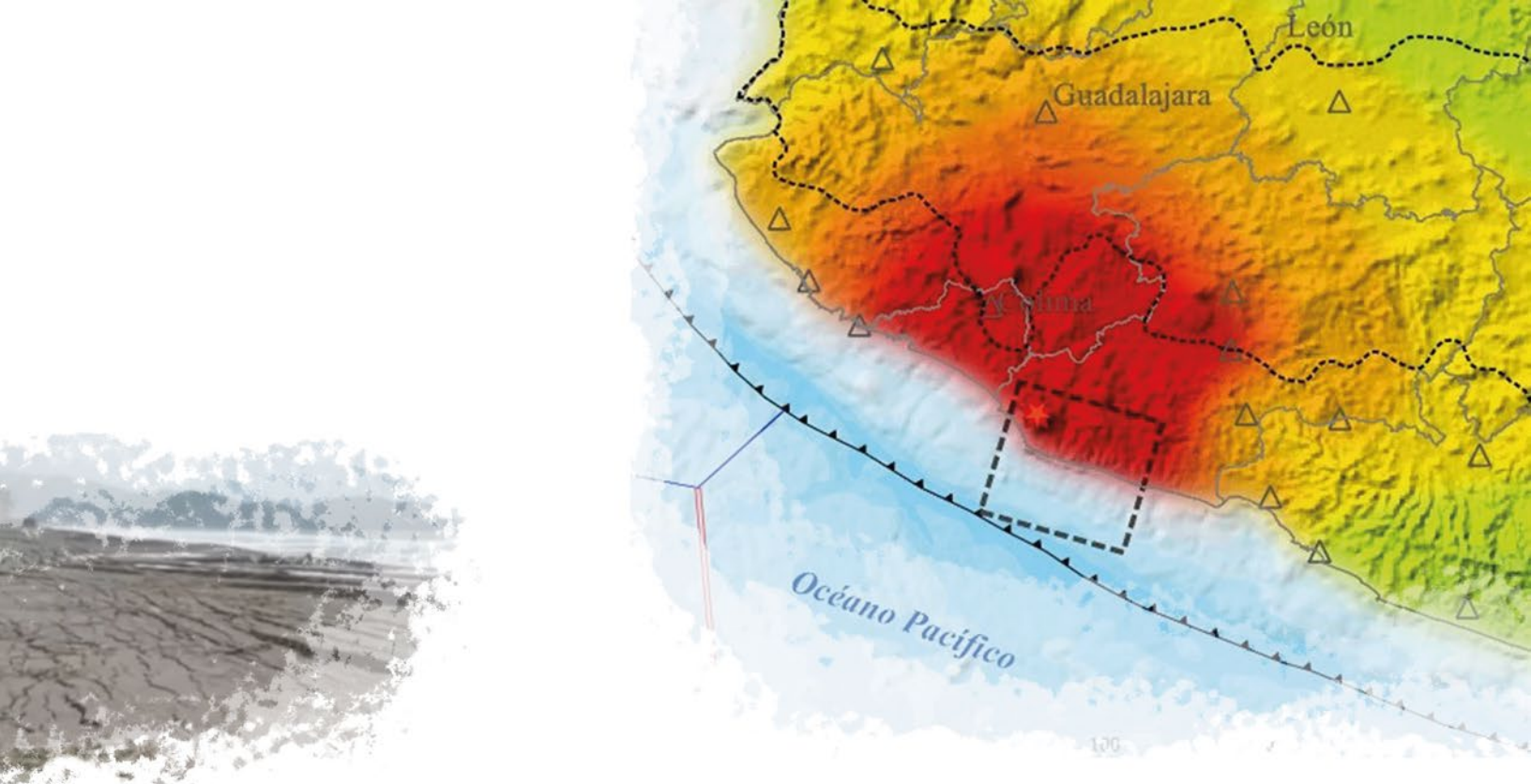




Sismo de Coalcomán Mw7.7 del 19 de septiembre de 2022

Análisis general y recopilación de daños

Compiladores:

Leonardo Ramírez Guzmán

Marcos Mauricio Chávez Cano

Alexandra Ossa López

SID 717



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Series

**Instituto
de Ingeniería UNAM**

Publicación arbitrada



Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Publicación arbitrada

ISBN: 978-607-587-615-3

DOI: 10.22201/iingen.9786075876153e.2025

Sismo de Coalcomán Mw7.7 del 19 de septiembre de 2022

Análisis general y recopilación de daños

Compiladores:

Leonardo Ramírez Guzmán¹

II UNAM

LRamirezG@iingen.unam.mx

Marcos Mauricio Chávez Cano²

II UNAM

MChavezC@iingen.unam.mx

Alexandra Ossa López³

II UNAM

AOssaL@iingen.unam.mx

Serie Docencia

SID 717

Julio 2025

¹ Investigador Titular A, Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, UNAM.

² Investigador Titular A, Coordinación de Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, UNAM.

³ Investigadora Titular A, Coordinación de Ingeniería Geotécnica, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Sismo de Coalcomán Mw7.7 del 19 de septiembre de 2022

Análisis general y recopilación de daños

Primera edición, 4 de julio de 2025

SID 717

D.R.© 2025 Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

ISBN: 978-607-587-615-3

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786075876153e.2025>

La obra fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM). El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo PDF de 18.8 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar.

Términos de licenciamiento Creative Commons para protección de la difusión por terceras personas y derechos de autor de la presente obra: Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional



Dedicatoria

A la memoria de las personas que hoy no están con nosotros a causa de los efectos del sismo de Coalcomán de 2022 y a los afectados en su patrimonio.

Al Dr. David Muria Vila, cuyo tesón y conocimiento profundo en los temas del monitoreo de estructuras siempre impulsaron una visión integral de la ingeniería civil. Investigador incansable y quien fuera subdirector de la Subdirección de Estructuras y Geotecnia durante el sismo del 19 de septiembre de 2022.

Agradecimientos

Este documento proporciona una fuente de información que refleja esfuerzos de los investigadores del Instituto de Ingeniería y otras instituciones en México. Los autores desean expresar su agradecimiento a todos los involucrados en la coordinación de las actividades necesarias para llevar a cabo las visitas técnicas a las zonas afectadas por el sismo, motivo de la presente publicación. Particularmente, los editores agradecen a la Dra. Rosa María Ramírez Zamora, directora del IIUNAM quien facilitó los medios logísticos y recursos para que las visitas y este documento fueran posibles.

También, agradecemos el apoyo brindado por el presidente municipal de Coahuayana, Ing. Gildardo Ruíz Vázquez, así como al Ing. Jesús David Rayna Rincón y al Maestro Joel García Hernández, quienes gentilmente nos condujeron y trasladaron a los sitios de mayor daño. Asimismo, al estudiante de la Universidad de Colima Raúl Vázquez Medina, cuyo apoyo fue importante en la ubicación de las afectaciones geotécnicas. El Director de Protección Civil Nacional, Ing. Oscar Zepeda Ramos, proporcionó información relevante y facilitó el contacto con autoridades locales.

Los académicos M.I. Marco Antonio Macías, M.I. Miguel Leonardo Suárez e Ing. Citlali Pérez contribuyeron de manera importante en homogeneizar los mapas, textos y referencias que le dan cohesión al documento.

Finalmente, agradecemos a todos los habitantes de los poblados visitados, que nos permitieron el acceso a sus hogares para la identificación de daños y que contribuyeron con su testimonio.

Resumen

El 19 de septiembre de 2022 un sismo de magnitud 7.7 con epicentro cerca de Coalcomán, Michoacán, sacudió buena parte del territorio de México. Debido a la importancia del sismo y a la cantidad de estructuras y poblados afectados, personal académico del Instituto de Ingeniería de la UNAM organizó brigadas de reconocimiento de daños con el fin de estudiar las afectaciones estructurales y geotécnicas. El documento que se presenta es una compilación e interpretación de información recolectada de primera mano y la disponible en medios diversos. El trabajo da cuenta de los aspectos sismológicos, y daños geotécnicos y estructurales observados.

Palabras clave: Sismo de Coalcomán de 2022, sismología, efectos y daños estructurales y geotécnicos

Abstract

On September 19, 2022, an M7.7 earthquake with an epicenter near Coalcoman, Michoacan, shook much of the territory of Mexico. Due to the importance of the earthquake and the number of structures and villages affected, a team of academics from UNAM's Institute of Engineering organized damage recognition brigades to study the structural and geotechnical effects. The document presented is a compilation and interpretation of information collected first-hand and available in various media. The work accounts for the seismological, geotechnical, and structural damage observed.

Keywords: 2022 Coalcoman Earthquake, seismology, structural and geotechnical damage and effects.

Índice

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice	xi
1. Introducción	1
2. Aspectos sismológicos	3
2.1. Introducción	4
2.2. Marco Tectónico y Sismicidad Histórica	4
2.3. Alertamiento sísmico.....	6
2.4. Réplicas.....	13
2.5. Características de la fuente sísmica	19
2.6. Movimiento fuerte del terreno	21
2.6.1. Movimiento cercano a la fuente	21
2.6.2. Movimiento lejos de la fuente sísmica – Ciudad de México	24
2.6.3. Atenuación en sitios de roca fuera de la Ciudad de México	26
2.6.4. Atenuación en terreno firme de la Ciudad de México	28
2.7. Tsunami	29
2.8. Conclusiones.....	31
2.9. Referencias	31
3. Aspectos geotécnicos del reconocimiento directo de daños	35
3.1. Introducción	36
3.2. Descripción de daños	37
3.2.1. Manzanillo, Colima.....	39
3.2.1.1. Bachillerato 8, 9 y 10 de la Universidad de Colima, Campus San Pedrito.....	39
3.2.1.2. Polideportivo Universitario	40
3.2.1.3. Museo Universitario de Arqueología de Manzanillo.....	42

3.2.1.4. Mirador del Valle de las Garzas.....	43
3.2.1.5. Infraestructura Portuaria	44
3.2.2. Tecomán, Colima.....	45
3.2.2.1. . Universidad de Colima, Campus Tecomán (Laboratorio Multidisciplinario)	45
3.2.3. Coquimatlán-Colima.....	48
3.2.3.1. Carretera Coquimatlán – Pueblo Juárez.....	48
3.2.3.2. Carretera Coquimatlán – Jala	49
3.2.3.3. Caídos Sobre la vía férrea Manzanillo-Colima.....	50
3.2.4. Coahuayana, Michoacán	50
3.2.4.1. Puente Coahuayana	51
3.2.4.2. Carretera a El Ticuiz.....	52
3.2.4.3. El Ticuiz.....	53
3.2.4.4. Asentamientos de Viviendas	54
3.2.4.5. Levantamiento y fracturamiento de pisos	56
3.2.4.6. Emersión de pozos y fosas sépticas	58
3.2.4.7. Inclinação de postes para líneas de transmisión	59
3.2.4.8. Boca de Apiza	60
3.2.4.9. Mezcala	61
3.3. Interpretación de los Daños	62
3.3.1. Licuación	62
3.3.2. Elevación regional del nivel freático	65
3.4. Conclusiones.....	67
3.5. Referencias	68
4. Infraestructura educativa y de salud	69
4.1. Introducción	70
4.2. Daños observados en el estado de Colima.....	71
4.2.1. Escuela Primaria Benito Juárez	71
4.2.2. Escuela Secundaria Técnica Felipe Sevilla del Río	73
4.2.3. USE Valle de las Garzas	74
4.2.4. Secundaria Mariano Miranda Fonseca	74
4.2.5. Secundaria Gregorio Torres Quintero	75
4.2.6. Secundaria Justo Sierra	76
4.2.7. Escuela Primaria Leopoldo Caraballo.....	77
4.2.8. Universidad de Colima, Campus San Pedrito	79
4.2.9. Universidad de Colima, Campus Tecomán	80
4.3. Conclusiones y recomendaciones	81
5. Edificios patrimoniales	83
5.1. Introducción	84
5.2. Afectaciones en el estado de Michoacán	85
5.2.1. San Juan Nuevo	85
5.2.2. Coalcomán	86
5.2.3. Santiago de Tangamandapio.....	87
5.2.4. San Miguel Arcángel. Tacátzcuaro	88

5.2.5. San Miguel Arcángel. Villamar	88
5.2.6. Zirahuén	89
5.2.7. Paracho	90
5.3. Afectaciones en el estado de Colima.....	90
5.3.1. Pueblo Juárez	90
5.3.2. Coquimatlán	91
5.3.3. Tecomán.....	92
5.4. Comentarios	94
5.5. Referencias	95
6. Normatividad	96
6.1. Introducción	97
6.2. Aspectos normativos del estado de Colima	98
6.2.1. Aspectos sísmicos.....	98
6.2.2. Aspectos estructurales normativos.....	101
6.3. Aspectos normativos del estado de Michoacán.....	102
6.3.1. Aspectos sísmicos.....	102
6.3.2. Aspectos estructurales.....	105
6.4. Aspectos normativos de la Ciudad de México.....	106
6.4.1. Aspectos sísmicos.....	107
6.4.2. Aspectos estructurales.....	110
6.5. Discusión	111
6.6. Agradecimientos.....	113
6.7. Referencias	114
7. Comportamiento de edificios instrumentados.....	115
7.1. Introducción	116
7.2. Edificios Instrumentados	117
7.2.1. Monitoreo y Sistema de Alerta	118
7.2.2. Edificio PC (Ciudad de México).....	119
7.2.3. Edificio CCUT (Ciudad de México)	120
7.2.4. Edificio SIS (Acapulco, Guerrero)	121
7.3. Registros Sísmicos	122
7.4. Análisis Espectral y Paramétrico.....	125
7.4.1. Análisis Espectral.....	128
7.4.2. Efectos de Interacción Suelo-Estructura	129
7.4.3. Análisis Paramétrico.....	130
7.5. Conclusiones.....	133
7.6. Reconocimientos.....	134
7.7. Referencias	135
8. Comportamiento de estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica.....	137
8.1. Introducción	138
8.2. Estados visitados	139
8.2.1. Estado de Colima.....	139

8.2.2. Estado de Michoacán	139
8.2.3. Estado de Jalisco	140
8.2.4. Estado de Nayarit	142
8.2.5. Estado de México	142
8.2.6. Ciudad de México	143
8.3. Comentarios	145
8.4. Referencias	145
9. Vivienda	147
9.1. Introducción	148
9.2. Daños presentados en viviendas	148
9.3. Referencias	157
Anexo A. Caídos en carreteras	158
A.1 Carretera Chinicuila-Coalcomán	158
A.2 Carretera Villa Victoria-Coalcomán	159
A.3 Carretera Colima-Tecomán	160
A.4 Autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas	161
A.5 Carretera Playa Azul-Manzanillo	161
Anexo B. Otros daños en edificaciones e infraestructura	162
B.1 Condominio Gran Pacífico, Manzanillo, Colima	163
B.2 Hotel Anita	164
B.3 Restaurante El Bigotes	168
B.4 Condominio La Vista	170
B.5 Parque Contenedores	171
B.6 Poblado de San Vicente	172
B.7 Pueblo Juárez	173

1. Introducción

El 19 de septiembre de 2022 un sismo de $M7.7^*$ con epicentro cerca de Coalcomán, Michoacán, sacudió buena parte del territorio de México. El sismo de Coalcomán, así conocido, ocurrió en la misma fecha un lustro y treinta y siete años después de los catastróficos eventos de Puebla-Morelos y Michoacán, respectivamente. Debido a la importancia del sismo y a la cantidad de estructuras y poblados afectados, personal académico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) organizó brigadas de reconocimiento de daños con el fin de estudiar las afectaciones estructurales y geotécnicas. Algunas de las afectaciones tuvieron difusión en los medios de comunicación, en especial las que ocurrieron en ciudades o poblados con un número importante de habitantes, pero las afectaciones acaecidas en poblaciones de menor tamaño y alejadas de los centros urbanos eran poco conocidas, pero no menos importantes.

El documento que se presenta es una compilación e interpretación de información recolectada de primera mano y la disponible en medios diversos realizada por investigadores del IIUNAM y otras instituciones en México. El trabajo está organizado en ocho capítulos, además de esta introducción, que dan cuenta de los aspectos sismológicos, geotécnicos y estructurales relacionados.

El capítulo dos toca los aspectos sismológicos sobre el sismo, incluyendo algunas interpretaciones preliminares de la fuente, las réplicas y el comportamiento dinámico del terreno a nivel regional y local, así como algunos aspectos normativos.

En cuanto a los temas geotécnicos, en el capítulo tres se abordan, describen y discuten los daños ocurridos como consecuencia del sismo, identificados durante el reconocimiento realizado por el Grupo de Geotecnia del Instituto de IIUNAM. Además de identificar y describir los daños en los sitios

* En el texto se mencionan diversas magnitudes, e.g. M_s , M_w o M , siguiendo la notación convencional $M_t N.D$ en las revistas especializadas, donde M_t es el tipo de magnitud y $N.D$ es el número con los decimales que se consideren necesarios. Se acostumbra utilizar la letra M para nombrar la magnitud de manera genérica, siendo generalmente la magnitud de Momento, pero en ocasiones puede ser M_s o mb .

visitados asociados a aspectos geotécnicos, se discute, desde un punto de vista geomecánico, los posibles mecanismos causados por el sismo que dieron lugar a los daños.

El evento ocasionó diversos daños de distinta magnitud en la infraestructura educativa y de salud en los estados de Colima y Michoacán. En el capítulo cuatro se presentan los daños observados en este tipo de estructuras, incluyendo recomendaciones que permitan reducir su ocurrencia. Los daños sufridos en el patrimonio arquitectónico de México, principalmente el religioso, se abordan en el capítulo cinco, seguido de una discusión sobre los aspectos normativos sísmicos y estructurales en los estados de Colima y Michoacán. También, por su importancia, y los efectos que causan estos eventos sísmicos, se incluye a la Ciudad de México, cuya interpretación se llevó a cabo antes de la modificación de mayo de 2024 de las Normas Complementarias del Reglamento de Construcciones.

Los edificios monitoreados por el IIUNAM registraron el evento, en el capítulo siete se hace un recuento del comportamiento de tres de ellos, con énfasis en el sistema de monitoreo que facilita la interpretación de la información y contribuye a establecer estrategias de mantenimiento oportunas. Finalmente, en los capítulos ocho y nueve se describen los resultados de las brigadas encargadas del reconocimiento de daños en estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica, como aislamiento sísmico o sistemas de disipación, y en viviendas.

El texto es amplio en contenido; sin embargo, no cubre todos los temas técnicos relacionados con el sismo y sus efectos, como el análisis de deslizamientos y los sistemas de estimación de riesgo implementados en el país, incluyendo el impacto en la economía, por mencionar algunos. Esperamos que el lector encuentre información de utilidad y lo aquí plasmado motive investigaciones posteriores que ayuden a mitigar y comprender el fenómeno y sus efectos en nuestro país.

Leonardo Ramírez Guzmán
Ciudad Universitaria, Ciudad de México
Agosto de 2024

2. Aspectos sismológicos

Dr. Leonardo Ramírez Guzmán

II-UNAM

lr Ramirezg@iingen.unam.mx

Dr. Miguel Ángel Jaimes Telles

II-UNAM

mjaimest@iingen.unam.mx

M.I. Miguel Leonardo Suárez

II-UNAM

mleonardos@iingen.unam.mx

Dr. Jorge Aguirre González

II-UNAM

joagg@pumas.ii.unam.mx

Ing. Juan Manuel Espinosa Aranda

Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C.

jm.espinosa@cires-ac.mx

Dr. Juan Manuel Mayoral Villa

II-UNAM

mmayoralv@iingen.unam.mx

Dr. Gustavo Ayala Milián

II-UNAM

gayalam@iingen.unam.mx

Ing. Alejandro Mora Contreras

II-UNAM

amorac@iingen.unam.mx

Ing. María del Rosario Delgado Diance

II-UNAM

rdd@pumas.ii.unam.mx

M.C. Cristian Roberto Tejada Malpica

II-UNAM

ctejadam@iingen.unam.mx

Ing. Citlali Pérez Yañez

II-UNAM

cperezy@iingen.unam.mx

Ing. Ana Laura Ruiz Gordillo

II-UNAM

aruizg@iingen.unam.mx

Ing. Mauricio Ayala Hernández

II-UNAM

mayalahe@iingen.unam.mx

Ing. Héctor Sandoval Gómez

II-UNAM

hsandovalg@iingen.unam.mx

M.I. Marco Antonio Macías Castillo

II-UNAM

mmaciasc@iingen.unam.mx

Ing. David Almora Mata

II-UNAM

dalmoram@iingen.unam.mx

M.I. Moisés Gerardo Contreras Ruiz Esparza

II-UNAM

mcontrerasr@iingen.unam.mx

Ing. Gerardo Castro Parra

II-UNAM

gcastrop@iingen.unam.mx

Ing. Juan Manuel Velasco Miranda

II-UNAM

jmvm@pumas.ii.unam.mx

Ing. Ricardo Vázquez Larquet

II-UNAM

rvt@pumas.ii.unam.mx

Ing. Luis Alberto Aguilar Calderón

II-UNAM

laguilarc@iingen.unam.mx

Ing. Israel Molina Ávila

II-UNAM

imolinaa@iingen.unam.mx

Ing. Miguel A. Carrillo Lucía

II-UNAM

mcarrillol@iingen.unam.mx

2.1. Introducción

En la tarde del 19 de septiembre de 2022 un sismo con epicentro cerca del poblado de Coalcomán, en el estado de Michoacán, sacudió la región central del país. El evento conocido como el sismo de Coalcomán tuvo una magnitud de momento de 7.7 y ocurrió cinco años después del catastrófico evento de 2017 y treinta siete años del de 1985. El temblor tuvo como tiempo de inicio las 13:05:09 (hora del Centro de México); casi una hora después de que se llevó a cabo el Simulacro Nacional 2022 organizado por la federación para conmemorar los sismos de 1985 y 2017. El terremoto causó daños y muertes, principalmente en sitios cercanos al epicentro, poniendo a prueba los mecanismos de gestión de emergencias del país. La coincidencia de la repetición de tres eventos de gran magnitud en un mismo día, en diferentes años, generó varias interrogantes entre la población respecto a la probabilidad de que ocurran sismos en la misma fecha. Algunas personas, asocian la ocurrencia de los grandes sismos en México al 19 de septiembre, aun cuando las probabilidades de este tipo de eventos en un día específico son bajas.

El sismo afectó principalmente a los estados de Colima y Michoacán, con efectos menores en Jalisco, Estado de México y Ciudad de México. De acuerdo con la Coordinación Nacional de Protección Civil se produjeron daños estructurales y no estructurales en 5,972 viviendas y 116 escuelas. En cuanto a la infraestructura de salud, se reportaron daños severos en 1 hospital y daños menores en 32 nosocomios. Además, 21 iglesias reportaron daños menores (19 en Michoacán y 2 en Colima). Los daños a las carreteras incluyeron dos puentes y cuatro deslizamientos de rocas. Se reportaron tres muertes (CNPC, 2022a).

El conocimiento de los aspectos sismológicos es indispensable para comprender el alcance del desastre ocasionado. En este capítulo del libro se presenta un resumen de los aspectos sismológicos, incluyendo el comportamiento dinámico regional.

2.2. Marco Tectónico y Sismicidad Histórica

La complejidad de la tectónica de México hace al país propenso a experimentar terremotos de gran magnitud. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), 128 eventos sísmicos de magnitud 6, o mayor, ocurrieron en el territorio nacional en los últimos ciento veintidós años (ver Figura 2.1). La mayoría ocurrieron en la costa del Pacífico de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Todos obedecieron a las características tectónicas regionales, y la gran mayoría tuvieron lugar en el límite de las placas tectónicas.

El sismo M7.7 del 19 de septiembre de 2022 tuvo lugar en la subducción del Pacífico Mexicano, en la zona de Jalisco-Colima-Michoacán, donde de las placas de Rivera y Cocos se deslizan por debajo de la placa de Norteamérica. Las dos primeras placas mencionadas son fragmentos de la placa Farallón (Atwater and Stock, 1988), y actúan cinemáticamente de manera independiente. Aun cuando no hay una expresión batimétrica clara asociada a los límites que las separan (ver e.g. Dañobeitia *et al.*, 2016),

algunos autores sugieren que el límite entre las placas de Rivera y Cocos está a un costado del Graben Sur de Colima (GSC) y es paralelo a este (Bandy et al., 1995). La placa de Rivera se separó de la de Cocos durante el Mioceno y su velocidad de convergencia con respecto a la placa de Norteamérica varía de ~ 2 a ~ 5 cm/año al acercarse a la de Cocos, la cual converge con velocidades que varían entre ~ 5 y ~ 7.5 cm/año de oeste a este (DeMets *et al.*, 1994).

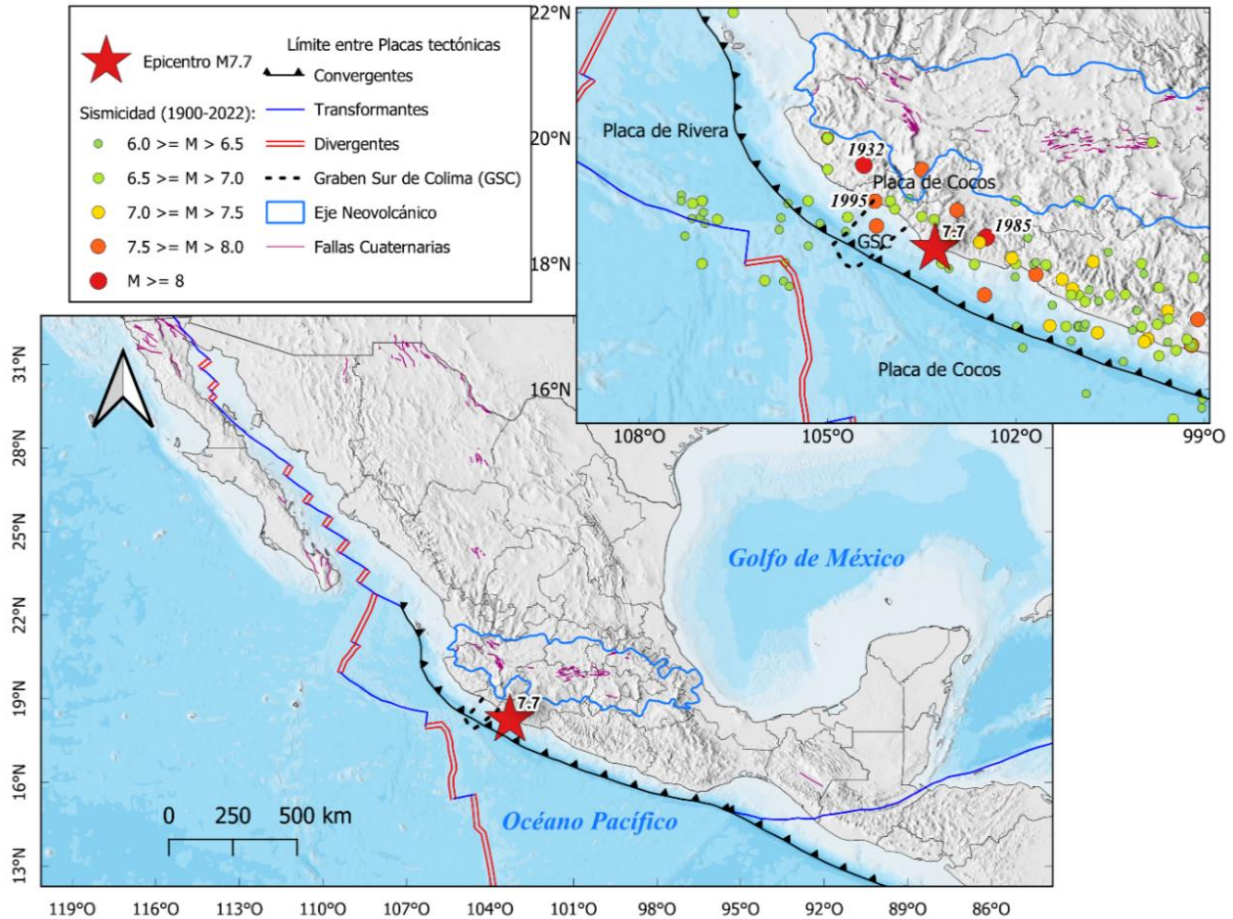


Figura 2.1 Sismos de magnitud mayor a 6 utilizando datos entre 1900 y 2022 en México de acuerdo con el SSN

La sismicidad en la zona cercana al evento de Coalcomán de 2022 es alta, destacan los sismos del 3 de junio de 1932, 9 de octubre de 1995 y 19 de septiembre de 1985 (ver Figura 2.1), con magnitudes 8.2, 8 y 8, respectivamente (Singh et al., 2023).

2.3. Alertamiento sísmico

El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) registró el sismo principal del 19 de septiembre de 2022 en 46 de los 96 sensores que constituyen su red de monitoreo (Figura 2.2). La réplica M6.9 se registró en 35 sensores del sistema SASMEX. Las Figuras 2.3 a 2.7 muestran los gráficos de aceleración de los sensores SASMEX más cercanos a la fuente sísmica, cuyos parámetros se utilizaron para activar la alerta.

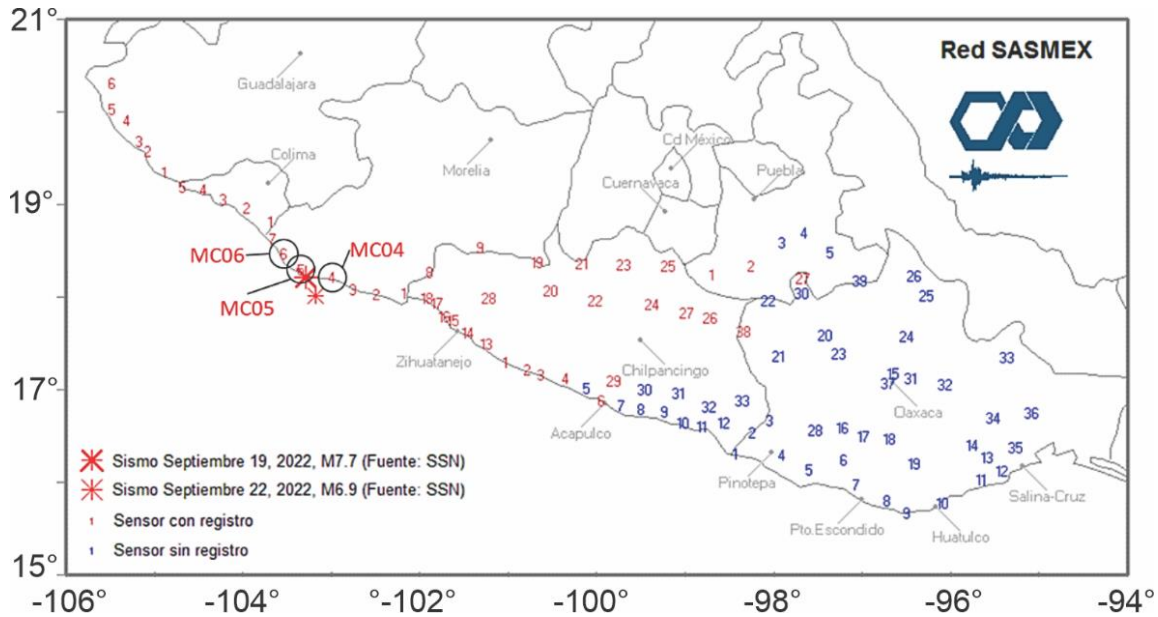


Figura 2.2 Red de monitoreo del SASMEX que registró el sismo del 19 de septiembre de 2022 de M 7.7 y la réplica del 22 de septiembre de 2022 de M6.9. Fuente: Espinosa et al. (2022)

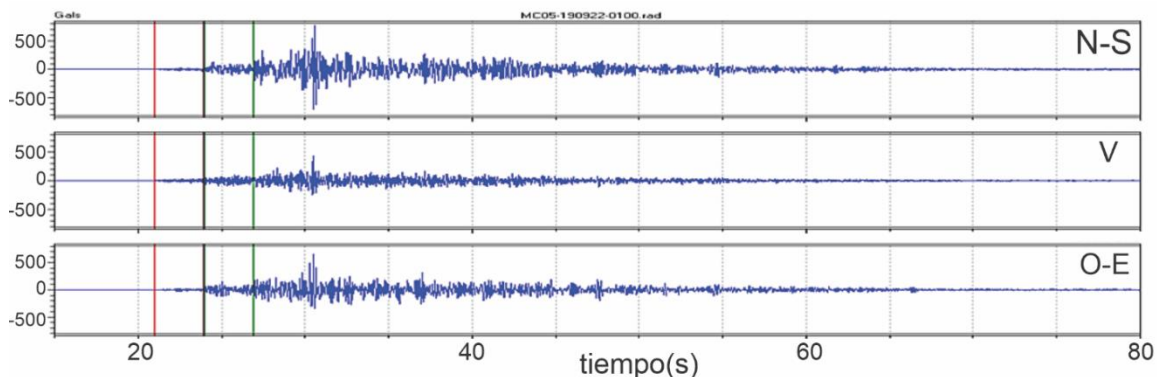


Figura 2.3 Registro de aceleración del sensor MC05 cercano a la fuente que activó la alerta sísmica el 19 de septiembre de 2022. Las líneas verticales indican las diferentes fases y segmentos empleados en el algoritmo de alertamiento. Fuente: Espinosa et al. (2022)

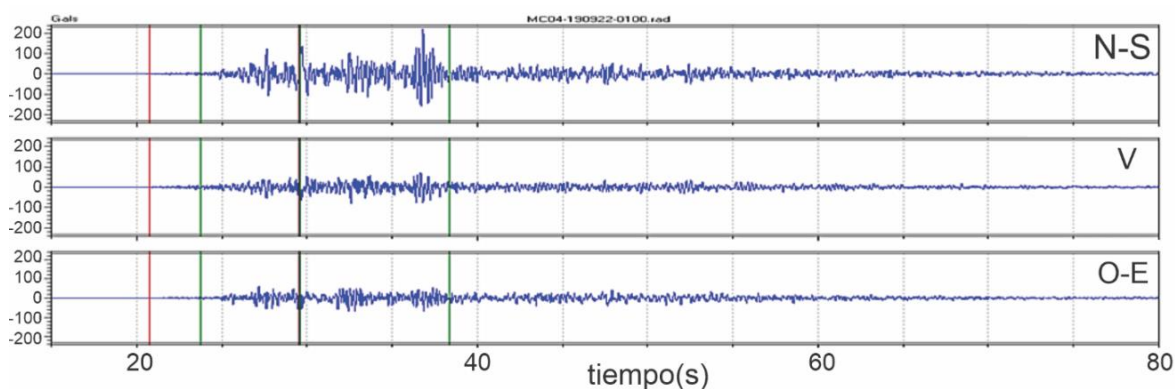


Figura 2.4 Registro de aceleración del sensor MC04 cercano a la fuente que activó la alerta sísmica el 19 de septiembre de 2022. Las líneas verticales indican las diferentes fases y segmentos empleados en el algoritmo de alertamiento. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

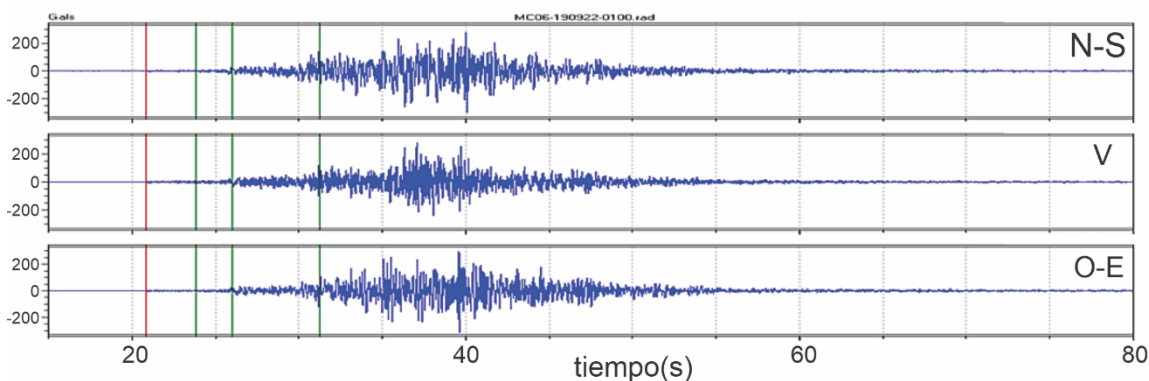


Figura 2.5 Registro de aceleración del sensor MC06 cercano a la fuente que activó la alerta sísmica el sismo del 19 de septiembre de 2022. Las líneas verticales indican las diferentes fases y segmentos empleados en el algoritmo de alertamiento. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

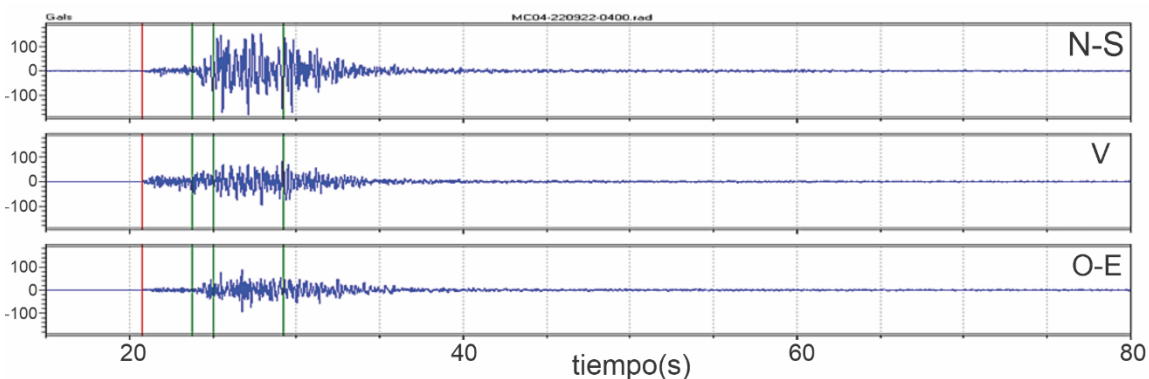


Figura 2.6 Registro de aceleración del sensor MC04 cercano a la fuente que activó la alerta sísmica el sismo del 22 de septiembre de 2022. Las líneas verticales indican las diferentes fases y segmentos empleados en el algoritmo de alertamiento. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

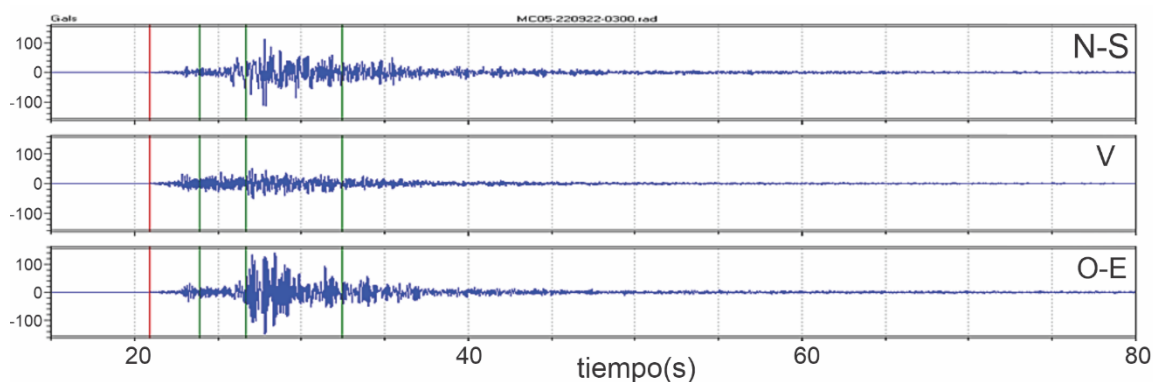


Figura 2.7 Registro de aceleración del sensor MC05 cercano a la fuente que activó la alerta sísmica el sismo del 22 de septiembre de 2022. Las líneas verticales indican las diferentes fases y segmentos empleados en el algoritmo de alertamiento. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

La Tabla 2.1 muestra los primeros 15 segundos del cuaderno de bitácora del sistema, tras el terremoto de 19 de septiembre de 2022. Los sensores analizan la señal sísmica utilizando tres algoritmos que se ejecutan simultáneamente. Los centros de recepción recopilan los resultados del análisis y actúan de acuerdo con los parámetros estimados utilizando un criterio de distancia medida desde la distancia hasta la primera estación que notificó. Con la información recibida de los sensores MC05 y MC04, el centro de Morelia activó una alerta sísmica, debido a que se encuentra a una distancia de menos de 350 km de MC05. Este es el criterio establecido en el algoritmo SP para activar las alertas (ver filas 1, 10 y 11 de la Tabla 2.1). Posteriormente, como se indica en las filas 5, 14 y 16 de la Tabla 2.1, los sensores MC05 y MC06 notificaron que el terremoto alcanzó o superó la magnitud M6.5. Por lo tanto, todos los centros activaron la alarma correspondiente al aviso de alerta sísmica.

Tabla 2.1. Registro de actividades de SASMEX durante el terremoto M7.7 del 19 de septiembre de 2022

ID	Tiempo	Sensor	Nombre	Algoritmo	Mensaje
1	13:05:14.7	MC05	Maruata	SP	M>6
2	13:05:14.7	MC05	Maruata	3s	M>6
3	13:05:14.8	----	SASMEX	----	Inicia Prealerta
4	13:05:17.3	MC04	El Herradero	3s	M>5
5	13:05:17.4	MC05	Maruata	2SP	M>6.5
6	13:05:18.4	MC06	El Duin	3s	M>5.5
7	13:05:20.3	MC06	El Duin	SP	M<5
8	13:05:21.5	MC03	Caleta Campos	3s	M>5
9	13:05:21.6	MC07	San Telmo	3s	M<5
10	13:05:22.9	MC04	El Herradero	SP	M>6
11	13:05:23.0	----	Central Morelia	----	Alerta Sísmica
12	13:05:24.4	CL01	Ojo de Agua	3s	M>5
13	13:05:25.4	CL01	Ojo de Agua	SP	M<5
14	13:05:25.9	MC06	El Duin	2SP	M>6.5
15	13:05:26.0	MC02	Las Peñas	3s	M<5
16	13:05:26.1	----	Central Cuernavaca	----	Alerta Sísmica
17	13:05:26.1	----	Central Acapulco	----	Alerta Sísmica
18	13:05:26.1	----	Central Oaxaca	----	Alerta Sísmica
19	13:05:26.2	----	Central Puebla	----	Alerta Sísmica
20	13:05:26.3	----	Central CDMX	----	Alerta Sísmica
21	13:05:26.4	----	Central CENAPRED	----	Alerta Sísmica
22	13:05:26.5	----	Central Chilpancingo	----	Alerta Sísmica
23	13:05:28.2	MC03	Caleta Campos	SP	M>5.5
24	13:05:28.2	----	Central C5	----	Alerta Sísmica

La Tabla 2.2 contiene los primeros 10 segundos del cuaderno de bitácora del sistema para el terremoto M6.9 del 22 de septiembre de 2022. Nuevamente, las filas 2, 6 y 7 de la tabla en cuestión muestran que la alerta sísmica se activó en el centro Morelia y, unos segundos después, en los otros centros de SASMEX. La activación se basa en la determinación utilizando el algoritmo 2SP, con el cual se estima si el terremoto alcanzaría o superaría la magnitud M6, como se evidencia en las filas 8, 12 y al final de la tabla.

Tabla 2.2 Registro de actividades de SASMEX durante el terremoto M6.9 del 22 de septiembre de 2022

ID	Tiempo	Sensor	Nombre	Algoritmo	Mensaje
1	01:16:16.5	MC04	El Herradero	3s	M>6
2	01:16:17.5	MC04	El Herradero	SP	M>6
3	01:16:17.5	----	SASMEX	----	Inicia Prealerta
4	01:16:18.2	MC05	Maruata	3s	M>5.5
5	01:16:20.5	MC03	Caleta Campos	3s	M>5.5
6	01:16:20.9	MC05	Maruata	SP	M>5.5
7	01:16:21.0	----	Central Morelia	----	Alerta Sísmica
8	01:16:21.6	MC04	El Herradero	2SP	M>6.5
9	01:16:22.4	MC06	El Duin	3s	M<5
10	01:16:23.1	MC03	Caleta Campos	SP	M>5.5
11	01:16:26.3	MC07	San Telmo	3s	M<5
12	01:16:26.6	MC05	Maruata	2SP	M>6
13	01:16:26.7	----	Central CDMX	----	Alerta Sísmica
14	01:16:26.8	----	Central Puebla	----	Alerta Sísmica
15	01:16:26.9	----	Central Oaxaca	----	Alerta Sísmica
16	01:16:27.0	----	Central Acapulco	----	Alerta Sísmica
17	01:16:27.0	----	Central Chilpancingo	----	Alerta Sísmica
18	01:16:27.0	----	Central Cuernavaca	----	Alerta Sísmica
19	01:16:27.1	----	Central CENAPRED	----	Alerta Sísmica

Las figuras 2.8 a 2.13 muestra las aceleraciones registradas en los tres componentes por los sensores y los centros. Cada gráfico tiene una línea roja vertical, que indica la hora de origen del terremoto; la advertencia de alerta emitida por SASMEX se traza como una línea vertical azul. Las aceleraciones pico y mínima y el identificador de cada sensor se muestran al final de cada gráfico.

Unos segundos después de que SASMEX registra un terremoto, se emite automáticamente un informe y se envía por correo electrónico a los suscriptores. La activación de un aviso de alerta sísmica se registra en el mismo documento, cuando corresponda, e incluye una tabla de distancia y de tiempos aproximados de llegada de las ondas P y S a cada una de las ciudades donde se emitió el aviso. La Figura 2.14 a y b contiene los informes que se emitieron automáticamente para los dos terremotos discutidos. Los informes contienen la fecha, hora y los centros donde se activaron las advertencias de alerta. La información sobre Distancia y Tiempos de anticipación preliminares se obtienen suponiendo que el epicentro se encuentra cerca del primer sensor que identificó el evento; dichos datos se corrigen posteriormente cuando el SSN calcula y divulga la ubicación hipocentral del evento.

