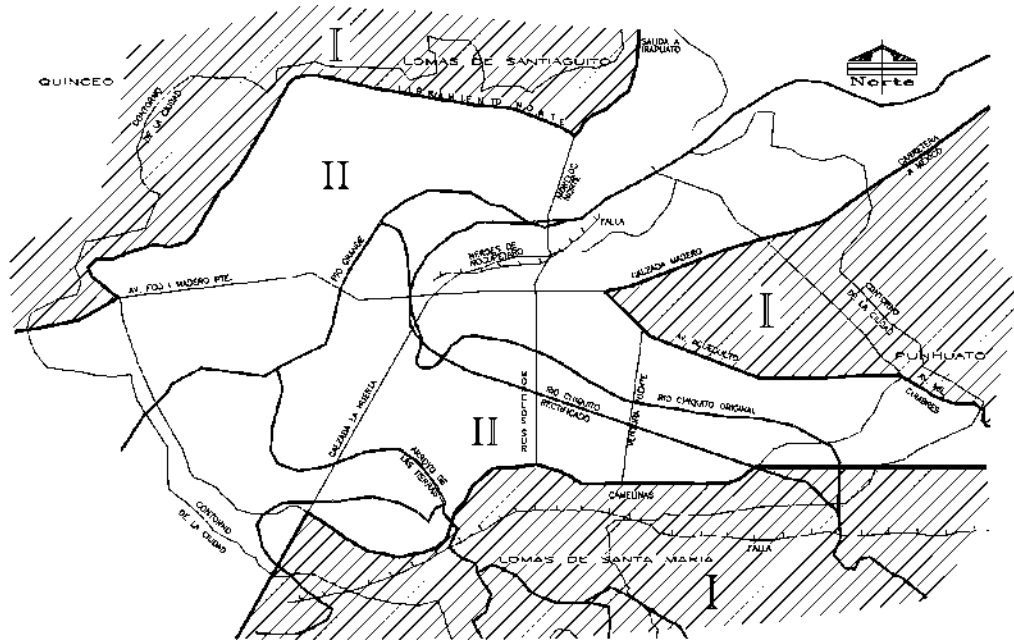


Figura 4.4.4 Zonificación sísmica reportada en Jara et al. (1994).



Figura 4.4.5 Curvas de isoperíodos reportadas. Modificada de Jara et al. (1994).

Con base en los cocientes espectrales H/V de los sondeos reportados en Mier et al. (1968), también se calcularon los periodos del suelo en la ubicación de dichos sondeos (tabla 4.4.2 y fig. 4.4.5).

Gracias a que los sondeos se realizaron cerca de diferentes estaciones de la RSN, se puede hacer una comparación de los periodos calculados a partir de los registros sísmicos de la red con los obtenidos usando los sondeos.

Tabla 4.4.2 *Períodos de vibrar del suelo (T_s) calculados con base en los sondeos de Mier et al. (1968).*

SONDEO	UBICACIÓN LUGAR	ESTACIÓN CERCANA	Te (seg)
S-1	BOSQUE	MEDICINA	0.30
S-2	CATEDRAL	SAN NICOLAS	0.24
S-3	CLUB CAMPESTRE	LUZ ALOU	0.11
S-4	CU	CU	0.17
S-5	SAL. CHARO	VETERINARIA	0.09
S-6	C.F.E VENTURA	MEDICINA	0.16
S-7	ISSSTE	PSICOLOGÍA	0.08
S-8	ISSSTE II	PSICOLOGÍA	0.08
S-9	ISSSTE III	PSICOLOGÍA	0.08
S-10	DR. MIGUEL SILVA	PSICOLOGÍA	0.16
S-11	AV. MICH - AV. NOCU	SAN NICOLAS	0.18
S-12	IMSS I	SAN NICOLAS	0.24
S-13	IMSS II	SAN NICOLAS	0.13

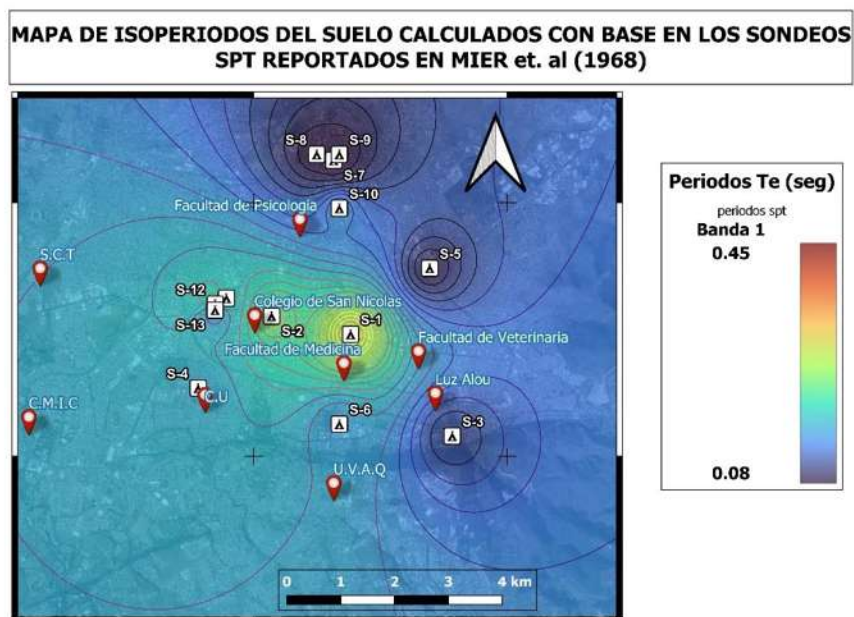


Figura 4.4.5 *Curvas de isoperíodos calculados con base en los sondeos reportados en Mier et al. (1968).*

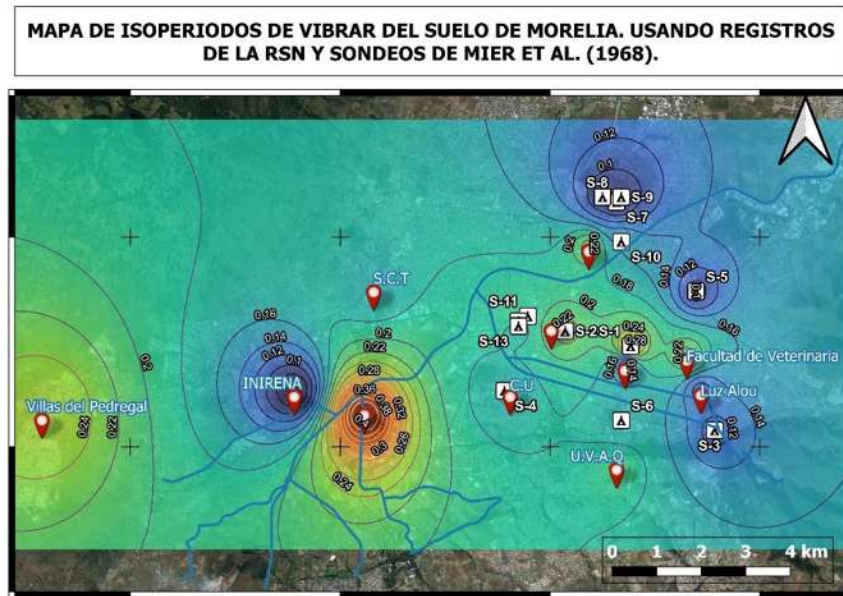


Figura 4.4.6 Curvas de isoperíodos calculados con base en los sondeos reportados en Mier et al. (1968).

En términos generales los periodos de vibrar de las diferentes zonas de la ciudad coinciden con todas las metodologías utilizadas. No obstante, debe mencionarse que, en algunos casos, se encontraron diferencias apreciables de los perfiles estratigráficos reportados en los sondeos de las pruebas SPT, a pesar de haberse realizado a escasos metros de separación uno del otro. Esto muestra cambios importantes de las características de los suelos dentro de la ciudad, que probablemente justifica realizar una nano-zonificación sísmica. No obstante, debe también observarse que el intervalo de variación de los periodos obtenidos no es muy grande en las diferentes zonas de la ciudad.

En la figura 4.4.6 se muestra el mapa de todos los isoperíodos calculados para el suelo de Morelia con las distintas metodologías usadas en este capítulo, se combina el uso de la RSN y los sondeos reportados en Mier et al. (1968). Este mapa de curva de isoperíodos es la base para una zonificación sísmica en la ciudad: donde la zona más desfavorable es la que rodea la estación a la estación CMIC (zona de la ciudad con los periodos T_s más altos).

5. Evaluación del peligro sísmico de Morelia.

Para la evaluación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, se debe seguir la metodología descrita en el capítulo 1, sección 1.2. El proceso se inicia al identificar las fuentes sismogénicas que afecten a Morelia y determinar la distancia epicentral que exista entre las fuentes y la ciudad de Morelia. Los catálogos sísmicos proporcionan la magnitud y frecuencia de los sismos que ocurren en dichas fuentes, para determinar los procesos de ocurrencia. Posteriormente, se eligen leyes de atenuación de cada fuente que proporcionan la esperanza de intensidad dada una magnitud y distancia epicentral. En el enfoque probabilista, se establecen densidades de probabilidad para cada variable aleatoria y, haciendo uso del teorema total de probabilidad, se estima la probabilidad de exceder una intensidad (aceleración) en un determinado tiempo (vida útil).

Con ayuda del software R-CRISIS V.20.3.0 (programa para la evaluación probabilística de peligro sísmico (EPPS)) se evaluó el peligro sísmico de la ciudad de Morelia. Este software sigue la metodología mencionada en la sección 1.2.

5.1. Identificación y localización de fuentes sismogénicas

Se deben seleccionar las fuentes sismogénicas del país que tengan impacto en Morelia; existe una recomendación general de tomar en cuenta fuentes sísmicas que puedan ocasionar temblores a un radio de 500 km del sitio en estudio. A distancias mayores, las intensidades sísmicas esperadas son muy bajas para contribuir de forma relevante al peligro sísmico del lugar.

Como ya se ha mencionado anteriormente las fuentes que impactan a la ciudad de Morelia son: fuente de subducción, donde se divide el proceso de ocurrencia para temblores con magnitud menor a 7 (fig. 5.1.1), y para los temblores característicos con magnitud mayor a 7 (fig. 5.1.2); fuentes de profundidad intermedia (fig. 5.1.3); fuentes superficiales del continente y fallas superficiales locales (fig. 5.1.4). Las coordenadas de cada una de las zonas generadoras de sismos fueron seleccionadas utilizando la versión más reciente del Manual de Diseño de Obras Civiles (MOC) del diseño por sismo, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015).

En las figs. 5.1.1 – 5.1.4 también se muestra un círculo con radio de 500 km, marcando así la zona de influencia de temblores con impacto en Morelia.



Figura 5.1.1 Zonas de subducción. Temblores $M_w < 7$. Circulo denota el radio de 500 km de la ciudad de Morelia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.



Figura 5.1.2 Zonas de subducción. Temblores característicos $M_w > 7$. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.



Figura 5.1.3 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.

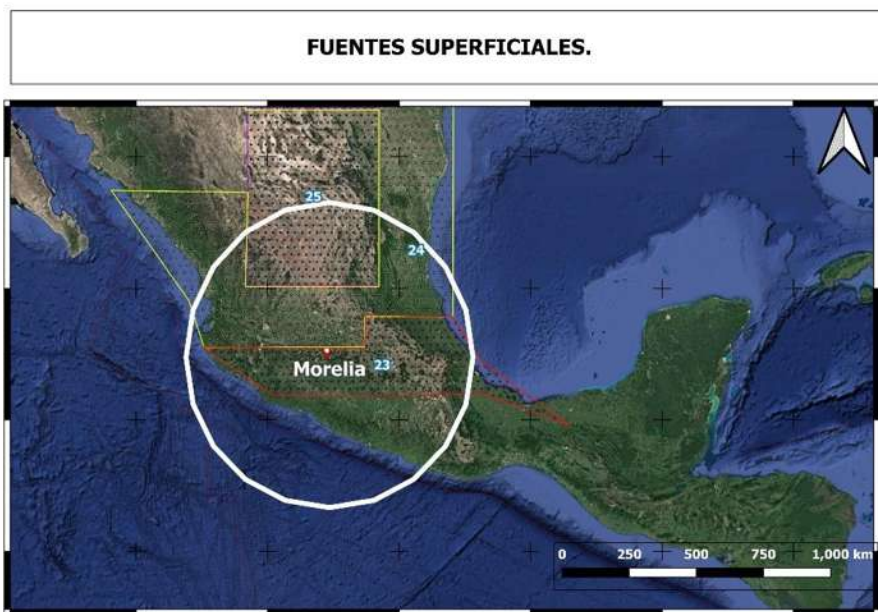


Figura 5.1.4 Zonas de fallas superficiales. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.



Figura 5.1.5 Zonas de profundidad intermedia. La numeración de las fuentes se refiere a la tabla 5.1.1.

Tabla 5.1.1 Fuentes sismogénicas con impacto en Morelia mostradas en las figs. 5.1.1 – 5.1.5.

No.	Nombre	Fuente
1	Jalisco nuevo	Subducción Mw < 7
2	Guerrero - Michoacán nuevo	Subducción Mw < 7
3	Oaxaca nuevo	Subducción Mw < 7
4	Chiapas nuevo	Subducción Mw < 7
5	Jalisco característicos	Subducción Mw > 7
6	Brecha de Colima característicos	Subducción Mw > 7
7	Colima 1 característicos	Subducción Mw > 7
8	Michoacán característicos	Subducción Mw > 7
9	Petatlán característicos	Subducción Mw > 7
10	Guerrero característicos	Subducción Mw > 7
11	San Marcos característicos	Subducción Mw > 7
12	Ometepec característicos	Subducción Mw > 7
13	Oaxaca Oeste característicos	Subducción Mw > 7
14	Oaxaca 2 característicos	Subducción Mw > 7
15	Oaxaca 1 característicos	Subducción Mw > 7
16	Oaxaca Este característicos	Subducción Mw > 7
17	Becha de Tehuantepec característicos	Subducción Mw > 7
18	Chiapas característicos	Subducción Mw > 7
19	Profundidad intermedia Oeste	Intraplaca
20	Profundidad intermedia Centro	Intraplaca
21	Profundidad intermedia Este	Intraplaca
22	Profundidos Chiapas	Intraplaca
23	Eje Volcánico Trans-mexicano	Superficiales
24	Sismicidad Difusa I	Superficiales
25	Cuenca de Burgos	Superficiales
26	Falla sísmica La Paloma	Locales
27	Falla sísmica La Colina	Locales

Como se observa, las fuentes sísmicas se dividen en subzonas para la mejor evaluación del peligro sísmico. La división permite determinar más adecuadamente la distancia de cada subzona al sitio en estudio. Por su parte, el proceso de ocurrencia de la fuente sísmica de subducción requiere que se consideren por separado los temblores con magnitud menor que 7.0 de aquellos que tienen magnitudes mayores. En el primer caso el proceso de ocurrencia se modela como un proceso de Poisson (carente de memoria) y en el segundo caso debe reconocerse la dependencia de la magnitud con el tiempo transcurrido sin temblar (proceso del temblor característico). Para los eventos característicos, la zona de subducción se ha dividido en 14 subzonas debido a que se ha encontrado que cada una de ellas se mueve en forma independiente (Singh et al., 1983).

5.2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas

De catálogos sísmicos se obtienen los parámetros de sismicidad, estos parámetros dependen de la ocurrencia de los temblores que pueden ser gobernados por el modelo Gutenberg-Richter; o como temblores característicos, en el caso de los sismos de subducción con magnitud mayor a 7.

Toda la actividad sísmica fue consultada en los catálogos sísmicos del Servicio Sismológico Nacional (México, 2022) y en el catálogo de sismos del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (U.S.G.S., 2022).

Para las fuentes gobernadas por el modelo de Gutenberg-Richter, se requiere determinar los siguientes parámetros:

- **Magnitud umbral M_0 .**
Esta magnitud se suele determinar como el valor a partir del cual se consideran a los catálogos sísmicos completos. A fines del siglo XIX y principios del siglo XX se tiene registro instrumental de actividad por las bases de datos de catálogos sísmicos. Sin embargo, por lo escaso de la instrumentación sísmica falta un número considerable de temblores pequeños. A partir de los años 60's se empezó a incrementar la instrumentación sísmica en el mundo haciendo más confiable la información de los catálogos. En este estudio, se consideró M_0 en el intervalo de 4 a 4.5, dependiendo de la fuente sísmica.
- **Tasa de ocurrencia anual, λ_0 (1/año).**
Es el número de temblores de magnitud M_0 o mayor registrado en una fuente sísmica, dividido entre el período en años transcurrido que se considera en el catálogo sísmico.
- **Esperanza del valor β .**
Denota la pendiente de la recta inicial del modelo de Gutenberg-Richter.
- **Coeficiente de variación, C. V.**
Coeficiente de variación en el proceso de ocurrencia descrito por el modelo de Gutenberg-Richter.

- Magnitud máxima esperada, M_u .
Magnitud máxima que puede dar origen la fuente sísmica. Depende principalmente del área de ruptura de la fuente sísmica y de la longitud de la falla. Para temblores de subducción con el modelo de Gutenberg-Richter, $M_u = 7$.
- Rango de error, ε .
Depende de la incertidumbre de M_u .

Para las fuentes sísmicas de temblores característicos, el estudio de los catálogos sísmicos muestra que el proceso tiene memoria. Jara y Rosenblueth (1988) propusieron la expresión 1.8 que es utilizada en este trabajo para definir el proceso de ocurrencia de este tipo de sismos. Los parámetros necesarios son los siguientes:

- Valor de la mediana del tiempo (en años) transcurrido entre temblores característicos, $Med(T)$ (años).
Al haber muy poco historial de este tipo de temblores en México, este valor es obtenido con base en catálogos sísmicos de diferentes fuentes de temblores característicos alrededor del mundo, como en Jara y Rosenblueth (1988). En este trabajo se utilizaron los mismos valores que en CFE (2015).
- Desviación estándar de la magnitud de los temblores característicos, σ_M .
Se sigue el mismo razonamiento que el parámetro anterior; queda definido con base en el estudio estadístico de muchas fuentes similares en todo el mundo. Igualmente, se usa el mismo valor que en el estudio de CFE (2015), que es 0.27 para todas las fuentes de temblor característico.
- Magnitud mínima de un temblor característico, M_0 .
Es la magnitud donde inicia el proceso de temblor característico. Como se muestra en la fig. 1.2.3, esta magnitud es de 7.
- Magnitud máxima de un temblor característico, M_u .
Es la magnitud máxima esperada en las fuentes sísmicas de subducción. Para México se asume de 8.4.
- Tiempo (en años) transcurrido desde el último temblor característico, T_{00} .

En las figs. 5.2.1 – 5.2.5 se muestran la ubicación epicentral de cada sismo que fue utilizado en este trabajo para definir los parámetros mencionados anteriormente, el período de búsqueda que se consideró fue de 1900 a septiembre de 2022 de los catálogos: México (2022) y U.S (2022).





Figura 5.2.3 Epicentros de temblores intraplaca de $M_w > 4$ de 1900 – 2022.



Figura 5.2.4 Epicentros de temblores superficiales de $M_w > 4$ de 1975 – 2022.

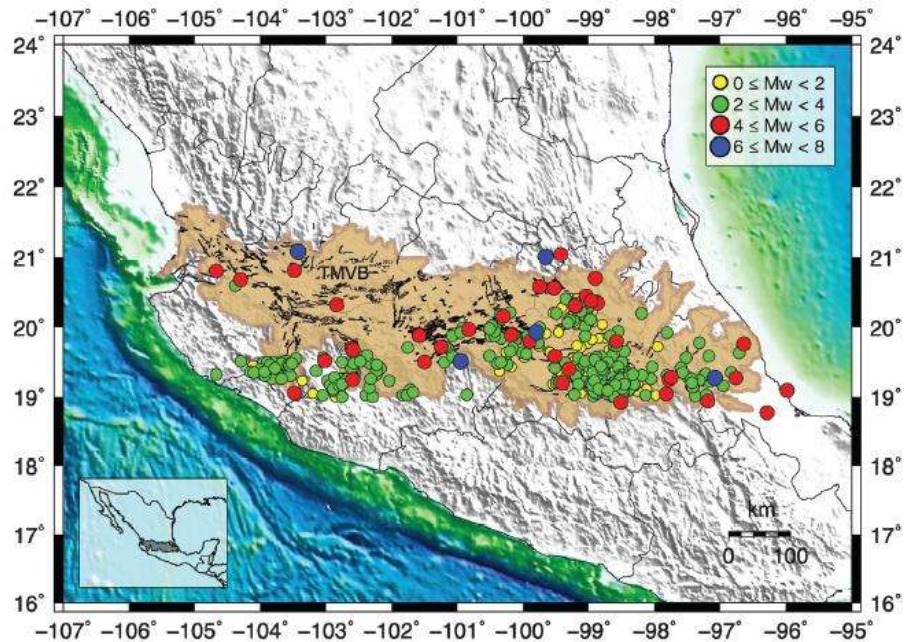


Figura 5.2.5 Epicentros de temblores superficiales del EVTM de 1858 – 2012 reportados por Bayona, Suárez y Ordaz (2017). Figura tomada de Bayona, Suárez y Ordaz (2017).

Tabla 5.2.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de Gutenberg y Richter.

No.	Nombre	M_0	λ_0 (1/año)	$E(\beta)$	C. V.	$E(\mu)$	ϵ (+/-)
1	Jalisco nuevo	4.50	2.102	1.731	0.063	7.0	0.0
2	Guerrero - Michoacán nuevo	4.50	5.456	1.907	0.071	7.00	0.00
3	Oaxaca nuevo	4.50	6.836	2.089	0.073	7.00	0.00
4	Chiapas nuevo	4.50	9.000	2.893	0.056	7.00	0.00
19	Profundidad intermedia Oeste	4.50	2.118	1.961	0.047	7.90	0.20
20	Profundidad intermedia Centro	4.50	2.668	1.616	0.067	8.10	0.20
21	Profundidad intermedia Este	4.50	3.966	1.988	0.096	7.80	0.20
22	Profundidos Chiapas	4.50	3.224	1.488	0.108	7.50	0.30
23	Eje Volcánico Trans-mexicano	4.00	0.750	3.333	0.170	7.60	0.30
24	Sismicidad Difusa I	4.00	1.790	3.742	0.053	5.60	0.00
25	Cuenca de Burgos	4.00	1.960	2.299	0.025	5.60	0.00
26	Falla sísmica La Paloma	4.00	0.001	2.300	0.025	6.40	0.30
27	Falla sísmica La Colina	4.00	0.001	2.300	0.025	5.80	0.30

Tabla 5.2.2 *Parámetros de sismicidad de las fuentes gobernadas por el modelo de temblores característicos.*

No.	Nombre	Med(T) (años)	σ_M	M_0	M_u	T_{00}
5	Jalisco característicos	17	0.27	7	8.4	87.51
6	Brecha de Colima característicos	64	0.27	7	8.4	19.29
7	Colima 1 característicos	46	0.27	7	8.4	0.08
8	Michoacán característicos	22	0.27	7	8.4	21.77
9	Petatlán característicos	48	0.27	7	8.4	8.07
10	Guerrero característicos	35	0.27	7	8.4	112.86
11	San Marcos característicos	82	0.27	7	8.4	0.67
12	Ometepec característicos	23	0.27	7	8.4	10.15
13	Oaxaca Oeste característicos	84	0.27	7	8.4	4.21
14	Oaxaca 2 característicos	63	0.27	7	8.4	93.62
15	Oaxaca 1 característicos	32	0.27	7	8.4	22.60
16	Oaxaca Este característicos	26	0.27	7	8.4	1.86
17	Becha de Tehuantepec característicos	70	0.27	7	8.4	108.16
18	Chiapas característicos	23	0.27	7	8.4	9.51

Tabla 5.2.3 *Parámetros de sismicidad de las fuentes superficiales locales.*

FALLA	LONGITUD (KM)	TIPO DE FALLA	RELACIÓN DE MAGNITUD (KRAMER, 1996)	σ_{Mw}	$E Mw $
LA PALOMA	14	NORMAL	$Mw = 4.86 + 1.32 \log L$	0.34	6.4
LA COLINA	4.81	NORMAL	$Mw = 4.86 + 1.32 \log L$	0.34	5.8

Los parámetros mostrados en las tablas 5.2.1 y 5.2.2 se calcularon con los sismos mostrados en las figs. 5.2.1 – 5.2.5. Como se mencionó anteriormente, algunos valores se obtuvieron de CFE (2015), y para el caso de los parámetros del EVTM, se utilizaron los valores reportados en Bayona, Suárez y Ordaz (2017).

Para los sismos de fuentes superficiales (fig. 5.2.5) se toma el periodo de tiempo de 1975 – 2022, porque en 1975 se registraron los primeros temblores de estas fuentes en los catálogos utilizados en este trabajo.

La esperanza de magnitud para las fallas locales de la ciudad de Morelia se calculó con la expresión mostrada en la tabla 5.2.3 (Kramer, 1996). Esta ecuación relaciona la magnitud máxima esperada en una fuente sísmica local con la longitud de la falla. La longitud mostrada en la tabla corresponde a lo reportado en Garduño-Monroy et al. (2001). El período de recurrencia de temblores en las fallas potencialmente sísmicas de Morelia se estima en el intervalo de 600 a 5000 años (Garduño-Monroy et al., 2001; Suter, 2016). En este trabajo se asumió un período de recurrencia de 1000 años para las dos fallas locales de Morelia.

Todos estos parámetros fueron capturados en el programa R-CRISIS (figs. 5.2.6 y 5.2.7). Se muestran los valores para una fuente gobernada por el modelo de Gutenberg y Richter, y en el segundo caso para un modelo de temblor característico.

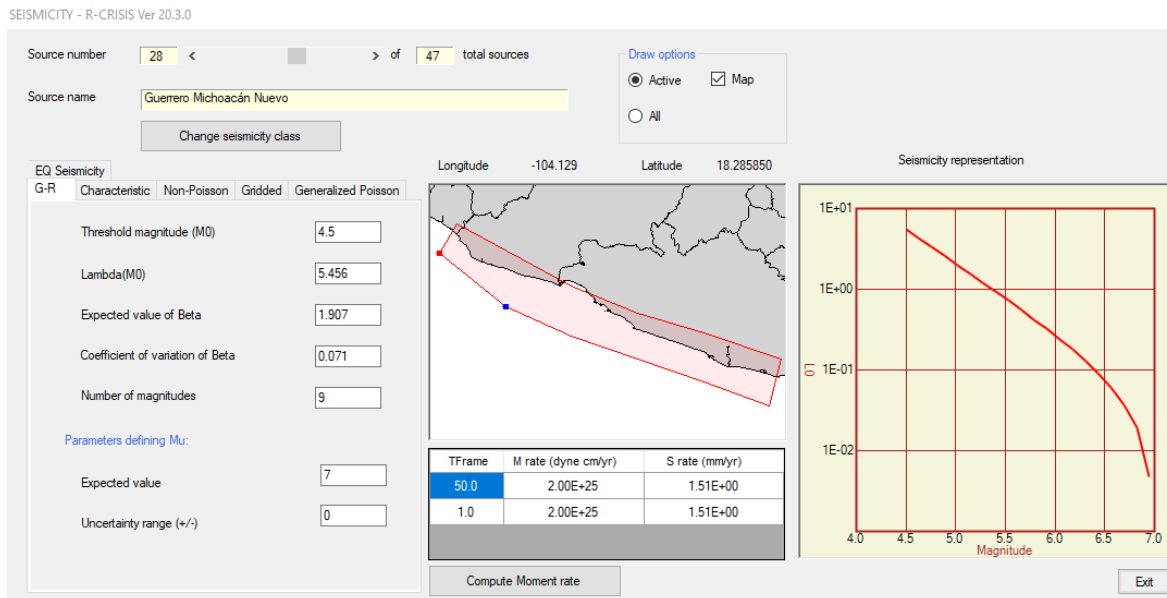


Figura 5.2.6 Modelo de la fuente sísmica de subducción Michoacán-Guerrero. Proceso de Gutenberg y Richter en el software R-CRISIS.

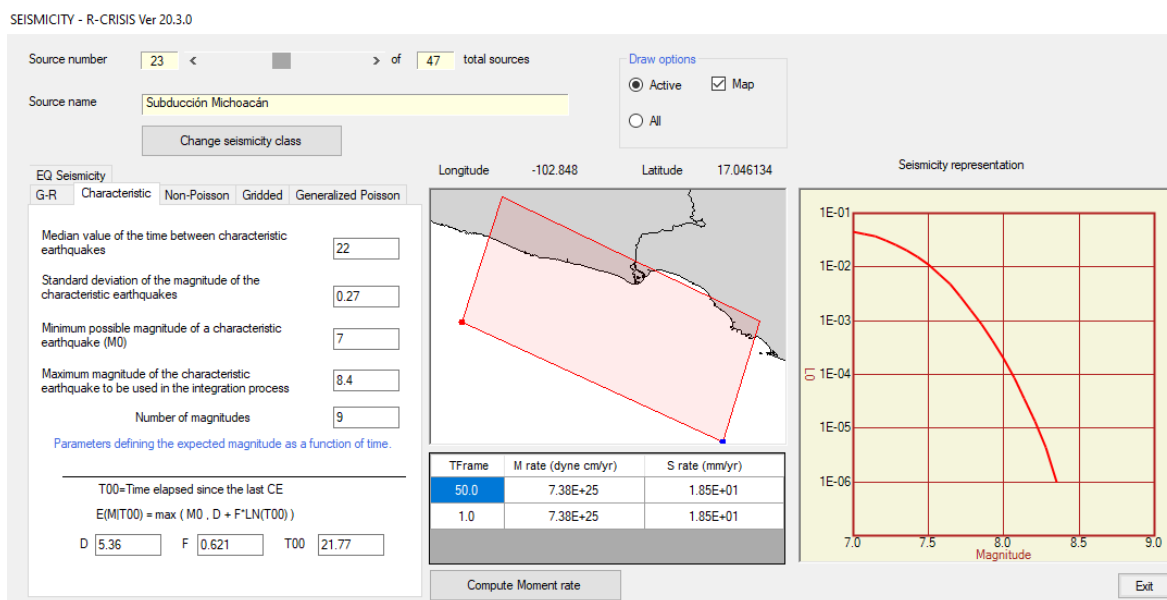


Figura 5.2.7 Modelo de la fuente sísmica de subducción Michoacán. Proceso de temblor característico en el software R-CRISIS.

5.3. Leyes de atenuación

Las leyes de atenuación utilizadas en la EPPS se describieron en el capítulo 1.2 y las que mejor correlación tuvieron con el PGA con los sismos registrados en la RSN se muestran en el capítulo 3.4. Las leyes de atenuación utilizadas son:

- Ley de atenuación de Arroyo et al. (2010): para temblores de subducción característicos.
- Ley de atenuación de García et al. (2005): para temblores intraplaca.
- Ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997): para temblores locales.

En las figs. 5.3.1 – 5.3.3 se muestran, como un ejemplo, las leyes de atenuación usadas en este trabajo para el caso determinista más desfavorable de cada fuente: para la fuente de subducción, el caso más desfavorable es un temblor con distancia epicentral de 200 km y magnitud de 8.4; para la fuente intraplaca, distancia epicentral de 65 km y magnitud de 7.9; para la falla local de Morelia, distancia de 0-10 km y magnitud de 6.4.

Los PGA obtenidos de manera determinista representan el límite superior que se podría tener en un estudio probabilista, aunque normalmente son mucho mayores debido a que en el caso determinista se utilizan el valor máximo de magnitud de la fuente con la distancia mínima posible y se ignora la incertidumbre de estas variables. Se grafican para ejemplificar la forma de las leyes de atenuación de cada fuente sísmica. Debido a la lejanía que existe entre las fuentes de subducción y la ciudad de Morelia, la ley de atenuación arroja valores de PGA relativamente bajos, mientras que las fuentes de intraplaca y locales, arrojan valores mucho mayores, por la cercanía que tienen con la ciudad de Morelia.

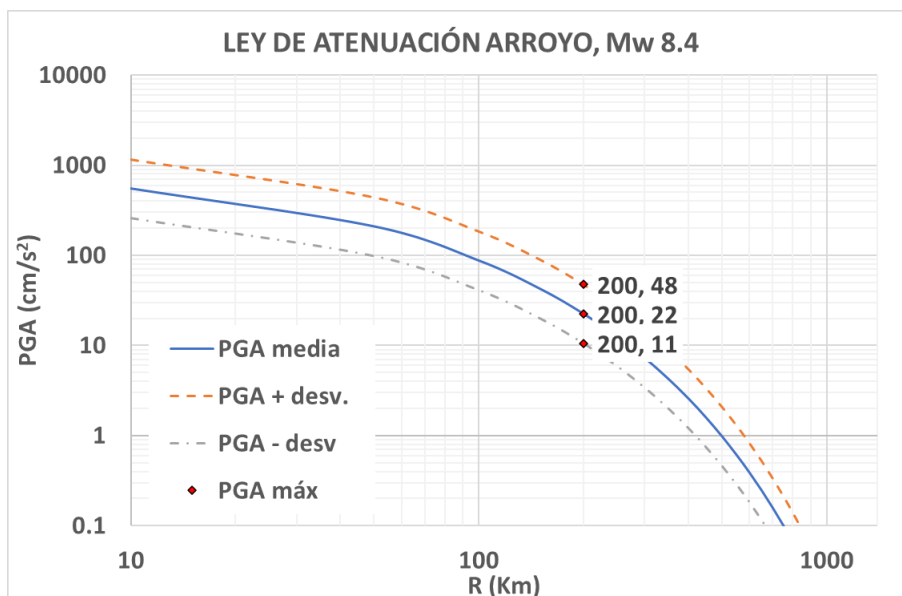


Figura 5.3.1 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de Arroyo et al. (2010) para el caso más desfavorable para una fuente de subducción.

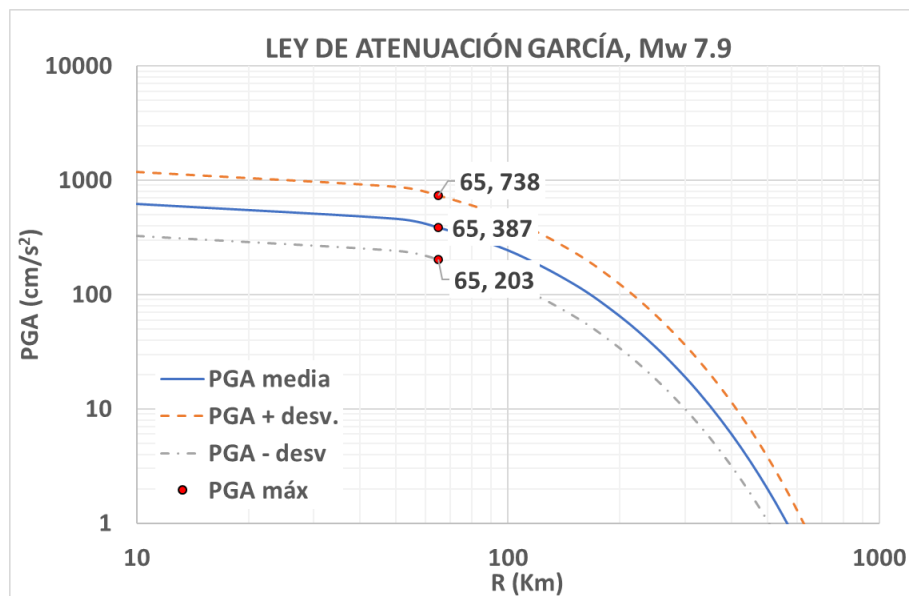


Figura 5.3.2 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de García et al. (2005) para el caso más desfavorable para una fuente de profundidad intermedia.

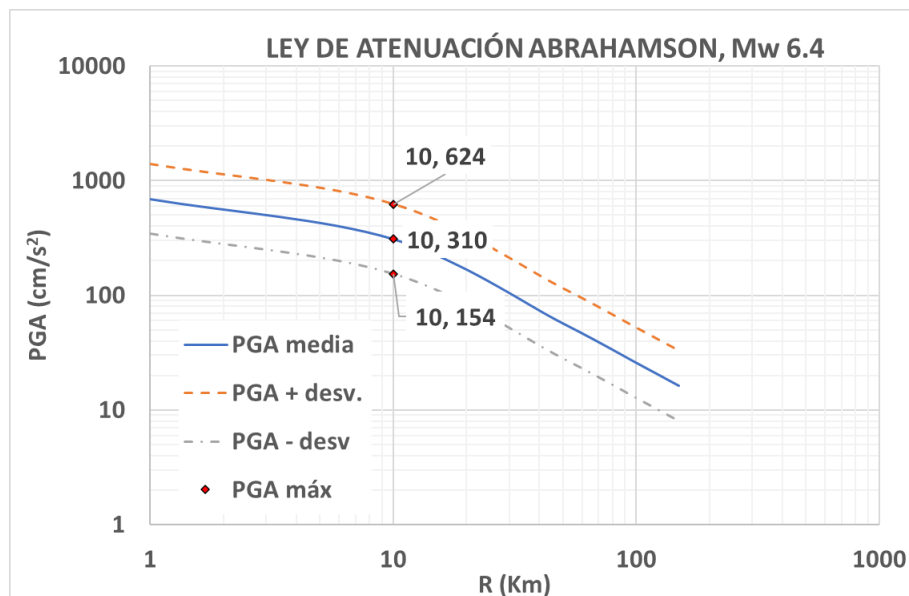


Figura 5.3.3 PGA determinista calculado con la ley de atenuación de Abrahamson y Silva (1997) para el caso más desfavorable para una fuente de fallamiento local.

5.4. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme

El resultado final de un EPPS es la obtención de tasas de excedencia que son curvas que definen la probabilidad de que una intensidad sísmica sea excedida en un determinado tiempo que normalmente es anual. Si se cuenta con las leyes de atenuación correspondientes, se pueden determinar tasas de excedencia para intensidades del terreno o para demandas espectrales, es decir que cada período de un S1GL tiene una tasa de excedencia distinta. En estas curvas se grafica en el eje de las ordenadas la probabilidad de excedencia anual, y en el eje de las abscisas la intensidad sísmica, que para este caso es el PGA o PSA (en cm/s^2) para un periodo específico T_e .

Un Espectro de Peligro Uniforme (EPU) es construido a partir de los valores de intensidad de las tasas de excedencia del terreno y para diferentes periodos (T_e). Un espectro de estas características se construye usando la misma tasa de excedencia para todos los valores de la intensidad sísmica que se grafica en el eje horizontal. Son estos espectros los que sirven de base para la elaboración de un Espectro de Diseño Sísmico de un reglamento.

5.4.1. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme en Roca

Las figs. 5.4.1 – 5.4.5 muestran las tasas de excedencia anuales en terreno rocoso para una vida útil de 50 años y periodos de retorno de 100, 250, 475, 1000 y 2500 años. Para determinar el espectro de peligro uniforme, se obtiene la probabilidad de excedencia en la vida útil de la estructura. Asumiendo que el proceso es de Poisson, la relación entre tasa de excedencia anual y la tasa de excedencia en el periodo de la vida útil es:

$$P(A > a | t_{\text{años}}) = 1 - e^{-t_{\text{años}} P(A > a_{\text{anual}})} \quad (5.1)$$

Recordando que el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia anual, en el primer caso, la tasa de excedencia es de $1/100 \text{ años} = 0.01/\text{año}$. Para una vida útil de 50 años la tasa de excedencia es:

$$P(A > a | 50 \text{ años}) = 1 - e^{-50 (0.01)} = 0.393 \quad (5.2)$$

La figura 5.4.1 muestra las tasas de excedencia espectrales para una vida útil de 50 años. Se muestra la tasa de excedencia de PGA y 18 tasas de excedencia espectrales en el intervalo de periodos de 0.05 s a 4 s. Para determinar el espectro de peligro uniforme correspondiente a este periodo de retorno y vida útil, se grafica una línea horizontal correspondiente a la probabilidad de excedencia de 0.39. La intersección de esta línea con cada curva proporciona las ordenadas del espectro de peligro uniforme, para cada período (T_e).

Similarmente, para los periodos de retorno de 250, 475, 1000 y 2500 años, las probabilidades de excedencia en una vida útil de 50 años, son 0.181, 0.10, 0.0488 y 0.0198, respectivamente (figs. 5.4.2-5.4.5).

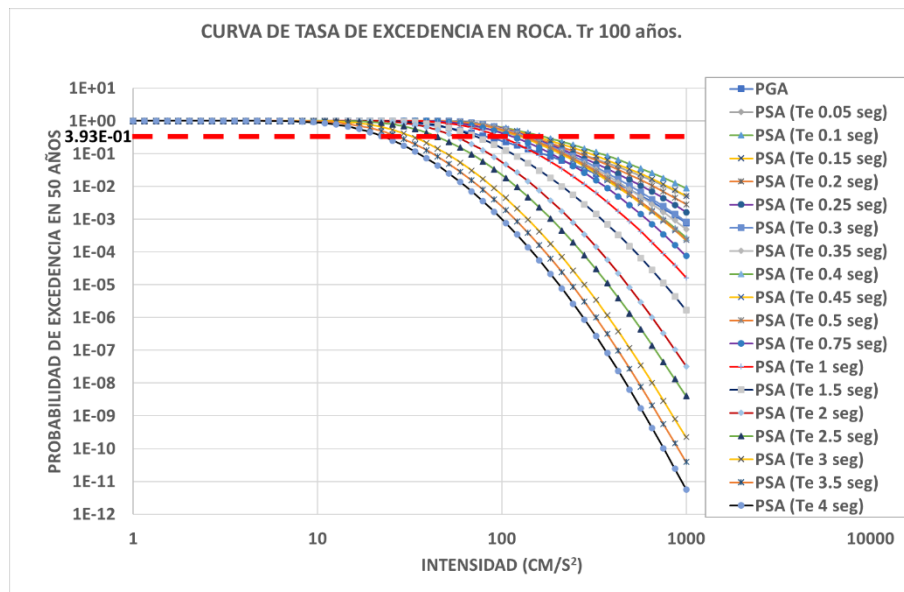


Figura 5.4.1 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos T_e . La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 100 años.

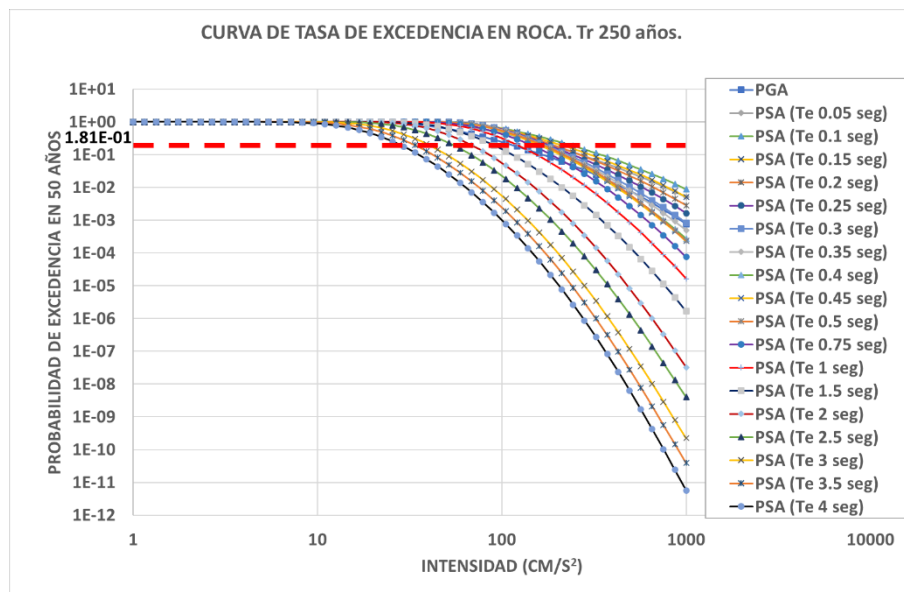


Figura 5.4.2 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos T_e . La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 250 años.

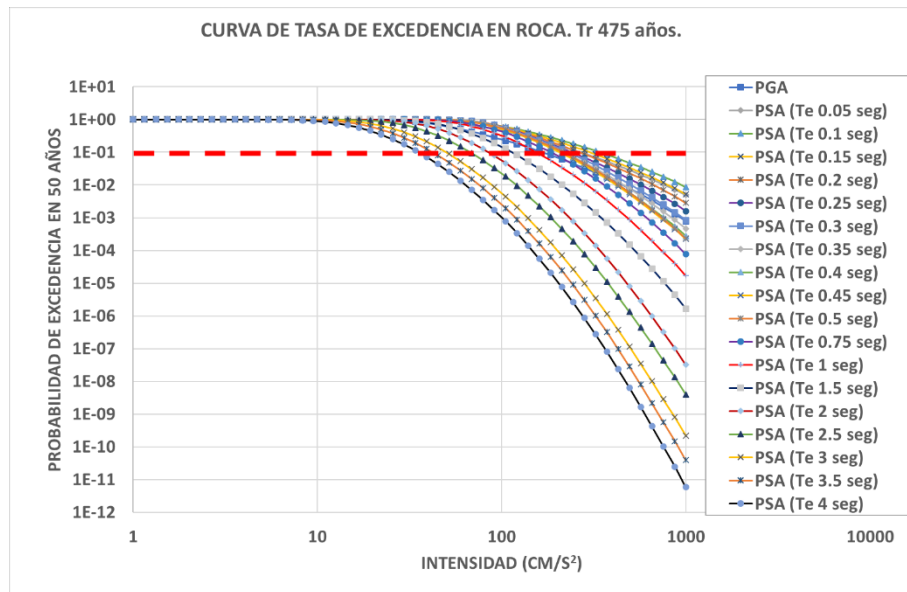


Figura 5.4.3 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos T_e . La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 475 años.

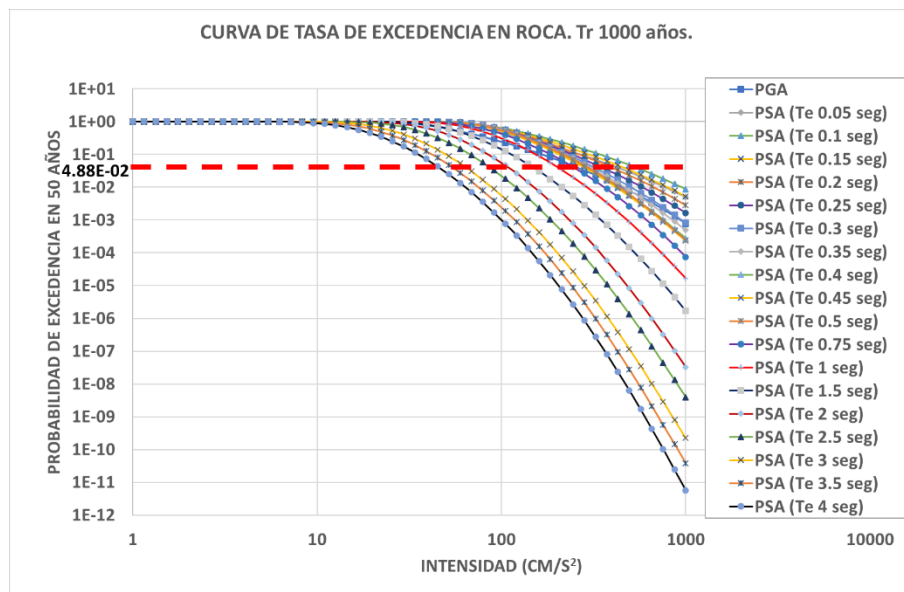


Figura 5.4.4 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos T_e . La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 1000 años.

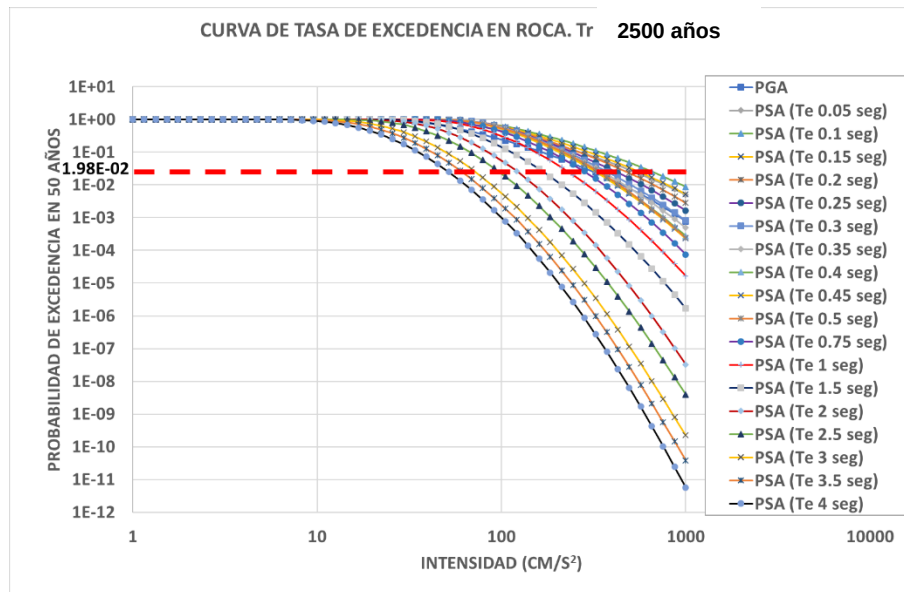


Figura 5.4.5 Curvas de tasa de excedencia para una vida útil de 50 años, para diferentes períodos T_e . La línea discontinua indica la probabilidad de excedencia para un período de retorno de 2500 años.

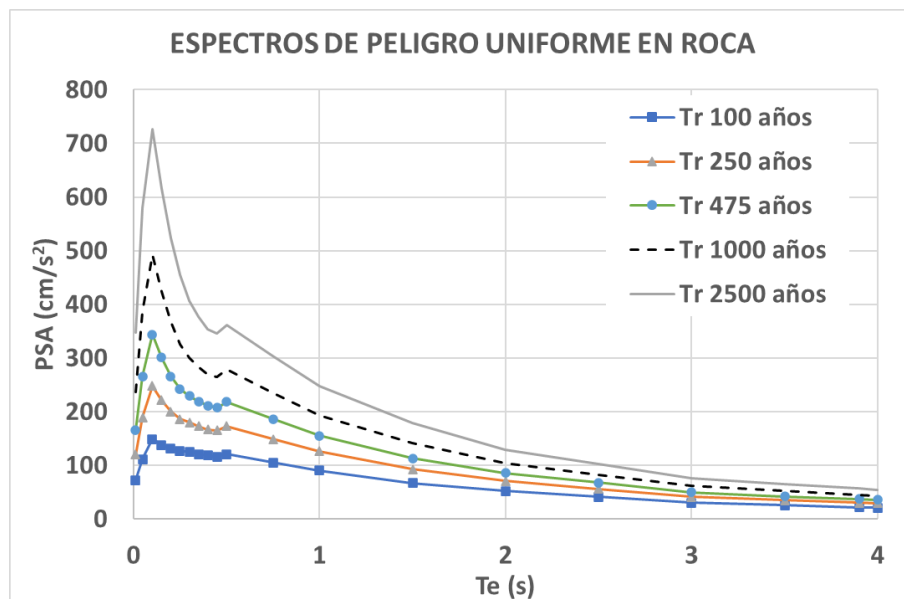


Figura 5.4.6 Espectros de Peligro Uniforme en Roca para los diferentes períodos de retorno.

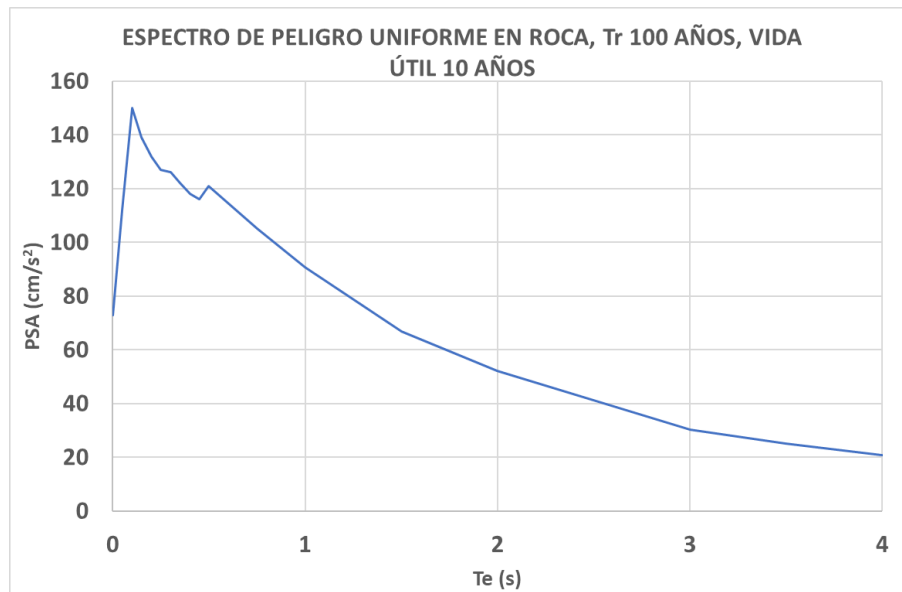


Figura 5.4.7 Espectros de Peligro Uniforme en Roca para un período de retorno de 100 años y una vida útil de 10 años.

Los espectros de peligro uniforme obtenidos se muestran en la figura 5.4.6. Como se observa, la máxima amplitud espectral varía en el intervalo de 150 a 720 gals dependiendo el período de retorno, Tr.

En la figura 5.4.7 se muestra el EPU en roca para un período de retorno de 100 años y una vida útil de 10 años, este espectro es de utilidad para revisar condiciones de servicio de acuerdo con el Eurocódigo.

5.4.2. Tasas de excedencia y Espectros de Peligro Uniforme en los suelos de Morelia

Para convertir las tasas de excedencia en roca a tasas de excedencia de las diversas zonas de Morelia, se usarán los acelerogramas registrados hasta la fecha actual, con los que se determinaron espectros de respuesta y cocientes espectrales (fig. 4.3.1b).

Para ello, se siguió la metodología que se explica continuación:

- Definir una función de probabilidad lognormal para los cocientes espectrales (fig. 5.4.7). Los parámetros de la densidad se obtienen con el método de momentos, donde el primer momento de los datos representa la media de la densidad y con base en el segundo momento se determinar la desviación estándar del logaritmo natural de la variable aleatoria (cocientes espectrales). Las ecuaciones 5.3 y 5.4, proporcionan los dos parámetros de la densidad lognormal con base en los datos hasta ahora obtenidos.

$$m_u = \ln(u) - 0.5 * \sigma_{\ln u}^2 \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\ln u} = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_u}{u} \right)^2 \right]} \quad (5.4)$$

Donde,

u es la media de los cocientes espectrales

σ_u es la desviación estándar de los cocientes espectrales

m_u es la mediana de los cocientes espectrales (primer parámetro de la densidad)

$\sigma_{\ln u}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de la variable (segundo parámetro de la densidad)

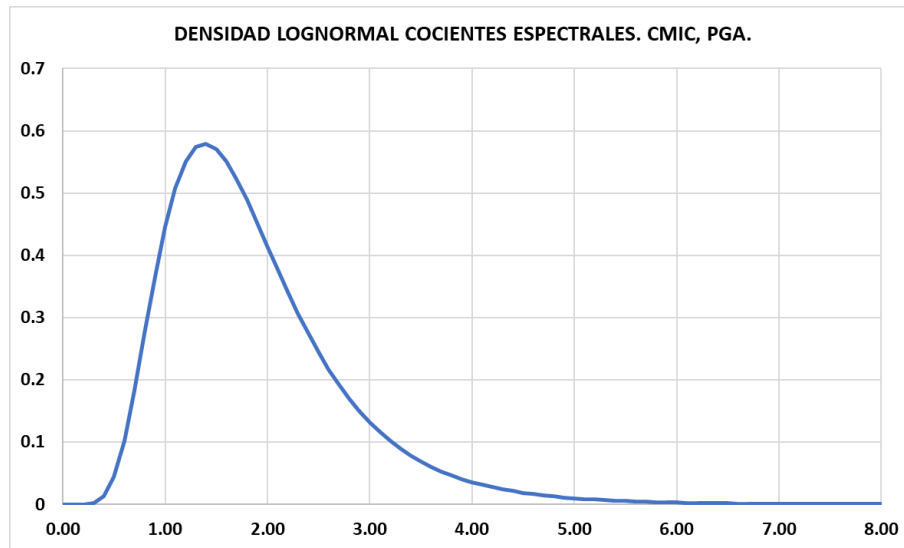


Figura 5.4.7 Densidad lognormal para los cocientes espectrales de la estación CMIC para PGA.

- Convertir la tasa de excedencia de 50 años (vida útil) a una tasa de excedencia anual para diferentes períodos T_e (en este trabajo se usaron: 0:@0.05:0.5, 0.5:@0.25:1, y 1:@0.5:4. Para realizar este paso recurrimos a la expresión 5.1, que despejando a la probabilidad anual es (ec. 5.5):

$$P(A > a_{\text{anual}}) = - \frac{\ln[1 - P(A > a | t_{\text{años}})]}{t_{\text{años}}} \quad (5.5)$$

- Para ingresar la incertidumbre de los cocientes espectrales para determinar la tasa de excedencia, se hace uso del teorema de probabilidad total. La ecuación 5.6

muestra la manera en que se calcula la tasa de excedencia en otras zonas de la ciudad y la forma de incluir la incertidumbre en los cocientes espectrales. En el caso determinista, solo se multiplica la tasa anual por la mediana de los cocientes espectrales.

$$\lambda_{A_S}(a) = \int_0^{\infty} [\lambda_{A_{TD}}(a) * CE] f_{CE}(CE) dCE \quad (5.6)$$

Donde,

$\lambda_{A_S}(a)$ = Tasa de excedencia en la estación “S” de la RSN

$\lambda_{A_{TD}}(a)$ = Tasa de excedencia en terreno duro

CE = Cociente espectral de la estación “S” a la estación de INIRENA

$f_{CE}(CE)$ = Densidad de probabilidad del cociente espectral

Tabla 5.4.1 Valores de la mediana de cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.

MEDIANA COCIENTE ESPECTRAL, u										
Tn (seg)	CMIC	CU	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0.00	6.025	2.020	2.950	2.004	1.198	2.513	1.370	0.996	1.483	1.599
0.05	5.712	1.905	7.035	2.494	1.187	2.883	1.291	0.924	1.440	1.512
0.10	5.985	2.305	3.942	2.317	1.381	2.537	1.744	1.000	1.651	1.639
0.15	5.882	2.421	2.207	2.364	1.630	2.966	2.228	1.058	1.926	1.858
0.20	5.918	2.217	1.323	2.229	1.760	3.133	2.404	1.122	2.235	1.872
0.25	6.575	2.326	1.528	2.110	1.521	3.650	2.234	1.043	2.009	2.170
0.30	8.477	1.997	1.537	1.971	1.126	2.901	1.974	1.018	1.876	1.948
0.35	10.099	1.947	1.654	2.030	1.199	3.204	1.634	1.044	1.850	1.855
0.40	9.667	1.781	1.706	2.397	1.030	2.993	1.627	1.033	1.764	1.804
0.45	9.091	1.583	1.306	2.544	1.122	2.387	1.425	1.050	1.536	1.546
0.50	8.483	1.810	1.364	2.544	1.113	2.487	1.393	1.006	1.280	1.358
0.75	5.309	2.412	1.006	1.776	1.061	2.069	1.026	0.923	1.588	1.190
1.00	3.316	2.335	1.192	1.432	1.167	1.790	0.971	1.001	1.598	1.464
1.50	2.848	1.896	0.900	1.344	0.858	1.502	1.165	1.026	1.025	0.994
2.00	1.949	1.438	0.552	0.921	0.889	1.020	0.826	0.959	0.794	0.633
2.50	2.117	1.123	0.552	0.840	0.784	0.849	0.837	0.981	0.752	0.618
3.00	2.011	1.163	0.560	0.926	0.898	0.920	0.782	1.055	0.734	0.711
3.50	2.333	1.192	0.645	0.922	1.028	1.023	0.905	1.102	0.895	0.741
4.00	2.292	1.212	0.694	0.953	1.009	1.099	0.922	1.106	0.932	0.760

Tabla 5.4.2 Valores de la desviación estándar de cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS COCIENTES ESPECTRALES, σ_u										
Tn (seg)	CMIC	CU	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0.00	2.850	0.567	2.646	0.963	0.207	1.473	1.983	0.128	0.567	0.625
0.05	2.133	0.624	5.816	1.490	0.154	2.363	1.170	0.182	0.583	0.632
0.10	11.679	0.779	3.986	1.309	0.265	1.383	3.488	0.130	0.663	0.621
0.15	2.741	0.969	2.232	1.343	0.326	1.532	5.434	0.147	0.700	0.810
0.20	2.867	0.699	1.041	1.046	0.335	1.832	4.089	0.147	0.797	0.839
0.25	3.290	0.792	0.894	0.796	0.198	2.297	4.041	0.123	1.045	0.910
0.30	4.208	0.673	0.863	0.531	0.217	1.366	2.760	0.151	0.612	0.620
0.35	5.391	0.534	0.891	0.535	0.228	0.880	2.699	0.123	0.471	0.590
0.40	5.684	0.402	0.764	0.694	0.198	0.766	2.188	0.131	0.335	0.612
0.45	4.731	0.331	0.678	0.792	0.159	0.537	1.644	0.108	0.286	0.459
0.50	3.952	0.341	0.605	0.750	0.277	0.631	1.561	0.099	0.372	0.306
0.75	2.158	0.483	0.475	0.417	0.216	0.366	0.976	0.087	0.340	0.255
1.00	1.190	0.645	0.570	0.513	0.218	0.425	1.865	0.173	0.330	0.346
1.50	1.000	0.486	0.410	0.490	0.094	0.430	1.546	0.120	0.194	0.258
2.00	1.417	0.306	0.294	0.190	0.153	0.177	1.044	0.122	0.203	0.144
2.50	1.859	0.273	0.247	0.154	0.104	0.145	0.970	0.105	0.150	0.108
3.00	3.918	0.185	0.259	0.161	0.061	0.139	1.096	0.078	0.181	0.128
3.50	4.469	0.270	0.274	0.214	0.070	0.205	0.771	0.084	0.333	0.214
4.00	5.112	0.325	0.313	0.231	0.109	0.249	0.580	0.085	0.464	0.340

Tabla 5.4.3 Valores del parámetro mediana (primer momento) para la densidad lognormal de los cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.

MEDIANA DE LOS COCIENTES ESPECTRALES, m _u , PRIMER MOMENTO										
Tn (seg)	CMIC	CU	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0.00	1.695	0.665	0.787	0.591	0.166	0.774	-0.250	-0.012	0.326	0.399
0.05	1.676	0.590	1.674	0.749	0.163	0.801	-0.044	-0.098	0.288	0.328
0.10	1.004	0.781	1.019	0.702	0.305	0.801	-0.248	-0.009	0.427	0.427
0.15	1.674	0.808	0.441	0.719	0.468	0.966	-0.168	0.047	0.592	0.532
0.20	1.673	0.749	0.039	0.702	0.547	0.995	0.198	0.106	0.744	0.536
0.25	1.770	0.789	0.277	0.679	0.410	1.126	0.074	0.036	0.578	0.693
0.30	2.027	0.638	0.293	0.643	0.100	0.965	0.138	0.007	0.579	0.618
0.35	2.182	0.629	0.375	0.675	0.164	1.128	-0.168	0.036	0.583	0.569
0.40	2.120	0.552	0.443	0.834	0.011	1.065	-0.029	0.025	0.550	0.536
0.45	2.087	0.438	0.140	0.887	0.103	0.845	-0.070	0.044	0.412	0.393
0.50	2.040	0.576	0.220	0.892	0.077	0.880	-0.075	0.001	0.207	0.281
0.75	1.593	0.861	-0.095	0.548	0.039	0.712	-0.298	-0.085	0.440	0.151
1.00	1.138	0.811	0.073	0.299	0.138	0.554	-0.803	-0.014	0.448	0.354
1.50	0.988	0.608	-0.200	0.233	-0.159	0.367	-0.355	0.019	0.007	-0.039
2.00	0.455	0.341	-0.719	-0.103	-0.132	0.005	-0.668	-0.050	-0.262	-0.482
2.50	0.464	0.088	-0.685	-0.190	-0.252	-0.178	-0.603	-0.025	-0.305	-0.497
3.00	-0.085	0.139	-0.676	-0.091	-0.110	-0.095	-0.789	0.051	-0.339	-0.357
3.50	0.077	0.151	-0.522	-0.108	0.025	0.003	-0.373	0.094	-0.176	-0.340
4.00	-0.064	0.158	-0.458	-0.077	0.003	0.070	-0.247	0.097	-0.182	-0.365

Tabla 5.4.4 Valores del parámetro desviación estándar (segundo momento) para la densidad lognormal de los cocientes espectrales para las diferentes estaciones de la RSN.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL LOGARITMO DE LOS COCIENTES ESPECTRALES, $\sigma \ln u$, SEGUNDO MOMENTO

Tn (seg)	CMIC	CU	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0.00	0.449	0.275	0.768	0.456	0.171	0.544	1.063	0.128	0.370	0.377
0.05	0.362	0.321	0.727	0.552	0.129	0.691	0.774	0.196	0.390	0.404
0.10	1.253	0.329	0.839	0.526	0.190	0.510	1.268	0.130	0.386	0.366
0.15	0.443	0.385	0.824	0.529	0.198	0.488	1.392	0.138	0.353	0.417
0.20	0.459	0.308	0.694	0.446	0.189	0.542	1.166	0.131	0.346	0.428
0.25	0.472	0.331	0.542	0.365	0.129	0.576	1.202	0.117	0.489	0.403
0.30	0.469	0.328	0.523	0.265	0.191	0.448	1.041	0.147	0.318	0.311
0.35	0.503	0.270	0.505	0.259	0.188	0.270	1.147	0.118	0.250	0.310
0.40	0.545	0.223	0.428	0.284	0.191	0.252	1.016	0.127	0.188	0.330
0.45	0.490	0.207	0.493	0.304	0.141	0.222	0.920	0.102	0.185	0.289
0.50	0.443	0.187	0.424	0.289	0.245	0.250	0.902	0.098	0.285	0.223
0.75	0.391	0.198	0.448	0.231	0.202	0.176	0.803	0.095	0.212	0.212
1.00	0.348	0.271	0.454	0.348	0.185	0.234	1.243	0.172	0.205	0.233
1.50	0.341	0.252	0.435	0.353	0.109	0.281	1.008	0.116	0.188	0.256
2.00	0.651	0.210	0.500	0.204	0.171	0.172	0.977	0.127	0.251	0.224
2.50	0.756	0.240	0.427	0.182	0.132	0.169	0.923	0.107	0.197	0.174
3.00	1.252	0.158	0.440	0.172	0.068	0.151	1.042	0.074	0.243	0.179
3.50	1.241	0.224	0.407	0.229	0.068	0.199	0.739	0.076	0.360	0.283
4.00	1.337	0.264	0.431	0.239	0.108	0.223	0.577	0.077	0.471	0.427

En las tablas 5.4.1 – 5.4.4 se muestran los valores de mediana y desviación estándar de los cocientes espectrales; primer momento y segundo momento para la distribución lognormal de los cocientes. La estación INIRENA no aparece, por ser la estación base para los cocientes espectrales.

En la fig. 5.4.8 se compara la tasa de excedencia anual de terreno duro y el terreno donde se ubica la estación CMIC, con y sin incertidumbre en los cocientes espectrales. Se observa la amplificación que existe en esta zona, respecto a terreno duro, de la ordenada de PGA.

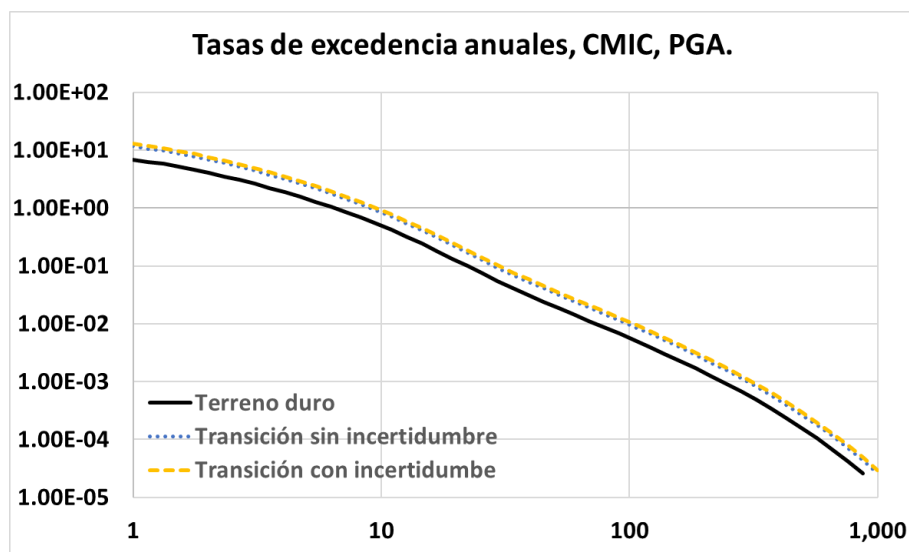


Figura 5.4.8 Densidad lognormal para los cocientes espectrales de la estación CMIC para PGA.

Esta metodología se aplica para todas las zonas de la RSN y para todos los períodos T_e . Con ello, se obtienen los EPU de cada zona. En las figs. 5.4.9 – 5.4.12 se muestran los EPU para los sitios donde se localizan las estaciones sísmicas de la RSN. Ocho de las 11 estaciones se encuentran en terreno que, de acuerdo con su periodo, se clasifica como terreno tipo I. Por ello, se usa como EPU el de roca. La estación CMIC tiene el EPU con mayores amplitudes de la Red, la estación Luz Alou también presenta una importante amplitud en el período T_e de 0.10 seg, y la estación de Psicología tiene bajas amplitudes en el intervalo de períodos de 0.2 – 0.3 s.

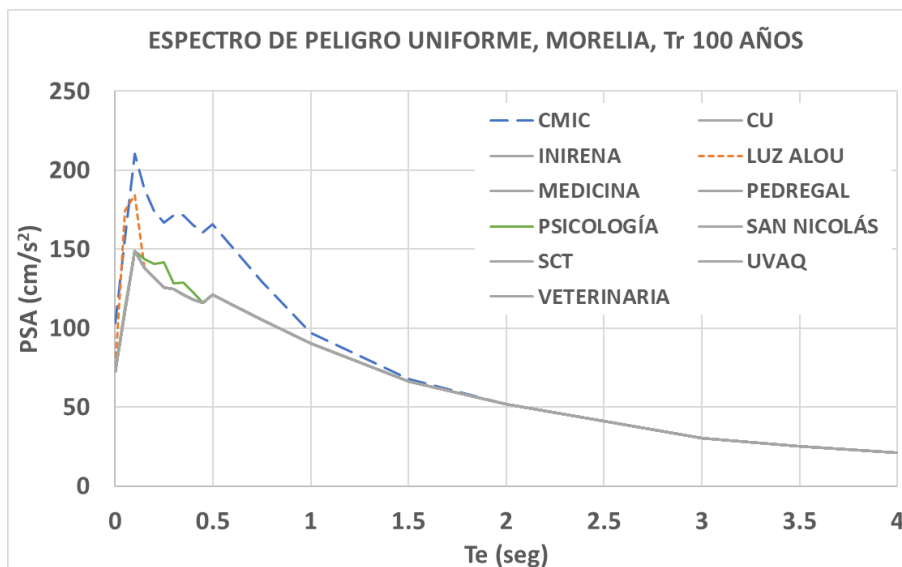


Figura 5.4.9 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 100 años.

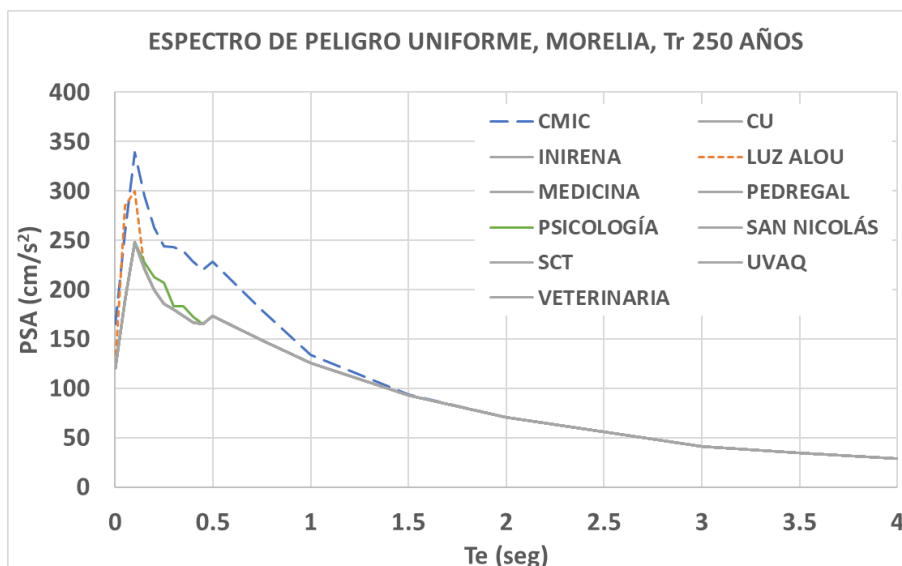


Figura 5.4.10 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 250 años.

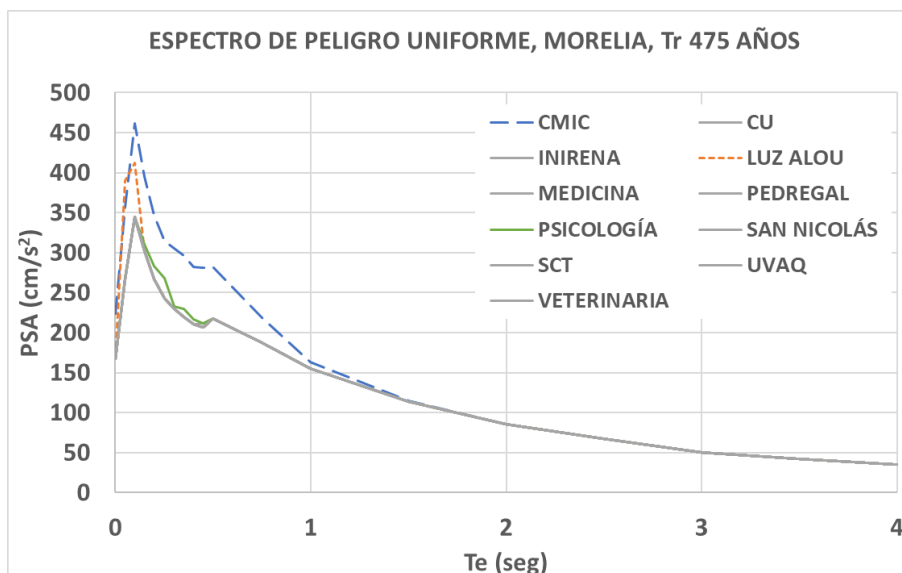


Figura 5.4.11 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 475 años.

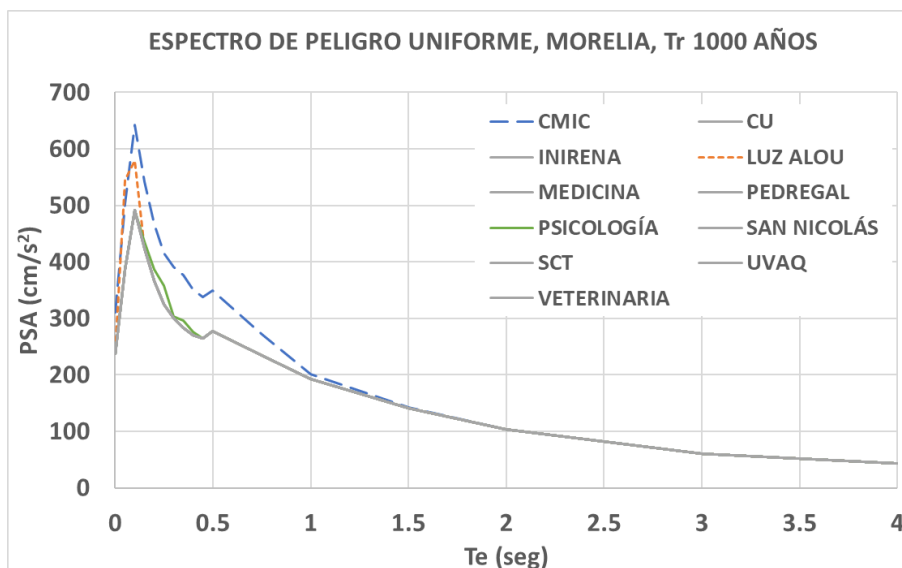


Figura 5.4.12 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 1000 años.

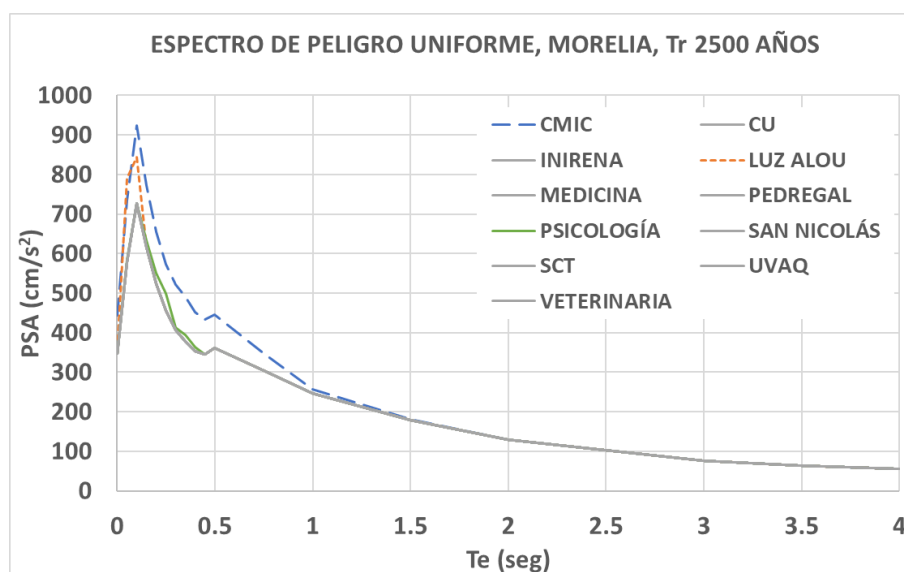


Figura 5.4.13 Espectros de Peligro Uniforme de la Red Sísmica Nicolaita. Tr 2500 años.

5.5. Desagregación del Peligro Sísmico

En zonas sísmicas, un sitio normalmente se ve afectado por diversas fuentes. Existen, sin embargo, fuentes sísmicas que contribuyen más al peligro sísmico que otras. ¿Cómo evaluamos cuáles son estas fuentes?; la respuesta está en la desagregación del peligro sísmico que permite calcular la aportación de cada fuente al peligro sísmico total. La desagregación se realiza para las variables aleatorias de magnitud y de distancia epicentral.

Se realizó la desagregación del peligro sísmico para los periodos T_e : 0:@0.05:0.5; 0.5:@0.25:1; 1:@0.5:4. La tabla 5.5.1 muestra el porcentaje de participación que tiene cada fuente sísmica (subducción, intraplaca, local) en el peligro sísmico de Morelia. La fuente sísmica local, incluye el porcentaje de participación de los temblores corticales en el EVTm y los temblores locales de las fallas potencialmente sísmicas en la ciudad.

Para estructuras con periodos en el intervalo de 0 – 0.25 s, las fuentes intraplaca son las que mayor aportación tienen en el peligro sísmico de la ciudad, con menor contribución de los temblores de subducción y locales. Los espectros de respuesta hasta ahora obtenidos en la RSN muestran que los temblores de subducción generan PSA grandes en periodos mayores a 0.25 segundos. La aportación de las fuentes locales es menor debido fundamentalmente a los periodos de recurrencia altos.

Para periodos mayores que 0.25 segundos, las fuentes de subducción generan la mayor aportación al peligro sísmico, reduciendo la contribución de las demás fuentes, debido al contenido de frecuencias dominantes que tienen los temblores costeros cuando viajan más de 200 km.

A pesar de que los temblores costeros tienen más participación en periodos largos, las PSA esperadas son menores comparadas con los valores esperados en periodos cortos, donde la mayor participación la tienen los temblores de profundidad intermedia.

Tabla 5.5.1 Porcentaje de participación de las fuentes sísmicas que aportan al peligro sísmico de la ciudad de Morelia.

DESAGREGACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO			DESAGREGACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO		
Te (seg)	FUENTE	% DE PARTICIPACIÓN	Te (seg)	FUENTE	% DE PARTICIPACIÓN
0.00	SUBDUCCIÓN	11%	0.45	SUBDUCCIÓN	76%
	INTRAPLACA	83%		INTRAPLACA	21%
	EVTM	5%		EVTM	3%
	LOCAL	1%		LOCAL	0%
0.05	SUBDUCCIÓN	8%	0.50	SUBDUCCIÓN	80%
	INTRAPLACA	83%		INTRAPLACA	18%
	EVTM	8%		EVTM	2%
	LOCAL	2%		LOCAL	0%
0.10	SUBDUCCIÓN	7%	0.75	SUBDUCCIÓN	86%
	INTRAPLACA	82%		INTRAPLACA	13%
	EVTM	9%		EVTM	1%
	LOCAL	2%		LOCAL	0%
0.15	SUBDUCCIÓN	14%	1.00	SUBDUCCIÓN	89%
	INTRAPLACA	74%		INTRAPLACA	10%
	EVTM	9%		EVTM	1%
	LOCAL	2%		LOCAL	0%
0.20	SUBDUCCIÓN	23%	1.50	SUBDUCCIÓN	92%
	INTRAPLACA	66%		INTRAPLACA	8%
	EVTM	9%		EVTM	0%
	LOCAL	2%		LOCAL	0%
0.25	SUBDUCCIÓN	35%	2.00	SUBDUCCIÓN	94%
	INTRAPLACA	56%		INTRAPLACA	6%
	EVTM	8%		EVTM	0%
	LOCAL	1%		LOCAL	0%
0.30	SUBDUCCIÓN	53%	2.50	SUBDUCCIÓN	94%
	INTRAPLACA	40%		INTRAPLACA	6%
	EVTM	6%		EVTM	0%
	LOCAL	1%		LOCAL	0%
0.35	SUBDUCCIÓN	64%	3.00	SUBDUCCIÓN	95%
	INTRAPLACA	30%		INTRAPLACA	5%
	EVTM	5%		EVTM	0%
	LOCAL	1%		LOCAL	0%
0.40	SUBDUCCIÓN	75%	3.50	SUBDUCCIÓN	95%
	INTRAPLACA	20%		INTRAPLACA	5%
	EVTM	4%		EVTM	0%
	LOCAL	0%		LOCAL	0%
	SUBDUCCIÓN	75%	4.00	SUBDUCCIÓN	96%
	INTRAPLACA	20%		INTRAPLACA	3%
	EVTM	4%		EVTM	0%
	LOCAL	0%		LOCAL	0%

Las figs. 5.5.1 – 5.5.19 presentan la desagregación del peligro sísmico para los diferentes periodos Te. Las figuras tridimensionales muestran en las abscisas la magnitud de los temblores (M) y distancia epicentral (R), y en el eje vertical el porcentaje de participación de la combinación M-R de las fuentes sísmicas.

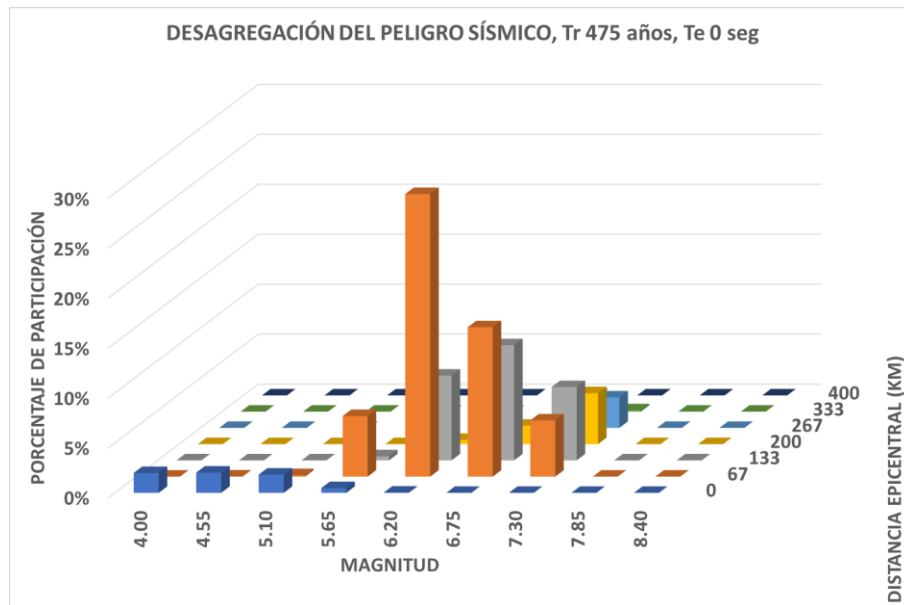


Figura 5.5.1 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, PGA.

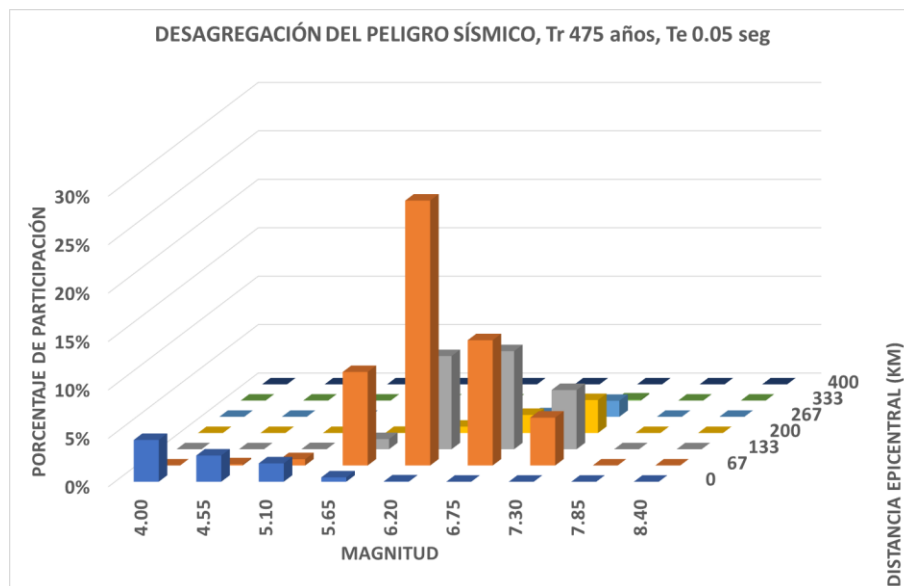


Figura 5.5.2 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.05 s.

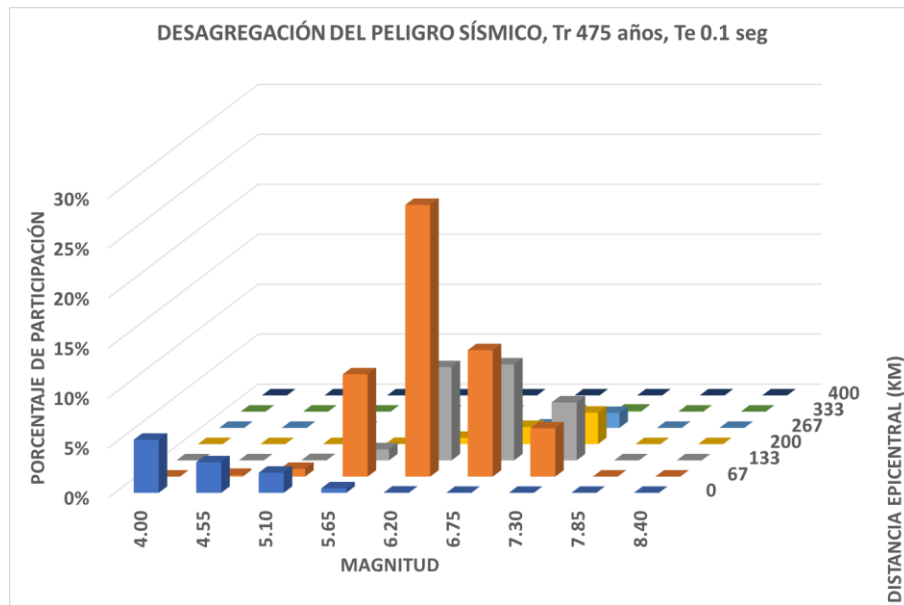


Figura 5.5.3 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.1 s.

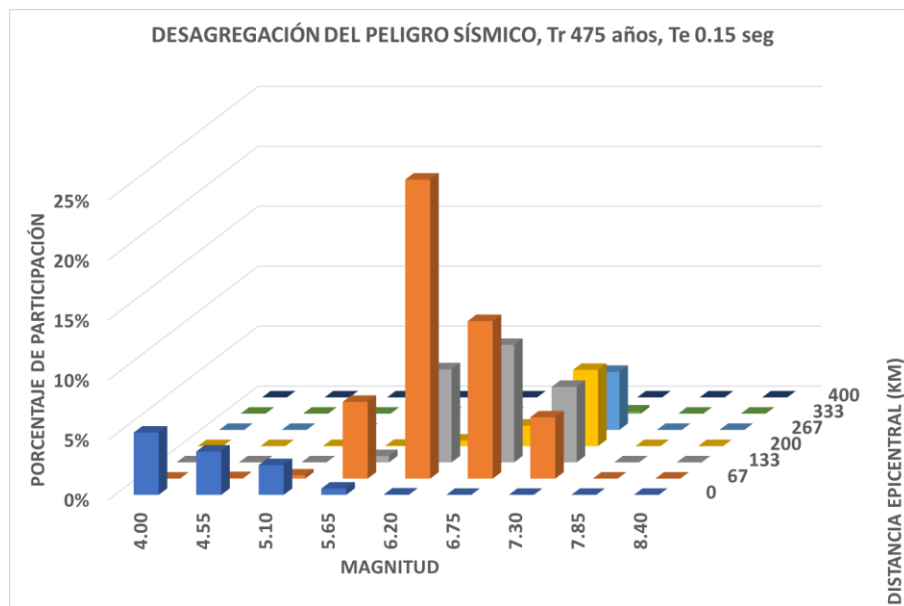


Figura 5.5.4 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.15 s.

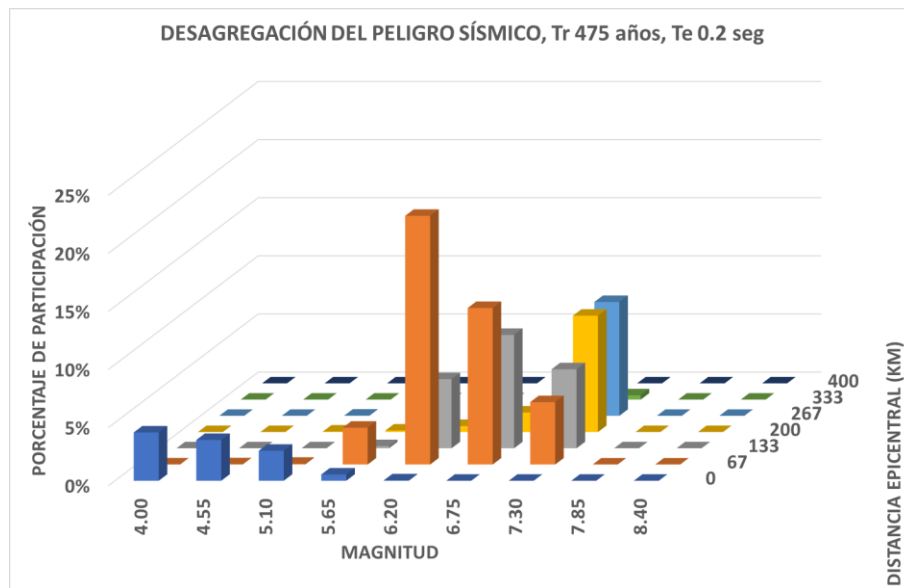


Figura 5.5.5 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.20 s.

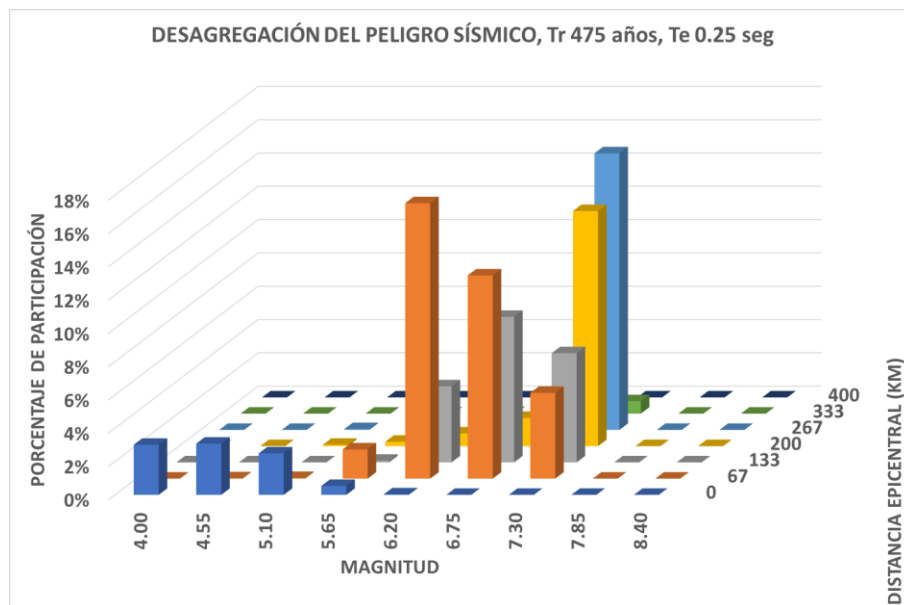


Figura 5.5.6 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.25 s.

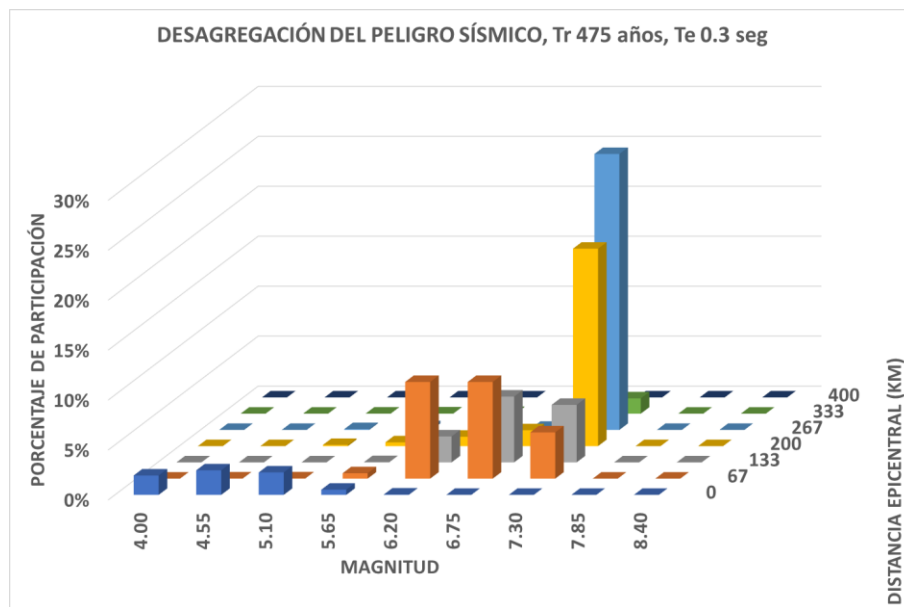


Figura 5.5.7 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.30 s.

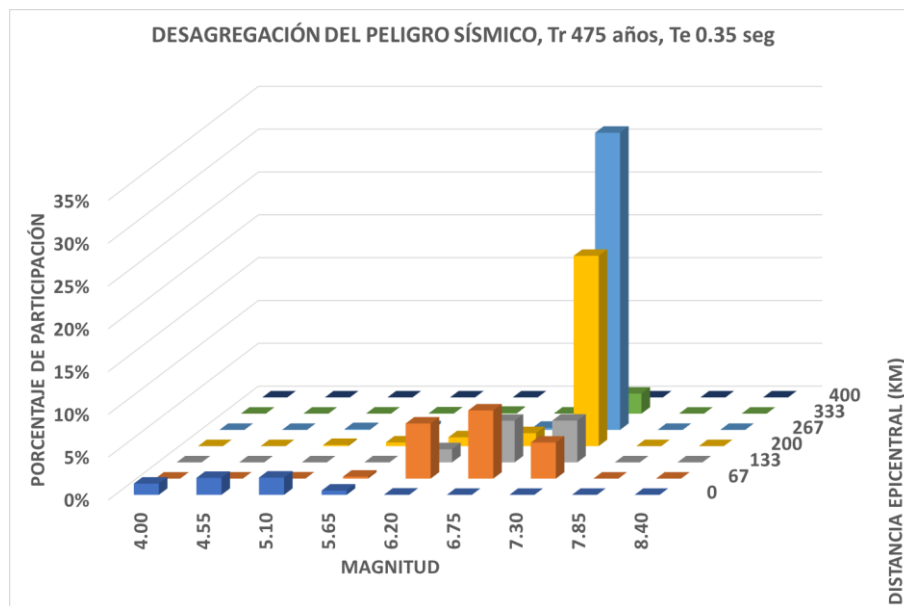


Figura 5.5.8 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.35 s.

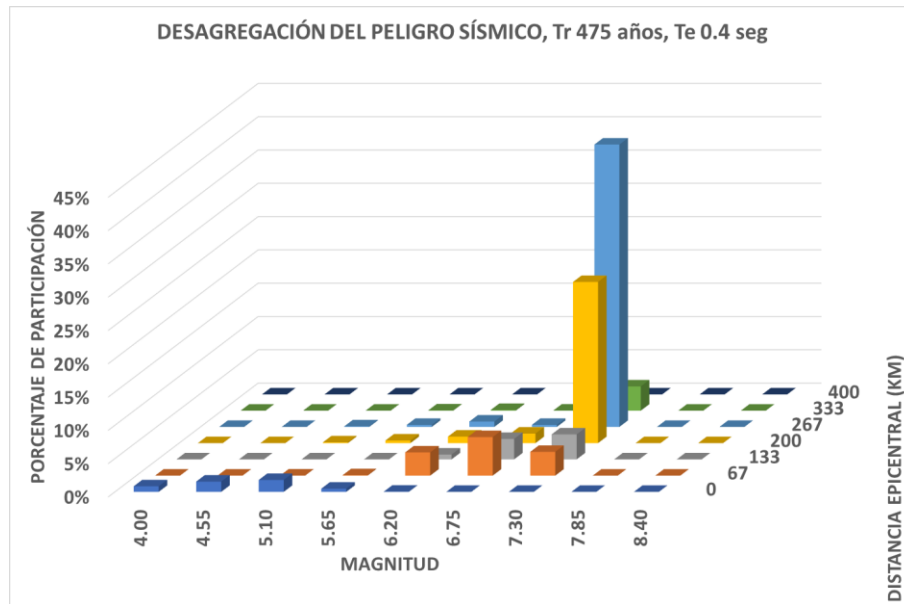


Figura 5.5.9 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.40 s.

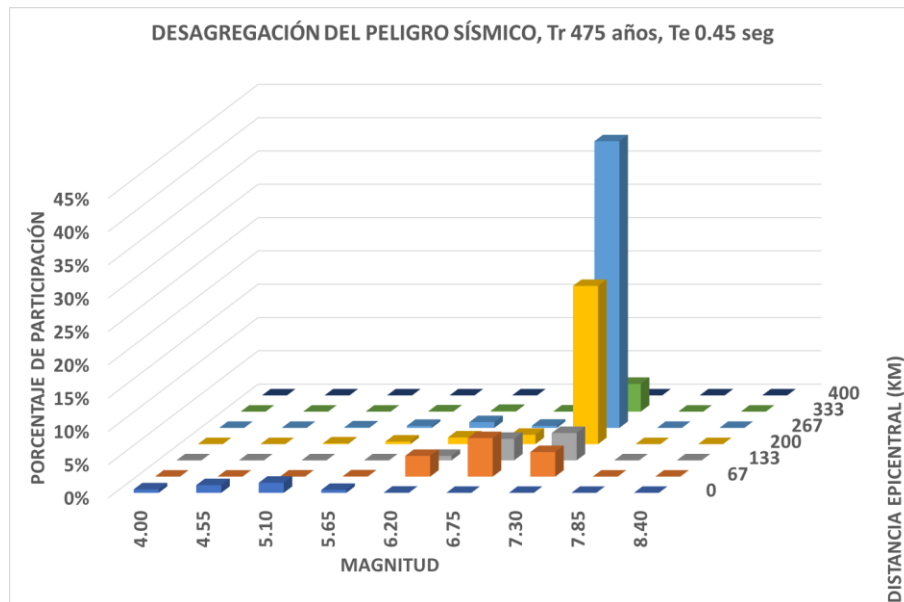


Figura 5.5.10 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.45 s.

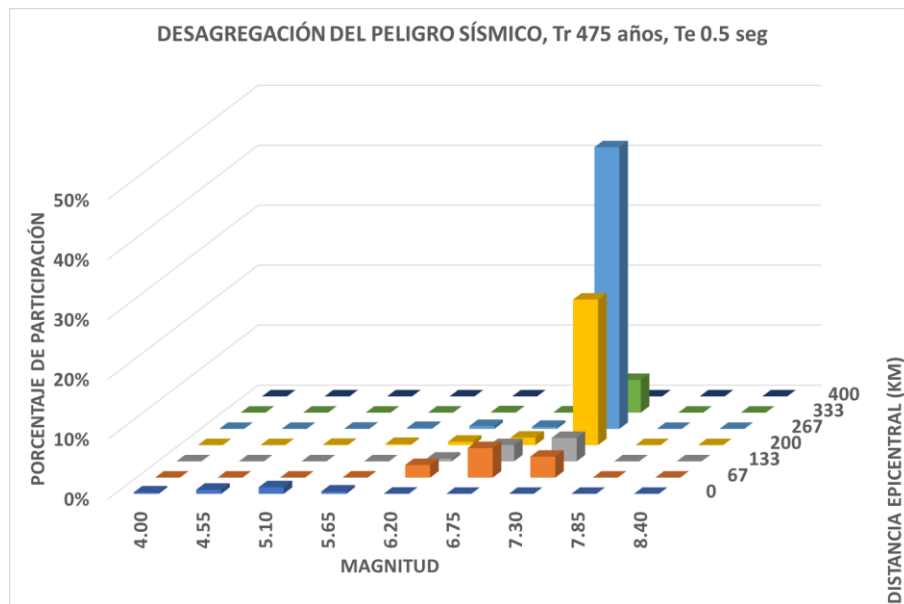


Figura 5.5.11 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.50 s.

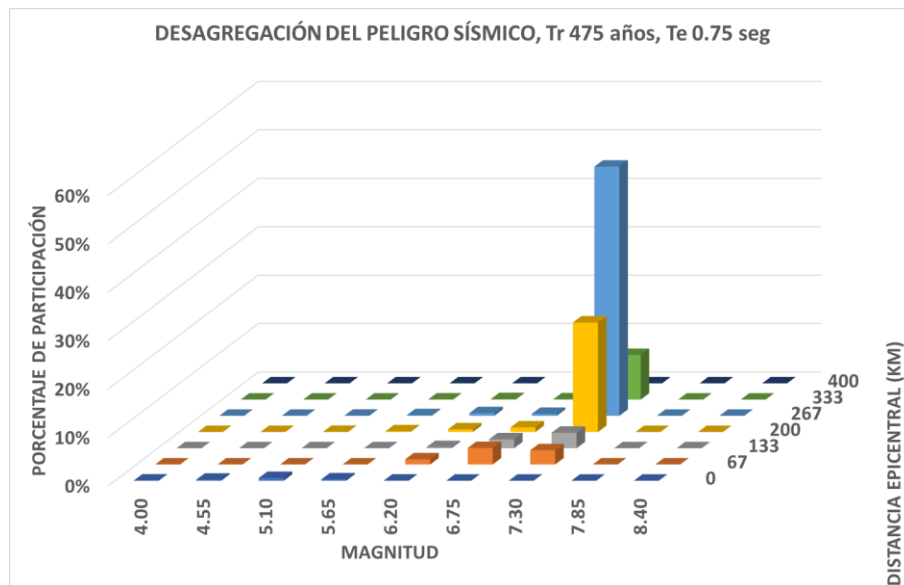


Figura 5.5.12 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 0.75 s.

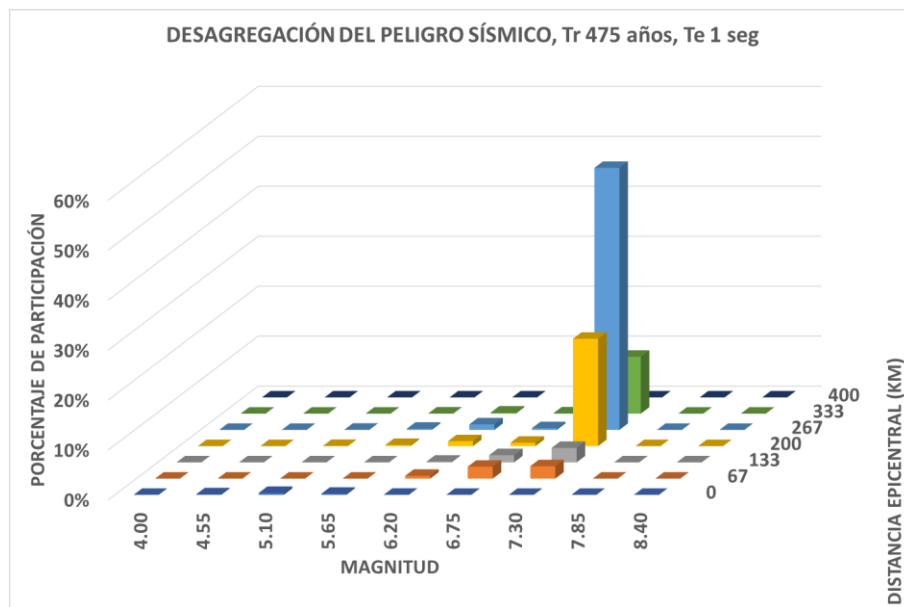


Figura 5.5.13 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 1 s.

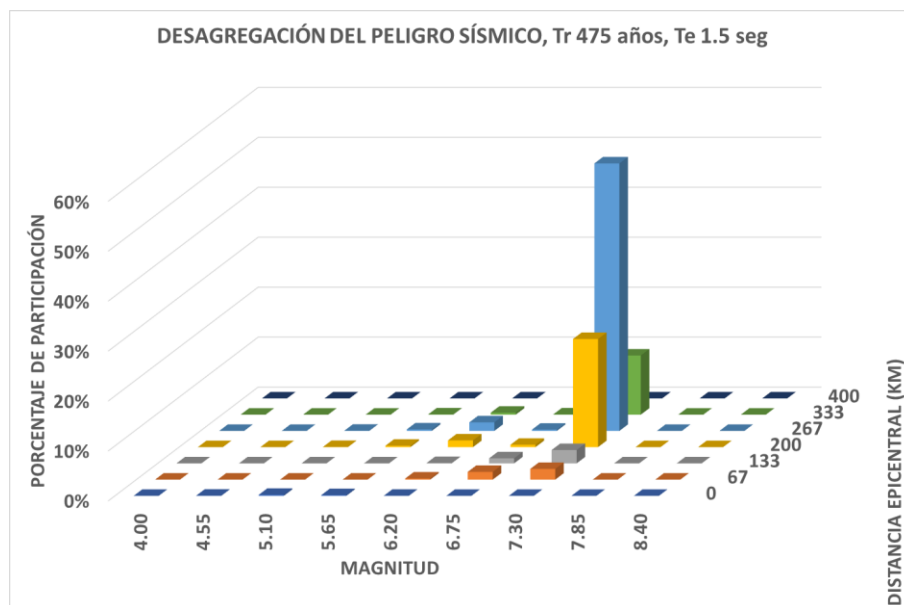


Figura 5.5.14 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 1.5 s.

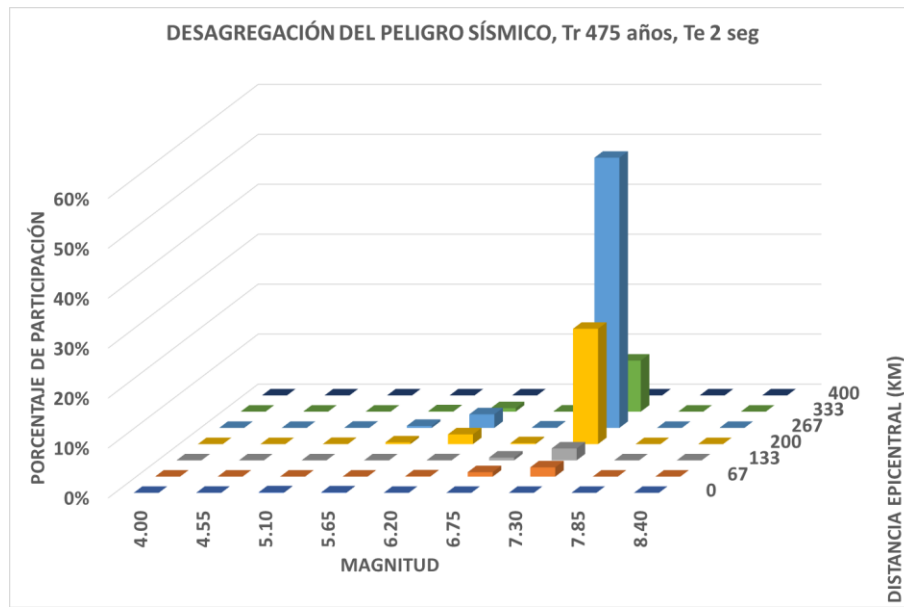


Figura 5.5.15 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 2 s.