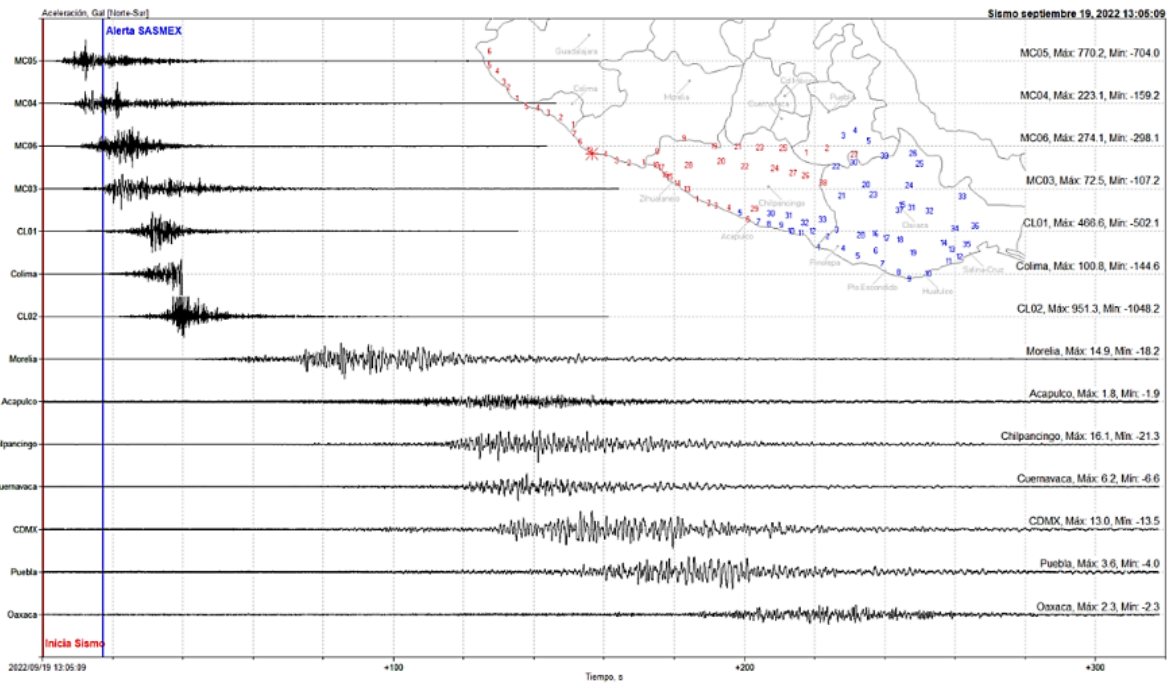


Figura 2.8 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente norte-sur durante el sismo del 19 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

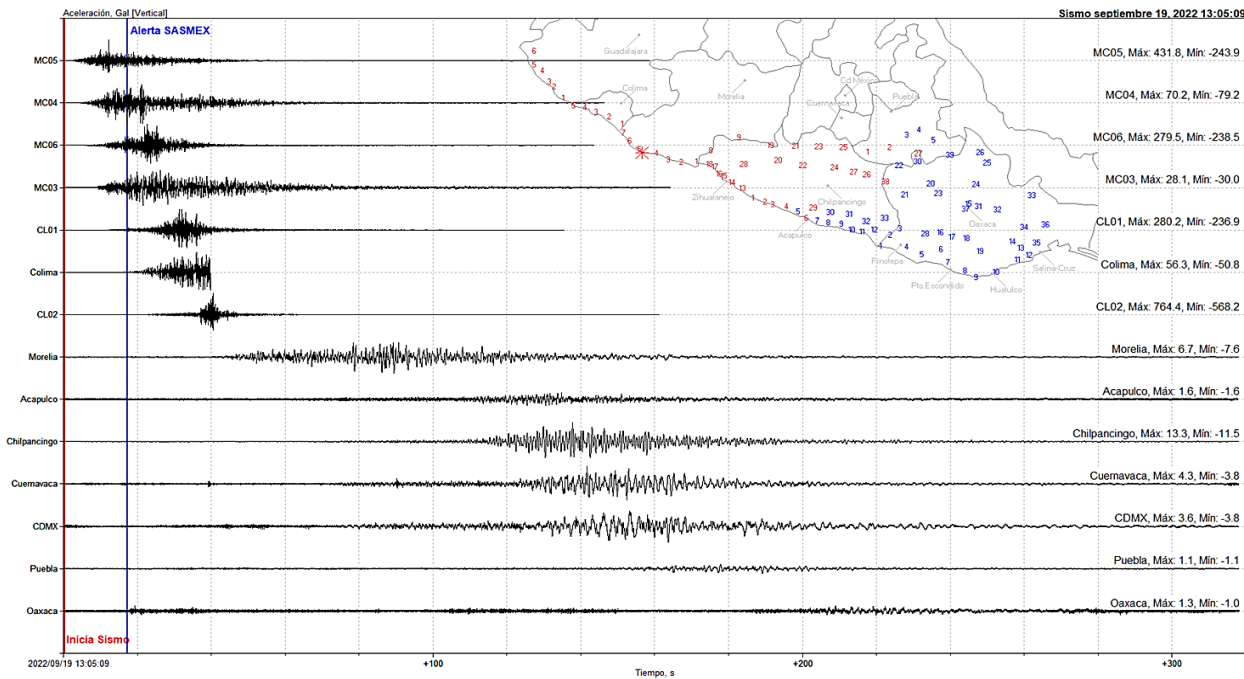


Figura 2.9 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente vertical durante el sismo del 19 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

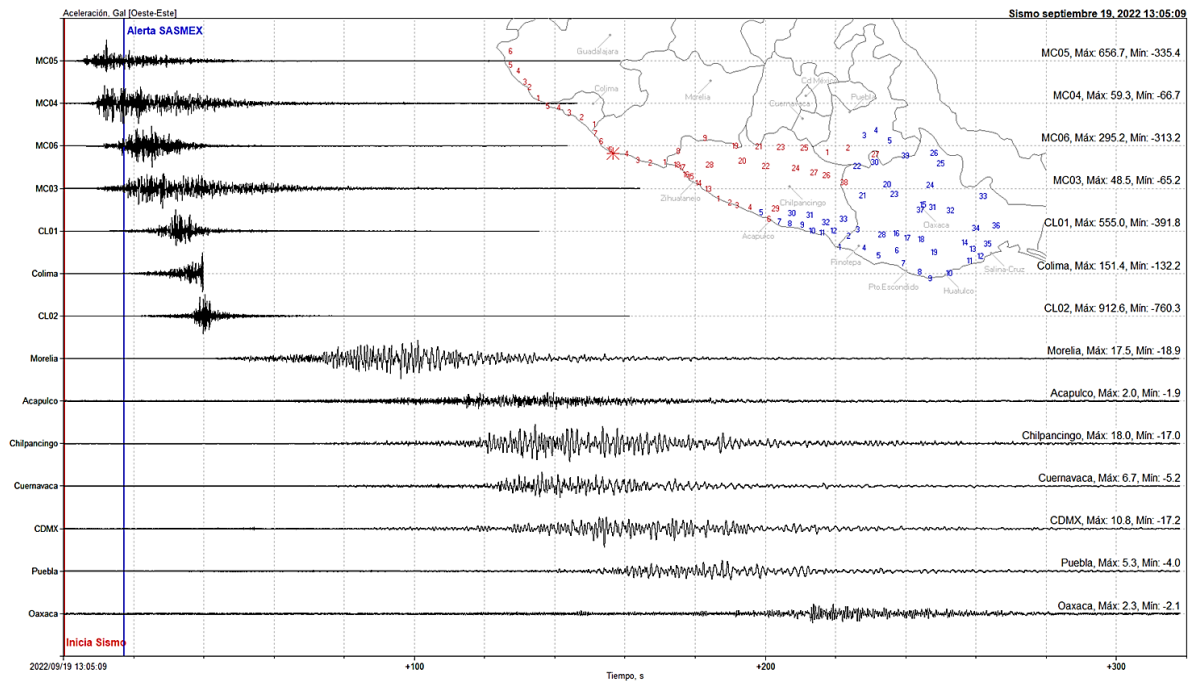


Figura 2.10 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente oeste-este durante el sismo del 19 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

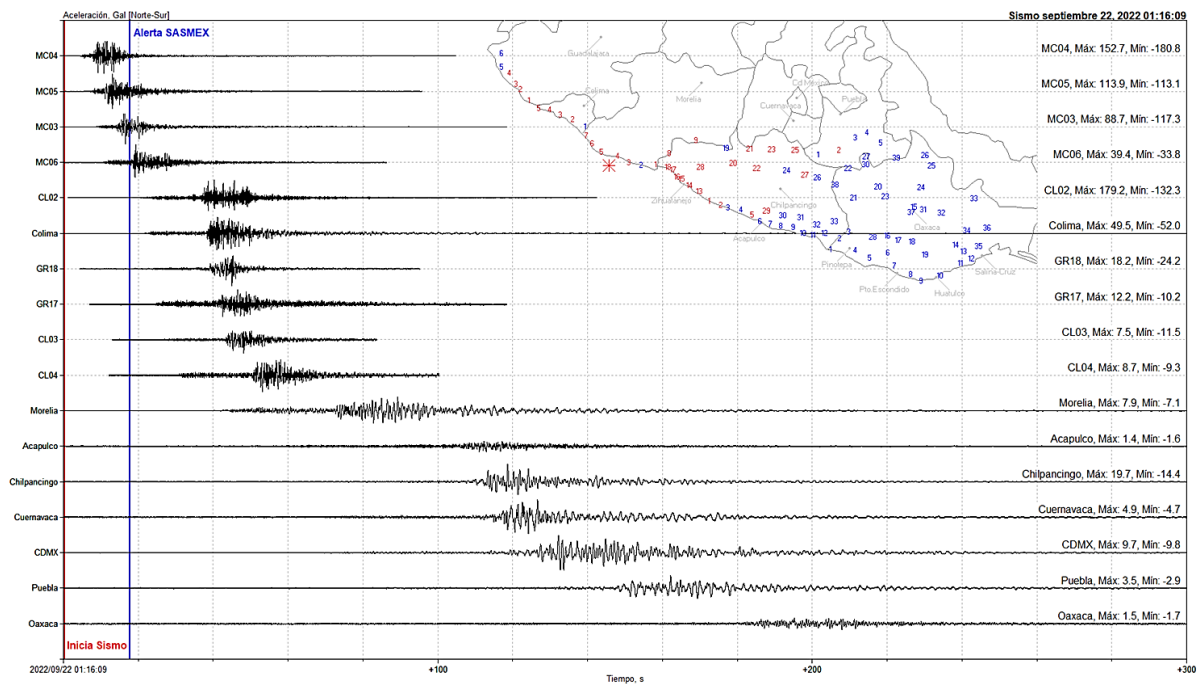


Figura 2.11 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente norte-sur durante el sismo del 22 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

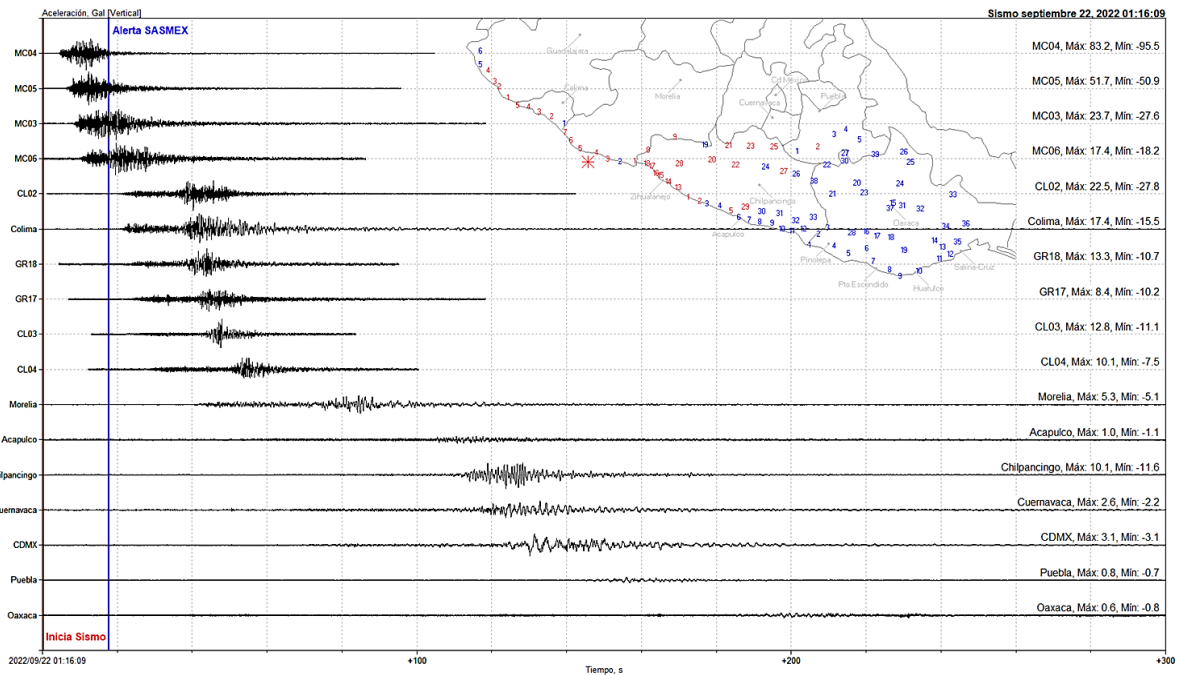


Figura 2.12 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente vertical durante el sismo del 22 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

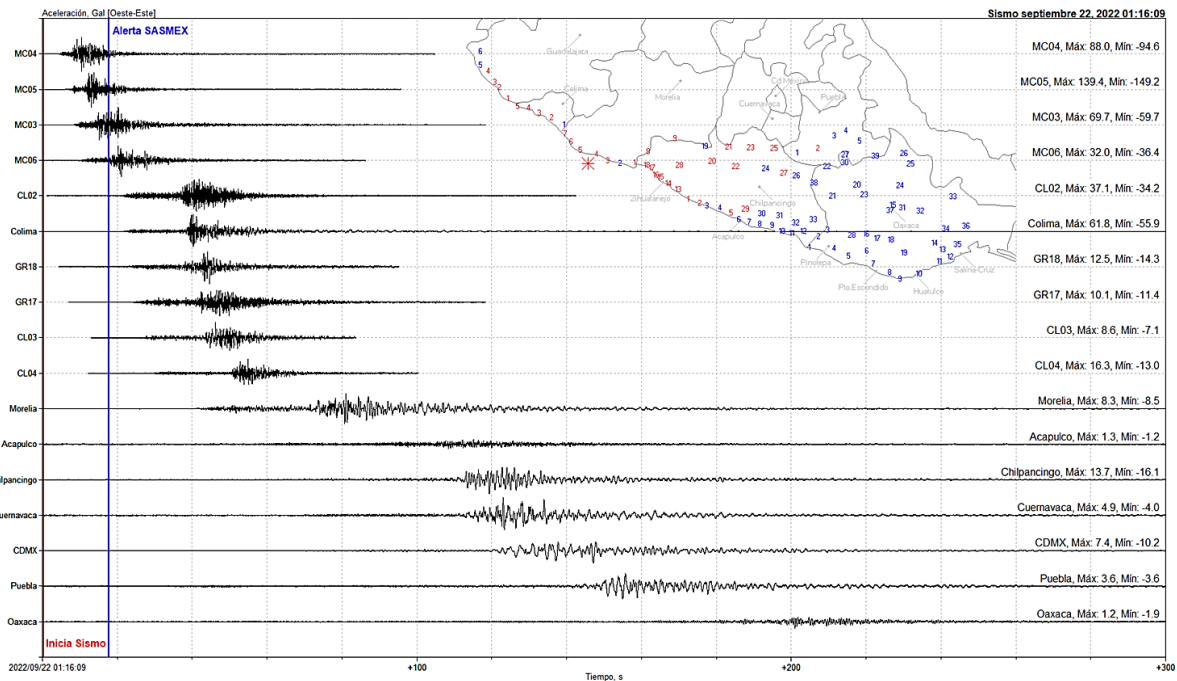
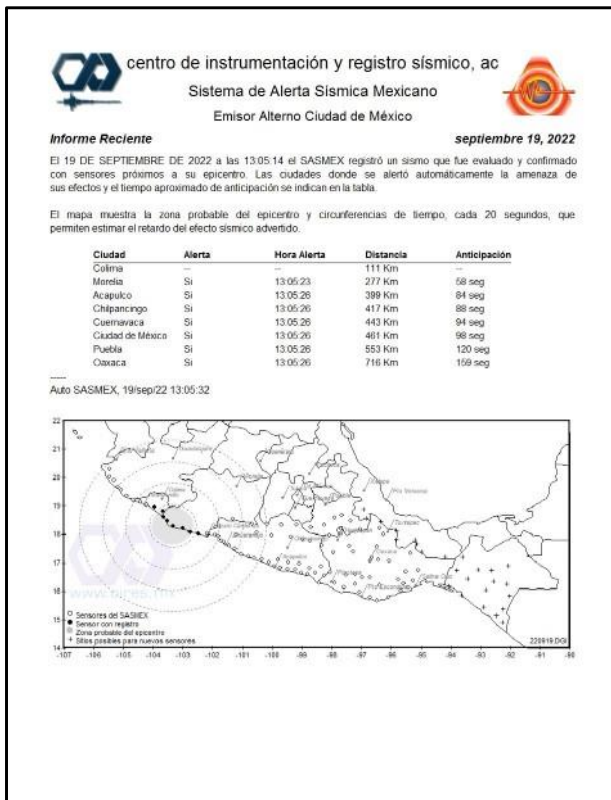
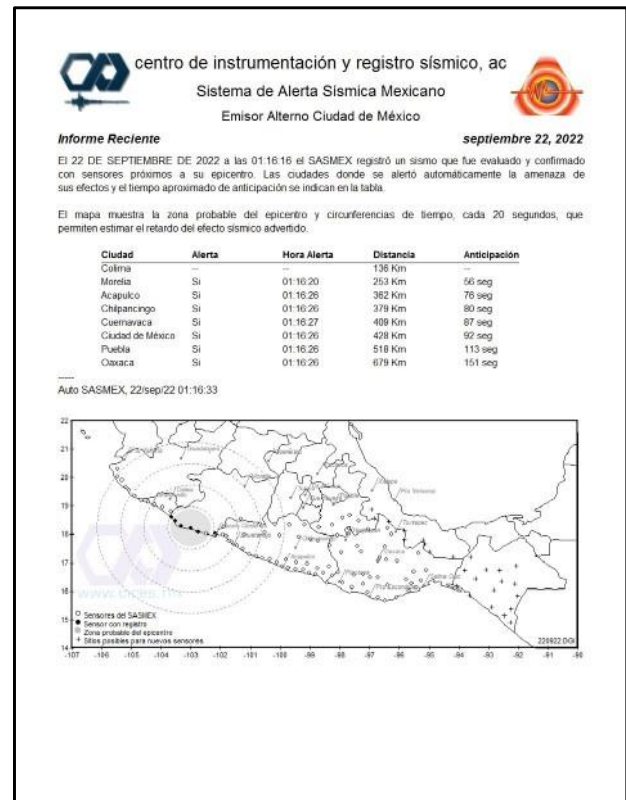


Figura 2.13 Aceleraciones registradas por los sensores y en los centros para el componente oeste-este durante el sismo del 22 de septiembre de 2022. A la derecha de las señales se indica el valor máximo de aceleración en cm/s^2 . Las señales están escaladas para visualizarse adecuadamente. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*



a)



b)

Figura 2.14 Informe emitido y enviado automáticamente por correo electrónico a los suscriptores, a) para el sismo del 19 de septiembre de 2022 y b) para el sismo del 22 de septiembre de 2022. *Fuente: Espinosa et al. (2022)*

2.4. Réplicas

El 19 de septiembre de 1985, el sismo de Michoacán de M8.1 causó daños y muertes en la Ciudad de México a pesar de ocurrir a más de 300 km de distancia. Una gran réplica de M7.6 siguió al sismo principal después de aproximadamente 32 horas. Otro sismo, el de Puebla-Morelos M7.1, ocurrió también el 19 de septiembre de 2017, 32 años después; su epicentro se localizó a 120 km de la Ciudad de México. Aunque la magnitud fue menor que la de 1985, el sismo de 2017 causó daños importantes a las estructuras y dejó varias muertes, no solo en la capital de México sino también en la región central de la República. En 2022, treinta y siete años después de los terremotos de 1985 y cinco años después de los terremotos de 2017, el 19 de septiembre ocurrió nuevamente un sismo M7.7. Este evento fue un sismo de subducción con mecanismo focal inverso y epicentro ubicado frente a la costa del estado de Michoacán con una profundidad de 15 km (SSN, 2022). Una gran réplica de M6.9 tuvo lugar aproximadamente 60 horas después. Hasta el 31 de diciembre de 2022 el SSN había reportado 13,140 réplicas. En la Figura 2.15 se muestran las réplicas ocurridas durante los 30 días subsecuentes al sismo principal.

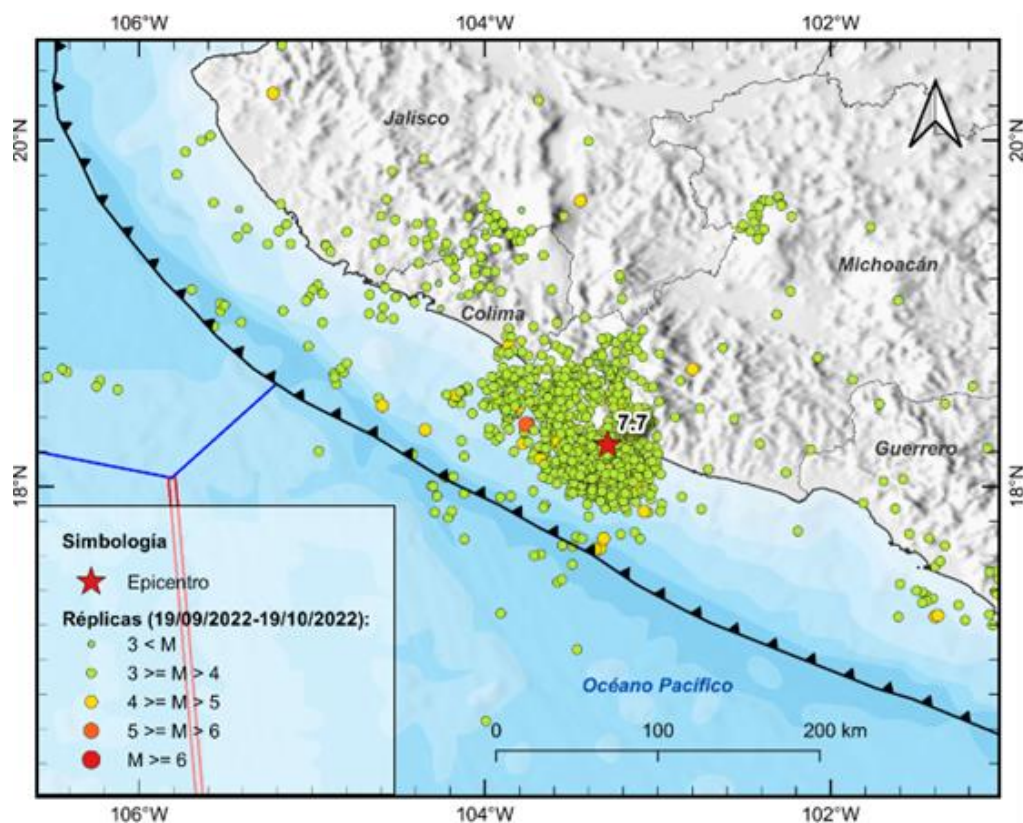


Figura 2.15 Réplicas registradas por el SSN del 19 de septiembre al 19 de octubre de 2022

Bastan solo las réplicas ocurridas en la primera semana (Figura 2.15) para tener una primera estimación del área de ruptura, la cual concuerda con la parte suroriental del área de ruptura del sismo de 1973 (M 7.6) que incluye el área de ruptura del sismo de 1986 (M7.0), ver Figura 2.16. Hacia el poniente las réplicas se presentan por el límite externo tanto del área de falla del sismo de 1973 como el área externa del sismo de Tecomán del 2003 (M 7.6). Hay una zona donde la sismicidad es escasa en el área de ruptura norponiente del sismo de 1973 que también es evidente en la sismicidad reportada para los tres meses después del evento principal, como se muestra en la Figura 2.17.

Adicionalmente a la ocurrencia de las réplicas, el sismo principal parece haber activado un brote sísmico observado en la región de Uruapan-Tancítaro-Los Reyes en el Estado de Michoacán (ver Figura 2.17). Este brote parece ser la continuación de la sismicidad ocurrida en el 2020 y 2021 y que había disminuido en la primera mitad de 2022 (SSN, 2022). Su reactivación comenzó con un evento de M3.8 ocurrido el 23 de septiembre de 2022 y el evento más grande, registrado hasta ahora, ocurrió el 22 de octubre de 2022 19 km al suroeste de Los Reyes de Salgado. En la Figura 2.18 se muestran los registros de velocidad y aceleración de ese sismo registrado en la estación instalada por el Instituto de Ingeniería, REYEII, en la ciudad de Los Reyes. Se puede observar que la aceleración mayor ocurrió en la componente vertical y fue de 11.91 cm/s^2 .

La distribución de esta sismicidad parece alinearse con las fallas locales de la región en el graben de Peribán y de manera más dispersa al sur del volcán de Tancítaro sobre la depresión del río Balsas de manera más dispersa (ver Figura 2.19).

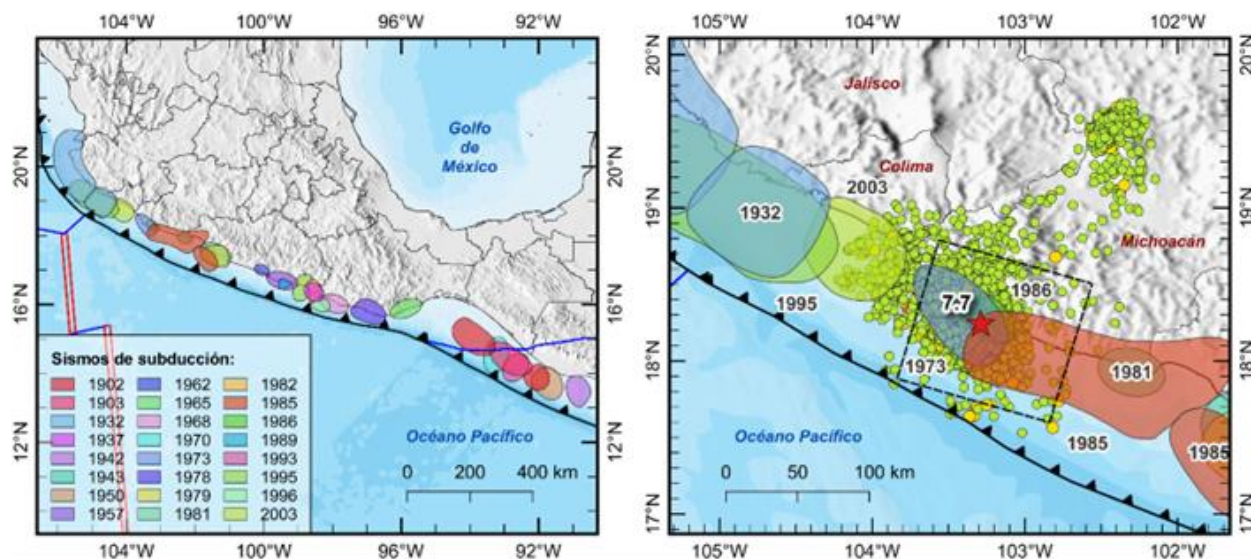


Figura 2.16 Mapa con los grandes sismos ocurridos en México. Se muestran las áreas de ruptura de los sismos intraplaca

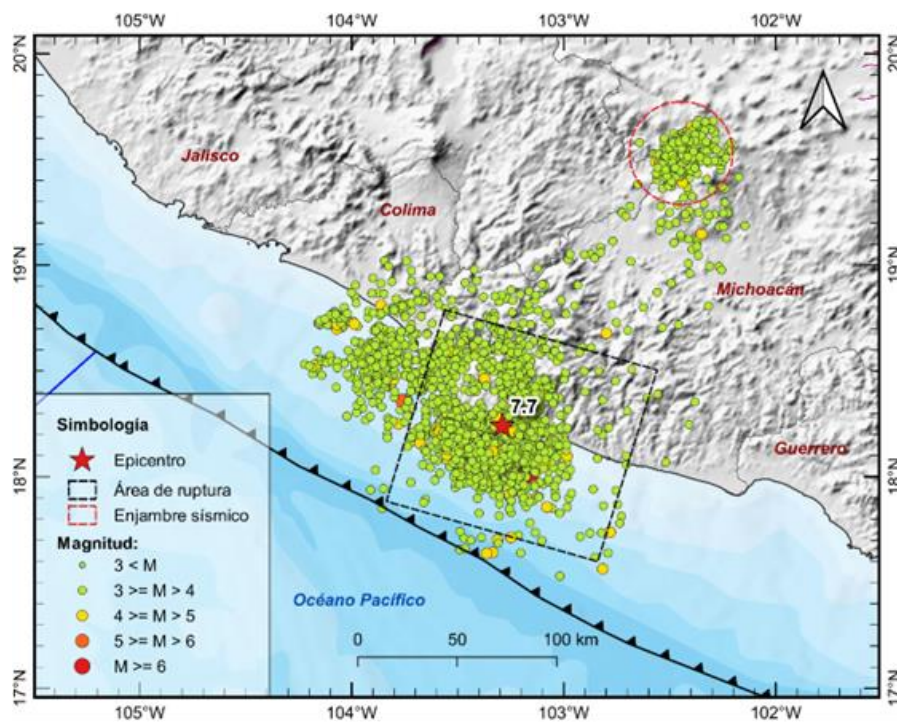


Figura 2.17 Sismicidad del 1 de octubre al 15 de diciembre de 2022. En un círculo rojo aparece el brote sísmico de la región de Uruapan-Tancítaro- los Reyes

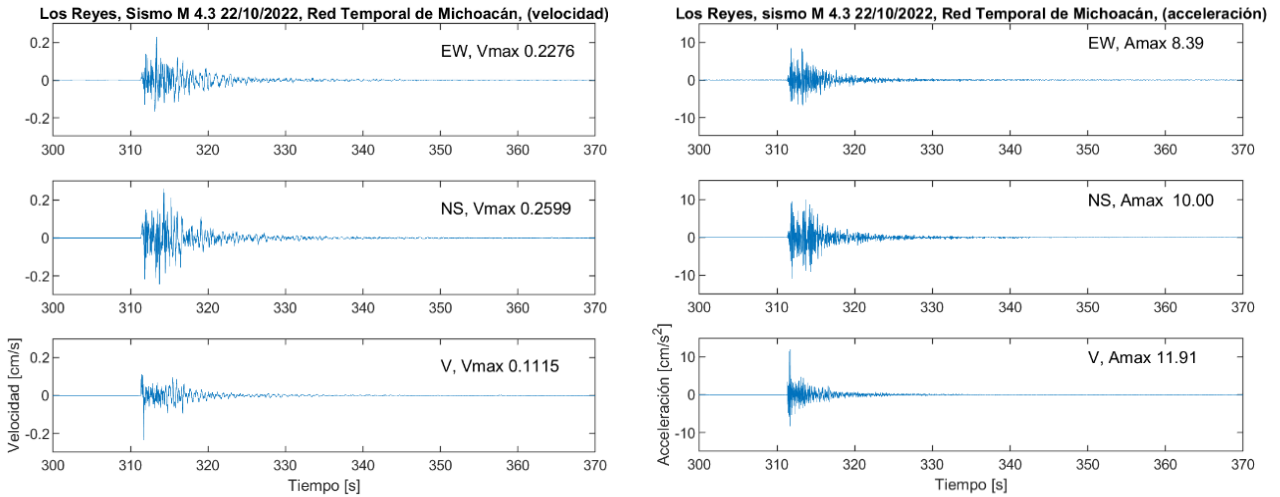


Figura 2.18 Registros del sismo de M 4.3 ocurrido el 22 de octubre de 2022 en la estación REYEII. A la izquierda los registros de velocidad, a la derecha los registros de aceleración

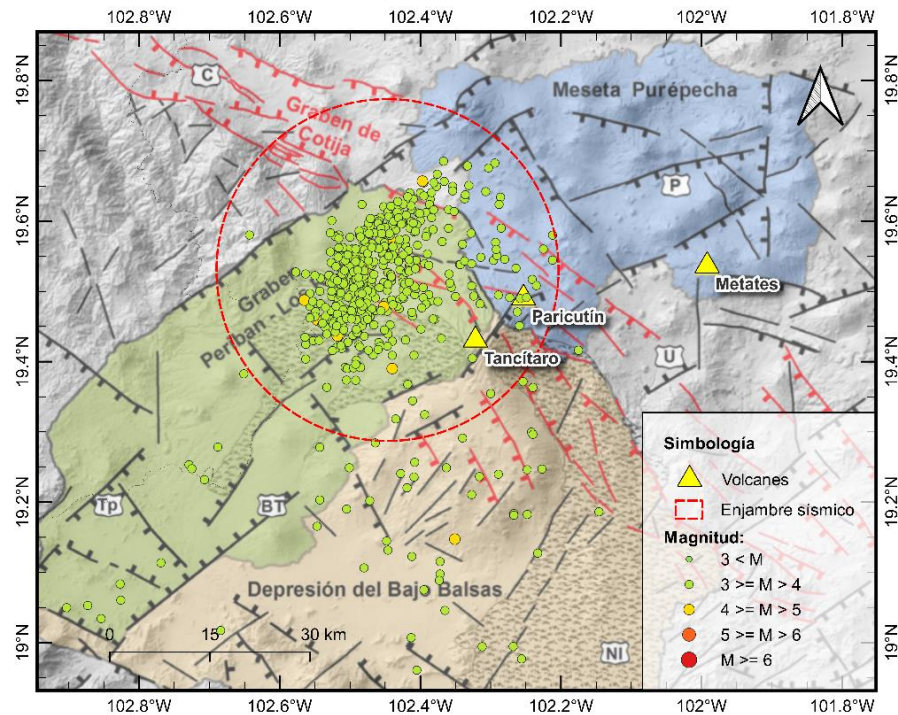


Figura 2.19 Localización de la actividad sísmica del 20 de octubre al 31 de diciembre de 2022 sobre el mapa geológico de la región de Uruapan-Tancitaro-Los Reyes

Si bien, tanto la localización de réplicas como el brote sísmico antes mencionado han sido oportunamente reportados por el SSN, resultan invaluable los registros como el mostrado en la Figura 2.18 que permiten conocer la magnitud y las características espectrales de los eventos sísmicos

ocurridos en la región. Además, permiten refinar la localización de estos eventos para establecer la asociación de esta sismicidad con las fallas locales. El Instituto de Ingeniería emprendió una campaña instalando 18 equipos en la región epicentral, mayormente en el Estado de Michoacán. La distribución de las estaciones aparece en la Figura 2.20. De los equipos instalados, 16 corresponden a sismómetros de banda ancha (Guralp 6TD, con respuesta plana hasta 30 segundos) y 2 acelerógrafos (K2, Kinemetrics).

En la Tabla 2.3 se muestra el listado y la descripción de la ubicación de las 2 estaciones con acelerógrafo y en la Tabla 2.4 se muestra la descripción de las 16 estaciones con sismómetros.

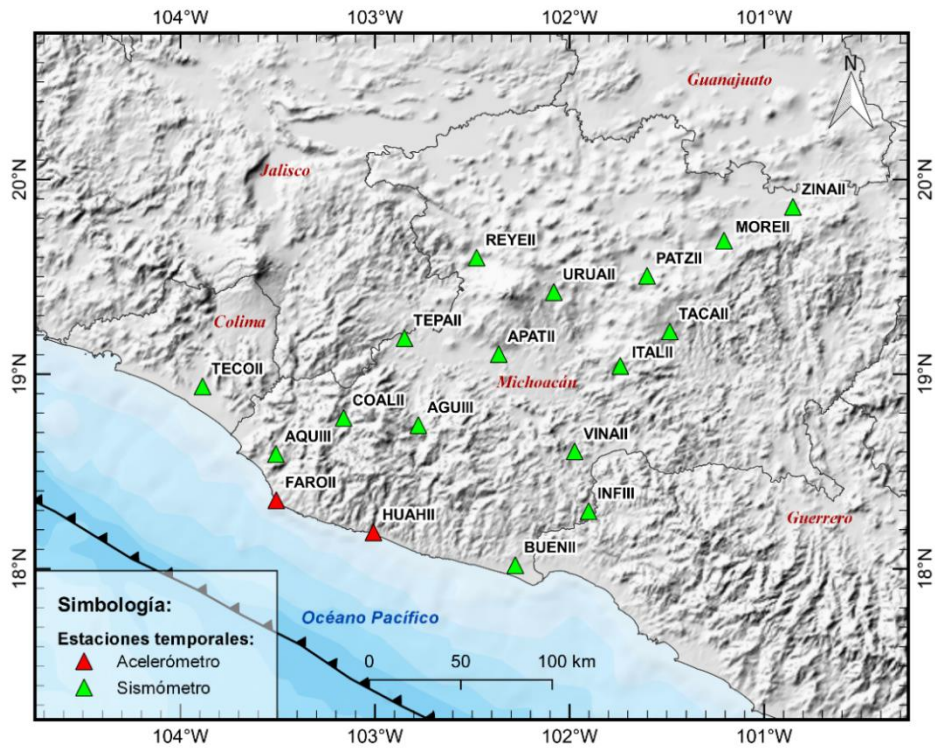


Figura 2.20 Ubicación de estaciones del arreglo temporal instalado en el Estado de Michoacán para registrar las réplicas del sismo del 19 de septiembre de 2022. En triángulos verdes las estaciones con sismógrafos y en triángulos rojos las estaciones con acelerógrafos

Tabla 2.3 Listado de estaciones del arreglo semipermanente con acelerógrafos

No	Clave	Equipo	Ubicación	Domicilio	Municipio	Estado	Coordenadas	
							Latitud	Longitud
1	HUAHII	FBA23	Huahua	(Casa Particular) Carretera Tecomán - Cd. Lázaro Cárdenas, 60895	Aquila	Michoacán	18.1867°	-103.0076°
2	FAROII	FBA23	Faro de Bucerías	(Casa particular) Av. Tsándani, 60885	Aquila	Michoacán	18.3516°	-103.5069°

Tabla 2.4 Listado de estaciones del arreglo semipermanente con sismómetros

No	Clave	Equipo	Ubicación	Domicilio	Municipio	Estado	Coordenadas	
							Latitud	Longitud
1	MOREII	T6N66	Villa Universidad	(Casa de Ricardo Vázquez) Calle Bruselas 57, Villa Universidad, 58069	Morelia	Michoacán	19.685°	-101.2060°
2	URUAII	T6V87	Inguambal	(Casa particular) F, Mariano Matamoros 35, 60130	Uruapan	Michoacán	19.421°	-102.0803°
3	TECOII	T6N67	Miguel Hidalgo y Amp	(Oficinas de Protección Civil) Av. Insurgentes 1582A, 28110	Tecomán	Colima	18.9361°	-103.8860°
4	AQUIII	T6N64	Aquila	(Casa particular) Av. Independencia s/n, 60873	Aquila	Michoacán	18.5891°	-103.5086°
5	COALII	T6N65	Coalcomán centro	(Oficinas de Protección Civil) Nogales 226, 60840	Coalcomán de Vázquez Pallares	Michoacán	18.7743°	-103.1608°
6	TEPAII	T6R81	Los Mangos	(Unidad de Medicina Familiar, IMSS) C. Belisario Domínguez 132, 60540	Tepalcatepec	Michoacán	19.1844°	-102.8481°
7	APATII	T6R83	Buenos Aires	(Casa particular) C. José María Arteaga 678, 60610	Apatzingán de la Constitución	Michoacán	19.1024°	-102.3634°
8	AGUIII	T6N71	Aguililla	(Casa particular) 18 de marzo 1005, 60570	Aguililla	Michoacán	18.7373°	-102.7768°
9	ITALII	T6R87	Benito Juárez	(Esc. Sec. Tec. No.44) Lázaro Cárdenas Nte. 312, 61760	Nueva Italia	Michoacán	19.0418°	-102.0830°
10	VINAI	T6N75	La Vinata	(Esc. Prim. Emiliano Zapata) Vía sin nombre, 60935	Arteaga	Michoacán	18.6023°	-101.9733°
11	INFIII	T6Q88	Infiernillo	(Esc. Sec. Tec. No.86) Adolfo López Mateos 3438, Pitirera, 60940	Arteaga	Michoacán	18.2958°	-101.9017°
12	BUENII	T6N73	Buenos Aires	(Esc. Sec. 106) Girasoles, 60983	Lázaro Cárdenas	Michoacán	18.0186°	-102.2787°
13	REYET	T6R73	La Paz	(COBAEM, Plantel Los Reyes) Uriel Bravo 3, 60322	Los Reyes	Michoacán	19.5979°	-102.4772°
14	PATZII	T6R71	Vista del Lago	(Oficinas de Protección Civil) Santiago 61, 61606	Pátzcuaro	Michoacán	19.5041°	-101.6014°
15	TACAI	T6V94	Zona El Gigante	(Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro) Av. Tecnológico No. 201, 61650	Tacámbaro	Michoacán	19.2184°	-101.4842°
16	ZINAI	T6R70	Zinapécuaro	(Oficinas de Protección Civil) Carretera Acámbaro–Morelia s/n	Zinapécuaro	Michoacán	19.8586°	-100.8518°

En la Figura 2.21 se muestra un ejemplo de los registros de aceleración de la componente EW, en las 18 estaciones sísmicas de la red, del sismo de M4.5 ocurrido el 11 de octubre de 2022 a 14 km al este-sureste de la estación HUAHII. Las estaciones se encuentran a distancias epicentrales que van de 14 a 306 km. Los registros están a la misma escala excepto para las estaciones más remotas MOREII y ZINAI que fueron multiplicadas por 2 a fin de poderse observar en la gráfica.

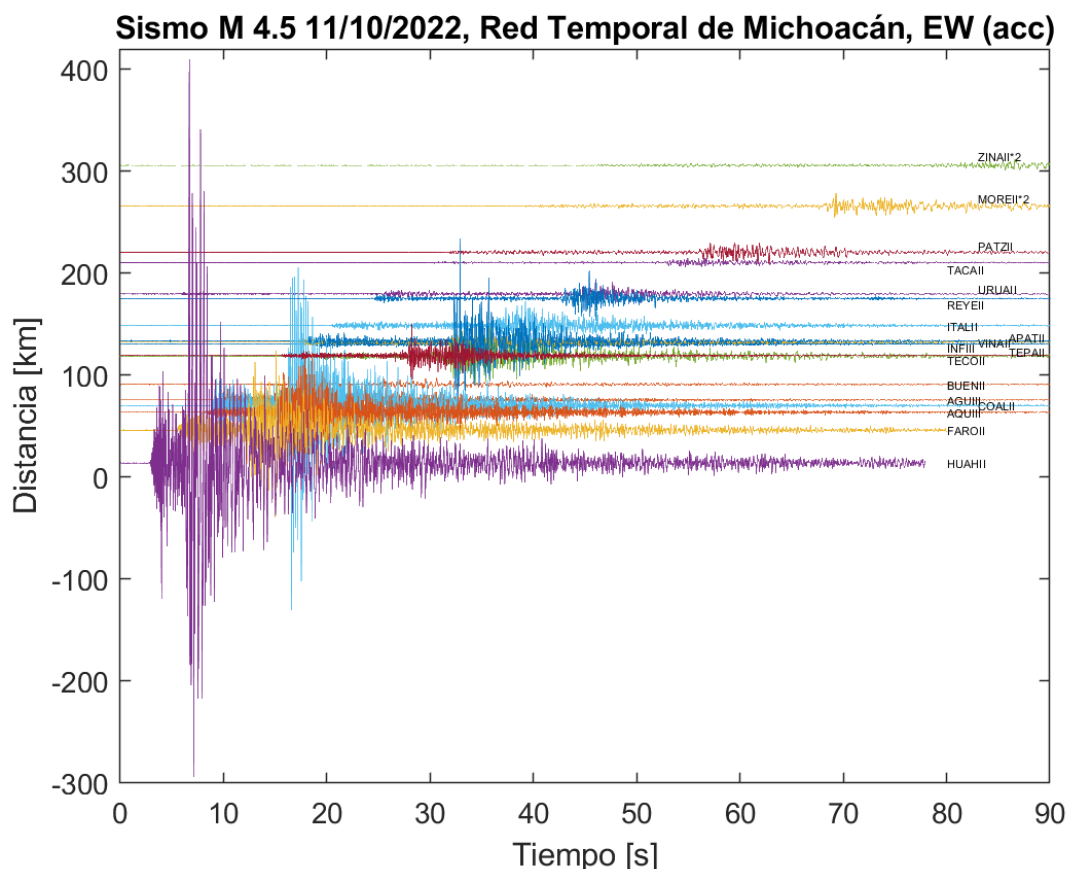


Figura 2.21 Registro de aceleración de las componentes EW de la réplica de M 4.5 ocurrida el 11 de octubre de 2022 en las 18 estaciones de la red temporal

2.5. Características de la fuente sísmica

De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el sismo interplaca de Coalcomán tuvo un mecanismo de falla inversa con rumbo = 101.9° , buzamiento = 81.7° e inclinación = 86.3° . Ocurrió cerca de la costa de Michoacán con un hipocentro en la latitud 18.24°O , longitud 103.29°N y profundidad de 15 km y una magnitud 7.7 (SSN, 2022). Estimaciones posteriores de la magnitud oscilaron entre 7.6 y 7.7, e.g. USGS 7.6, pero dada la incertidumbre en los datos y estructura empleada, se prefiere en el texto la primera estimación del SSN que coincide con la propuesta por el Global CMT, una referencia comúnmente empleada en la sismología. El modelo de deslizamiento obtenido por el Centro de Geociencias de la UNAM (Mendoza y Martínez-López, 2022; Mendoza, comunicación personal, 20 de septiembre de 2022) muestra dos grandes áreas de deslizamiento con un pico de 1.29 m. Las Figuras 2.22 y 2.23 muestran los parámetros de la fuente obtenidos del informe publicado por el SSN, la falla finita y algunos movimientos de suelo registrados.

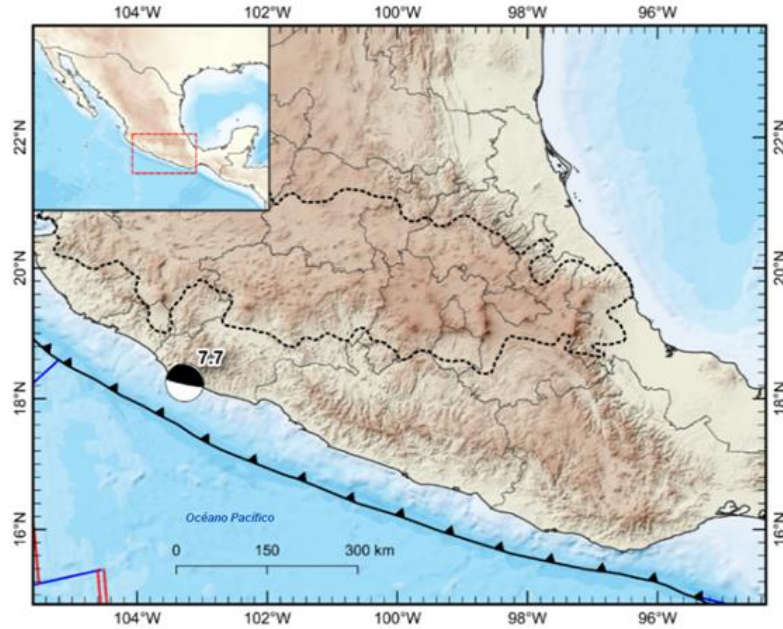


Figura 2.22 Epicentro y mecanismo focal del sismo M7.7 del 19 de septiembre de 2022, reportado por el Servicio Sismológico Nacional

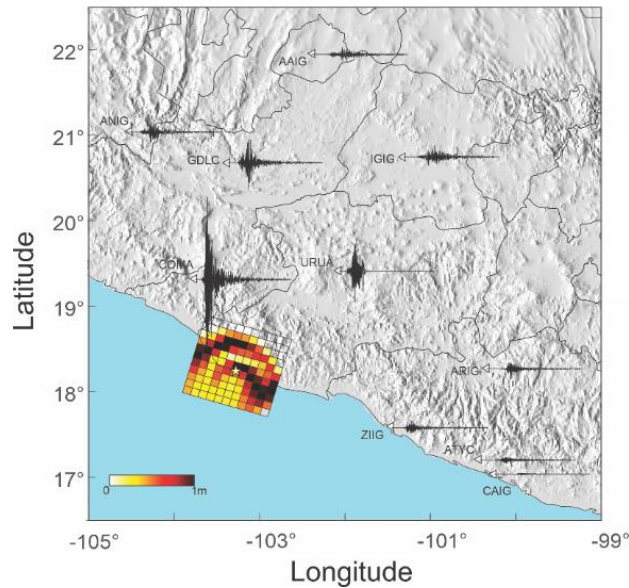


Figura 2.23 Modelo de falla finita (Mendoza y Martínez-López, 2022; Mendoza, comunicación personal, 20 de septiembre de 2022), epicentro (estrella amarilla) y velocidades registradas integradas desde la componente norte de los registros de aceleración de las redes sismológicas de la UNAM. La barra de calor indica la amplitud del deslizamiento saturada a 1 m en el plano de falla. Todas las señales se muestran con la misma escala.

2.6. Movimiento fuerte del terreno

2.6.1. Movimiento cercano a la fuente

La Figura 2.23 ilustra el modelo de falla finita, incluidos los registros de velocidad en varias estaciones alrededor del epicentro. La fuente tiene dos regiones distintas con gran deslizamiento, al noroeste y al sureste del epicentro (representado con una estrella amarilla), a partir de las cuales podemos anticipar efectos de directividad. Además, se muestra la amplitud y duración de la estación.

Las estaciones ARIG, ZIIG, ATYC y CAIG tienen amplitudes bajas y duraciones largas, mientras que COMA, GDLC y ANIG tienen pulsos que probablemente estén relacionados con la directividad (ver e.g., Somerville *et al.*, 1997). Para ayudar en la discusión, realizamos una simulación usando el modelo de fuente de Mendoza, la cadena de herramientas de elementos finitos Hércules (Tu *et al.*, 2006; Bielak *et al.*, 2010), y un modelo de velocidad de la corteza basado en una tomografía de onda completa (Juárez-Zúñiga y Ramírez-Guzmán, 2016). La simulación, válida hasta 0.5 Hz, muestra claramente que la energía se propaga preferentemente hacia el norte y noroeste, pero algunos frentes de onda de gran amplitud inciden hacia el noreste (estación URUA en la Figura 2.24). Se destaca la probable directividad y la focalización; ambos podrían explicar el patrón de distribución de los daños reportados.

Poco tiempo después del evento, la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería dio a conocer mapas de parámetros de movimiento del suelo estimados utilizando un algoritmo kriging bayesiano y los registros de la red de la UNAM.

La Figura 2.25 presenta la distribución espacial de la raíz cuadrática media (RMS) de las aceleraciones horizontales máximas del suelo (componentes norte-sur y este-oeste) y la aceleración espectral (SA) para períodos estructurales (T) de 1 y 2 s. Solo los registros obtenidos en sitios de roca se incluyen en los cálculos. Los mapas permiten conocer de manera rápida la intensidad de los sismos potencialmente dañinos generados por el sismo de 2022 (es decir, leve, moderado y severo).

El sismo de Coalcomán generó intensidades de moderadas a altas alrededor de la región epicentral. Los valores de RMS PGA y SA más altos para T=1 y 2 s, registrados en la estación MMIG, fueron 902 cm/s^2 , 219 cm/s^2 y 84 cm/s^2 , respectivamente.