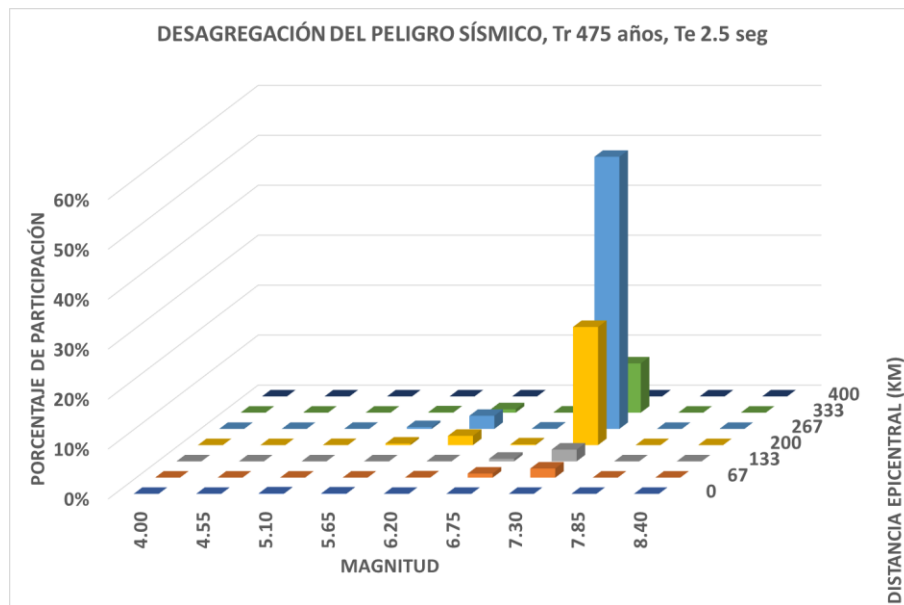


Figura 5.5.16 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 2.5 s.

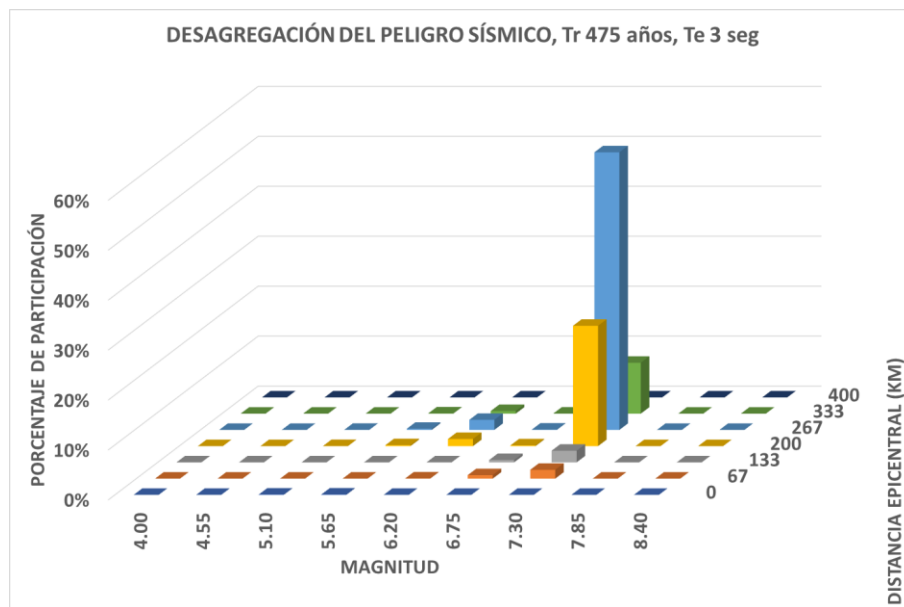


Figura 5.5.17 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 3 s.

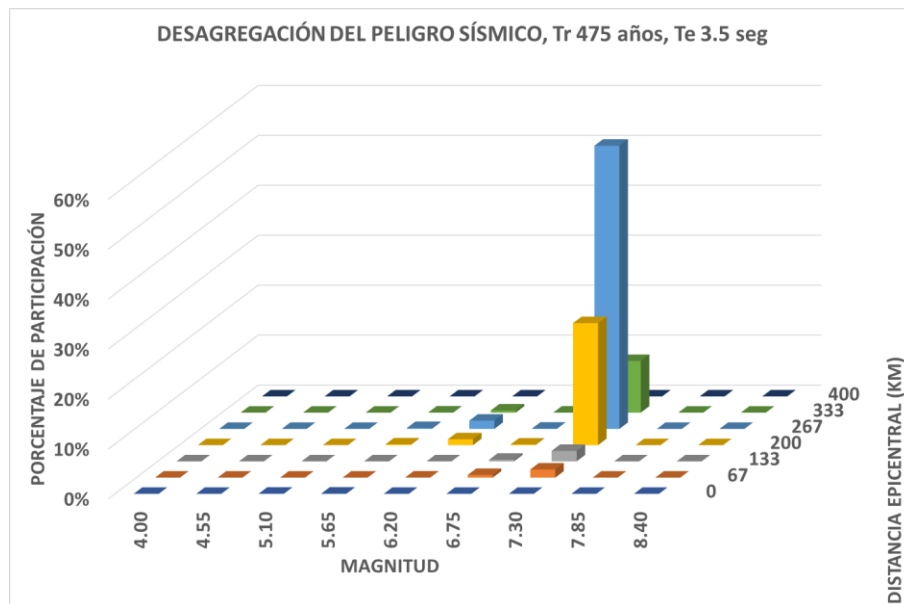


Figura 5.5.18 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 3.5 s.

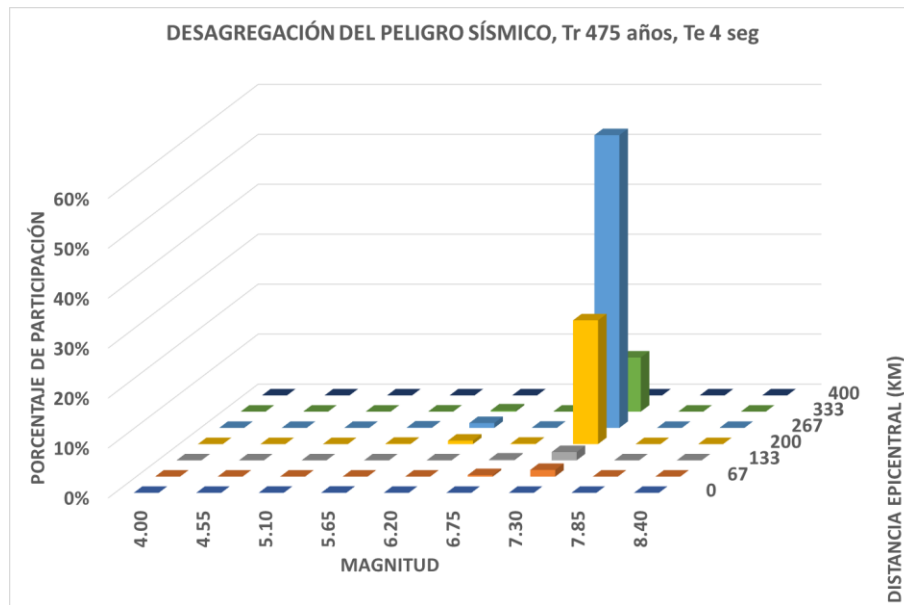


Figura 5.5.19 Desagregación del peligro sísmico de la ciudad de Morelia, Tr 475 años, Te 4 s.

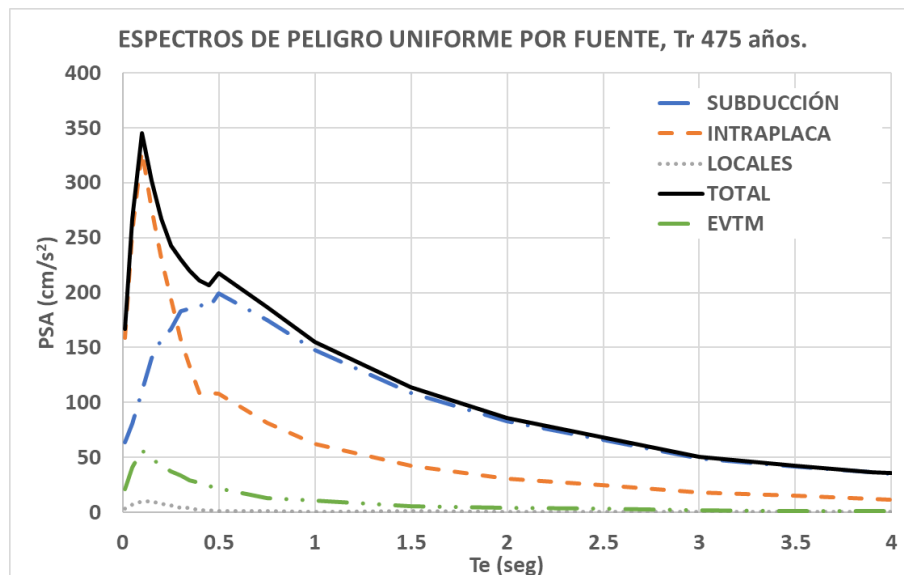


Figura 5.5.20 Espectros de Peligro Uniforme desagregados por fuente sísmica para un Tr de 475 años.

Como se observa, la desagregación del peligro sísmico concuerda con los resultados obtenidos del capítulo 3 y 4, donde la amplitud máxima de los espectros de respuesta de la RSN para sismos de fuente de subducción se genera en períodos (T_e) mayores a 0.30 s, que es donde existe el mayor porcentaje de participación de las fuentes de subducción; de igual forma en períodos menores a 0.30 s, las fuentes de intraplaca y locales tienen mayor participación, que concuerda con los espectros de respuesta registrados en la red para dichas fuentes.

Morelia, al ser una ciudad de suelo duro a semiduro, donde el periodo del suelo más grande en la ubicación de las estaciones sísmicas es de 0.45 segundos, la fuente de sismos intraplaca es la que mayor aportación tiene en la EPPS. Esto se deba a la cercanía de estas fuentes con la ciudad (65-200 km) y al umbral de la magnitud máxima que pueden generar estos eventos (M_w 7.9-8.2).

A pesar de que las fuentes locales (corticales y fallas potencialmente sísmicas en Morelia) se encuentran más cercanas a la ciudad e incluso dentro de ella, su aportación es menor, principalmente por el período de recurrencia que tienen y las magnitudes máximas que pueden alcanzar estos eventos (menores a los de subducción e intraplaca). Sin embargo, su aportación no es despreciable y deben ser consideradas con la importancia que tienen.

En la fig. 5.5.20 se resume también lo anteriormente mencionado; gráficamente se observan las amplitudes de mayor importancia que cada fuente sísmica tiene en el EPU total. Para periodos menores que 0.30 s, la fuente de intraplaca genera un EPU con la mayor amplitud de PSA, y para periodos mayores la fuente de subducción gobierna al EPU.

6. Propuestas de espectros de diseño sísmico de Morelia

El espectro de diseño es una herramienta necesaria en la ingeniería estructural para diseñar nuevas estructuras o evaluar la seguridad de estructuras existentes localizadas en zonas sísmicas. A diferencia de los espectros de respuesta, los de diseño se construyen con curvas suaves y líneas rectas para diferentes niveles de amortiguamiento. Los espectros de diseño son envolventes de los espectros de peligro uniforme y de los espectros de respuesta obtenidos en la red.

En México, se utilizan para el diseño sísmico de estructuras los espectros de diseño de la Ciudad de México y del capítulo de diseño por sismo del Manual de Obras Civiles de la CFE. En este trabajo, se analizarán las formas espectrales del reglamento de la Ciudad de México (NTC-DS, 2017), el Manual de Diseño de Obras Civiles (CFE, 2015) para proponer los espectros de diseño para la ciudad de Morelia. Se hace también una comparativa con los espectros de diseño para la ciudad de Morelia que contiene el manual de la CFE (2015) y las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de Morelia (NTC-RCM, 2019).

6.1. Espectros de diseño elásticos de acuerdo con los reglamentos de construcción vigentes en el país.

La construcción de los espectros de diseño en México se divide en tres o cuatro segmentos que dependen del periodo de vibrar (T_a , T_b y T_c). Parten de la aceleración máxima del terreno (a_0) siguiendo una recta con pendiente ascendente, hasta llegar al período T_a , donde inicia la meseta del espectro (línea horizontal desde el periodo T_a hasta T_b), el valor de PSA en esa meseta es el coeficiente sísmico (c). Para los períodos de la edificación T_e mayores que T_b , el espectro desciende parabólicamente. En las normas NTC-DS (2017) esta es la última curva del espectro de diseño. Para CFE (2015) existen dos segmentos posteriores al periodo T_b ; se proponen dos parábolas descendentes después de la meseta, entre T_b y T_c , y posterior al periodo T_c .

El espectro de diseño de PSA de las NTC-DS (2017), se construye utilizando las ecuaciones 6.1, 6.2 y 6.3, y los valores señalados de la tabla 6.1.

$$a = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ \beta c; & \text{si } T_a \leq T < T_b \\ \beta c p \left(\frac{T_b}{T} \right)^2; & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (6.1)$$

donde:

a_0 es la aceleración máxima del terreno (cm/s^2)

c es el coeficiente sísmico (cm/s^2)

T_a es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño (s)

T_b es el límite superior de la meseta del espectro de diseño (s)

T es el período estructural de la dirección del análisis (s)

β es el factor de amortiguamiento

ζ es el porcentaje de amortiguamiento crítico (1/100)

k es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales

p es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente calculado de la siguiente forma:

$$p = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T} \right)^2 \quad (6.2)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 - \left[1 - \left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda \right] \frac{T}{T_a}; & \text{si } T \leq T_a \\ \left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda; & \text{si } T_a < T < \tau T_b \\ 1 + \left[\left(\frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda - 1 \right] \left(\frac{\tau T_b}{T} \right); & \text{si } T \geq \tau T_b \end{cases} \quad (6.3)$$

Tabla 6.1.1 Valores de λ , ε y τ en función de T_s .

Período del sitio (s)			λ	ε	τ
	T_s	≤ 0.5	0.40	0.80	2.50
0.5 <	T_s	≤ 1.0	0.45	0.20	1.00
1.0 <	T_s	≤ 1.5	0.45	0.30	1.00
1.5 <	T_s	≤ 2.0	0.50	1.20	1.00
2.0 <	T_s	≤ 2.5	0.50	1.80	1.00
2.5 <	T_s	< 3.0	0.55	3.00	1.00
3.0 <	T_s	< 4.0	0.50	4.00	1.00

En el caso de CFE (2015) el procedimiento es muy similar, con la diferencia de algunos términos y que el espectro se divide en cuatro segmentos. Se construye siguiendo las ecuaciones 6.4, 6.5 y la tabla 6.2.

$$Sa\langle T_e, \beta \rangle = \begin{cases} a_0 + [c\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle - a_0] \frac{T_e}{T_a}; & \text{si } T_e < T_a \\ c\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle; & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^r; & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle \left(\frac{T_b}{T_c} \right)^r p_c \langle T_e \rangle \left(\frac{T_c}{T_e} \right)^2; & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (6.4)$$

donde:

T_c es el periodo de inicio de la segunda rama descendente (s)

T_e es el período estructural de la dirección del análisis (s)

p_c es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente calculado de la siguiente forma:

$$p_c \langle T_e \rangle = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T_e} \right)^2 \quad (6.5)$$

Tabla 6.1.2 Valores de los períodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño de CFE (2015)

Zona	Tipo de Terreno	T_a (s)	T_b (s)	T_c (s)	k	r
A	I	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	0.67
	III	0.3	2.0	2.0	0.5	1
B	I	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	0.67
	III	0.3	2.0	2.0	0.5	1
C	I	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	0.67
	III	0.2	2.0	2.0	0.5	1
D	I	0.1	0.6	2.0	1.5	0.5
	II	0.1	1.4	2.0	1.0	0.67
	III	0.1	2.0	2.0	0.5	1

Por su parte las NTC-RCM (2019), utiliza las expresiones 6.6 y la tabla 6.3 para la construcción de los espectros de diseño. Estas normas no incluyen en sus ecuaciones el factor de amortiguamiento por lo que se toma en general un amortiguamiento de 5% y un factor de amortiguamiento unitario. Se utilizaron en general las ecuaciones de las NTC-DS (2017) para la propuesta de este espectro.

$$a = \begin{cases} a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ c; & \text{si } T_a \leq T < T_b \\ c \left(\frac{T_b}{T} \right)^r; & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (6.6)$$

Tabla 6.1.3 Valores de la aceleración máxima del terreno y del coeficiente sísmico (1/g), los períodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño de las NTC-RCM (2019).

Zona	a_0	c	T_a (s)	T_b (s)	r
I	0.03	0.16	0.3	0.8	0.5
II	0.045	0.2	0.5	2	0.67

6.2. Parámetros para la elaboración de espectros de diseño en la Ciudad de Morelia

Los EPU obtenidos en el capítulo anterior (Figs. 5.4.9 – 5.4.13) y la mediana de los espectros de respuesta rotados (ROT) en todas las estaciones de la RSN contienen la información para determinar los parámetros de los espectros de diseño. Para ello, se procedió de la siguiente manera:

- Zonas de suelo en Morelia:
Dada la información obtenida hasta este capítulo y los EPU generados en las figs. 5.4.9 – 5.4.13, existen tres distintos EPU para la ciudad (hasta el momento). Las estaciones de: INIRENA, MEDICINA, PEDREGAL, PSICOLOGÍA, SAN NICOLÁS, SCT, UVAQ Y VETERINARA, pertenecerán a la Zona IA (Fig. 6.1), por ser el EPU de menores amplitudes de PSA; la zona IB (Fig. 6.2), caracterizada por la estación LUZ ALOU donde, a pesar de tener un período T_s muy bajo, presenta amplificaciones en el EPU y en los espectros de respuesta para períodos T_e muy bajos; finalmente, la zona II (Fig. 6.3), alrededor de la estación CMIC, donde se han presentado los mayores PGA y PSA en los espectros de respuesta y también en el espectro de peligro uniforme.

Esta propuesta de zonificación sísmica de Morelia se sustenta en la fig. 5.4.13, donde se observan las curvas de isoperíodos para la ciudad. La fig. 6.4 muestra el trazo de las zonas IB y II tomando como base las curvas de isoperíodos.

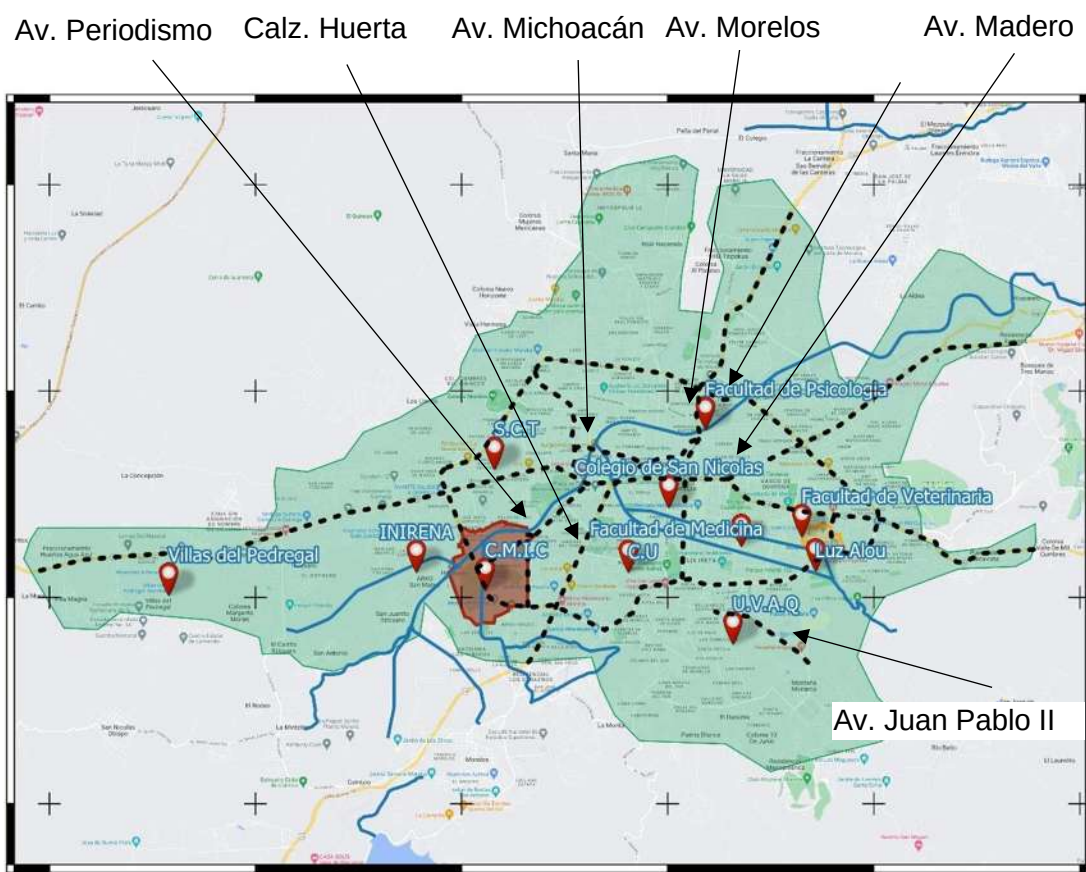


Figura 6.2.1 Contorno de la zona sísmica IA para la ciudad de Morelia.

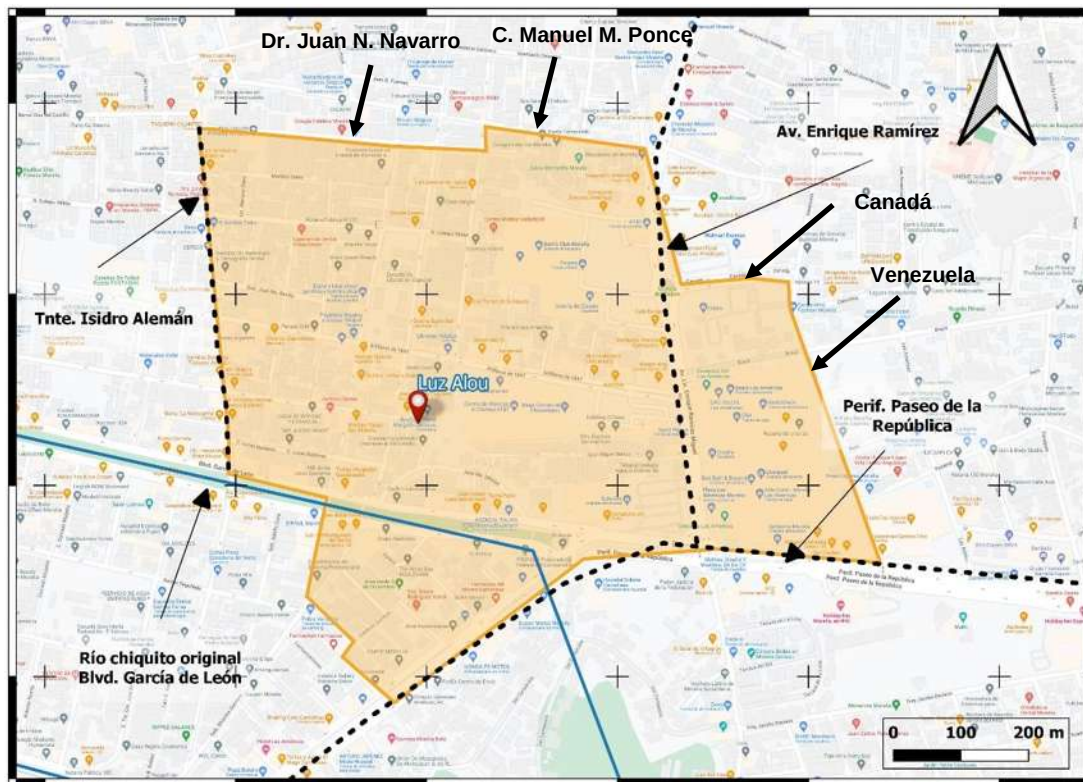


Figura 6.2.2 Contorno de la zona sísmica IB para la ciudad de Morelia.

- Aceleración máxima del suelo, a_0 (cm/s²):

Debido a que se sugiere zonificar Morelia en tres diferentes zonas sísmicas, se tendrán tres valores a_0 . El valor inicial de a_0 se obtiene de los EPU; sin embargo, a_0 se amplifica en la propuesta del espectro de diseño, con base en el incremento obtenido con los espectros de respuesta rotados (ROT₁₀₀) respecto de los espectros de respuesta calculados. Los valores de a_0 del EPU, el porcentaje de aumento dependiendo del ROT₁₀₀, y los valores incrementados de a_0 para las tres zonas de Morelia se muestran en la tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1 Valores de a_0 para las tres zonas sísmicas de Morelia y diferentes períodos de retorno. La segunda columna indica el periodo de retorno; la tercera, el valor de a_0 obtenido a partir del EPU; la cuarta, el valor de la mediana de los espectros ROT₁₀₀ respecto a los espectros de respuesta; la última columna es el valor de a_0 amplificado (producto de la tercera columna por la cuarta).

ZONA	Tr (años)	EPU a_0 (cm/s ²)	ROT100/ CALCULADO	Amplificado a_0 (cm/s ²)
ZONA IA	100	72	1.05	76
	250	120		126
	475	167		175
	1000	237		249
	2500	348		365
ZONA IB	100	75	1.05	79
	250	124		130
	475	171		179
	1000	243		255
	2500	357		375
ZONA II	100	103	1.08	111
	250	165		178
	475	224		242
	1000	311		336
	2500	443		478

- Meseta del espectro de diseño c (cm/s²):

La amplitud de la meseta del espectro de diseño, se calculó similarmente a la aceleración máxima del suelo. Se determinó el valor en los EPU y se amplificó por la relación del ROT₁₀₀ mostrada en la Tabla 6.2.2.

Tabla 6.2.2 Valores de c para las tres zonas de Morelia y los diferentes períodos de retorno

ZONA	Tr (años)	EPU c (cm/s ²)	ROT100/ CALCULADO	Amplificado c (cm/s ²)
ZONA IA	100	149	1.05	156
	250	248		260
	475	345		362
	1000	492		517
	2500	726		762
ZONA IB	100	184	1.05	193
	250	300		315
	475	412		433
	1000	579		608
	2500	843		886
ZONA II	100	210	1.08	227
	250	339		366
	475	461		498
	1000	642		694
	2500	923		997

- Forma funcional de los espectros de diseño:

Como se mencionó anteriormente, se utilizarán las formas funcionales propuestas en los espectros de diseño de las NTC-DS (2017), de las NTC-RCM (2019) y de las normas del manual de la CFE (2015). Para ello, es necesario analizar el conjunto de espectros de respuesta hasta ahora obtenidos en la Red Sísmica Nicolita. La tabla 6.2.3 resume los valores que se usarán en este trabajo. El valor de T_a , depende principalmente de la ubicación de la amplitud máxima de los EPU y del periodo de vibrar del suelo en la zona; T_b y T_c son función de la forma espectral de los espectros de respuesta registrados en las diferentes zonas de la ciudad.

En la zona IB, el valor de T_a es de 0.04 s, debido a que en ese periodo el EPU presente una ordenada alta de PSA. Como el espectro de diseño es una envolvente del EPU y de los espectros de respuesta, se opta por este valor tan bajo, que es razonable comparando con los periodos T_s que hay en esos sitios. A pesar que, para fines prácticos, podría iniciar el espectro de diseño con una recta horizontal en esta zona, se dejó la línea recta entre 0 y 0.04 s para conservar la forma funcional conocida por los ingenieros de la práctica profesional. El valor de T_b es de 1.0 s, ya que los espectros de respuesta presentan una amplitud considerable en el intervalo de periodos de 0.7-1.0 s. Finalmente se propone un valor de $T_c=2.0$ s por la forma funcional de la mediana de los espectros de respuesta hasta ahora registrado en esta zona.

Para las zonas IA y II, se conserva el valor de T_a de 0.1 s, que es donde se presenta la amplitud máxima del EPU. El valor de T_b de 1.0 cubre satisfactoriamente a los espectros de respuesta del sitio y a los espectros de peligro uniforme. Los valores de T_c propuestos son 2.5 s. Los valores de r y n que se proponen para los dos segmentos de parábola posteriores a T_b , son acordes con los espectros de respuesta obtenidos en cada zona.

Tabla 6.2.3 Valores de T_a , T_b , T_c , r , k y n para las tres zonas de Morelia.

ZONA	T_a (s)	T_b (s)	T_c (s)	r	k	n
ZONA IA	0.10	1.00	2.50	0.90	1.50	3.00
ZONA IB	0.04	1.00	2.00	1.10	1.50	2.50
ZONA II	0.10	1.00	2.50	1.80	1.50	2.00

Los demás parámetros necesarios para la elaboración de los espectros de diseño se muestran en las tablas 6.1.1 – 6.1.3.

6.3. Espectros de diseño

Siguiendo las indicaciones de los reglamentos del país (descritos en el capítulo 6.1) y usando los parámetros obtenidos en este trabajo para la ciudad de Morelia (capítulo 6.2), el siguiente paso es la construcción de los espectros de diseño. Se construyen los espectros y se comparan con los espectros de los tres reglamentos y manuales mencionados.

La elaboración del espectro de diseño propuesto en este trabajo se realizó con las formas funcionales del manual de la CFE (2015), con valores exponenciales r y n que se muestran en la tabla 6.2.3. La ecuación 6.7 presenta las expresiones para obtener los espectros de diseño de Morelia. El factor de amortiguamiento se calcula con las ecuaciones 6.2 y 6.3.

$$Sa\langle T_e, \beta \rangle = \begin{cases} a_0 + \left[c\beta \langle T_e, \zeta_e \rangle - a_0 \right] \frac{T_e}{T_a}; & \text{si } T_e < T_a \\ c\beta \langle T_e, \zeta_e \rangle; & \text{si } T_a \leq T_e < T_b \\ c\beta \langle T_e, \zeta_e \rangle \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^r; & \text{si } T_b \leq T_e < T_c \\ c\beta \langle T_e, \zeta_e \rangle \left(\frac{T_b}{T_c} \right)^r p_c \langle T_e \rangle \left(\frac{T_c}{T_e} \right)^n; & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (6.7)$$

La fig. 6.3.1 muestra los espectros de diseño para la zona IA de la ciudad de Morelia para un periodo de retorno de 475 años. Se presentan también los espectros de diseño que se obtienen al utilizar las expresiones de los reglamentos NTC-DS (2017), CFE (201) y NTC-

RCM (2019), escalando la amplitud máxima al valor correspondiente a esta zona de Morelia, para un amortiguamiento del 5%. Se dibujan los espectros escalados para comparar más claramente la forma del espectro de diseño de Morelia con las propuestas de los demás reglamentos y normas. Las líneas grises delgadas denotan la mediana de las los espectros de respuesta (escalados al EPU) de las nueve estaciones sísmicas de la red que se encuentran en zona IA, la línea discontinua naranja es el EPU.

De acuerdo con esta figura, la forma del espectro de diseño usando las NTC-DS (2017) para periodos mayores que 1.5 s, es superado por los espectros de respuesta de algunas estaciones. Por su parte, los espectros de la CFE (2015) y NTC-RCM (2019) se encuentran muy por encima de los espectros de respuesta y del EPU para periodos mayores que 1 s. La diferencia se encuentra en el valor del exponencial de la parábola; mientras que para NTC-DS (2017) es de 2.0, para CFE (2015) y NTC-RCM (2019) es de 0.5.

Las figs. 6.3.2 y 6.3.3 muestran los espectros de diseño para las zonas IB y II respectivamente, la simbología de las líneas es la misma que la descrita para la fig. 6.3.1. Los espectros de diseño mostrados en estas figuras se proponen a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, usando las formas funcionales de los reglamentos actuales en México, pero ajustando los parámetros a los espectros de respuesta de los registros sísmicos hasta obtenidos en Morelia.

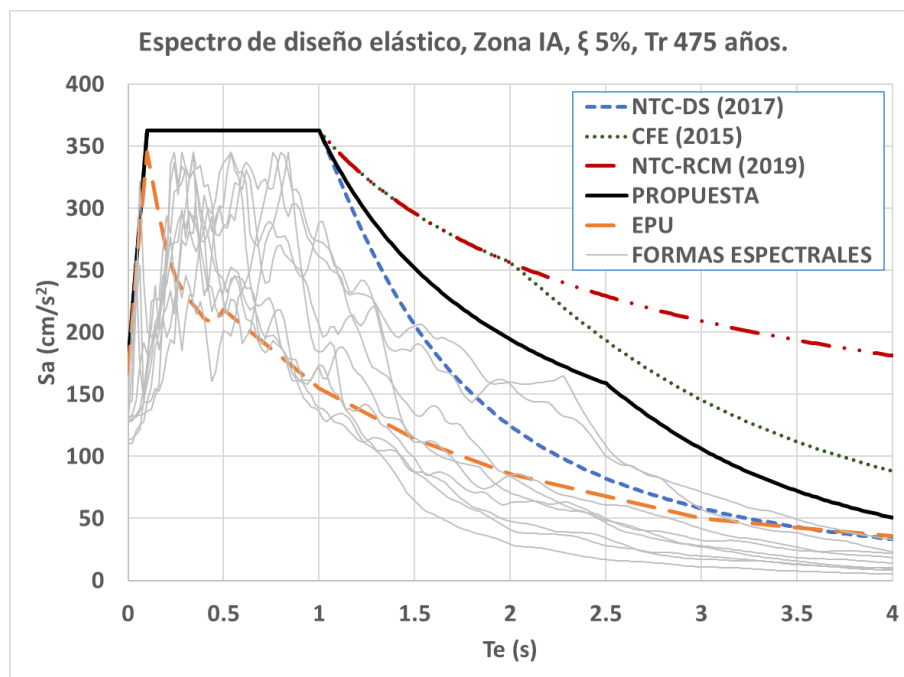


Figura 6.3.1 Espectro de diseño elástico para la zona IA con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (Tr) de 475 años.

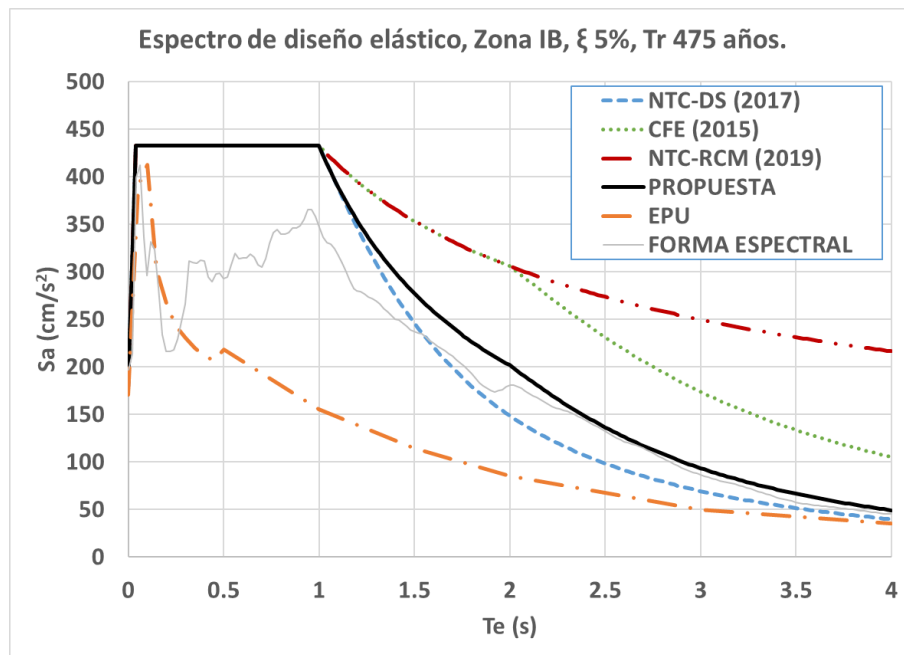


Figura 6.3.2 Espectro de diseño elástico para la zona IB con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (T_r) de 475 años.

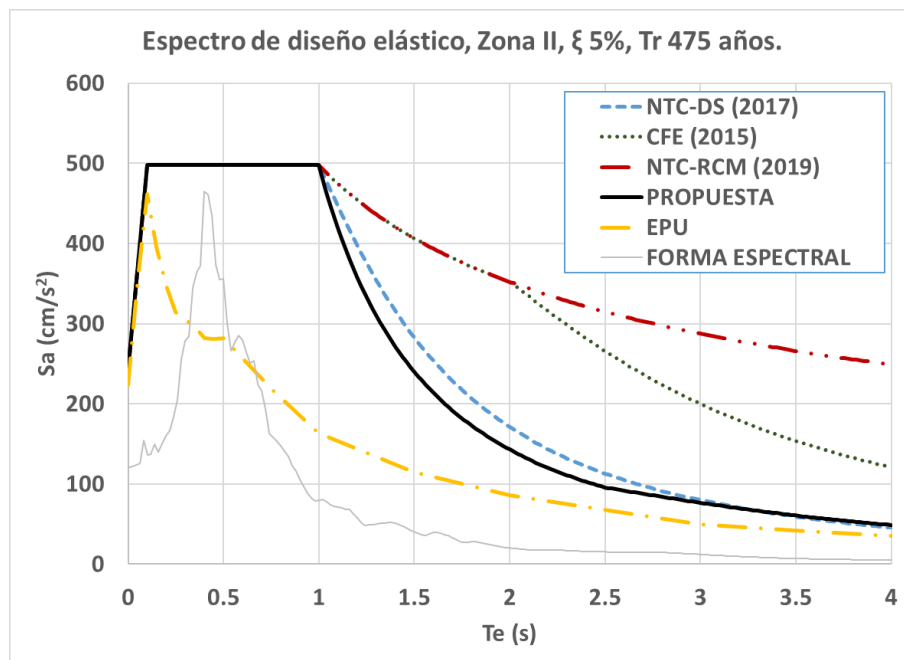


Figura 6.3.3 Espectro de diseño elástico para la zona II con amortiguamiento del 5% y periodo de retorno (T_r) de 475 años.

Las figs. 6.3.4 y 6.3.5 muestran los espectros de diseño propuestos en este trabajo y los existentes en las NRC-RCM (2019) y en el manual de la CFE (2015). El espectro de las

NTC-RCM (2019) tiene ordenadas excesivamente pequeñas, mientras que el espectro de la CFE (2015) queda ligeramente por debajo del propuesto para la zona IA. La diferencia entre la CFE (2015) y los resultados de este trabajo radica en la actualización de los parámetros de sismicidad del país, particularmente del Eje Volcánico Trans-mexicano y de la incorporación, en la evaluación del peligro sísmico, de dos fallas locales en la ciudad de Morelia. Adicionalmente, la Red Sísmica Nicolaita permitió calcular cocientes espectrales de diferentes sitios de la ciudad, que proporcionó lo necesario para proponer los espectros en las zonas con amplificaciones del movimiento sísmico. En las tablas 6.3.1 y 6.3.2 se muestran los porcentajes de incremento en a_0 y c para los espectros de diseño propuestos, con respecto a los ya mencionados.

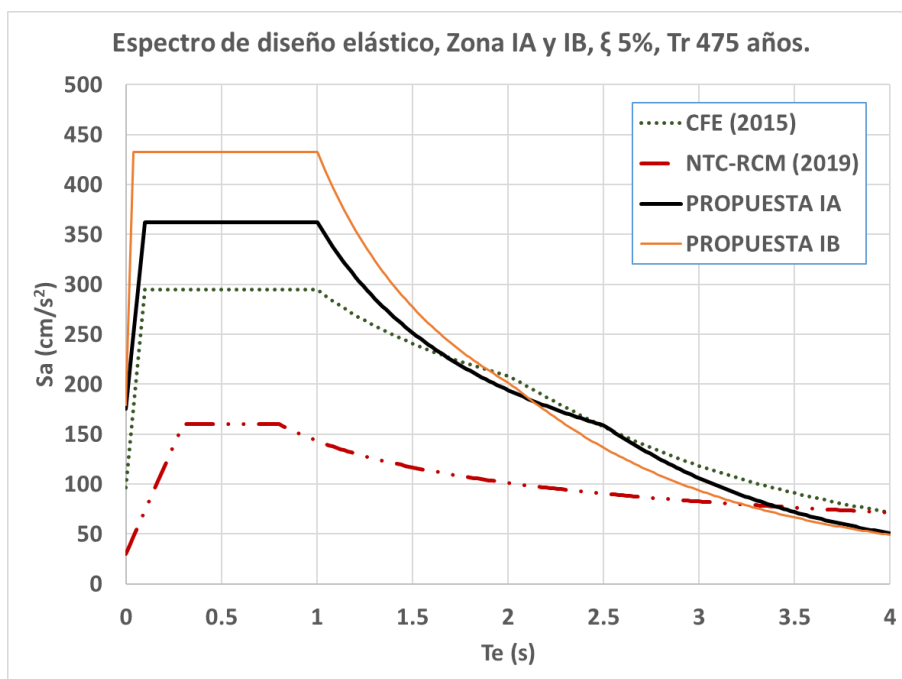


Figura 6.3.4 Espectros de diseño elástico para las zonas IA y IB y espectros propuestos en CFE (2015) y NTC-RCM (2019) para zona I. Tr 475 años y $\zeta = 5\%$.

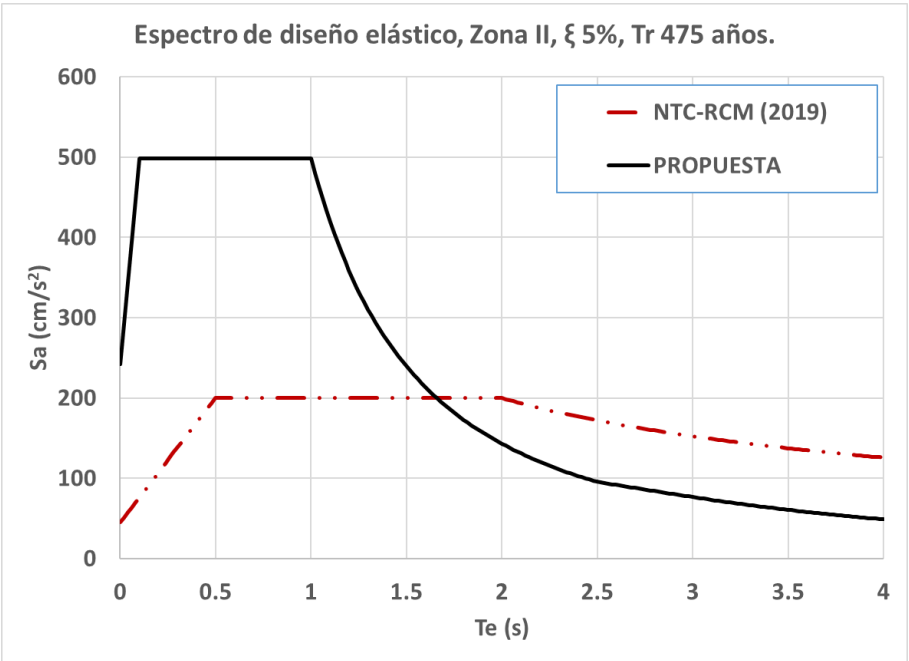


Figura 6.3.5 Espectro de diseño para la zona II y espectro propuesto en NTC-RCM (2019) para zona II. Tr 475 años y $\zeta = 5\%$.

Tabla 6.3.1 Porcentajes de incremento de a_0 de los espectros propuestos con respecto a CFE (2015) y NTC-RCM (2019).

a_0	ZONA IA	ZONA IB	ZONA II
CFE (2015)	81%	85%	-
NTC-RCM (2019)	485%	499%	438%

Tabla 6.3.2 Porcentajes de incremento de c de los espectros propuestos con respecto de CFE (2015) y NTC-RCM (2019).

c	ZONA IA	ZONA IB	ZONA II
CFE (2015)	23%	47%	-
NTC-RCM (2019)	126%	170%	149%

Las figs. 6.3.6 – 6.3.8 presentan los espectros de diseño elásticos para los diferentes periodos de retorno usados en este trabajo (100, 250, 475, 1000 y 2500 años). La fig. 6.3.9 muestra los tres espectros de diseño para la ciudad de Morelia.

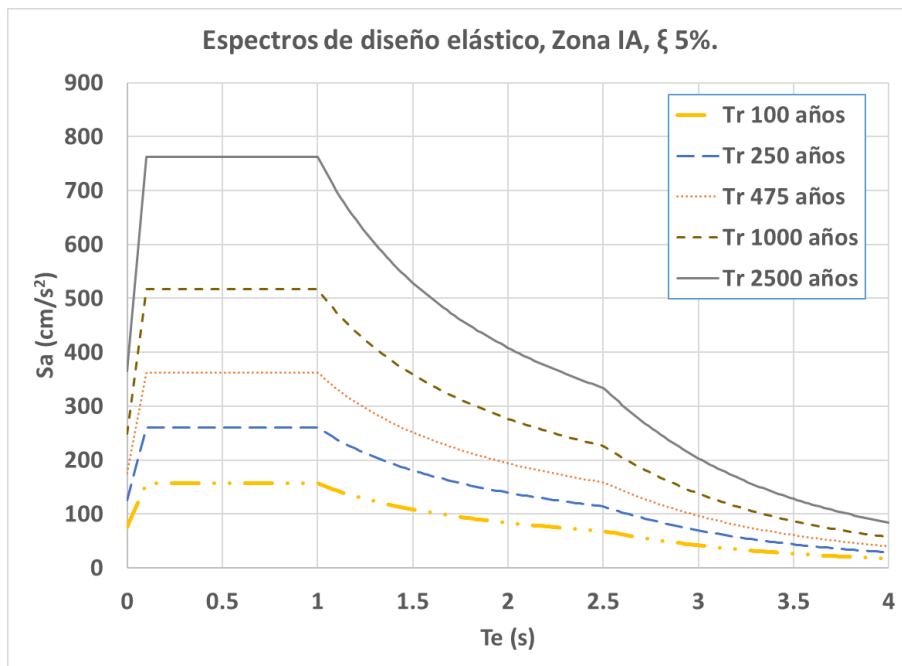


Figura 6.3.6 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona IA.

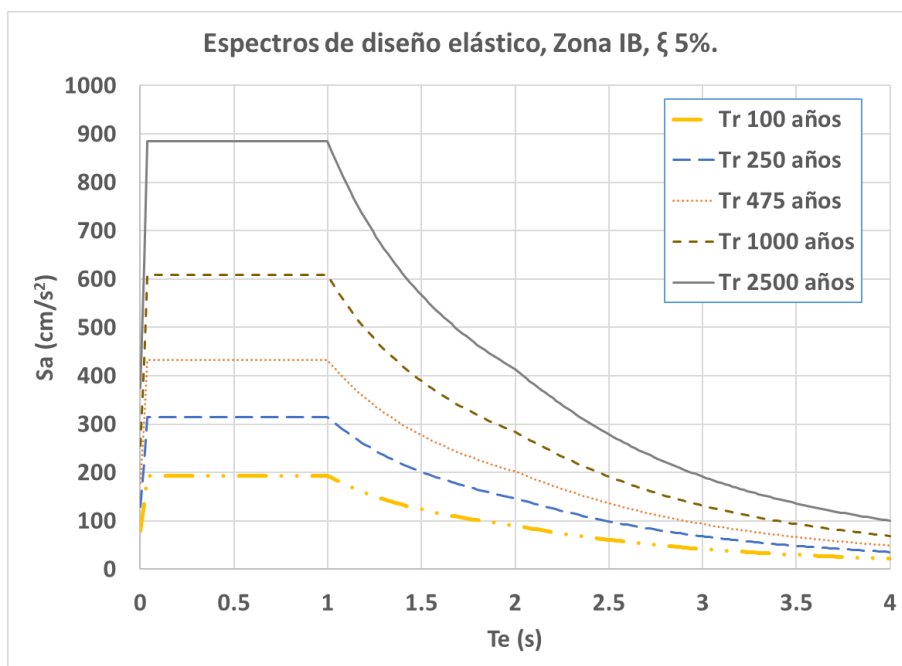


Figura 6.3.7 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona IB.

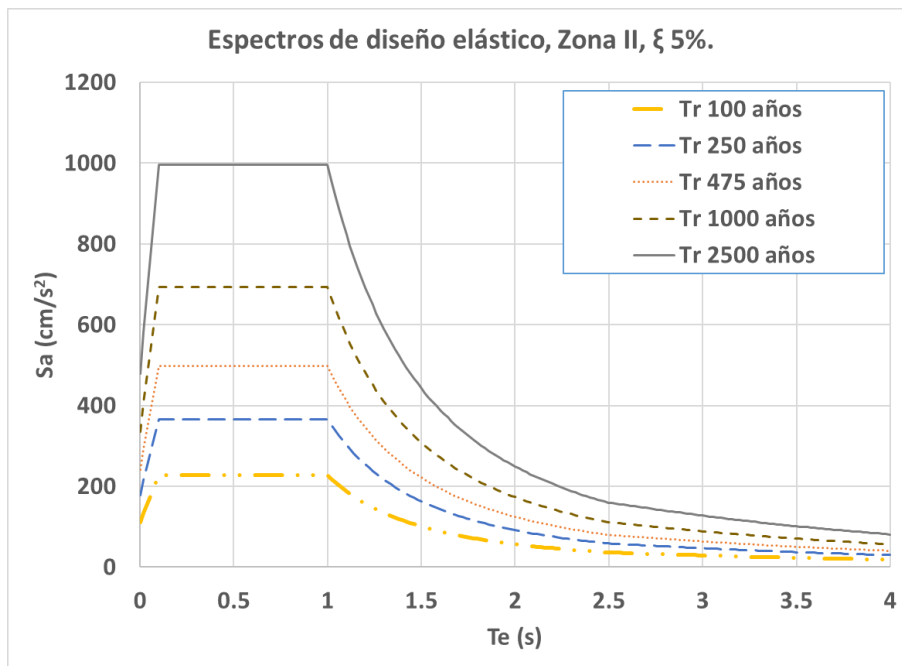


Figura 6.3.8 Espectros de diseño elástico para diferentes periodos de retorno, zona II.

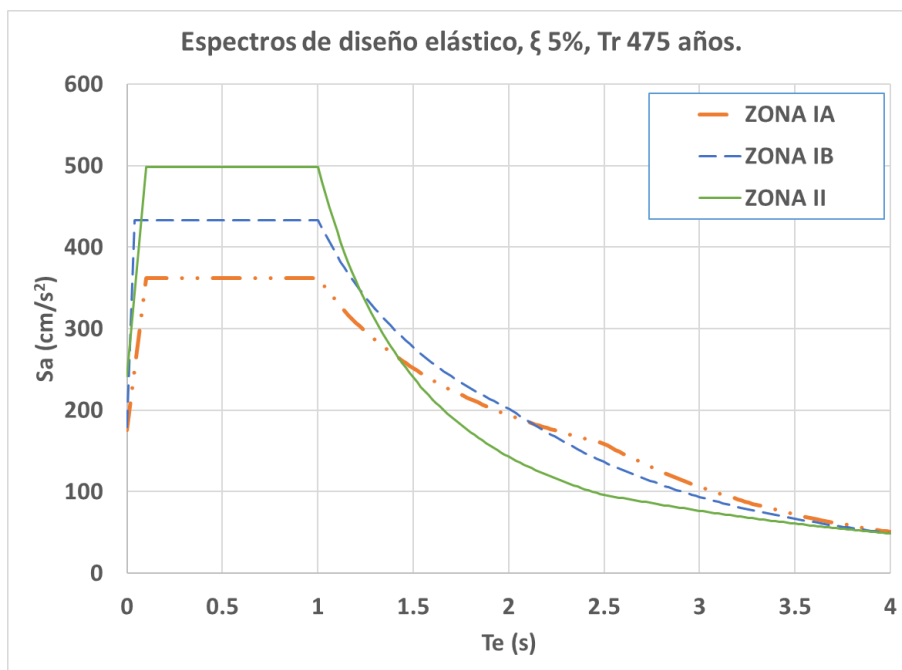


Figura 6.3.9 Espectros de diseño elástico para las tres zonas sísmicas de la ciudad de Morelia. Tr 475 años.

6.4. Intensidades máximas esperadas en Morelia para 475, 1000 y 2500 años de periodo de retorno.

Como hemos mencionado con anterioridad, en la RSN existe una estación ubicada en terreno duro (INIRENA) la cual es de mucha ayuda para la obtención de funciones de transferencia y cocientes espectrales. Los cocientes espectrales proporcionan información de la respuesta esperada en las estaciones sísmicas con base en la información de una de ellas, en este caso INIRENA. Se usan también para estimar las intensidades máximas esperadas en las distintas ubicaciones de la RSN para diferentes periodos estructurales, $T_e=0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, \text{ y } 1.2$ s. Se eligen estos periodos estructurales por la gran cantidad de estructuras existentes en la ciudad con periodo corto y también por ser los que mayor intensidad presentan. Los periodos de 1.0 y 1.2 se escogen por la gran cantidad de puentes vehiculares que se están construyendo en Morelia.

La metodología para calcular dichas intensidades máximas en este trabajo, fue la siguiente:

- Seleccionar la estación de la red con menor amplificación de intensidad, en este caso es INIRENA,
- Escalar el espectro promedio de respuesta de la estación seleccionada (INIRENA), con el PGA del espectro de diseño elástico en roca para los periodos de retorno de 475, 1000 y 2500 años,
- Determinar las intensidades del espectro promedio de respuesta de INIRENA en los periodos ($T_e 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, \text{ y } 1.2$), y, mediante las funciones de transferencia, calcular las intensidades esperadas en las demás estaciones de la red.

La figura 6.4.1 ilustra los espectros promedios de INIRENA escalados al espectro de diseño de roca para 475 y 2500 años. En la tabla 6.4.1 y 6.4.2 se muestran los valores de intensidad máxima esperada de las once estaciones sísmicas de la red para 475, 1000 y 2500 años, respectivamente.

Las intensidades esperadas en las demás estaciones se obtienen como el producto de la intensidad en la estación de INIRENA, multiplicada por su función de transferencia correspondiente.

Con estos valores, se obtuvieron mapas de calor de las intensidades, los cuales son de mucha ayuda para identificar visualmente el posible comportamiento de la ciudad ante un posible evento extraordinario, estos mapas se muestran en las figuras 6.4.2 – 6.4.20.

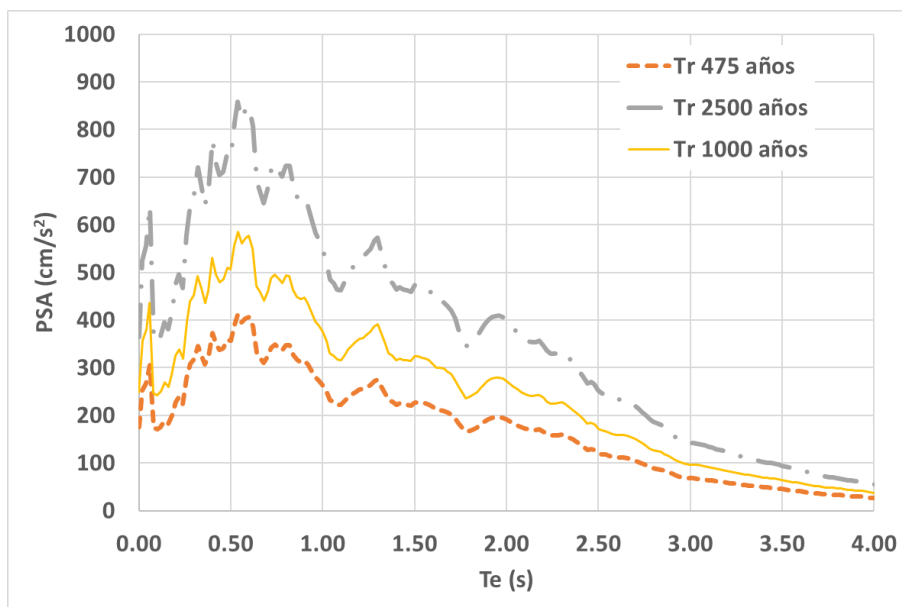


Figura 6.4.1 Espectros de respuesta promedios de la estación INIRENA, escalados a los espectros de diseño en roca para un Tr de 475, 1000 y 2500 años.

Tabla 6.4.1 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 475 años.

Te (s)	INTENSIDAD MÁXIMA ESPERADA DE PSEUDOACELERACIÓN (cm/s²), Tr 475 años										
	CMIC	CU	INIRENA	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0	1054.37	353.49	175.00	516.17	350.73	209.71	439.70	239.76	175.00	259.50	279.89
0.1	1019.47	392.66	170.34	671.49	394.76	235.31	432.16	297.16	170.34	281.27	279.23
0.2	1351.65	506.33	228.39	302.06	509.02	401.86	715.46	549.13	255.80	510.46	427.56
0.5	3023.40	645.09	356.39	486.00	906.67	396.77	886.34	496.50	358.59	456.30	484.04
1	875.72	616.61	264.05	314.83	378.14	308.23	472.54	256.34	264.22	421.83	386.45
1.2	672.34	509.04	259.26	272.91	412.36	319.01	412.81	272.88	269.42	328.50	294.23

Tabla 6.4.2 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 1000 años.

Te (s)	INTENSIDAD MÁXIMA ESPERADA DE PSEUDOACELERACIÓN (cm/s2), Tr 1000 años										
	CMIC	CU	INIRENA	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0	1499	503	249	734	499	298	625	341	249	369	398
0.1	1450	558	242	955	561	335	615	423	242	400	397
0.2	1922	720	325	430	724	571	1017	781	364	726	608
0.5	4299	917	507	691	1289	564	1260	706	510	649	688
1	1245	877	375	448	538	438	672	365	376	600	550
1.2	838	635	323	340	514	398	515	340	336	410	367

Tabla 6.4.3 Intensidades máximas de pseudo aceleración en las once estaciones sísmicas de la red para un Tr de 2500 años.

Te (s)	INTENSIDAD MÁXIMA ESPERADA DE PSEUDOACELERACIÓN (cm/s2), Tr 2500 años										
	CMIC	CU	INIRENA	LUZ ALOU	MEDICINA	PEDREGAL	PSICOLOGÍA	SAN NICOLÁS	SCT	UVAQ	VETERINARIA
0	2201.52	738.09	365.40	1077.77	732.32	437.87	918.09	500.62	365.40	541.84	584.42
0.1	2126.33	818.97	355.29	1400.53	823.35	490.80	901.36	619.79	355.29	586.64	582.40
0.2	2819.16	1056.06	476.36	630.01	1061.67	838.17	1492.25	1145.32	533.53	1064.68	891.78
0.5	6305.94	1345.46	743.32	1013.66	1891.05	827.54	1848.65	1035.56	747.91	951.71	1009.56
1	1826.49	1286.07	550.74	656.64	788.68	642.87	985.59	534.66	551.09	879.82	806.03
1.2	1402.30	1061.72	540.75	569.22	860.08	665.36	861.01	569.15	561.93	685.17	613.68

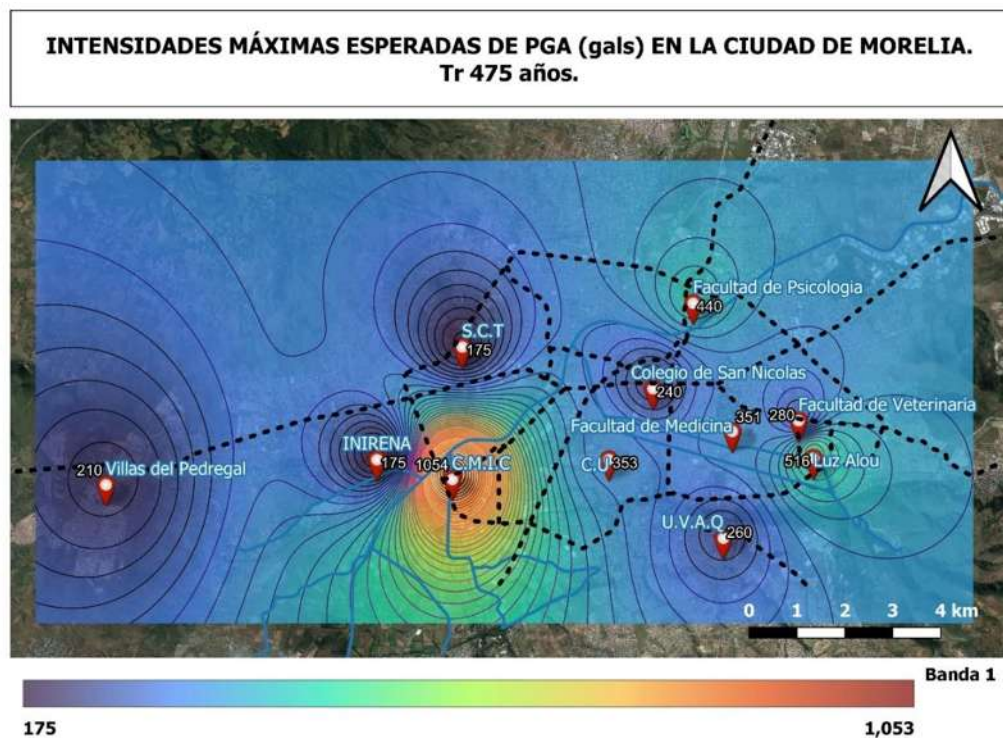


Figura 6.4.2 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

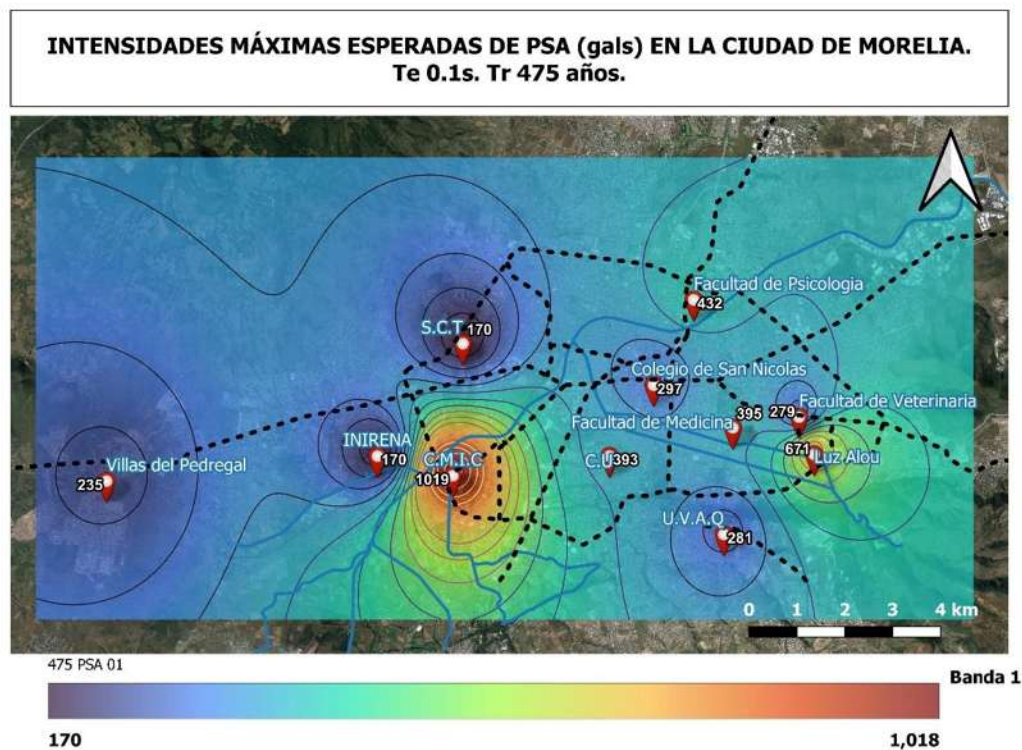


Figura 6.4.3 Intensidades de PSA (Te 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

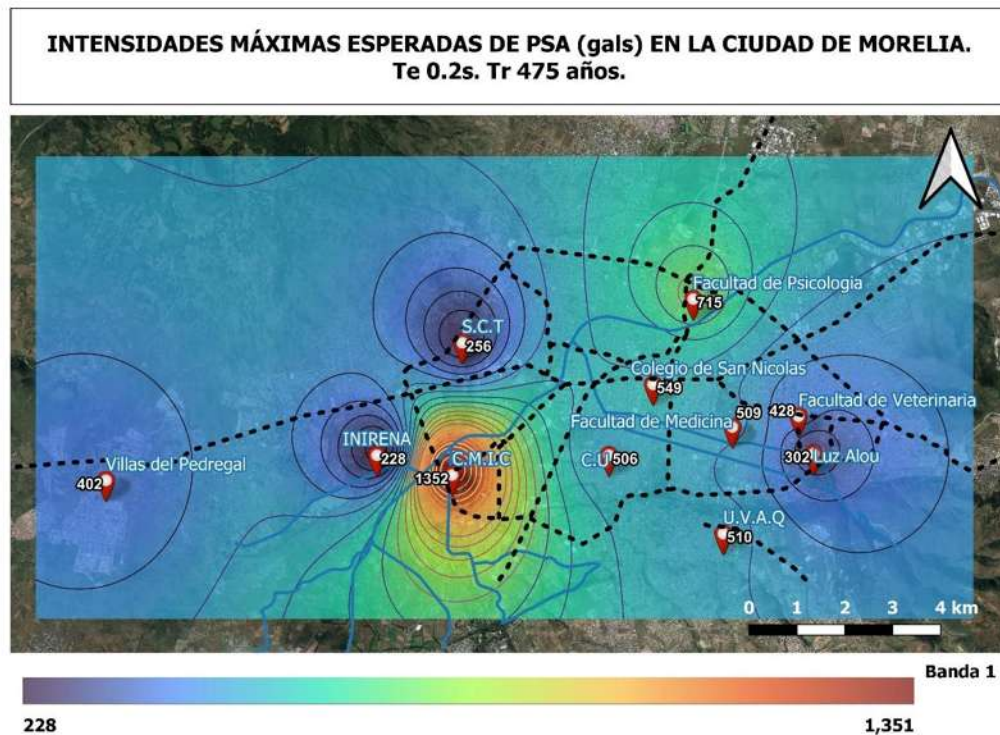


Figura 6.4.4 Intensidades de PSA (Te 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

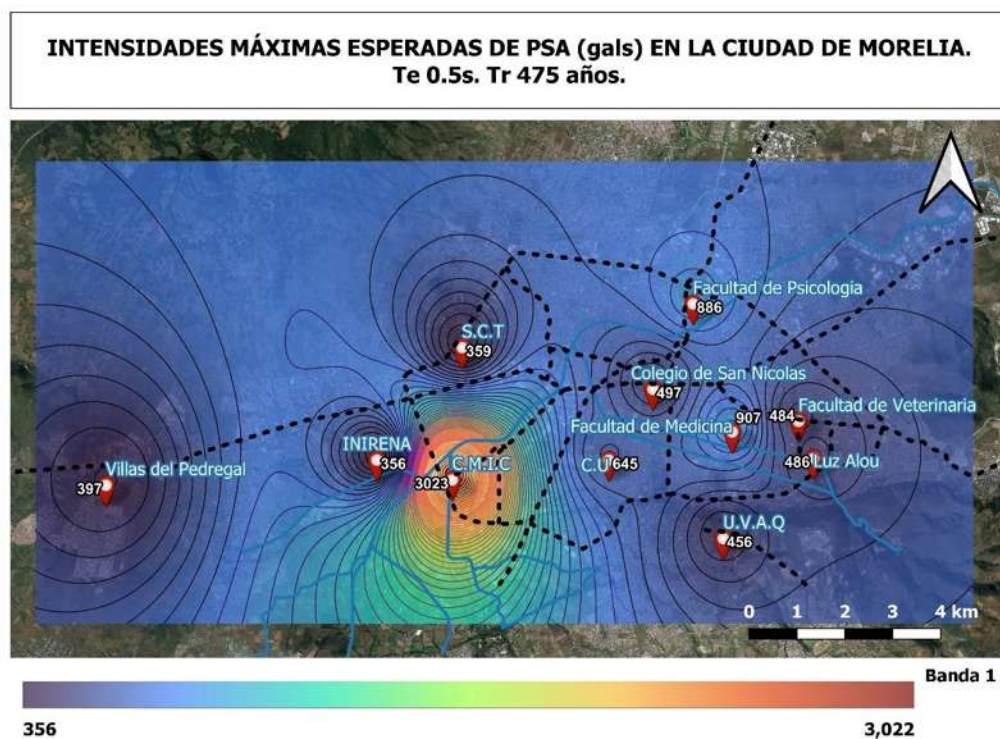


Figura 6.4.5 Intensidades de PSA (Te 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

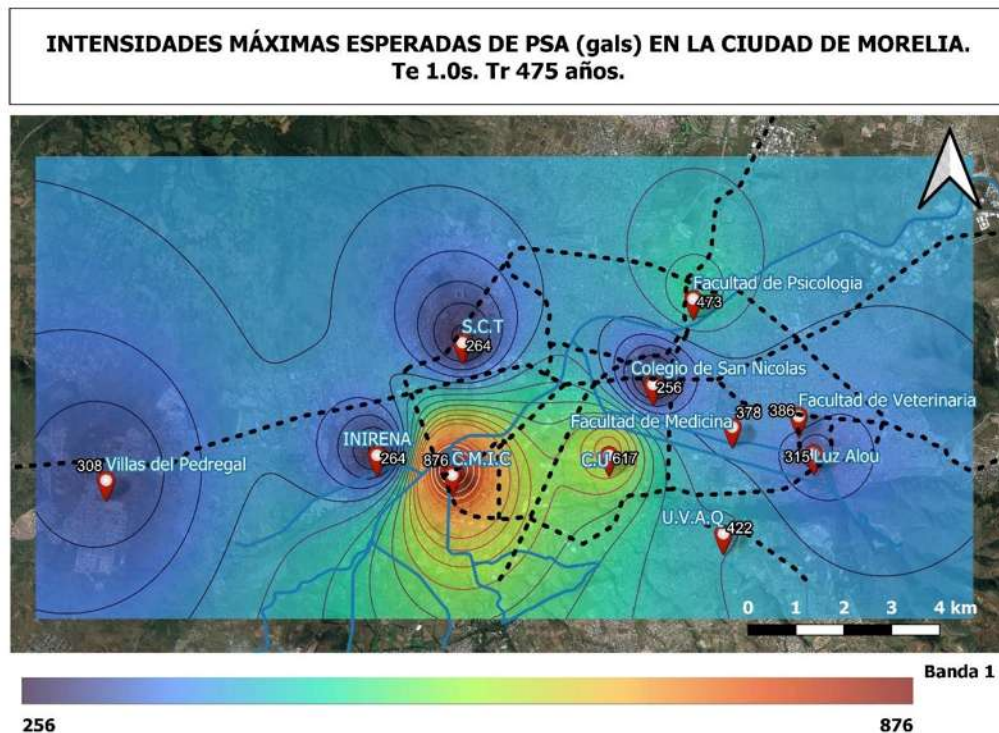


Figura 6.4.6 Intensidades de PSA (Te 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

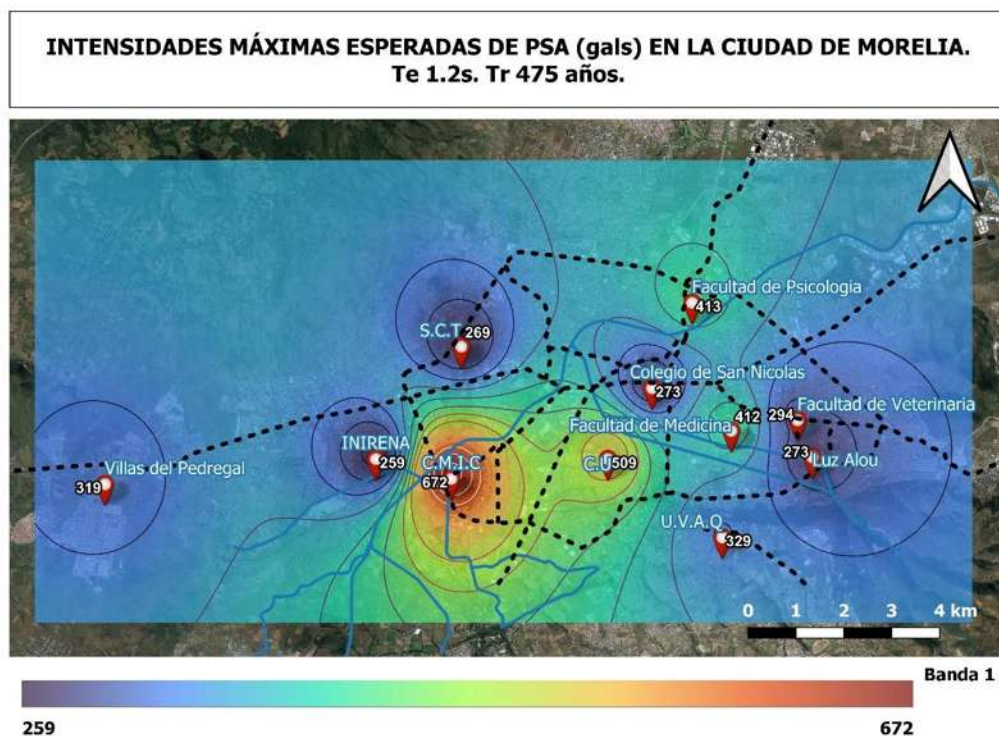


Figura 6.4.7 Intensidades de PSA (Te 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 475 años.

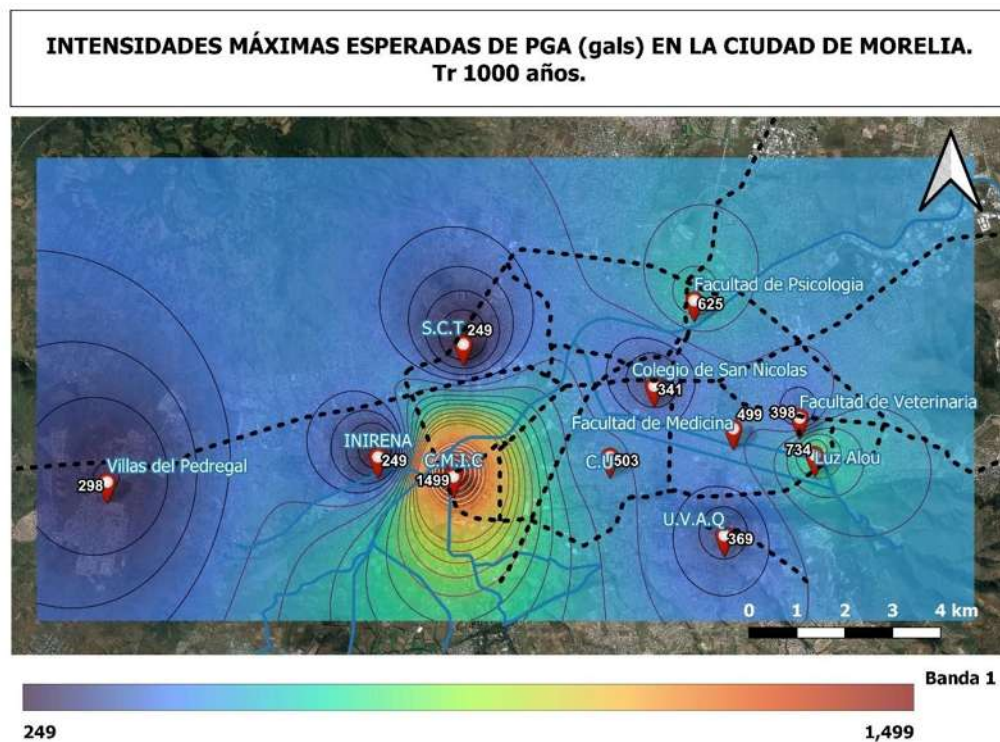


Figura 6.4.8 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.

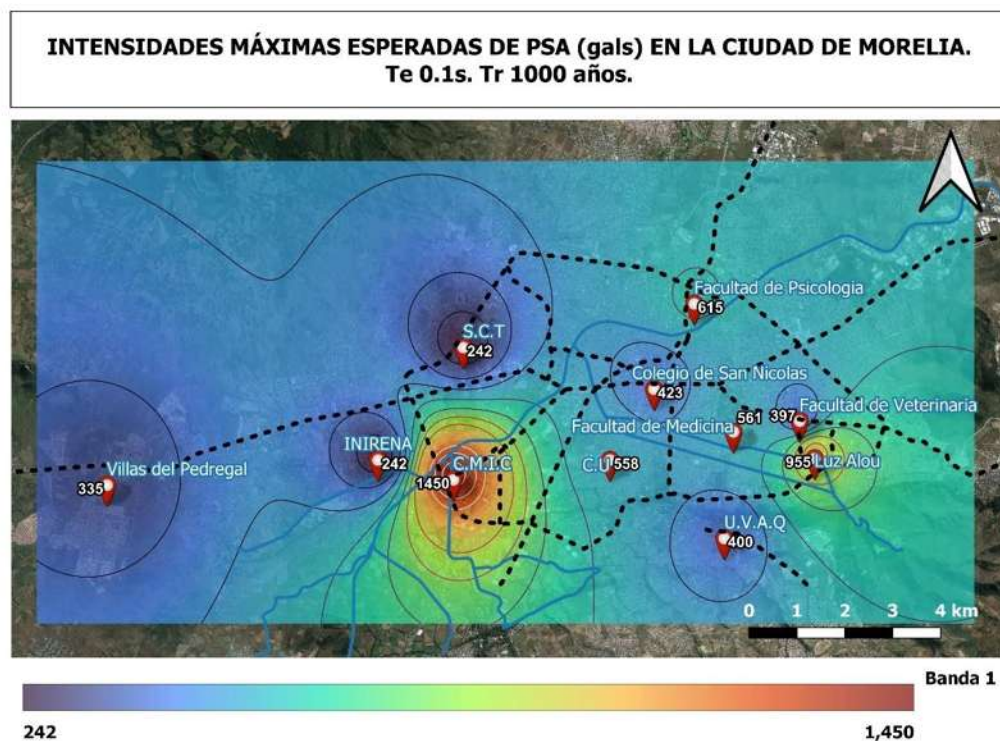


Figura 6.4.9 Intensidades de PSA (T_e 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un T_r de 1000 años.

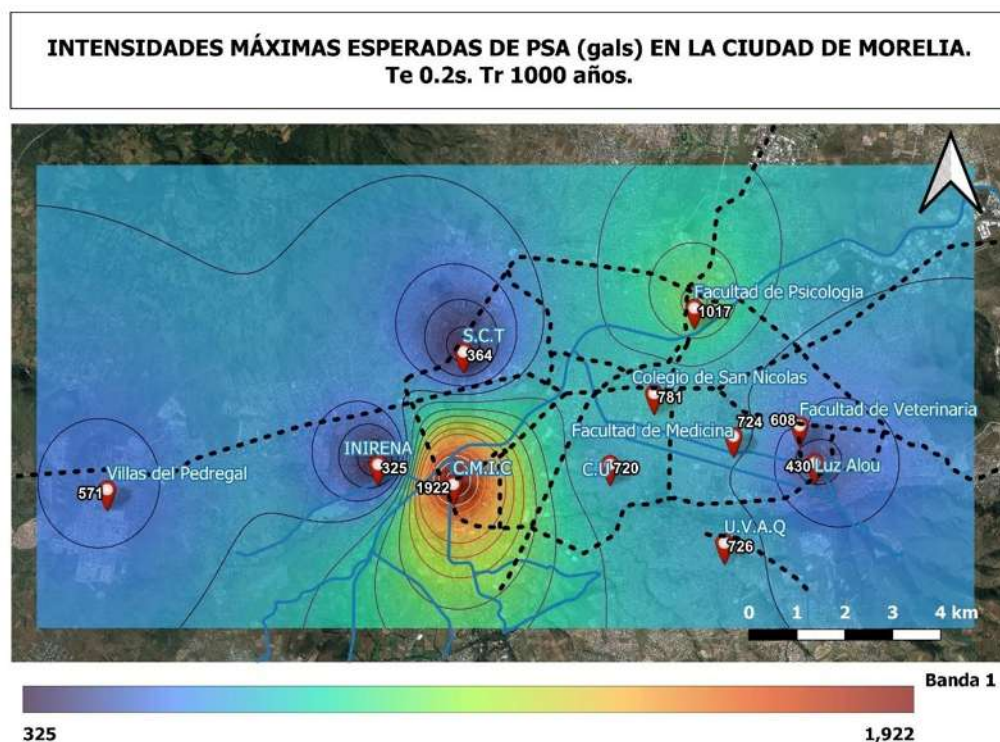


Figura 6.4.10 Intensidades de PSA (Te 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.

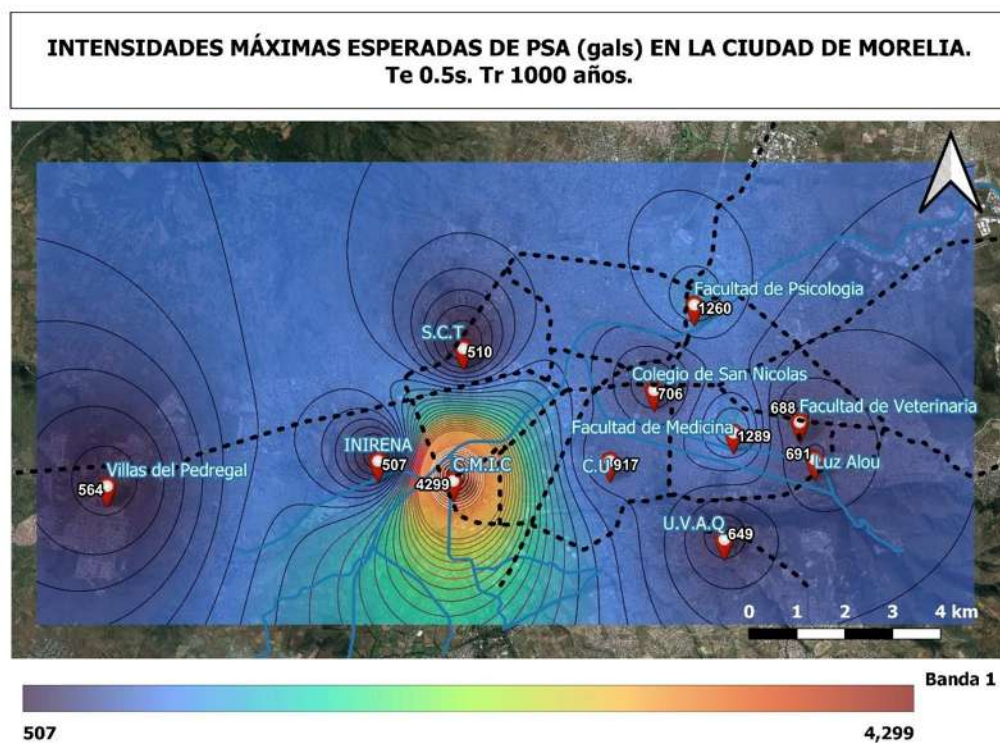


Figura 6.4.11 Intensidades de PSA (Te 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.

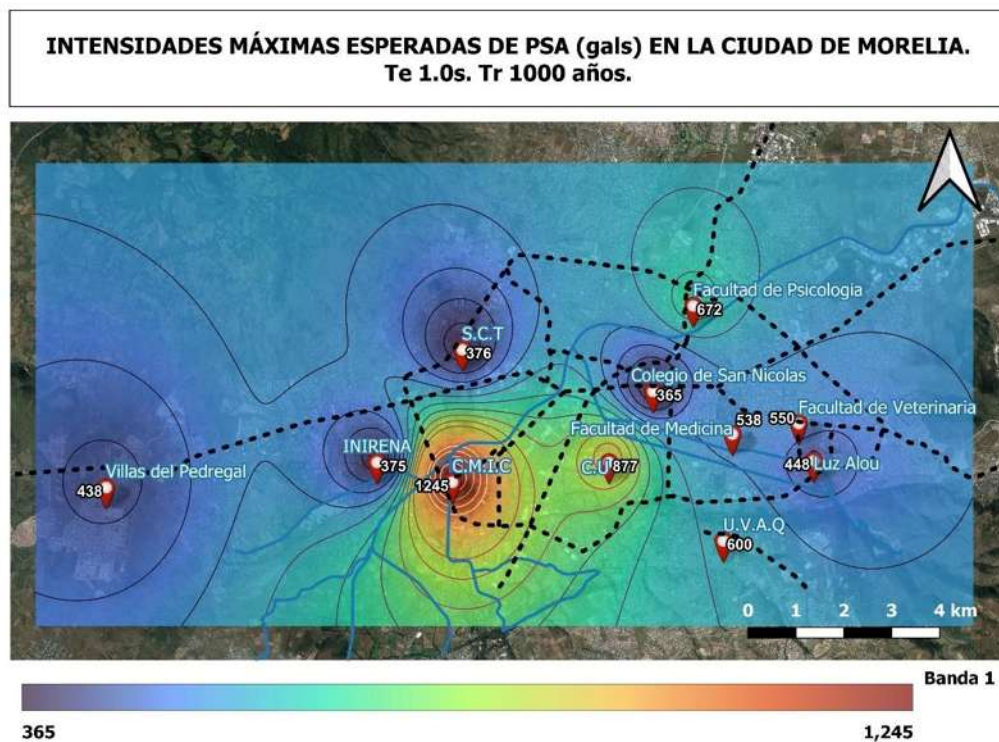


Figura 6.4.12 Intensidades de PSA (Te 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.

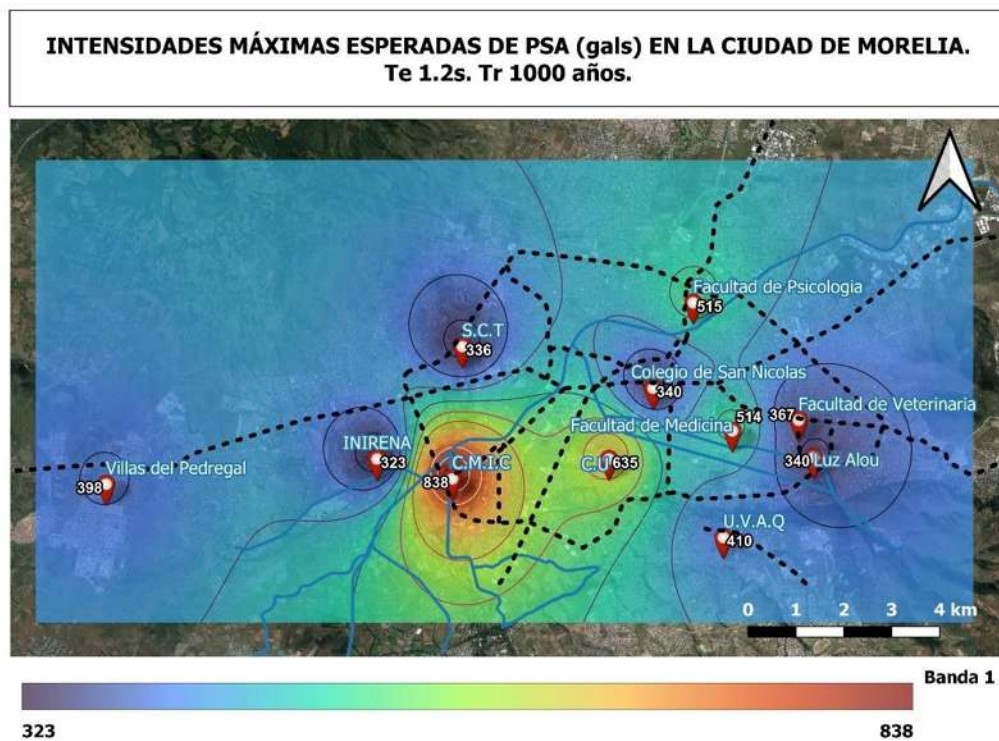


Figura 6.4.13 Intensidades de PSA (Te 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 1000 años.

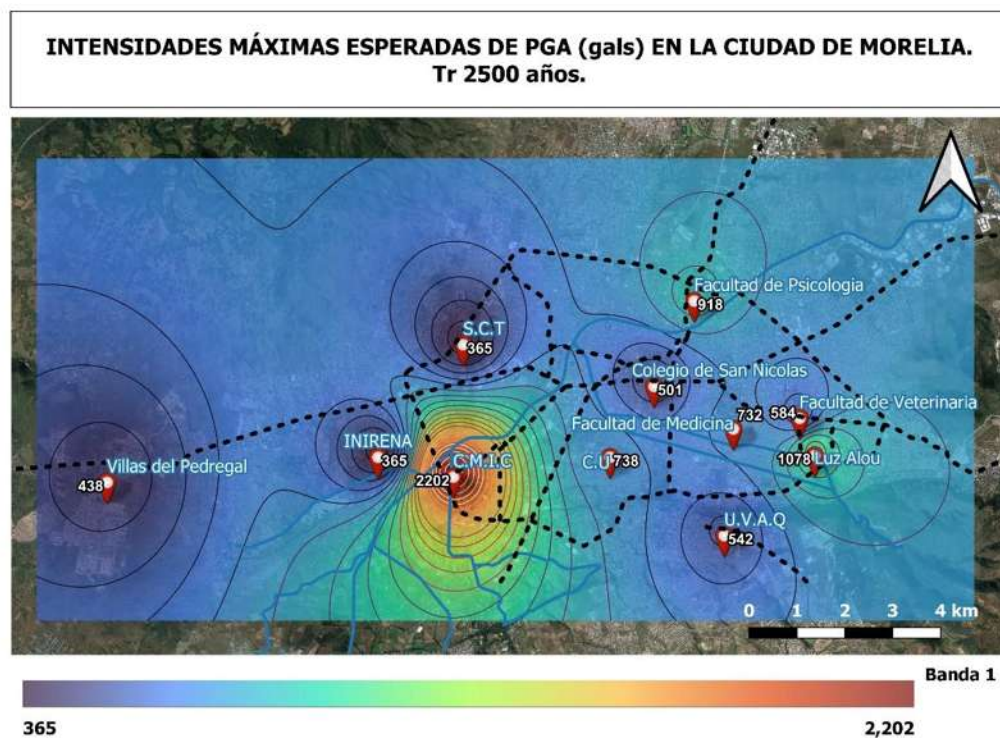


Figura 6.4.14 Intensidades de PGA máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

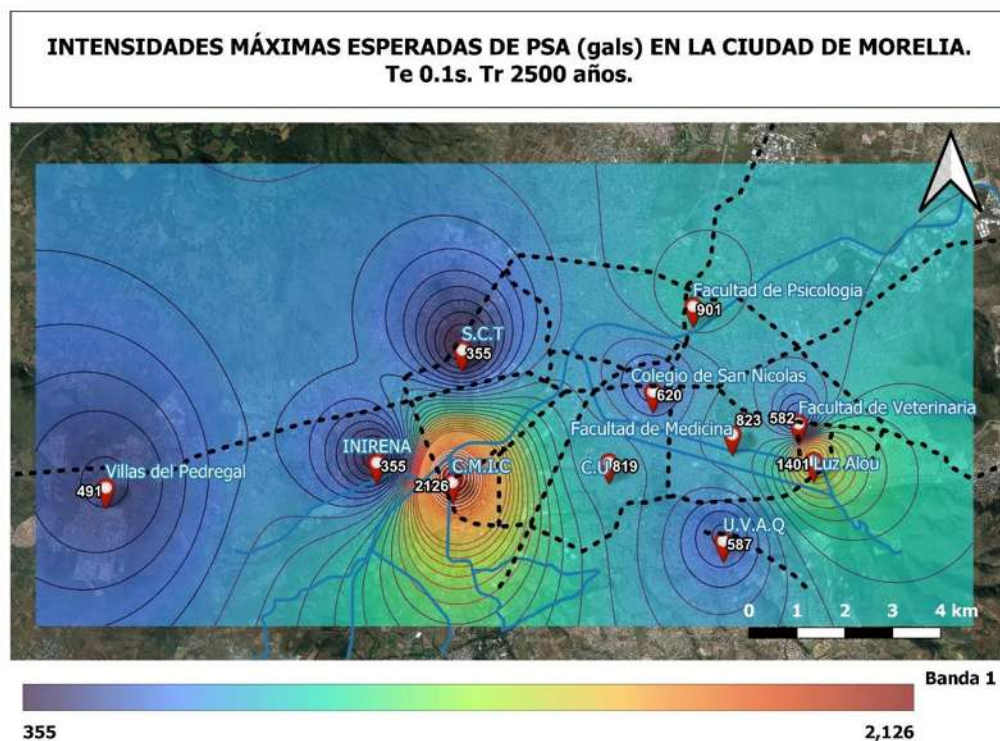


Figura 6.4.15 Intensidades de PSA (Te 0.1s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

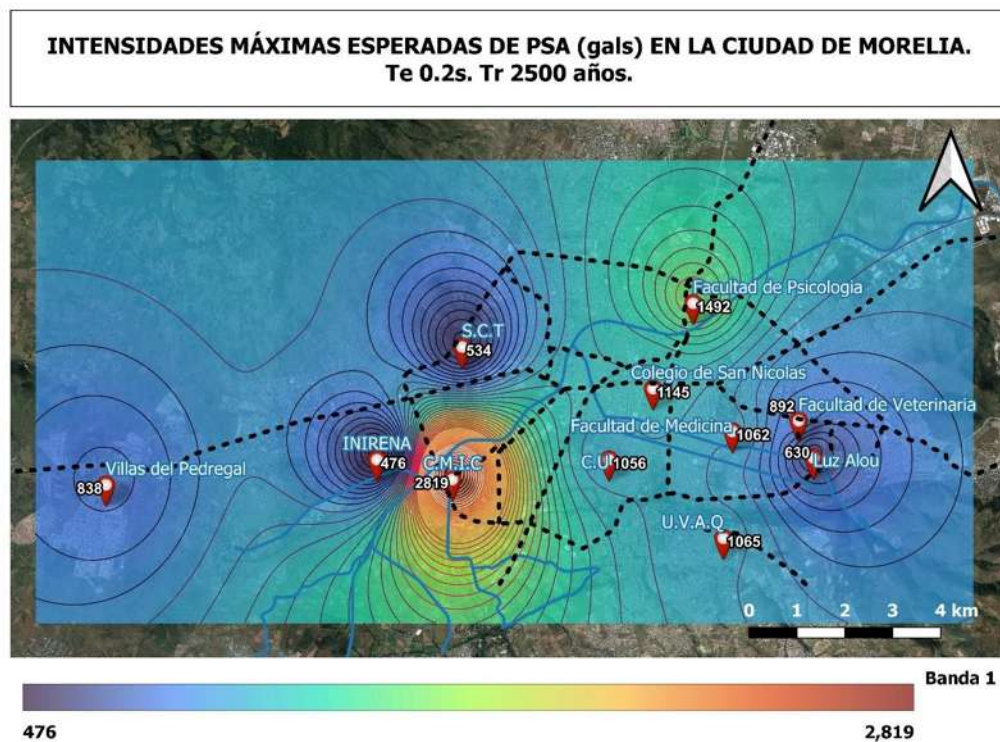


Figura 6.4.16 Intensidades de PSA (Te 0.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

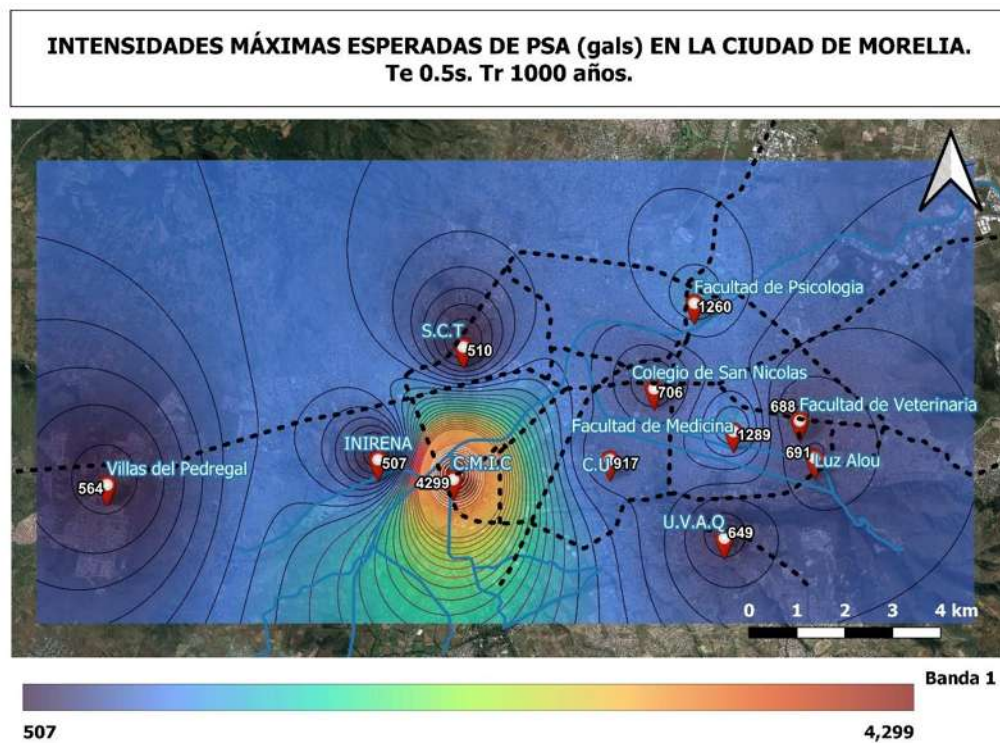


Figura 6.4.17 Intensidades de PSA (Te 0.5s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

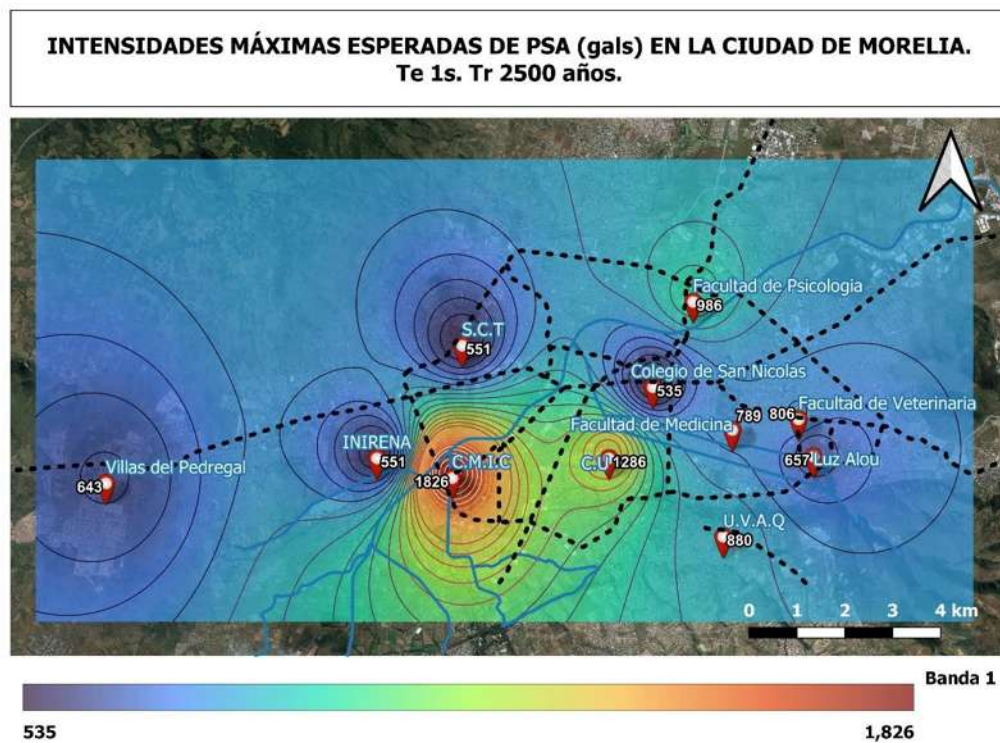


Figura 6.4.18 Intensidades de PSA (Te 1.0s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

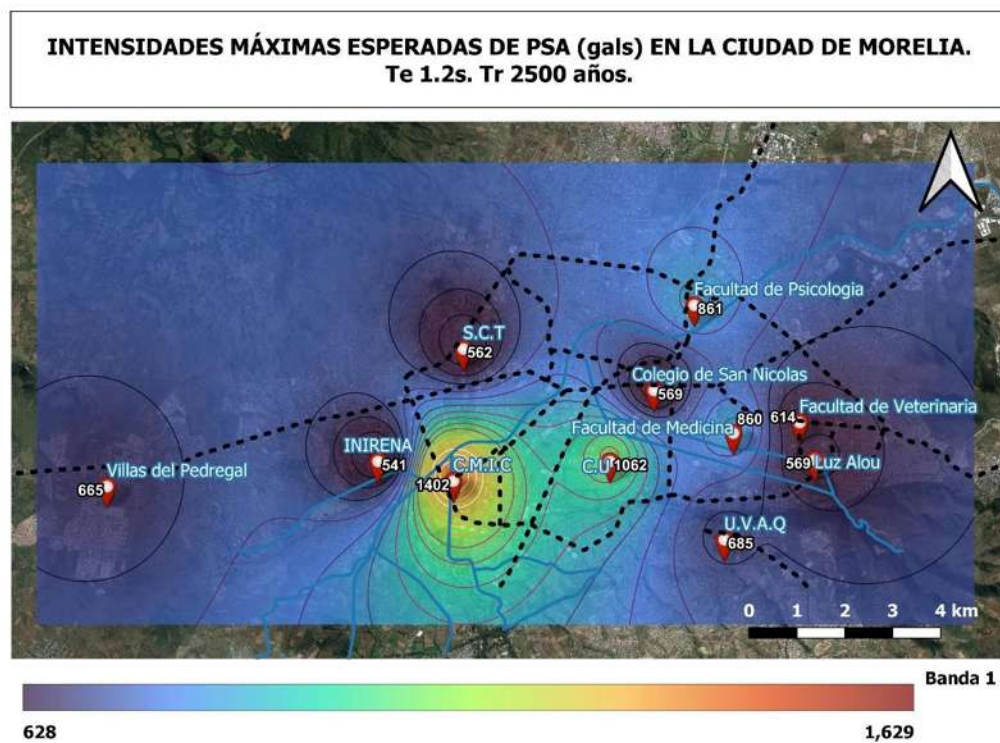


Figura 6.4.19 Intensidades de PSA (Te 1.2s) máximas esperadas en la ciudad de Morelia para un Tr de 2500 años.

Las figuras 6.4.2 – 6.4.19 muestran que la estación CMIC presentaría las intensidades máximas esperadas para todos los periodos T_e , seguida de la estación Luz Alou en periodos cortos, y de CU y Psicología para periodos más grandes.

Los valores obtenidos e ilustrados en este subcapítulo son de gran ayuda para evaluar a futuro la vulnerabilidad sísmica de estructuras en la ciudad y los daños y pérdidas esperadas ante la ocurrencia de temblores de diseño y extraordinarios.

6.5. Programa para obtener espectros de diseño en Morelia.

Para la facilidad de los usuarios, se realizó un programa en MATLAB para obtener los espectros de diseño en Morelia. El usuario selecciona la zona de la ciudad donde requiere el espectro (zona IA, IB o II), define el amortiguamiento ($1/100$) e ingresa los parámetros de reducción de los espectros (factor de comportamiento sísmico, Q ; factor de sobrerresistencia, R_o ; factor de redundancia, ρ ; y factor de irregularidad, α). Estas variables se deben definir de acuerdo con las recomendaciones de la normativa vigente en la ciudad o con las presentadas en NTC-DS (2017) y CFE (2015).

Dicho programa lleva el nombre de ESDISMO (Espectros de Diseño en Morelia). La fig. 6.5.1 muestra la interfaz del programa. A continuación, se describen los pasos a seguir para obtener el espectro de diseño:

- En el rectángulo azul de la figura se selecciona la zona de interés (zona IA, zona IB y zona II).
- El rectángulo naranja corresponde al periodo de retorno (100, 250, 475, 1000 y 2500 años).
- El amortiguamiento, ξ (ingresado en $1/100$); el factor de comportamiento sísmico, Q (1, 1.25, 1.5, 2, 3 y 4); el factor de sobrerresistencia, R_o (2, 2.5 y 3); el factor de redundancia, ρ (0.8, 1, 1.25); y el factor de irregularidad (0.7, 0.8, 0.9 y 1) se ingresan en el recuadro verde de la figura. Los valores que se pueden seleccionar en este programa son los recomendados en CFE (2015).
- Después de definir todos los parámetros se oprime el botón de calcular.
- En la parte inferior derecha se despliega el espectro de diseño, que muestra los espectros: transparente, reducido y EPU.
- En el recuadro morado se muestran los valores de a_0 y c en gals.
- El botón “Exportar” permite trasladar los espectros calculados a un libro de Excel “Espectros diseño.xlsx”. En la fig. 6.5.2 se muestra la hoja de cálculo del libro generado al exportar los espectros. En la columna B se encuentran los periodos T (0:@0.02:5), la columna C presenta las ordenadas de PSA (en gals) del espectro transparente, la columna D las ordenadas de PSA del espectro reducido en gals, y en F y G, las ordenadas y abscisas del EPU.
- El botón “Borrar” limpia la pantalla para iniciar el cálculo de un nuevo espectro.

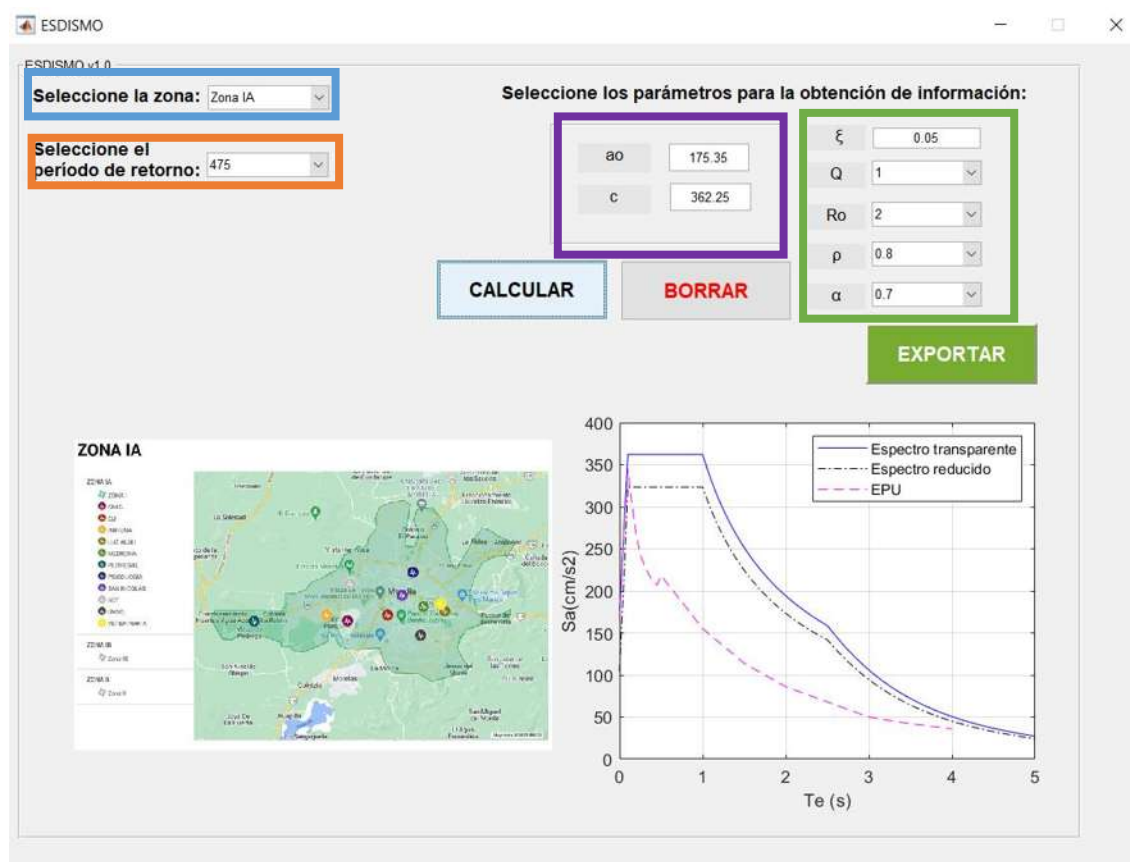


Figura 6.5.1 Interfaz gráfica del programa ESDISMO.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		0	175.35	104.375		0	167	
3		0.02	212.73	148.80798		0.05	267	
4		0.04	250.11	188.64482		0.1	345	
5		0.06	287.49	230.68852		0.15	302	
6		0.08	324.87	275.51885		0.2	267	
7		0.1	362.25	323.4375		0.25	243	
8		0.12	362.25	323.4375		0.3	230	
9		0.14	362.25	323.4375		0.35	220	
10		0.16	362.25	323.4375		0.4	211	
11		0.18	362.25	323.4375		0.45	207	
12		0.2	362.25	323.4375		0.5	218	
13		0.22	362.25	323.4375		0.75	187	
14		0.24	362.25	323.4375		1	155	
15		0.26	362.25	323.4375		1.5	114	
16		0.28	362.25	323.4375		2	86	
17		0.3	362.25	323.4375		2.5	68	
18		0.32	362.25	323.4375		3	50	
19		0.34	362.25	323.4375		3.5	42	
20		0.36	362.25	323.4375		4	36	
21		0.38	362.25	323.4375				
22		0.4	362.25	323.4375				
23		0.42	362.25	323.4375				
24		0.44	362.25	323.4375				
25		0.46	362.25	323.4375				
26		0.48	362.25	323.4375				
27		0.5	362.25	323.4375				
28		0.52	362.25	323.4375				
29		0.54	362.25	323.4375				
30		0.56	362.25	323.4375				

Figura 6.5.2 Datos generados en el libro de Excel "Espectros diseño.xlsx" al exportar los datos del programa ESDISMO.

CONCLUSIONES

Cuanto mayor sea el número de registros sísmicos obtenidos en un sitio con base en redes sísmicas, más preciso será el estudio de peligro sísmico del lugar. El registro continuo del movimiento dinámico de los suelos y de las estructuras, permite actualizar los códigos de diseño sísmico con el paso de los años.

Gracias a los 255 registros sísmicos hasta ahora obtenidos en la RSN, a los estudios de mecánica de suelos, y a la actualización de los datos sísmicos obtenidas de catálogos, se llega a la conclusión de que el suelo de Morelia no es una masa continua con movimientos similares cuando ocurren los temblores. Existen suelos duros con casi nula amplificación de aceleraciones (zona IA); suelos duros, con amplificación considerable en periodos cortos (zona IB), y suelos semiduros, con amplificaciones importantes respecto a las demás zonas (zona II).

Los temblores de fuente intraplaca y locales tienen su mayor contribución al peligro sísmico de las construcciones pequeñas de la ciudad (casas y edificios de uno y tres niveles), por la distancia tan corta que hay entre esas fuentes sísmicas y Morelia. Por su parte, los temblores costeros, debido a su distancia más lejana, afectan más a construcciones más grandes de la ciudad.