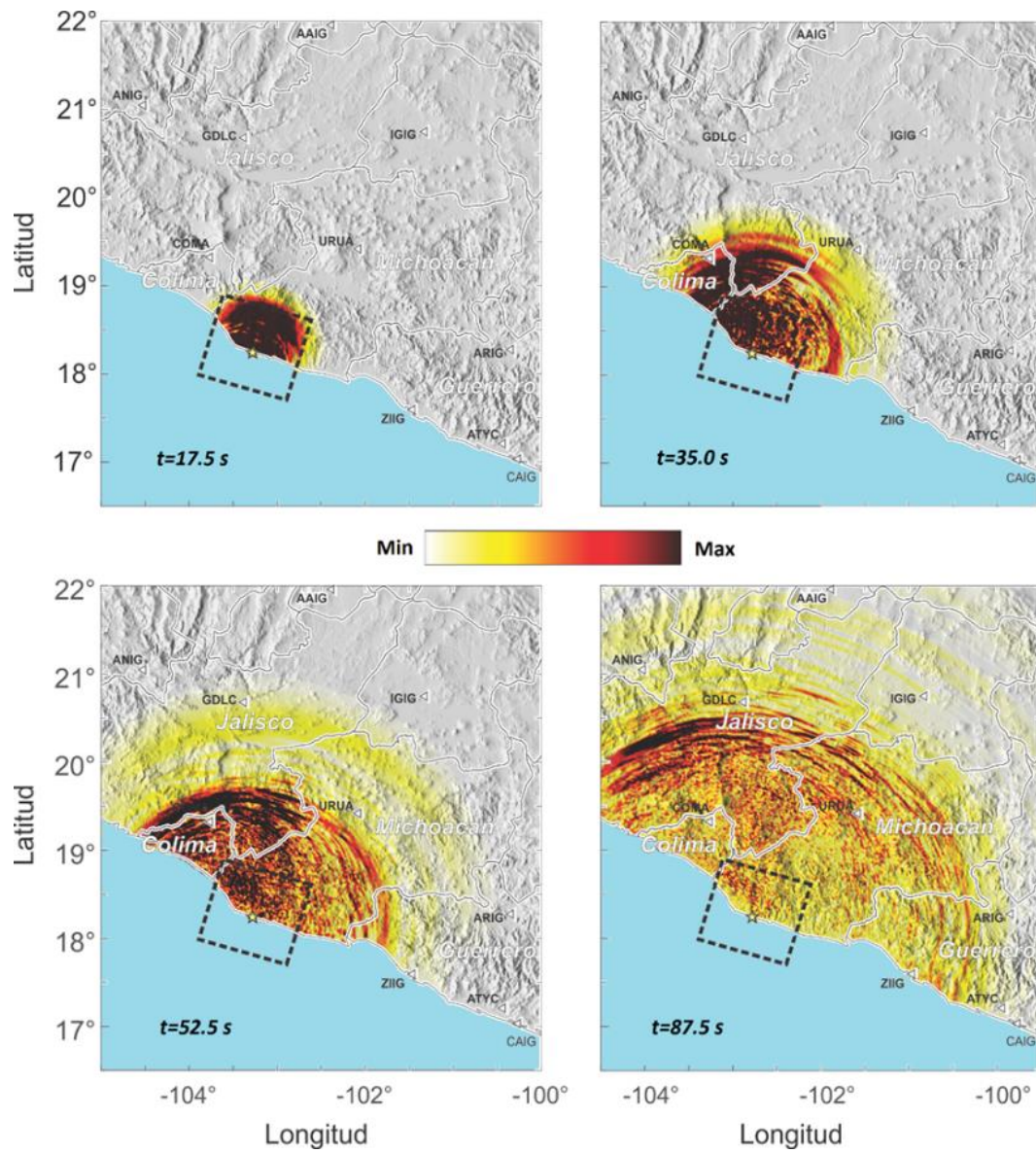
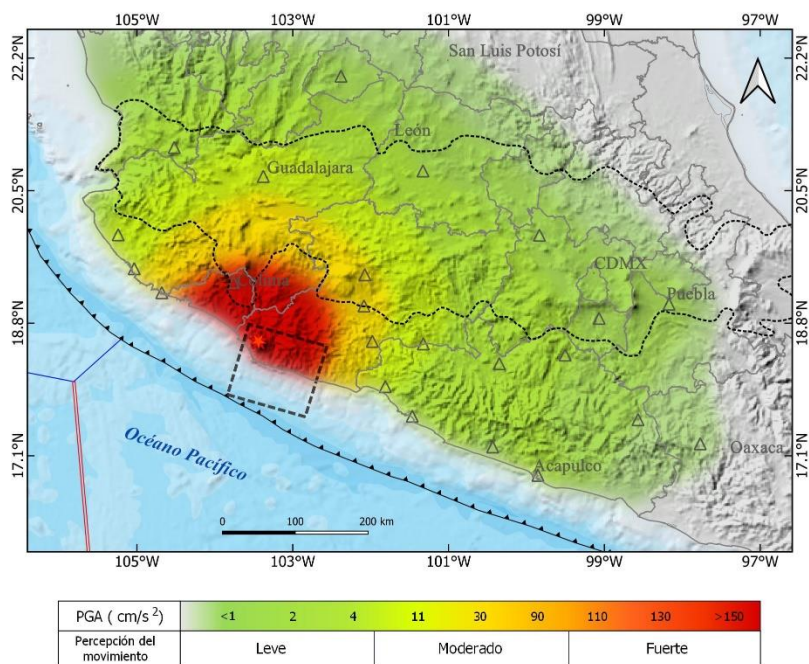
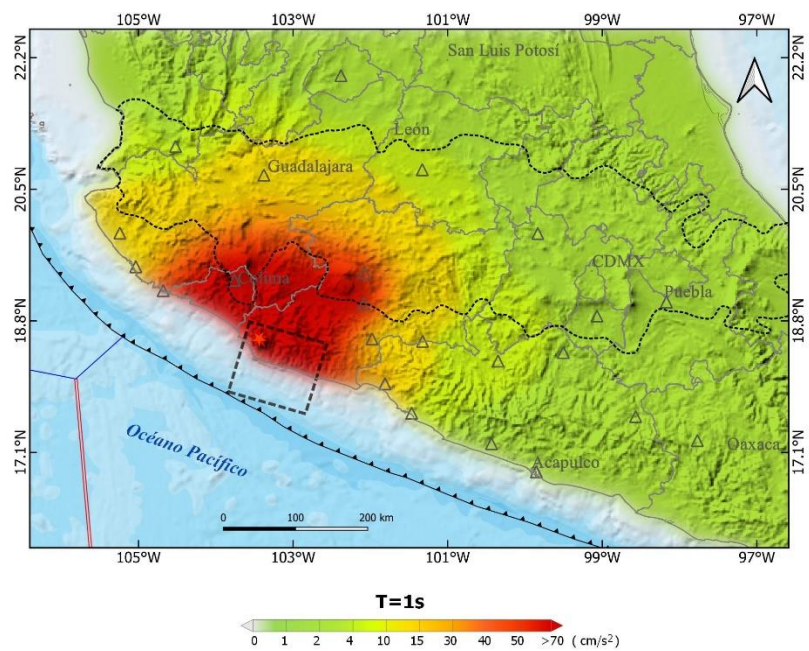


Figura 2.24 Simulación del movimiento del terreno. El mapa de colores representa la velocidad horizontal en los tiempos 17.5, 35, 52.5 y 87.5 s



a)



b)

Figura 2.25 Distribución espacial de parámetros de movimiento del terreno: a) aceleración máxima del terreno, PGA. b) aceleración espectral para T=1 s y c) aceleración espectral para T= 2 s

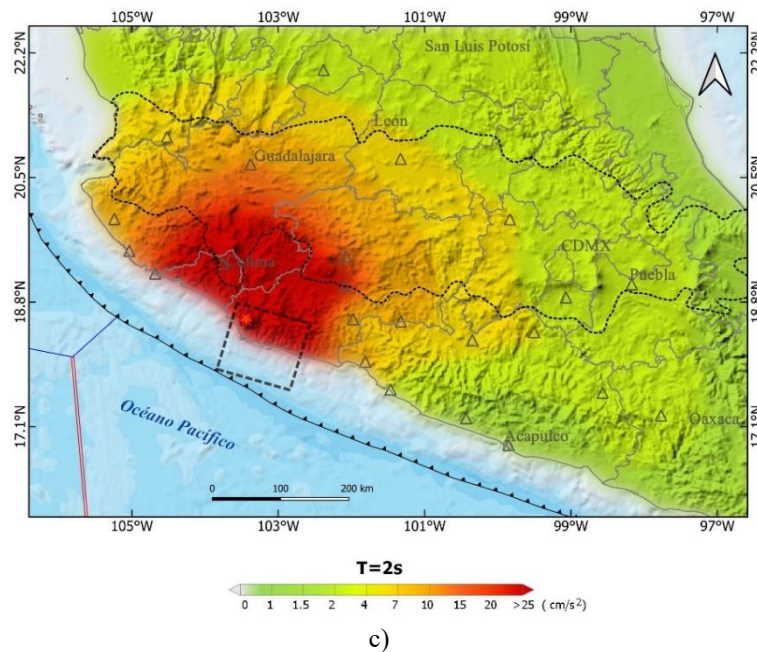


Figura 2.25 (Continuación). Distribución espacial de parámetros de movimiento del terreno: a) aceleración máxima del terreno, PGA. b) aceleración espectral para $T=1$ s y c) aceleración espectral para $T=2$ s

2.6.2. Movimiento lejos de la fuente sísmica – Ciudad de México

La capital de México cuenta con un sistema de evaluación rápida de intensidades y daños de alta resolución (Ordaz *et al.* 2017), que brinda una visión general rápida del impacto de los sismos en la ciudad. La Figura 2.26 presenta la distribución espacial de varios parámetros de movimiento del suelo del evento del 19 de septiembre de 2022: PGA, SA para periodos estructurales de 0.3, 1 y 2 segundos, con valores entre 3 y 3.35 cm/s^2 , 5 y 45 cm/s^2 , 7 y 90 cm/s^2 y 8 y 165 cm/s^2 , respectivamente. Estas intensidades no representan un riesgo sísmico crítico para la ciudad. Las intensidades no superan el espectro sísmico de diseño considerado para la revisión del estado límite denominado “limitación de daños” de la NTCS-2017 y NTCS-2020, es decir, se espera que las edificaciones alcancen un nivel de desempeño de ocupación inmediato luego de sismos con intensidades sísmicas moderadas, como se muestra más adelante para dos sitios en la Ciudad de México.

Las disposiciones de diseño sísmico de la Ciudad de México (NTCS 2017, 2020) proporcionan umbrales para las distorsiones máximas de entrepisos relacionadas con la intensidad del estado límite de daño para proteger los elementos no estructurales del daño (*e.g.*, muros de relleno, fachadas de cristales). El denominado estado límite de servicio puede presentarse varias veces durante la vida útil de la estructura (*i.e.*, sismos frecuentes). Esto último significa que se espera que las estructuras diseñadas con este criterio alcancen un nivel de desempeño de ocupación inmediato después de sismos de intensidades sísmicas moderadas; esto implica que se considera que las construcciones tienen un comportamiento lineal.

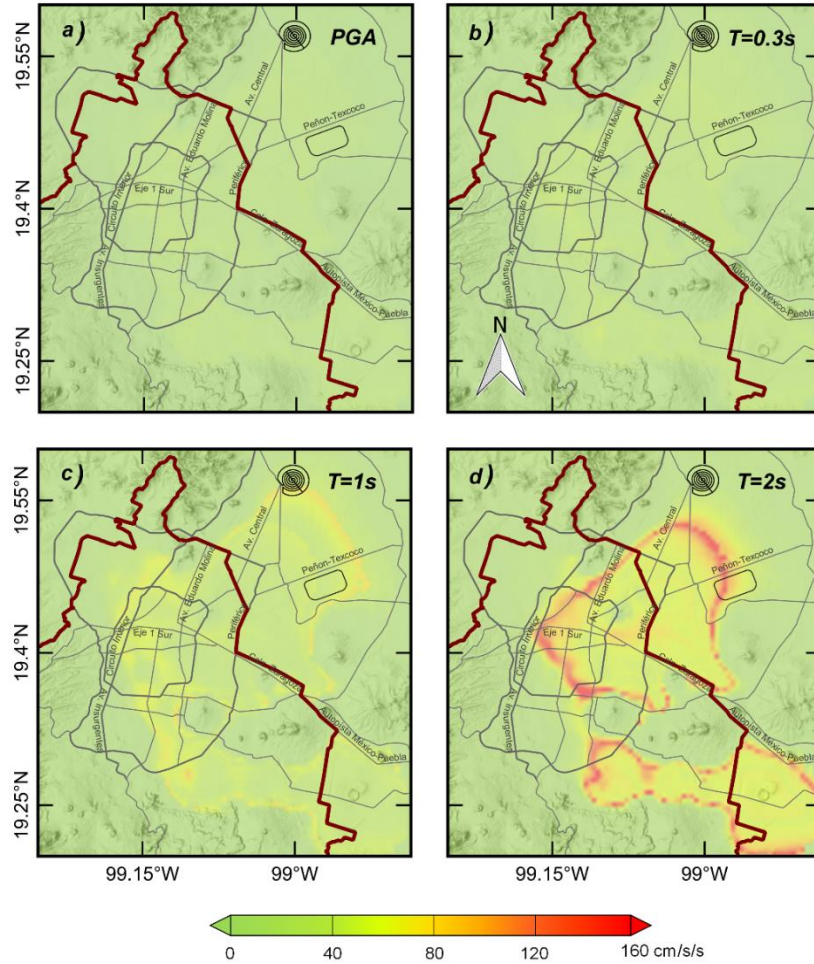


Figura 2.26 Distribución espacial de a) aceleración máxima del terreno, b, c y d) intensidad espectral para un período estructural de 0,3, 1, 2 s, para el terremoto del 19 de septiembre de 2022

La Figura 2.27 compara el espectro de respuesta calculado en las estaciones acelerométricas CU y SCT (línea naranja) con el espectro de diseño para el estado límite de servicio (ELS) de la NTCS-2017 (línea negra). En esta Figura, los valores espectrales graficados corresponden al RMS de la máxima respuesta de ambas componentes horizontales. Esta medida de la intensidad del movimiento del suelo es consistente con la utilizada para derivar el espectro de diseño en la Norma para el Diseño Sísmico de la Ciudad de México NTCS 2017. Para ambos sitios, se puede notar que los valores espectrales computados no exceden las ordenadas espectrales (definidas para un período de retorno de 20 años) del ELS, lo que indica daño estructural menor o nulo que no afecta el nivel operativo de los edificios. Este último concuerda con el informe de daños del Gobierno de la Ciudad de México (GCM, 2022), que menciona que solo veintidós edificios sufrieron daños leves como, caída de techos, cristales rotos y daños en yeso.

El espectro de respuesta en CU muestra un PGA de 5.06 cm/s^2 y una amplitud máxima de 17.3 cm/s^2 en $T=2.5 \text{ s}$. Para SCT, el valor de PGA corresponde a 18.4 cm/s^2 y la amplitud máxima a 101.8 cm/s^2 en

$T=1.5$ s. La forma del espectro de respuesta en CU está fuertemente influenciada por los efectos de sitio presentes en la estación, que producen una gran amplificación en el intervalo de período de 1 a 3 segundos. Esta condición es particularmente atípica en sitios clasificados como roca, donde se espera que la amplitud máxima ocurra en períodos inferiores a 1 s. Sin embargo, en la zona firme de la Ciudad de México, esta amplificación es causada por los sedimentos poco profundos (<1 km) que yacen debajo de las rocas volcánicas que cubren la zona dura del Valle de México (Ordaz y Singh 1992).

Adicionalmente, la versión 2020 del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México especifica que las estructuras deben ser inspeccionadas cuando el PGA supere los 90 cm/s^2 en la estación SCT, ubicada en la zona de suelo blando. Cabe mencionar que las versiones anteriores de las disposiciones de diseño sísmico de la Ciudad de México no incluían dichos requisitos. Como se mencionó anteriormente, para el sismo M7.7 del 19 de septiembre de 2022, se registró un PGA de 18.4 cm/s^2 en la estación SCT.

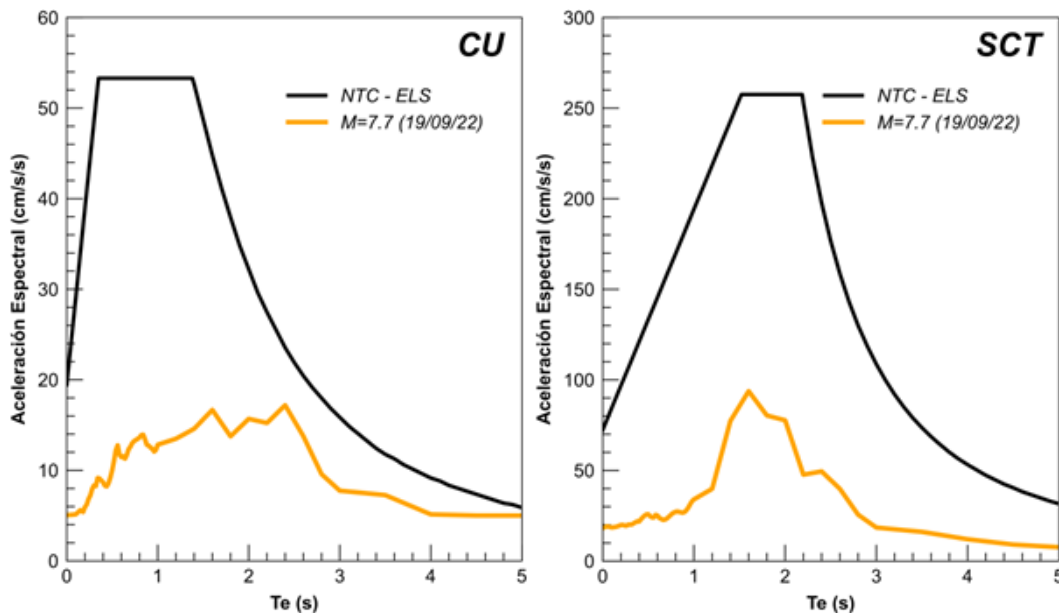


Figura 2.27 Espectro de diseño sísmico considerado para la revisión del estado límite de servicio (línea negra) y el espectro de respuesta obtenido en las estaciones CU (izquierda) y SCT (derecha) (línea naranja), ubicadas en la zona de lomas y lago de la Ciudad de México, respectivamente

2.6.3. Atenuación en sitios de roca fuera de la Ciudad de México

Al comparar, las observaciones y las ecuaciones de predicción del movimiento del terreno (GMPE) de Zhao et al. (2006), Arroyo et al. (2010) y NGA-Subduction Global 2022 (Parker et al. 2022) para RMS PGA y SA para $T=1$ y 2 s para sismos de subducción (Figura 2.28), se observa que los GMPE concuerdan razonablemente bien con los valores observados.

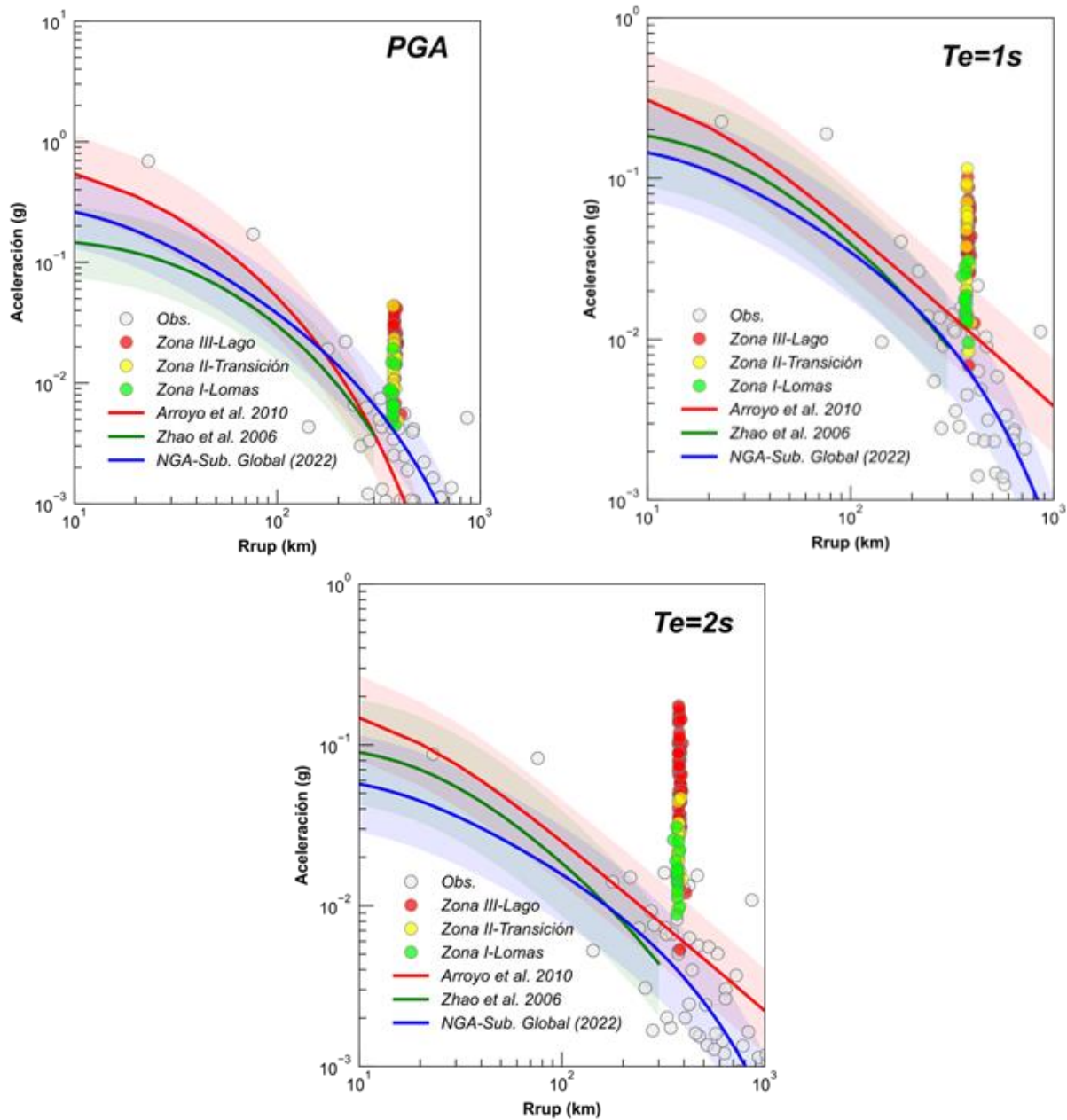


Figura 2.28 GMPE vs observaciones. Curvas del RMS de la componente horizontal de PGA (arriba a la izquierda), SA a $T=1$ s (arriba a la derecha) y SA a $T=2$ s (abajo) para el sismo de subducción mexicano con M7.7. Las observaciones (Obs) en sitios rocosos se muestran en círculos blancos. Los círculos verdes, amarillos y rojos muestran los valores RMS dentro de la Ciudad de México en las zonas de Roca, Transición y Lago

La Figura 2.28 también incluye los percentiles 16 y 84 de los modelos (región sombreada). Las intensidades observadas se encuentran aproximadamente entre los límites de incertidumbre mostrados. Para distancias cortas, el modelo de Arroyo et al. (2010) proporciona una buena estimación, y NGA-Subduction Global (2022) funciona mejor para intervalos más grandes de Rrup, la distancia más

cercana a la ruptura. Se espera lo primero, ya que el intervalo de validez de la ecuación es de 400 km, mientras que el segundo modelo cubre un intervalo más amplio. Se incluyen los valores de intensidad en la Ciudad de México, donde el efecto de sitio es evidente.

2.6.4. Atenuación en terreno firme de la Ciudad de México

Las intensidades sísmicas registradas en la estación del sitio de referencia de la Ciudad de México, CU (Ciudad Universitaria), son un buen indicador de las intensidades y daños en toda la ciudad, i.e., se esperan daños severos en la Ciudad cuando ocurren intensidades sísmicas altas en la estación CU.

Los ejemplos incluyen el sismo de subducción M8.1 de 1985 y el sismo de intraplaca de profundidad intermedia M7.1 de 2017. Para el primero, las grandes intensidades sísmicas para el registro de la estación CU están bien correlacionadas con el intervalo del período del suelo de 1.8-2.5 s, y para el último, el intervalo del período del suelo de 0.5-1.6 s coincide con las zonas más dañadas de la ciudad durante estos eventos (en términos del período predominante del sitio). Se esperan patrones similares para futuros eventos sísmicos destructivos interplaca e intraplaca (Singh *et al.*, 2015). La Figura 2.29 compara los espectros de respuesta estimados con las GMPE de Reyes (1999) y Jaimes *et al.* (2006) para el sitio CU contra el espectro del sismo de Coalcomán registrado en esta estación. La Figura 2.29 también incluye $\pm$ una desviación estándar para cada modelo predicho (región sombreada). Ambos modelos de predicción sobrestiman las ordenadas, lo que podría deberse a la necesidad de revisar los parámetros de origen o una actualización requerida de las GMPE.

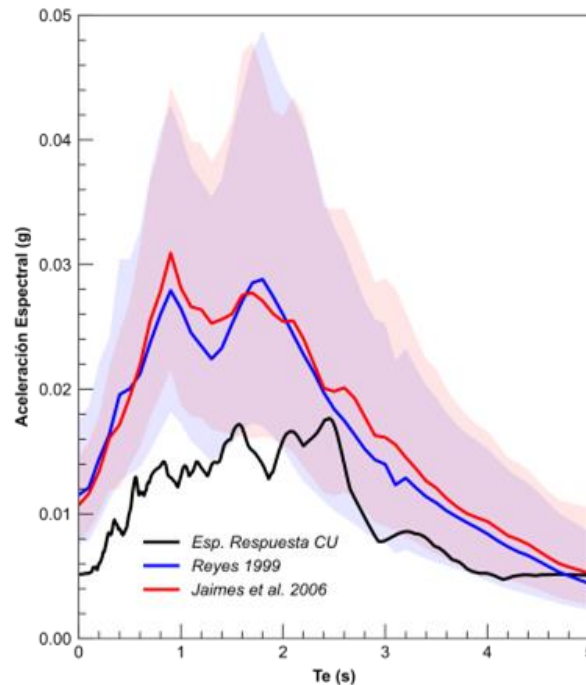


Figura 2.29 Espectros de respuesta en la estación CU: espectros del registro y espectros obtenidos con GMPMs para sismo de subducción mexicano con M7.7

2.7. Tsunami

En México diferentes zonas significativas son vulnerables a los tsunamis provocados por eventos sísmicos. Más de 60 tsunamis se originaron dentro de esta región desde 1732 hasta 2022. Los eventos tsunamigénicos han tenido magnitudes superiores a M6.9, por lo que era razonable suponer que un evento de magnitud M7.7 podría generar un tsunami significativo. De acuerdo con el Servicio Mareográfico Nacional (SMN 2022), la altura máxima de ola en estaciones cercanas al epicentro fue de 1.75 m en Manzanillo y de 0.635 m en Acapulco. Para comprender mejor la altura de las olas en la costa, se realizó una simulación utilizando el modelo de tsunami GeoClaw (e.g., LeVeque et al., 2011). El perfil de amplitud del tsunami se calculó para puntos de referencia cerca de la costa en una isobata de 1.5 m (Figura. 2.30). La batimetría de alta resolución solo estaba disponible en los puertos cercanos a la región epicentral. Si bien la altura de ola modelada subestima los valores reportados sin considerar corrección alguna, cualitativamente la distribución representada en la Figura 2.30 es consistente con la información del Centro de Alerta de Tsunamis de la Secretaría de Marina, que emitió una alerta esperando variaciones anormales del nivel del mar hasta de 0.82 m sobre el nivel del mar (CNPC, 2022b).

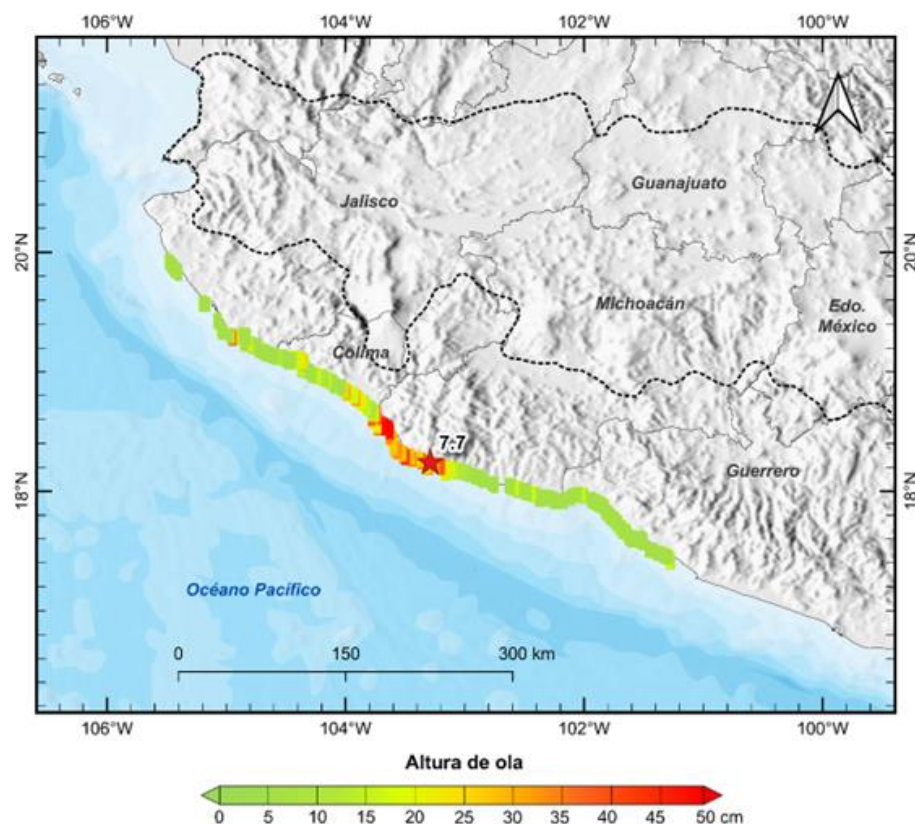


Figura 2.30 Altura máxima de ola de tsunami a lo largo de la costa mexicana. La estrella roja denota el epicentro

La Secretaría de Marina, por medio del Centro de Alerta de Tsunami, emitió el 19 de septiembre de 2022, a las 13:23:35 horas, el Boletín de Alerta de Tsunami 001 (SEMAR-CAT, 2022). En este se estableció que, con base en la información preliminar del sismo, se esperaban variaciones anómalas del nivel del mar de hasta 82 cm. Posteriormente, se emitieron otros ocho boletines de seguimiento, en donde se reportaron las alturas de tsunami medidas. La altura máxima registrada fue de 95 cm, a las 14:53:00 horas en Manzanillo. En el último boletín, emitido a las 23:45:00 horas, se reportó que ya no existía peligro y se canceló la alerta por tsunami.

Por su parte, los Centros Nacionales de Información Ambiental de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos, a través del Sistema de Alertamiento de Tsunami, emitieron el 19 de septiembre de 2022, a las 18:09:45 horas (UTC), una alerta de tsunami para las costas del Pacífico mexicano (NOAA, 2022). Dicha alerta pronosticaba olas de entre uno y tres metros de altura para las ciudades de Lázaro Cárdenas (Michoacán), Manzanillo (Colima), Acapulco (Guerrero) y Puerto Vallarta (Jalisco). En total se emitieron siete alertas de amenaza de tsunami, siendo la última a las 23:16:32 horas (UTC) en donde se declaró que la amenaza había cesado.

El Servicio Mareográfico Nacional (SMN) del Instituto de Geofísica de la UNAM registró perturbaciones en el nivel de mar en 5 de sus 27 estaciones: Puerto Vallarta, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Zihuatanejo y Acapulco API. Siendo en la estación Manzanillo, localizada a 141.5 km del epicentro, en donde se alcanzó la máxima amplitud (pico a pico) de las ondas del tsunami (SMN, 2022). En la Figura 2.31 se presenta el residual (datos medidos menos el pronóstico de marea astronómica) calculado en la estación Manzanillo y cuyo valor máximo de amplitud de ondas es de 1.749 m. En el eje horizontal se indica la fecha (hora UTC) y en el eje vertical las alturas. La línea vertical discontinua indica el tiempo de ocurrencia del sismo.

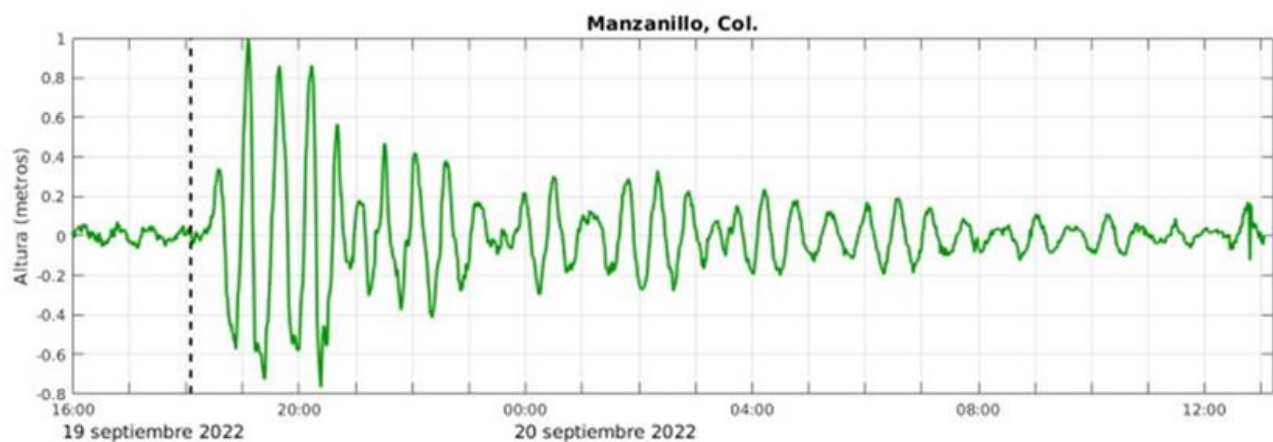


Figura 2.31 Residual en la estación Manzanillo en donde la amplitud de onda pico a pico fue de 1.749 m (SMN, 2022)

2.8. Conclusiones

El 19 de septiembre de 2022 se presentó un sismo de M7.7 a 4 km de Coalcomán, Michoacán, a 400 km de la Ciudad de México. El sismo generó movimientos de suelo con grandes aceleraciones máximas horizontales RMS; un valor de 902 cm/s^2 se registró en la estación MMIG (operada por el SSN) ubicada en Michoacán a unos 8 km del epicentro.

Las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo para sismos de subducción concuerdan razonablemente bien con los valores observados. En contraste, los GMPE específicos desarrollados para terreno firme en la estación CU para sismos de subducción necesitan ser revisados. Se encuentran diferencias entre los valores observados y los modelos para el evento del 2022.

Para los sitios alrededor de la región epicentral, las distribuciones espaciales de intensidad coinciden aproximadamente con las zonas donde los medios de comunicación informaron sobre daños estructurales y geotécnicos.

Para la Ciudad de México, ubicada a unos 370 km de la región epicentral, las autoridades gubernamentales reportaron daños leves y moderados en 21 edificios. Las intensidades sísmicas generadas por el evento no superaron las intensidades de diseño indicadas en las disposiciones sísmicas asociadas al estado límite de servicio vigentes hasta 2023. Esto último implica que se espera que las estructuras diseñadas con este criterio alcancen un nivel de ocupación inmediato después de un sismo que genere intensidades sísmicas moderadas, lo que puede ocurrir varias veces durante la vida útil de la estructura; el evento de Coalcomán fue una buena prueba para este estado límite.

2.9. Referencias

- Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes, *Journal of Seismology*, 14(4), 769-785.
- Atwater, T., & Stock, J. (1998). Pacific–North America plate tectonics of the Neogene south western United States: an update. *International Geology Review*, 40(5), 375–402.
- Bielak, J., Graves, R.W., Olsen, K. B., Taborda, R., Ramirez-Guzman, L., Day, S. M., Ely, G.P., Roten, D., Jordan, T. H., Maechling, P. J., Urbanic, J., Cui, Y., & Juve, G. (2010). The ShakeOut earthquake scenario: Verification of three simulation sets, *Geophysical Journal International*, 180(1), 375-404.
- CNPC (2022a). Informe de Coordinación Nacional de Protección Civil. Gabinete de Seguridad.
- CNPC (2022b). Coordinación Nacional de Protección Civil
https://twitter.com/CNPC_MX/status/1571940576123322370
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>
- GCM (2022). Gobierno de la Ciudad de Mexico, Síntesis informática Jefa de Gobierno, 20 de septiembre de 2022. URL: <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Sintesis%20Informativa/SEPTIEMBRE%202022/200922/JEFA%20DE%20GOBIERNO%20200922.pdf>

- Jaimes, M. A., Reinoso, E., & Ordaz, M. (2006). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(06), 887-902.
- Ramirez-Guzman, L., & Juarez-Zuñiga, A. (2016). Adjoint-wavefield tomography of Southcentral Mexico, *Geological Society of America Annual Meeting*, Denver, CO.
- LeVeque, R. J., George, D. L., & Berger, M. J. (2011). Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods, *Acta Numerica*, 20, 211-289.
- Mendoza, C., & Martinez-Lopez, M. R. (2022). Rapid finite-fault analysis of large Mexico earthquakes using teleseismic P waves, *Journal of Seismology*, 26(2), 333-342.EM
- National Oceanic and Atmospheric Administration; National Weather Service (NOAA). (2022). U.S. Tsunami Warning System. Recuperado el 13 de octubre de 2022, a partir de <https://www.tsunami.gov>
- Ovando-Shelley, E. y Romo, M. P. (2000). Behavior of the main wharf in San Pedrito Port in Manzanillo, Mexico. En *12th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–8). Auckland, New Zeland.
- NTCS-2017 (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.
- NTCS-2020 (2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.
- Ordaz, M., & Krishna Singh, S. (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City, *Bulletin of the Seismological Society of America* **82**, 24-43
- Ordaz, M., Reinoso, E., Jaimes, M. A., Alcántara, L., & Pérez, C. (2017). High-resolution early earthquake damage assessment system for Mexico City based on a single-station, *Geofísica internacional*, 56(1), 117-135.
- Parker, G. A., Stewart, J. P., Boore, D. M., Atkinson, G. M., & Hassani, B. (2022). NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors, *Earthquake Spectra*, **38**(1), 456-493.
- RCCDMX (2020). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 15 de diciembre.
- Reyes, C. (1999). El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Secretaría de Marina; Centro de Alerta de Tsunami (SEMAR-CAT). (2022). Centro de Alerta de Tsunamis. Recuperado el 13 de octubre de 2022, a partir de <https://digaohm.semar.gob.mx/cat/centroAlertasTsunamis.html>
- Singh, S. K., Iglesias, A., Arroyo, D., Pérez-Campos, X., Ordaz, M., Mendoza, C., Corona-Fernández R. D., Rivera, L., Espíndola, V. H., González-Ávila, D., & Martínez-López, R (2023). A Seismological Study of the Michoacán-Colima, Mexico, Earthquake of 19 September 2022 (Mw7. 6). *Geofísica internacional*, 62(2), pp.445-465.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Pérez-Campos, X., & Iglesias, A. (2015). Intraslab versus interplate earthquakes as recorded in Mexico City: Implications for seismic hazard, *Earthquake Spectra*, 31(2), 795-812.
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.
- SMN (2022) Servicio Mareográfico Nacional. <https://twitter.com/smareograficon?lang=en>
- SSN (2022) Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional (2021), Catálogo de sismos. UNAM, IGEF, SSN. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

- Tu, T., Yu, H., Ramirez-Guzman, L., Bielak, J., Ghattas, O., Ma, K. L., & O'hallaron, D. R. (2006, November). From mesh generation to scientific visualization: An end-to-end approach to parallel supercomputing, In SC'06: Proceedings of the 2006 ACM/IEEE conference on Supercomputing (pp. 12-12). IEEE.
- UIS (2022). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Reportes Especiales, Sismos del 19 de septiembre de 2022, Sur de Coalcomán, Michoacán, México http://www.uis.unam.mx/PDF/UIS-IIUNAM_rep_prelim_20220919_130509_MICH M7.7.pdf.
- USGS (2022) United States Geological Survey <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000i9bw/executive>
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913

3. Aspectos geotécnicos del reconocimiento directo de daños

Dr. Manuel Jesús Mendoza López
IIUNAM
mjm@pumas.ii.unam.mx

Dr. Miguel Ángel Mánica Malcom
IIUNAM
mmanicam@iingen.unam.mx

Dr. Eduardo Botero Jaramillo
IIUNAM
eboteroj@iingen.unam.mx

Dr. Leonardo Alcántara Nolasco
IIUNAM
lalcantaran@iingen.unam.mx

Mtro. Salvador Antonio Mendoza Morales
IIUNAM
smendozam@iingen.unam.mx

3.1. Introducción

El sismo de Coalcomán, Michoacán, provocó daños principalmente en los estados de Colima y Michoacán, con estimaciones iniciales de alrededor de 6,220 edificaciones afectadas (Milenio, 2022). La mayoría de los daños se identificaron en mampostería ordinaria, recubrimientos y elementos no estructurales.

En cuanto a los aspectos geotécnicos, dadas las experiencias de los sismos de Manzanillo de 1995 (M_w 8.0) y Tecomán de 2003 (M_e 7.6, M_w 7.5), se esperaban afectaciones en algunas cimentaciones, la posible ocurrencia del fenómeno de licuación en poblaciones cercanas a la costa, deslizamientos y caídos en taludes carreteros y ferroviarios y afectaciones a la red de infraestructura pública. Los daños asociados a aspectos geotécnicos en la ciudad de Manzanillo fueron limitados, apreciándose en sitios como el Polideportivo de la Preparatoria Campus San Pedrito, de la Universidad de Colima, o el puente del Boulevard Miguel de la Madrid, en donde se observaron asentamientos relacionados con el fenómeno de licuación. Asimismo, se distinguieron indicios de licuación en la Universidad de Colima, sede Tecomán. Sin embargo, la mayor densidad de daños relacionados con aspectos geotécnicos se identificó en poblados de Michoacán, cercanos a la costa, como El Ticuiz y Boca de Apiza, donde se observaron levantamientos de pisos, agrietamiento del suelo, asentamientos totales y diferenciales de viviendas y emersiones de pozos y fosas sépticas. Algunas de estas afectaciones se relacionan con la licuación, aunque algunas otras pudieron estar asociadas no precisamente a este fenómeno, sino a una elevación regional del nivel freático. Adicionalmente, se inspeccionaron varios puentes y zonas afectadas en las carreteras circundantes, en donde se identificaron grietas en el pavimento, asentamientos y desplazamientos de los estribos de algunos puentes, caídos y deslizamientos en taludes, entre otros.

Algunas de estas afectaciones habían tenido difusión en los medios de comunicación, en especial las que ocurrieron en ciudades o poblados con un número importante de habitantes, pero las afectaciones acaecidas en poblaciones de menor tamaño y alejadas de los centros urbanos eran poco conocidas, pero no menos importantes. Por lo cual, la labor de reconocimiento comprendió, no solo la ciudad de Manzanillo, sino las ciudades y localidades de Tecomán, Coquimatlán y Pueblo Juárez en el Estado de Colima; así como Coahuayana, San Vicente, Boca de Apiza y El Ticuiz en Michoacán.

Se identificó la ocurrencia de licuación en varios de los poblados visitados, aunque en magnitud y frecuencia mucho menores a los sismos de Manzanillo de 1995 y de Tecomán de 2003. Sin embargo, también se demuestra que la licuación no es la explicación más probable en algunos de los casos, en donde una elevación temporal del nivel de aguas freáticas (NAF), ocasionada por el incremento del nivel del mar como consecuencia del sismo, puede proporcionar una hipótesis más congruente con las observaciones de campo y, particularmente, con los testimonios de los pobladores afectados. Adicional a los aspectos geotécnicos, el Grupo de Geotecnia (GdeG) participó de igual forma en labores generales de reconocimiento ingenieril de los daños, principalmente en los centros de población rurales visitados.

En este capítulo se describen y discuten los daños ocurridos como consecuencia del sismo del 19 de septiembre de 2022, identificados durante el reconocimiento realizado por el GdeG del IIUNAM. En la sección 3.2, se identifican y se describen los daños distinguidos en los sitios visitados asociados a

aspectos geotécnicos. En la sección 3.3, se discute, desde un punto de vista geomecánico, los mecanismos inducidos por el sismo que dieron lugar a los daños sucedidos. Finalmente, en la sección 3.4, se presentan algunos comentarios y reflexiones generales de las observaciones realizadas durante la visita. En el Anexo A, se presentan caídos y deslizamientos en vías de comunicación que no fueron identificados durante la visita técnica. Por último, algunos de los daños relacionados con aspectos estructurales, identificados por el GdeG, se presentan en el Anexo B.

3.2. Descripción de daños

En esta sección se presenta una descripción de los daños observados durante el viaje de reconocimiento del GdeG del IIUNAM a sitios cercanos a la zona epicentral. La ubicación de las tres zonas visitadas se indica en la Figura 3.1: a) zona de Manzanillo Colima, b) zona de Tecomán, Pueblo Juárez y Coquimatlán en Colima y c) zona de Coahuayana, el Ticuz y San Telmo en Michoacán. Asimismo, en la Tabla 3.1 describe a detalle cada una de los sitios visitados de cada zona. Si bien el énfasis fue la identificación de daños asociados a cuestiones geotécnicas, también se realizó el reconocimiento de daños de naturaleza estructural en edificaciones y obras de infraestructura; estos se presentan en el Anexo B. Es importante mencionar que, debido a la falta de seguridad ciudadana que persiste en la región, se consideró prudente no adentrarse más a la zona epicentral.

Tabla 3.1 Descripción de las zonas y cada uno de los sitios visitados

ID	Sitio	Uso	Municipio	Estado	Latitud	Longitud
01	Bachillerato 8, 9, 10 y Escuela Técnica de Enfermería de la UDC	Educación	Manzanillo	Colima	19.054578	-104.304410
02	Polideportivo Universitario de la UDC	Educación	Manzanillo	Colima	19.054154	-104.303429
03	Museo Universitario de la UDC	Educación	Manzanillo	Colima	19.054700	-104.303444
04	Mirador DEL Valle de las Garzas	Turismo	Manzanillo	Colima	19.086173	-104.303713
05	Infraestructura Portuaria (Terminal de Contenedores)	Puerto	Manzanillo	Colima	19.070477	-104.289978
06	Universidad de Colima, Campus Tecoman	Educación	Tecomán	Colima	18.949300	-103.898188
07	Puente Carretera Coquimatlán–Pueblo Juárez	Puente	Pueblo Juárez	Colima	19.164544	-103.902606
08	Carretera Coquimatlán – Jala	Carretera	Coquimatlán	Colima	19.188717	-103.819922
09	Caídos Sobre vía férrea Manzanillo-Colima	Carretera	Coquimatlán	Colima	19.173944	-103.829333
10	Puente Coahuayana	Puente	Coahuayana	Michoacán	18.717500	-103.716111
11	Carretera a El Ticuiz	Carretera	Coahuayana	Michoacán	18.669958	-103.681797
12	N1: Levantamiento y fracturamiento de pisos	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.664858	-103.684900
13	N2: Levantamiento y fracturamiento de pisos	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.664641	-103.684577
14	N3: Asentamientos de Viviendas	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.664354	-103.684425
15	N4: Asentamientos de Viviendas	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.664177	-103.684269
16	N5: Asentamientos de Viviendas	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.664072	-103.684182
17	N6: Emersión de fosa séptica	Vivienda	El Ticuiz	Michoacán	18.663911	-103.684682
18	N7: Inclinação de postes	Infraestructura eléctrica	El Ticuiz	Michoacán	18.663716	-103.684770
19	Escuela Primaria 5 de febrero	Educación	Coahuayana	Michoacán	18.685593	-103.735053
20	Tanque Elevado de Agua	Infraestructura de agua potable	Coahuayana	Michoacán	18.687982	-103.733700
21	Licucación en la Playa de Mezcala	Turismo	San Telmo	Michoacán	18.626832	-103.685290

La sección está organizada de forma geográfica, haciendo referencia a las ciudades y localidades visitadas durante el reconocimiento. Se describen los daños identificados en las ciudades de Manzanillo y Tecomán, y en la localidad de Coquimatlán y alrededores, todas en el estado de Colima. Sin embargo, la mayor concentración de daños asociados a aspectos geotécnicos se identificó en localidades cercanas a la costa, pertenecientes al municipio de Coahuayana, Michoacán.

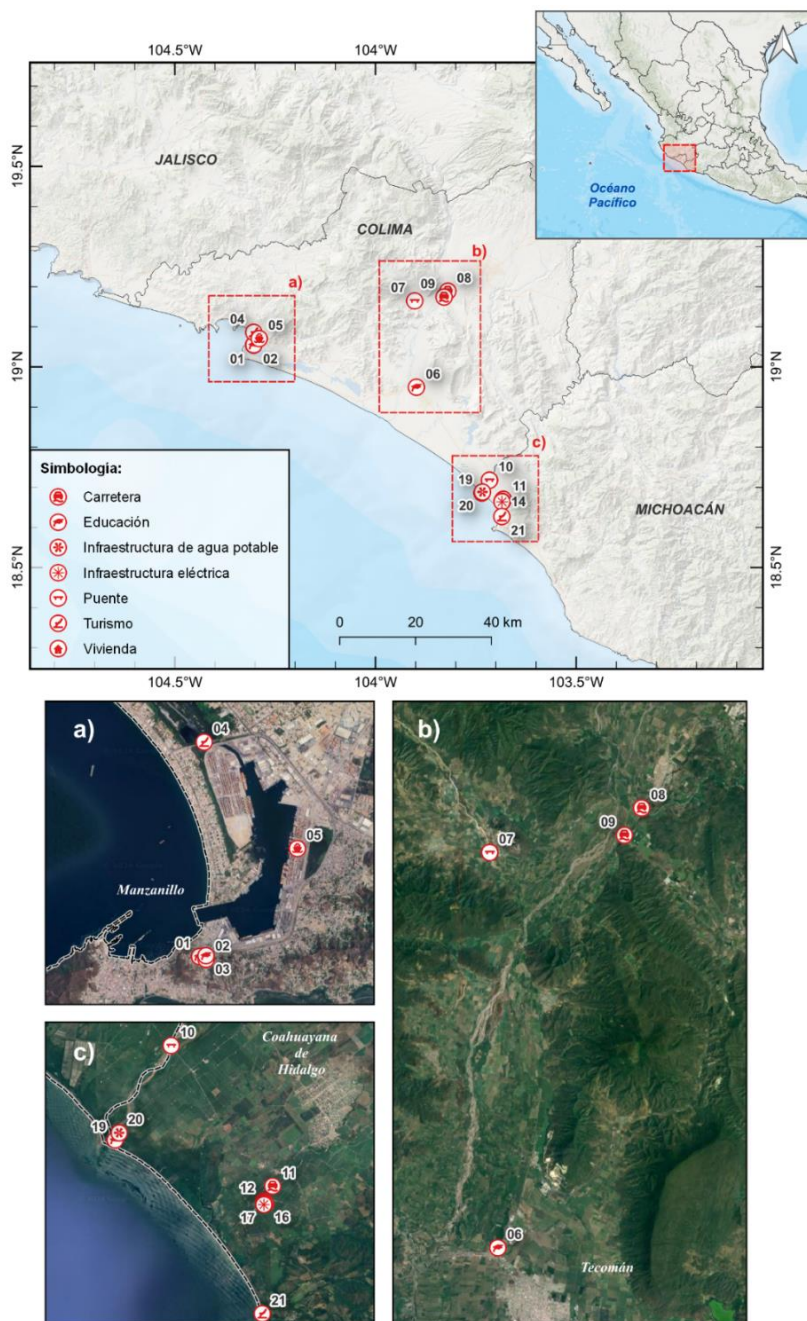


Figura 3.1 Ubicación de las zonas y sitios visitados tras el sismo del 22 de septiembre de 2022 por el GdeG: a) zona de Manzanillo, Colima, b) zona de Tecomán, Pueblo Juárez y Coquimatlán en Colima y c) zona de Coahuayana, el Ticuz y San Telmo en Michoacán

3.2.1. Manzanillo, Colima

3.2.1.1. Bachillerato 8, 9 y 10 de la Universidad de Colima, Campus San Pedrito

El predio donde están construidas estas instalaciones escolares se encuentra en el barrio de San Pedrito El Bajo, a unos 300 m de la línea de costa de la Bahía de Manzanillo, entre la Terminal Marítima y Cruceros y el canal de acceso a la Laguna San Pedrito (Figura 3.1a sitio 01).

Los edificios escolares, de una sola planta, están estructurados con perfiles de acero y paneles de relleno contruados con un mortero de cemento pobremente reforzado. Los daños observados fueron principalmente en el Edificio G, en su dirección longitudinal, tanto en el muro ciego sin ventanas, ubicado en la parte delantera de cada salón, como en el lado opuesto que ocupa la puerta. En la porción superior de las columnas de acero se apreciaron deformaciones laterales permanentes, como se distingue en las imágenes de la Figura 3.2, determinando con ello el fracturamiento de los paneles en su porción superior.



Figura 3.2 Deformación lateral de la porción superior de una columna y fracturamiento del panel aledaño

Los muros y su refuerzo en la junta superior con las columnas de acero (Figura 3.3) no ofrecieron rigidez suficiente, generándose deformaciones máximas permanentes del orden de 2.5 cm, provocando el colapso sistemático de los muros cortos contruados en esa dirección longitudinal. Las máximas deformaciones del edificio ocurrieron en su dirección longitudinal, a pesar de las varias crujías en esa dirección, pero jugando entonces un papel determinante el hecho de que solo se tiene medio muro en ambos lados de cada salón, por la presencia de las ventanas. A pesar de solo contar con una crujía en la dirección transversal del edificio, los muros continuos y sin aberturas entre columnas en esa dirección proporcionaron una rigidez eficiente al desplazamiento lateral.



Figura 3.3 Fracturamiento sistemático de muros en la dirección longitudinal del edificio G

La inspección ocular permitió establecer que la cimentación de estas estructuras no tuvo efecto relevante alguno en estos daños. No se apreciaron a nivel de piso fisuras o grietas alrededor de sus cimientos someros que llevaran a pensar en movimientos significativos de estos con el terreno que los sustenta. No se cuenta con información geotécnica que permita conocer la estratigrafía del lugar. Superficialmente no se apreciaron signos o evidencias claras de licuación en el campus; tampoco fuimos informados de que tal fenómeno haya ocurrido con el sismo; al respecto, cabe señalar que este no les es extraño a los habitantes de la región, toda vez que dicho fenómeno ha ocurrido ahí en sismos previos.

3.2.1.2. Polideportivo Universitario

Se revisó el Polideportivo Universitario del plantel cuya ubicación se muestra en la Figura 3.1a sitio 02. Es un espacio amplio de unos 40m x 60m, cuya porción Este está destinada a la práctica de basketbol y voleibol, en donde cuenta con gradas en tres de sus lados. La porción Oeste está habilitada para gimnasio, danza o actividades similares. Cada una de estas áreas (Figura 3.4) cuenta con techumbres a base de pórticos, con secciones de vigas metálicas I de peralte variable y armaduras que soportan láminas plásticas.

La cancha de basketbol, que superficialmente está resuelta con una membrana plástica gruesa, continua e impermeable, no acusa daño alguno, aunque sí exhibe en su totalidad un asentamiento generalizado de entre 3 y 6 cm, con una traza de agrietamiento que se identifica en la Figura 3.5. Se distingue con claridad que esta área asentada corresponde a la zona de cancha en toda su extensión (Figura 3.6), incluyendo la primera fila de asientos usada por los jugadores. Esta zona se agrietó y asentó lo antes señalado, con un diferencial que determinó un asentamiento en el lado de gradas Sur, mayor que en las del Norte (Figura 3.7). Se conoció que se recurrió a una cimentación piloteada para desplantar la porción de gradas y las columnas que soportan la techumbre del Polideportivo.



Figura 3.4 Interior del Polideportivo (visto de Este a Oeste)

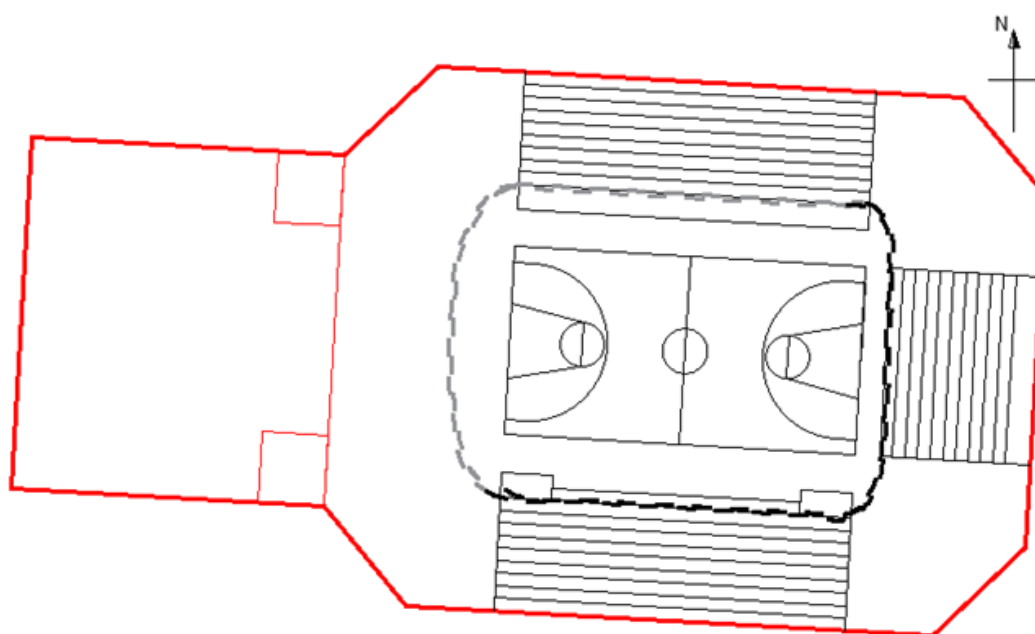


Figura 3.5 Área asentada dentro del Polideportivo provocada por el sismo



Figura 3.6 Agrietamiento de cancha y primera fila de grada Sur en extremo Oeste



Figura 3.7 Asentamiento en la primera fila de las gradas Sur

3.2.1.3. Museo Universitario de Arqueología de Manzanillo

Al norte del Polideportivo, dentro del campus universitario, Figura 3.1a sitio 03, se encuentran construcciones con una forma triangular en planta que correspondían, atendiendo a un letrero en su fachada, a lo que fue el Museo Universitario de Arqueología de Manzanillo. Actualmente, estas estructuras se encuentran abandonadas y en ruinas. En la planta baja, por alguna circunstancia que suponemos estuvo asociada al comportamiento del suelo de apoyo o al de una losa o firme de la base, decidieron construir losas con nervaduras y casetones sobre los contratraves, como se aprecia en la Figura 3.8; para ello nótese que incluso generaron ranuras en las paredes de concreto. La obra y la estructura se encuentran abandonadas, distinguiéndose que solo colaron una parte del concreto y el acero restante simplemente quedó al descubierto, encontrándose ahora muy oxidado. No se apreciaron daños estructurales a esta obra por el sismo en comento.



Figura 3.8 Losa con nervaduras en planta baja de museo en el Campus San Pedrito

3.2.1.4. *Mirador del Valle de las Garzas*

A un costado del Boulevard Miguel de la Madrid, a la altura del Mirador del Valle de las Garzas, Figura 3.1a sitio 04, se identificaron daños en una pequeña subestación de transformación. Particularmente, se observó el agrietamiento del muro perimetral, en la zona de salida de las líneas de conducción, como se observa en la Figura 3.9. El agrietamiento fue consecuencia del asentamiento diferencial del terreno, el cual se concentró debajo de la estructura que soporta a los tubos que alojan las líneas de conducción. Debido a la rigidez de la losa, esta no fue capaz de seguir la deformación del muro, ocasionando la grieta que se identifica en la figura, la cual sugiere un asentamiento máximo de alrededor de 15 cm.



Figura 3.9 Agrietamiento debido al asentamiento diferencial del terreno en una subestación de transformación

Es importante mencionar que la subestación se encuentra a unos 20 m de la margen del canal de navegación interior del Puerto de Manzanillo, la cual está contenida por un tablestacado metálico, y el terreno corresponde a material de relleno. En esta área se identificaron deformaciones del terreno significativas, como consecuencia del fenómeno de licuación, durante los sismos de Manzanillo de 1995 y de Tecomán de 2003, siendo los daños notablemente más severos durante el sismo de 1995 (Wartman *et al.*, 2005). Sin embargo, en esta ocasión solo se identificaron los daños descritos en el párrafo anterior, que también pueden relacionarse con el fenómeno de licuación.

3.2.1.5. *Infraestructura Portuaria*

No se tuvo acceso a las instalaciones portuarias en Manzanillo, ubicadas en la Figura 3.1a sitio 05, por lo que no es posible señalar el grado de ocurrencia de licuación, si es que la hubo. Las actividades en la Terminal Especializada en Contenedores parecían tener un curso de normalidad, a juzgar por lo apreciado desde el exterior de las instalaciones (Figura 3.10). Con grúas trabajando y movimientos de tráileres y trenes de carga con contenedores, se pudo constatar que, a 15 días de ocurrido el sismo, la terminal se encontraba en operación normal. No obstante, se tuvo conocimiento, por parte de terceros, de que en sitios particulares hubo manifestaciones de licuación, como el ubicado en la vecindad del canal de acceso a la zona portuaria de San Pedrito. Si bien no se conoció en este viaje de reconocimiento de información acerca de eventuales daños en la zona portuaria, debe tenerse presente la ocurrencia de licuación en sismos previos de magnitud comparable con el sismo en comento. El sismo ocurrido el 9 de octubre de 1995, provocó asentamientos severos, agrietamientos y fallas estructurales en pilotes de muelles, en la zona de la Terminal de Contenedores y otras instalaciones alrededor de la Laguna de San Pedrito (Figura 3.11).

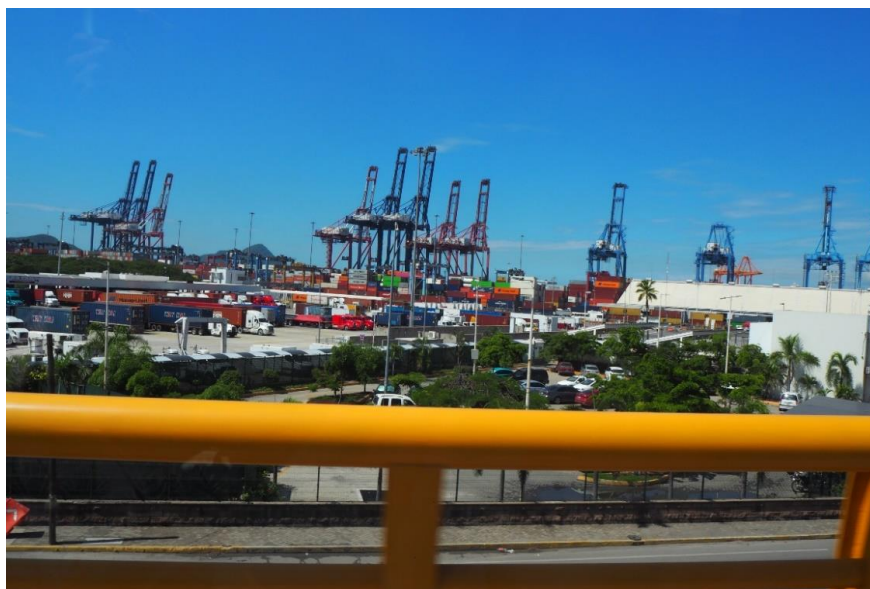


Figura 3.10 Terminal de contenedores en San Pedrito, Manzanillo

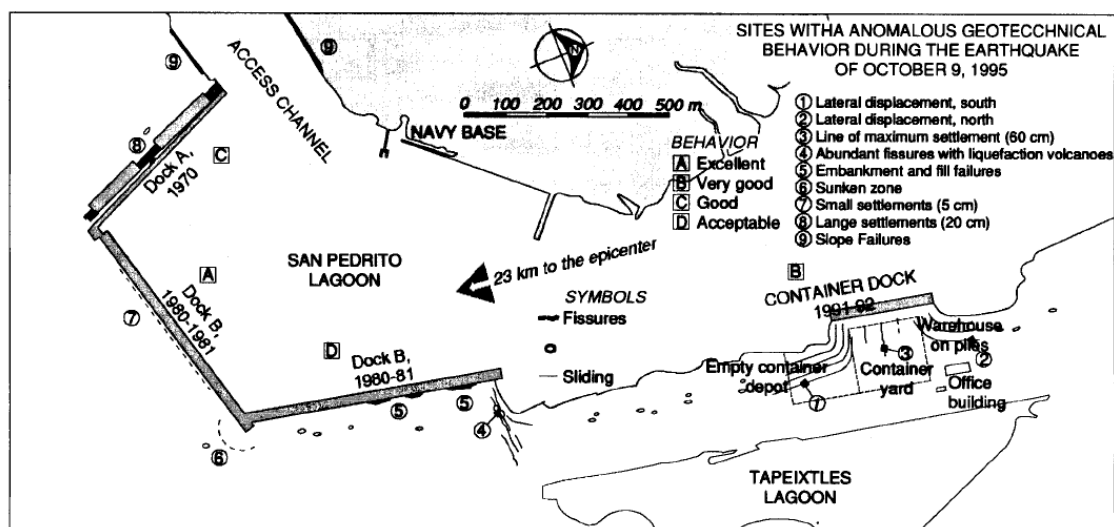


Figura 3.11 Daños a la infraestructura portuaria de Manzanillo, debidos al sismo del 9 de octubre de 1995 (Ovando-Shelley y Romo, 2000)

En la zona se tienen rellenos arenosos producto de dragado de por lo menos 10 m de espesor, los que, a juzgar por los efectos que ese sismo produjo, probablemente debió tener algunas porciones con depósitos sueltos. Tal sismo fue de magnitud, basada en ondas de superficie y en momento sísmico, de $M_s 7.3$ y $M_w 8.0$, respectivamente, ubicándose su epicentro a 23 km al sur de estas instalaciones portuarias. Por otro lado, a pesar de que el sismo del 19 de septiembre de 2022 tuvo una magnitud significativa ($M_w 7.7$), su epicentro se localizó aproximadamente a 145 km de la zona portuaria. Por lo tanto, las diferentes distancias epicentrales, y consecuentemente las diferentes intensidades parecen justificar las posibles diferencias respecto al comportamiento de la zona portuaria para estos dos eventos sísmicos.

3.2.2. Tecomán, Colima

3.2.2.1. Universidad de Colima, Campus Tecomán (Laboratorio Multidisciplinario)

En la ciudad de Tecomán, el GdeG del IIUNAM visitó la Universidad de Colima, Campus Tecomán, Figura 3.1a sitio 06. Se identificaron afectaciones en su laboratorio multidisciplinario, que es un edificio de un nivel destinado a albergar laboratorios de diferentes disciplinas. Este sufrió daños diversos asociados a su mobiliario y contenidos, así como en sus instalaciones de aire acondicionado, equipo de cómputo e iluminación (Figura 3.12). Se distinguieron también daños en muros internos de relleno y divisorios (Figura 3.13), principalmente en sus juntas con elementos estructurales. Estos últimos tuvieron, en general, un desempeño adecuado no distinguiéndose daños significativos en ellos.



Figura 3.12 Daños en instalaciones al interior del laboratorio



Figura 3.13 Daños en muros no estructurales al interior del laboratorio

En los alrededores del edificio, se identificó una cantidad considerable de pequeños “volcanes” (Figura 3.14) evidencia de una licuación ligera, dado que estos son muy pequeños y con arrastre mínimo de suelo arenoso (Figura 3.15). Adicionalmente, dio la impresión de que la generación de los pequeños volcanes ocurrió con material muy cercano a la superficie, el cual está constituido por una arena de grano medio a grueso (Figura 3.16).

Durante el sismo, este sitio sufrió sacudidas muy intensas, que provocaron los daños al interior del inmueble ya descritos. Adicionalmente, se identificó que el suelo circundante sufrió un asentamiento de aproximadamente 5 cm en el lado Oeste del edificio, como puede apreciarse en la Figura 3.17. Estos movimientos provocaron también agrietamientos y asentamientos en algunos muros estructurales de concreto, como se aprecia en la Figura 3.18.



Figura 3.14 Generación de múltiples pequeños volcanes alrededor del laboratorio



Figura 3.15 Pequeños volcanes generados alrededor del edificio de laboratorios



Figura 3.16 Arena con granos de tamaño medio a grueso, que constituye el suelo licuado



Figura 3.17 Asentamiento del terreno alrededor de algunas columnas del edificio



Figura 3.18 Asentamiento y agrietamiento en muro estructural del lado oeste del edificio

3.2.3. *Coquimatlán-Colima*

3.2.3.1. *Carretera Coquimatlán – Pueblo Juárez*

En el puente localizado en la carretera Coquimatlán - Pueblo Juárez, Figura 3.1a sitio 07, se presentó un desplazamiento considerable en el sentido del eje de la vía, entre los dos cuerpos del puente (Figura 3.19). Es posible que la magnitud de la abertura observada de esta junta no se haya presentado únicamente por la acción de este evento sísmico, sino que sea el producto de la acción acumulada de los sismos que han afectado a la zona; esto se evidencia por la presencia de vegetación en la junta. Adicionalmente, se revisaron los apoyos de las trabes del puente y se pudo observar que esta separación no compromete su seguridad (Figura 3.20).



Figura 3.19 Separación en la junta entre dos cuerpos del puente



Figura 3.20 Apoyo de las traves que sufrieron el desplazamiento longitudinal

3.2.3.2. Carretera Coquimatlán – Jala

En un sitio en la carretera Coquimatlán-Jala, Figura 3.1a sitio 08, se identificó una falla en el cuerpo de la carretera inducida por el sismo. Sin embargo, las condiciones precarias de estabilidad en las que se encontraba la carretera eran producto del proceso de erosión inducido por la corriente que pasa a un costado del camino (Figura 3.21). Por lo tanto, el sismo simplemente detonó esta falla, que hubiese ocurrido de cualquier forma por la continua erosión al pie del talud de la carretera.



Figura 3.21 Daños en la carretera Coquimatlán – Jala

3.2.3.3. Caídos Sobre la vía férrea Manzanillo-Colima

Sobre la vía del ferrocarril que une Colima y Manzanillo, en el tramo entre los poblados de Coquimatlán y Jala, Figura 3.1a sitio 09, ocurrieron algunos caídos en un talud de roca al costado de la vía. Cuando asistimos al sitio ya habían terminado de retirar los bloques rocosos caídos. Sin embargo, se muestra la imagen que se presenta en la Figura 3.22, cortesía del Ing. Leobardo Domínguez del CENAPRED. Se observa un volumen considerable de material rocoso que deslizó y cayó del talud, dejando inhabilitada la vía hasta su remoción y la reparación de los daños.



Figura 3.22 Caídos sobre una vía férrea. Fuente: cortesía Ing. Leobardo Domínguez

Debido a que el recorrido del IIUNAM ocurrió dos semanas después del evento sísmico, gran parte de los escombros producto de caídos y deslizamientos de taludes en vías de comunicación ya habían sido retirados por las autoridades correspondientes. Del mismo modo, muchos de los agrietamientos en carreteras, producidos como consecuencia del sismo, ya habían sido reparados. Este tipo de daños fueron numerosos, y fueron reportados en varias notas periodísticas y por usuarios a través de redes sociales. En el **Anexo A** se presenta una recopilación de algunos de esos reportes, que no fueron identificados durante el recorrido del IIUNAM, los cuales se incluyen para su consulta.

3.2.4. Coahuayana, Michoacán

La visita a diversas localidades del municipio de Coahuayana, en el estado de Michoacán, fue particularmente relevante ya que en estos sitios se observó la mayor concentración de daños asociados a aspectos geotécnicos, los cuales se describen a continuación.

3.2.4.1. Puente Coahuayana

El río Coahuayana constituye la frontera entre los estados de Colima y Michoacán; es una corriente caudalosa con una anchura de hasta 150 m a la altura del Puente Coahuayana, de la Carretera Costera del Pacífico, Figura 3.1a sitio 10. Sus terraplenes de acceso sufrieron desplazamientos laterales (sin causar la falla de sus taludes) que provocaron un profuso agrietamiento predominantemente en el sentido longitudinal del camino, apreciándose aberturas en la carpeta asfáltica de 20 a 30 cm, Figura 3.23. A poco del sismo, los responsables del mantenimiento rellenaron con arena esas grietas y re encarpetaron con mortero asfáltico, como se aprecia en la Figura 3.24. Adicionalmente, se presentó un desplazamiento en dirección longitudinal, el cual se aprecia en el barandal del puente, en la sección de acople entre tubos que no está pintada y que tiene una longitud aproximada de 5 a 7 cm, Figura 3.25.



Figura 3.23 Profuso agrietamiento en terraplenes de acceso al puente Coahuayana (Mi Morelia, 2022)



Figura 3.24 Terraplén de acceso al puente Coahuayana, ya reparado



Figura 3.25 Desplazamiento longitudinal del puente

3.2.4.2. Carretera a El Ticuiz

En los terraplenes de la cercanía al puente de acceso al pueblo de El Ticuiz, véase su ubicación en la Figura 3.1a sitio 11, se observa agrietamiento profuso en el pavimento, Figura 3.26. Se aprecia que estos agrietamientos van acompañados, o son consecuencia, principalmente del desplazamiento lateral que exhibieron esos terraplenes ante la acción sísmica, pero también con cierto componente de asentamiento. Adicionalmente, se distingue una falla del terraplén en sentido longitudinal, directamente en contacto y por debajo de uno de los estribos del puente; el estribo está piloteado con elementos circulares inclinados.



Figura 3.26 Grietas y asentamientos en el pavimento debidas al desplazamiento lateral

Pocos metros detrás del contacto estribo-terraplén, se aprecia un asentamiento en el pavimento, Figura 3.27, que es la manifestación de la falla contenida de ese terraplén. En efecto, pudo apreciarse desde el nivel del río la falla del talud debajo del estribo y contenida por la presencia de los tres pilotes frontales que soportan el estribo. En la Figura 3.28 se presenta un desplazamiento longitudinal del puente respecto al talud de acceso.



Figura 3.27 Falla incipiente del terraplén de acceso por debajo del estribo del puente El Ticuiz (dirección longitudinal del camino) que se manifiesta como un asentamiento del pavimento



Figura 3.28 Desplazamiento longitudinal entre el puente y el talud de acceso en el puente El Ticuiz

3.2.4.3. *El Ticuiz*

El Ticuiz se localiza al occidente del Estado de Michoacán, muy cerca (~6 km) de la colindancia con el Estado de Colima, delimitada por el río Coahuayana, y a 2 km de la costa. En términos geomorfológicos, se ubica en una llanura costera que se extiende en dirección noroeste hasta la ciudad de Tecomán, Colima,

Figura 3.1a sitio 11, en donde predominan materiales aluviales del cuaternario (INEGI, 1992). En estratos superficiales se identifica la presencia de arenas finas a medias. La localidad se encuentra a pocos metros sobre el nivel del mar, con el nivel de aguas freáticas (NAF) entre 1.5 y 3.0 m de profundidad.

El Ticuiz se ubica a 58 km del epicentro. Los pobladores describen al sismo como un evento muy violento, lo que se estima corresponde a una intensidad de entre VII y VIII según la Escala Modificada de Mercalli. En la Figura 3.1c sitios 12 a 21, se muestra una vista aérea del poblado, en donde se señalan los daños identificados más relevantes desde el punto de vista geotécnico; estos se describen más adelante. Sin embargo, es importante mencionar que un gran número de edificaciones presentaron un cierto nivel de daño estructural, y algunas de estas el colapso total. Algunos de estos daños, sin relación con aspectos geotécnicos, se presentan en el **Anexo B**.

3.2.4.4. Asentamientos de Viviendas

En la Figura 3.29 se muestra una vivienda en donde se identificó un marcado asentamiento diferencial hacia la esquina, provocando la separación del castillo y el muro; se exhiben las condiciones de la vivienda antes y después del sismo.



Figura 3.29 Vivienda con marcado asentamiento diferencial hacia la esquina a) antes del sismo y b) después del sismo. Fuente a): Google, 2024

Otro ejemplo de asentamientos diferenciales, siguiendo el alineamiento preferencial de los daños se presenta en la Figura 3.30, en donde también se aprecian las condiciones de la vivienda antes y después del sismo. El asentamiento, en dirección a la calle, generó el agrietamiento de la vivienda y, consecuentemente, una separación creciente de piso a techo entre el muro y el castillo—aspecto estructural muy recurrente al no ligar estos elementos adecuadamente. El agrietamiento continúa por el piso y la techumbre de la casa. En su interior distinguimos una escena impactante (ver Figura 3.31) pensando lo que pudo haber ocurrido si el sismo hubiese sucedido en horas de la noche.

En la Figura 3.32 se muestra una vivienda que sufrió un asentamiento generalizado de unos 10 cm, así como un desplazamiento lateral de aproximadamente 3 cm. Este movimiento generó grietas en la banqueta contigua y en el terreno circundante, con alineamiento paralelo a la fachada; estructuralmente la casa no sufrió daños. Se aprecia también una separación entre el muro de la vivienda y la banqueta. El habitante de la vivienda comentó que, durante el sismo, brotó agua a través de las grietas, y que esta era de color muy oscuro, indicativo de arena en suspensión.



Figura 3.30 Asentamiento diferencial en vivienda y consecuente agrietamiento. a) antes del sismo y b) después del sismo. *Fuente a): Google, 2014*



Figura 3.31 Volteo de muro en el interior de una habitación



Figura 3.32 Asentamiento generalizado en vivienda y agrietamiento de banqueta contigua

3.2.4.5. Levantamiento y fracturamiento de pisos

En numerosas viviendas del poblado se reportó el levantamiento y fracturamiento de pisos. Estos se construyen como un firme de concreto pobre sin refuerzo, y la mayoría de las veces de suelo-cemento. Por ejemplo, en la vivienda de la Figura 3.29 se identificó este tipo de daños, con aberturas de grietas hasta de 6 cm y evidente arrastre de arena del subsuelo, Figura 3.33a. Este comportamiento también se identificó en el patio de la vivienda, Figura 3.33b, indicativo del fenómeno de licuación.



Figura 3.33 a) Abultamiento y fracturamiento en el piso y b) agrietamiento del terreno con arrastre de arena a la superficie

Una manifestación interesante de los efectos de este sismo se muestra en la Figura 3.34, en donde es evidente el levantamiento del piso al centro de la habitación, de entre 15 y 20 cm con respecto a las paredes circundantes. Todas las habitaciones y pasillos de esta vivienda presentaban este comportamiento. En la Figura 3.34b, puede notarse la pérdida de arrastre bajo la puerta de un cuarto, lo que impedía abrirla totalmente. El abultamiento al centro es máximo y se ve reducido hacia los muros, debido al peso de estos.



Figura 3.34 a) Abultamiento y fracturamiento en el piso y b) vista a nivel del suelo

Una primera explicación que viene a la mente es el asentamiento de la cimentación que soporta a los muros de la vivienda. Si existe una cierta liga entre el firme y el muro, el asentamiento empujaría al firme contra el suelo y causaría el tipo de daño observado. Sin embargo, después de una cuidadosa inspección en el perímetro de la vivienda, no existían indicios de este asentamiento. Por lo tanto, el firme fue deformado y fracturado por un empuje actuando desde su cara inferior; en efecto, como se expondrá más adelante, la explicación más plausible es el ascenso del nivel del agua freática, lo que provocó una ligera sub-presión debajo del piso. Cabe señalar que este tipo de daño no ocurrió solo en el poblado de El Ticuiz, sino que también se identificó, por ejemplo, en el templo de la Figura 3.39, en Boca de Apiza, descrita en el subinciso 3.2.4.8.

3.2.4.6. Emersión de pozos y fosas sépticas

También se identificó la emersión de algunas estructuras semi-enterradas. Por ejemplo, al costado de la vivienda de la Figura 3.29, existe un pozo de agua cuyo brocal mostraba una emersión respecto al nivel de terreno de unos 5 cm. Otro ejemplo se muestra en la Figura 3.35, en donde se observa el fracturamiento del firme de concreto pobre y sin refuerzo en el patio de una vivienda como consecuencia de la emersión de una fosa séptica.



Figura 3.35 Emersión de fosa séptica que causó el fracturamiento del firme de concreto no reforzado, Figura 3.1a sitio 17

3.2.4.7. *Inclinación de postes para líneas de transmisión*

En el poblado El Ticuiz, se identificaron también algunos postes de concreto para líneas de transmisión inclinados, como el mostrado en la Figura 3.36. Estos no tienen propiamente una cimentación, y su estabilidad depende únicamente de un cierto ensanchamiento de la sección en la parte inferior del elemento que va enterrado en el terreno (CFE, 2019).

La inclinación de los postes acusa un movimiento con una intensidad considerable, así como una condición un tanto suelta del terreno. La inclinación de postes no solo se identificó en El Ticuiz, también se observaron, por ejemplo, varios postes inclinados a lo largo de la Carretera Costera del Pacífico, particularmente en terrenos bajos, Figura 3.37.



Figura 3.36 Postes de concreto para líneas de transmisión inclinados en El Ticuiz



Figura 3.37 Postes de concreto para líneas de transmisión inclinados. Vista desde el puente Coahuayana, en la Carretera Costera del Pacífico

3.2.4.8. Boca de Apiza

El poblado de Boca de Apiza, perteneciente al municipio de Coahuayana, se ubica francamente en la playa, a casi 8 km de Coahuayana y 6 km de distancia de El Ticuiz, Figura 3.1a sitio 19 y 20. En el poblado se identificaron daños importantes de naturaleza estructural, muchos de los cuales fueron el resultado de materiales precarios y/o procedimientos constructivos deficientes. Algunas de estas afectaciones se muestran en la Figura 3.38.



Figura 3.38 a) Tanque elevado volteado, b) estructura desplomada y bardas de una escuela derrumbadas, c) hacia la vía pública y d) hacia el interior de la escuela

Justo antes de entrar al poblado, se encontró un tanque elevado derrumbado, Figura 3.38a, el cual actuó como péndulo durante el movimiento y su base no fue capaz de soportar las cargas dinámicas. Ya dentro del poblado, lo primero que se observó fueron los escombros de una estructura que se desplomó, Figura 3.38b, probablemente una casa habitación de un nivel. También se identificó el colapso hacia la vía pública de una barda en una escuela, Figura 3.38c. Esta era bastante vieja y se podían observar algunas deficiencias en su estructura. Dentro de la escuela, se identificaron modificaciones en los elementos estructurales de un aula, quizá indicativas de daños en sismos anteriores. Dichas modificaciones hicieron a la estructura lo

suficientemente rígida que no presentó daños durante el evento sísmico. Al interior de la escuela, una de las bardas de colindancia también colapsó, Figura 3.38d.

Un templo también sufrió su destrucción total, Figura 3.39a. Quedó en pie una columna totalmente desplomada, constituida por tubos de albañal rellenos con un mortero de cemento y con un refuerzo de muy poca cuantía, ya muy corroído. Sin embargo, también pudo distinguirse que el piso de la iglesia, formado por un firme sin refuerzo y con acabado liso, sufrió fuerte agrietamiento, Figura 3.39b. Asimismo, este se mostraba abultado con un máximo en la zona central del rectángulo que constituía la planta de la pequeña iglesia. Este abultamiento del piso es similar al observado en varias viviendas del El Ticuiz, Figura 3.34.

Los hechos antes relatados apuntan como causante al ascenso del NAF, horas después de haber ocurrido el sismo, lo que parece estar ligado a los niveles del mar influenciados por el oleaje del tsunami; Apiza se ubica en la costa y El Ticuiz a unos cuantos kilómetros, ambos en una planicie muy baja.



Figura 3.39 a) Estructura de la iglesia colapsada y b) firme abultado y agrietado

3.2.4.9. Mezcala

La playa de Mezcala se localiza en el límite sur de la llanura costera de Tecomán, a unos 4 km de distancia de El Ticuiz y a unos 8.5 km de Boca de Apiza (en línea recta), Figura 3.1a sitio 21, cuyos daños se describieron en las secciones anteriores. Este sitio fue ampliamente mencionado en los medios de comunicación debido al vasto agrietamiento que se presentó en la playa, el cual se muestra en la Figura 3.40. Por su puesto, debido a la acción continua del mar y del viento, al momento del recorrido por parte de IIUNAM ya había desaparecido cualquier indicio del fenómeno. La fotografía mostrada fue tomada de un video publicado por un grupo de pescadores (Apiza Surf Fishing, 2022), a partir del cual se

confirma que las grietas aparecieron como consecuencia directa del evento sísmico. Este tipo de agrietamiento es una consecuencia típica del fenómeno de licuación, cuando este induce desplazamiento lateral en el sentido de la pendiente. Sin embargo, en este caso, las escarpas de las grietas apuntan a un movimiento del terreno en dirección contraria al mar y, por lo tanto, en dirección contraria a la pendiente, Figura 3.40. Aunque es evidente la ocurrencia del fenómeno de licuación, este parece haber inducido un asentamiento en una zona comprendida entre la línea costera y la vegetación posterior, Figura 3.40a, lo cual sería compatible con la dirección de las escarpas generadas.



Figura 3.40 Agrietamiento en la playa de Mezcala (Apiza Surf Fishing, 2022)

3.3. Interpretación de los Daños

3.3.1. *Licuación*

Algunos de los daños asociados con aspectos geotécnicos, descritos en la sección 3.2, pueden relacionarse con el fenómeno de licuación. Este está asociado a suelos sueltos saturados de baja plasticidad, y ocurre debido al incremento de la presión de poro que reduce el estado de esfuerzos

efectivo del suelo y, por lo tanto, reduce su rigidez y resistencia al corte. En el límite, cuando el esfuerzo medio efectivo ($p' = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}')/3$, donde $\boldsymbol{\sigma}'$ es el tensor de esfuerzos efectivos) tiende a cero, el suelo se comporta como un fluido. Sin embargo, la licuación parcial ($p' > 0$) también puede resultar en deformaciones permanentes considerables. Los incrementos de presión de poro ocurren debido a la tendencia del suelo a disminuir su volumen bajo carga desviadora. Si la carga ocurre lo suficientemente rápido, con respecto a la permeabilidad del material, se aproxima a una condición no drenada donde la tendencia del suelo a reducir su volumen, y la alta rigidez volumétrica del agua (~ 2.1 GPa), ocasionan los incrementos de presión mencionados. Por lo tanto, dependiendo del estado de compactación y permeabilidad del material, de las condiciones hidráulicas y de la intensidad del movimiento, la licuación del suelo puede ocurrir como consecuencia de un evento sísmico.

Como ya mencionó, en la región estudiada existen reportes en la literatura de numerosos daños asociados a la licuación por los sismos de Manzanillo de 1995 (Ovando et al., 1997) y de Tecmán de 2003 (CENAPRED 2003; Wartman et al., 2005). En este contexto, se presenta una descripción breve del fenómeno de licuación, desde un punto de vista geomecánico, con el fin de identificar los mecanismos que potencialmente pueden explicar algunos de los daños descritos en la sección 3.2.

En la Figura 3.41 se muestra a) la trayectoria de esfuerzos y b) la curva esfuerzo-deformación que puede experimentar un elemento de suelo sometido a carga cíclica no drenada, como la que puede inducir un movimiento sísmico. El comportamiento mostrado corresponde, particularmente, al fenómeno conocido como movilidad cíclica; un tipo de licuación en donde la resistencia residual (en el estado crítico) es mayor que los esfuerzos cortantes estáticos (ver Kramer, 1996). Por lo tanto, en este caso el material no exhibe una pérdida de resistencia súbita, como en el caso de la licuación de flujo (ver Mánica et al., 2022).

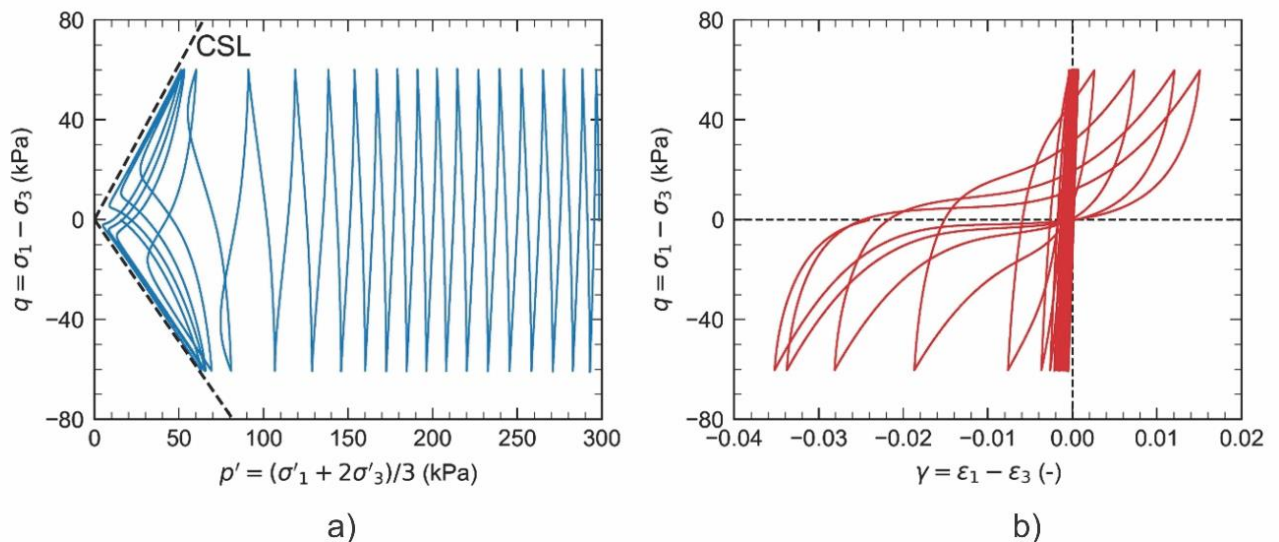


Figura 3.41 Comportamiento de Arena de Toyoura bajo carga cíclica no drenada. a) Trayectoria de esfuerzos y b) curva esfuerzo-deformación (modificado de Savidis *et al.* 2008)

En la Figura 3.41a se observa cómo el material acumula excesos de presión de poro en cada ciclo de carga, disminuyendo los esfuerzos efectivos y moviendo al estado de esfuerzos progresivamente hacia la izquierda. Cuando el material alcanza a la envolvente de resistencia (CSL en la Figura 3.41a), este exhibe un comportamiento dilatante (que en una condición no drenada se refiere a una reducción de la presión de poro y, por lo tanto, a un aumento en los esfuerzos efectivos) con endurecimiento (incremento de resistencia). Sin embargo, durante este proceso se acumulan deformaciones plásticas considerables, reduciendo significativamente la rigidez del material, como se identifica en la Figura 3.41b. Este comportamiento puede relacionarse con los hundimientos identificados en las Figuras 3.6, 3.7, 3.9, 3.17, 3.29, 3.30 y 3.32, ocurridos como consecuencia del sismo. En cimentaciones deficientes, en donde el esfuerzo desviador transmitido al terreno es alto, el estado de esfuerzos estará próximo a la envolvente de resistencia. Por lo tanto, la carga cíclica producida por un sismo puede acercar con relativa facilidad al material a la envolvente de resistencia, en donde la pérdida de rigidez y la acumulación de deformaciones plásticas pueden causar el asentamiento de la estructura.

En algunos casos, *e.g.* cuando existe un material con menor permeabilidad próximo a la superficie, los excesos de presión de poro generados a una cierta profundidad pueden liberarse de forma súbita, con arrastre de material, lo cual tiende a formar los distintivos volcanes de arena. Sin embargo, en los sitios visitados no se identificó consistentemente esta característica, con excepción de los pequeños volcanes alrededor del laboratorio de la Universidad de Colima, Figura 3.1a sitio 6. No obstante, a partir de testimonios de los pobladores, sí se identificó la formación de grietas y la expulsión de agua con material en suspensión a través de estas en el caso mostrado en la Figura 3.32, en la localidad de El Ticuiz. Esto confirma la ocurrencia de la licuación en estos sitios, y sugieren que esta es la responsable por los asentamientos identificados, a través del mecanismo descrito en el párrafo anterior.

El fracturamiento longitudinal observado en algunas carreteras, como en los terraplenes de acceso al puente de Coahuayana, Figura 3.12, también pueden relacionarse con el fenómeno de licuación. Aunque el proceso de conformación del terraplén (compactación en capas) resulta, usualmente, en materiales poco susceptibles a este fenómeno, el terreno natural subyacente sí puede ser vulnerable. El mecanismo es similar a lo descrito anteriormente, en donde la carga del terraplén contribuye a un estado de esfuerzos con un desviador relativamente alto. En este caso, el nivel freático se encuentra básicamente en la superficie del terreno natural (y ocasionalmente por encima de ella), debido a la colindancia con la margen del río. Adicionalmente, la presencia del terraplén contribuye a una condición no drenada durante el sismo y, por lo tanto, facilita la ocurrencia de la licuación. Como esta tiene lugar en el terreno natural, las cargas inerciales producidas por el terraplén tienden a generar desplazamientos laterales (*lateral spreading*) los cuales se manifiestan como grietas de tensión en la superficie (Harada *et al.*, 2022), tales como las observadas en las Figuras 3.12 a 3.16.

La licuación también podría relacionarse con la emersión de pozos, cisternas y fosas sépticas ocurrida en la localidad de El Ticuiz, como la mostrada en la Figura 3.35. En este caso, no es necesario que el estado de esfuerzos de un cierto elemento de suelo alcance a la envolvente de resistencia. El exceso de presión de poro inducido causa la reducción del esfuerzo normal efectivo en el contacto lateral entre la estructura y el suelo y, por lo tanto, reduce la resistencia friccionante en dicha interfaz. Al mismo tiempo,

el incremento en la presión del agua causa un aumento en el empuje hidrostático vertical. La combinación de ambos efectos puede causar la emersión de este tipo de estructuras como consecuencia de la licuación (Kang *et al.*, 2014).

La licuación también podría explicar el levantamiento y fracturamiento de pisos mostrado en la Figura 3.9. En este caso, la presión del agua en la cara inferior del firme lo empuja hacia arriba. Si la presión es tal que puede contrarrestar el peso del piso, esta causará su elevación y, consecuentemente, su fracturamiento. En la periferia, la presión tiene que contrarrestar también el peso de los muros, lo que resultaría en un levantamiento no uniforme, concentrado en el centro de las habitaciones, como el observado la Figura 3.34. Sin embargo, es importante mencionar que en varios de estos casos no se identificaron daños adicionales ni indicios de asentamiento de la vivienda. Por lo tanto, se considera improbable la ocurrencia de la licuación, con una magnitud tal que genere la presión necesaria en superficie para levantar el piso, sin que ocurran simultáneamente otras afectaciones en la estructura, como sí ocurrieron en los casos de las Figuras 3.29 y 3.32.

3.3.2. *Elevación regional del nivel freático*

Una evidencia significativa para explicar algunos de los daños ocurridos en la localidad de El Ticuiz, descritos en la sección 3.2.4.5, es el hecho de que algunas afectaciones, como el abultamiento de pisos mostrado en la Figura 3.34, no tuvieron lugar durante o en los minutos posteriores al evento sísmico. La mayoría de los pobladores se movilizó después del sismo tierra adentro debido a la alerta de tsunami, y volvieron a sus hogares la noche del sismo, después de la cancelación de la alerta, o incluso hasta el día siguiente por la mañana. Sin embargo, a partir del testimonio de pobladores que no abandonaron sus viviendas, se pudo establecer que el abultamiento del piso mencionado había ocurrido algunas horas después del evento—entre 3 y 4 horas. A pesar de que el tsunami de altura considerable no ocurrió, sí se identificó una elevación significativa del nivel del mar, con valores de hasta un metro en Manzanillo (ver inciso 2.7). Se cree que dicha elevación del nivel del mar pudo haber generado una elevación regional del NAF, causando algunas de las afectaciones identificadas. De hecho, esta elevación fue directamente identificada por uno de los habitantes en un aljibe horas después del sismo.

Aunque la elevación máxima del mar se registró una hora y 48 minutos después del evento, la variación del NAF en El Ticuiz resultaría de un proceso de flujo transitorio, controlado por la permeabilidad del subsuelo y por la interacción entre el agua salada y dulce. Por lo tanto, la respuesta del acuífero a la elevación del nivel del mar necesitaría de un cierto tiempo en manifestarse, tal como se estableció a partir de los testimonios de los pobladores. Este proceso resulta una hipótesis razonable para explicar los daños que ocurrieron en la localidad de El Ticuiz algunas horas después del sismo.

Al igual que para el fenómeno de licuación, el incremento del NAF causa un incremento de la presión de agua y, por lo tanto, una reducción de los esfuerzos efectivos. Consecuentemente, el estado de esfuerzos efectivos de un cierto elemento de suelo también se desplaza a la izquierda (ver Figura 3.41). Por lo tanto, los mecanismos descritos en la sección 3.2.1 siguen aplicando en este caso, ya que todos ellos son causados por el incremento de la presión de agua. Sin embargo, en el caso de la licuación estos

incrementos de presión son generados por la tendencia del suelo a reducir su volumen en una condición no drenada (o parcialmente drenada) que sucede, precisamente, durante la ocurrencia del sismo, mientras que en este caso el incremento de presión tiene lugar de forma gradual, en condiciones drenadas, a medida que tuvo lugar la elevación del NAF. Es claro que hay una gran diferencia en lo referente a la temporalidad de un fenómeno y el otro.

Daños asociados a fluctuaciones del NAF se han reportado antes en la literatura. Uno de los casos más notables es el del Municipio de Pereira Barreto, en Brasil, en donde la construcción y llenado de la presa Três Irmãos causó la elevación del NAF 20 metros en el poblado, ocasionando daños relacionados con asentamientos totales y diferenciales en más de 1,000 edificaciones (Vilar y Rodrigues, 2011). En este caso, la presencia de un suelo colapsable contribuyó a estos daños generalizados, al pasar de una condición parcialmente saturada a una saturada.

La posible elevación regional del NAF podría explicar los abultamientos del piso identificados en algunas viviendas (Figura 3.34) en donde no hubo evidencia contundente de la ocurrencia de licuación. En este caso, la reducción de los esfuerzos efectivos ocurre de forma drenada y, por lo tanto, debe ir acompañada de una cierta expansión elástica del material, que se manifiesta como deformación vertical ascendente del terreno. Sin embargo, no parece que esta expansión sea suficiente para causar el desplazamiento observado. Lo más probable es que el NAF haya subido ligeramente por encima de la superficie, generando una presión de agua en la cara inferior del firme suficiente para causar su abultamiento y agrietamiento. Tomando en cuenta que en este tipo de viviendas el firme se construye con materiales pobres (la mayoría de las veces con suelo cemento), la presión hidrostática necesaria para su fracturamiento es modesta. En este caso, el abultamiento observado (~15 cm) se justificaría cuantitativamente con una presión equivalente a un tirante de unos 10 a 15 cm. Esta estimación se obtuvo a partir de la solución teórica elástica de una placa circular libremente apoyada en su periferia (Young, 1989). La placa sería el piso y los apoyos serían los muros de la vivienda. La placa se supuso de 10 cm de espesor y constituida por un suelo-cemento con módulo elástico de 1,500 MPa y sometida a una subpresión uniforme debajo del piso, equivalente al tirante antes citado.

La elevación del NAF también podría asociarse a daños por asentamiento. A diferencia de la expansión descrita en el párrafo anterior, debido a un esfuerzo desviador inicial alto la reducción de esfuerzos efectivos causa que elementos de suelo alcancen su envolvente de resistencia y la acumulación de deformaciones plásticas. Sin embargo, en la mayoría de estos casos, como los reportados en las Figuras 3.29 y 3.32, existe suficiente evidencia para señalar a la licuación como el fenómeno responsable de los daños. Lo mismo puede decirse en el caso de los agrietamientos mostrados en la Figura 3.12, en donde se identifica con claridad un típico caso de desplazamiento lateral (lateral spreading) como consecuencia de la ocurrencia de la licuación.

Por otro lado, la emersión de estructuras enterradas, como en la Figura 3.35, se podría asociar con mayor facilidad a la elevación del NAF. La elevación del NAF causa un incremento del empuje hidrostático vertical y una disminución de la fricción lateral debido a la reducción de los esfuerzos efectivos. Sin embargo, a diferencia del fenómeno de la licuación, este incremento de la presión es generalizado y no está limitado a un cierto volumen de suelo.

En todos los casos, la forma más sencilla de discernir entre los daños relacionados directamente con la licuación y aquellos asociados con la elevación regional del NAF sería ubicar en el tiempo la ocurrencia de estos. Cabe señalar que hubo testimonios detallados de habitantes de El Ticuiz, que describen que el fracturamiento de pisos y la aparición de agua dentro de las viviendas, ocurrió horas después del sismo; sin embargo, debido a la movilización de la población por la alerta de tsunami, no fue posible establecer esa temporalidad en todos los casos con afectaciones. De cualquier forma, a partir de la información recabada en la visita, se puede postular, con un buen nivel de certidumbre, que ambos fenómenos tuvieron lugar en El Ticuiz y en algunos otros poblados aledaños.