En general, de acuerdo con la estimación de los periodos del terreno, el suelo de Morelia es duro. Sin embargo, temblores del pasado han mostrado la vulnerabilidad sísmica de la ciudad, que es mucho mayor en la actualidad por las construcciones históricas deterioradas y las contemporáneas existentes. Morelia se encuentra a 200 km de las fuentes de subducción (sismos de gran magnitud). A pesar de que la distancia es considerable, esta fuente es la que mayores afectaciones puede generar en estructuras de periodos de vibrar (T_e) mayores a 0.30 s (casas y/o edificios de más de tres niveles o más niveles). A mucho menor distancia están las fuentes de intraplaca y locales, las primeras siendo las que mayor impacto tienen en la EPPS, y las segundas que incluso pueden generar epicentros dentro de la ciudad.

Con base en el estudio de peligro sísmico realizado, en este trabajo se proponen tres zonas sísmicas: zona IA, zona IB, y zona II. Se proponen espectros de diseño que envuelven a los EPU y para determinar las formas espectrales se utilizan los espectros de respuesta que se han registrado en la RSN, en cada zona sísmica. Los espectros deben ser la base de la revisión y actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo vigente actualmente en la ciudad de Morelia. El camino para mitigar el riesgo sísmico de Morelia requiere necesariamente mantener actualizado el reglamento de construcciones. Se desarrolló también un programa de cómputo que es de gran utilidad para determinar, de forma sencilla, los espectros de diseño (ESDISMO).

La ocurrencia de temblores sigue siendo un proceso lleno de incertidumbres que el ser humano lleva estudiando por cientos de años y que, aunque sean más de 100 años registrándolos en bases de datos y redes sísmicas, no deja de ser una muestra muy pequeña comparada con la edad del planeta. Es por ello recomendable continuar realizando

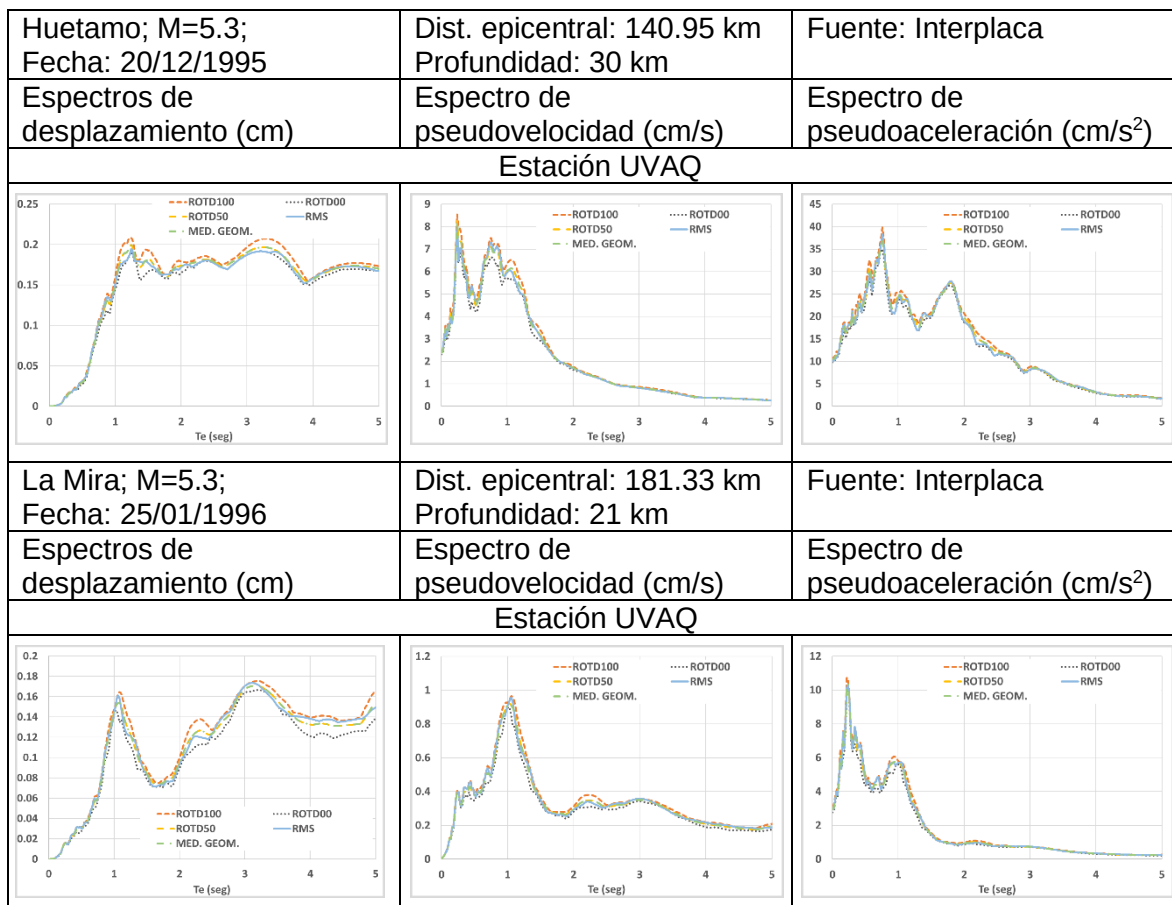
CONCLUSIONES

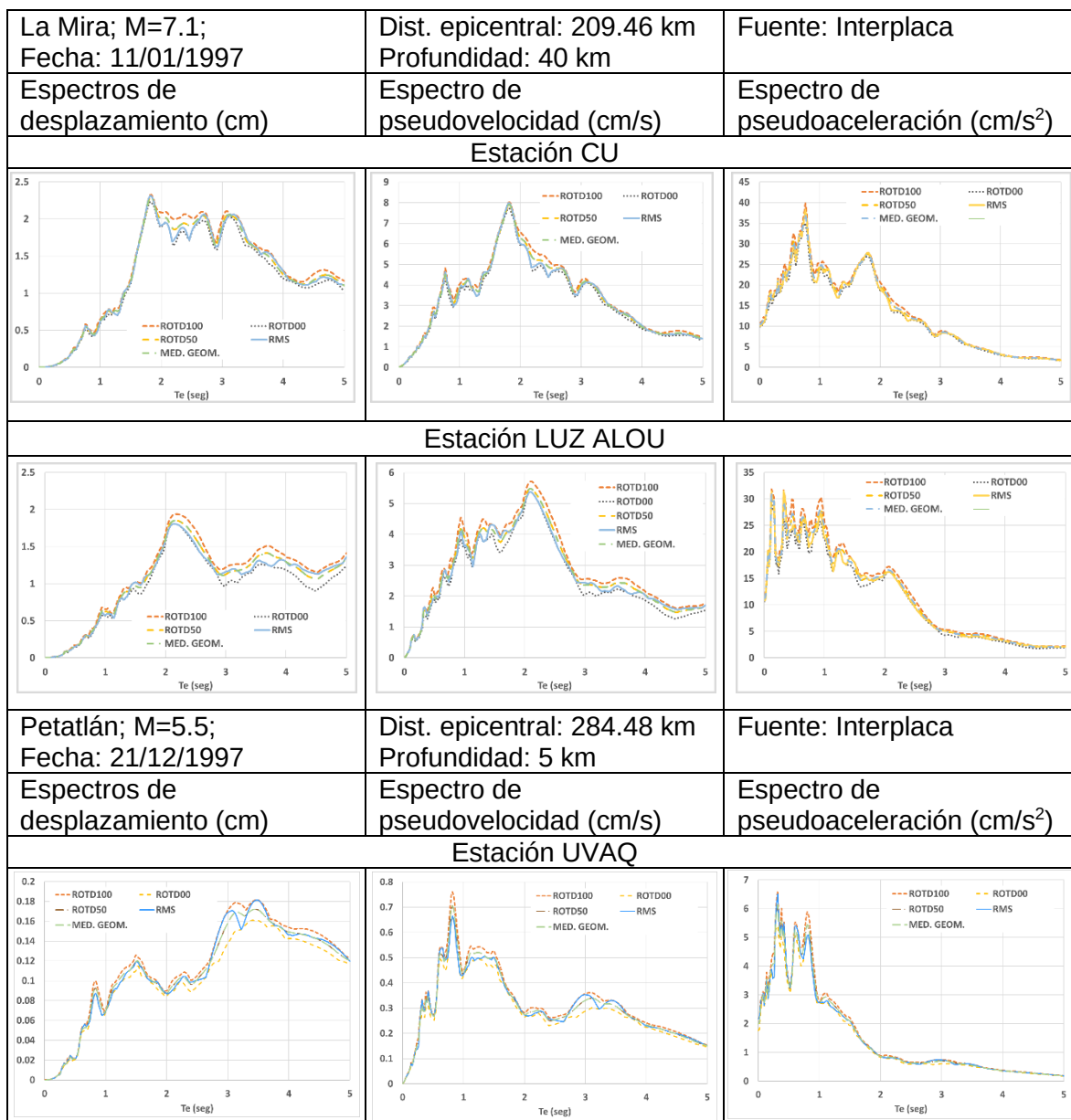
estudios del peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico de las construcciones para mitigar los daños y pérdidas humanas que siguen presentándose en nuestro país.

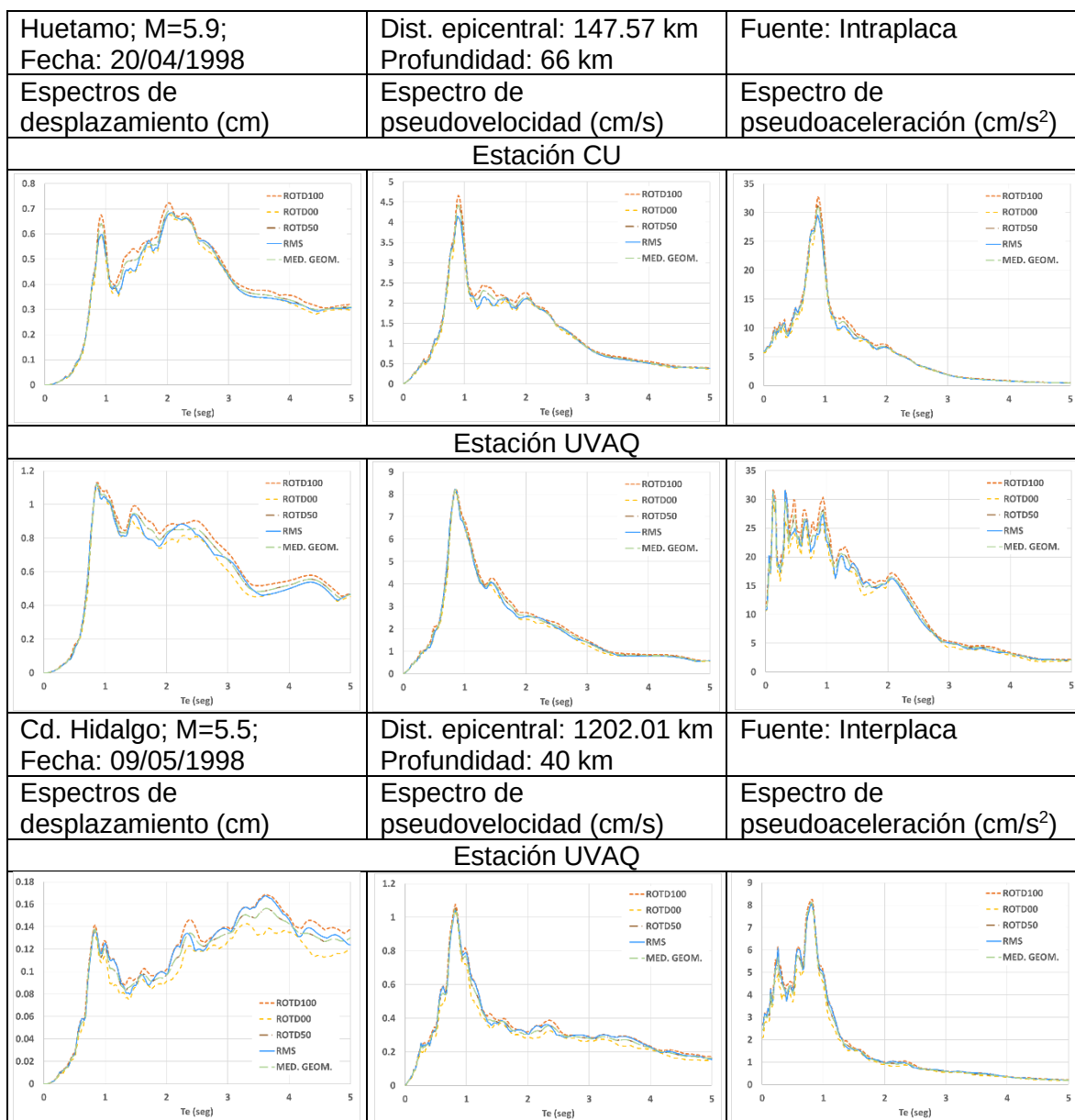
APÉNDICES

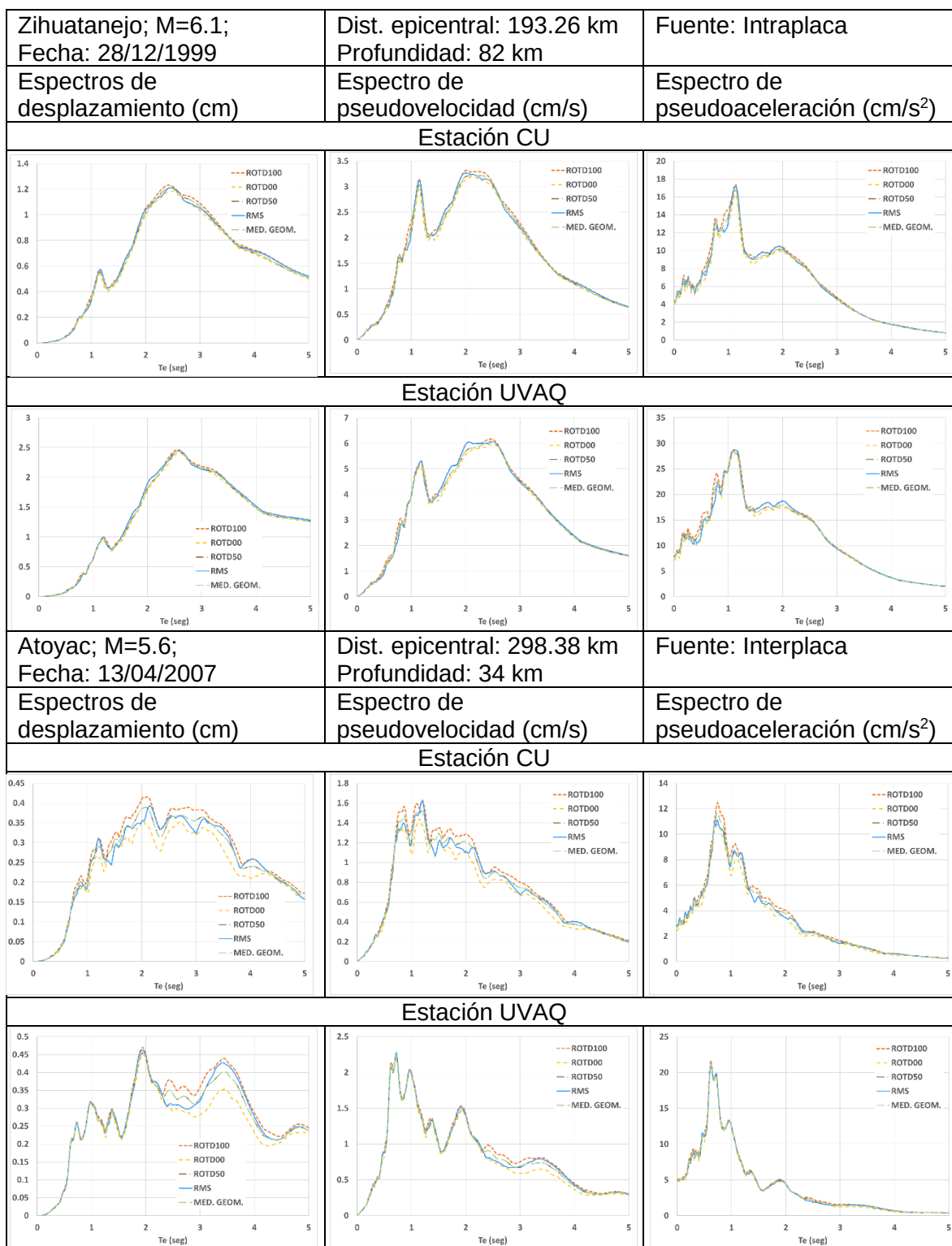
APÉNDICE A

Espectros de respuesta rotados siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4.1.1. Se muestran los espectros de respuesta de desplazamiento (cm), pseudo velocidad (cm/s) y pseudo aceleración (cm/s²).

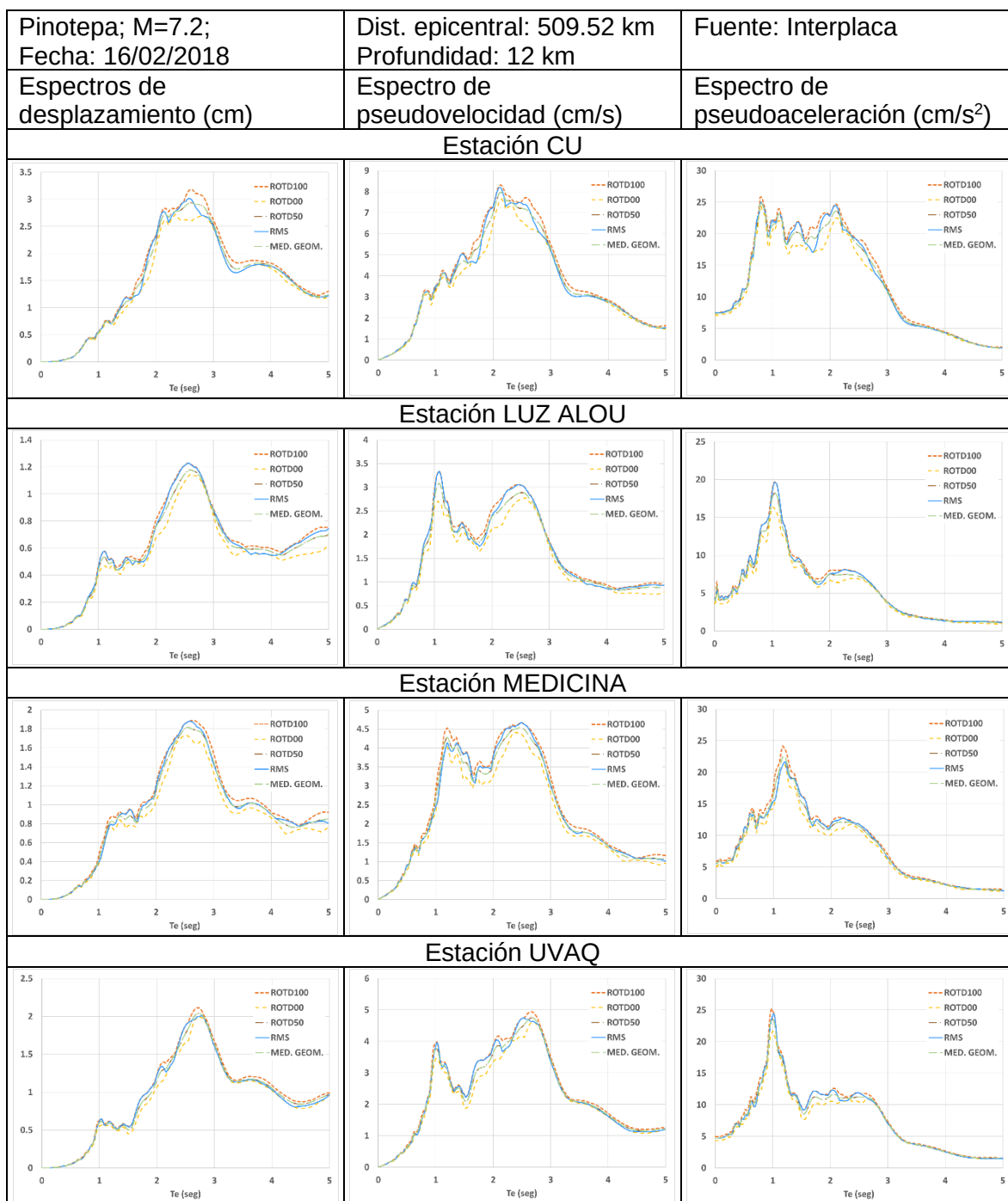


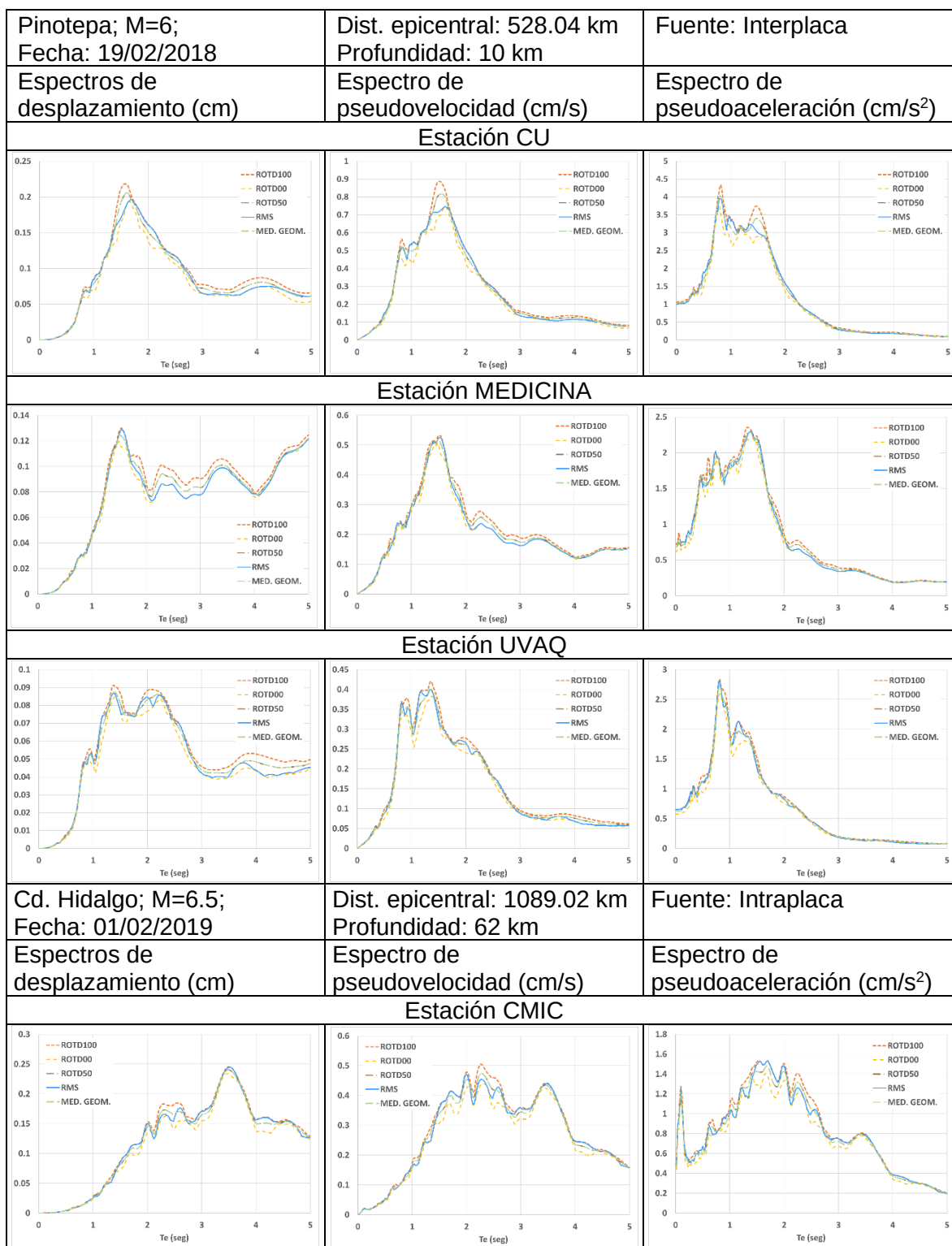


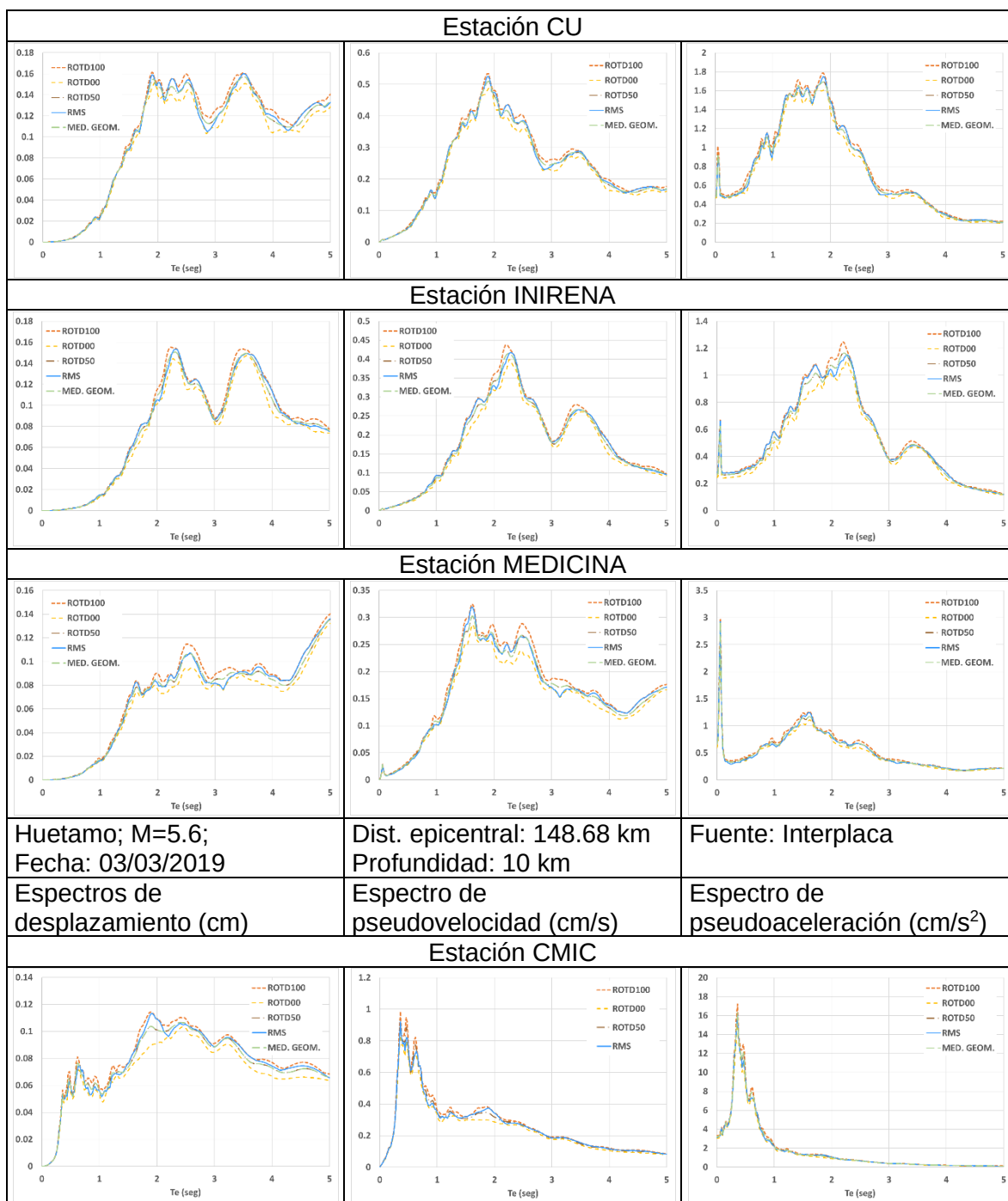


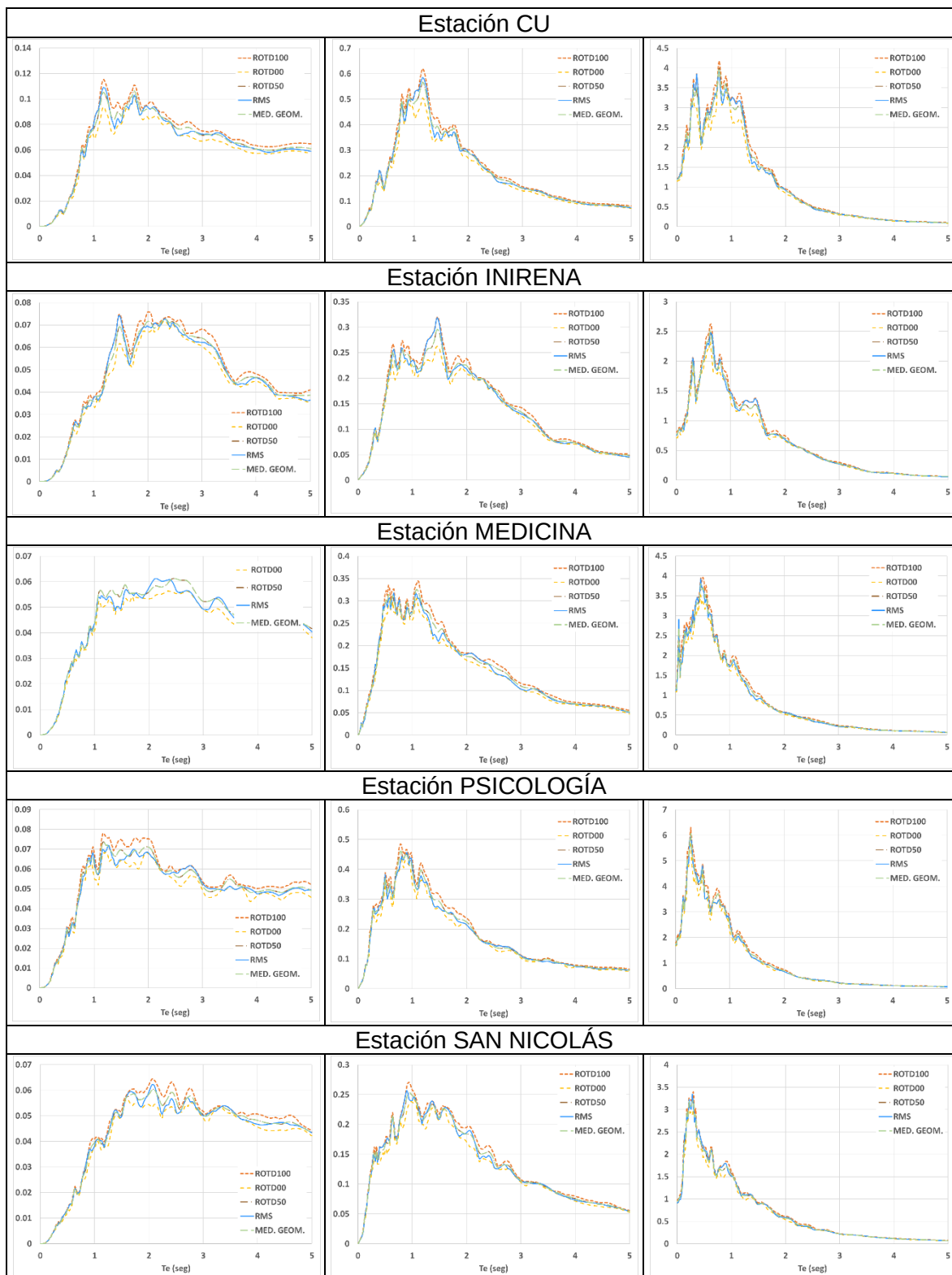


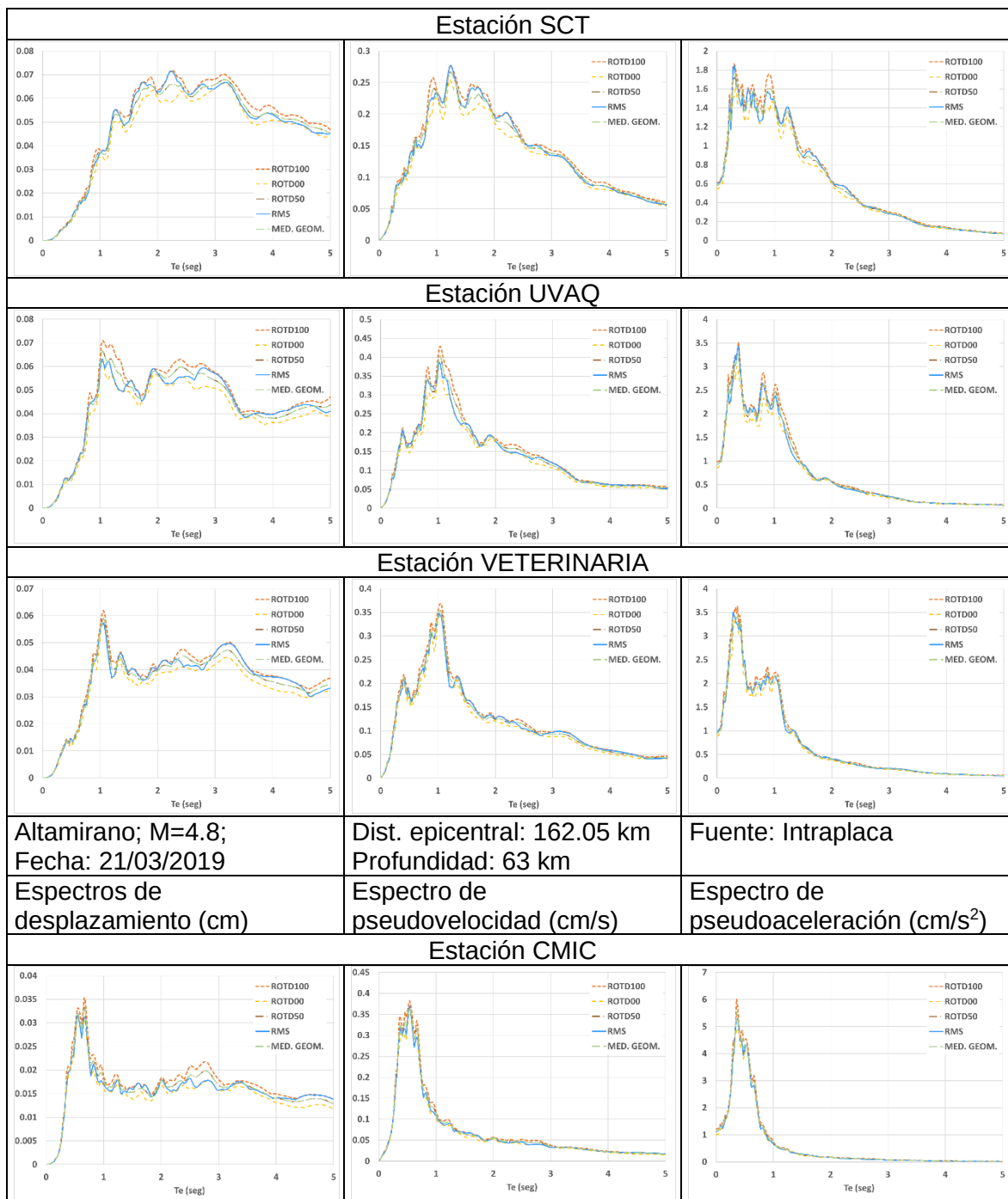
Petatlán; M=7.2; Fecha: 18/04/2014	Dist. epicentral: 300.18 km Profundidad: 18 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectro de pseudovelocity (cm/s)	Espectro de pseudoaceleración (cm/s ²)
Estación UVAQ		
Tecpán; M=6.5; Fecha: 08/05/2014	Dist. epicentral: 302.59 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectro de pseudovelocity (cm/s)	Espectro de pseudoaceleración (cm/s ²)
Estación UVAQ		
Tecpán; M=6.1; Fecha: 10/05/2014	Dist. epicentral: 297.38 km Profundidad: 10 km	Fuente: Interplaca
Espectros de desplazamiento (cm)	Espectro de pseudovelocity (cm/s)	Espectro de pseudoaceleración (cm/s ²)
Estación CU		