3.4. Conclusiones

En el capítulo se describen y discuten los daños ocurridos como consecuencia del sismo del 19 de septiembre de 2022, identificados durante el reconocimiento realizado por el GdeG del IIUNAM. El informe se enfoca en las afectaciones relacionadas con aspectos geotécnicos. Sin embargo, también se describen algunos daños estructurales consecuencia de movimientos del terreno, así como otras afectaciones puramente estructurales identificadas durante los recorridos del GdeG. A diferencia de otros eventos previos (Manzanillo 1995 y Tecomán 2003) las afectaciones relacionadas con aspectos geotécnicos fueron muy limitadas en ciudades como Manzanillo y Tecomán. Sin embargo, sí se reportaron múltiples caídos y deslizamientos en taludes carreteros y ferroviarios en caminos de los estados de Colima y Michoacán. En términos de movimientos del terreno, las afectaciones se concentraron en poblados cercanos a la costa de Michoacán, dentro de la llanura costera de Tecomán. En dicha zona, se identificó la ocurrencia del fenómeno de licuación, el cual causó desplazamientos laterales en terraplenes carreteros (y su consecuente agrietamiento), asentamientos de viviendas y agrietamiento del terreno. Sin embargo, también se identificó otro fenómeno, poco documentado, que afectó principalmente a las zonas bajas cerca de la costa. Este consistió en un ascenso regional del nivel freático, debido a elevación del nivel del mar que tuvo lugar como consecuencia del sismo. Se cree que este fenómeno fue responsable de algunos daños, que se manifestaron algunas horas después del evento sísmico, como el abultamiento de pisos en viviendas y la emersión de estructuras semi-enterradas.

En general, se puede concluir que una gran parte de los daños ocurridos como consecuencia del sismo se debieron al uso de materiales inadecuados y a técnicas constructivas precarias, tanto en las estructuras como en su cimentación. Particularmente, en poblados pequeños la autoconstrucción no regulada es una de las principales causas de estas estructuras inadecuadas. Aunque sería deseable prevenir dicha cultura de autoconstrucción, es claro para los autores que las condiciones sociales y económicas hacen difícil la erradicación de estas prácticas. Por lo tanto, los autores creen que la inversión en programas sociales/técnicos, enfocados a mejorar la calidad de dicha autoconstrucción, pueden derivar en una reducción significativa de los daños asociados a futuros eventos sísmicos en la zona.

3.5. Referencias

- Apiza Surf Fishing (2022). [terremoto] en epicentro cerca de nosotros mientras pescabamos. Recuperado el 12 de febrero de 2023, a partir de https://www.youtube.com/watch?v=_Sk66AMMZwk&t=21s
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2019). *Postes de concreto reforzado seccion I* (No. Especificación CFE J6301-53).
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (2003). *El sismo de Tecomán, Colima del 21 de enero de 2003 (Me 7.6)*. Ciudad de Mexico: Secretaría de Gobernación, Dirección de Investigación - Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Harada, Y., Goto, H., & Sawada, S. (2022). Initiation process of tension cracks in soil embankment on liquefied sandy ground investigated from centrifuge model test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161(July), 107444. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107444>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI (1992). *Tecomán – Cuaderno de información básica para la planeación municipal*. Aguascalientes: INEGI.
- Kang, G. C., Tobita, T., & Iai, S. (2014). Seismic simulation of liquefaction-induced uplift behavior of a hollow cylinder structure buried in shallow ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.05.006>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mánica, M. A., Arroyo, M., Gens, A., & Monforte, L. (2022). Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 175(2), 151–165. <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00001>
- Mi Morelia. (2022). Se abre carretera en Coahuayana, Michoacán. Recuperado el 24 de octubre de 2022. Disponible en: <https://mimorelia.com/noticias/michoacan/se-abre-carretera-en-coahuayana-michoacan>
- Milenio. (2022). A un mes del 19-S en Colima, la herida del sismo sigue abierta; dañó 6 mil casas. Recuperado el 13 de octubre de 2022, a partir de <https://www.milenio.com/estados/mes-19-s-colima-herida-sismo-abierta>
- Ovando, E., Vieitez, L., Alemán, J. D., Contreras, R., Castellanos, G., Navarro, C., & Sánchez, M. (1997). Geotecnia. En A. T. Colunga (Ed.), *El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995* (pp. 82–133). Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Gobierno del Estado de Colima, Universidad de Colima.
- Savidis, S. A., Aubram, D., & Rackwitz, F. (2008). Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Formulation for Geotechnical Construction Processes. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 38(2), 165–194.
- Vilar, O. M., & Rodrigues, R. A. (2011). Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 226–233. <https://doi.org/10.1139/T10-065>
- Wartman, J., Rodriguez-Marek, A., Macari, E. J., Deaton, S., Ramírez-Reynaga, M., Ochoa, C. N., & Ovando-Shelley, E. (2005). Geotechnical Aspects of the January 2003 Tecomán, Mexico, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(2), 493–538. <https://doi.org/10.1193/1.1904064>
- Young, W.C. (1989). *Roark's Formulas for Stress and Strain* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.

4. Infraestructura educativa y de salud

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
II-UNAM
salcocerm@iingen.unam.mx

Dr. Marcos M. Chávez Cano
II-UNAM
mchavezc@iingen.unam.mx

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla
II-UNAM
hguerrerob@iingen.unam.mx

Dr. Alfredo Sánchez Alejandre
Universidad de Colima
asanchez35@ucol.mx

4.1. Introducción

La ocurrencia del sismo de Coalcomán, Michoacán, del 19 de septiembre de 2022 (M7.7), ocasionó diversos daños de distinta magnitud en la infraestructura educativa y de salud en los estados de Colima y Michoacán que fueron los que más daños presentaron. En este capítulo se documentan los daños observados en este tipo de estructuras por la misión que envió el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por diversos especialistas que visitaron las zonas afectadas. Al final de este capítulo se presentan conclusiones y recomendaciones que permitirían la reducción de daños. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación de los sitios visitados.

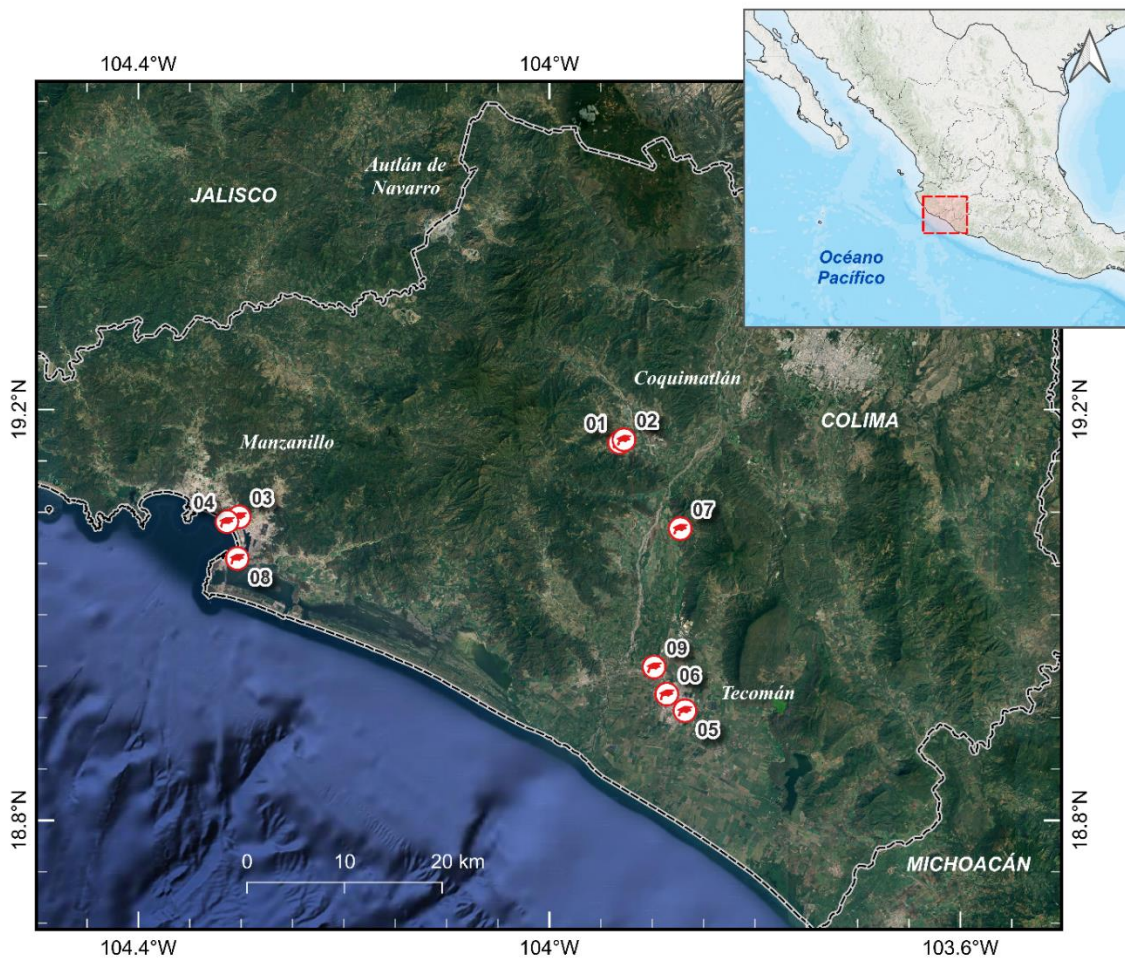


Figura 4.1 Ubicación de las zonas y sitios visitados por el II-UNAM tras el sismo del 19 de septiembre de 2022 a Pueblo Juárez, Manzanillo, Tecmán y Madrid en el estado de Colima

4.2. Daños observados en el estado de Colima

La visita de reconocimiento de daños realizada por el II-UNAM fue del 5 al 7 de octubre de 2022; incluyó recorridos en los municipios de Pueblo Juárez, Manzanillo, Tecomán y Madrid, donde se constataron afectaciones de distinta magnitud a la infraestructura urbana, hospitalaria, educativa, habitacional y comercial. La Tabla 4.1 lista las escuelas y universidades visitadas. Se visitaron siete escuelas con reporte de daño severo; dos ubicadas en el municipio de Pueblo Juárez, dos en el municipio de Manzanillo y tres en Tecomán, así como dos campus de la Universidad de Colima. Las observaciones preliminares del grupo de trabajo con respecto a las siete escuelas y dos universidades que se visitaron se presentan a continuación.

Tabla 4.1 Descripción de las zonas y cada uno de los sitios visitados

ID	Sitio	Uso	Municipio	Estado	Latitud	Longitud
01	Escuela Primaria Benito Juárez	Educación	Pueblo Juárez	Colima	19.168011	-103.931789
02	Escuela Secundaria Felipe Sevilla del Río No 14	Educación	Pueblo Juárez	Colima	19.170661	-103.927470
03	USAE Coordinación de Servicios Educativos	Educación	Manzanillo	Colima	19.095496	-104.301957
04	Escuela Secundaria Mariano Miranda Fonseca	Educación	Manzanillo	Colima	19.090902	-104.313830
05	Escuela Secundaria Adolfo Torres Quintero No 1	Educación	Tecomán	Colima	18.906820	-103.868139
06	Escuela Secundaria General Justo Sierra	Educación	Tecomán	Colima	18.922923	-103.885746
07	Escuela Primaria Leopoldo Caraballo	Educación	Madrid	Colima	19.084059	-103.872695
08	Universidad de Colima Campus San Pedrito	Educación	Manzanillo	Colima	19.055029	-104.303769
09	Universidad de Colima, Campus Tecomán	Educación	Tecomán	Colima	18.949300	-103.898188

4.2.1. Escuela Primaria Benito Juárez

Ubicada en el municipio de Pueblo Juárez, la escuela está formada por cuatro edificios, todos de un solo nivel. La ubicación del plantel se muestra en la Figura 4.1 sitio 01. Los principales daños observados fueron agrietamientos en el perímetro de los muros divisorios elaborados con panel W y mampostería, Figura 4.2. Algunas columnas presentaron agrietamientos por cortante y desprendimiento del concreto por un confinamiento inadecuado, Figura 4.3. Por otra parte, aunque no

corresponde a un daño ocasionado por el sismo, llamó la atención que algunas columnas fueron alteradas con el propósito de colocar pizarrones interactivos eliminando parte del concreto y del acero de refuerzo longitudinal, Figura 4.4. Este tipo de acciones debilitan las columnas al ocasionar una excentricidad que, aunque en esta ocasión no se observaron daños, pueden provocar un comportamiento inadecuado de los edificios. Este edificio fue clasificado por las autoridades con daño severo y no funcional.



Figura 4.2 Agrietamientos horizontales y verticales en los bordes de los muros divisorios



Figura 4.3 Agrietamientos por cortante en columnas y pérdida de recubrimiento en nudos

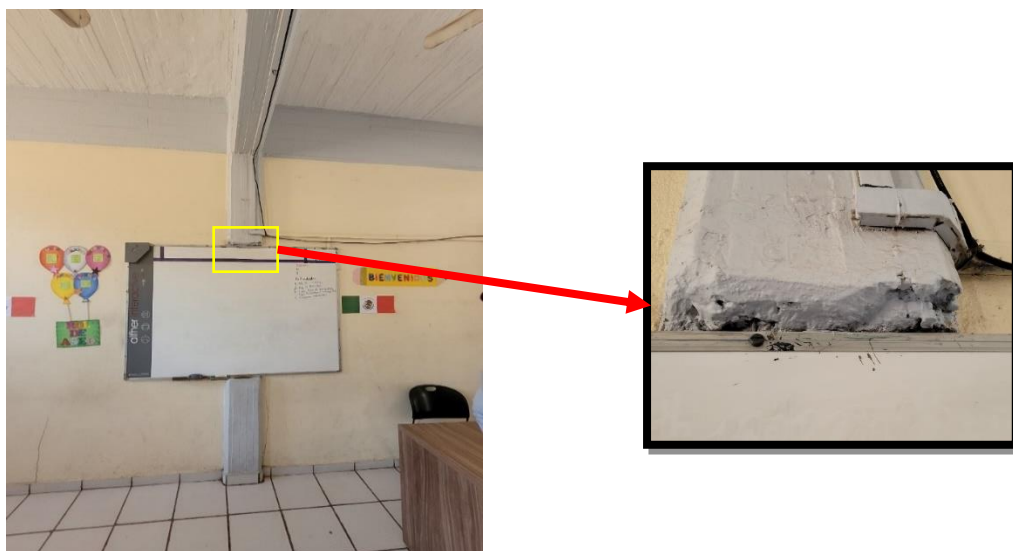


Figura 4.4 Corte de columna y acero de refuerzo para la instalación de pizarrones interactivos

4.2.2. *Escuela Secundaria Técnica Felipe Sevilla del Río*

El plantel se encuentra ubicado en Pueblo Juárez y cuenta con cuerpos de un solo nivel, Figura 4.1 sitio 02. Únicamente se encontraron daños en una bodega resuelta con perfiles de acero estructural, Figura 4.5. Los daños consistieron en que los muros longitudinales presentaron un comportamiento fuera del plano debido a la falta de anclajes eficientes que restringieran este tipo de movimiento. No se alcanzó el colapso, pero el riesgo era latente. Por ello, el uso de esta bodega estuvo restringido. El edificio fue valorado por las autoridades con daño severo y funcional restringido. Esto se considera adecuado debido a que los daños están concentrados en un solo edificio y el resto puede operar de manera normal.



Figura 4.5 Edificio en donde los muros longitudinales presentaron comportamiento fuera del plano

4.2.3. *USE Valle de las Garzas*

El plantel USE Valle de las Garzas, está ubicado en Manzanillo y cuenta con cuerpos de un solo nivel. La ubicación de la escuela se muestra en Figura 4.1 sitio 03. Únicamente se observaron daños en una bodega construida con perfiles de acero estructural y muros perimetrales de mampostería. Uno de los muros perimetrales se volteó al interior debido a las vibraciones fuera del plano que el sismo le indujo y a la falta de topes en el interior que restringieran este tipo de movimiento. Además, se observaron deficiencias constructivas en los traslapes del acero de refuerzo de los castillos de los muros, Figura 4.6. El edificio fue valorado por las autoridades con daño severo y funcional restringido. Esto se considera adecuado debido a que los daños están concentrados en un solo edificio y el resto del plantel puede operar de manera normal.



Figura 4.6 Volteo de muro longitudinal por deficientes elementos de sujeción e inadecuados traslapes en el acero de refuerzo longitudinal

4.2.4. *Secundaria Mariano Miranda Fonseca*

La escuela se encuentra ubicada en Manzanillo, Figura 4.1 sitio 04, cuenta con cuerpos de uno y dos niveles. Está resuelta con marcos de concreto reforzado. Durante la visita no fue posible ingresar al plantel y sólo se observaron desplomes en las bardas perimetrales, Figura 4.8, que fueron acordonados emergentemente. La barda frontal en donde se ubica el letrero de identificación de la escuela colapsó.

El edificio fue valorado por las autoridades con daño severo y funcional. Esto debido a que los daños están concentrados en las bardas que pueden aislarse y el resto puede operar de manera normal.



Figura 4.8 Volteo de barda perimetral y colapso del letrero de identificación de la escuela

4.2.5. Secundaria Gregorio Torres Quintero

La escuela se encuentra ubicada en Tecomán, Figura 4.1 sitio 05, cuenta diversos cuerpos de un nivel. En uno de los cuerpos se apreció comportamiento de columna corta además de un inadecuado confinamiento del núcleo de concreto, Figura 4.9. El acceso a este edificio estaba restringido. Un muro de mampostería de piedra presentó una grieta por cortante. El edificio fue valorado por las autoridades con daño severo y funcional restringido. Esto se considera adecuado debido a que los daños están concentrados en un solo edificio y el resto puede operar de manera normal.



Figura 4.9 Agrietamientos por cortante en columnas y muros

4.2.6. Secundaria Justo Sierra

La escuela se ubica en el municipio de Tecomán, Figura 4.1 sitio 06, y está formada por varios cuerpos de un solo nivel. Presentó el colapso de una barda perimetral. Esta barda es muy larga y no contaba con contrafuertes y sus castillos y dadas estaba reforzados con armados prefabricados tipo TEC, Figura 4.10. Los edificios no presentaron daños significativos, salvo algunos agrietamientos en los bordes de los muros de mampostería y alguna pérdida de recubrimiento ocasionada por la corrosión del acero de refuerzo, Figura 4.11. Al momento de la visita la escuela estaba funcionando y se tenía restringido el paso en la zona donde ocurrió el colapso. El edificio fue valorado por las autoridades con daño severo y funcional restringido. Esto se considera adecuado debido a que los daños están concentrados en una de las bardas perimetrales que no afectan la operación del plantel.



Figura 4.10 Volteo de bardas por falta de contrafuertes y escaso acero de refuerzo

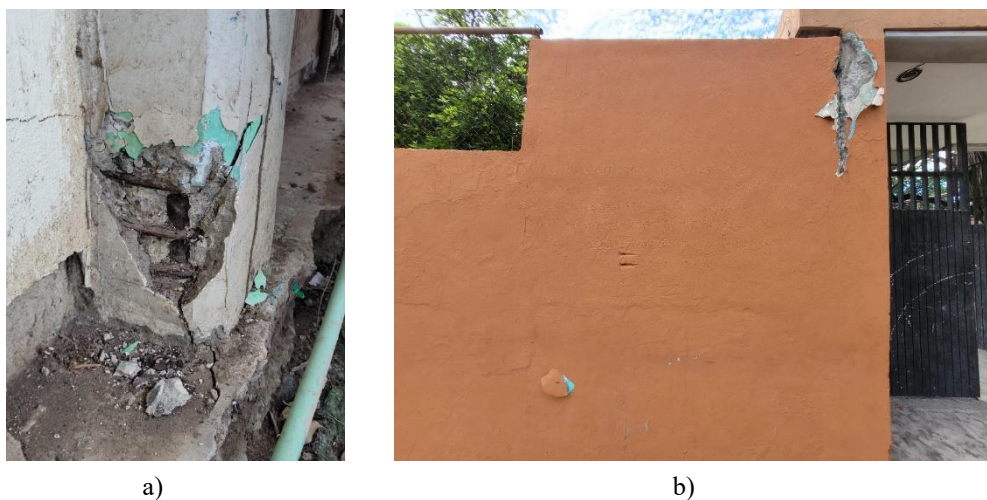


Figura 4.11 a) Pérdida de recubrimiento por corrosión del acero en la parte baja de las columnas y b) agrietamiento vertical en muros por falta de anclaje a la columna

4.2.7. *Escuela Primaria Leopoldo Caraballo*

La escuela se encuentra ubicada en el municipio de Tecomán, Figura 4.1 sitio 07. La estructura está resuelta con muros de mampostería y, en algunos casos, la losa de concreto está apoyada sobre vigas de acero. Los mayores daños se observaron en el edificio que se muestra en la Figura 4.12, en donde los muros de mampostería presentaron grietas de cortante formando una letra X. En el resto de la escuela se observaron agrietamientos en los bordes de los muros.



Figura 4.12 Daños por cortante en muros de mampostería (*continúa*)



Figura 4.12 Daños por cortante en muros de mampostería (continuación)

En la azotea de uno de los cuerpos, los tinacos de almacenamiento de agua se encontraban bordeados por muros de mampostería que, al carecer de una dala de cerramiento, se agrietaron en las esquinas, Figura 4.13a. Esta situación representa un riesgo, pues, aunque estos muros no tienen una función estructural pueden desprenderse y caer sobre los usuarios de la escuela. También, se observaron desprendimientos del recubrimiento de la losa por un inadecuado recubrimiento y por corrosión del acero de refuerzo, Figura 4.13b). Esta escuela fue clasificada con daño severo y funcional restringida.



Figura 4.13 a) Agrietamiento vertical en muros por falta de dalas de cerramiento, y b) Daño en losa por inadecuado armado de acero de refuerzo

4.2.8. Universidad de Colima, Campus San Pedrito

El campus se encuentra ubicado en el municipio de Manzanillo, Figura 4.1 sitio 08. En el campus se encuentra la Escuela Técnica de Enfermería y el Bachillerato 8, 9 y 10. La primera corresponde a dos edificios de dos niveles, la planta baja está resuelta con marcos de concreto reforzado y la planta alta con perfiles de acero estructural. Los edificios del Bachillerato son de un solo nivel y están hechos de acero estructural con muros de mampostería. Solo se observaron daños en el edificio E del Bachillerato, principalmente en los muros que se colocaron para tapar una de las aberturas de las ventanas de cada aula, Figura 4.14. Estos daños pudieron ser ocasionados por la posible deformación del edificio que se presentó durante el sismo y que los muros no fueron capaces de resistir. Otro de los edificios que presentó daños fue el Polideportivo, ya discutido en el capítulo anterior, el cual presentó grietas de cortante en algunos muros de concreto, aunque también se observaron hundimientos diferenciales del terreno lo que pudo haber ocasionado la aparición de daños, Figura 4.15.



Figura 4.14 Daños en muros de relleno para cubrir aberturas de ventanas en aulas de acero estructural

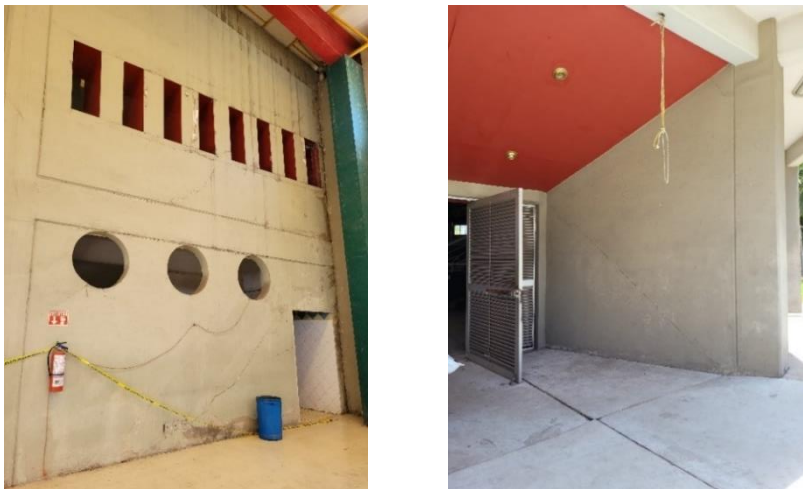


Figura 4.15 Daños en polideportivo: a) agrietamiento por cortante en muros de concreto, b) indicios de asentamientos diferenciales del subsuelo

4.2.9. Universidad de Colima, Campus Tecomán

El campus se encuentra ubicado en el municipio de Tecomán, Figura 4.1 sitio 09. Los mayores daños se presentaron en el edificio del Laboratorio Multidisciplinario en donde los muros divisorios de mampostería presentaron daños significativos al no estar adecuadamente separados de los marcos de concreto reforzado, que, al vibrar durante el sismo, los muros se dañaron por su baja resistencia, Figura 4.16. También, se observó la caída de plafones debido a que no estaban sujetos correctamente. No se apreciaron daños significativos en los elementos estructurales.



a)

Figura 4.16 Daños en Laboratorio Multidisciplinario: a) muros divisorios con daño por no estar debidamente desligados de los marcos de concreto reforzado, b) caída de plafones por un inadecuado sistema de sujeción (continúa)



b)

Figura 4.16 Daños en Laboratorio Multidisciplinario: a) muros divisorios con daño por no estar debidamente desligados de los marcos de concreto reforzado, b) caída de plafones por un inadecuado sistema de sujeción (continuación)

4.3. Conclusiones y recomendaciones

Muchos de los daños observados se debieron a malas prácticas constructivas como separación de estribos muy grandes, técnicas de traslape de barras de refuerzo inadecuadas, pérdida de recubrimiento por corrosión, muros de mampostería con deficiencias en las restricciones para evitar la falla fuera del plano y comportamiento de columna corta.

Cabe destacar que todos los planteles visitados estaban reportados con daños severos, aunque algunos de ellos no comprometían la seguridad estructural del plantel. Sin embargo, por las condiciones en que quedaron los elementos estructurales podrían presentar una situación de riesgo para sus ocupantes. Por ello, se considera prudente la manera con la que se evaluó la mayoría de las escuelas visitadas.

Se observaron algunas malas prácticas que deben erradicarse como la alteración de los elementos estructurales, tal y como sucedió en las columnas de la Escuela Primaria Benito Juárez. Toda alteración puede provocar un comportamiento inadecuado de la estructura.

Se recomienda: 1) Rehabilitar las escuelas dañadas de acuerdo con los requisitos de la Guía Técnica de Rehabilitación de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), 2) Entrenar y formar brigadas para aplicar la Metodología de Evaluación Postsísmica de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), 3) Desarrollar lineamientos para la modificación de la infraestructura física educativa, 4) Elaborar guías para el mantenimiento preventivo y correctivo de edificios educativos, y 5) Desarrollar una guía técnica para el diseño, construcción, supervisión, mantenimiento, conservación y rehabilitación de bardas perimetrales de escuelas.

5. Edificios patrimoniales

Dr. Fernando Peña Mondragón

II-UNAM

fpenam@iingen.unam.mx

Dr. Abraham Roberto Sánchez Ramírez

II-UNAM

asanchezr@iingen.unam.mx

5.1. Introducción

En este capítulo se describen los daños sufridos en el patrimonio arquitectónico de México, principalmente el religioso (iglesias), como consecuencia del sismo del 19 de septiembre de 2022. De acuerdo con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH, 2022) se reportaron 34 inmuebles catalogados como monumentos históricos con afectaciones o daños de distinta índole; aunque no se reportaron daños estructurales severos. Por lo que en general se puede decir que, se registraron daños menores en este tipo de edificaciones.

Se reportaron afectaciones principalmente en cuatro estados del país: Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit. De acuerdo con el Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura (INBAL, 2022), Michoacán es el estado que reporta las mayores afectaciones, sobre todo en la zona cercana al epicentro: Coalcomán, Paracho, San Juan Nuevo, Pátzcuaro, Huetamo y Tingüidín. En Colima se reportaron daños menores en el Museo Regional de Historia de Colima y la ruptura de algunas piezas menores que se encontraban exhibidas en sus salas. En Jalisco se reportó el desprendimiento de cantera en los templos de La Merced y San Agustín en Guadalajara, así como algunas grietas en el Museo Regional de la misma ciudad. También, se reportaron algunos daños menores en Chapala, Tamazula de Gordiano, Miravalle, San Martín de las Flores, San Pedrito y Tlaquepaque. Por su parte, en Nayarit solo se reportaron desprendimientos de cantera en los cupulines de la Catedral de Tepic.

Además de describir los daños que se observaron en el patrimonio arquitectónico durante el recorrido realizado por el estado de Colima, se presenta información recopilada de internet de los daños presentados en el estado de Michoacán. Al ser pocos los inmuebles afectados, la información se describe por estado. En la Figura 5.1 se ilustra la ubicación de los sitios visitados y en la Tabla 5.1 se listan cada uno de ellos.

Tabla 5.1 Descripción de los edificios patrimoniales

ID	Sitio	Uso	Municipio	Estado	Latitud	Longitud
01	Santuario del Señor de los Milagros	Iglesia	Nuevo San Juan Parangaricutiro	Michoacán	19.416641	-102.128455
02	Parroquia de Santiago Apostol	Iglesia	Coalcomán de Vázquez Pallares	Michoacán	18.778169	-103.159488
03	Templo de Santiago Apostol	Iglesia	Santiago Tangamandapio	Michoacán	19.954649	-102.432078
04	Parroquia de San Miguel Arcángel	Iglesia	Tacátzcuaro	Michoacán	19.730268	-102.547037
05	Iglesia de San Miguel de Arcángel	Iglesia	Villamar	Michoacán	20.020096	-102.596048
06	Parroquia del Señor del Perdón	Iglesia	Zirahuén	Michoacán	19.453000	-101.731295
07	Parroquia de San Pedro Apostol	Iglesia	Paracho de Verduzco	Michoacán	19.647151	-102.047587
08	Parroquia Santa María Magdalena	Iglesia	Pueblo Juárez	Colima	19.167384	-103.931796
09	Parroquia de San Pedro Apostol	Iglesia	Coquimatlán	Colima	19.201188	-103.810285
10	Santuario Mariano Diocesano de Nuestra Señora de la Candelaria	Iglesia	Tecomán	Colima	18.910449	-103.872339

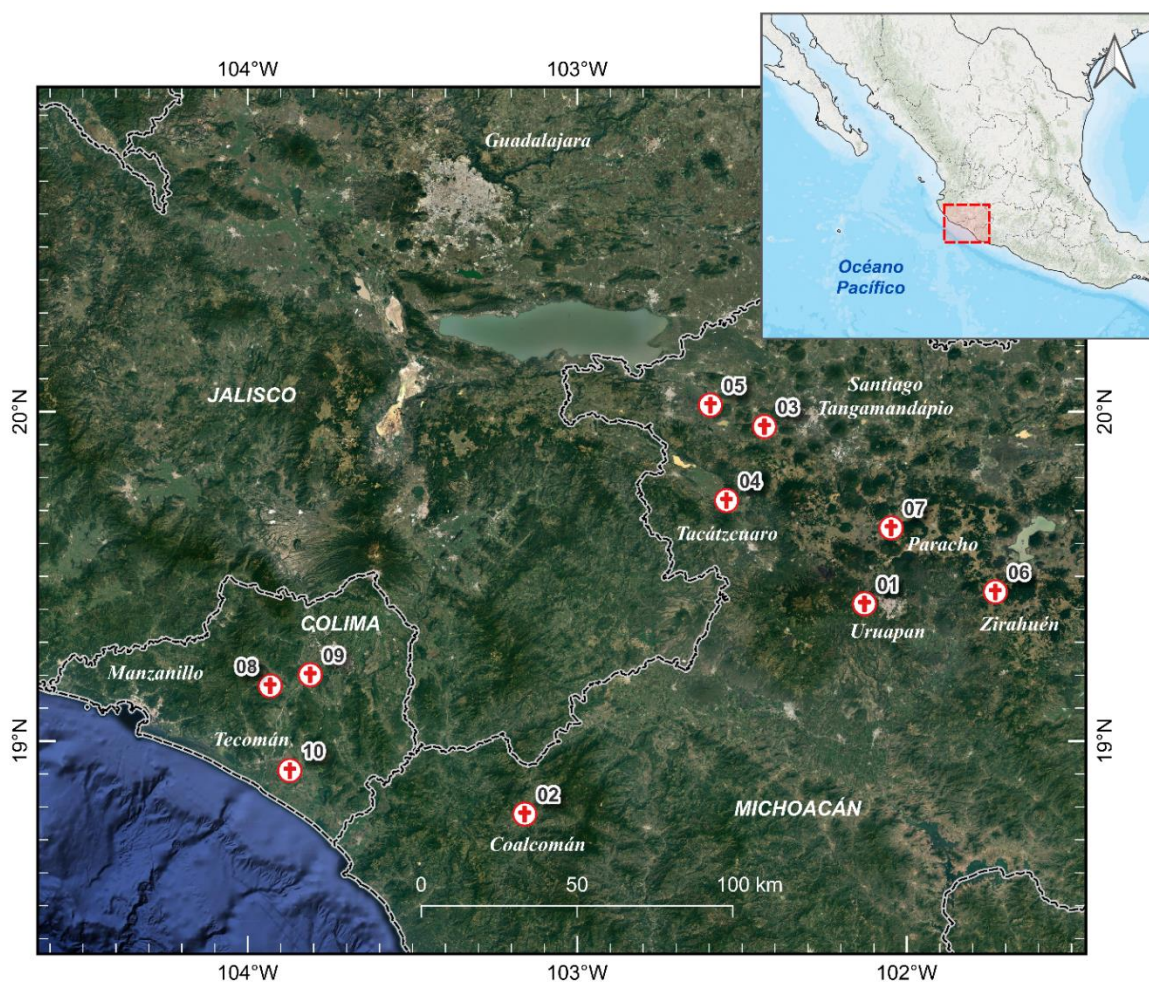


Figura 5.1 Ubicación de los edificios patrimoniales visitados durante el recorrido realizado por el estado de Colima e información recopilada de internet de los daños presentados en el estado de Michoacán

5.2. Afectaciones en el estado de Michoacán

5.2.1. San Juan Nuevo

El Santuario del Señor de los Milagros ubicado en el municipio de Nuevo San Juan, Figura 5.1 sitio 01, es la parroquia del nuevo pueblo de San Juan, fundado después de que San Juan Parangaricutiro fuera sepultado por la lava del volcán Parícutín en 1944. Aquí se trasladó la imagen del señor de los Milagros que se encontraba en la iglesia que ahora es visitada por sus ruinas. El daño principal se presentó en el segundo cuerpo de la torre izquierda de la fachada; así como también se presentaron agrietamientos menores en bóvedas, Figura 5.2.

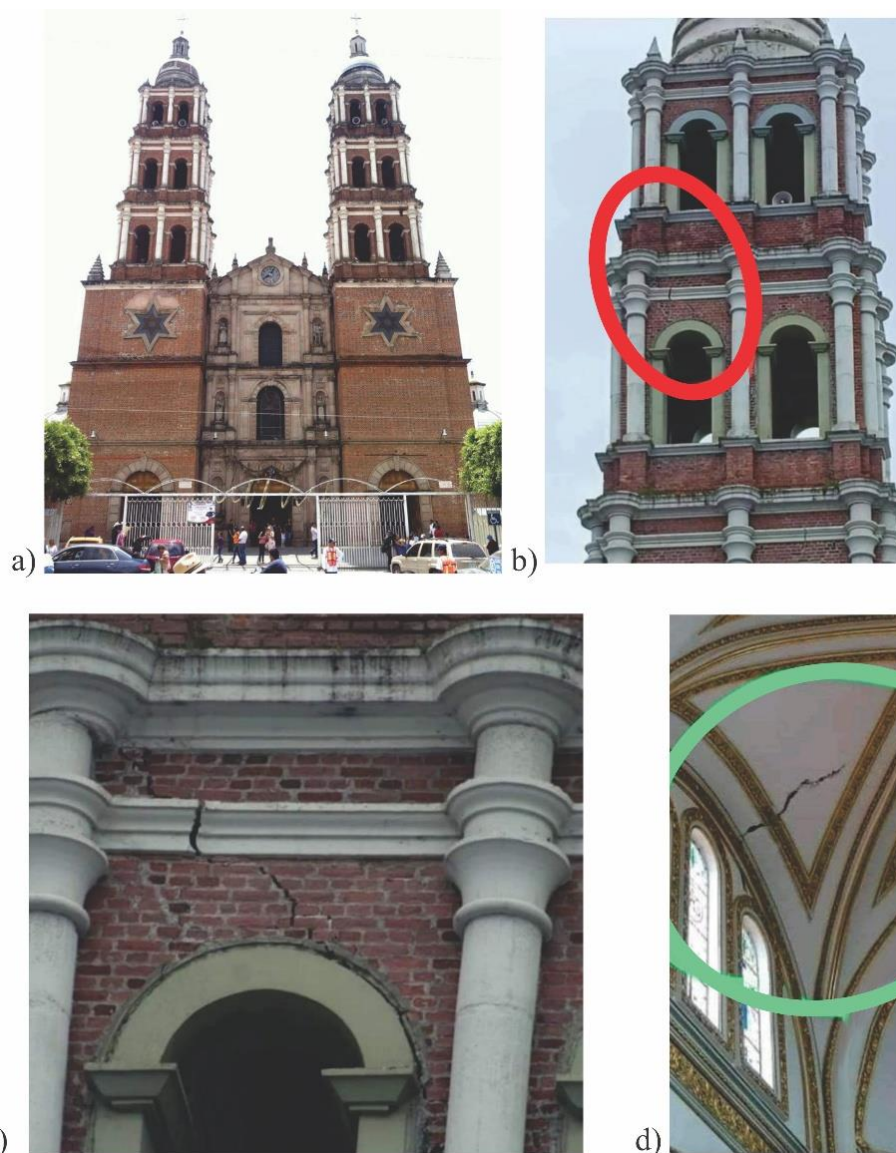


Figura 5.2 Santuario del Señor de los Milagros (Diócesis, 2023): a) fachada, b) torre Izquierda, c) detalle del daño y d) daño en bóveda al interior

5.2.2. Coalcomán

La parroquia de Santiago Apóstol se encuentra ubicada en el municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares, Figura 5.1 sitio 02. Esta iglesia es una de las más antiguas, fundada en 1554 y declarada oficialmente parroquia en 1776. Tuvo afectaciones en el sismo de 1985 y en otro que ocurrió en la década de los 90 del siglo pasado, cuando se cayó la campana. Presentó agrietamiento en algunos muros, desprendimiento de aplanados, daños en la torre del campanario y caída del sistema de techo. Los daños presentados fueron menores, pero extensos al interior de la iglesia, Figura 5.3.

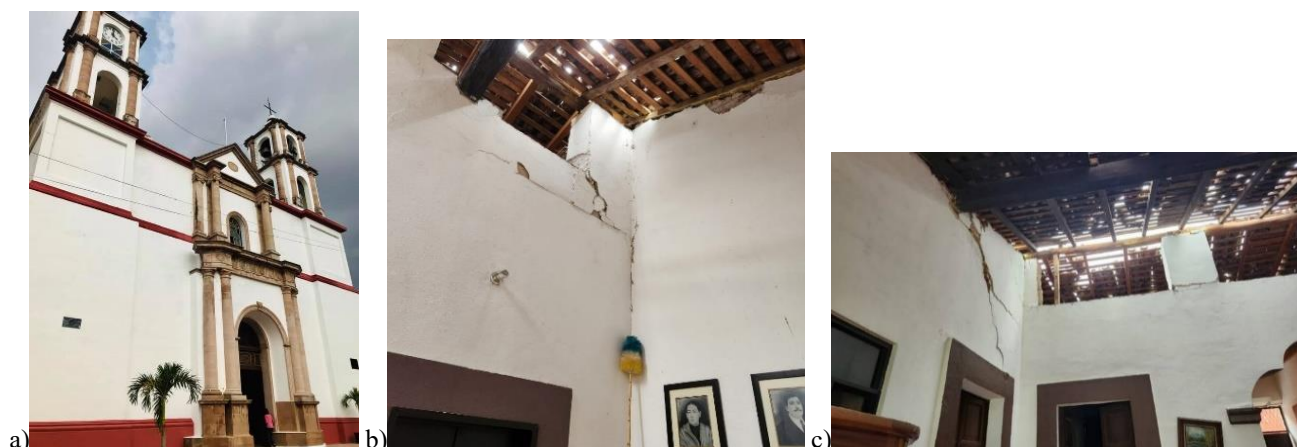


Figura 5.3 Parroquia de Santiago Apóstol: a) fachadas, b) daños en Muros, c) colapso parcial del sistema de techo

5.2.3. Santiago de Tangamandapio

La parroquia de Santiago Apóstol, ubicada en el municipio de Tangamandapio, Figura 5.1 sitio 03, fue fundada por los agustinos y en 1768 paso a manos del clero secular. Presentó agrietamiento menor en su fachada y en la torre de campanario, Figura 5.4.



Figura 5.4 Iglesia de Tangamandapio (Diócesis, 2023): a) fachada principal, b) daño en esquinas y conexiones entre muros, c) daños en pilastras del primer cuerpo del campanario

5.2.4. *San Miguel Arcángel. Tacátzcuaro*

La iglesia de San Miguel Arcángel, cuyos primeros libros del archivo del bautismo de la parroquia datan de 1868, se ubica a 7 km de Tingüindin, en el municipio de Tacátzcuaro, Figura 5.1 sitio 04, colinda con las comunidades de Tocumbo, Santa Inés, Cotija, Los Reyes, Santa Clara y Atapan. Esta iglesia durante el sismo presentó un derrumbe parcial de la fachada del templo debido a un comportamiento fuera del plano, Figura 5.5.



Figura 5.5 Fachada principal (Diócesis, 2023): a) antes del sismo; b) daños por el sismo

5.2.5. *San Miguel Arcángel. Villamar*

La iglesia de San Miguel Arcángel, ubicada en el municipio de Villamar, Figura 5.1 sitio 05. Por documentos que datan de 1777 consta que la ahora parroquia de San Miguel Arcángel en Villamar era vicaría de Jiquilpan, asistida por los padres franciscanos; así permaneció hasta que fue erigida parroquia en 1884.

Durante la visita a este monumento se observó que la linternilla del campanario (cuarto cuerpo) presentó agrietamientos en la base y en la parte superior de las pilastras debidos a momentos flexionantes, Figura 5. 6.

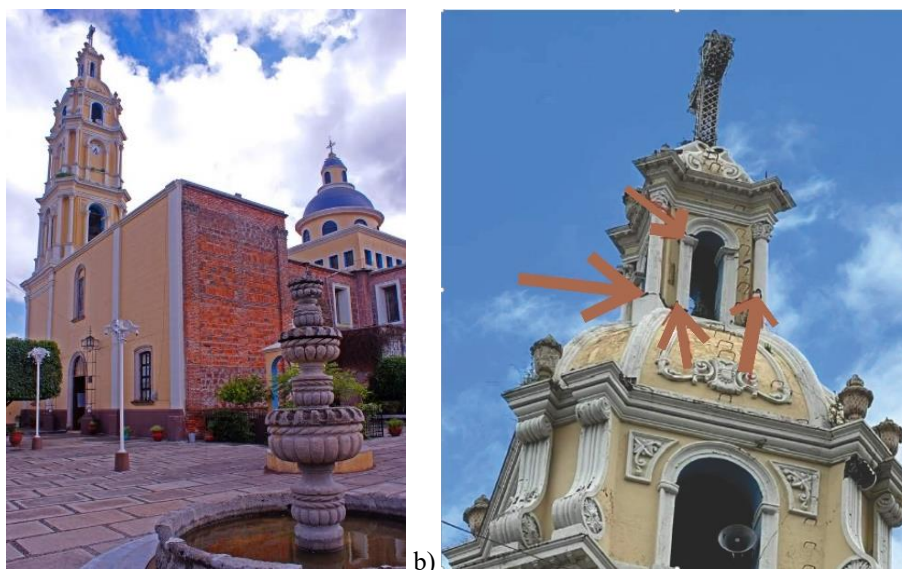


Figura 5.6 Iglesia de San Miguel Arcángel en Villamar (Diócesis, 2023): a) fachada principal, b) daños en la linternilla del campanario

5.2.6. Zirahuén

El templo del Señor del Perdón en Zirahuén, ubicado en el municipio de Zirahuén, Figura 5.1 sitio 06, fue fundado por los franciscanos y se convirtió en parroquia hasta 1730. El templo presentó el desprendimiento de madera de la bóveda y de los muros de adobe sobre los que se asienta. La cruz también sufrió daños al fragmentarse, Figura 5.7.



Figura 5.7 Iglesia de Zirahuén: a) fachada principal, b) daño en bóveda, c) daño en cruz de fachada

5.2.7. Paracho

La iglesia primitiva de San Pedro Apóstol, ubicada en el municipio Paracho de Verduzco, Figura 5.1 sitio 07, fue incendiada en 1918 y a partir de esta fecha fue construida la actual parroquia. La iglesia es de concreto reforzado y presentó desprendimientos y agrietamientos leves de la bóveda nervada y los arcos en que se asienta, Figura 5.8.



Figura 5.8 Iglesia de Paracho: a) fachada principal, b) daños en muros y c) en la bóveda nervada

5.3. Afectaciones en el estado de Colima

5.3.1. Pueblo Juárez

La Parroquia de Santa María Magdalena en Pueblo Juárez, ubicada en el municipio de Coquimatlán, Figura 5.1 sitio 08. Es una construcción nueva de concreto armado. Presentó algunos daños menores en la torre de campanario, muros y bóvedas, Figura 5.9. El daño del campanario se debió principalmente a la flexión de la parte superior de la torre, en la zona de unión con el muro lateral y la fachada; estos muros trabajaron como restricciones. También, se presentó agrietamiento en la zona de la cadena de cerramiento entre la losa y los muros, lo que indica que este elemento trabajó como puntal, golpeando a los muros de la nave.



Figura 5.9 Iglesia de Santa María Magdalena, Pueblo Juárez: a) fachada, b) vista posterior de la torre, c) vista lateral

5.3.2. Coquimatlán

La Parroquia de San Pedro Apóstol, ubicada en el municipio de Coquimatlán, Figura 5.1 sitio 09, fue intervenida después del sismo de Tecmán de 2003, debido a que presentó daños severos y el colapso de los cuerpos superiores de los campanarios. El refuerzo consistió en la incorporación de nervaduras de concreto para el refuerzo de las bóvedas y los campanarios se reforzaron con un encamisado de placas de acero, Figura 5.10. Durante el sismo de 2017, la iglesia presentó un buen comportamiento estructural y no se presentaron daños, al igual que durante el sismo del 2022.



Figura 5.10 Iglesia de Santa María Magdalena, Pueblo Juárez: a) fachada, b) refuerzo de bóvedas, c) refuerzo de campanario

5.3.3. Tecomán

El Santuario Mariano Diocesano de Nuestra Señora de la Candelaria, ubicado en el municipio de Tecomán, Figura 5.1 sitio 10, sufrió daños moderados en el recubrimiento de la techumbre. Es una iglesia de arquitectura moderna realizada con elementos de acero. Las formas complejas de la techumbre se dan con elementos arquitectónicos. La estructura de acero no tuvo ningún tipo de daño, pero presentó caídos de las láminas de tablaroca que recubren la techumbre, Figura 5.11.



Figura 5.11 Santuario de la Virgen de la Candelaria, Tecomán: a) fachada, b) daño en recubrimiento de techumbre, c) daño en uniones muro – techo (continúa)



Figura 5.11 c) Daño en uniones muro – techo (continuación)

5.4. Comentarios

El patrimonio arquitectónico religioso del área de estudio está compuesto principalmente por iglesias coloniales hechas de mampostería de piedra y mortero de arena de cal. Estas iglesias fueron construidas entre los siglos XVI y XVIII. Sin embargo, han sido intervenidas a lo largo del tiempo modificando su estructuración original. También, podemos encontrar iglesias modernas de mediados y finales del siglo pasado.

A pesar del hecho de que estas iglesias son altamente vulnerables a los eventos sísmicos, principalmente cuando están cerca del epicentro como se observó en los terremotos de septiembre de 2017 (Peña *et al.*, 2022), la mayoría de las iglesias tuvieron un comportamiento adecuado. Las pocas iglesias afectadas sufrieron solo daños ligeros. Esto puede deberse a que la mayoría de estas iglesias se han reforzado anteriormente, utilizando varias técnicas, tanto tradicionales como con elementos concretos. Solo hubo un caso de una iglesia moderna donde se produjeron daños importantes en los elementos arquitectónicos.

5.5. Referencias

- INAH (2022). Daños menores en el patrimonio cultural de cuatro estados, saldo preliminar del sismo del 19 de septiembre de 2022. Boletín No. 460. Instituto Nacional de Arquitectura e Historia. México.
- INBAL (2022). Daños menores en el patrimonio cultural de cuatro estados, saldo preliminar del sismo del 19 de septiembre de 2022. Boletín No. 616 – 19 de septiembre de 2022. Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura. México.
- Diócesis (2023). Diócesis de Zamora, Michoacán: historia, arte y tradición. Página de Facebook. Accesado el 20 de mayo de 2023. <https://www.facebook.com/Di%C3%B3cesis-de-Zamora-Michoac%C3%A1n-historia-arte-y-tradici%C3%B3n-115474834370847>
- Peña F., Chávez Cano, M. M., García Gómez, N., Meli, R., & Cuenca Sánchez, J. C. (2022). Patrimonio Arquitectónico, Capítulo 7. En Los sismos de septiembre de 2017. Alcocer y Rivera Eds. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.

6. Normatividad

Dr. Miguel A. Jaimes Tellez
II-UNAM
mjaimest@iingen.unam.mx

Dr. Adrián Pozos Estrada
II-UNAM
apozoe@iingen.unam.mx

Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez
II-UNAM
grodriguezg@iingen.unam.mx

Dr. Jorge Ruíz García
UMSNH
jruizgar@stanfordalumni.org

Dr. Alfredo Sánchez Alejandre
Universidad de Colima
asanchez35@ucol.mx

6.1. Introducción

En términos generales, las actividades desarrolladas en sociedad requieren ser reguladas, con la finalidad de enmarcar sus derechos y obligaciones. Así, en el ámbito de la construcción, gran parte de las entidades federativas de México cuentan con un Reglamento de Construcciones (RC), incluso a nivel Municipal. Los reglamentos de construcción son documentos legales que tienen la función de proteger a la sociedad contra la falla o mal funcionamiento de las edificaciones e infraestructura (CENAPRED, 2023). A su vez, son documentos que no pueden permanecer estáticos a lo largo del tiempo. Generalmente, a raíz de la ocurrencia de sismos importantes, los reglamentos de construcción son sometidos a revisión, y con base en resultados significativos de investigaciones realizadas en la ingeniería sísmica, ingeniería estructural y otras áreas afines, se actualizan y mejoran para establecer niveles de seguridad estructural óptimos.