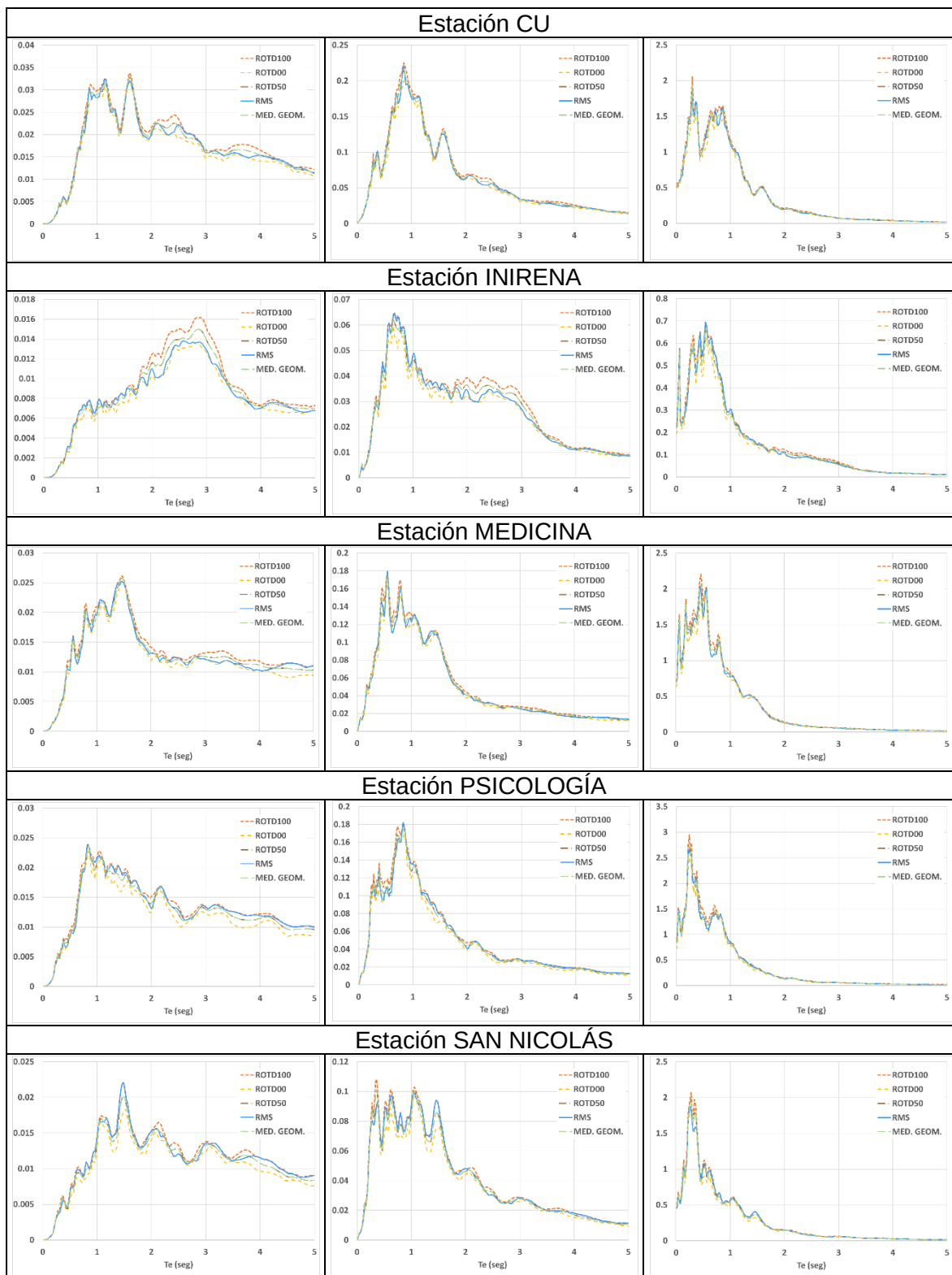


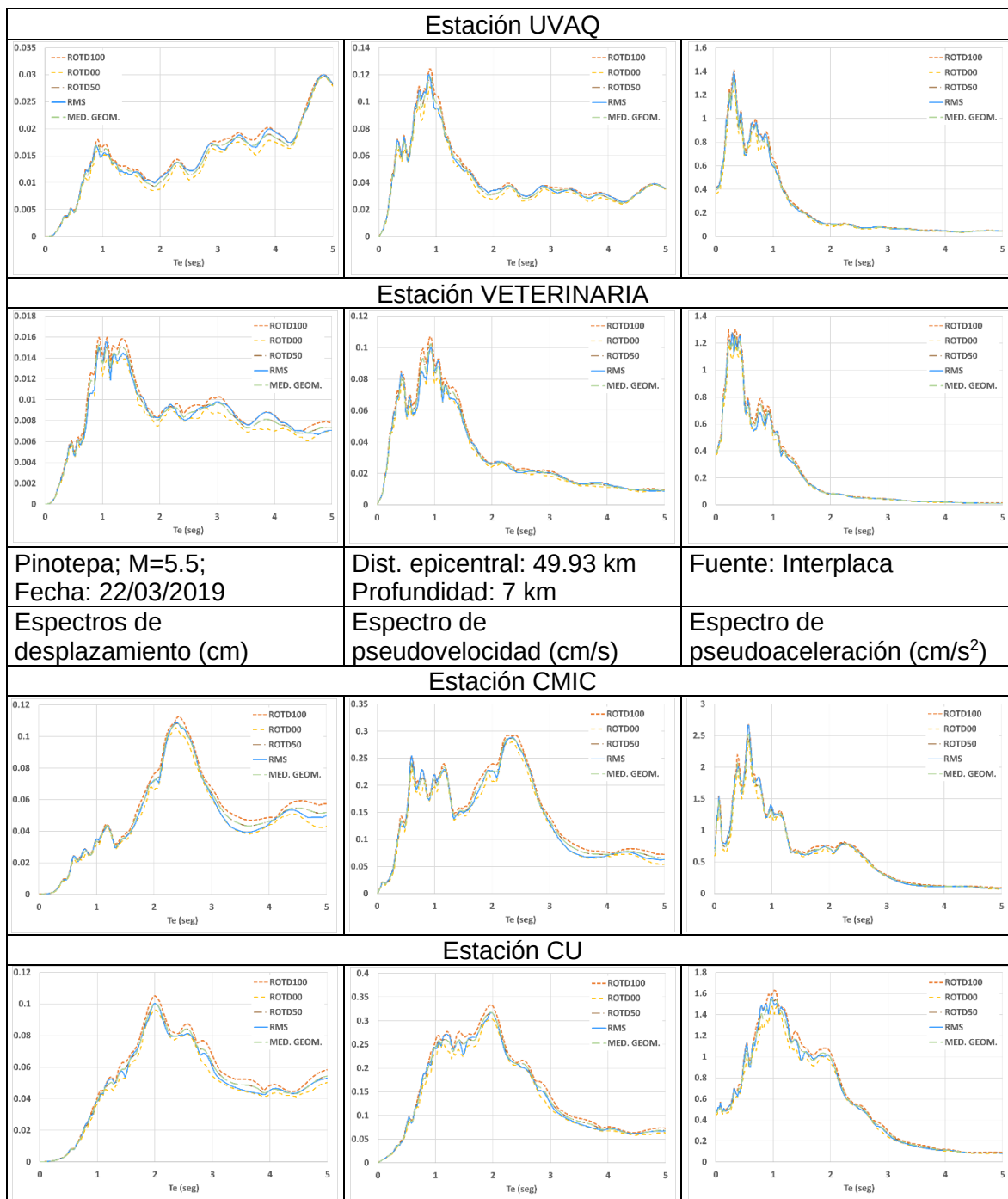


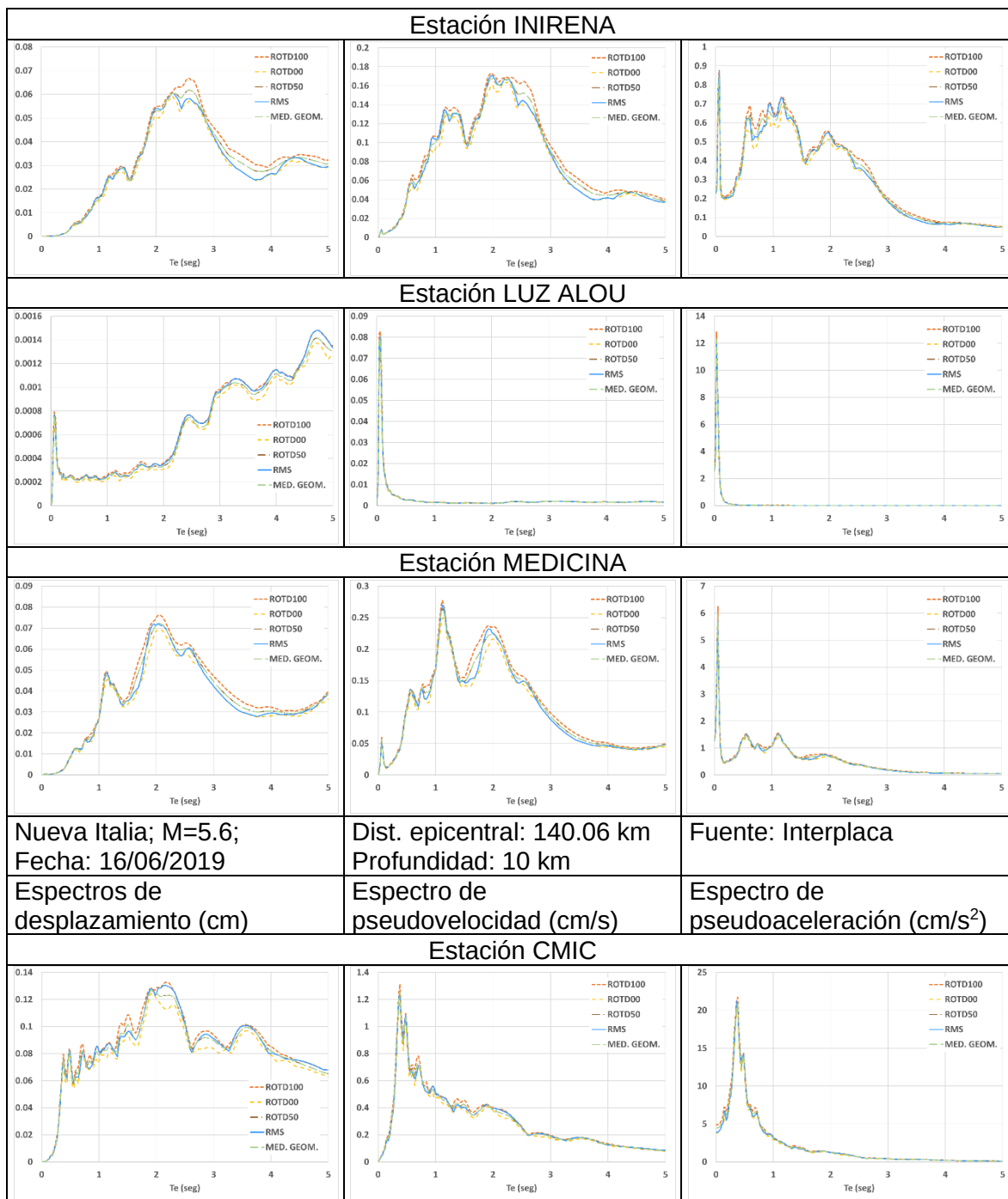


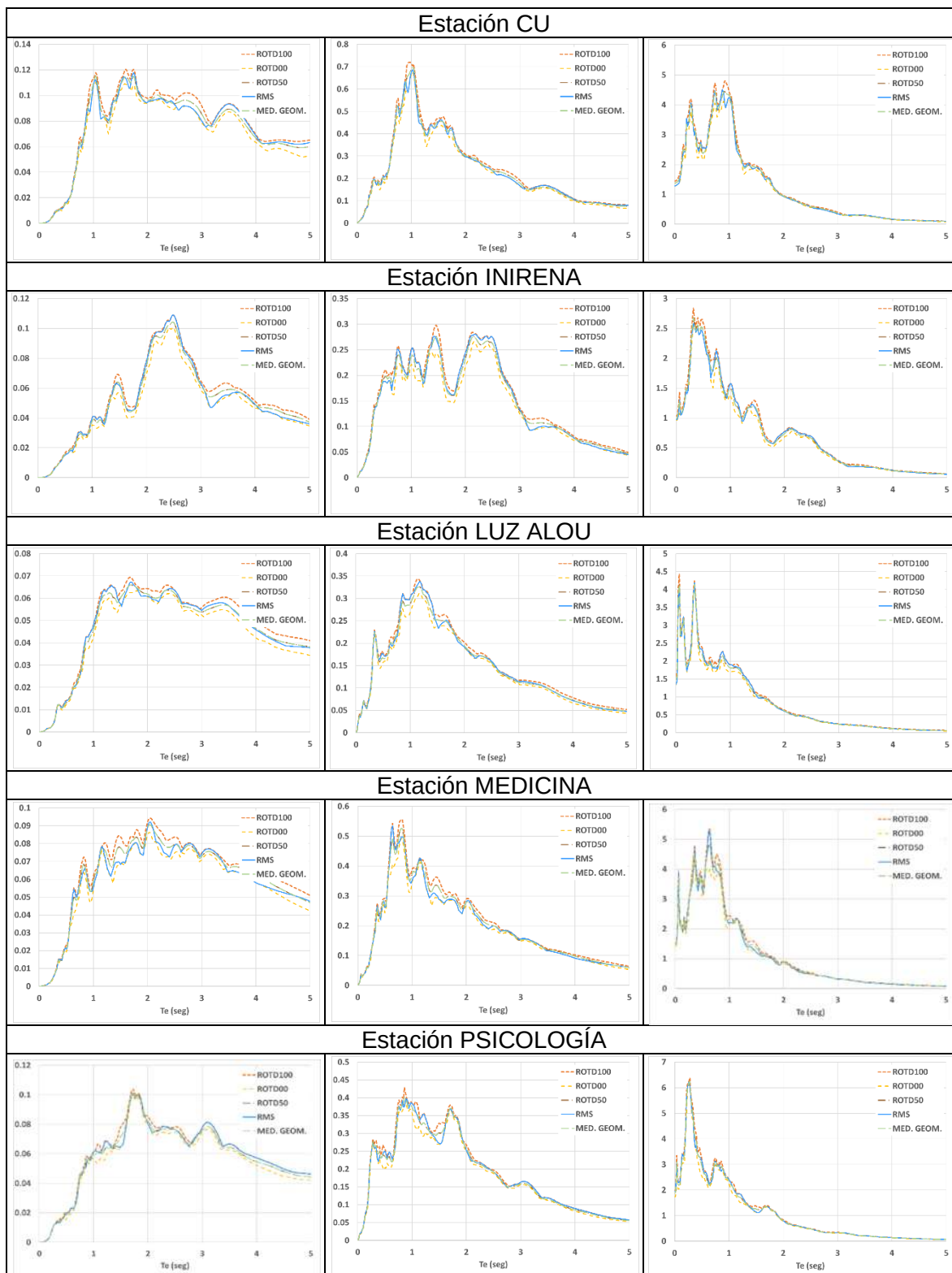


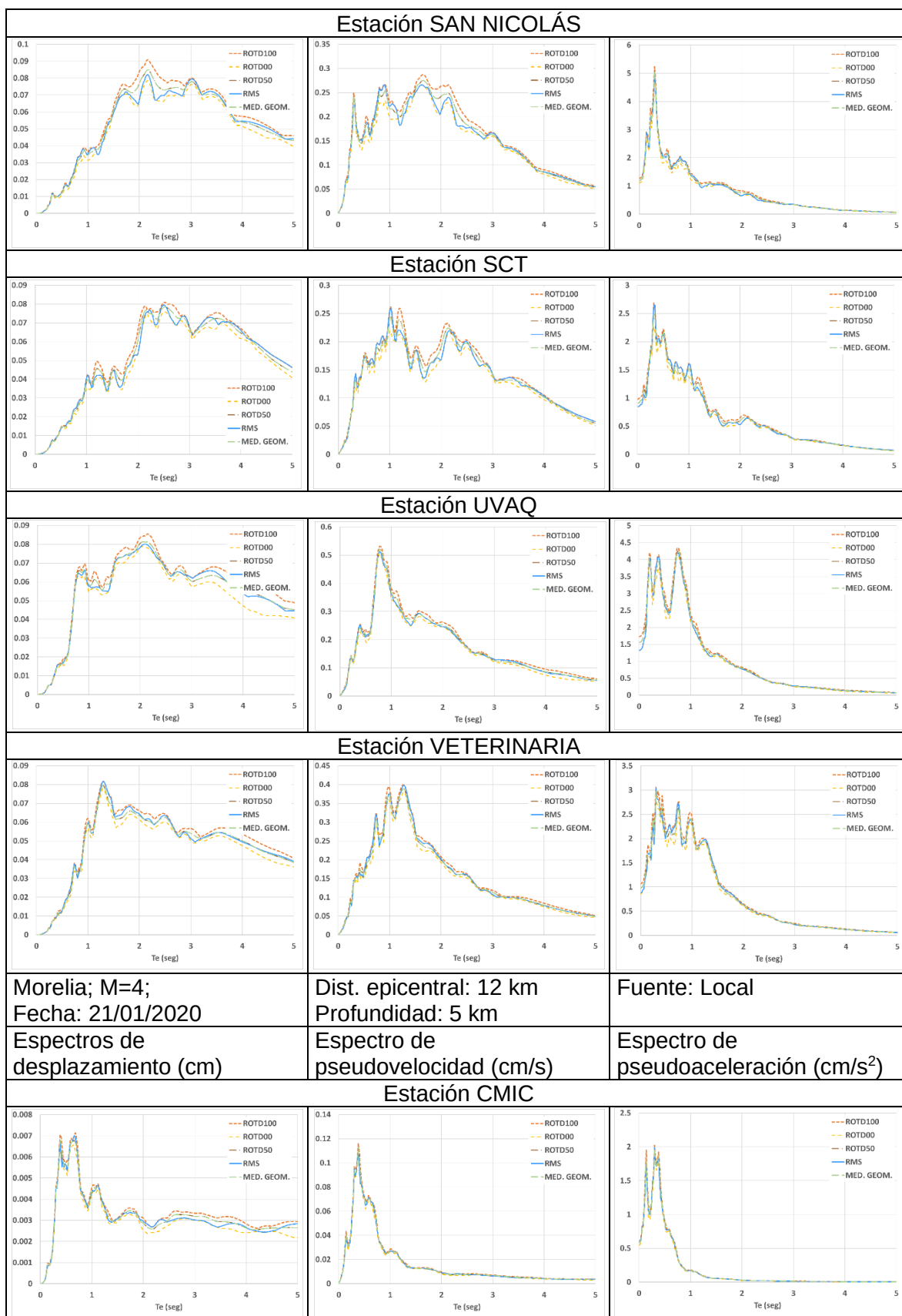


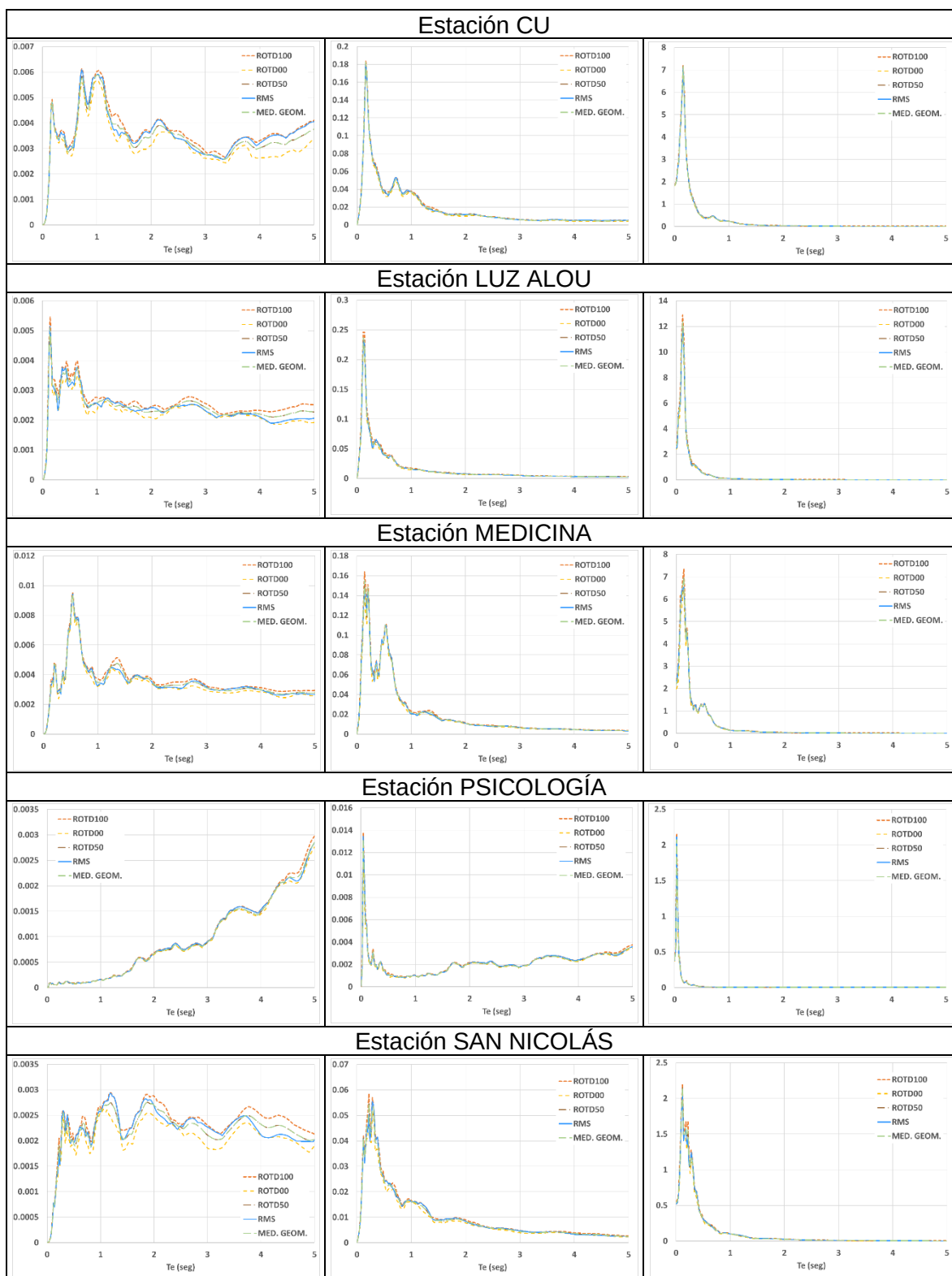


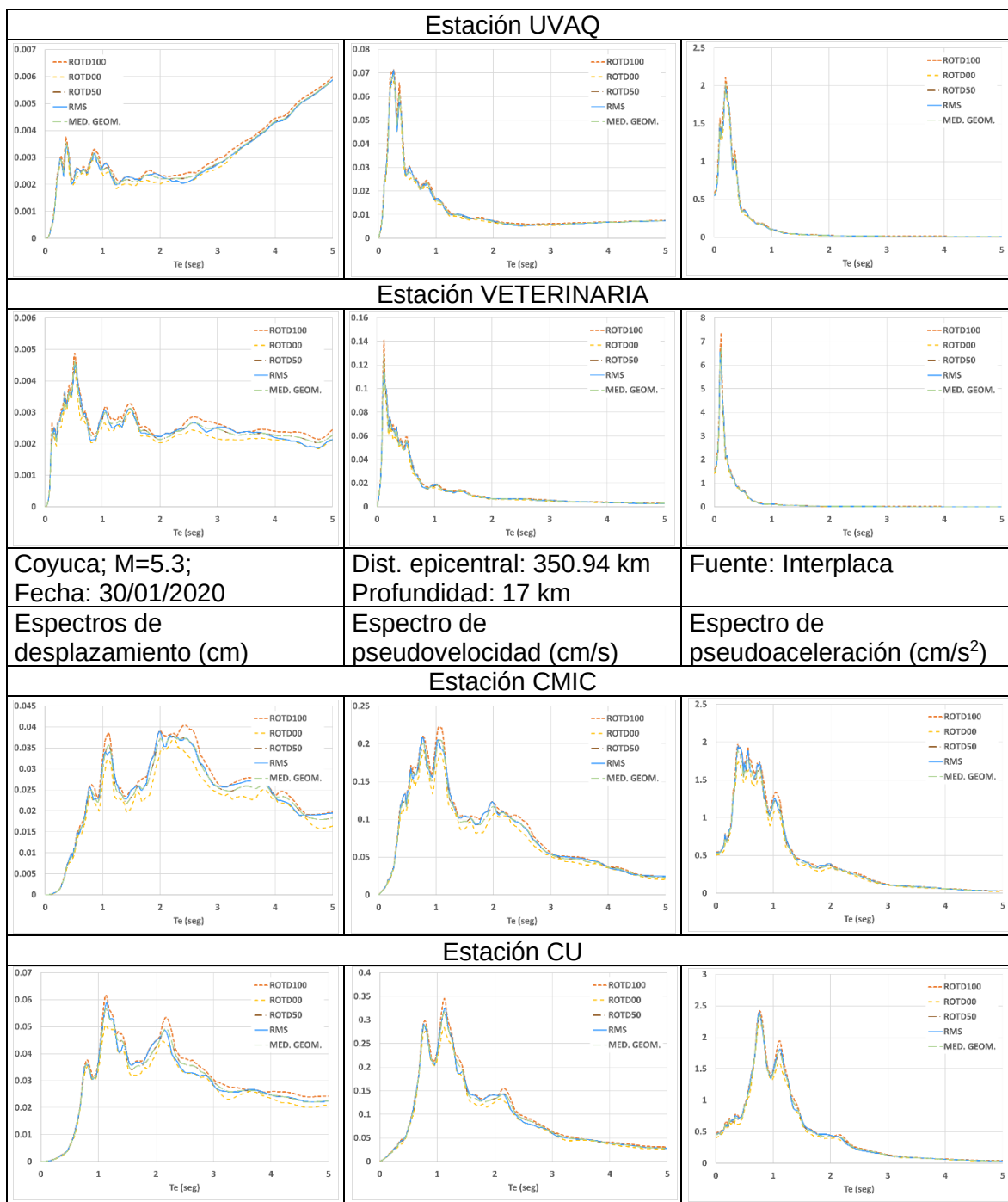


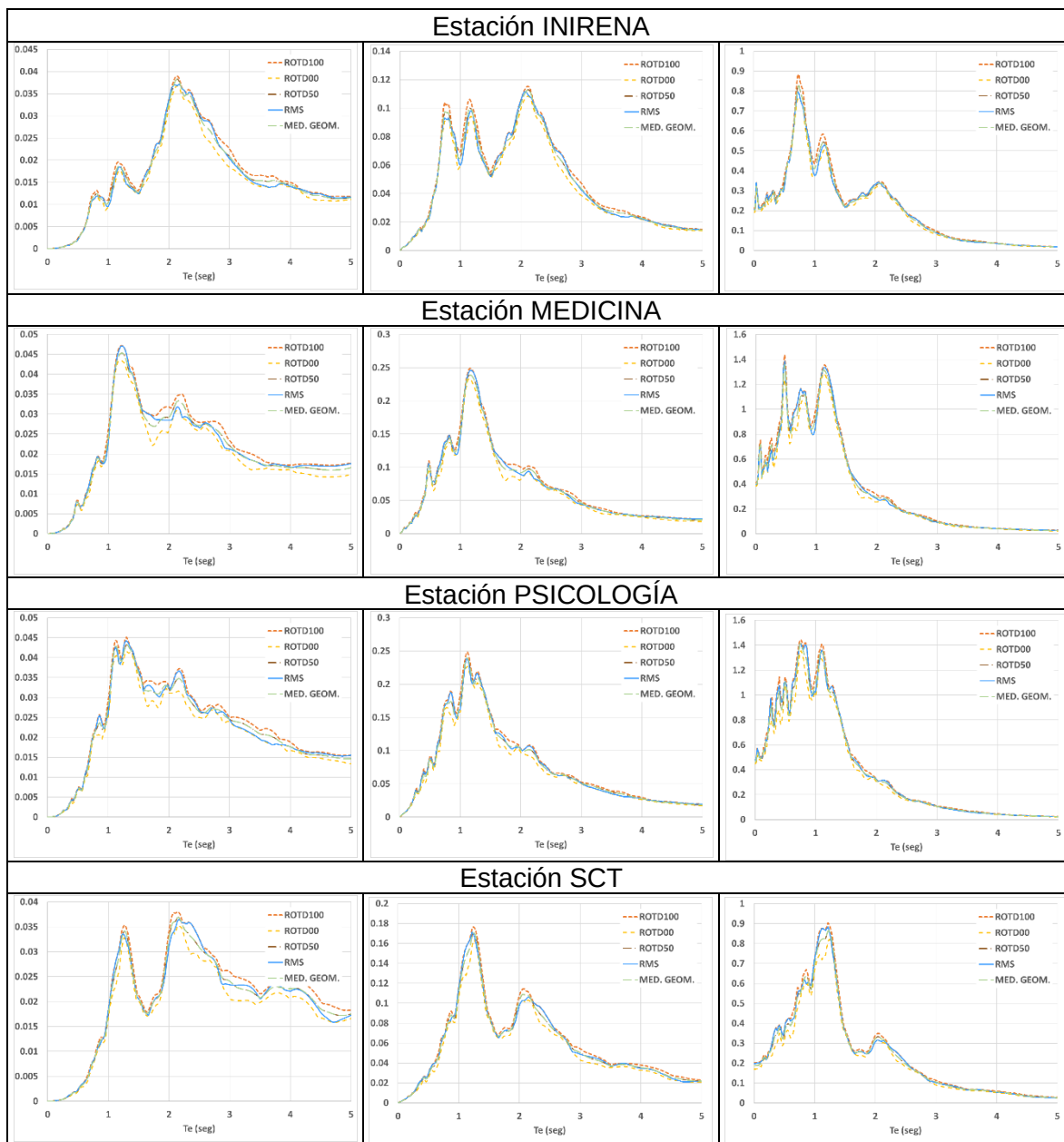


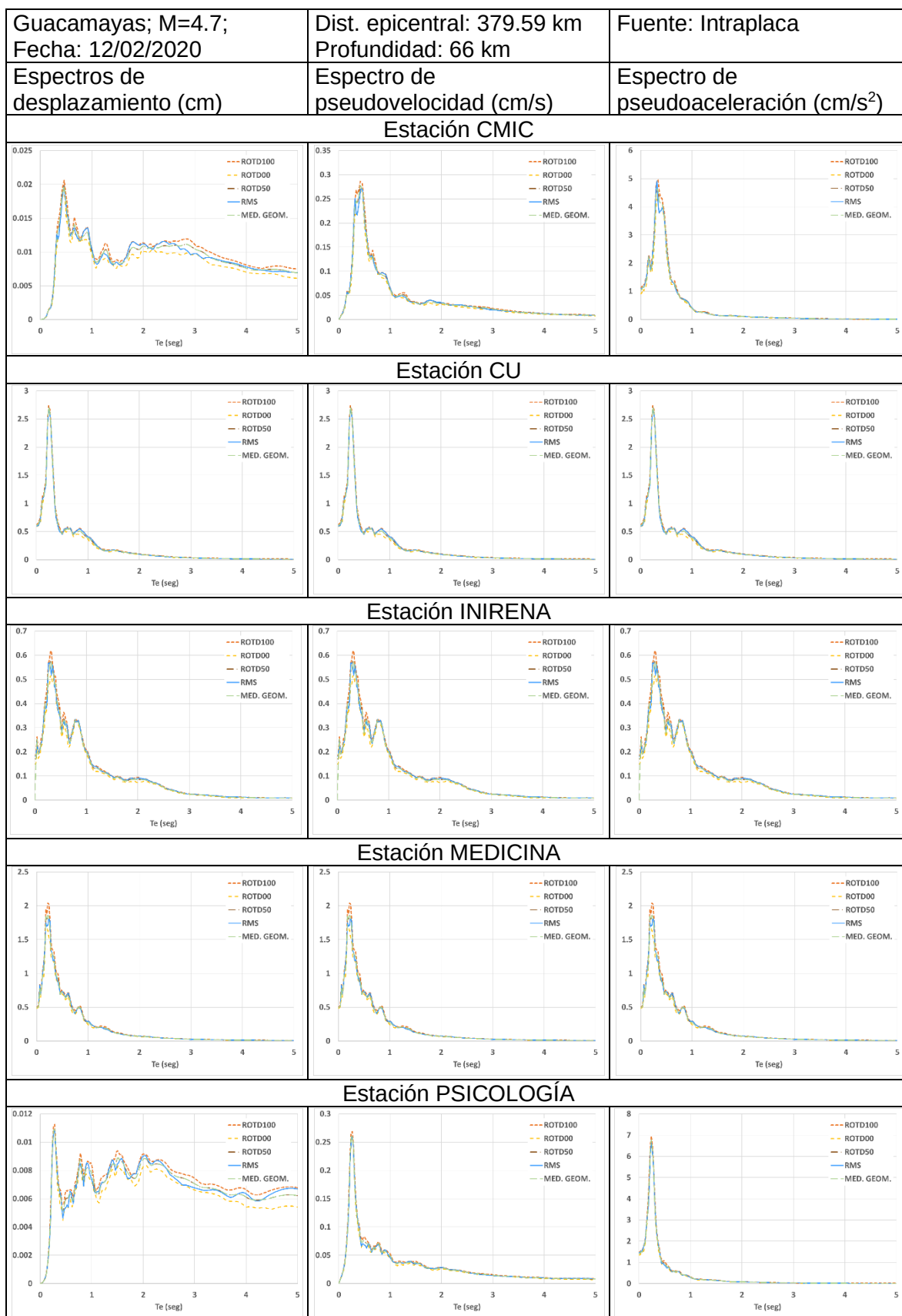


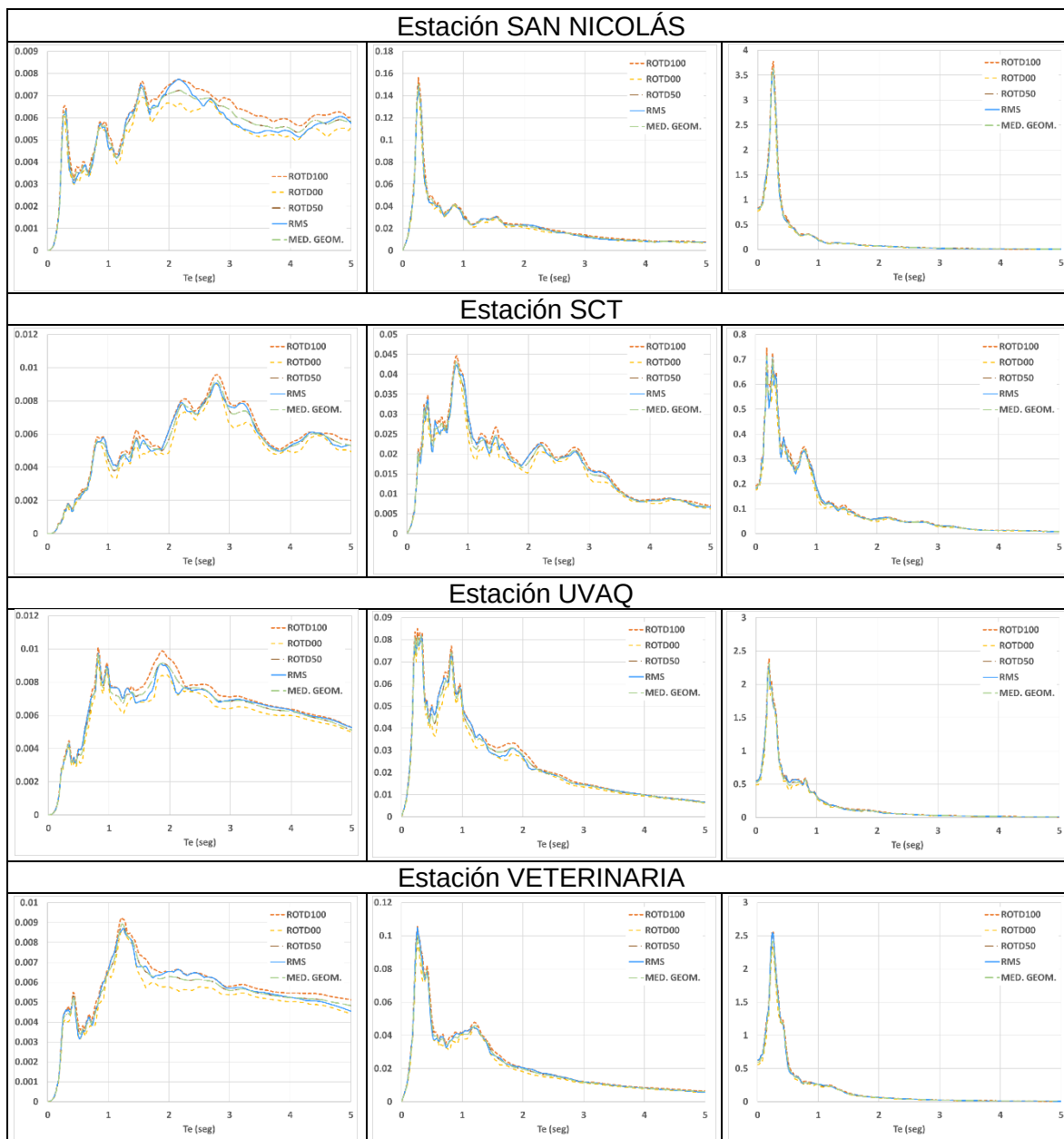


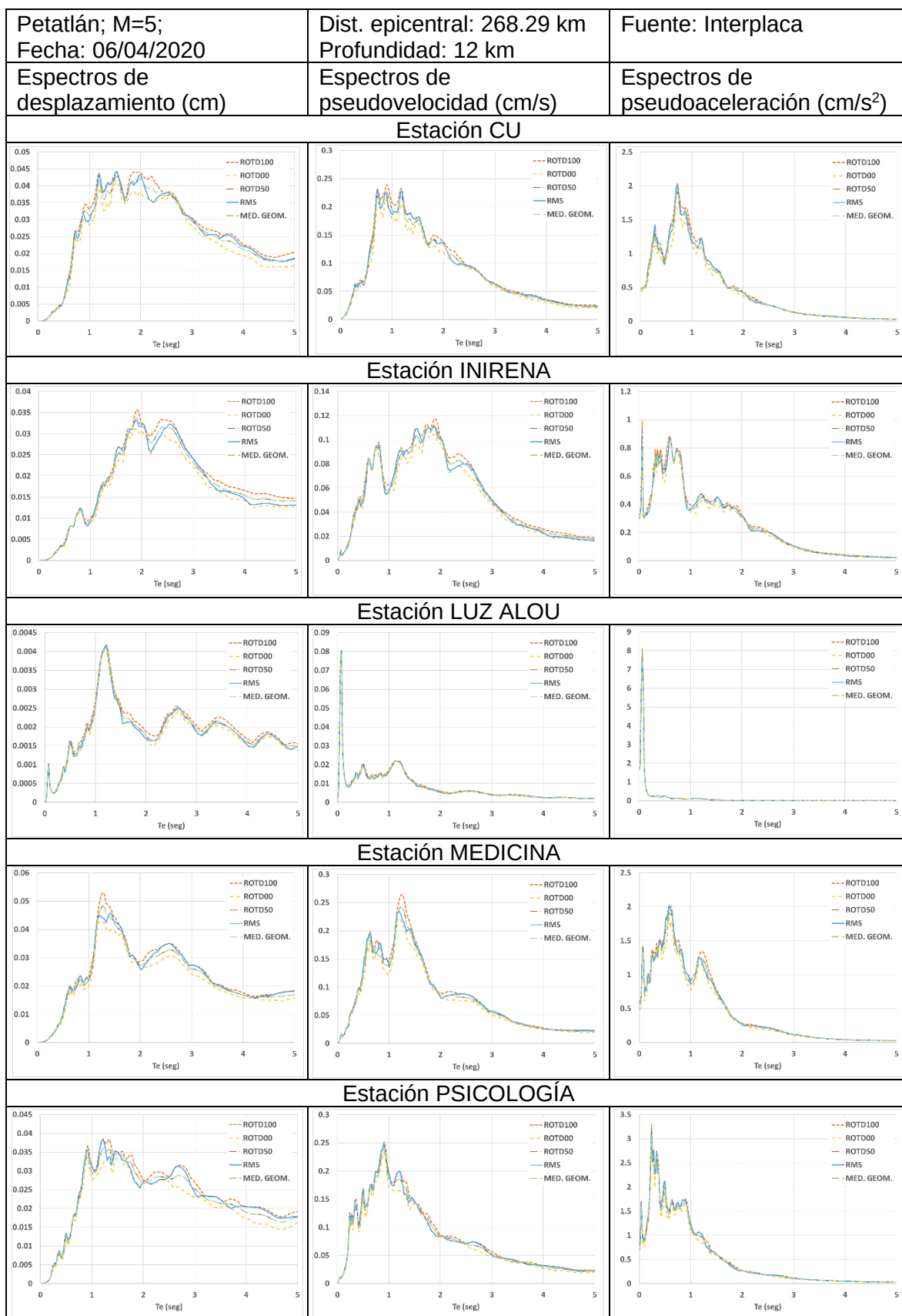


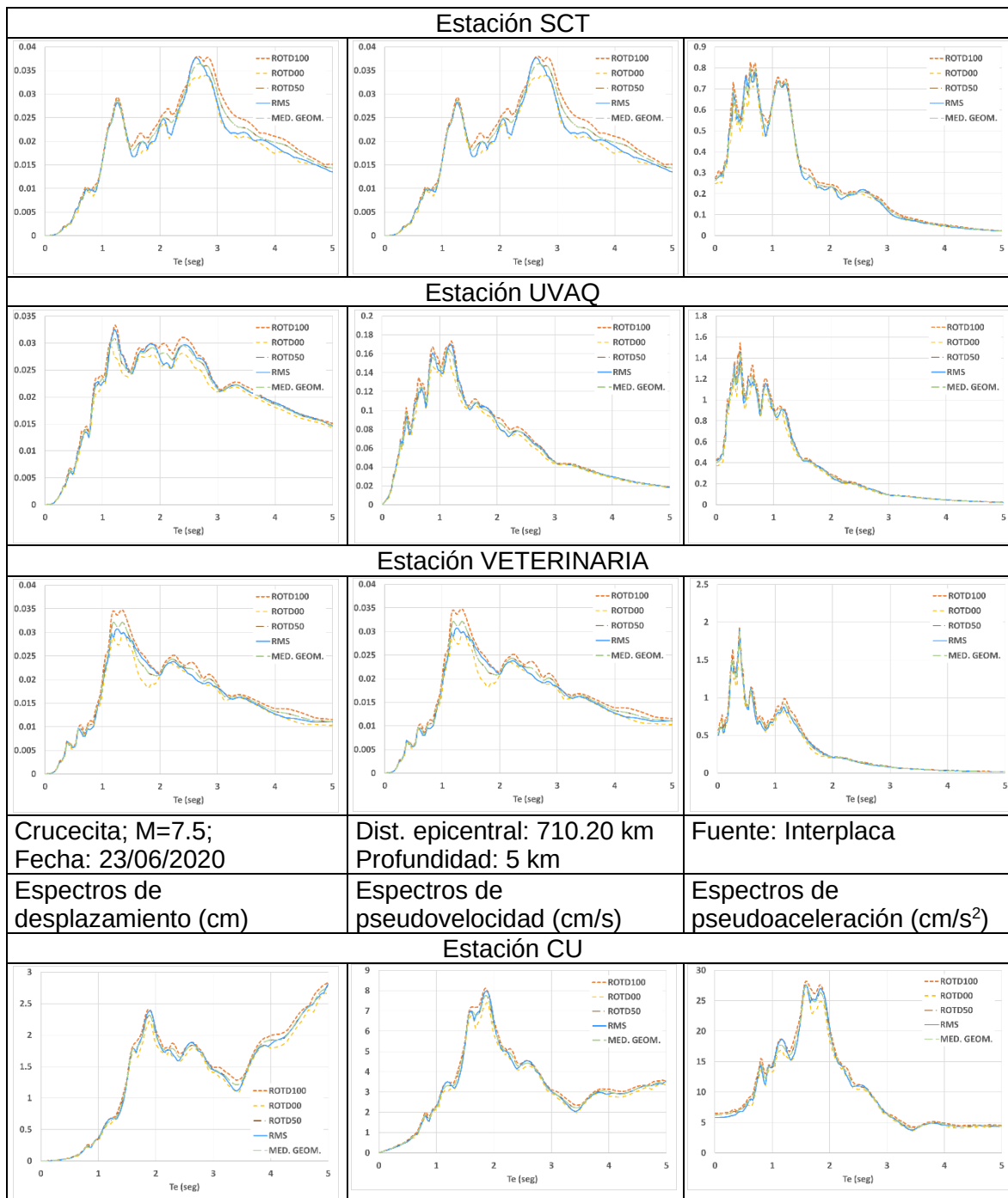


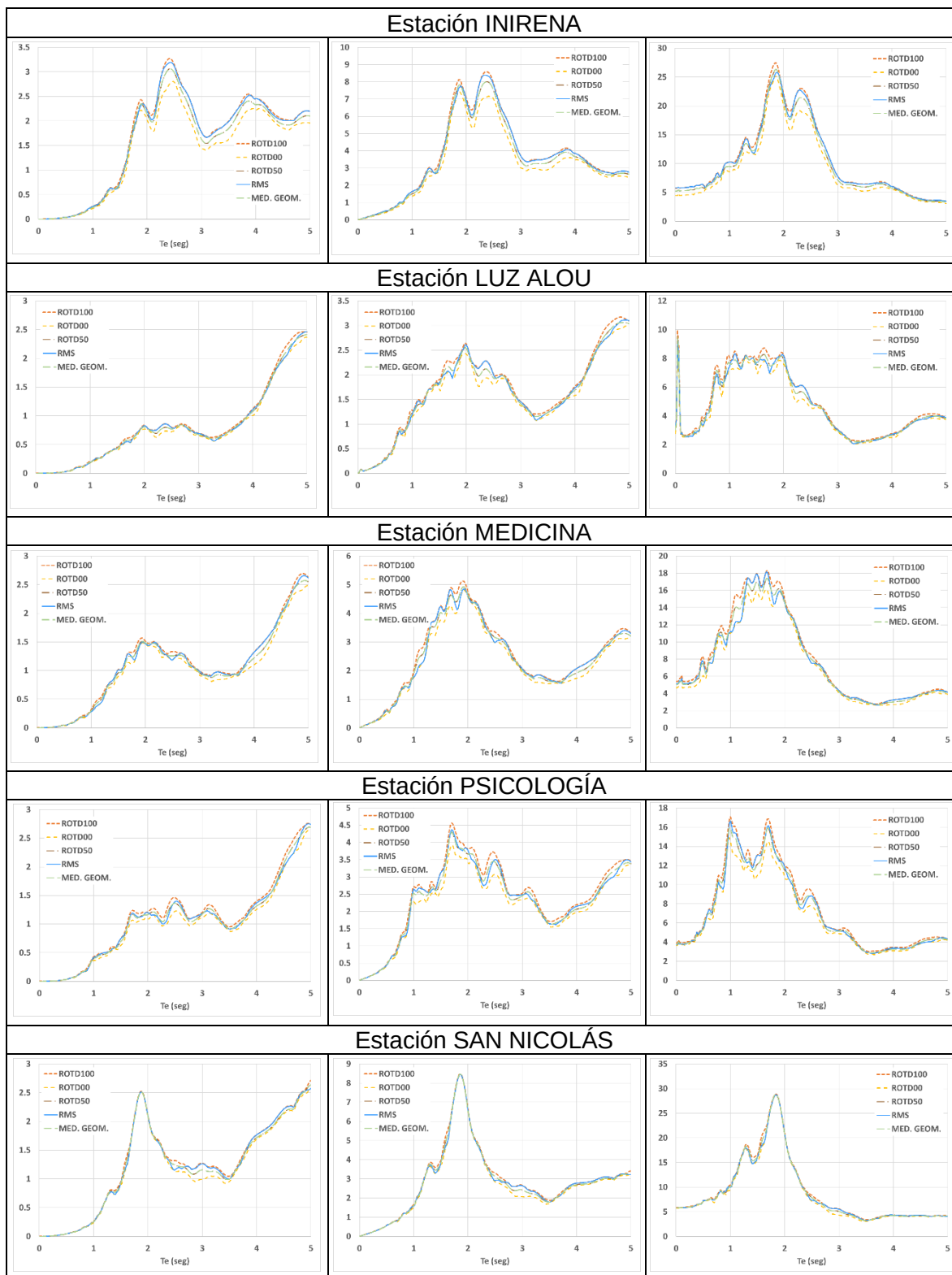


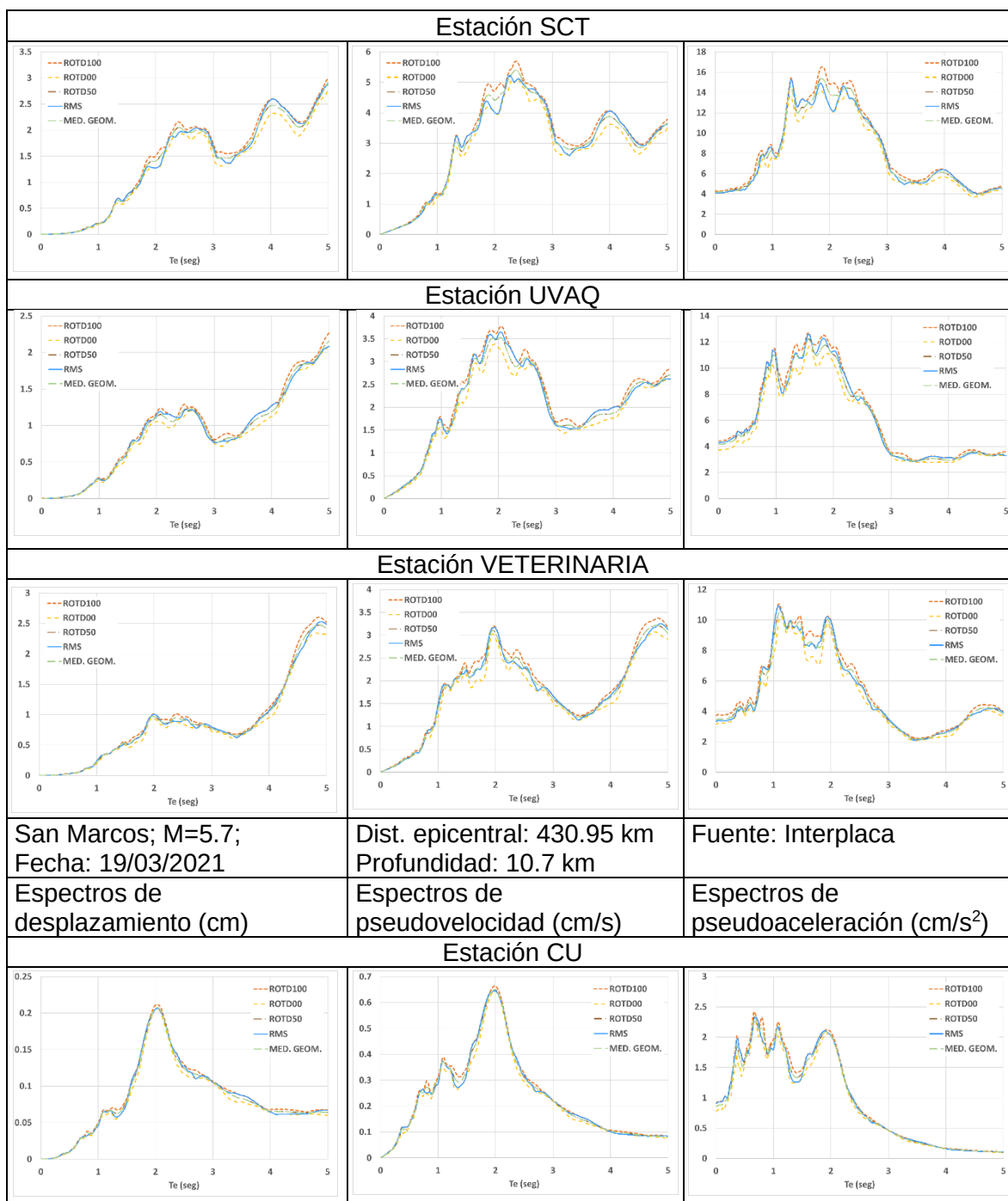


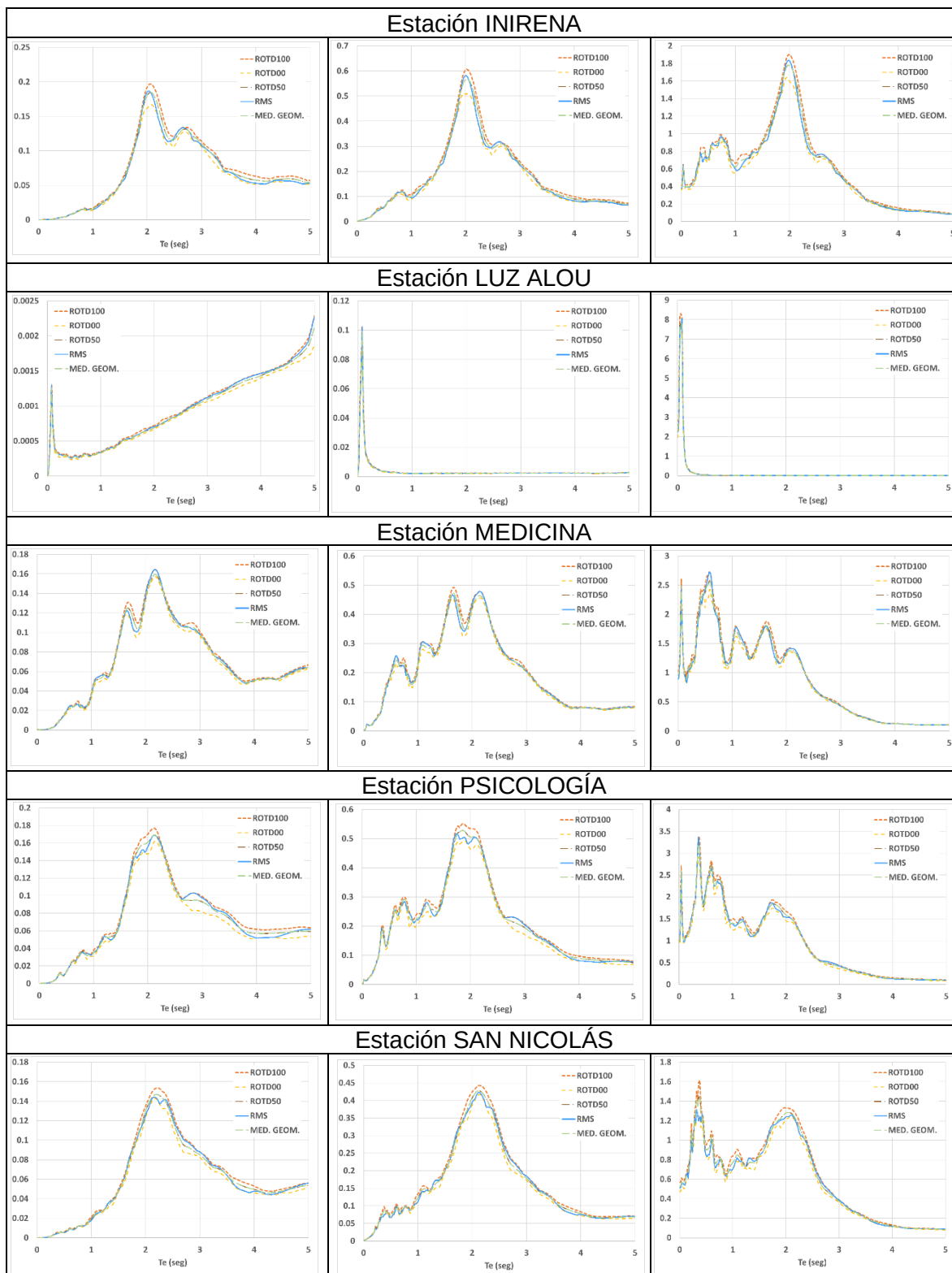


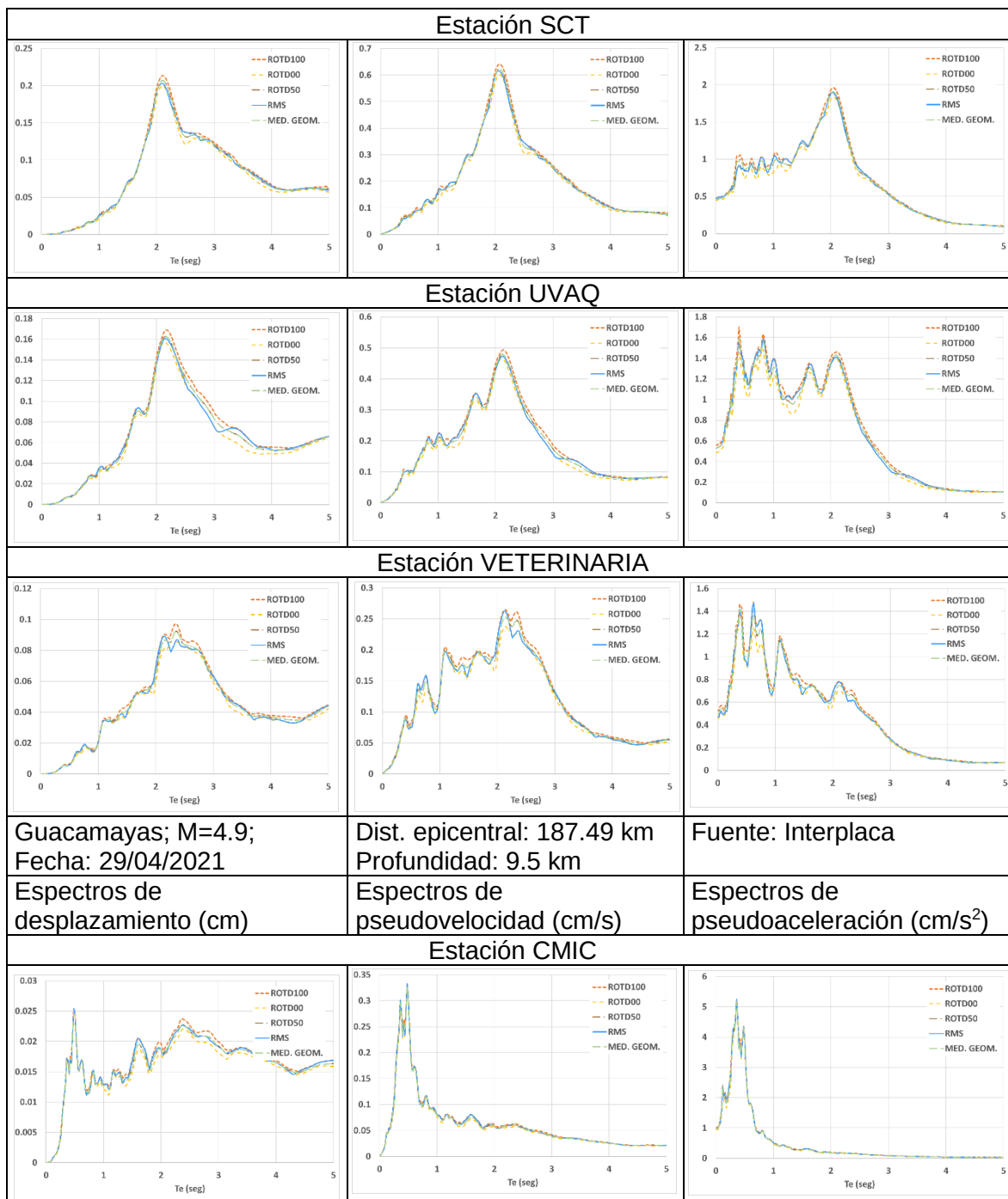


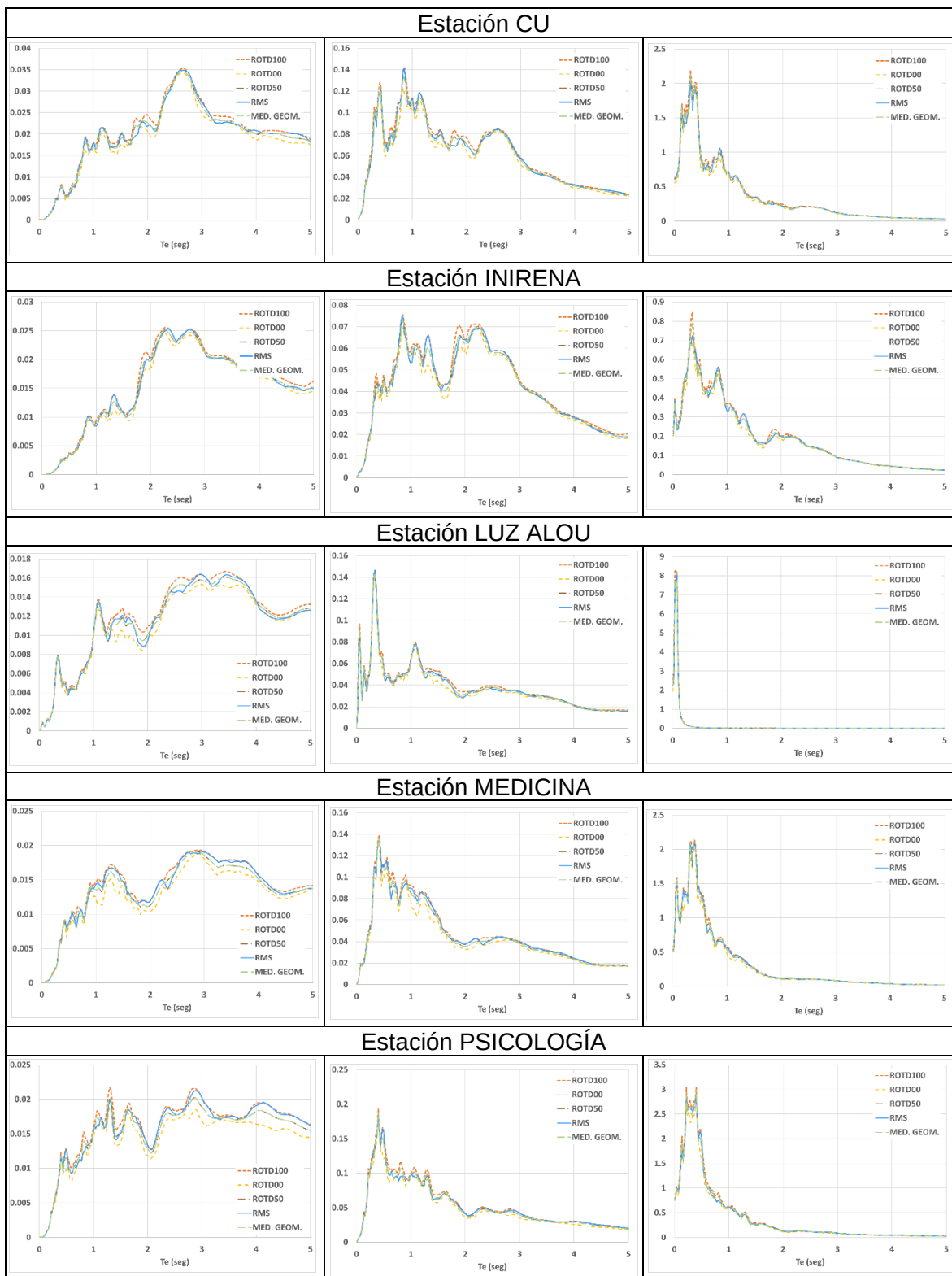


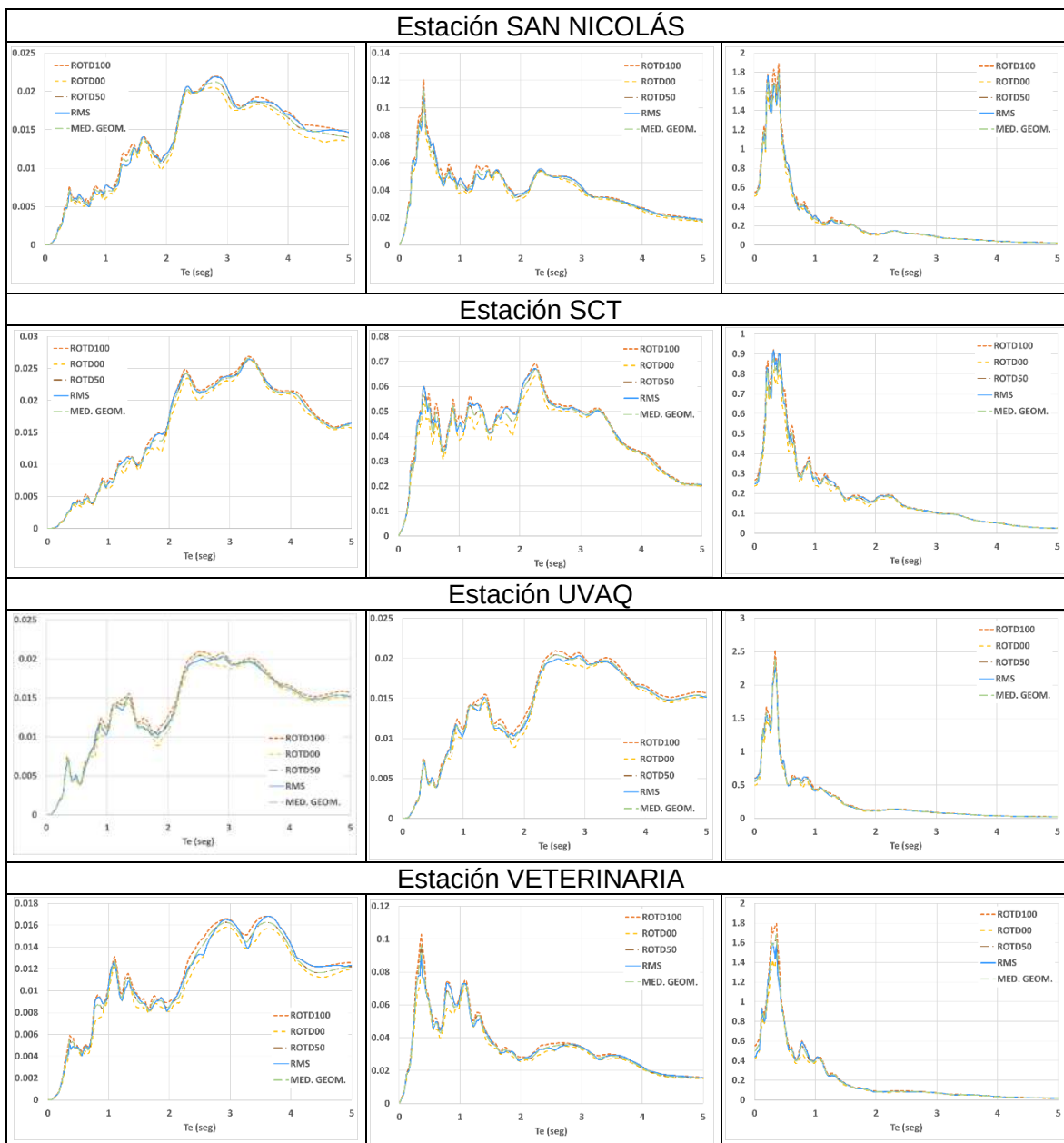


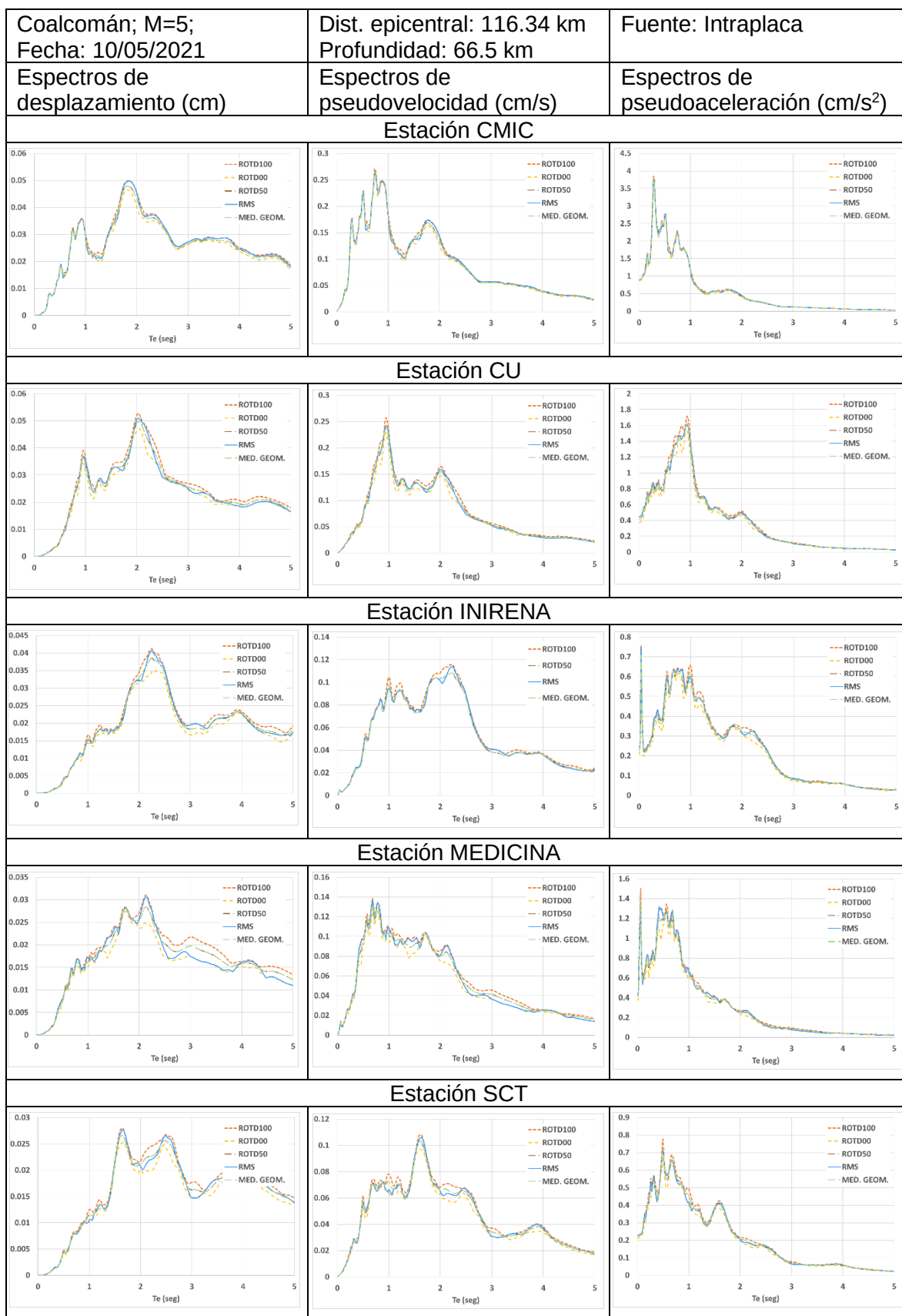


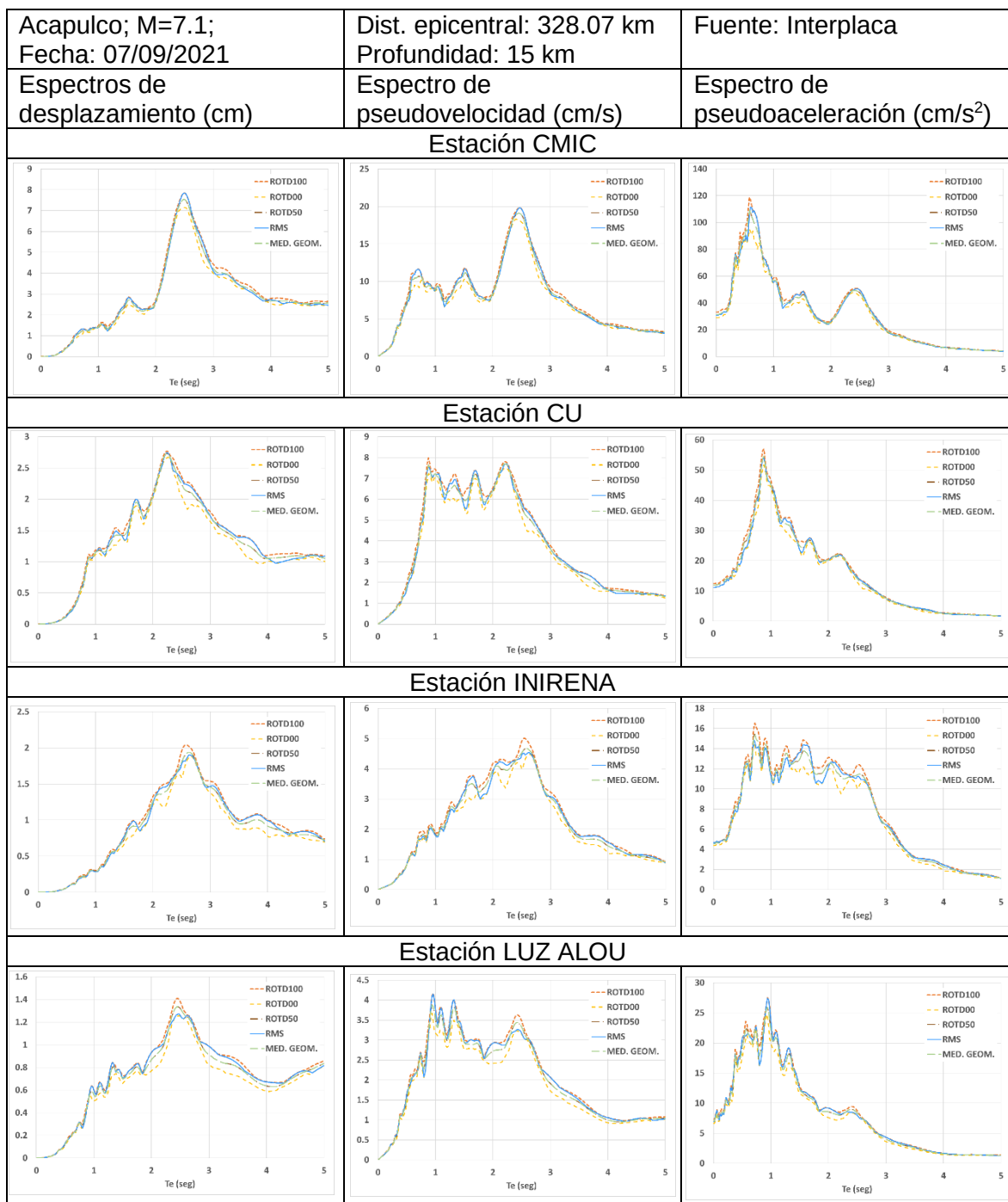


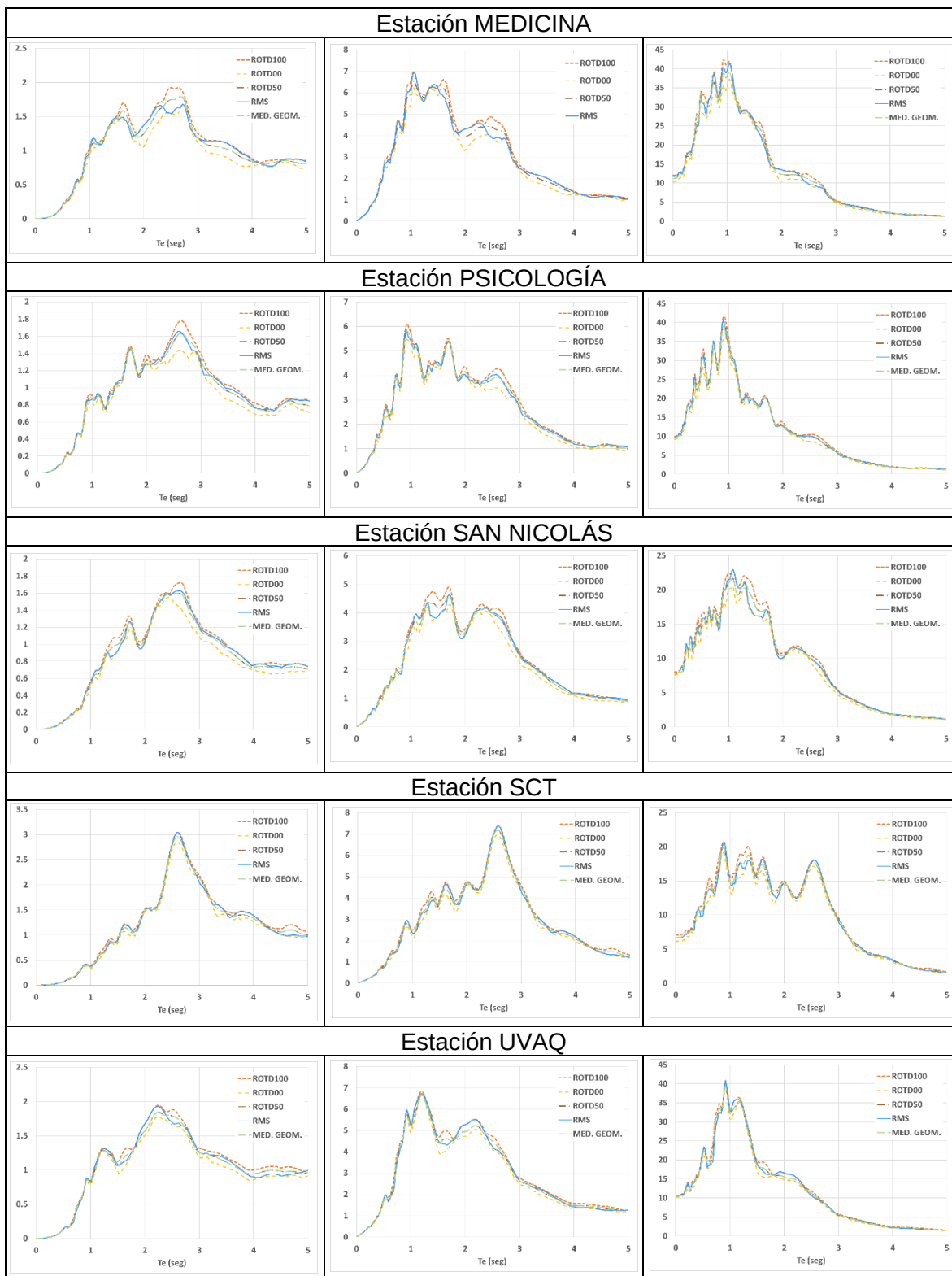


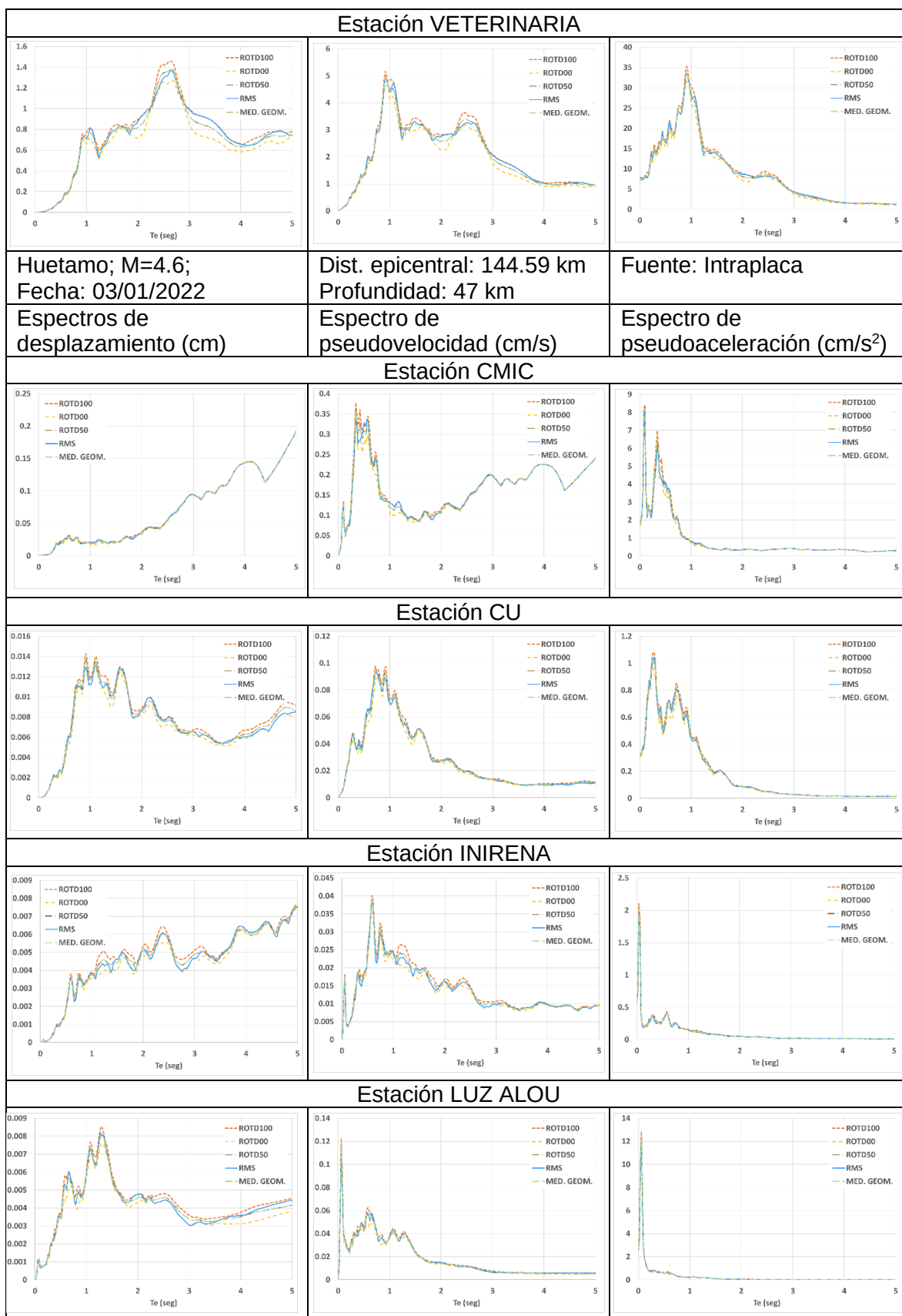


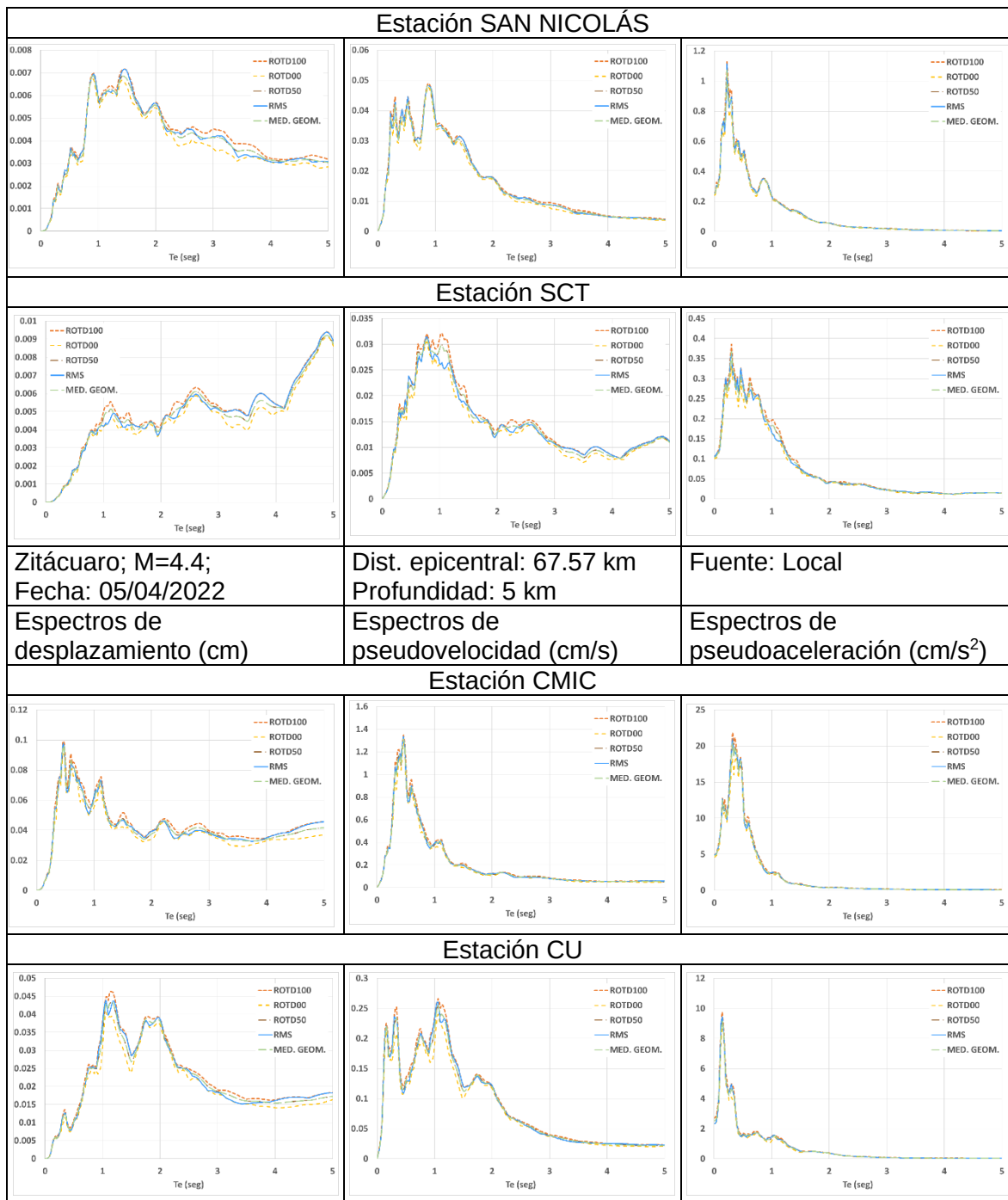


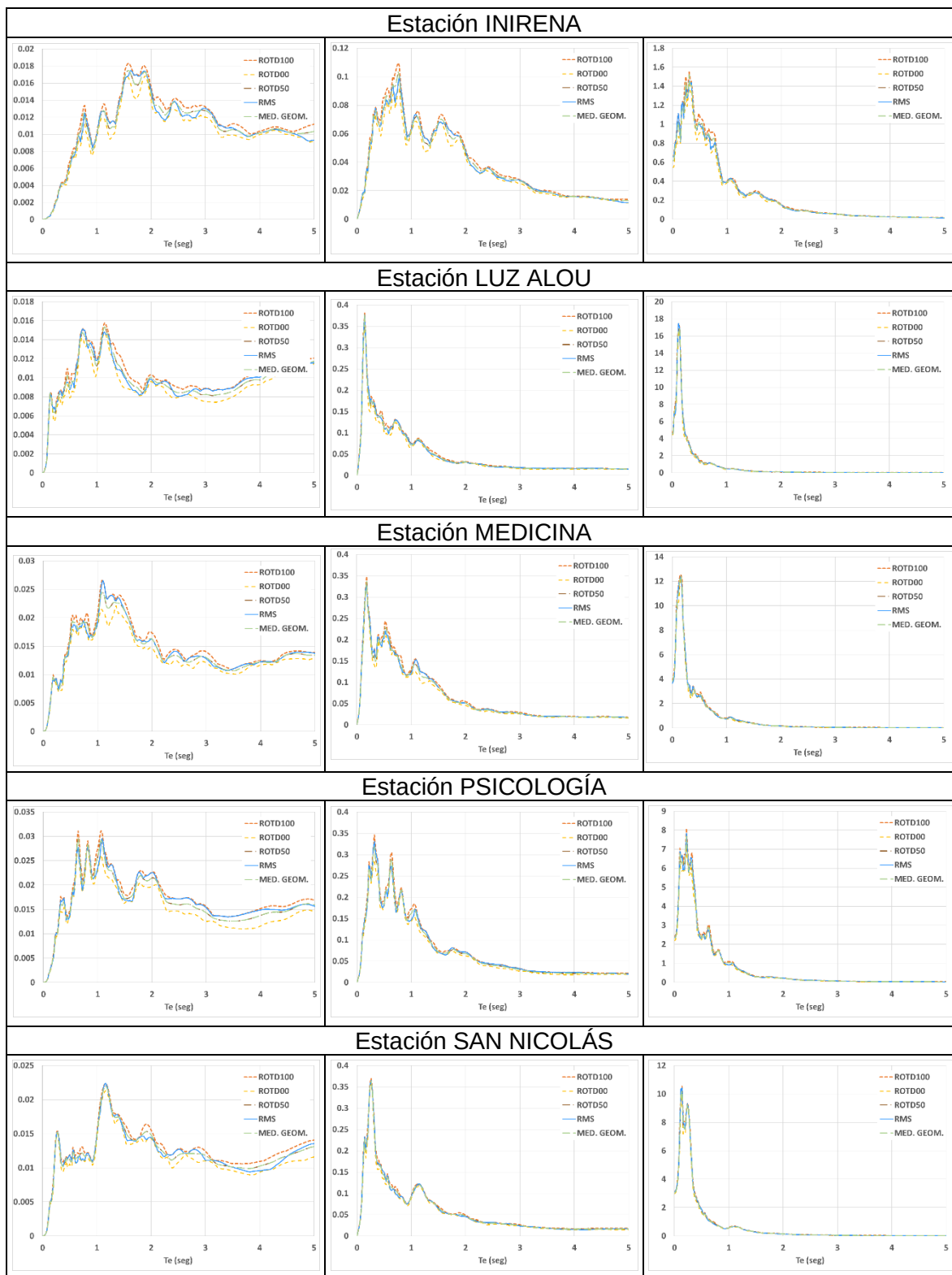


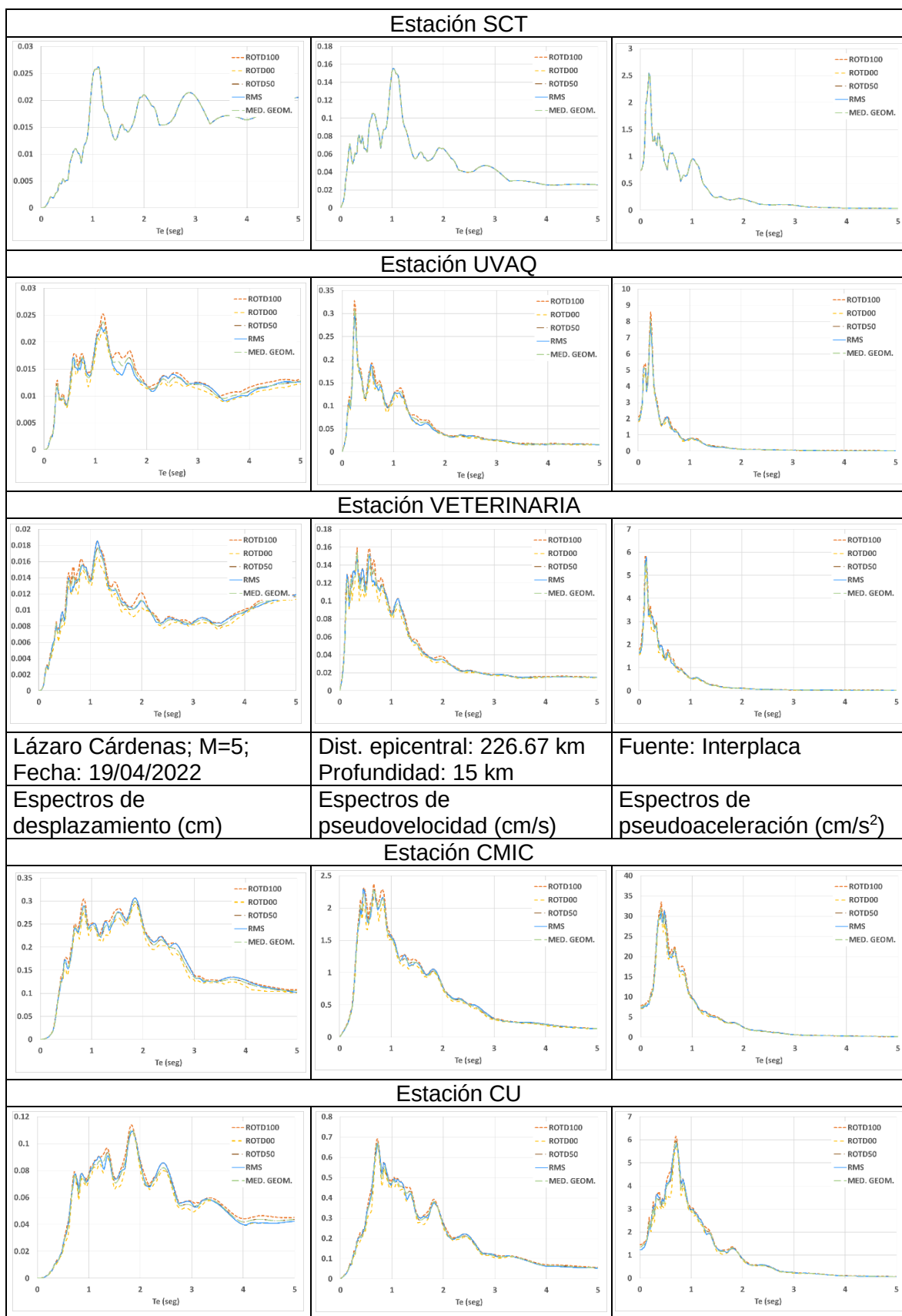


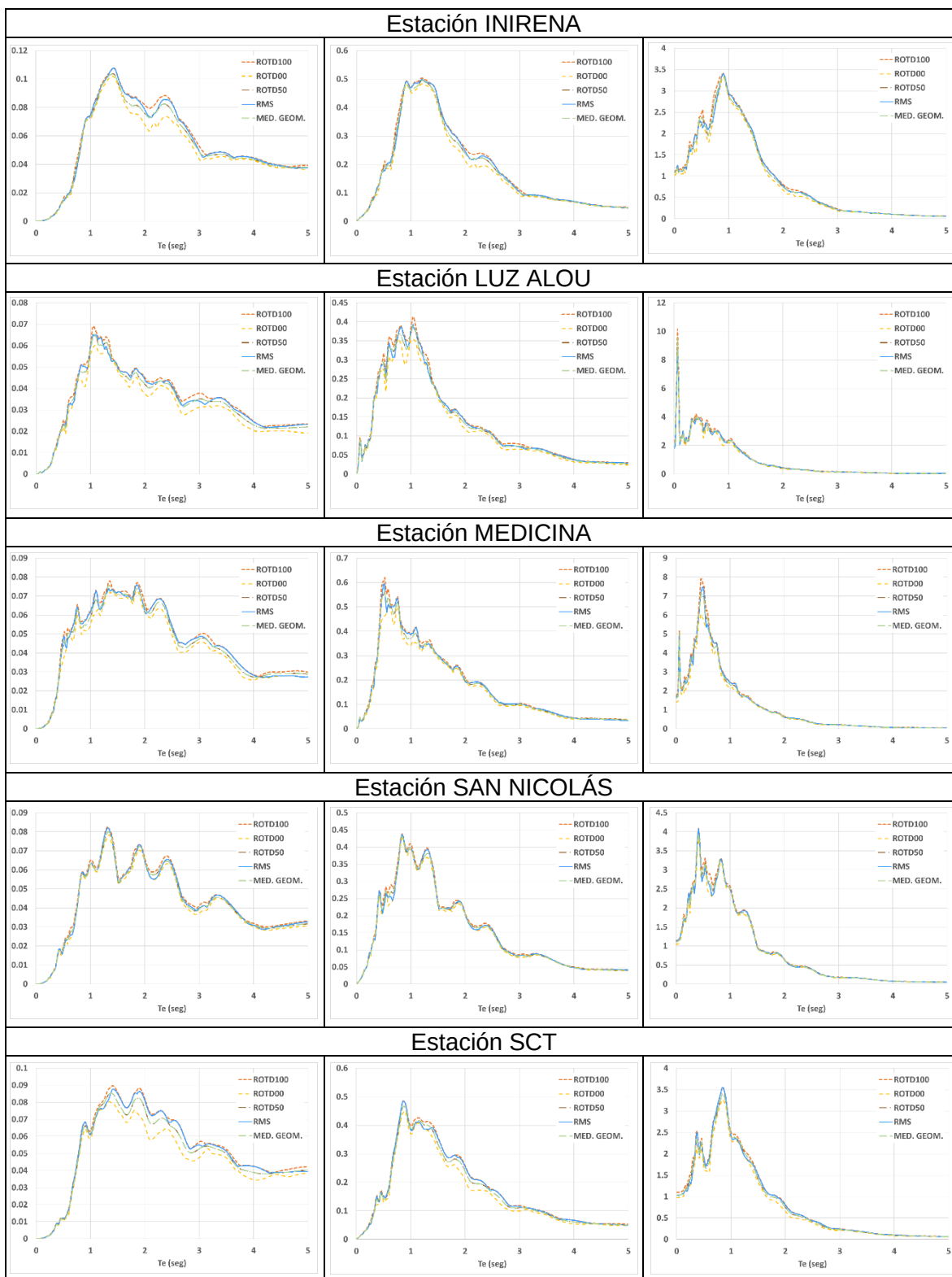


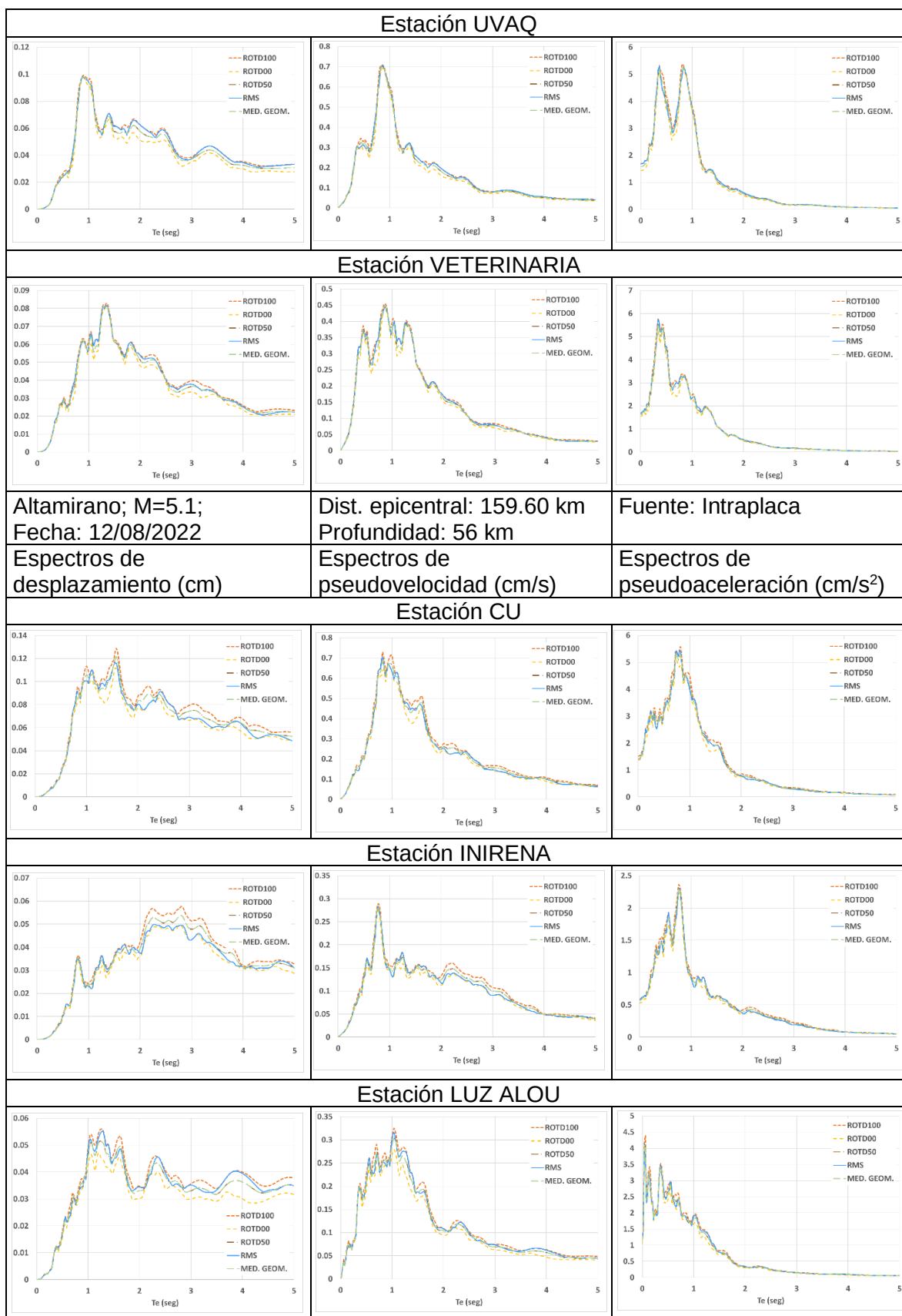


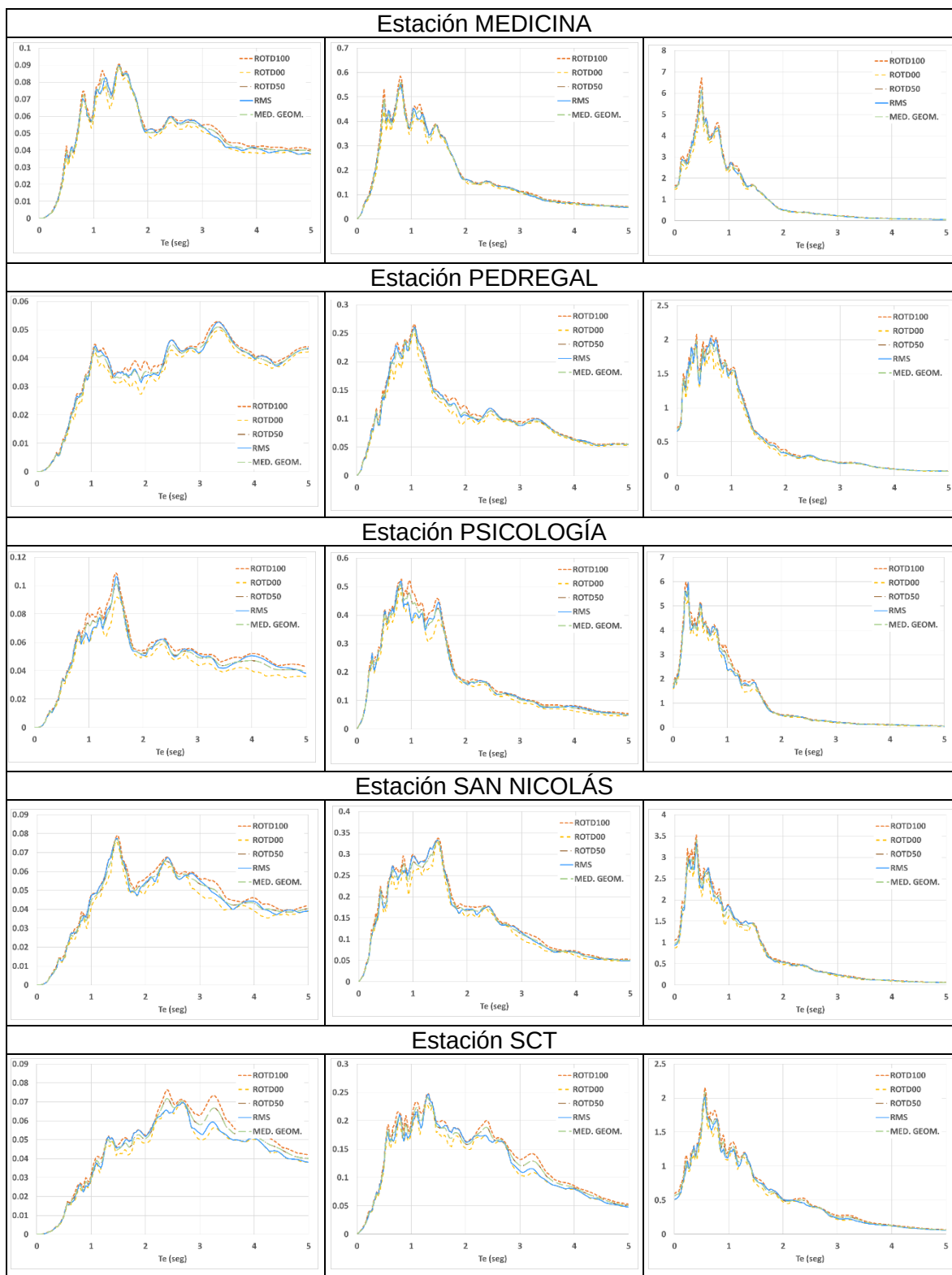


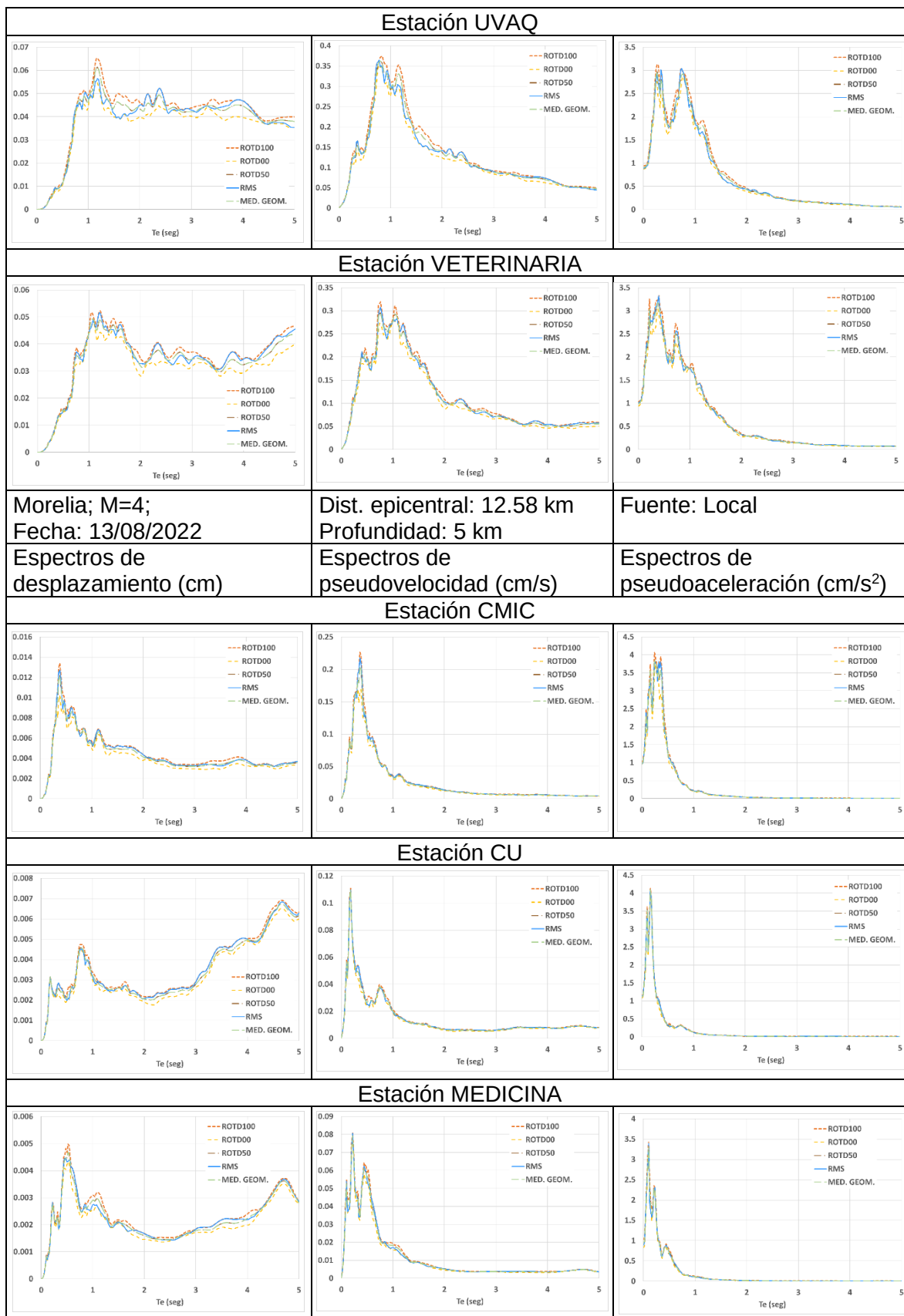


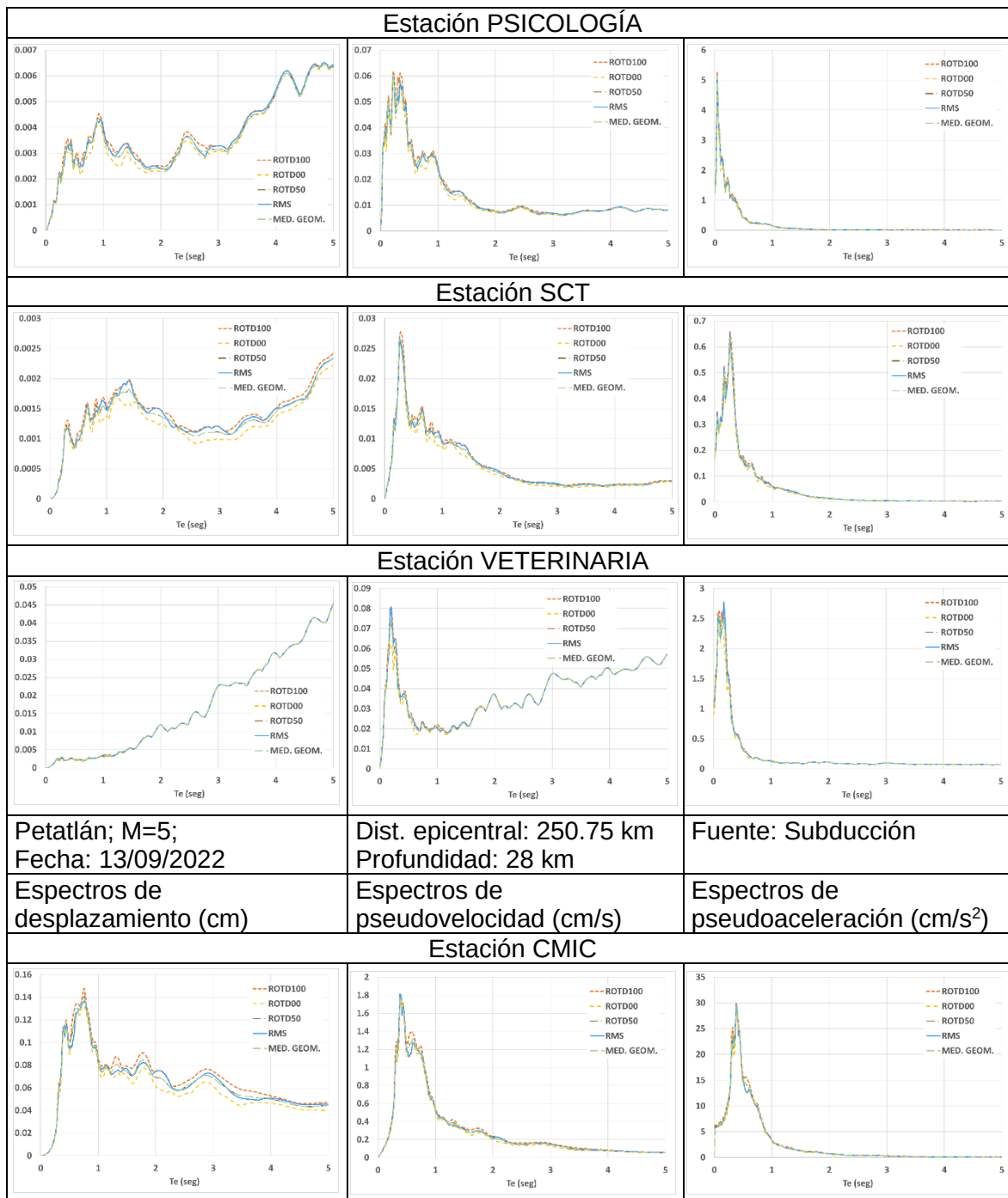


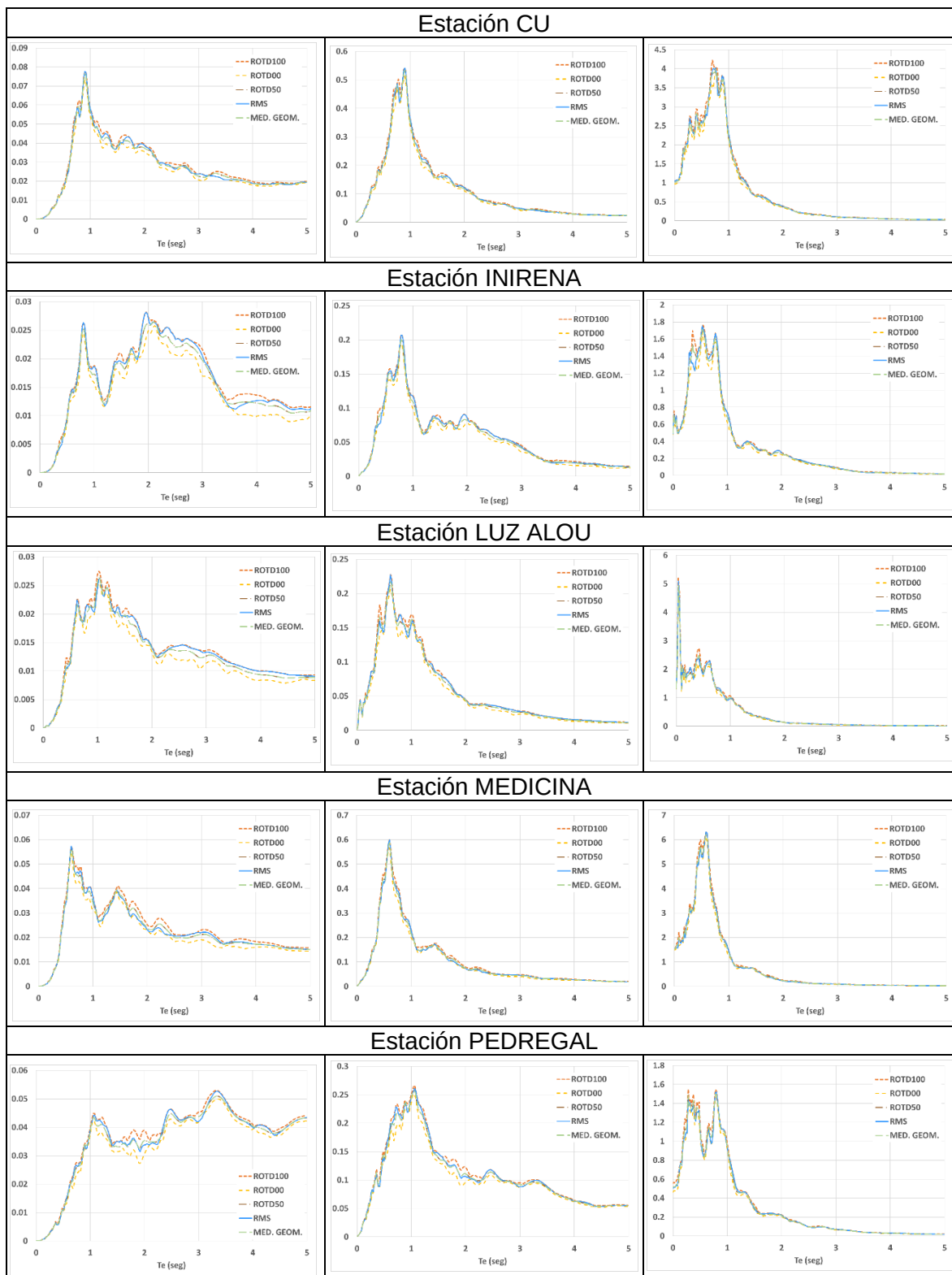


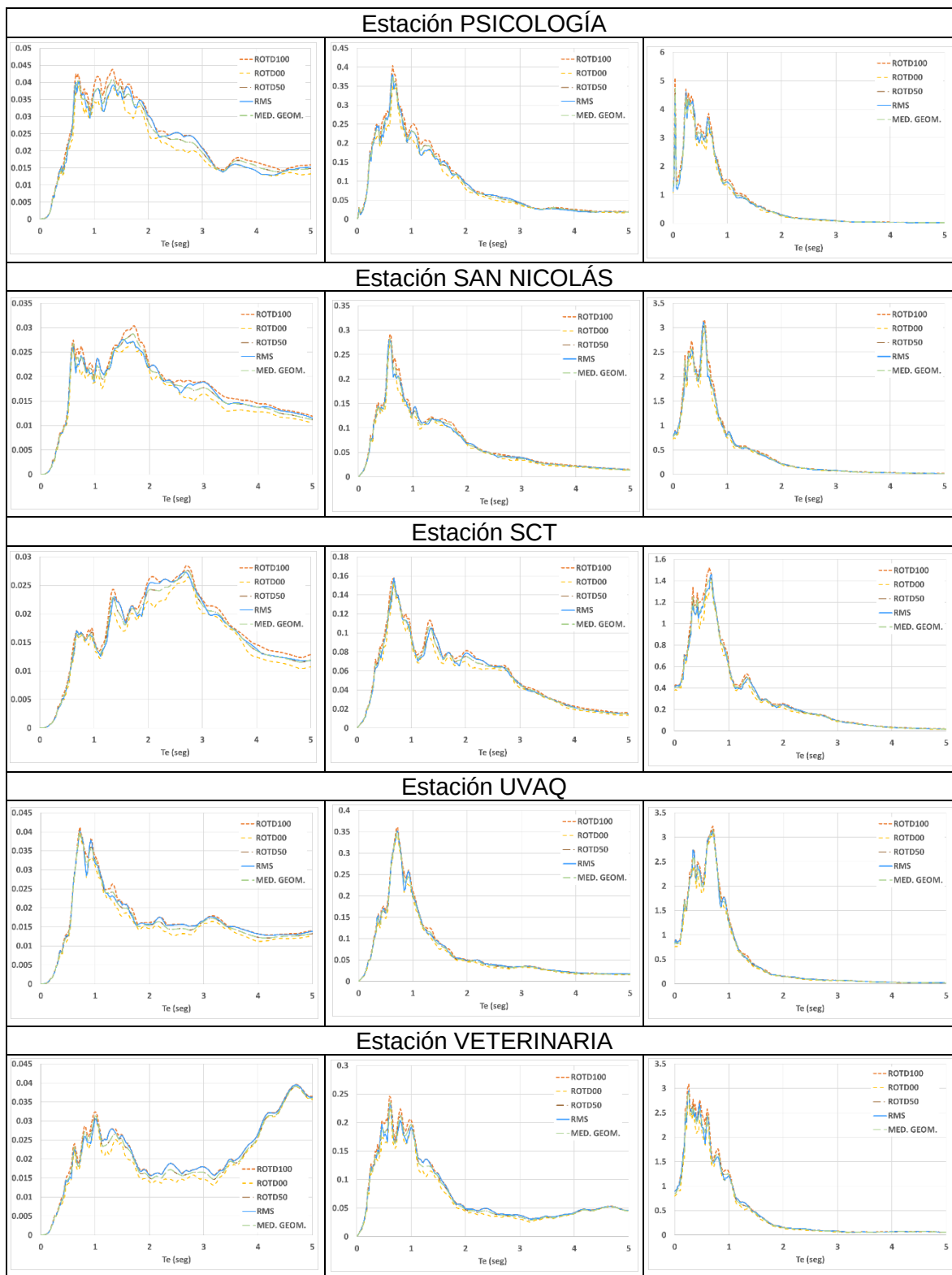


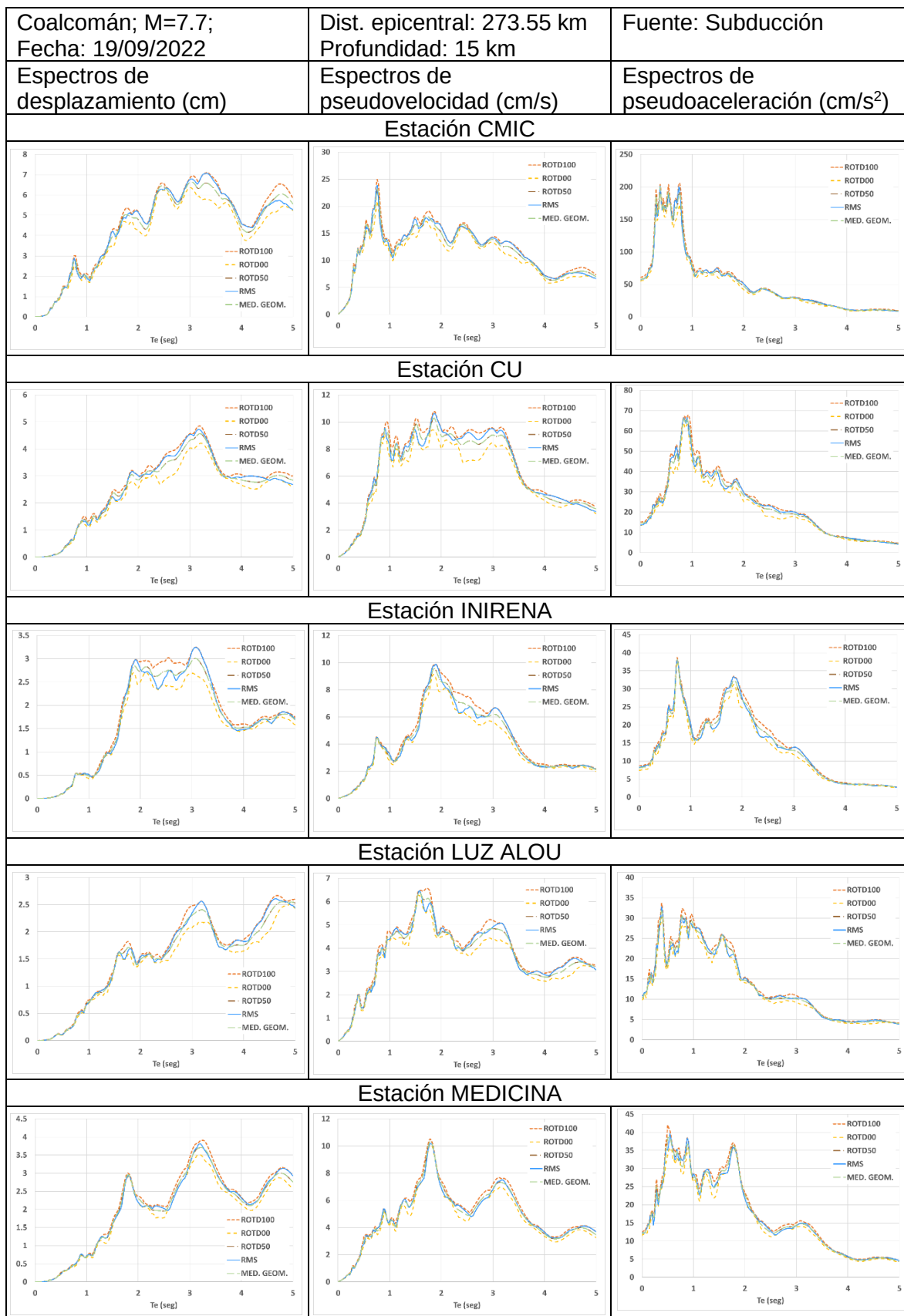


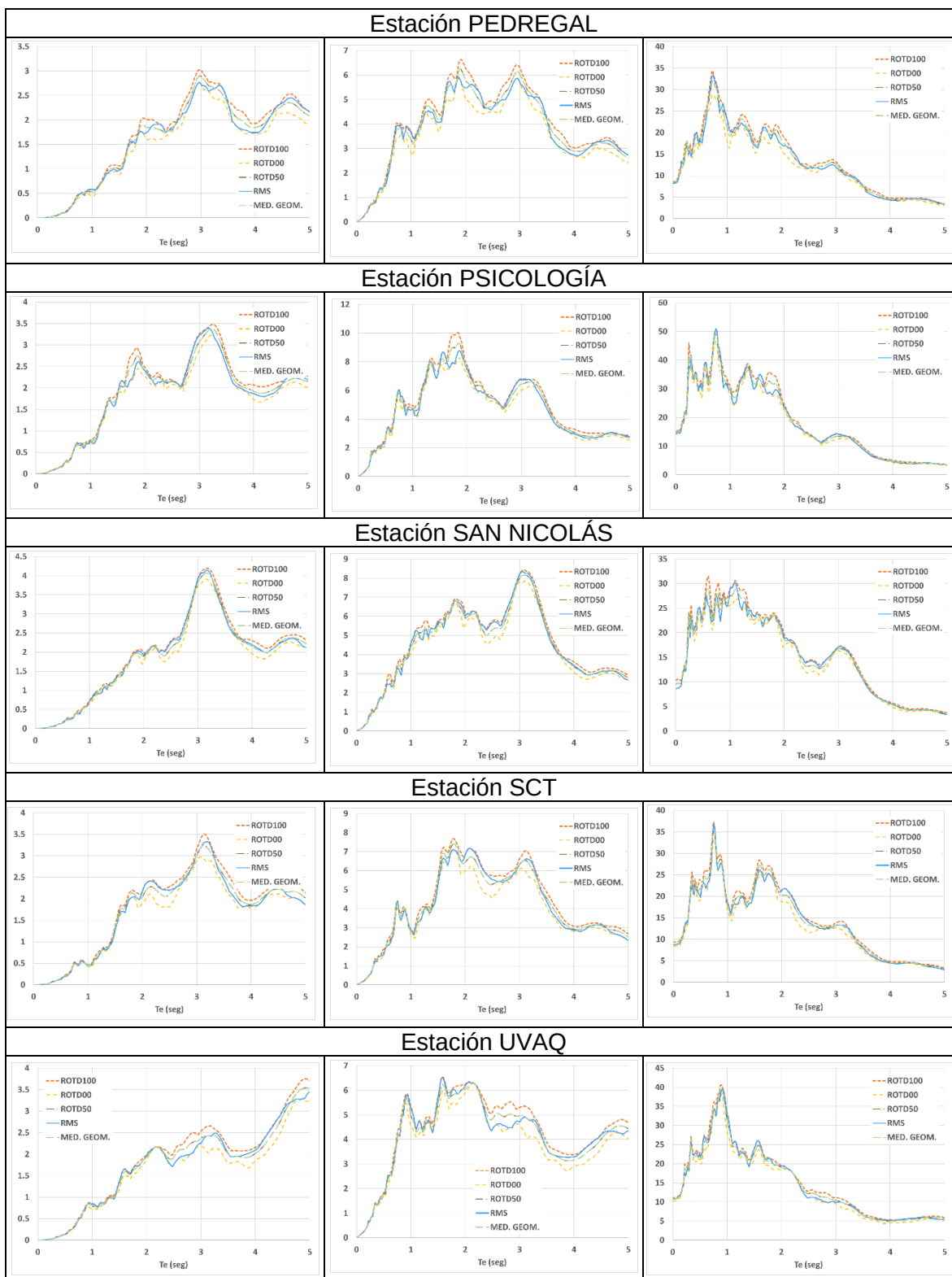


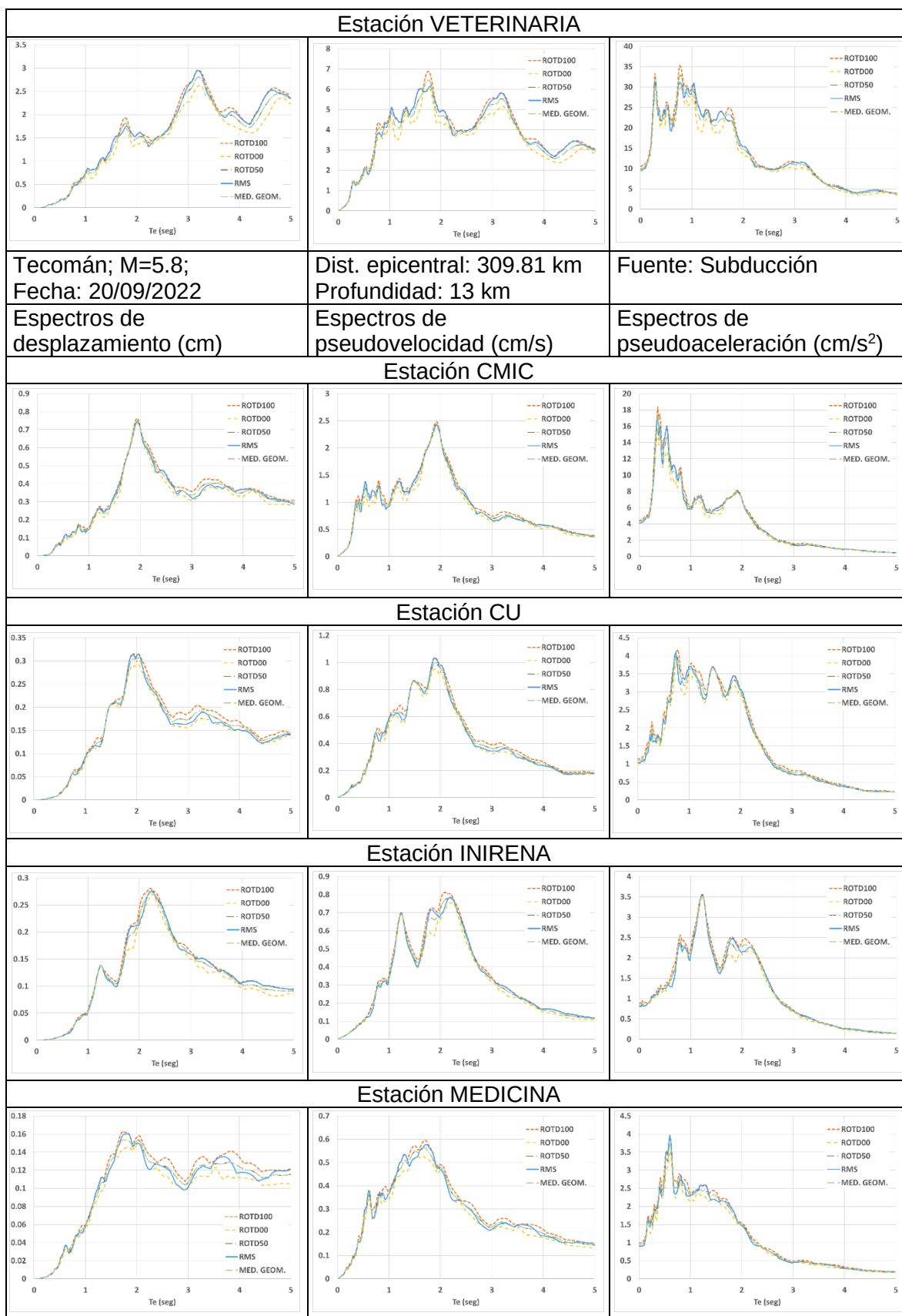


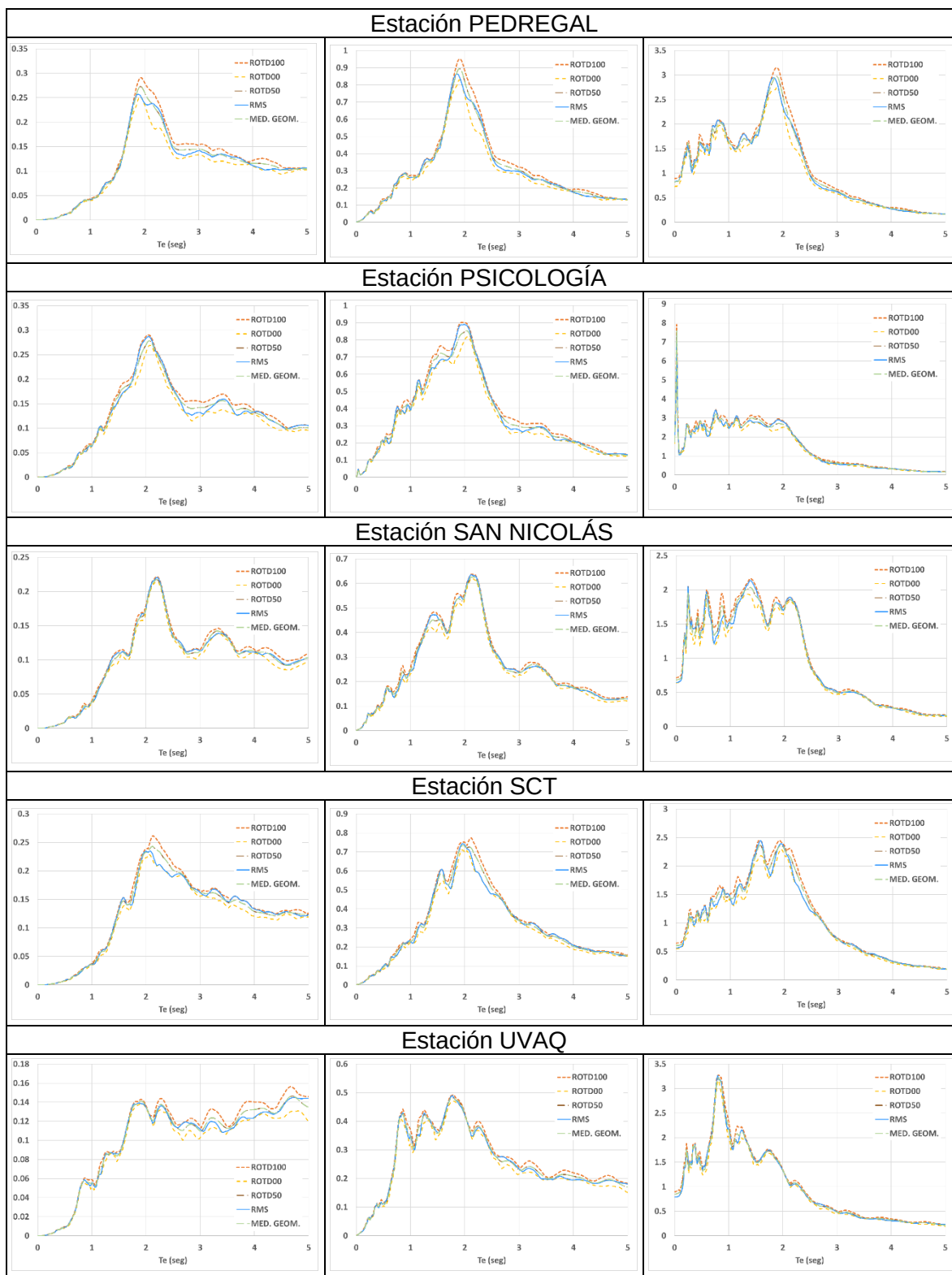


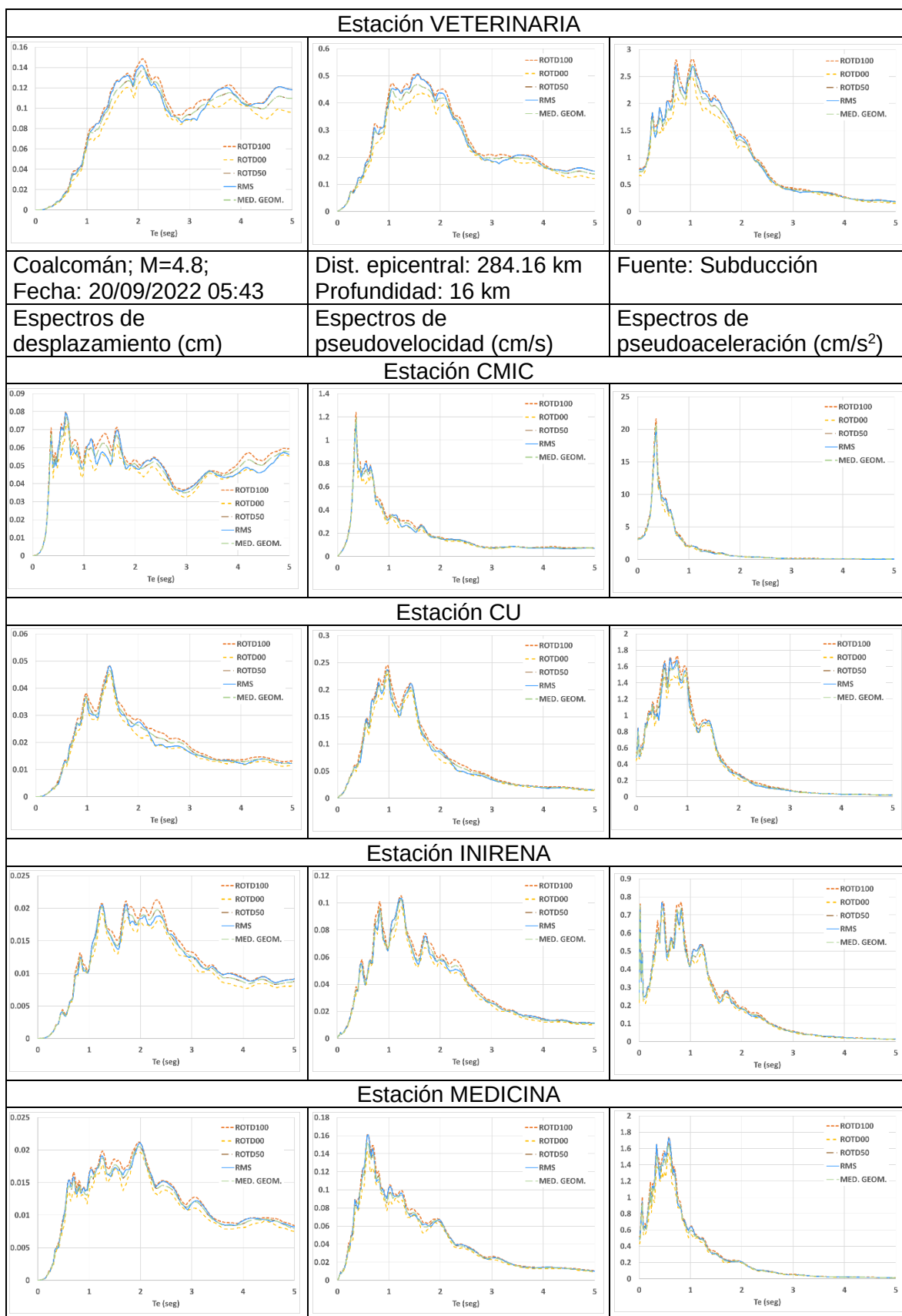


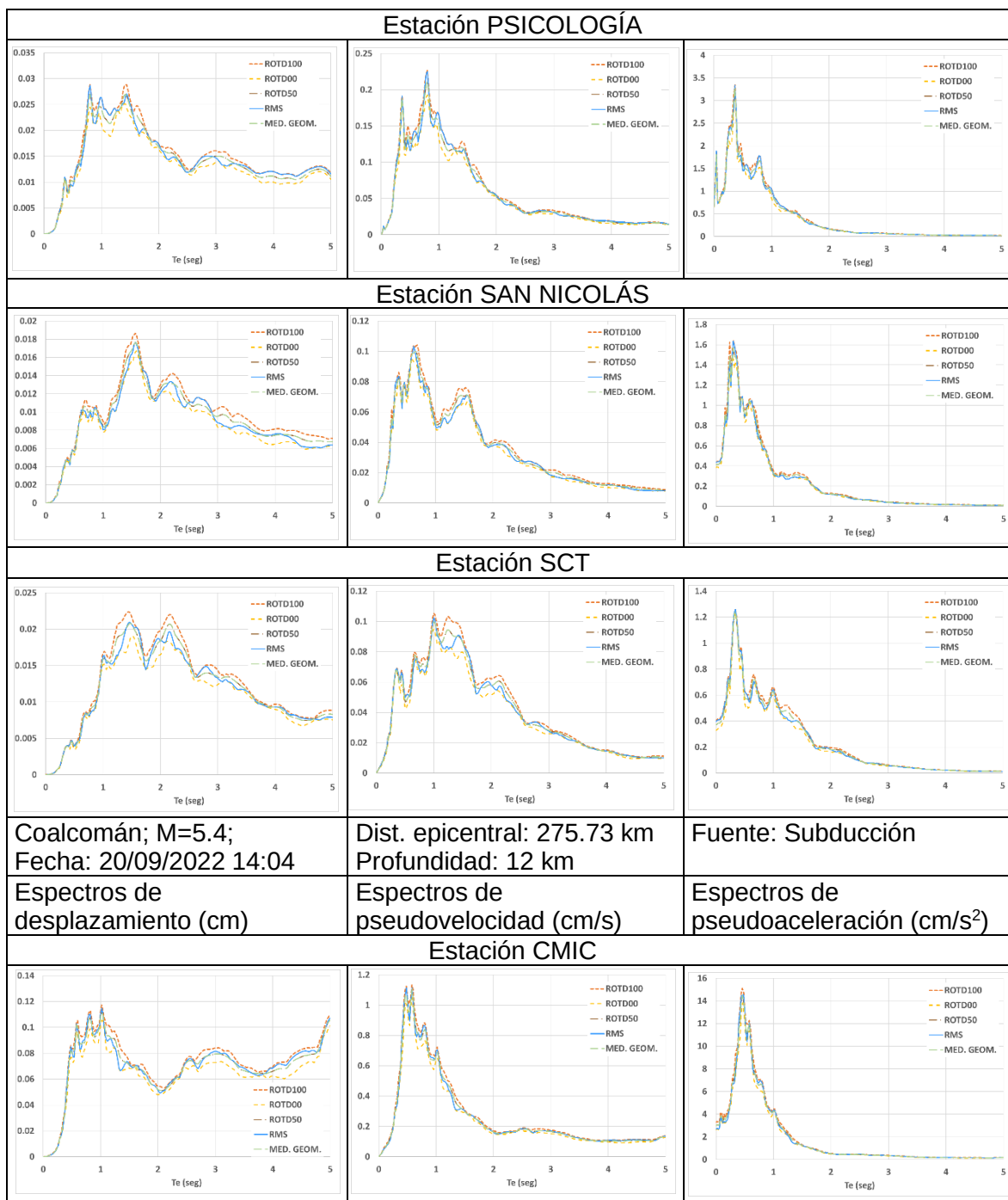


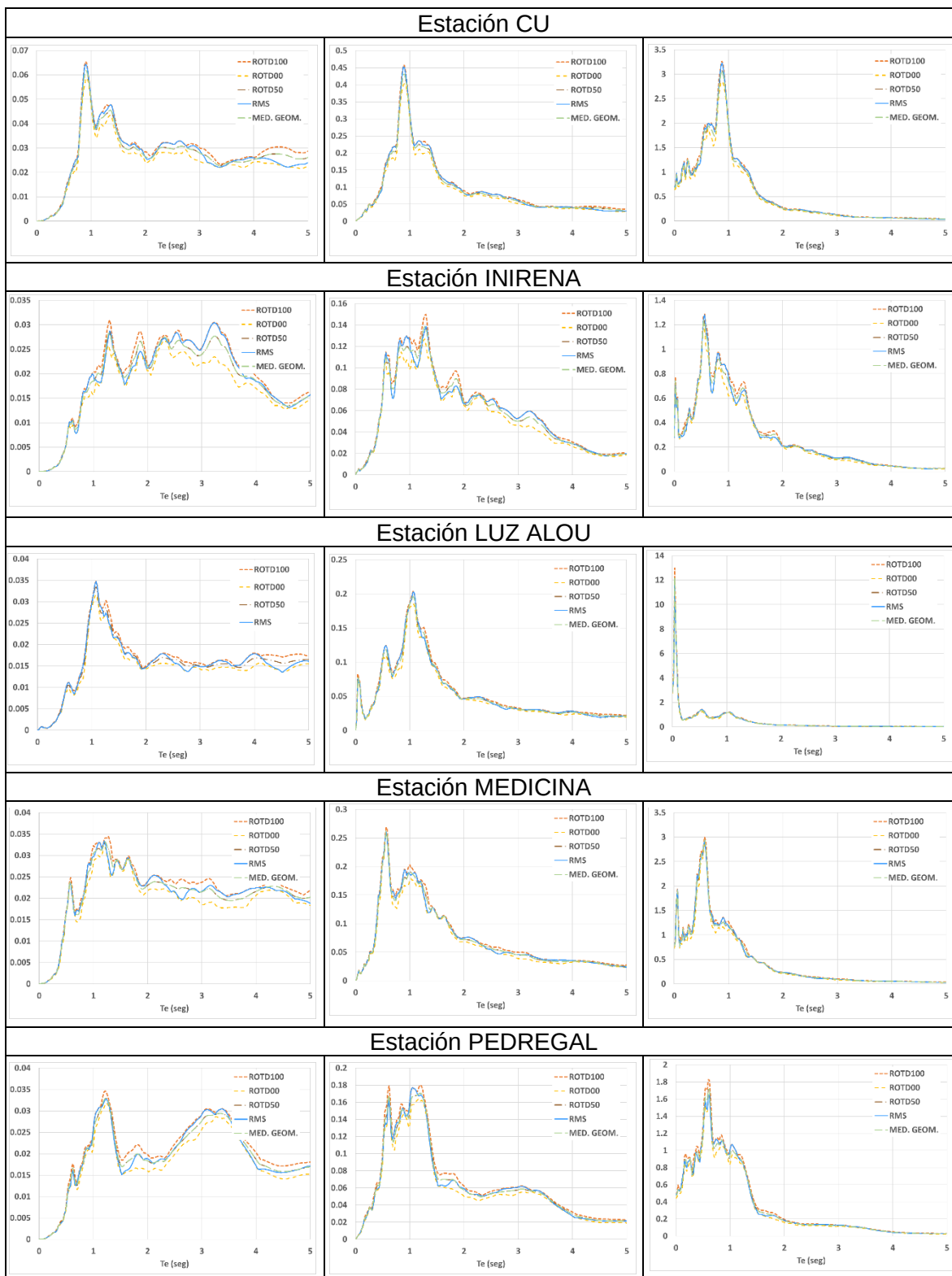


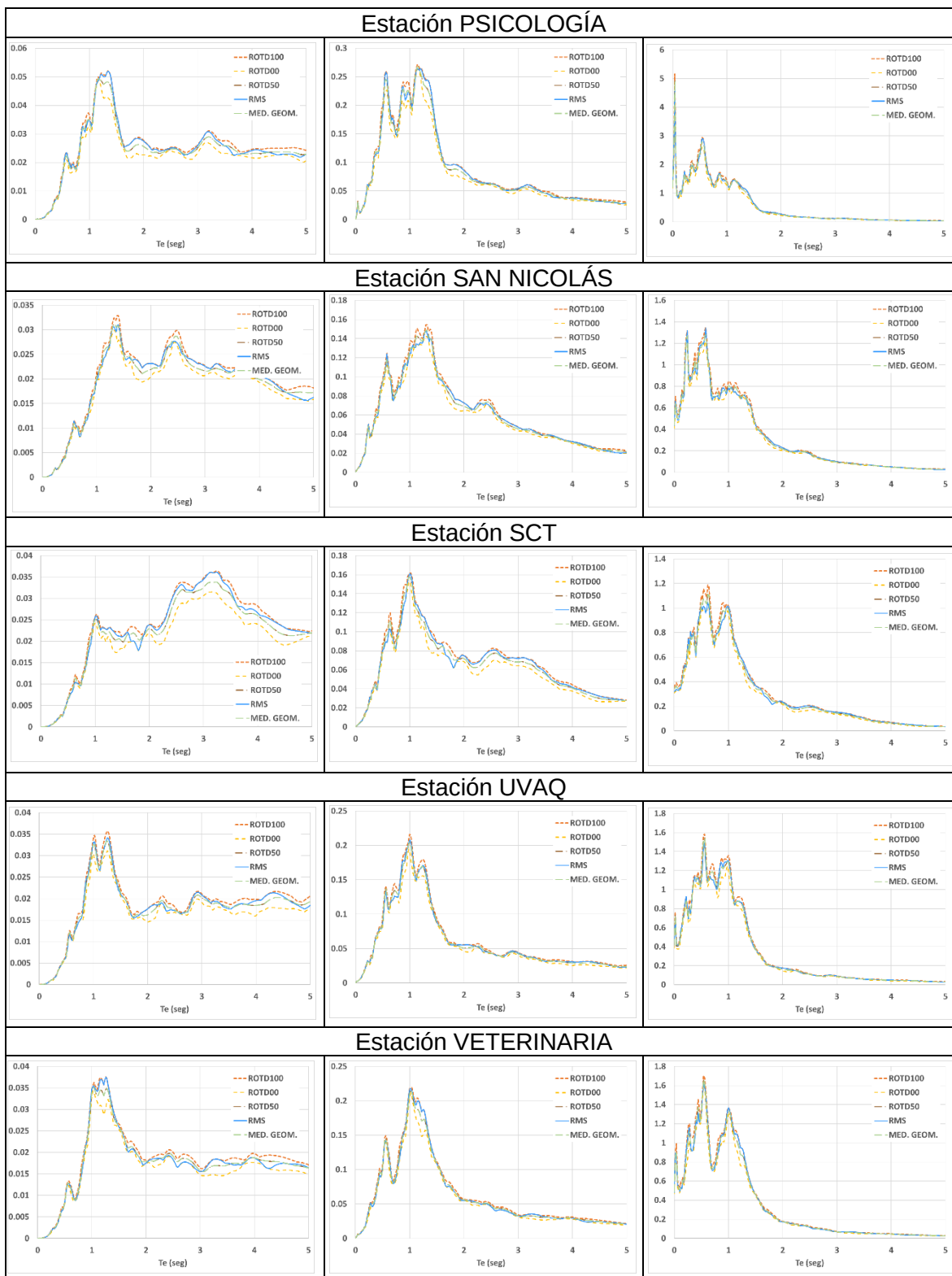


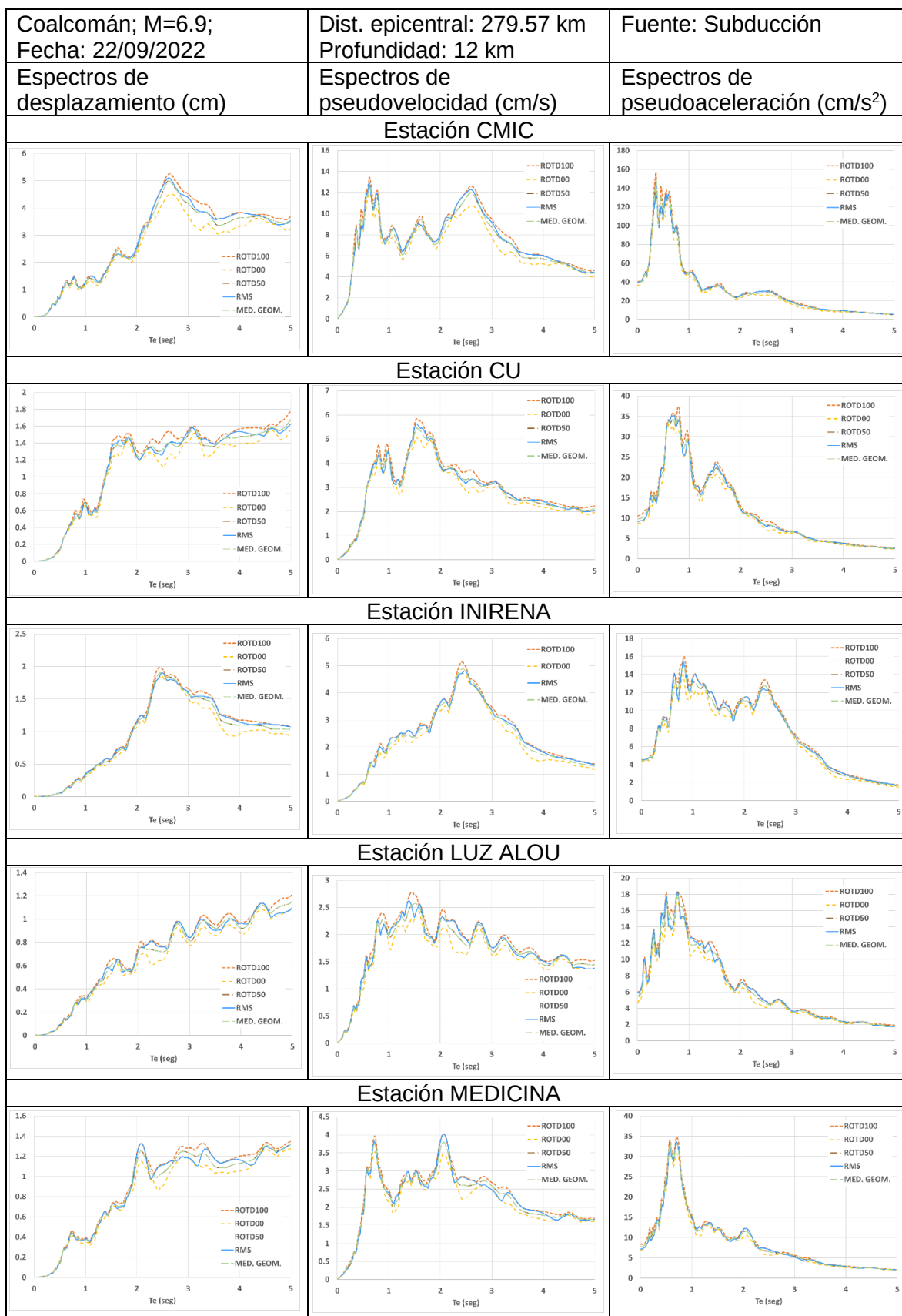


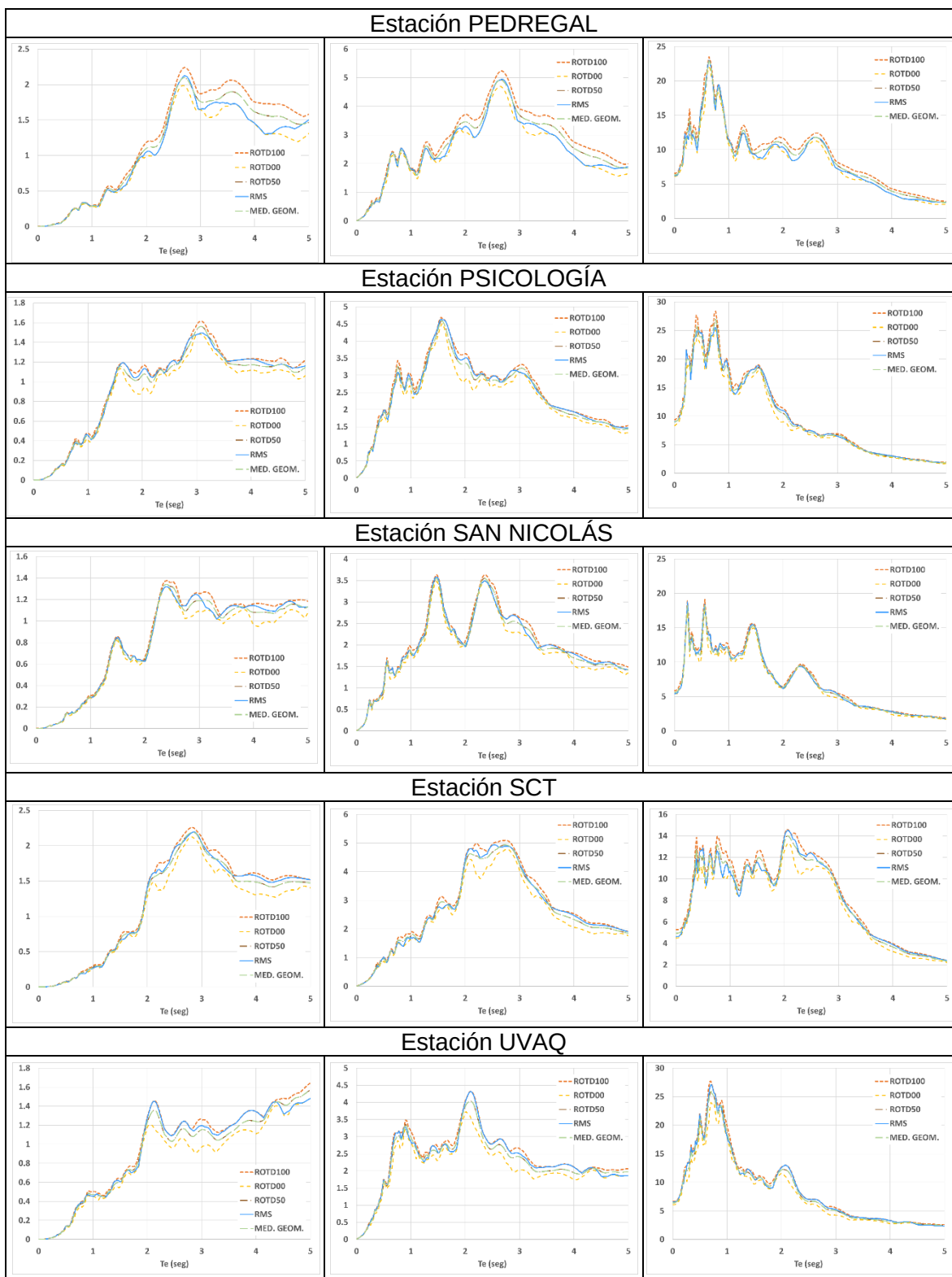


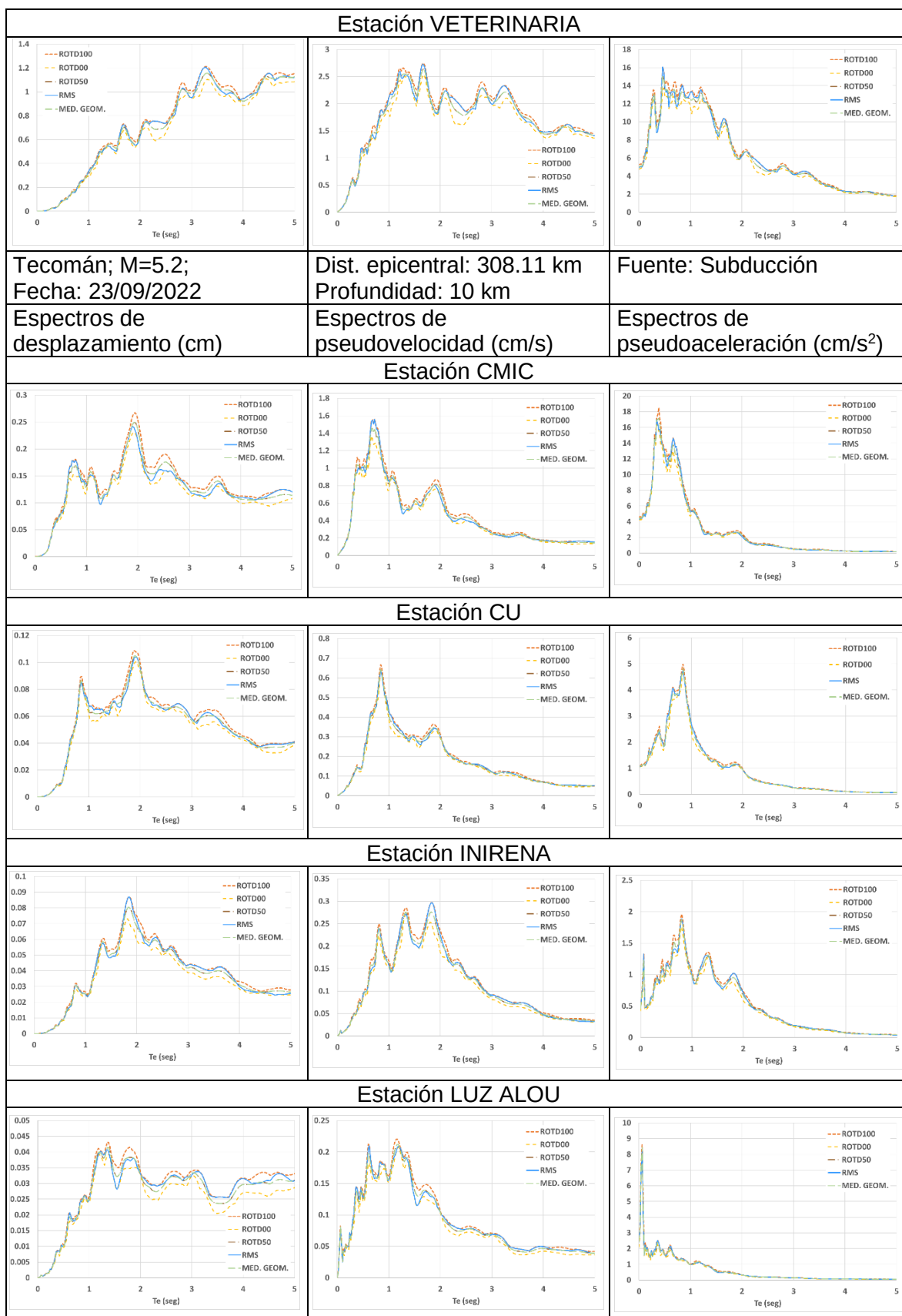


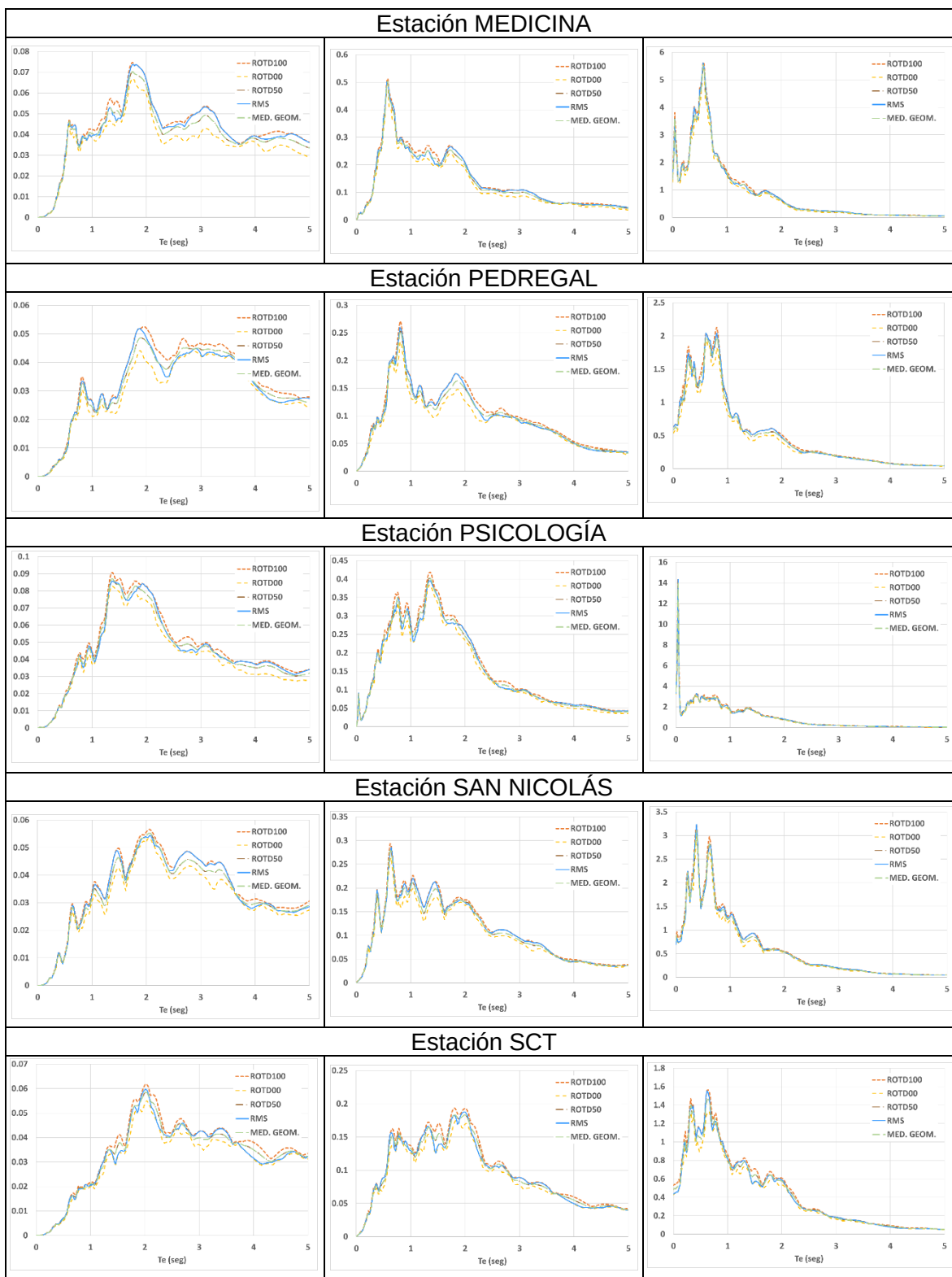


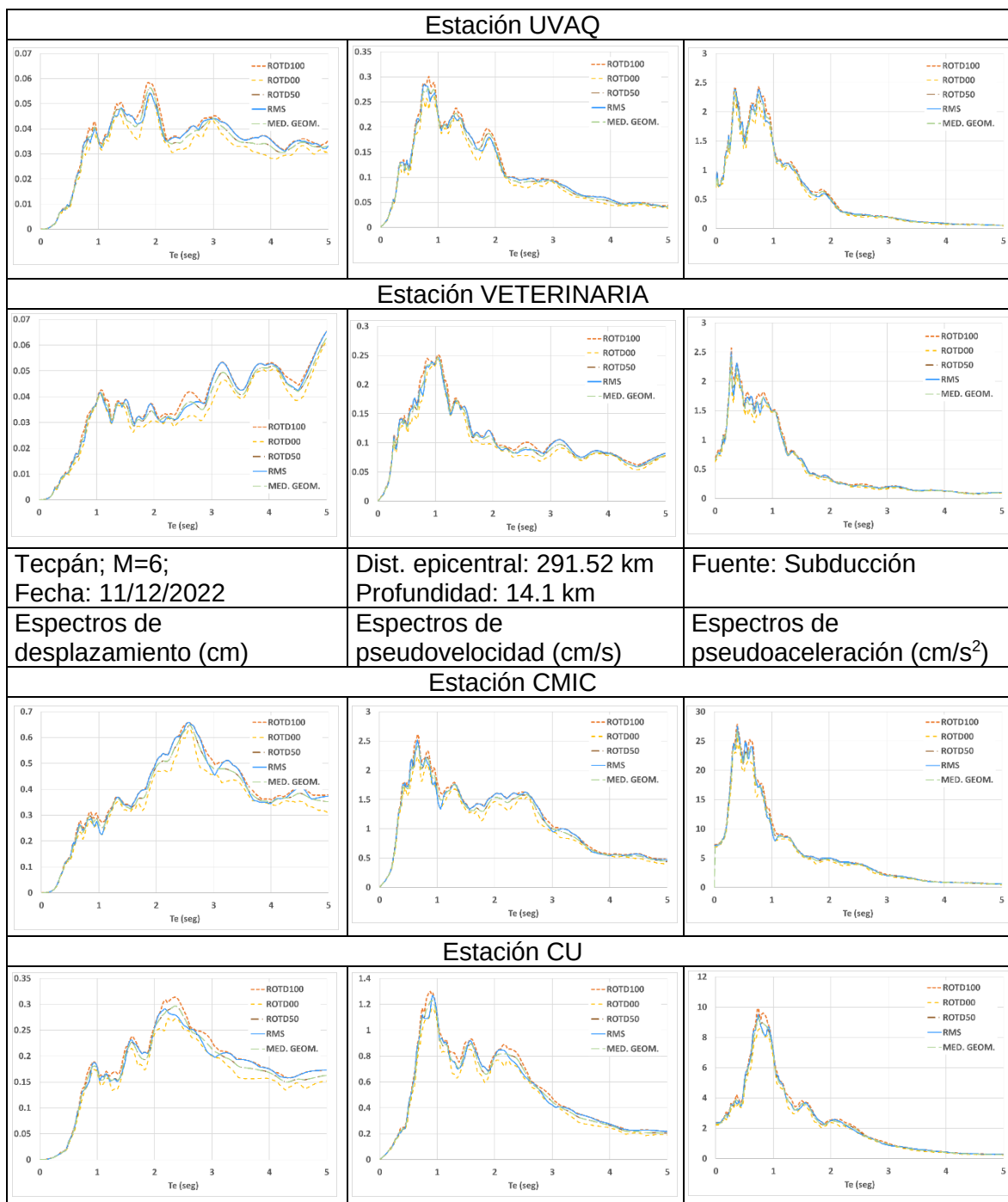


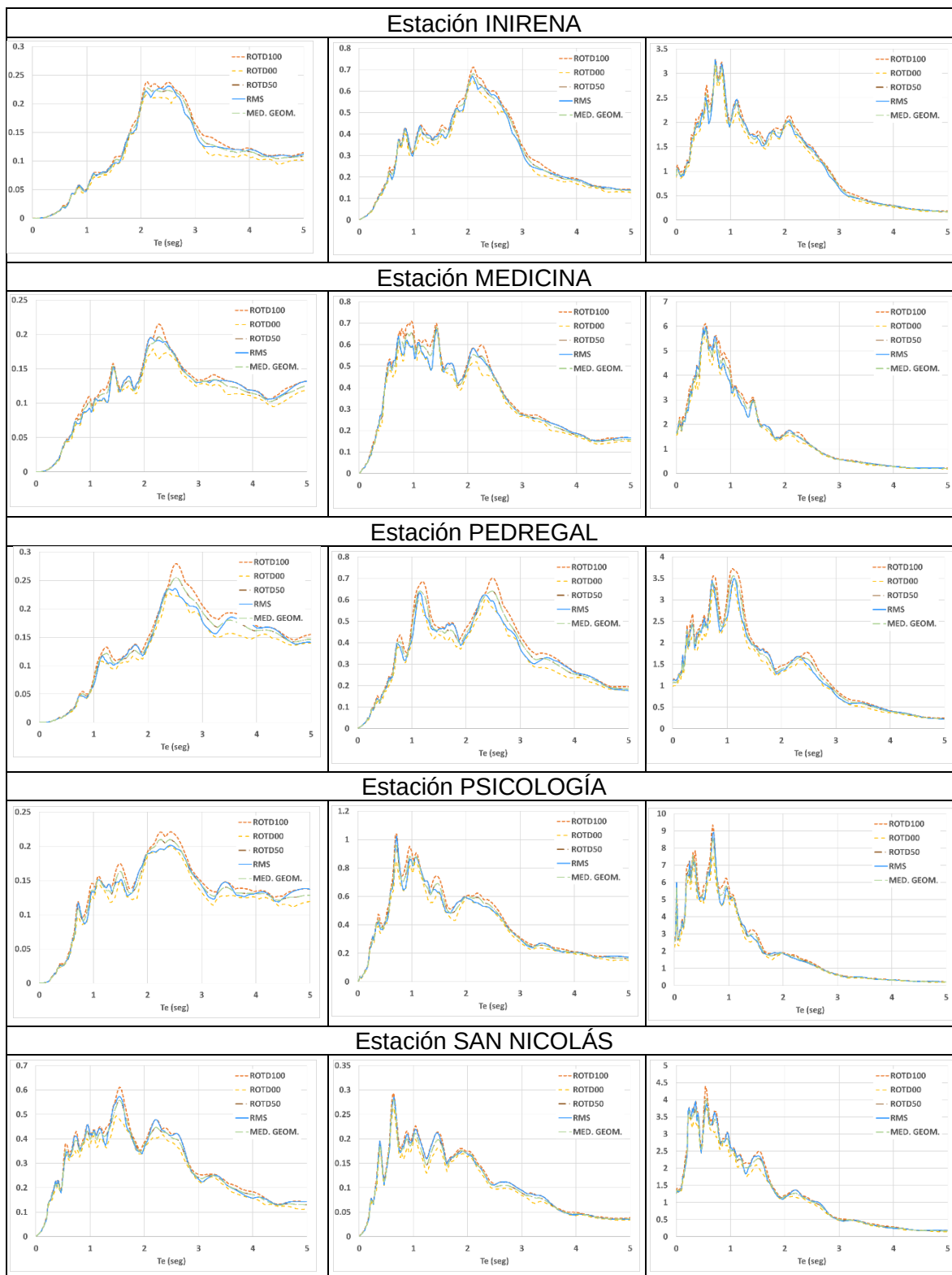


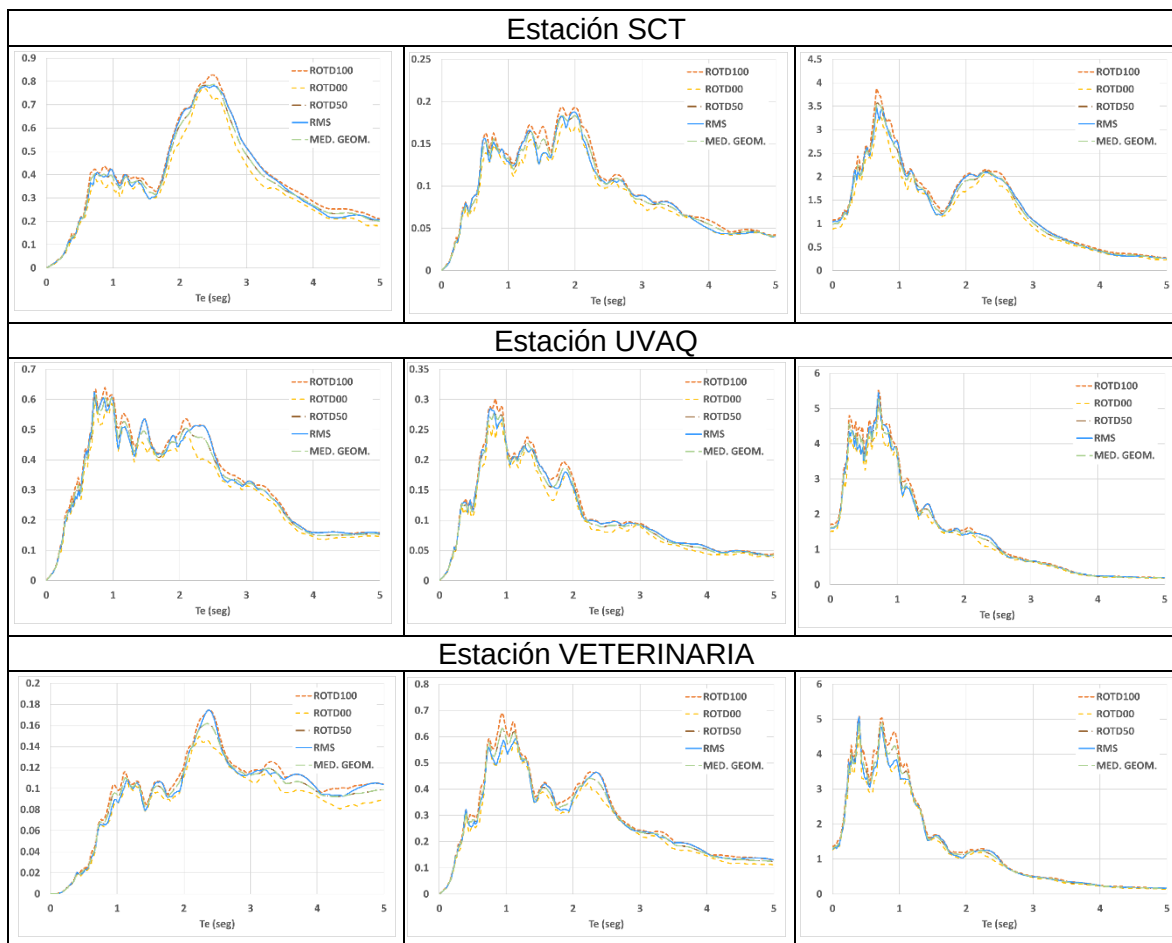












Revisión Bibliográfica

Anbazhagan, P., y Sitharam, T.G. (2006). Evaluation of dynamic Properties and Ground profiles using MASW: Correlation between Vs and N60. *13th Symposium on Earthquake Engineering Indian Institute of Technology, Roorkee*, 1-10.

Archuleta, R. J., y P. Liu (2004). Improved predication method for time histories of near field ground motions with application to southern California. *Tech. rep., United States Geological Survey*.

Assimaki, D., y Kausel, E. (2002). An equivalent linear algorithm with frequency- and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), 959–965.

Bayona, J., Suárez, G., & Ordaz, M. (2017). A probabilistic seismic Hazard assessment of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico based on historical and instrumentally recorded seismicity. *Geofísica Internacional* 56(1), 87-101. DOI: 10.19155/geofint.2017.056.1.7.

Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60(1), 29-61.

Burdick, L.J. y Langston, C.A. (1977). Modeling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body-wave forms. *Bulletin of the Seismological Society of America* 67(3), 677-691.

Caltech's Tectonics Observatory (2018). The unusual case of the Mexican subduction zone. <https://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/>.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (2018). Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017. <https://eird.org/americas/docs/perdidas-economicas-pobreza-y-desastres.pdf>.

Chatterjee, K., y Choudhury, D. (2013). Variations in shear wave velocity and soil site class in Kolkata city using regression and sensitivity analysis. *Nat. Hazards*, 2057-2082.

Comisión Federal de Electricidad, CFE, (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles.

Cornell, C. A. and Vanmarcke, E. (1969). The major influences on seismic risk. *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Chile*.

De Anda, J., Gómez, A., Juárez, H. (2019). Evaluación de vulnerabilidad sísmica en edificios en la ciudad de México construidos antes de 1985.

D. Asimaki and J. Shi (2017) "SeismoSoil User Manual, v1.3"

Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the seismological Society of America*, 43(1), 17–34.

Esteve, L. (1967). "Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico". *Tercer Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas, Universidad Central de Venezuela*.

Fauzi, A., Irsyam, M., y Fauzi, U. J. (2014). Empirical correlation of shear wave velocity and n-spt value for jakarta. *Int. J. of GEOMATE, Vol. 7, No. 1 (Sl. No. 13), 980-984*.

García, A., Pozos-Estrada, A., Hong, H., y Gómez, R. (2012). Estimación del peligro sísmico debido a sismos interplaca e inslab y sus implicaciones en el diseño sísmico. *Revista de ingeniería, 86, PP. 27-54*.

Garduño-Monroy, V., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., y Rodriguez-Torres, G. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm. 1, p. 37-54*.

Gül, H. D. y Taskin, K. (2021). The effect of component rotation on the response spectra of near-fault ground motion records. *6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.

Gutenberg, B. & Richter, C. (1954). Seismicity of the Earth. *second ed., Princeton Press*.

Hanumantharao, C., y Ramana, G.V. (2008). Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *J. Earth Syst., Sci., 117, S2, 719–730*.

Issgeo. (2021). Sondeos de penetración estándar en el distribuidor vial Tecnológico, Morelia, Michoacán. *Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de Michoacán*.

Jara, J. (1986). *Observations on 19 september 1985 Mexico earthquake. Pacific Structural Steel Conference, 237 – 255*.

Jara, J. y Jara, M. (2007). *Peligro Sísmico. Morevallado editors*.

Jara J. y Rosenblueth E. (1988). Probability distribution of times between characteristic subduction earthquakes. *Earthquake Spectra, 4, pp 499-529*.

Jara M., Hurtado F., Jara J.M., Suárez R., Ramírez M., Ruíz-Sandoval M., Aguilar J., Carballo J. e Iglesias J., (1994). Zonificación sísmica de la ciudad de Morelia. *1er seminario Interuniversitario de Ingeniería Sísmica, Chilpancingo, Guerrero*.

Kirar, B., Maheshwari, B.K., y Muley, P. (2016). Correlation between Shear Wave Velocity (Vs) and SPT resistance (N) for Roorkee region. *Int., J., of Geosynth., and Ground Eng., 1-11*.

K. Konno & T. Ohmachi (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol.88, No.1, 228-241.

Kumar, A., Anbazhagan, P., y Sitharam, T.G. (2010). Shear Wave Velocity Profiling for Lucknow Urban Centre Using Seismic Refraction Survey. *Indian Geotechnical Conference, GEO. trendz.*, 167-170.

Langston, C.A. (1977). The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter. *Bulletin of the Seismological Society of America* 67(3), 1029-1050.

Langston, C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal Geophysical Research* 84(B9), 4749-4762.

Maheswari, R. U., Boominathan, A., yDodagoudar, G.R. (2009). Use of Surface Waves in Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance of Chennai Soils. *Geotech. Geol. Eng.*, 119-137.

McGuire, R.K. (2004). MNO-10, Seismic Hazard and Risk Analysis. *Earthquake Engineering Research Institute*, 240 p.

México. Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional. SSN (2022). *Catálogo de sismos*. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Mier, J., Mejía, J., Núñez, A., Paniagua, Walter., Vicente, R., Aramburu, J., Ellstein, A., Juárez E., y Esquivel, R. (1968). El subsuelo de la ciudad de Morelia. *División de Ingeniería, cuadernos técnicos, Centro de Comunicación Educativa No. 1*.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30, 25-33.

NTC-DS. (2017). Normas Técnicas Complementarias del Diseño por Sismo de la Ciudad de México.
<https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>