En el caso de México, la Figura 6.1 muestra los Estados y Municipios que cuentan con un reglamento de construcciones. Se observa en la Figura 6.1 que, por un lado, existe una gran diversidad de reglamentos de construcción en nuestro país, lo anterior debido principalmente a la interpretación que se da al Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que atribuye a cada municipio tiene la emisión de su propio reglamento de construcciones (CENAPRED, 2023). Por otro lado, también se observa que una parte importante del territorio nacional no cuenta con reglamento de construcciones, como fue el caso de varios Municipios afectados por el evento sísmico que se estudia en este documento (Ruiz García y Ramos Cruz, 2022).

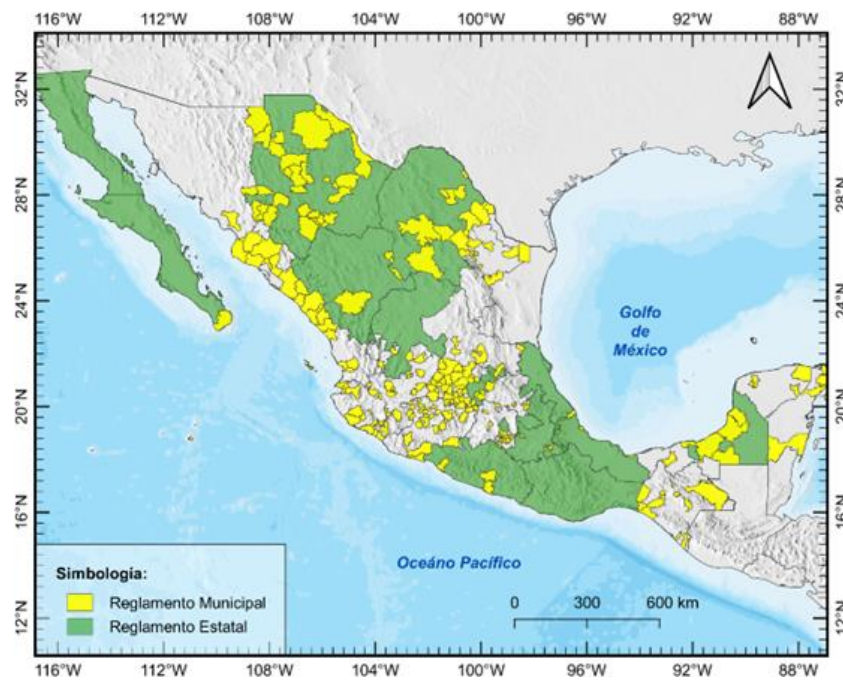


Figura 6.1 Reglamentos de construcción en México. *Fuente: CENAPRED (2023)*

Derivado de los efectos causados por el sismo de Coalcomán, Michoacán, del 19 de septiembre de 2022 (M7.7), en este capítulo se discuten aspectos normativos sísmicos y estructurales de los estados de Colima y Michoacán, que fueron dos de los estados con la mayor cantidad de reportes de daño. También, por su importancia, y los efectos que causan estos eventos sísmicos, se incluye a la Ciudad de México.

La discusión de los aspectos normativos se centra en dos rubros: 1) acciones sísmicas de diseño y 2) aspectos estructurales de las normas con relación directa a los daños observados. Para una mejor organización de este capítulo, la discusión de los rubros mencionados se realiza por estado afectado, iniciando con Colima, prosiguiendo con Michoacán y finalizando con la Ciudad de México. Al final de este capítulo se discuten de forma general los aspectos normativos que fueron de importancia total para el funcionamiento adecuado de las estructuras ante el evento sísmico y réplicas. Asimismo, se aportan algunos comentarios que pueden coadyuvar a mejorar la normativa sísmica en general.

6.2. Aspectos normativos del estado de Colima

Al igual que en otros estados de México, el estado de Colima—conformado por diez Municipios—, cuenta con diversos reglamentos de construcciones a nivel municipal, uno de los cuales es el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Colima (2014). De acuerdo con este documento, en su Séptimo considerando indica que el TÍTULO X es agrupado en doce capítulos, que incluyen: el Capítulo I. Seguridad Estructural de Construcción, Capítulo II. Características Generales de las Edificaciones, Capítulo III. De los Criterios de Diseño Estructural, Capítulo IV. De las Cargas Muertas, Capítulo V. De las Cargas Vivas, Capítulo VI. Del Diseño por Sismo, Capítulo VII. Del Diseño por Viento, Capítulo VIII. Del Diseño de Cimentaciones, Capítulo IX. De las otras Obras, Capítulo X. De las Construcciones Dañadas, Capítulo XI. De las Obras Provisionales y Modificaciones, y el Capítulo XII. De las Pruebas de Carga.

En la siguiente sección se discuten los aspectos relacionados con el Capítulo VI. Del Diseño por Sismo y de manera particular las acciones sísmicas de diseño.

6.2.1. Aspectos sísmicos

El Capítulo VI sobre el Diseño por Sismo, indica en su Artículo 211 que en las normas se establecen las bases y requisitos generales mínimos de diseño para que las estructuras tengan seguridad adecuada ante los efectos de los sismos. Los métodos de análisis y los requisitos para estructuras específicas se detallan en las normas. Así, al igual que en diversos reglamentos de construcción de México, los detalles técnicos de diversas especialidades son referidos a normas. Asimismo, el transitorio Quinto del reglamento indica que la Dirección General expedirá las normas a que hace referencia el reglamento, dentro de los siguientes doce meses, contados a partir de la publicación del mismo en 2014. En tanto se expidan éstas, se aplicarán, en un principio y de forma provisional, las vigentes del

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF), publicadas en la Gaceta Oficial del Distrito Federal. De acuerdo con la anterior, las Normas o Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, y otras de diversas especialidades, deberían ser empleadas como documentos técnicos normativos para el municipio de Colima.

Es importante mencionar que el Reglamento actual del Municipio de Colima no hace referencia a ningún valor de coeficiente sísmico de diseño. Por lo anterior y para suplir esta carencia, académicos y especialistas en el diseño sísmico en Colima han observado que, en la práctica del diseño estructural, existen grupos de profesionales que emplean los valores de coeficientes sísmico de diseño indicados en la versión de 1989 del Reglamento del Municipio de Colima. Asimismo, otros grupos de profesionales emplean los valores de coeficiente sísmico de diseño indicados en versiones pasadas del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (antes de la inclusión del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID) (<https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>). Una comparación de los valores de los coeficientes sísmicos de diseño empleados en el Municipio de Colima se presenta en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Comparación de coeficientes de diseño sísmico para el Municipio de Colima

Reglamento	Zona	Tipo de suelo	C
Versión de 1989 del Reglamento del Municipio de Colima ¹	D	I	0.48
		II	0.56
		II	0.64
Versiones anteriores a 1993 y 2004 del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal ²	-----	I	0.16
		II	0.32
		II	0.40

Notas: (1) El artículo 245 de la versión de 1989 indica que se considerará el Municipio de Colima dentro de la zona “D” de acuerdo a las últimas recomendaciones de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C. (2) De acuerdo con académicos y especialistas en el diseño sísmico en Colima, sólo se empleaban los coeficientes de diseño sísmico para tipos de suelo I y II.

Se observa en la Tabla 6.1 que existe una diferencia importante en los valores de los coeficientes sísmicos de diseño empleados en la práctica de diseño sísmico en el Municipio de Colima. Con la finalidad de comparar los niveles de aceleración empleados para diseño, en la Figura 6.2 se presentan los espectros de diseño (ED) y de peligro uniforme (EPU) tanto en el Municipio de Colima, como en el Municipio de Comala. Estos espectros se obtuvieron con el programa PRODISIS del Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Sismo (MDOC-Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad (2015), el cual es comúnmente empleado para el diseño sísmico de construcciones en diversos sitios de México. También, se presentan los espectros de respuesta obtenidos de registros sísmicos durante el evento del 19 de septiembre de 2022 M7.7 en la estación COMALA, la cual se encuentra instalada en la escuela primaria “José María Morelos y Pavón”, ubicada en la calle Francisco Villa No. 12, en la Colonia Los Aguajes, Comala, Colima. Se hace notar que todos los espectros de respuesta mostrados en este capítulo se asocian con un porcentaje de amortiguamiento de 5%. Por último, con líneas horizontales se muestran los coeficientes de diseño sísmico de la Tabla 6.1.

Se observa en la Figura 6.2 que, para todos los casos, las ordenadas de los espectros de diseño del Municipio de Colima, calculado con el programa PRODISIS (CFE, 2015), son mayores a las ordenadas de los espectros de respuesta calculados con las componentes del del evento sísmico M7.7 registrado en la estación COMALA, ubicada en roca, para todos los periodos. También se observa que las ordenadas de los espectros de diseño para el Municipio de Comala y los espectros de respuesta de la estación del mismo nombre en la componente CH N90E, para periodos cercanos a $T=0.3$ s, son prácticamente de la misma magnitud. Mientras que las ordenadas del espectro de respuesta en la componente CH N00E son menores a las del espectro de diseño, y presentan su valor máximo en periodos entre los 0.4 y 0.5 s. Resulta interesante observar también que los espectros de peligro uniforme para los Municipios de Colima y Cómala presentan una variación de las ordenadas espectrales con un valor máximo cercano a $T=0.15$ s, contrario a lo observado en los espectros de respuesta para las componentes del terreno, cuyos máximos se encuentran entre periodos de 0.3 y 0.4 s. También se observa en la Figura 6.2 que los valores de los coeficientes sísmicos de diseño empleados en la práctica en los Municipios de Colima y Comala son sensiblemente menores a aquéllos de los espectros de diseño calculados con PRODISIS (CFE, 2015). Otra observación interesante es que el espectro de respuesta para la componente vertical del registro de la estación COMALA presentó un valor máximo cercano a los 230 cm/s^2 , aceleración espectral superior al coeficiente sísmicos de diseño de las versiones 1993 y 2004 del RCDF para el tipo de suelo I.

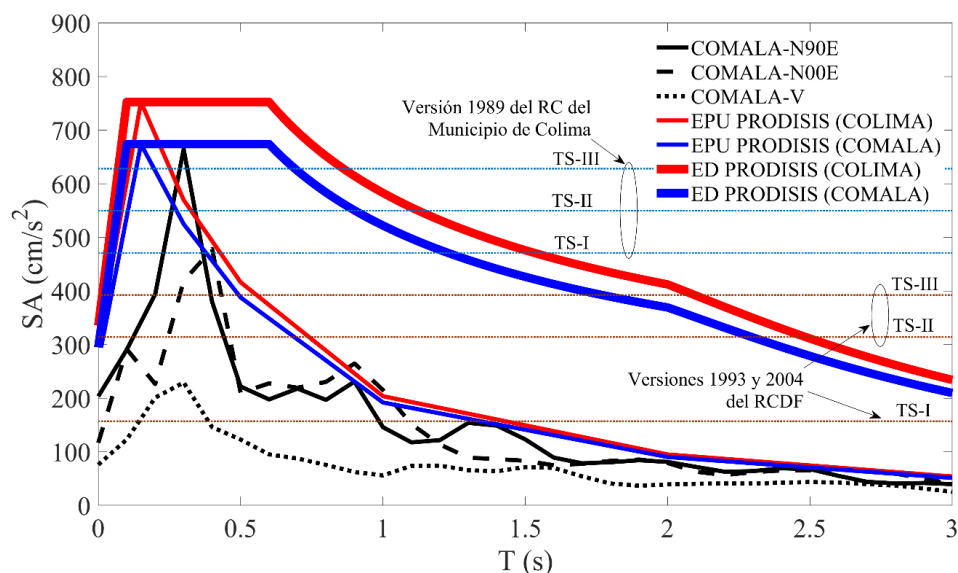


Figura 6.2 Comparación de espectros de diseño, de respuesta y coeficientes de diseño sísmico para el Municipio de Colima (TS = Tipo de suelo)

También se observa en la Figura 6.2, que las ordenadas máximas de los espectros de respuesta de las dos componentes horizontales N90E y N00E de la estación COMALA, correspondientes a los periodos entre 0.3 y 0.4 s respectivamente, son superiores a los coeficientes de diseño sísmico establecidos en

las versiones 1993 y 2004 del RCDF. Lo cual resulta de interés, en los casos en los cuales se hayan considerado los coeficientes de diseño correspondientes a estas versiones del RCDF.

Basado en lo anterior, es claro que el emplear valores de coeficientes sísmicos de diseño de versiones pasadas de reglamentos, así como de valores de coeficientes sísmicos de diseño de otras regiones sísmicas lleva a valores de estimaciones de intensidades sísmicas inadecuados ante eventos sísmicos futuros para la región.

6.2.2. Aspectos estructurales normativos

El Reglamento de Construcciones para el municipio de Colima (2014), en su TÍTULO X incluye los requisitos mínimos para la Seguridad Estructural de las Construcciones, así como Criterios de Diseño Estructural.

En relación con la Seguridad Estructural de Construcción, el Reglamento de Construcciones para el municipio de Colima (2014) indica que la Dirección¹ será la encargada de expedir normas para definir los requisitos específicos de ciertos materiales y sistemas estructurales, así como procedimientos de diseño para los efectos de las distintas acciones y de sus combinaciones, incluyendo tanto las acciones permanentes y las variables, en particular las cargas muertas y vivas, como las acciones accidentales, en particular los efectos de sismo y viento. También, indica que los procedimientos de revisión de la seguridad estructural para construcciones como puentes, túneles, torres, chimeneas y estructuras no convencionales deben ser aprobados por la Dirección. Este reglamento también incluye una clasificación de las estructuras en Grupos.

Dentro de los aspectos más relevantes del Reglamento de Construcciones para el municipio de Colima (2014) en relación con los Criterios de Diseño Estructural se incluye que toda edificación debe contar con un sistema estructural que permita el flujo adecuado de las fuerzas que generan las distintas acciones de diseño, para que dichas fuerzas puedan ser transmitidas de manera continua y eficiente hasta la cimentación. También se indica que las estructuras deben contar con una cimentación que garantice la correcta transmisión de estas fuerzas al subsuelo. Asimismo, se indica que la seguridad de una estructura debe verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente, considerándose dos categorías de combinaciones que se describen en las normas. Además, se incluye la posibilidad de emplear criterios de diseño estructural diferentes de los especificados en el reglamento y en las normas si se justifican, a satisfacción de la Dirección.

En esta versión del reglamento aún se indica que el propietario o poseedor del inmueble es responsable de los perjuicios que ocasione el cambio de uso de una edificación, cuando produzca

¹ De acuerdo con el Reglamento de Construcciones para el municipio de Colima (2014), se entiende por Dirección a la Dirección de Desarrollo Urbano o su equivalente, como dependencia competente en la aplicación de este Reglamento.

cargas muertas o vivas mayores o con una distribución más desfavorable que las del diseño aprobado. También, el propietario o poseedor es responsable de los perjuicios que puedan ser ocasionados por modificaciones a la estructura y al proyecto arquitectónico que modifiquen la respuesta de la estructura ante acciones sísmicas.

Los estados límite considerados en este reglamento se resumen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Estados límite considerados en el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Colima

Estado Límite	Revisión
Falla	Capacidad de carga de la estructura o de cualquiera de sus componentes, incluyendo la cimentación, o al hecho de que ocurran daños irreversibles que afecten significativamente su resistencia ante nuevas aplicaciones de carga.
Servicio	Desplazamientos, agrietamientos, vibraciones o daños que afecten el correcto funcionamiento de la edificación, pero que no perjudiquen su capacidad para soportar cargas. ¹

Notas: (1) Los valores específicos de estos estados límite se definen en las normas

6.3. Aspectos normativos del estado de Michoacán

El estado de Michoacán cuenta con 110 municipios, y por lo tanto con diversos reglamentos de diseño a nivel Municipal. Por su relevancia para el estado, la capital Morelia cuenta con su propio reglamento de construcciones. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones y de los Servicios Urbanos para el municipio de Morelia (2019), en su Capítulo 7. Diseño de las Estructuras, se incluyen los siguientes temas: Estados límites. Acciones, Resistencia, Procedimiento para la evaluación de la seguridad, Cargas muertas, Cargas vivas, Diseño por sismos, Diseño por viento y Cimentaciones.

Como en muchos otros reglamentos de construcciones municipales de México, los aspectos relacionados con el diseño sísmico son también incluidos. Los aspectos generales de Diseño por sismos del Reglamento de Construcciones y de los Servicios Urbanos para el municipio de Morelia (2019) se discuten en la siguiente sección, con énfasis en las fuerzas sísmicas empleadas para diseño.

6.3.1. Aspectos sísmicos

El Capítulo 7, sección 7.7 Diseño por sismos, incluye valores del coeficiente sísmico para el análisis estático de las construcciones clasificadas en el grupo B según su uso, se indica que se deben emplear los valores del coeficiente sísmico que se reproducen en la Tabla 6.3. Con la finalidad de comparar algunos valores de coeficientes sísmicos para otros municipios de Michoacán, en la Tabla 6.3 también se incluyen valores de los reglamentos de los municipios de Nahuatzen (2007), Uruapan (2007) y Zamora (1986).

Se observa en la Tabla 6.3 que, en general, los valores de los coeficientes de diseño empleados en la práctica de diseño sísmico en diversos municipios de Michoacán son similares. Para el caso de

Morelia, los coeficientes sísmicos de diseño son iguales a los propuestos para Uruapan, si se considera la zona sísmica B de la República Mexicana y los tipos I y II de terreno. También se observa que los coeficientes sísmicos para los municipios de Nahuatzen (2007) y Zamora (1986) son los mismos, a pesar de los 21 años de diferencia que existen entre la publicación de ambos reglamentos.

Tabla 6.3 Comparación de coeficientes de diseño sísmico para algunos Municipios de Michoacán

Reglamento	Zona de la República	Tipo de terreno/suelo	C
Versión de 2019 del Reglamento del Municipio de Morelia	----	I. Firme	0.16
	----	II. Compresible	0.20
Versión de 2007 del Reglamento del Municipio de Nahuatzen	----	I	0.10
	----	II	0.20
	----	II	0.25
	A	I	0.08
		II	0.12
		III	0.16
Versión de 2007 del Reglamento del Municipio de Uruapan ¹	B	I	0.16
		II	0.20
		III	0.24
	C	I	0.24
		II	0.30
		III	0.36
Versión de 1986 del Reglamento del Municipio de Zamora	D	I	0.48
		II	0.56
		III	0.64
	----	1	0.10
	----	2	0.20
	----	3	0.25

Notas: (1) El reglamento indica que, para el método general de análisis sísmico de las construcciones, tratado en el artículo 23 se emplearán los coeficientes sísmicos que se reproducen en esta tabla de acuerdo con la zona sísmica y el tipo de terreno

Para todos los municipios incluidos en la Tabla 6.3 el coeficiente sísmico de diseño para suelo tipo II (y Zona de la República B para Uruapan) es el mismo. Resulta interesante resaltar que para algunos municipios se consideran tres tipos de suelo, mientras que para el caso de Morelia sólo se consideran dos. También resalta que, en el reglamento del municipio de Uruapan, se toman en cuenta las zonas sísmicas A, B, C y D de la República Mexicana, para establecer los coeficientes sísmicos de diseño.

Una comparación de los espectros de diseño y de peligro uniforme obtenidos del programa PRODISIS del Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Sismo (MDOC-Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad (2015), de los espectros de respuesta calculados con los registros sísmicos obtenidos de la estación URUAPAN, la cual se localiza en el Jardín de Niños "URUAPAN", ubicado en la calle Characo S/N, Col. INFONAVIT Gandarillas, Uruapan, Michoacán y los coeficientes de diseño sísmico de la Tabla 6.3. La comparación se presenta en la Figura 6.3 y se

emplea escala semilogarítmica para apreciar mejor la variación de los espectros mostrados. Se observa en la Figura 6.3 que, las ordenadas de las intensidades de los espectros de diseño y de peligro uniforme de los Municipios de Morelia y Uruapan, con periodos de retorno de 508 y 491 años, respectivamente, calculado con el programa PRODISIS (CFE, 2015), son considerablemente mayores a las ordenadas de los espectros de respuesta calculados con las componentes del registro de la estación URUAPAN durante el evento del 19 de septiembre de 2022 (M7.7) para todos los periodos estructurales. Resulta interesante observar también que los espectros de peligro uniforme para los Municipios de Morelia y Uruapan presentan una variación de las ordenadas espectrales con un valor máximo cercano a los 0.15 s, y que los espectros de respuesta presentan una variación de la energía en un intervalo amplio de periodos. También se observa en la Figura 6.3 que los valores del coeficiente sísmico de diseño empleados en la práctica en los Municipios de Morelia y Uruapan son sensiblemente menores a aquéllos de los espectros de diseño calculados con PRODISIS (CFE, 2015). Se observa también que el espectro de respuesta para la componente vertical (CV) del registro de la estación URUAPAN presentó valores comparables con aquéllos de las componentes horizontales para periodos cercanos a los 2 s.

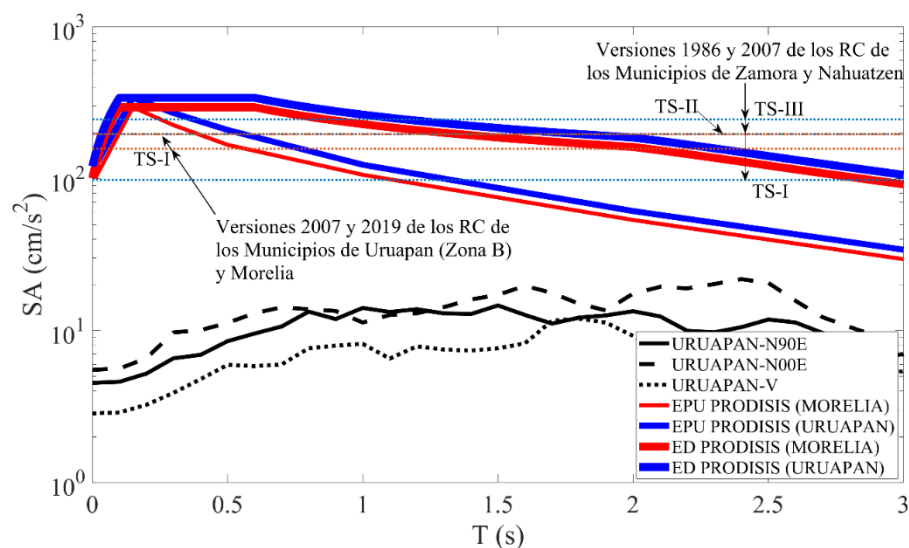


Figura 6.3 Comparación de espectros de diseño, de respuesta y coeficientes de diseño sísmico para algunos Municipios de Michoacán (TS = Tipo de duelo)

Basado en lo anterior, en el caso del estado de Michoacán, es claro que el emplear valores de coeficientes sísmicos de diseño acorde a los esperados en la región conlleva a una mejor estimación de las intensidades de eventos sísmicos futuros en la región.

6.3.2. Aspectos estructurales

El Reglamento de Construcciones para el municipio de Morelia (2019), en su Capítulo 7, Sección Procedimiento para la evaluación de la seguridad, indica que se revisará que las distintas combinaciones de acciones específicas y ante la aparición de cualquier estado límite de falla que pudiera presentarse, la resistencia de diseño sea mayor o igual al efecto de las acciones nominales que intervengan en la combinación de carga en estudio multiplicado por el factor de carga correspondiente. También, indica que se revisará que bajo el efecto de las posibles combinaciones de acciones clasificadas en la categoría I en el apartado 7.2.8 de las normas, no se rebase ningún estado límite de servicio. Cuando una estructura sufra daños en sus elementos por efectos de sismo, viento, explosiones, incendios, exceso de cargas verticales, asentamientos o alguna otra causa, deberá presentarse un proyecto de reparación o de refuerzo a la Secretaría, quien podrá determinar las disposiciones y criterios que deban aplicarse.

Este reglamento indica que se consideran dos categorías de estado límite; los de falla y los de servicio. La Tabla 6.4 presenta un resumen de los estados límite considerados en este reglamento.

Tabla 6.4 Estados límite considerados en el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Morelia

Estado Límite	Revisión
Falla	Se considera que los estados límites corresponden a falla dúctil cuando la capacidad de carga de la sección del elemento estructural en cuestión, se mantenga para deformaciones apreciablemente mayores que las existentes al alcanzarse el estado límite. Se consideran de falla frágil cuando la capacidad de carga de la sección del elemento estructural en cuestión, se reduzca bruscamente al alcanzarse el estado límite. I. Deformaciones. Se considera como estado límite cualquier deformación de la estructura que ocasione daños inaceptables a la propia construcción o a sus vecinas, o que cause interferencia con el funcionamiento de equipos o instalaciones de servicio público adicionalmente se consideran los siguientes límites: a) Una flecha vertical, incluyendo los efectos a largo plazo, igual a 0.5 cm más el claro entre 240 además para miembros cuyas deformaciones afecten elementos no estructurales, como muros de mampostería que no sean capaces de soportar deformaciones apreciables, se considerará como estado límite una deflexión medida después de la colocación de los elementos no estructurales, igual a 0.3 cm más el claro entre 480; y,
Servicio	b) Una deflexión horizontal entre dos niveles sucesivos de una estructura igual al 1/250 de la altura de entre piso, para estructuras que no tengan ligados elementos no estructurales que puedan dañarse con pequeñas deformaciones, e igual a 1/5000 de la altura del entre piso para otros casos. II. Vibraciones. Se considerará como estado límite cualquier vibración que afecte el funcionamiento de la construcción o que produzca molestias o sensación de inseguridad a los ocupantes; y, III. Otros daños. Se considera como estado límite de servicio la ocurrencia de grietas, desprendimientos, estallamientos, torceduras y otros daños locales, que afecten el funcionamiento de la construcción.

Resulta interesante mencionar que la descripción y tipos de estados límite, tanto de falla como de servicio, para este reglamento son más completos que lo indicado en el reglamento del Municipio de Colima aun y cuando en este último municipio las demandas sísmicas son mucho mayores.

6.4. Aspectos normativos de la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con un Reglamento de Construcciones desde el año 1920, que la hace una de las ciudades del país con uno de los reglamentos de construcción más antiguos, lo anterior es probable que se deba a su carácter de capital del país. El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal² (RCDF) ha sido actualizado con cierta regularidad, la Figura 6.4 presenta una representación esquemática de la evolución del RCDF.



Figura 6.4 Evolución del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México. Fuente: *elaborada con información de González-Cuevas, 2022*

² Aunque el Reglamento es aplicable para la Ciudad de México, su denominación sigue siendo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, ya que a la fecha sólo se ha reformado, pero su denominación no cambia. Para que cambie a Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México, se tiene que publicar un nuevo reglamento con ese nombre que abrogue el reglamento actual. Es un tema legal (Aguilar Ortega, 2023).

Se observa en la Figura 6.4 que en la versión del RCDF del año 2017 se han presentado nueve actualizaciones, en algunas de ellas la actualización se debió principalmente a la ocurrencia de sismos importantes, como los de los años 1957 y 1985. Más recientemente, con la ocurrencia del sismo del año 2017, se programó la actualización del RCDF y sus Normas Técnicas Complementarias para finales del año 2023. Se hace notar que, de acuerdo con las nuevas normas de la Ciudad de México para la actualización de códigos y normas, la nueva periodicidad de las actualizaciones se fijó en 6 años. También se observa en la Figura 6.4 que la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo (NTC-Sismo) es una de las normas que ha tenido mayor relevancia en las actualizaciones.

6.4.1. Aspectos sísmicos

De acuerdo con el RCDF (2017), en su Título Sexto acerca de la seguridad estructural de las construcciones se indica que la Secretaría de Obras y Servicios ha expedido un cuerpo de normas en las que se definen los requisitos específicos de ciertos materiales y sistemas estructurales, así como procedimientos de diseño para los efectos de las distintas acciones y de sus combinaciones, incluyendo tanto las acciones permanentes (cargas muertas), las variables, cargas vivas, y las acciones accidentales, en particular los efectos de sismo y viento. Así, son las NTC-Sismo las que incluyen la información técnica mínima que debe considerarse para el diseño sísmico de estructuras.

La versión actual de las NTC-Sismo se publicó en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 9 de junio del año 2020. En su capítulo 3 se discute el tema de Espectros para Diseño Sísmico. En este capítulo 3 se indica que cuando se emplee el método de análisis dinámico modal, las acciones sísmicas de diseño se determinarán a partir de los espectros de diseño contenidos en el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, denominado SASID, para la ubicación específica del predio en estudio. Se incluye también la dirección de internet en la que se accede al programa SASID (<https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>). La Figura 6.5 muestra la interfaz de acceso al programa SASID.

Como resultado de emplear el programa SASID se obtiene el espectro elástico para el sitio de la construcción, así como el afectado por los factores de reducción por comportamiento sísmico, Q' , y por sobrerresistencia, R , que se usa para revisar el estado límite de prevención de colapso.

Con la finalidad de comparar las ordenadas de los espectros de diseño sísmico del programa SASID con los espectros de respuesta de los registros del sismo en estudio obtenidos en algunas de las estaciones acelerográficas del Instituto de Ingeniería de la UNAM (CUP5, SCT B-2 y TACUBAYA), se emplean la ubicación de las estaciones para generar los espectros de diseño con el programa SASID.

Las Figuras 6.6 a 6.8 presentan una comparación de los espectros de diseño sísmico elástico (ED), espectro de servicio (ES), espectro de peligro uniforme (EPU), asociados a un periodo de retorno de 250 años, y espectros de respuesta de aceleración (SA), obtenidos para las estaciones CUP5, SCT B-2 y TACUBAYA, respectivamente. Para contar con una mejor visualización de la variación de los espectros de respuesta, el eje de las ordenadas se presenta en escala logarítmica.

NTCDS-CDMX Acerca de Contacto Registro // Iniciar sesión

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México

⚠ La aplicación hace uso de un componente de mapas web y únicamente funciona con las versiones más actuales de los navegadores.
Por favor no utilice internet explorer o navegadores no actualizados (IE11 mínimo).

El inicio de sesión es necesario
La aplicación es fácil y sencilla de usar

Vaya a la página de registro, [de clic aquí](#)

⚠ Es importante que sus datos estén correctos para brindar un mejor servicio

INICIO DE SESIÓN

✉ Correo:

🔒 Contraseña:

[Inicio](#)

[Registro](#) [¿Olvidó su contraseña?](#)

© 2023 - Aplicación Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (NTCDS-CDMX)

Figura 6.5 Interfaz de acceso al programa SASID (último acceso: 1-febrero-2023)

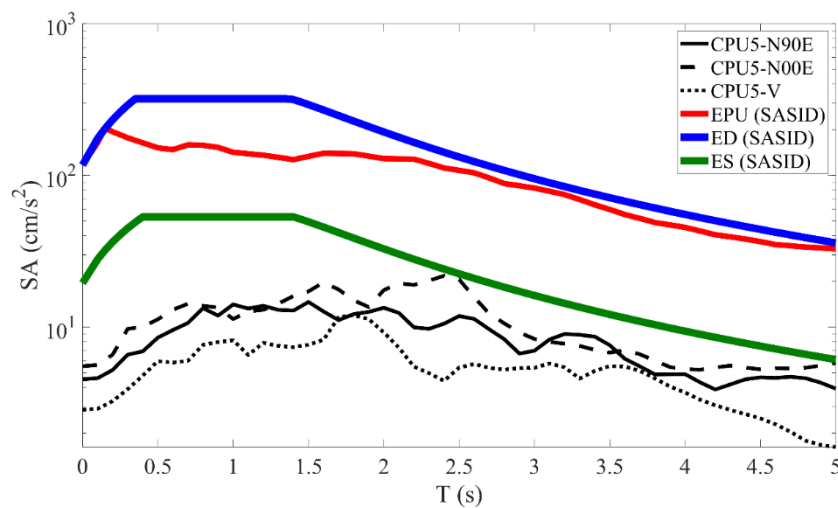


Figura 6.6 Comparación de los espectros ED, ES y EPU con los espectros de respuesta de SA calculados a partir de los registros obtenidos en la estación

Se observa en la Figura 6.6 que las ordenadas de los espectros de diseño elástico y de peligro uniforme son considerablemente mayores a las ordenadas de los espectros de respuesta para todos los periodos. Resulta interesante observar también que las ordenadas del espectro de respuesta para la componente N00E para periodos cercanos a los 2.5 s son similares a aquéllas del espectro de servicio. También se observa que, para algunos periodos de vibrar, las ordenadas del espectro de respuesta de la componente N90E y de la componente CV son similares.

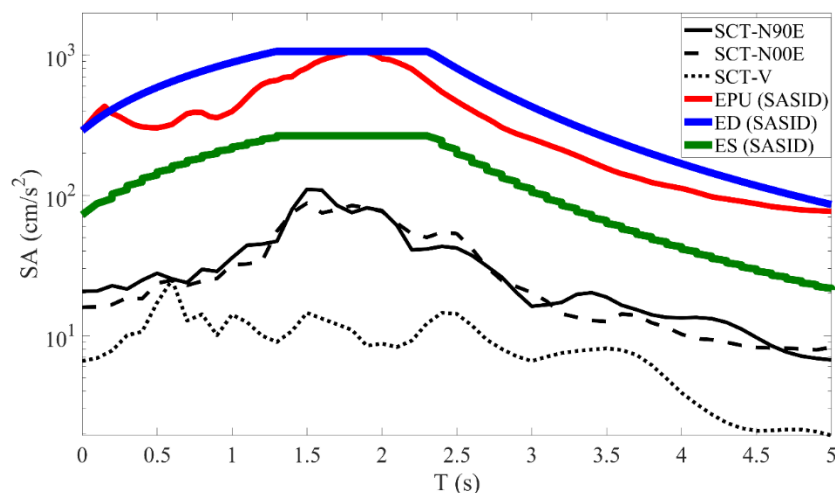


Figura 6.7 Comparación de los espectros ED, ES y EPU con los espectros de respuesta de SA calculados a partir de los registros obtenidos en la estación SCT

Se observa en la Figura 6.7 que las ordenadas de los espectros de diseño elástico, peligro uniforme y de servicio son superiores a aquéllas de los espectros de respuesta para todos los periodos estructurales. También, se observa que las ordenadas del espectro de respuesta de la componente CV son similares a aquéllas de los espectros para ambas componentes horizontales (i.e., N90E y N00E) para periodos de vibrar cercanos a 0.6 s.

Las observaciones hechas para la Figura 6.7 son aplicables a la Figura 6.8, excepto que los periodos de vibrar en donde las ordenadas de los espectros de respuesta son similares se encuentren entre 2 y 3 s.

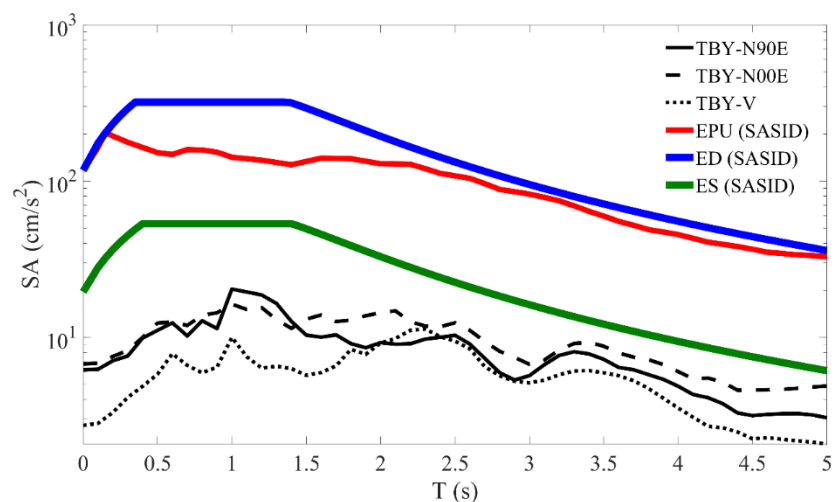


Figura 6.8 Comparación de los espectros ED, ES y EPU con los espectros de respuesta de SA calculados a partir de los registros obtenidos en la estación Tacubaya

6.4.2. Aspectos estructurales

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017), en su Título Sexto de la Seguridad Estructural, Artículo 137 indica que el título Sexto se refiere al proyecto estructural de los edificios comunes. Es importante resaltar esta limitación que se hace en el reglamento, ya que para estructuras no convencionales como puentes, túneles, torres y chimeneas no hay normatividad y por lo tanto se indica que los procedimientos de revisión de la seguridad estructural para esas estructuras deben ser aprobados por la Secretaría de Obras y Servicios.

En el Capítulo III de los Criterios de Diseño Estructural se indica que toda edificación debe contar con un sistema estructural que permita el flujo adecuado de las fuerzas que generan las distintas acciones de diseño, para que dichas fuerzas puedan ser transmitidas de manera continua y eficiente hasta la cimentación. Debe contar además con una cimentación que garantice la correcta transmisión de dichas fuerzas al subsuelo considerando las condiciones en materia de hundimientos, emersiones, agrietamientos del subsuelo, oquedades o galerías de minas. También se indica que en el diseño de toda estructura deben tomarse en cuenta los efectos de las cargas muertas, de las cargas vivas, del sismo, del viento cuando este último sea significativo. Las intensidades de estas acciones y sus combinaciones habrán de considerarse en el diseño y la forma en que deben calcularse sus efectos se especifican en las Normas correspondientes, que la seguridad de una estructura debe verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente, considerándose dos categorías de combinaciones que se describen en las Normas.

También se indica que se podrán emplear criterios de diseño estructural diferentes de los especificados en este Capítulo III y en las Normas si se justifica, a satisfacción del Instituto para la Seguridad de las Construcciones (ISC), que los procedimientos de diseño empleados dan lugar a niveles de seguridad no menores que los que se obtengan empleando los previstos en el Reglamento. Resulta interesante mencionar que es la primera vez que aparece la Figura de Instituto³ en el RCDF.

Se imponen también dos condiciones para el diseño de toda estructura y cada una de sus partes, las condiciones son:

- I. Tener seguridad adecuada contra la aparición de todo estado límite de falla posible ante las combinaciones de acciones más desfavorables que puedan presentarse durante su vida esperada.
- II. No rebasar ningún estado límite de servicio ante combinaciones de acciones que corresponden a condiciones normales de operación.

Los estados límite considerados en este reglamento se resumen en la Tabla 6.5.

³ Se refiere al Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México. Es la primera vez que, en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en el Artículo 2 de Disposiciones Generales aparece la figura del Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México (González Cuevas, 2022).

Tabla 6.5 Estados límite considerados en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal

Estado Límite	Revisión
Falla	Las Normas establecerán los estados límite de falla más importantes para cada material y tipo de estructura
Servicio	Desplazamientos, agrietamientos, vibraciones o daños que afecten el correcto funcionamiento de la edificación, pero que no perjudiquen su capacidad para soportar cargas. ¹

Notas: (1) Los valores específicos de estos estados límite se definen en las normas

6.5. Discusión

Con relación a los aspectos normativos de diseño sísmico y estructural que se han comentado en este capítulo, y que se han enfocado en reglamentos de construcción en los municipios de estados de Colima, Michoacán y en la Ciudad de México, destacan los siguientes aspectos:

La reglamentación para la Ciudad de México, que existe desde 1920 y que ha sido continuamente actualizada a partir de 1985, es el modelo que se intenta seguir para establecer las reglamentaciones en diferentes estados y municipios de la república mexicana, en cuanto a diseño sísmico y estructural. Sin embargo, las comparaciones realizadas en este capítulo entorno a los coeficientes de diseño utilizados, y los espectros de diseño y de peligro uniforme que se pueden obtener con las herramientas tecnológicas actuales, muestran que su potencial debe ser adecuadamente utilizado. Por ejemplo:

- Los espectros de diseño que se obtienen mediante PRODISIS en el estado de Colima, son los que presentan los coeficientes sísmicos mayores. Bajo este escenario y con relación a los espectros de respuesta obtenidos, se aprecia que en general estructuras rígidas, y no de altura considerable, pudieron ser las más afectadas, sobre todo aquellas con periodos entre los 0.3 y 0.4 s. También y de manera más precisa, los espectros de peligro uniforme indican que, coeficientes de diseño más altos, se concentran en un periodo alrededor de los 0.2 s. Si estas herramientas son utilizadas, lo anterior conllevaría a diseños estructurales en los cuales las fuerzas sísmicas sean mayores a las consideradas de acuerdo a lo que indica la práctica del diseño estructural actual en ese estado.
- Para establecer reglamentaciones de diseño y construcción de estructuras propio de cada municipio o región en las principales zonas que se ven afectadas por la actividad sísmica en nuestro país, se requiere un trabajo extenso y profundo. En este sentido habría varios objetivos a cumplir, siendo uno de los principales, el poder conformar normas que sean reflejo de los efectos de sitio, de la calidad de los materiales y de los procesos constructivos de municipios, estados o regiones específicas. Lo anterior, sumado a esfuerzos encaminados por hacer reglamentos de construcción más atractivos para su entendimiento y aplicación, podría verse reflejado en el incremento de la construcción de estructuras que cumplan las normas, sin sacrificar aspectos relacionados con la economía y la seguridad.

En años recientes se ha evidenciado el uso y abuso de configuraciones estructurales (*e.g.*, piso débil, irregularidad en planta y elevación) que en muchos casos no se han tomado en cuenta en el análisis, siendo esto más evidente en edificaciones donde se permite el uso del método sísmico estático y del método simplificado. Esto es muy evidente y prácticamente generalizado en estructuras modernas para dar cabida al espacio de estacionamiento en planta baja. Se han identificado elementos no estructurales interactuando con la estructura, modificando sensiblemente su comportamiento estructural. Dado lo anterior, las edificaciones podrían presentar un comportamiento estructural inadecuado lo que pone en peligro la seguridad del inmueble y de sus habitantes, aún de edificios que tradicionalmente se han comportado bien como aquellos de vivienda de mampostería confinada. Por lo anterior, se debe realizar una revisión de las medidas que tienen los Reglamentos de las Construcciones de los municipios de estados de Colima y Michoacán que limiten estas prácticas, sobre todo para edificaciones con irregularidades en elevación y planta donde se permite el uso del método sísmico estático y del método simplificado.

Hay que tener en cuenta el daño estructural se sigue concentrando en edificaciones unifamiliares para vivienda, las cuales se construyen por autoconstrucción. Para el caso de escuelas, se trata de escuelas de un nivel cuyo sistema estructural es a base de muros de mampostería, los cuales pudieron tener degradación en sus materiales. Para el caso de hospitales, el daño se concentra en elementos no estructurales.

En países como Estados Unidos de América, Japón y Chile y recientemente la Ciudad de México tienen un “adecuado” sistema para el cumplimiento del reglamento de construcciones. En estos países y ciudades existen instituciones (*e.g.*, Sección de Seguridad Estructural de la División del Arquitecto del Estado en su sigla en inglés DSA/SSS en California, el Instituto de la Construcción en Chile, el Japan Building Center en Japón y el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México) que se encargan de supervisar la seguridad estructural y sísmica de edificios. Sin embargo, para lograr tal seguridad, una tarea enorme, se requiere de una apropiada comunicación entre cada uno de los participantes, de métodos bien desarrollados y prácticos, de competencia profesional y de dedicación. Se trata de revisar que los planos, memorias de cálculos y especificaciones finales de la edificación cumplan estrictamente con el reglamento de construcciones vigente y supervisar que los edificios sean contruidos con apego a los documentos aprobados. En el municipio de Colima son la Dirección General de Desarrollo Urbano, Ecología y Vivienda y la Dirección de Desarrollo Urbano o su equivalente, las dependencias competentes en la aplicación de este Reglamento. Asimismo, de acuerdo con el Reglamento de Construcciones y Servicios urbanos de Morelia, el cumplimiento de las Normas Técnicas Complementarias queda bajo la responsabilidad de los propietarios de los predios en los que se realiza la construcción y/o de los Directores Responsables de Obra y de los Corresponsables, en su caso. Para los casos de los municipios de estados de Colima y Michoacán, la seguridad y cumplimiento del Reglamento de Construcciones y demás disposiciones están a cargo de un profesional (*e.g.*, el Director Responsable de Obra, el Corresponsable en Seguridad Estructural). Es deseable que, en los municipios de estados de Colima y Michoacán, exista una institución que como mínimo proporcione los servicios siguientes: 1) Una revisión verdaderamente independiente del diseño

estructural, 2) Una supervisión estricta e independiente de los procesos constructivos y 3) Medidas que eviten conflictos de interés en las diferentes etapas del diseño y construcción. Por ejemplo, a pesar de que el Reglamento de Construcciones para algunos municipios del estado de Michoacán parece adecuado, se podrían estar construyendo edificaciones al margen de lo indicado en él, ya que los profesionales que se encargan del diseño y construcción de edificios en ocasiones no lo aplican adecuadamente o con criterios erróneos (*e.g.*, uso de coeficientes de diseño sísmico no adecuados para la región de estudio). En varios casos podría no existir información clara y confiable para conocer la seguridad que guarda la edificación. En opinión de los autores, es necesaria una institución autónoma que haga una revisión verdaderamente independiente del diseño que verifique que los criterios y procedimientos utilizados sean compatibles con lo que marca el reglamento de construcciones y sus normas técnicas vigentes en los municipios de los estados de Colima y Michoacán.

Para el caso del estado de Michoacán, debe tenerse en cuenta que numerosas construcciones para vivienda son resultado de la autoconstrucción, con deficiente supervisión técnica, con sistemas estructural a base de muros de mampostería con deficiente confinamiento, o de adobe. Existe evidencia de edificaciones para vivienda con irregularidad en elevación, que fomentaba la formación de una planta baja débil, cuyas columnas de concreto exhibían un detallado no dúctil. Para el caso de las escuelas, existe evidencia del buen comportamiento de este tipo de estructuras que contaban con muros, ya sea incorporados como refuerzo o en la estructura original. Un aspecto importante para fines de normatividad sería la evaluación de demandas de aceleración, dado que muchos componentes no-estructurales en hospitales son susceptibles a esta demanda sísmica.

Para el caso de la Ciudad de México, las intensidades sísmicas del sismo del 19 de septiembre de 2022 (M7.7) parecen no rebasar aquéllas indicadas en la normatividad asociadas al estado límite de limitación de daño. Esto significa que se espera que las edificaciones diseñadas bajo este criterio tengan una ocupación inmediata bajo sismos de ocurren varias veces durante la vida útil de la construcción. Los daños reportados por el Gobierno de la Ciudad de México, principalmente de daños ligeros, parecen confirmar lo anterior. Aunado a lo anterior, parece que los daños fueron en edificaciones con algún daño previo de sismos pasados ya sea del 2017 o con daños del sismo de 1985 y 2017. Este sismo de 2022 fue una prueba para el estado límite de servicio *i.e.*, ocupación inmediata de los inmuebles en la Ciudad de México.

6.6. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del M.I. Rigo Nava González en el desarrollo de los espectros de servicio para la Ciudad de México. También, agradecemos a la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería por proveer los registros sísmicos de las estaciones CUP5, SCT y TACUBAYA.

6.7. Referencias

- Aguilar Ortega, P. A. (2023). Comunicación personal.
- Ayuntamiento Constitucional de Colima. (1989). Reglamento de Construcciones para el Municipio de Colima.
- Ayuntamiento Constitucional de Zamora, Michoacán. (1986). Reglamento de Construcciones para el Municipio de Zamora, Michoacán.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023). Último acceso: 1 de febrero de 2023. Disponible en: <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/que-es-un-reglamento-de-construccion?idiom=es>
- Comisión Federal de Electricidad. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles – Capítulo Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- Diario Oficial de la Federación. (1993). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con Comentarios.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.
- Gobierno Municipal H. Ayuntamiento Constitucional de Colima, Col. (2014). Reglamento de Construcciones para el municipio de Colima. Último acceso: 1 de febrero de 2023. Disponible en: http://ipco.gob.mx/ipco/transparencia/fl/marconormativo/reglamentos/reglamento_construccion_municipio_o_colima.pdf
- González Cuevas, O.M., (2022). Una revisita en su centenario a los reglamentos de construcción de la Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo. (2019). Reglamento de Construcciones y de los Servicios Urbanos para el Municipio de Morelia.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo. (2011). Reglamento de Construcción del Municipio de Uruapan.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo. H. Ayuntamiento Constitucional de Nahuatzen, Mich. (2004). Reglamento de Construcción y Servicios Municipales.
- Ruiz García, J., & Ramos Cruz, J. M. 2022). El sismo de Coalcomán, Michoacán, del 19 de septiembre de 2022 (M7.7), Informe Virtual Preliminar 23-09-2022. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería Civil.
- Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID). Último acceso: 2 de febrero de 2023. <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX>

7. Comportamiento de edificios instrumentados

M.I. Baruo Daniel Aldama Sánchez
II-UNAM
baldamas@iingen.unam.mx

Dr. Miguel Ángel García Illescas
II-UNAM
mgarciai@iingen.unam.mx

Dr. David Murià Vila
II-UNAM
dmv@pumas.ii.unam.mx

Dr. Leonardo Ramírez Guzmán
II-UNAM
lr Ramirezg@iingen.unam.mx

7.1. Introducción

En México la instrumentación sísmica en edificios tuvo un primer intento con la Torre Latinoamericana (Zeervaert, 1960 y 1962), registrándose los sismos de julio de 1957 y mayo de 1962. La información derivada fue clave para establecer los coeficientes sísmicos del reglamento de construcciones de aquel entonces, aunque, al ocurrir el sismo de septiembre de 1985 no se contó con ningún registro. Lo anterior evidenció la necesidad de datos experimentales que sirvieran para tener una mejor comprensión de los fenómenos ligados al comportamiento estructural. Con la participación del Centro Instrumentación y Registros Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra (CIRES), la instrumentación sísmica de edificios en la Ciudad de México se retoma formalmente a partir de 1987 y en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) esto ocurre con el inicio de operaciones de dos redes acelerométricas en dos edificios (Murià Vila et al, 1992; Murià-Vila et al, 1993a y 1993b). Lo anterior ayudó a realizar investigaciones sustentadas en información de registros reales, propiciando la necesidad de instrumentar edificios más representativos de diferentes poblaciones del país. Actualmente, en México se estima que los edificios instrumentados no exceden de algunas decenas, aunque el número exacto se desconoce (Murià-Vila, 2007), lo cual resulta insuficiente desde el punto de vista de mitigación de riesgos.