NTC-RCM. (2019). Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de Morelia.
http://morelos.morelia.gob.mx/ArchivosTranspMorelia/Art3519/Norm/Fraccl/normas_tecnicas%20complementarias%20del%20reglamento%20de%20construcciones.pdf

QGIS.org, 2022. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
<http://www.qgis.org>

Roeslin, S., Juárez-García, H., Kenneth, J., Rajesh, P. y Gómez-Bernal, A. (2020). El terremoto del 19 de septiembre de 2017 en Puebla, México: Informe final del equipo de reconocimiento de Nueva Zelanda. *Boletín de la Sociedad Neoselandeza de Ingeniería Sísmica*, Vol. 53, No. 3.

S. K. Singh, M. Ordaz, & L. E. Pérez-Rocha (1996). The great Mexican Earthquake of June 1858: Expected Ground Motions and Damage in Mexico City from a Similar Future Event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, N° 6, pp. 1655-1666.

Seed, H. B., and I. M. Idriss (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, UCB/EERC-70/10. *Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley*.

Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte Especial, Sismo del día 19 de septiembre de 2017. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf

Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte especial, Sismo de Tehuantepec. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf

Servicio Sismológico Nacional. Reportes históricos, Sismos de 1932. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/1932/SSNMX_rep_his_19320603_colimajalisco_M82.pdf

Silva, L. (2019). Crónicas de seis siglos de sismos en México: lecciones aprendidas y perspectivas. *Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros, A. C.*

Singh, S. K., Rodríguez, M., y Esteva, L. (1983). Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol.73, 1779-1796.

SIObl. (2012). Estudio de mecánica de suelos, proyecto de entronque del cruce de avenida acueducto y periférico poniente en la salida a mil cumbres, en la ciudad de Morelia, Michoacán. *Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de Michoacán*.

Suárez, G., Caballero-Jiménez, G. V., & Novelo-Casanova, D. A. (2019). Active crustal deformation in the Trans-Mexican Volcanic Belt as evidenced by historical earthquakes during the last 450 years. *Tectonics*, 38. <https://doi.org/10.1029/2019TC005601>

Suárez, G. (2021). Catálogo de Sismos Históricos de México, <http://www.sismoshistoricos.org/>

Suter, M. (2016). Structure and Holocene Rupture of the Morelia Fault, Trans-Mexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 5, pp. 2376–2388, doi: 10.1785/0120160092

Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium, *Journal of applied Physics*, 21(2), 89–93.

Torres, C. (2015). Determinación de espectros de diseño sísmico mediante análisis de peligro sísmico. *Geotecnia*, 237, 20 – 25. <https://www.smiq.org.mx/archivos/revista-trimestral-smiq/revista-geotecnia-smiq-numero-237.pdf>

Torres, C. (2017). *Efectos de sitio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México*. *Geotecnia*, 246, 18 – 22. <https://www.smiq.org.mx/archivos/revista-trimestral-smiq/revista-geotecnia-smiq-numero-246.pdf>

Tsiambaos, G., y Sabatakakis, N. (2010). Empirical estimation of shear wave velocity from in situ tests on soil formations in Greece. *Bull Eng. Geol. Environ.*, 291-297.

U.S. Geological Survey. (2022). Earthquake Lists, Maps, and Statistics, accessed November 11th, 2022 at <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>

Ünal, D. (2009). Statical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering.*, Volume 6, 61-72, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>

Youngs, R., Chiou, S., Silva, W. y Humphrey, J. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, Volume 68, Number 1.

Zhao, J. X. y Xu. H. (2013). A comparison of Vs30 and site period as site-effect parameters in response spectral ground-motion prediction equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 1, pp. 1–18, February 2013, doi: 10.1785/0120110251.