En más de 30 años de estudios, se han analizado con detalle las respuestas registradas de más de siete edificios instrumentados (Murià-Vila, 2007). Destacando los resultados de tres edificios de concreto reforzado, dos desplantados en suelos blandos de la Ciudad de México y uno en la zona de suelo blando de la Ciudad de Acapulco (Murià-Vila et al, 2021). Estos tres edificios instrumentados cuentan con registros sísmicos que permiten evaluar y dar seguimiento a su respuesta dinámica global, incluyendo la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) (Murià-Vila, 2007).

Cuando tuvo lugar el sismo Mw7.7 del 19 de septiembre de 2022, los edificios monitoreados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Murià-Vila, 2007) registraron el evento. En los días posteriores, el 22 de septiembre de 2022, se registró una réplica con Mw6.9. En la Ciudad de México, las intensidades de estos eventos fueron moderadas y se lograron registrar gracias a la red acelerométrica instalada en los edificios, por lo que fue posible estudiar y comparar sus efectos apoyándose con análisis y resultados históricos de estas estructuras. Las secciones siguientes se resumen y discuten los principales resultados de los análisis de los registros sísmicos incluyendo el sismo del 19 septiembre de 2022, esto permitirá determinar los cambios que han experimentado en sus propiedades dinámicas desde su origen, como consecuencia de sismos moderados. Este capítulo tiene como fin coadyuvar a la comprensión del estudio la respuesta dinámica en estructuras instrumentadas que al exponerse a sismos poco frecuentes puede conducir a un comportamiento que, a largo plazo, sea desfavorable; por lo que, la adecuada aplicación de un sistema de monitoreo facilita la interpretación de la información y contribuye a establecer estrategias de mantenimiento oportunas.

7.2. Edificios Instrumentados

Actualmente, el número de estructuras instrumentadas está cambiando, principalmente en la Ciudad de México, esto debido a la adición de un nuevo artículo aprobado en la versión del reglamento de construcciones en diciembre de 2017 (RCCD, 2017), de acuerdo con este documento, todas las estructuras más importantes (Grupo A o Subgrupo B1) desplantadas en la zona de lago (suelo blando) deberán instrumentarse mediante acelerógrafos. Debido a ello, el número exacto de estructuras instrumentadas, hasta el momento, se desconoce ya que no se está llevando a cabo un adecuado control y registro.

Los edificios que se presentan en este capítulo son aquellos que están a cargo del IIUNAM, que registraron los sismos de septiembre de 2022 y que cuentan con registros de eventos previos y posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2022. En la Figura 7.1 aparece la localización de los dos edificios ubicados en la Ciudad de México y el de la ciudad de Acapulco.

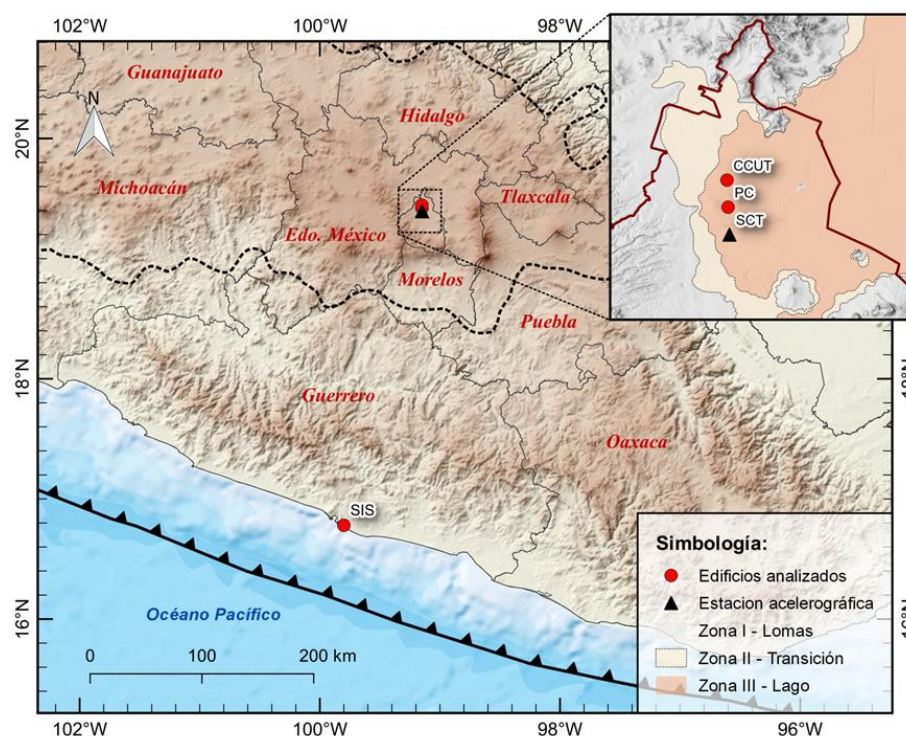


Figura 7.1 Localización de los edificios analizados en la Ciudad de México y la costa de Acapulco

Los dos edificios de la Ciudad de México se localizan en la zona de suelo blando, uno construido en 1964 (edificio CCUT) y el segundo entre 1980 y 1984 (edificio PC), ambos afectados por el sismo de Michoacán de del 19 de septiembre de 1985. El otro edificio, denominado SIS, fue construido en el año 2000 y se encuentra ubicado en la zona de suelo blando de la ciudad de Acapulco.

7.2.1. Monitoreo y Sistema de Alerta

En estos tres edificios se ha implementado un sistema de monitoreo de salud estructural que incluye una alerta estructural con la cual se evalúan dos indicadores de severidad sísmica y tres de desempeño estructural. El uso de múltiples indicadores permite tener redundancia en la estimación del estado físico del edificio, cuando el cálculo de alguno de ellos puede verse afectado, por ejemplo, por la calidad de las señales. Los primeros indicadores son la aceleración máxima horizontal del terreno ($A_{\max}$) y la intensidad de Arias horizontal ($I_{h-Arias}$) (Arias, 1970). Los otros tres son el coeficiente sísmico (C_s), la distorsión de entrepiso (DE) y la variación de la frecuencia fundamental de vibración de los componentes horizontales (VF) identificada en el tramo final de pequeña amplitud de los registros. La alerta estructural genera un informe automático, en cuestión de minutos, sobre el desempeño del edificio. Esto permite estimar su probable estado físico al dar seguimiento al cambio en sus propiedades dinámicas, así como su respuesta estructural ante los eventos sísmicos registrados.

En el análisis y el procesamiento de los registros sísmicos se emplean los sistemas de monitoreo de la salud estructural y de alerta estructural “AlertaE” con una versión actualizada en 2021 para estimar su posible estado físico (Aldama-Sánchez *et al*, 2021). En esta nueva versión se implementó el método de subespacios N4SID recursivo (Van Overschee y De Moor, 1994; Oku y Kimura, 1999) para identificar las frecuencias fundamentales de vibración en los componentes de L, T y torsión, y se le asigna al indicador de distorsión de entrepiso igual peso que al indicador de variación de frecuencia para la estimación del posible estado físico de los edificios.

La condición estructural del edificio se establece ponderando los cinco indicadores descritos anteriormente, por medio un sistema de reglas lógicas (Zadeh, 1965; Mamdani, 1976), basadas en cuatro colores: Verde, cuando VF, DE, $A_{\max}$, $I_{h-Arias}$ y C_s corresponden al nivel 1. Amarillo, cuando VF o DE o dos de los indicadores restantes corresponden al nivel 2. Naranja (inspección de edificio) cuando VF o DE corresponden a nivel 3 y al menos uno de los indicadores restantes es nivel 2, o VF es nivel 2 y uno de los otros indicadores es nivel 3. El estado naranja, requiere urgentemente inspeccionar el edificio para excluir el estado rojo. Rojo, se establece cuando la inspección sugiere evacuar el edificio. Los umbrales para determinar esta clasificación para los tres edificios son los que aparecen en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Umbrales de la alerta estructural de los edificios PC, CCUT y SIS

Edificio	Nivel	$A_{\max}$ cm/s ²	$I_{h-Arias}$ cm/s	C_s	DE %	VF%
PC	1	0-15	0-5	0-0.03	0-0.15	0-7
	2	15-130	5-140	0.03-0.16	0.15-0.6	7-25
	3	>130	>140	>0.16	>0.6	>25
CCUT	1	0-15	0-5	0-0.03	0-0.12	0-7
	2	15-130	5-140	0.03-0.16	0.12-0.6	7-25
	3	>130	>140	>0.16	>0.6	>25
SIS	1	0-108	0-50	0-0.05	0-0.10	0-10
	2	108-338	50-645	0.05-0.19	0.10-0.6	10-35
	3	>338	>645	>0.19	>0.6	>35

El edificio PC cuenta con una instrumentación con el fin de monitorear su desempeño estructural que ha operado satisfactoriamente por más tiempo al de su vida útil, ya actualmente lleva 33 años. En septiembre de 1989 quedó instrumentado con una red acelerográfica compuesta por 11 acelerómetros triaxiales, y en 1999 se incrementó con un acelerómetro triaxial en la base de la estructura y otro más en el jardín colindante (Murià Vila *et al.*, 2018c). Con esta red se han registrado un gran número de temblores, de los cuáles se han analizado hasta la fecha 35 eventos.

Las inspecciones realizadas después de los eventos sísmicos de intensidad moderada, incluyendo el sismo del 19 de septiembre de 2022, e intensidad alta registrados revelaron daños en elementos no estructurales de fachada, muros divisorios y aplanados, y reapertura de grietas. El sismo del 19 de septiembre de 2017 es el que produjo una mayor afectación de una manera más generalizada, pero el tipo de daño es similar al que se evidenció después de los sismos moderados previos.

7.2.3. Edificio CCUT (Ciudad de México)

El edificio consta de una torre de 22 niveles y de tres cuerpos bajos de tres niveles con un sótano en común. Está localizado en la zona de lago con periodos dominantes entre 1.5 y 2 s. En 1964 fue concluido y desde un inicio presentó problemas de asentamientos diferenciales y desplomos en la dirección SO de la torre, así como emersiones en los cuerpos bajos. El sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 provocó daños en las vigas de acoplamiento y en las columnas de la fachada este, así como daños severos en los muros de mampostería y desprendimiento de recubrimientos. Para controlar estos problemas se han realizado cuatro recimentaciones en diferentes años y dos rehabilitaciones de la estructura de la torre. La última rehabilitación fue en 2009, y consistió en rigidizar la torre con diagonales de acero en la dirección transversal, añadiendo cruces de acero como contravientos en tres distintos niveles, y en el reforzamiento de varias vigas de acoplamiento con mallas de fibra de carbono. Además, en la base de la torre en el lado sur, ampliada en 1987, se añadieron 36 pilotes de control y se construyeron muros en la dirección T de concreto reforzado entre el sótano de la torre y el cuerpo bajo del lado norte.

Después de su última rehabilitación y ante el primer sismo de gran intensidad registrado en el edificio, las afectaciones fueron esencialmente en elementos no estructurales, en muros de mampostería con reapertura de grietas previamente consolidadas por daños de sismos anteriores, reapertura de grietas en elementos originales, grietas adicionales en vigas de acoplamiento, algunos agrietamientos y aplastamientos del material de relleno en algunas conexiones de los contravientos metálicos y la aparición de unas pequeñas grietas adicionales en las vigas de acoplamiento. En la cimentación se evidenciaron alrededor del edificio movimientos relativos de la cimentación con el suelo, así como aplastamiento de algunos cubos de caobilla y una ligera inclinación del cabezal en cuatro de los sistemas de control de pilotes.

Para monitorear la respuesta estructural y evaluar el desempeño esperado del edificio se instaló una instrumentación para registrar eventos sísmicos. La instrumentación que opera desde diciembre de 2008 consiste en una red de 28 servo-acelerómetros uniaxiales de alta resolución ubicados en

diferentes puntos del edificio, el terreno circundante y el subsuelo, así como de un sistema GPS de alta resolución para medir los desplazamientos relativos entre la azotea y la base (Murià-Vila *et al.*, 2018a) como se muestra en la Figura 7.3. La resolución de los acelerómetros es adecuada para registrar tanto la vibración ambiental como movimientos sísmicos de gran intensidad. En un periodo de cerca de 14 años se han analizado los registros de 29 eventos sísmicos.

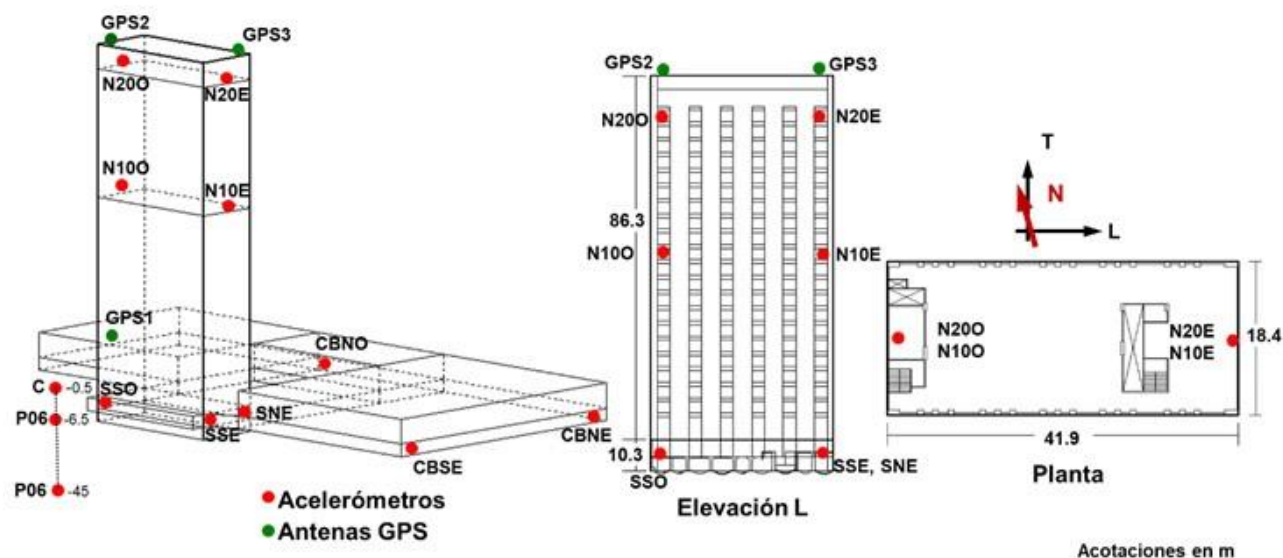


Figura 7.3 Edificio CCUT y su instrumentación

7.2.4. Edificio SIS (Acapulco, Guerrero)

El edificio cuenta con una estructura de concreto reforzado con 16 niveles y un semisótano como estacionamiento. La planta del semisótano mide 32.4 m en dirección longitudinal (L) y 36.4 m en dirección transversal (T), mientras que la planta de los niveles restantes es de 23.4 por 24.6 m (Figura 7.4). El semisótano tiene una altura de entrepiso de 2.9 m y está desplantado a una profundidad de 0.8 m. La altura total del edificio es de 86 m. La estructura de concreto reforzado se compone de marcos y muros unidos a losas macizas con espesores de 10 y 12 cm que están construidas monolíticamente con las vigas perimetrales de 90 cm de peralte. Las columnas en general tienen forma rectangular, aunque algunas son de secciones en T o L. Los muros de concreto se ubican en la dirección L, y los muros estructurales de mampostería en ambas direcciones. La cimentación está compuesta por muros de concreto reforzado en los costados norte, este y oriente del sótano, contratraveses de 2 m de peralte y 30 pilas de fricción con secciones circulares de 1 a 1.6 m de diámetro y de 12.5 m de longitud.

Los sismos que han producido daño al edificio han sido el del 21 de agosto de 2013 y 7 de septiembre de 2021, cuyos epicentros fueron a menos de 40 km del edificio. Con los sismos del 19 septiembre de 2017 y de 2022 no hubo afectación en el edificio. El sismo más intenso que ha afectado

al edificio fue el del 7 de septiembre de 2021 y que desafortunadamente no fue registrado por una falla de la red la red acelerométrica, se estima que el evento fue de alta intensidad por los registros de la red acelerométrica de Acapulco que disponen el CIRES y el IIUNAM.

La instrumentación fue instalada a finales del año 2001. Está compuesta de una red de 18 servoacelerómetros uniaxiales y dos triaxiales. La ubicación y orientación de los sensores se muestra en la Figura 7.4. Los sensores están interconectados en una configuración maestro-esclavo, en la que, al superar cierto umbral de aceleración, el sensor maestro activa la operación simultánea de la red. La resolución de la instrumentación es tal que permite registrar desde vibraciones ambientales hasta sismos de gran intensidad. En un periodo de cerca de 22 años se han analizado los registros de más de 38 eventos sísmicos.

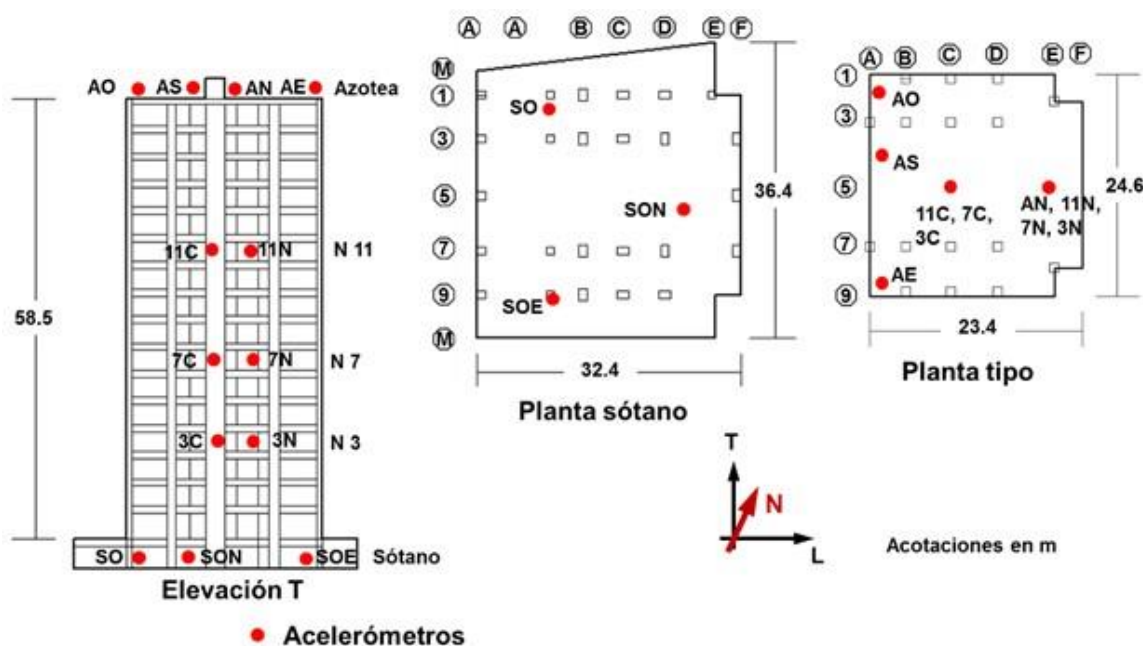


Figura 7.4 Edificio SIS y su instrumentación

7.3. Registros Sísmicos

Los movimientos producidos por el 19 de septiembre de 2022 se percibieron en las ciudades de México y Acapulco con intensidades que fueron moderadas y bajas, respectivamente. En el Edificio SIS no se cuenta con registros completos del 19 de septiembre de 2022 porque hubo problemas en la energía que afectó parcialmente el registro de algunos acelerómetros de su red. Ahora bien, en los tres edificios se han registrado las respuestas de eventos previos y posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2022 y que se consideran para el análisis del desempeño de los edificios.

Los acelerogramas de los componentes horizontales de azotea, así como los del terreno, o en ausencia de éste, el de la base obtenidos del sismo del 19 de septiembre de 2022 para los edificios de las ciudades de México y Acapulco se comparan en las Figuras 7.5 a 7.7. En la Tabla 7.2 se muestran los principales datos estimados a partir de los registros sísmicos de los edificios, y en la Tabla 7.3 aparecen sus características principales.

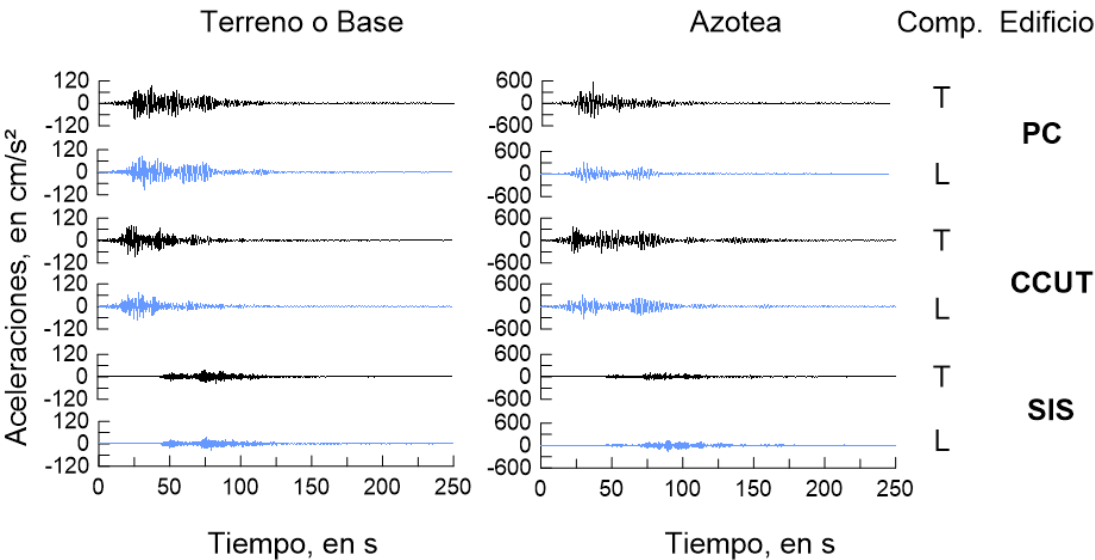


Figura 7.5 Acelerogramas del sismo de 19 de septiembre de 2017 registrados en la azotea y la base o el terreno de cada edificio. El componente T corresponde a la menor dimensión en planta y el componente L a la mayor.

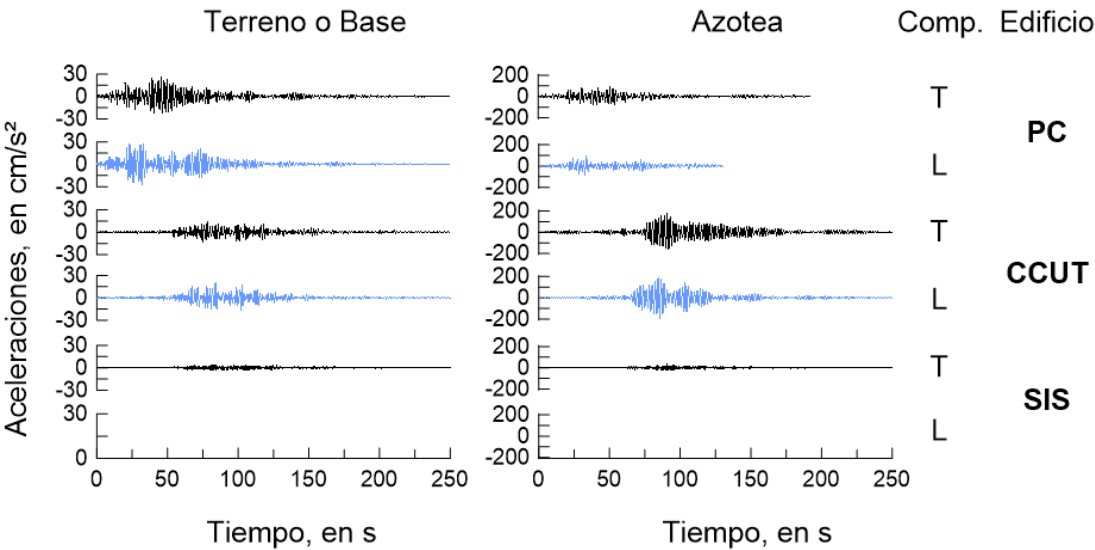


Figura 7.6 Acelerogramas del sismo de 19 de septiembre de 2022 registrados en la azotea y la base o el terreno de cada edificio. El componente T corresponde a la menor dimensión en planta y el componente L a la mayor

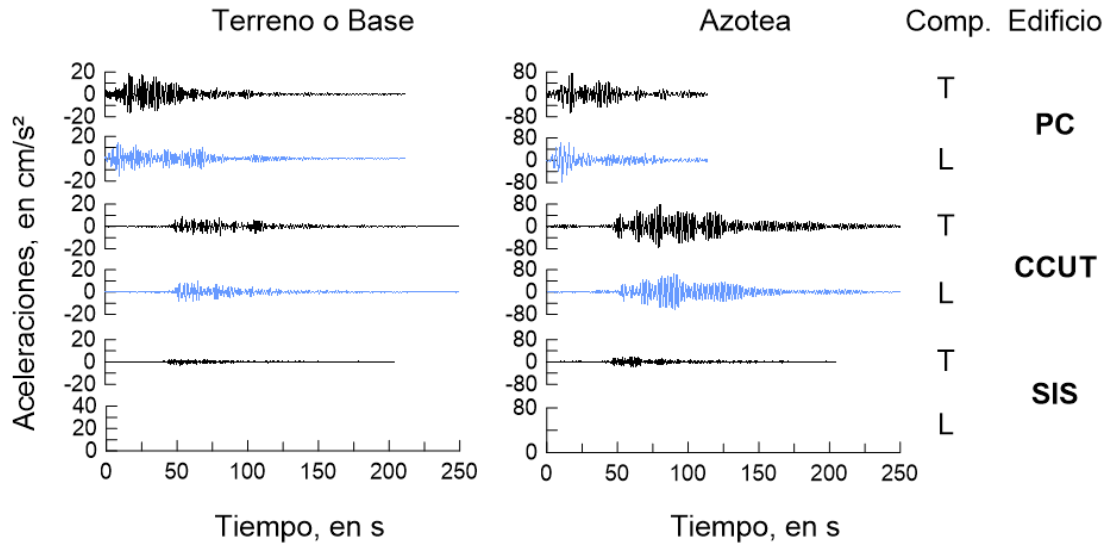


Figura 7.7 Acelerogramas del sismo de 22 de septiembre de 2022 registrados en la azotea y la base o el terreno de cada edificio. El componente T corresponde a la menor dimensión en planta y el componente L a la mayor

Tabla 7.2 Indicadores estimados a partir de los registros sísmicos de los edificios

Edificio	Fecha	A _{máx} , en Gal	V _{máx} , en cm/s	D _{máx} , en cm	A _{e-máx} , en Gal		D _{e-máx} , en cm		DE _{máx} , en %		Ts, en s	f _e , en Hz			f _{ef} , en Hz		Vf _{ef} , en %		P/n	
					L	T	L	T	L	T		L	T	R	L	T	L	T	L	T
PC	31/05/90	7	2	0.9	35	39	4.6	6.3	0.07	0.10	0.42-0.52	0.38-0.39	0.39	0.48	0.39	0.39	0	0	0.15	0.15
	30/09/99	27	8	3.3	114	220	16.5	23.5	0.23	0.31		0.34-0.37	0.35-0.36	0.41-0.43	0.37	0.36	-6	-6	0.16	0.16
	20/03/12	43	10	3.6	127	148	17	16	0.28	0.30		0.34-0.38	0.34-0.37	0.42-0.44	0.38	0.37	-4	-5	0.16	0.16
	07/09/17	31	11	4.7	150	128	14.6	16.3	0.27	0.26		0.35-0.37	0.34-0.36	0.42-0.44	0.37	0.36	-6	-7	0.16	0.16
	19/09/17	98	27	8.4	313	571	29.8	35.0	0.61	0.53		0.32-0.34	0.31-0.35	0.38-0.41	0.34	0.35	-13	-10	0.17	0.17
	23/09/17	3	1	0.3	8	11	1.0	1.2	0.02	0.02		0.37-0.38	0.35-0.37	0.43-0.44	0.38	0.37	-4	-5	0.16	0.16
	16/02/18	30	9	3.1	150	69	15.9	8.0	0.31	0.12		0.31-0.34	0.33-0.35	0.40-0.41	0.34	0.35	-12	-11	0.17	0.17
	23/06/20	46	16	5.6	99	205	10.3	20.6	0.22	0.42		0.30-0.33	0.32-0.36	0.40-0.43	0.34	0.34	-14	-12	0.17	0.17
	07/09/21	40	10	3.7	122	132	12.0	16.2	0.27	0.30		0.32-0.36	0.33-0.36	0.38-0.41	0.35	0.34	-11	-12	0.17	0.17
	19/09/22	28	9	3.5	102	87	10.9	11.1	0.23	0.19		0.31-0.34	0.32-0.34	0.39-0.43	0.33	0.34	-16	-12	0.18	0.17
CCUT	22/09/22	19	6	2.2	79	76	12.8	9.2	0.21	0.15		0.31-0.33	0.32-0.34	0.39-0.42	0.34	0.34	-14	-12	0.17	0.17
	25/02/11	1	0.2	0.1	5	7	0.3	0.5	0.00	0.01	0.50-0.66	0.68	0.59	1.08-1.12	0.68	0.59	0	0	0.07	0.08
	20/03/12	32	9	2.9	176	163	16.3	14	0.19	0.16		0.51-0.59	0.50-0.56	0.81-0.96	0.59	0.56	-13	-6	0.08	0.08
	07/09/17	22	7	3.1	157	104	15.4	9.3	0.18	0.10		0.50-0.58	0.50-0.56	0.85-0.96	0.58	0.56	-14	-6	0.08	0.08
	19/09/17	86	23	7.6	336	359	30.6	34.3	0.35	0.35		0.46-0.55	0.46-0.54	0.77-0.9	0.55	0.54	-20	-9	0.08	0.08
	16/02/18	21	5	1.7	107	108	10.7	11.3	0.12	0.11		0.47-0.55	0.49-0.54	0.75-0.84	0.55	0.54	-18	-9	0.08	0.08
	23/06/20	24	6	2.3	106	166	10.5	18.7	0.12	0.18		0.46-0.55	0.48-0.55	0.76-0.86	0.55	0.54	-19	-9	0.08	0.08
	07/09/21	45	11	3.7	162	267	17.0	26.7	0.08	0.12		0.47-0.55	0.47-0.54	0.77-0.92	0.55	0.54	-19	-9	0.08	0.08
	19/09/22	21	5	1.8	203	175	20.1	17.6	0.24	0.22		0.46-0.55	0.47-0.54	0.75-0.85	0.55	0.54	-19	-9	0.08	0.08
	22/09/22	10	3	1.6	67	80	8.1	8.0	0.09	0.08		0.46-0.54	0.48-0.55	0.73-0.96	0.54	0.54	-20	-9	0.08	0.08
SIS	08/10/01	102	6	0.8	166	165	2.5	2.4	0.03	0.03	0.75	1.00-1.04	0.79-0.82	1.33-1.37	1.04	0.82	-3	-4	0.06	0.08
	29/10/01	8	0.1	0.003	4	10	0.0	0.0	0.00	0.00		1.44	1.07	1.44	1.07	0.85	0	0	0.06	0.07
	21/08/13	324	25	3.3	371	598	4.6	15.1	0.09	0.19		0.85-0.96	0.58-0.68	1.13-1.17	0.96	0.68	-11	-20	0.07	0.09
	07/09/17	13	2	0.5	75	45	2.4	1.7	0.04	0.02		0.90-0.97	0.65-0.69	1.12-1.21	0.97	0.69	-10	-18	0.06	0.09
	19/09/17	35	3	0.7	158	103	4.4	3.8	0.07	0.05		0.87-0.97	0.62-0.69	1.09-1.24	0.97	0.69	-9	-18	0.06	0.09
	23/09/17	3	0.4	0.1	20	13	0.6	0.5	0.01	0.01		0.90-0.94	0.66-0.71	1.16-1.17	0.94	0.71	-13	-16	0.07	0.09
	25/12/17	124	4	0.4	113	89	1.1	0.6	0.02	0.01		0.90-0.94	0.66-0.71	1.16-1.17	0.94	0.71	-13	-16	0.07	0.09
	16/02/18	26	4	0.8	160	118	5.2	2.9	0.07	0.04		0.90-0.93	0.67-0.68	1.16-1.18	0.93	0.68	-13	-20	0.07	0.09
	23/06/20	9	2	0.4	51	46	1.9	1.9	0.02	0.03		0.89-0.93	0.64-0.68	1.11-1.17	0.95	0.69	-11	-19	0.07	0.09
	09/09/21	181	3	0.1	30	106	0.1	0.1	0.00	0.00		0.79-0.95	0.66-0.75	1.03-1.23	0.80	0.70	-26	-17	0.08	0.09
	19/09/22	4	0.7	0.2	-	29	-	1.0	0.00	0.01		0.86-0.89	0.61-0.63	1.07-1.11	0.80	0.70	-26	-17	0.08	0.09
	22/09/22	3	0.5	0.1	-	20	-	0.9	0.00	0.01		0.84-0.94	0.64-0.69	0.91-0.96	0.80	0.68	-26	-20	0.08	0.09
	30/03/23	16	0.4	0.04	9	12	0.2	0.1	0.00	0.00		0.80-0.83	0.66-0.72	1.07-1.15	0.82	0.67	-23	-21	0.08	0.09

Notas A_{máx}, V_{máx} y D_{máx} - aceleración, desplazamiento y desplazamiento máximo del suelo o base
A_{e-máx} y D_{e-máx} - aceleración y desplazamiento máximo en el edificio, DE_{máx} - distorsión de entrepiso, fs y Ts - frecuencia o periodo del suelo
fe - frecuencia fundamental del edificio f_{ef} - frecuencia fundamental del edificio de la fase final del registro, Vf_{ef} - variación de la f_{ef}

Tabla 7.3 Datos de los sismos de los edificios de las ciudades de México y Acapulco

Edificios ciudad de México			Coordenadas		Prof. Epi.	M	PC	CCUT
Fecha	Hora	Localización	Lat. N	Lon. O			D.Epi(km)	D.Epi(km)
1990-05-31	01:35:30	26 km al Suroeste de Tecpan, Guerrero	17.14	-100.86	27.0	5.8	311	314
1999-09-30	11:31:13	22 km al Noroeste de Puerto Escondido Oaxaca	16.06	-97.00	39.0	7.4	438	441
2011-02-25	07:07:28	34 km al Suroeste de Sayula de Aleman Veracruz	17.69	-95.21	135.0	6.0	458	459
2012-03-20	12:02:48	46 km al Sur de Ometepepec Guerrero	16.26	-98.46	18.0	7.5	359	362
2017-09-07	23:49:17	140 km al Suroeste de Pijijiapan, Chiapas	14.76	-94.10	45.9	8.2	746	748
2017-09-19	13:14:39	8 km al Noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla	18.33	-98.67	51.2	7.1	131	135
2017-09-23	07:53:01	9 km al Suroeste de Ciudad Ixtepec, Oaxaca	16.50	-95.15	10.0	6.1	534	536
2018-02-16	17:39:39	14 km al Sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca	16.22	-98.01	16.0	7.2	376	379
2020-06-23	10:29:03	4 km al Norte de Crucecita, Oaxaca	15.80	-96.13	22.8	7.4	514	517
2021-09-07	20:47:46	14 km al Suroeste de Acapulco, Guerrero	16.76	-99.95	15.0	7.1	308	312
2022-09-19	13:05:09	61 km al Sur de Coalcoman, Michoacán	18.24	-103.27	12.1	7.7	453	454
2022-09-22	01:16:08	85 km al Sur de Coalcoman, Michoacán	18.01	-103.16	8.0	6.9	450	451
Edificio ciudad de Acapulco			Coordenadas		Prof. Epi.	M	SIS	
Fecha	Hora	Localización	Lat. N	Lon. O			D.Epi(km)	
2001-10-07	21:39:19	9 km al Suroeste de Coyuca de Benitez, Guerrero	16.94	-100.14	4.0	6.1	40	
2001-10-29	15:15:12	8 km al Sur de Coyuca de Benitez, Guerrero	16.94	-100.10	12.0	4.0	37	
2013-08-21	07:38:29	21 km al Oeste de San Marcos, Guerrero	16.75	-99.58	5.0	6.0	23	
2017-09-07	23:49:17	140 km al Suroeste de Pijijiapan, Chiapas	14.76	-94.10	45.9	8.2	650	
2017-09-19	13:14:39	8 km al Noreste de Chiautla de Tapia, Puebla	18.33	-98.67	51.2	7.1	210	
2017-09-23	07:53:01	9 km al Suroeste de Ciudad Ixtepec, Oaxaca	16.50	-95.15	10.0	6.1	497	
2017-12-25	14:23:11	14 km al Noroeste de Acapulco, Guerrero	16.99	-99.85	21.7	5.0	23	
2018-02-16	17:39:39	14 km al Sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca	16.22	-98.01	16.0	7.2	200	
2020-06-23	10:29:03	4 km al Norte de Crucecita, Oaxaca	15.80	-96.13	22.8	7.4	406	
2021-09-09	05:56:21	15 km al Sureste de Acapulco, Guerrero	16.79	-99.79	10.0	4.2	1	
2022-09-19	13:05:09	61 km al Sur de Coalcoman, Michoacán	18.24	-103.27	12.1	7.7	402	
2022-09-22	01:16:08	81 km al Sur de Coalcoman, Michoacán	18.01	-103.16	8.0	6.9	381	
2023-03-30	09:46:16	20 km al Suroeste de Coyuca de Benitez, Guerrero	16.84	-100.14	14.0	4.5	37	

7.4. Análisis Espectral y Paramétrico

El estudio de los acelerogramas consistió en dos análisis:

- Análisis en el tiempo para determinar las amplitudes máximas de las respuestas de los edificios en los diferentes puntos instrumentados y estimar la intensidad del movimiento.
- Análisis espectral y paramétrico, aplicando para este último una metodología basada en subespacios para determinar las frecuencias de vibración más significativas de los edificios y del suelo donde están desplantados.

Los acelerogramas obtenidos de los edificios instrumentados se procesan en dos etapas. La primera la lleva a cabo el grupo encargado de la operación y mantenimiento de la red acelerográfica. En esta, los registros en cada aparato son recuperados para editarlos y así asignar a cada uno las características de la estación, del instrumento y del evento. En la segunda etapa se realiza el procesamiento de los acelerogramas que consiste en examinar los registros de un mismo evento para determinar su calidad, y verificar el tiempo inicial para sincronizarlos con base en una señal común de tiempo. A continuación, se efectúa la corrección de línea base para establecer el eje de amplitudes cero a cada registro y con un filtrado eliminar los componentes frecuenciales que no son de interés. Posteriormente, se integran los acelerogramas corregidos para obtener las historias de velocidades y

desplazamientos. Con las historias de aceleración de las componentes horizontales del terreno o de la base del edificio, se calcula la intensidad instrumental horizontal de Arias (Arias, 1970), y con las historias de desplazamiento se estiman las distorsiones promedio de entrepiso entre la azotea y base del edificio. Por último, a partir de las historias de las respuestas se identifican las amplitudes máximas del movimiento del edificio y del terreno, así como las distorsiones de entrepiso (Tabla 7.2).

Los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamientos del terreno obtenidos de los eventos registrados en los edificios se muestran en la misma Tabla 7.4. Para la Ciudad de México, las aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos del terreno durante el sismo del 19 de septiembre de 2022 se obtuvieron en el edificio PC con valores de 28 cm/s^2 , 9 cm/s y 3.5 cm , respectivamente. Las respuestas máximas en la estructura ocurrieron en el edificio CCUT con aceleraciones, desplazamientos y distorsiones de entrepiso de 203 cm/s^2 , 20.1 cm y 0.24% , respectivamente. En el edificio SIS de la ciudad de Acapulco, la máxima aceleración en el terreno fue de $\sim 4 \text{ cm/s}^2$ y en la azotea de edificio de 20 cm/s^2 , y la máxima distorsión de entrepiso fue de 0.01% . En este caso las respuestas registradas de la estructura solo se disponen en el componente T. La máxima aceleración registrada, y la máxima distorsión, hasta la fecha en este edificio corresponden al sismo del 21 de agosto de 2013 (324 cm/s^2 en terreno y 598 cm/s^2 en azotea, y distorsión de 0.16%).

Hasta la fecha las máximas aceleraciones registradas con la instrumentación en los edificios de la Ciudad de México corresponden a las del sismo del 19 de septiembre de 2017; en la superficie del terreno y en la estructura del Edificio PC se obtuvieron valores de 98 cm/s^2 y 571 cm/s^2 , respectivamente. En cuanto al edificio SIS de la ciudad de Acapulco, la máxima aceleración y distorsión de entrepiso fueron durante el evento de 2013 con valores de 324 cm/s^2 en el terreno y 371 cm/s^2 en la azotea, y una distorsión de 0.19% .

La Figura 7.8 muestra los espectros de respuesta de aceleración y desplazamiento de los componentes horizontales suponiendo 5% del amortiguamiento crítico, calculados con los acelerogramas de los eventos sísmicos seleccionados para cada uno de los edificios. Los acelerogramas fueron los registrados en el terreno y en su defecto en la base del edificio. Las amplitudes máximas de cada espectro en los suelos blandos de la Ciudad de México corresponden a los periodos dominantes de cada sitio y sus valores aparecen en la Tabla 7.4. En el edificio PC, que cuenta con registros desde 1990. Las mayores amplitudes para los eventos previos a 2000 se concentran entre 2.1 y 2.9 s de periodo, mientras que para eventos posteriores al 2007 se ubican entre 1.9 y 2.4 s (Murià Vila *et al.*, 2017 y 2018c).

Para los edificios de la Ciudad de México, las amplitudes espectrales de aceleración más significativas conciernen al gran sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017. Estas amplitudes en los edificios desplantados en suelos blandos fueron superiores entre dos y cinco veces a los sismos de moderada intensidad, entre estos el sismo del 19 de septiembre de 2022. En cuanto a las amplitudes espectrales de desplazamiento, estas no excedieron a las mayores registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 y corresponden a amplitudes alrededor del periodo dominante ($\sim 2 \text{ s}$ para los edificios en suelo blando), se observa que son de hecho similares a las de los eventos moderados registrados tanto en el CCUT como en el PC el 20 de marzo de 2012 y del 23 de junio de 2020, el cual

es superior en aceleración y desplazamiento en el componente T, al registrado el 19 de septiembre de 2022. Este comportamiento es similar en ambas estructuras, mientras que para el edificio SIS, el evento del 19 de septiembre de 2022 se registró parcialmente con la instrumentación permanente, solo uno de los dos registradores funcionó durante los sismos de septiembre de 2022, teniéndose solo un registro de base en el componente T.

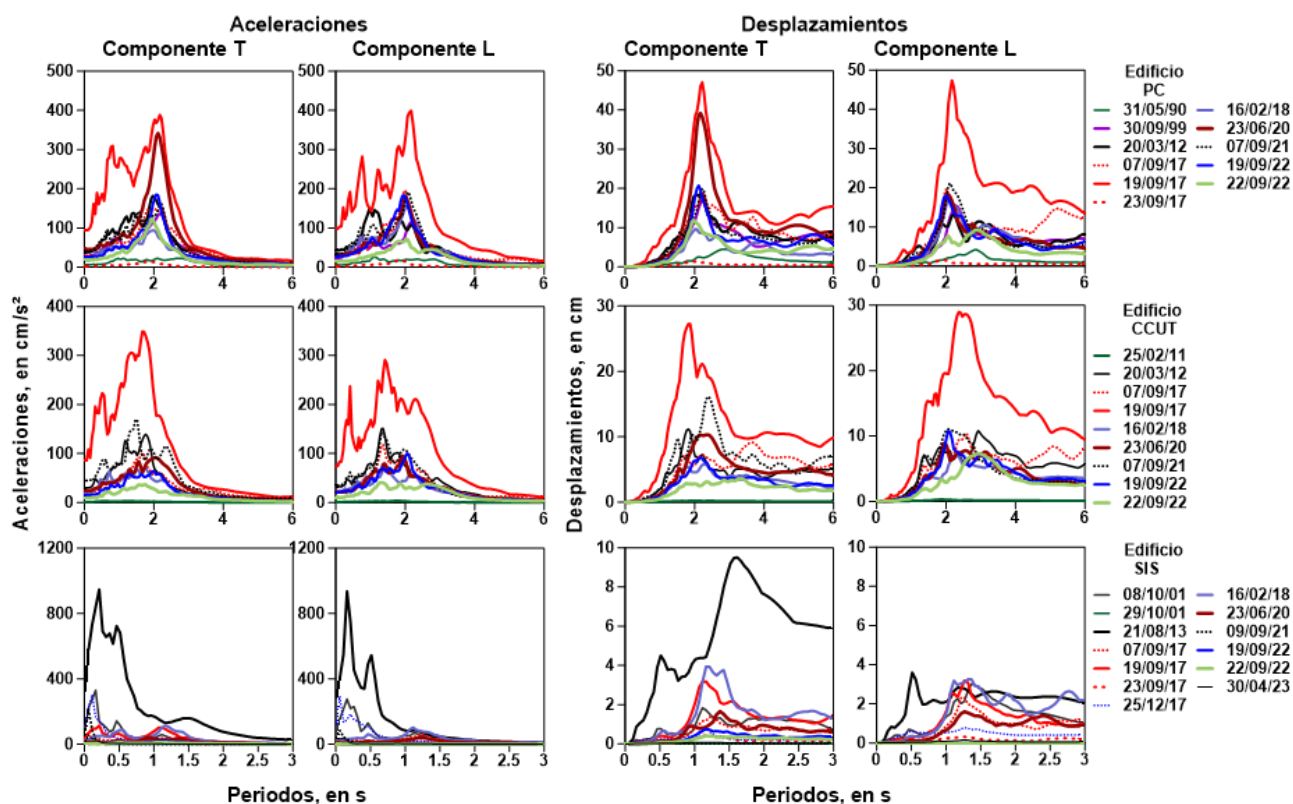


Figura 7.8 Espectros de respuesta de aceleraciones y desplazamientos calculados con los registros del terreno o base de los edificios

Para el estudio de las características dinámicas de los edificios se establecieron con dos procedimientos, uno con base en un análisis espectral de los registros para determinar las frecuencias de vibración más significativas asociadas a los componentes horizontales de traslación y, en algunos de ellos, la de torsión (Bendat y Piersol, 1989, Murià-Vila *et al.* 2006b; Murià Vila, 2007). El otro procedimiento fue un análisis paramétrico de los registros aplicando el método de minimización modal (MM) propuesto por Beck y Jennings (1980) y el método de subespacios N4SID recursivo (Van Overschee y De Moor, 1994; Oku y Kimura, 1999).

7.4.1. Análisis Espectral

Los espectros de Fourier y los cocientes de los espectros de Fourier entre los registros obtenidos en azotea y terreno o base para los componentes horizontales L y T calculados para los sismos seleccionados, se presentan en las Figuras 7.9 y 7.10. Para los tres edificios, se presentan los cocientes espectrales calculados con los registros del componente T entre azotea esquina y azotea centro para estimar la frecuencia fundamental de torsión. En estas figuras se aprecia varias ordenadas significativas asociadas a un pequeño intervalo de frecuencias, las cuales corresponden a las frecuencias fundamentales de cada componente del sistema suelo-estructura. Este hecho revela que el sistema tiene un comportamiento no lineal.

En la Tabla 7.2 se comparan las frecuencias de los primeros modos de vibrar en los componentes L y T identificadas en los edificios para cada sismo. A partir de las frecuencias obtenidas de la fase final de los registros, se calculó la relación de periodos de vibrar del edificio entre el número de pisos (P/n) que se presentan en la misma tabla y sus valores varía entre 0.06 y 0.18. Lo que indican los resultados es que las frecuencias fundamentales de vibración son sensibles al nivel de amplitud de la señal de excitación. Durante el sismo del 19 de septiembre de 2022, las frecuencias en los edificios de la Ciudad de México prácticamente no cambian con respecto a los eventos previos y esto es porque el sismo fue de menor intensidad a otros que han afectado a los tres edificios.

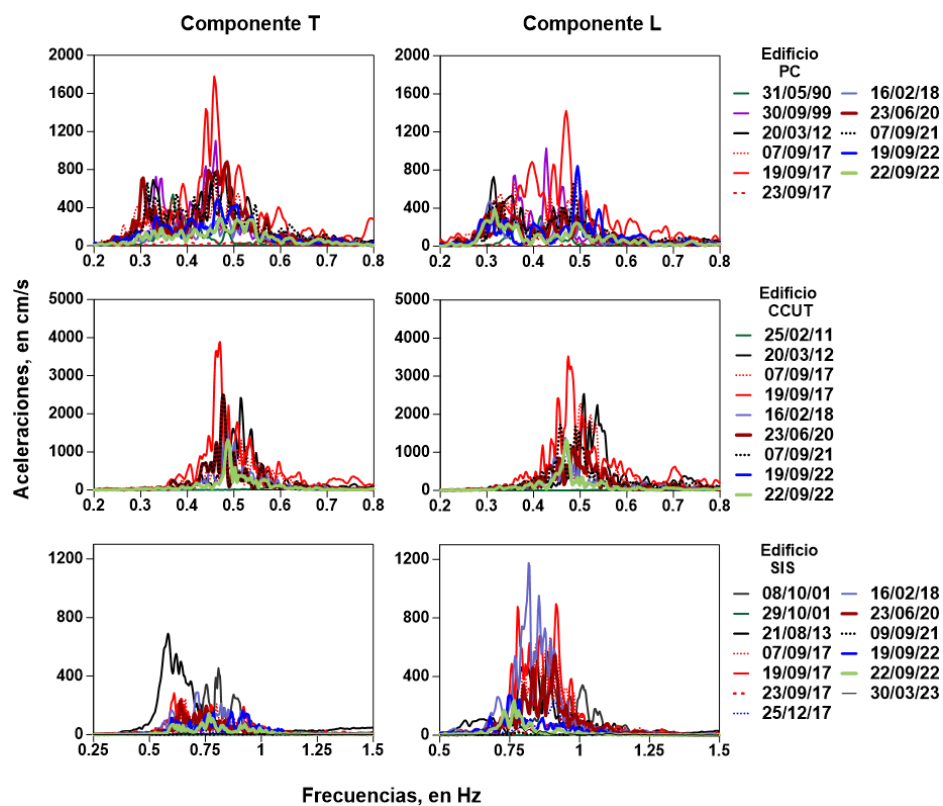


Figura 7.9 Espectros de Fourier azotea de los edificios

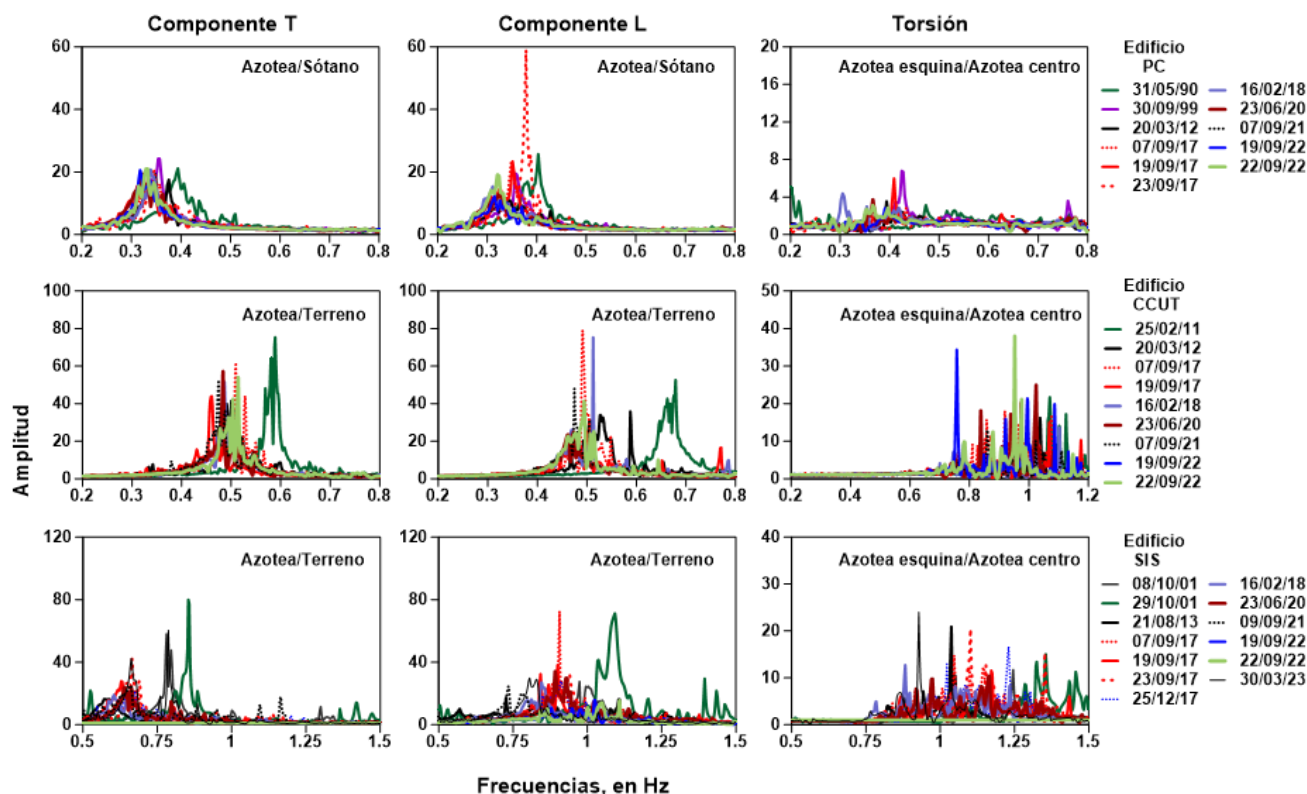


Figura 7.10 Cocientes espectrales azotea/base o terreno y azotea esquina/azotea centro de los edificios

7.4.2. Efectos de Interacción Suelo-Estructura

En aquellos eventos que se dispone de registros del terreno y la base del edificio se calcularon los cocientes espectrales entre ambas estaciones (Figura 7.11). Uno de los aspectos de los efectos de ISE que se observan en las figuras es el relativo a la interacción cinemática, al evidenciarse en la base del edificio una disminución de las amplitudes de movimiento, las cuales se incrementan a medida que la frecuencia aumenta.

La ISE produce un conjunto de efectos inerciales y cinemáticos ante solicitaciones dinámicas que modifican las propiedades dinámicas del sistema suelo-estructura. Las disminuciones de las frecuencias fundamentales de vibración de los componentes horizontales y de torsión del edificio con respecto a la condición de base empotrada son producto de la interacción inercial.

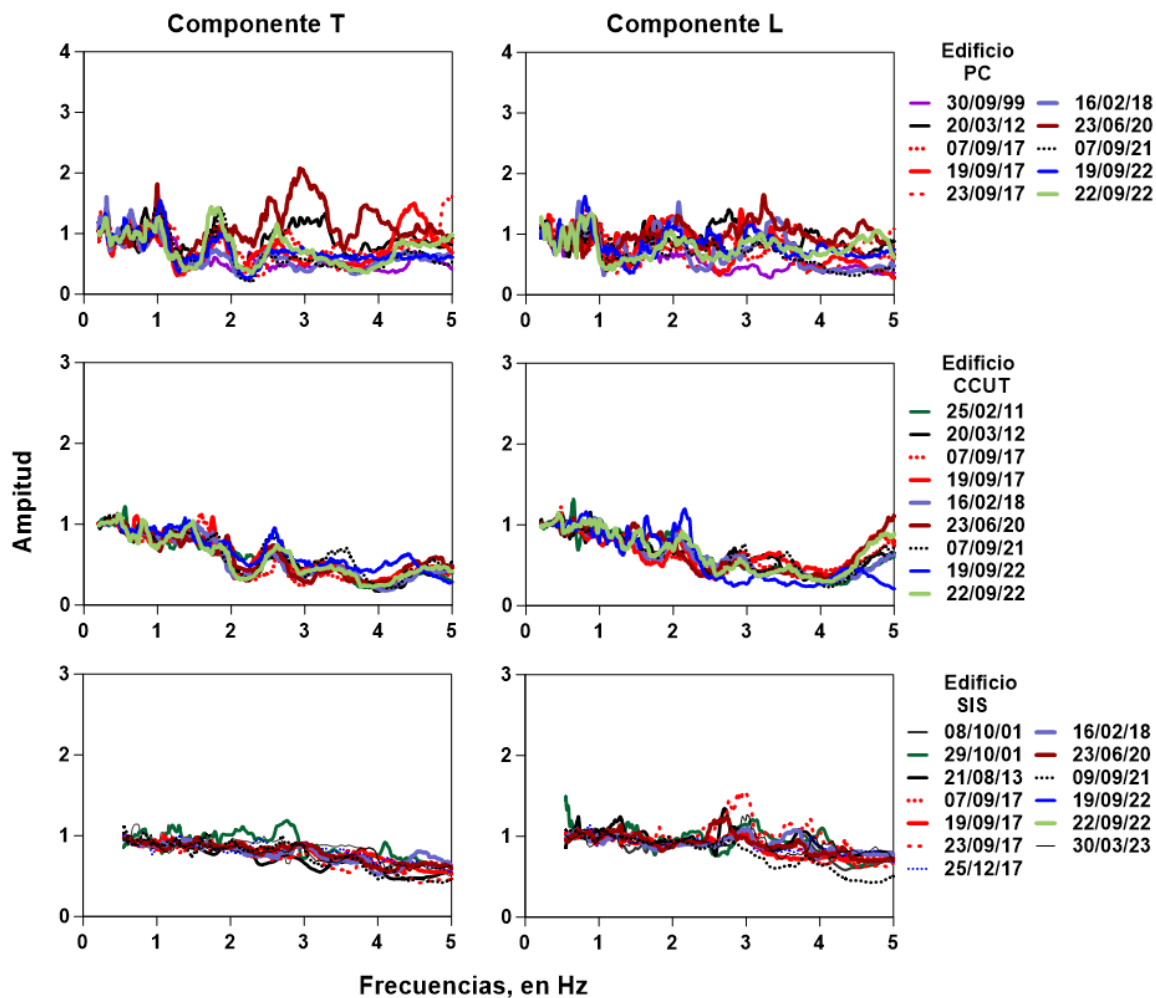


Figura 7.11 Cocientes espectrales sótano/terreno de los edificios del IIUNAM

7.4.3. Análisis Paramétrico

Para estos análisis se establece un modelo matemático simplificado para estimar las variaciones de las frecuencias de vibración más significativas y sus correspondientes amortiguamientos durante el evento. Los modelos con base en estos métodos se desarrollaron con programas de cómputo elaborados en el IIUNAM (Cruz *et al.*, 2007; García-Illescas *et al.*, 2019). El modelo empleado con el método recursivo proporciona un historial de frecuencias en intervalos de tiempo de un segundo. Las Figuras 7.12 a 7.14 muestran los resultados obtenidos para dos de los eventos registrados en los edificios PC y CCUT. En ellas aparecen las variaciones en las frecuencias de los dos primeros modos y sus correspondientes amortiguamientos en los componentes T, L y torsión. La participación del primer modo de vibrar representa, durante la fase intensa, más del 85% en las respuestas registradas en la azotea y con el segundo modo se alcanza entre el 95 y 99%. Los resultados obtenidos para los eventos analizados con ambos métodos son similares.

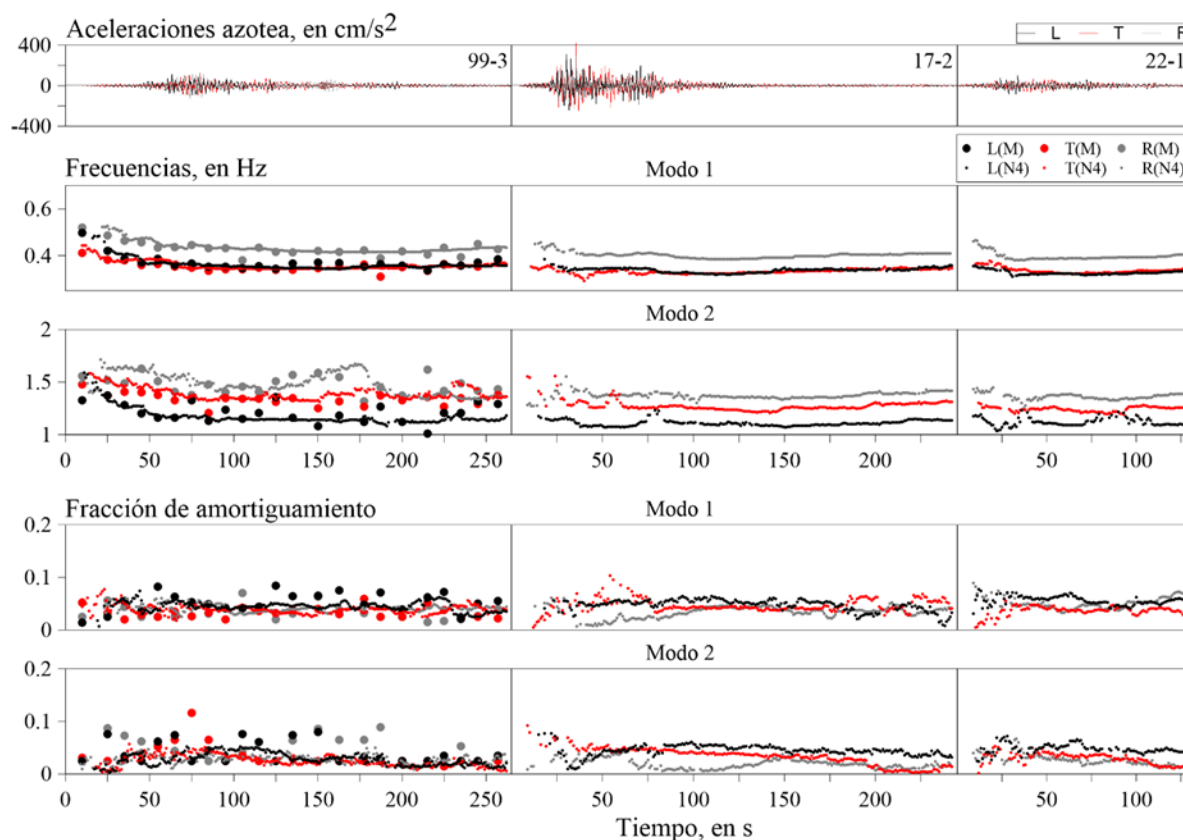


Figura 7.12 Frecuencias y fracciones de amortiguamiento crítico identificados en el edificio PC con los registros de los sismos del 30 de septiembre de 1999 (evento 99-3), del 19 de septiembre de 2017 (evento 17-2) y del 19 de septiembre de 2022 (evento 22-1)

Para el edificio PC se han estudiado los eventos más significativos ocurridos de 1990 a 2022 para determinar las variaciones de las propiedades dinámicas del edificio. El análisis de los registros entre 1990 y 2015 muestra que las frecuencias fundamentales de vibración del edificio disminuyeron en menos de 10% y después de 2017 la disminución total es de hasta 12 % en el componente T y después del sismo del 19 de septiembre de 2019 evidencia una acumulación de 14 % en el componente L.

El proceso de consolidación del suelo en la Ciudad de México provoca un hundimiento regional y un aumento en la frecuencia dominante del sitio. Estos cambios tienen implicaciones en la respuesta dinámica de los edificios. Para el sitio donde se ubica el edificio PC sus frecuencias fundamentales en 1990 prácticamente coincidían con la frecuencia dominante del sitio. Actualmente, la diferencia entre las frecuencias fundamentales del edificio y las frecuencias dominantes del suelo ha aumentado. Esto explica porque las distorsiones de entrepiso son menores durante los sismos de moderada intensidad de 2014, 2017, 2018, 2021 y 2022 en comparación con el sismo de similar intensidad de 1995, donde la distorsión fue la mayor (Murià-Vila *et al.*, 2018c).

En el edificio CCUT, las frecuencias de vibración identificadas de los eventos sísmicos obtenidos muestran que sus valores decrecen en la fase final de moderada y gran intensidad con respecto a los

identificados en la fase inicial del primer evento. En el primer sismo de moderada intensidad del 20 de marzo de 2012, ocurrido después de su última rehabilitación, las frecuencias en los componentes L o T se reducen hasta un 13%. Con los siguientes dos eventos de similar intensidad, 18 de abril de 2014 y 7 de septiembre de 2017, la reducción se incrementa en menos de 2% y tras el sismo de Morelia de gran intensidad su incremento es de un 3%. Lo cual muestra un daño global acumulado de 20%. Este daño es esencialmente en elementos no estructurales y estructurales, y no por efectos de ISE (Murià-Vila *et al.*, 2018b).

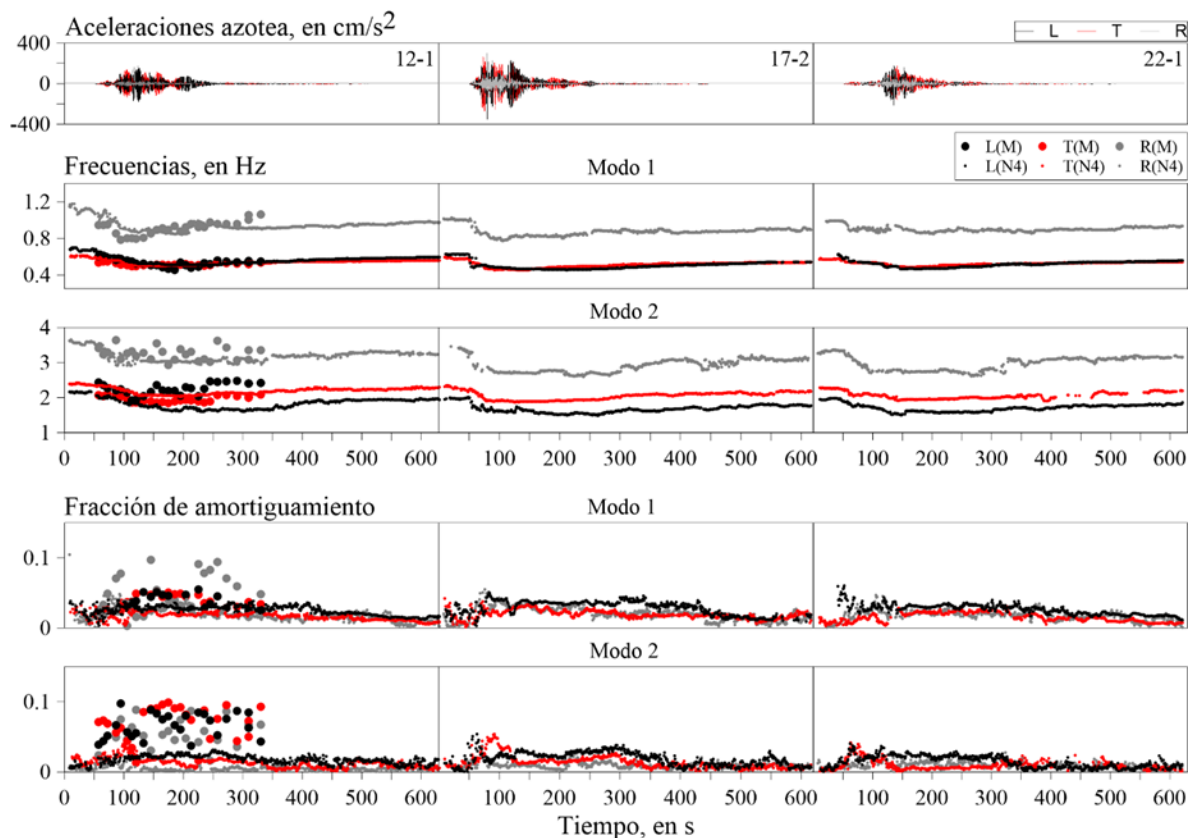


Figura 7.13 Frecuencias y fracciones de amortiguamiento crítico identificados en el edificio CCUT con los registros de los sismos del 20 de marzo de 2012 (evento 12-1), del 19 de septiembre de 2017 (evento 17-2) y del 19 de septiembre de 2022 (evento 22-1)

En el edificio SIS, las frecuencias de vibración identificadas ante el evento del 19 de septiembre de 2022 no cambiaron dado que se trata de un evento de muy pequeña intensidad, para este edificio. En el edificio SIS, el primer sismo que provocó cambios significativos en sus frecuencias de vibración corresponde al sismo del 21 de agosto de 2013. Dichas frecuencias reportaron una disminución de hasta un 11 % en el componente L y un 18 % en el componente T, con mínimas variaciones durante los eventos siguientes. A partir del registro del 9 de septiembre de 2021, se observó un aumento en la

disminución de la frecuencia de vibración del componente L de 14%. En tanto, el componente T reportó solo una reducción de 1 %. Estas variaciones de frecuencias se mantienen hasta el registro del 30 de marzo de 2023. Es decir, las frecuencias de vibración identificadas ante el evento del 19 de septiembre de 2022 no registraron un cambio, ya que se trata de un evento de muy pequeña intensidad.

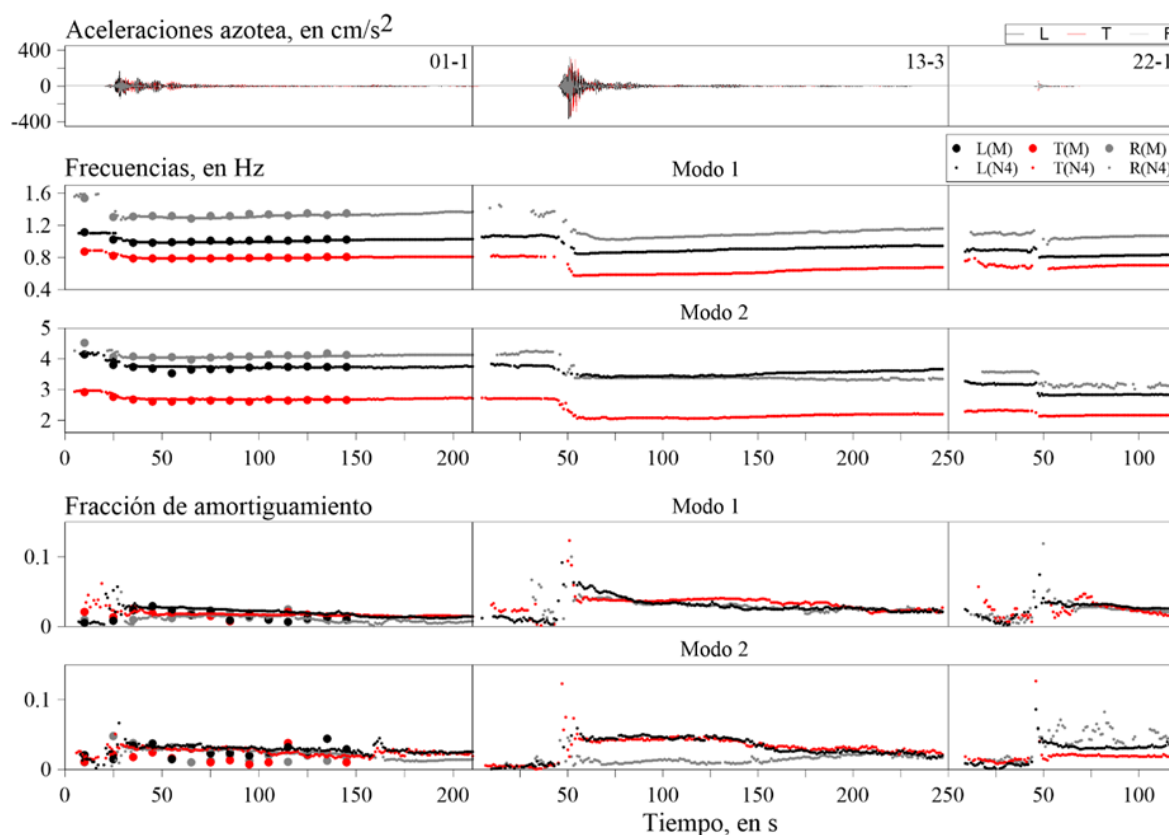


Figura 7.14 Frecuencias y fracciones de amortiguamiento crítico identificados en el edificio SIS con los registros de los sismos del 8 de octubre de 2001 (evento 01-1), del 21 de agosto de 2013 (evento 13-1) y del 19 de septiembre de 2022 (22-1)

7.5. Conclusiones

Después de tres décadas de diversos estudios sobre edificios instrumentados, con la información generada, se han determinado las variaciones de las propiedades dinámicas de tres edificios instrumentados (Murià-Vila, 2007; Murià Vila *et al.*, 2018a, 2018c, y 2020b). Esta información ha permitido observar que la rigidez de los edificios se deteriora por el efecto de sismos sucesivos de moderada y gran intensidad. Dicho deterioro incluye la pérdida de rigidez de los elementos no estructurales que son comunes en la infraestructura de México.

Con el nuevo reglamento de construcciones se propone regular una parte importante en el desarrollo de la infraestructura de obras civiles y que tiene que ver con el seguimiento del comportamiento estructural y mitigación de riesgos, ya que la experiencia de las consecuencias de sismos pasados, como el terremoto de septiembre de 1985, ponen al descubierto las prácticas de construcción y las necesidades que aún falta por atender. En el caso de la Ciudad de México un gran número de estructuras fueron construidas con reglamentos que datan de más de 20 años, por lo que son estructuras vulnerables que requieren de un seguimiento y control de respuesta. Es aquí donde el desarrollo de herramientas y aplicación de estrategias de análisis y criterios de evaluación toman un papel clave. En las estructuras instrumentadas mostradas, dos edificios localizados en la Ciudad de México (edificios PC y CCUT) y uno en Acapulco (edificio SIS) esta serie de cuestiones son abordadas utilizando la información recaba por décadas en las redes acelerométricas instaladas.

Un sistema de monitoreo fue implementado en los edificios instrumentados a cargo del IIUNAM y operó satisfactoriamente, este sistema incluye una alerta estructural, la cual ha tenido un buen desempeño (Murià Vila *et al.*, 2010; Murià Vila *et al.*, 2018a, 2018c, y 2020a). Indicando que, existe un proceso de acumulación de daño evidenciado por el deterioro de la rigidez lateral de estas estructuras afectadas por el sismo del 19 de septiembre (edificios PC y CCUT) y por el sismo del 21 de agosto de 2013 (edificio SIS), principalmente. Para el caso del sismo moderado del 19 de septiembre de 2022, la condición de los edificios no manifestó un aumento adicional al observado después del sismo de gran magnitud del 19 de septiembre de 2017, esto se puede corroborar al observar la respuesta de los edificios ante el sismo del 22 de septiembre de 2022, el cual fue una réplica del primero y se identificó como un evento de pequeña intensidad. Para el caso del sitio donde se localiza el edificio de Acapulco, ambos eventos fueron de pequeña intensidad y no reportaron cambios en las propiedades dinámicas del edificio.

Aunque la información derivada del estudio de estas tres estructuras instrumentadas proporciona un mejor entendimiento de su respuesta ante sismos de pequeña y moderada intensidad, los resultados no son directamente extrapolables para el resto de las estructuras que existen en nuestro país ya que existe un componte local, que son los efectos de sitio y son propios del terreno donde se ubican los edificios. Además, existe un componente de desempeño que es función de la condición de la estructura, por ejemplo, se debe tomar en cuenta que en el caso particular de los edificios PC y CCUT existe el antecedente del sismo de 1985 que originó daños en ambos.

7.6. Reconocimientos

Se reconoce a la Secretaría de Obras del Departamento del Distrito Federal, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, el apoyo económico brindado para la instrumentación de estructuras. A los propietarios anónimos de algunos de los edificios instrumentados. Al Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal por el patrocinio de parte de los estudios desarrollados.

Se hace patente la eficiente labor desempeñada por los ingenieros, técnicos y estudiantes encargados de la instalación, operación y mantenimiento de las redes de instrumentación en las estructuras del IIUNAM estudiados: G. Aguilar, J. Camargo, MA Mendoza, L. Ramírez, C. Pérez, A.L. Ruiz, R. Delgado, M.A. Macías, D. Almora, L. Alcántara, J.M. Velasco, A. Mora, H. Sandoval, M. Torres, G. Castro, R. Vázquez, I. Molina, P. Trinidad, M. A. Soto, G. E. González y C. Castro.

7.7. Referencias

- Aldama-Sánchez, B. D., Murià-Vila, D., & García-Illescas, M. A. (2021). Sistema de Alerta Estructural: AlertaE. II-UNAM
- Arias, A. (1970). A Measure of Earthquake Intensity, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, R J Hansen (ed), MIT Press.
- Beck, J. L., & Jennings, P. C. (1980). Structural identification using lineal models and earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8(2), 145-160.
- Bendat, J.S., & Piersol, A.G. (1989). Random Data, *Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley and Sons, NewYork.
- Cruz, C. A., Murià-Vila, D., & Camargo, J. (2007). Implementación del programa de un programa de estimación paramétrica modal con base en el programa MIMO, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- García-Illescas, M.A., Murià-Vila, D., & Alvarez-Icaza, L. (2019). Monitoring and Identification of Vibration Frequencies on a Portion of México City Metro Line 12 *Advances in Civil Engineering*, 1-13.
- Mamdani. (1976). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE transactions on computers*, 100(12), 1182-1191.
- Murià-Vila, D., González Alcorta, R., Espinosa Aranda, J. M., & León, A. (1992). Análisis de la respuesta de un edificio instrumentado, Serie azul, Instituto de Ingeniería, UNAM, 541, agosto.
- Murià-Vila, D., González Alcorta, R., & Espinosa Aranda, J. M. (1993), Efectos de interacción suelo-estructura en la respuesta de un edificio instrumentado, Serie azul, Instituto de Ingeniería, UNAM, 555, enero.
- Murià-Vila, D., Guzman, S., Fernandez, F., Zapata, A., Taborda, R., Pérez, J. H., Ordaz, M., González, R., Cruz, C. A., & Camargo, J. (2006b). Programa para calcular la corrección de línea base, transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias entre dos señales, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Murià-Vila, D. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados, III Coloquio de Ingreso a la Academia, Academia de Ingeniería, México, 50 pp.
- Murià-Vila, D., Camargo, J., & Aldama, B. D. (2017). Influence of Soil-Structure Interaction and Subsoil Consolidation in the Seismic Response of a Building, *16 World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago Chile.
- Murià-Vila, D., Aldama, B. D., Rodríguez, G., García Illescas, M. A., Camargo, J., Aguilar, L. A., Ayala, M., & Maya, J. (2018a). Respuesta sísmica de un edificio alto ante el sismo del 19 de septiembre de 2017, *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, Campeche.
- Murià-Vila, D., Arnau, O., Aguilar, G. G., Arias, D., Pérez, K., & Zárate, G. (2018b). Simulación de la respuesta del edificio CCUT ante sismos, *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, Campeche.

- Murià-Vila, D., Pérez, J.J., Aldama, B. D., García Illescas, M. A., Rodríguez, G., & Pérez, K. (2018c). Estudios de las respuestas sísmicas registradas y simulación numérica de las respuestas del edificio PC. Instituto de Ingeniería, UNAM, Proy. 8583, elaborado para la Seguridad de las Construcciones, Gobierno de la CdMx. pp. 142.
- Murià-Vila, D., Aldama, B. D., García-Illescas, M. A., & Rodríguez, G. (2020a). Monitoring of a rehabilitated building in soft soil in Mexico and structural response to September 2017 earthquakes. Part 1: Structural health monitoring system. *Earthquake Spectra*, 37(4), 2737-2766.
- Murià-Vila, D., Arnau Delgado, O., Aguilar Silva, G. G., Arias Lara, D. & Pérez-Liévana, K. (2020b). Monitoring of a Rehabilitated Building in soft Soil in Mexico and Structural Response to September 2017 Earthquakes. Part 2: Numerical Simulation. *Earthquake Spectra*, 36(2_suppl), 238-261.
- Oku, H. & Kimura, H. (1999). Recursive 4SID from the Input-Output Point of View. *Asian Journal of Control*, 1(4), 258–269.
- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1994). N4SID Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems. *Automatica*, 30(1), 75-93.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

8. Comportamiento de estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica

Dr. Héctor Guerreño Bobadilla

II-UNAM

hguerrero@iingen.unam.mx

Dr. Roberto Gómez Martínez

II-UNAM

rgomez@iingen.unam.mx

Dr. José Alberto Escobar Sánchez

II-UNAM

jescobars@iingen.unam.mx

8.1. Introducción

Después de la ocurrencia del sismo de Coalcomán, Michoacán, del 19 de septiembre de 2022 (M_w 7.7), se realizó una visita por los estados de Colima, Michoacán, Jalisco y Nayarit con la intención de identificar los daños ocasionados por el terremoto; así como en el Estado de México y Ciudad de México.

La ubicación de los sitios visitados se muestra en la Figura 8.1 y en la Tabla 8.1 se listan cada uno de los sitios. Uno de los objetivos de la brigada de reconocimiento de daños fue reportar si alguna estructura equipada con sistemas de protección sísmica, como aislamiento sísmico o sistemas de disipación, presentaba algún tipo de daño. En las secciones siguientes se describe lo observado.

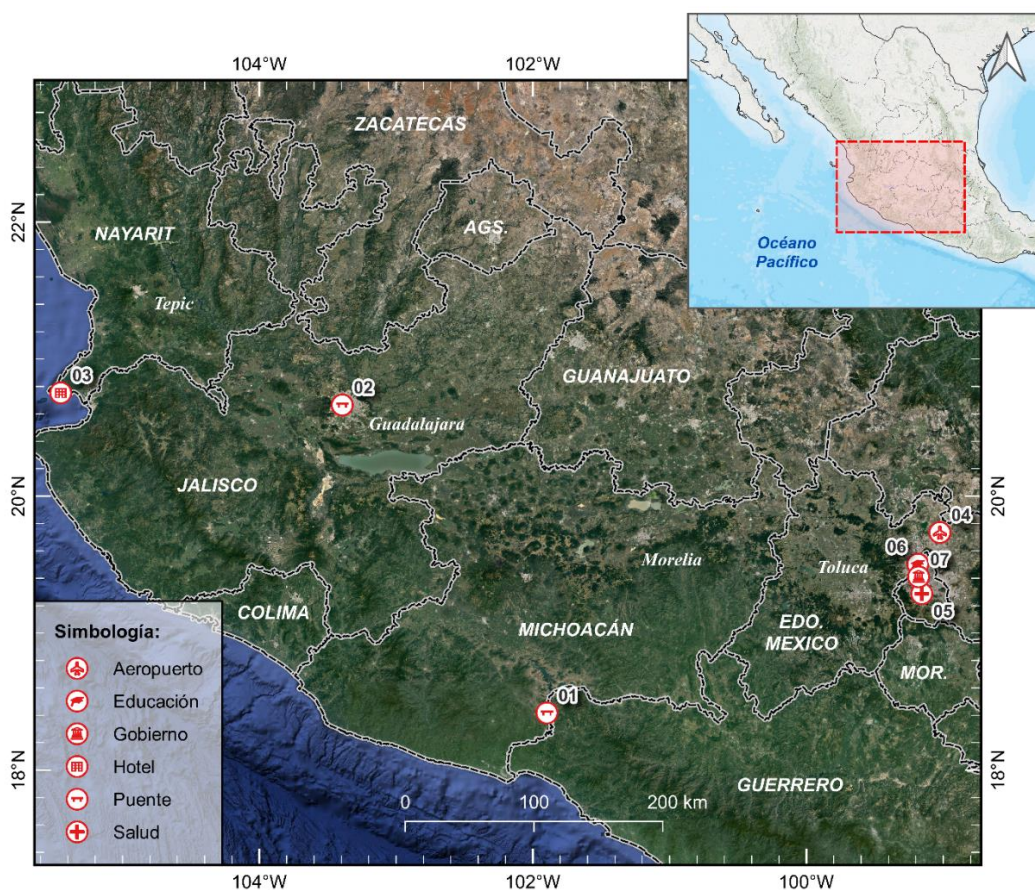


Figura 8.1 Ubicación de los sitios visitados, con el objeto de reconocer daños en estructuras con aislamiento, en los estados de Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit; así como del Estado de México y Ciudad de México

Tabla 8.1 Lista de los sitios visitados en los estados de Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit, Estado de México y Ciudad de México con el objeto de reconocer daños en estructuras con aislamiento

ID	Sitio	Uso	Municipio	Estado	Latitud	Longitud
01	Puente Infiernillo II	Puente	Uruapan	Michoacán	18.417686	-101.897844
02	Puente Matute Remus	Puente	Guadalajara	Jalisco	20.664847	-103.393751
03	Hotel Dreams Bahía Mita	Hotel	Punta Mita	Nayarit	20.753315	-105.452075
04	Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles	Aeropuerto	Zumpango de Ocampo	Estado de México	19.734444	-99.024731
05	Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán	Salud	Tlalpan	Ciudad de México	19.287863	-99.157172
06	Universidad Autónoma de México, Edificio G	Educación	Azcapotzalco	Ciudad de México	19.503571	-99.186227
07	Secretaría de Economía - Torre Ejecutiva	Gobierno	Cuauhtémoc	Ciudad de México	19.410969	-99.180436

8.2. Estados visitados

8.2.1. Estado de Colima

No se identificó alguna estructura equipada con algún sistema de protección sísmica. Sin embargo, ingenieros locales comentaron que en el puerto de Manzanillo existen dos tanques de gas natural licuado, con capacidad de 150,000 metros cúbicos, equipados con 340 aisladores de triple péndulo que se comportaron apropiadamente.

8.2.2. Estado de Michoacán

En el estado de Michoacán no se visitaron estructuras con sistemas de protección sísmica pues son raras en el estado. Sin embargo, el puente Infiernillo II, cuya ubicación en el municipio de Uruapan se muestra en la Figura 8.1 sitio 01. Fue el primero que contaba con un sistema de aislamiento sísmico en el país, se comportó apropiadamente. Este puente cuenta con una longitud total de 515 m, dividida en 5 claros simplemente apoyados a base de armaduras de acero de 102 m de longitud.

Un croquis de la estructura del puente Infiernillo se muestra en la Figura 8.2 y una fotografía de los aisladores usados en este puente se muestra en la Figura 8.3. Después del terremoto, el puente estaba totalmente operable.

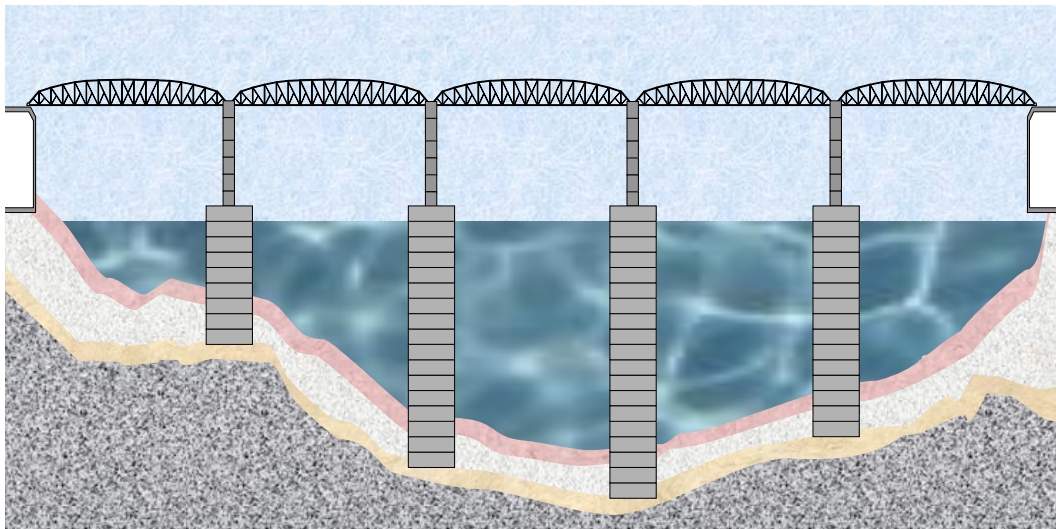


Figura 8.2 Croquis del puente Infiernillo II.

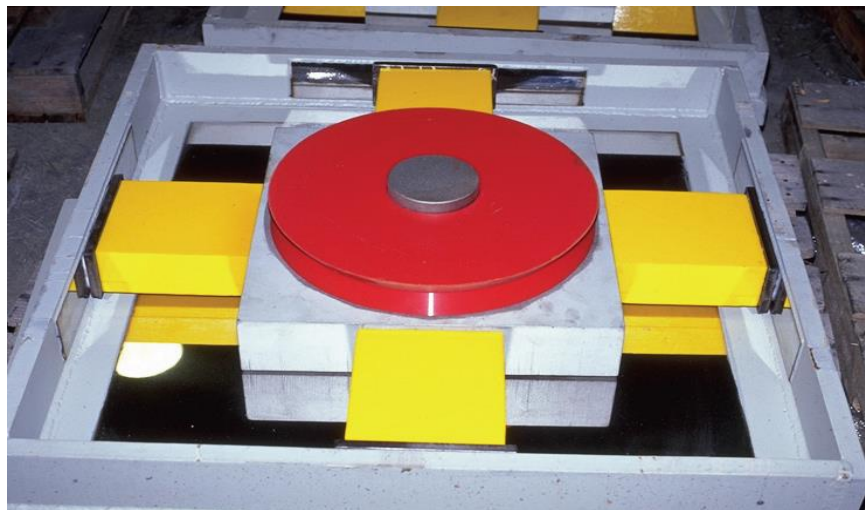


Figura 8.3 Fotografía de un aislador usado en el puente Infiernillo II.

8.2.3. Estado de Jalisco

En el estado de Jalisco, particularmente en Zapopan y Guadalajara existen varias estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica. Ninguna presentó afectaciones por el terremoto. Un ejemplo, muy popular de ellos, es el puente Matute Remus, ubicado sobre la avenida Lázaro Cárdenas, ubicado en el municipio de Guadalajara, Figura 8.1 sitio 02. Se trata de un puente atirantado construido entre 2009 y 2011. Tiene una longitud de 980 m, con 165 m de tramo atirantado. Este puente cuenta con aisladores de base de tipo pendular y amortiguadores viscosos colocados debajo del tablero, que se pueden observar en las Figuras 8.4 y 8.5. Este puente, y otras estructuras equipadas con aislamiento y/o disipación sísmica en la ciudad, no tuvieron afectación alguna debido al terremoto.



Figura 8.4 Puente Matute Remus, ubicación de aisladores y amortiguadores. *Fuente: Google Maps (2023)*



Figura 8.5 Ubicación de aisladores y amortiguadores en el puente Matute Remus. *Fuente: Google Maps (2023)*

8.2.4. Estado de Nayarit

Aunque no se visitó, en el estado de Nayarit se ubicó al hotel Dreams Bahía Mita, Figura 81 sitio 03. El edificio tiene una geometría muy irregular en planta, y está estructurado a base de marcos y muros de concreto reforzado. Cuenta con losas planas postensadas como sistema de piso. El edificio está equipado con 412 aisladores de base de tipo deslizante pendular. Durante el terremoto no tuvo afectaciones en esta edificación.

8.2.5. Estado de México

En el estado de México es muy conocida la terminal de pasajeros del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA) por el sistema de aislamiento sísmico con el que cuenta. Esta terminal está desplantada sobre 1316 aisladores sísmicos de tipo deslizante, lo que la convierte en la estructura aislada más grande de Latinoamérica, y una de las más grandes del mundo. Durante el terremoto, esta terminal no tuvo afectación alguna. En la Figura 8.1 sitio 04, se muestra su ubicación y en la Figura 8.6 se muestra una fotografía de los aisladores de base colocados.



Figura 8.6 Fotografía de aisladores bajo la terminal de pasajeros del AIFA. *Fuente: YouTube (2023)*

8.2.6. Ciudad de México

En la Ciudad de México existen varias estructuras equipadas con algún sistema de protección sísmica. Por mencionar algunas, están: la nueva torre de hospitalización del Hospital Salvador Zubirán; el Edificio G de la Universidad Autónoma Metropolitana, campus Azcapotzalco; y la Torre Ejecutiva de Secretaría de Economía, entre otros.

La nueva torre de hospitalización del Hospital Salvador Zubirán está ubicada en Tlalpan, Ciudad de México, Figura 8.1 sitio 05, cuenta con cuatro sótanos y nueve niveles sobre el nivel de banqueta. Está equipado con 35 aisladores sísmicos de tipo deslizante. La Figura 8.7 muestra una fotografía de los aisladores. El edificio no presentó problema alguno debido al movimiento generado por el terremoto. Cabe aclarar que el edificio está ubicado en la zona geotécnica II según el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México.



Figura 8.7 Fotografía de aisladores en la nueva torre de hospitalización del Hospital Salvador Zubirán

El Edificio G de la Universidad Autónoma Metropolitana, campus Azcapotzalco, está equipado con 256 contraventeos restringidos al pandeo. El edificio está ubicado en zona geotécnica II, según el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México. Se localiza en la Col. Reynosa-Tamaulipas, de la Alcaldía Azcapotzalco, Figura 8.1 sitio 06. La Figura 8.8 muestra una fotografía de la fachada del edificio con algunos de los contraventeos restringidos al pandeo, pintados en color rojo, instalados en el edificio. El edificio no tuvo daño alguno por la ocurrencia del terremoto.

Por su parte, la Torre Ejecutiva de la Secretaría de Economía, ubicada en la Col. Condesa, Alcaldía Cuauhtémoc, Figura 8.1 sitio 07, también tuvo un buen desempeño adecuado durante el terremoto. Este edificio fue construido en 1975 y rehabilitado en 2017 con 200 amortiguadores viscosos. La Figura 8.9 muestra una fotografía de su fachada, donde se pueden observar los amortiguadores.



Figura 8.8 Fachada del Edificio G de la UAM, Azcapotzalco



Figura 8.9 Torre Ejecutiva de la Secretaría de Economía

8.3. Comentarios

En este capítulo se describió el comportamiento de estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica ante el terremoto de Coalcomán, Michoacán, del 19 de septiembre de 2022. Se pudo observar que ninguna de estas estructuras tuvo daños. Estas estructuras tienen ventajas sobre las convencionales, y se espera que su comportamiento sea superior. Por otro lado, se debe mencionar que la cantidad de estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica cerca de la zona epicentral es baja, pero seguramente en el futuro habrá más, lo que permitirá dimensionar mejor las ventajas de este tipo de tecnologías para proteger a las construcciones. Adicionalmente, en lugares más alejados de la zona epicentral, como la Ciudad de México, las intensidades sísmicas fueron bajas, lo que se reflejó en demandas reducidas que no causaron afectaciones en las estructuras equipadas con algún sistema de protección sísmica.

8.4. Referencias

Google Maps. (2023). [Puente Matute Remus]. Recuperado de: <https://www.google.com>
Youtube (2023) [A quien corresponda]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=8rPUYYvB4FI>

9. Vivienda

Dr. Juan José Pérez Gavilán Escalante
II-UNAM
JPerezGavilanE@iingen.unam.mx

MI Leonardo Flores Corona
CENAPRED
lfc@cenapred.unam.mx

Dr. Alfredo Sánchez Alejandre
Universidad de Colima
asanchez35@ucol.mx

Dr. Adrián Pozos Estrada
II-UNAM
APozosE@iingen.unam.mx

9.1. Introducción

El 19 de septiembre del 2022 ocurrió un sismo de magnitud $M_w 7.7$ a 63 km al sur de Coalcomán, Michoacán y una fuerte réplica de 6.9 el 22 de septiembre. El movimiento fue percibido de manera fuerte en los estados de Colima, Michoacán, Ciudad de México y Guerrero; y de forma moderada en Jalisco, Nayarit, Estado de México, Morelos y Aguascalientes. Con las mayores afectaciones en los estados de Colima y Michoacán y daños menores en Jalisco, Nayarit, Estado de México, Ciudad de México, Morelos y Aguascalientes.

Tras los primeros recorridos de los organismos de protección civil, para evaluar la magnitud de los daños, el 30 de septiembre del 2022 se emitieron las declaratorias de desastre natural en los 10 municipios del Estado de Colima y en cinco municipios del estado de Michoacán en el Diario Oficial de la Federación.

En Colima las ciudades más afectadas fueron las de Colima, Tecomán, Ixtlahuacán, Comala, Armería y Manzanillo, con más de 2790 viviendas dañadas, aunque no se tiene el número total de colapsos.

En Michoacán, de acuerdo a un reporte del Director de Caminos y Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP) del estado de Michoacán, los daños a la vivienda unifamiliar se distribuyeron según se muestra en la Tabla 9.1. Sin embargo, se tiene registro de al menos 3161 viviendas con daño en el estado.

En Jalisco, fueron doce los municipios que resultaron más afectados en la región sur de estado: Toluca, Zapotitlán de Vadillo, San Gabriel, Zapotlán el Grande, Sayula, Atoyac, Gómez Farías, Amacueca, Villa Purificación, Cuautitlán de García Barragán, Tonila, y Tizapán el Alto. Los primeros reportes del comité de emergencia del estado ubicaron 243 viviendas con daño parcial y 59 con daño total, siendo el municipio de Toluca uno de los más afectados con 35 viviendas con daño total.

Tabla 9.1 Daños a la vivienda unifamiliar en Michoacán

Municipio	Unidades con daño	Unidades Colapsadas
Coahuayana	1143	398
Aquila	1133	400
Chinicuila	24	-
Coalcomán	63	-

9.2. Daños presentados en viviendas

La mayoría de los daños se presentaron en viviendas informales construidas principalmente con mampostería simple, sin elementos de confinamiento. Se aprecia como una de las principales causas de los daños, al uso de sistemas de techo de madera o de lámina normalmente con alguna pendiente

(una o dos aguas) que descansan directamente sobre los muros. Se sabe que estos sistemas son incapaces de transmitir fuerzas de corte en su plano y por lo tanto no acoplan el movimiento de los muros o elementos resistentes. Este hecho dio lugar, con mucha frecuencia, a fallas fuera del plano y colapso de los muros debido a que funcionan en voladizo si son aislados y si son de fachada, son muros que, en la dirección hacia afuera de la vivienda no tienen soporte lateral y por lo tanto funcionan también en voladizo. Los muros tienen una resistencia muy baja ante cargas fuera del plano, especialmente cuando a esta condición se agrega que los muros no están rematados con dadas formales de concreto reforzado. Parece práctica común en las viviendas de autoconstrucción de la región el remate de los muros con elementos de madera, medios troncos, que, al parecer, facilitan la sujeción del sistema de techo. En otras instancias, la cuerda de la armadura de techo descansa directamente sobre el muro, siendo igualmente ineficaz para resistir cargas fuera del plano. Se observaron algunas construcciones de mampostería confinada, que mostraron un comportamiento más apropiado y con daños menores.

En la Figura 9.1 se muestra un muro interior de una vivienda. El muro muestra agrietamiento por tensión diagonal. Se observa que el muro no tiene dala de remate a nivel de techo; en su lugar, se existe un elemento de madera que recibe troncos de rama que forman el sistema de techo. La abertura en el muro para comunicar dos habitaciones tiene un refuerzo en el extremo superior. Se aprecia en la fotografía el paso de los rayos solares, que atestiguan daño en el techo de la vivienda.



Figura 9.1 Agrietamiento por tensión diagonal, techo de madera. *Fuente: CENAPRED, 2022*

En la Figura 9.2 se presenta el interior de una vivienda, construida con muros de mampostería de tabique rojo recocido, con techo a dos aguas hecho con una estructura de madera con cubierta de lámina acanalada, que no acopla a los muros de la estructura. Los muros están rematados con elementos de madera. Se observan grietas de flexión cerca de la base y deformación fuera del plano.



Figura 9.2 Vivienda, deformación fuera del plano de uno de los muros con daños debidos a flexión cerca de la base. *Fuente: CENAPRED (2022)*

En la Figura 9.3 se observa un muro interior de una vivienda, que tenía una abertura. Se observa que el muro tiene elementos de confinamiento de concreto, pero la abertura no los tiene. El muro perdió un número considerable de piezas. Por la forma del agrietamiento cerca de las esquinas, se deduce que es una falla por corte. Sin embargo, la pérdida de piezas pudo deberse a la acción sísmica fuera del plano.

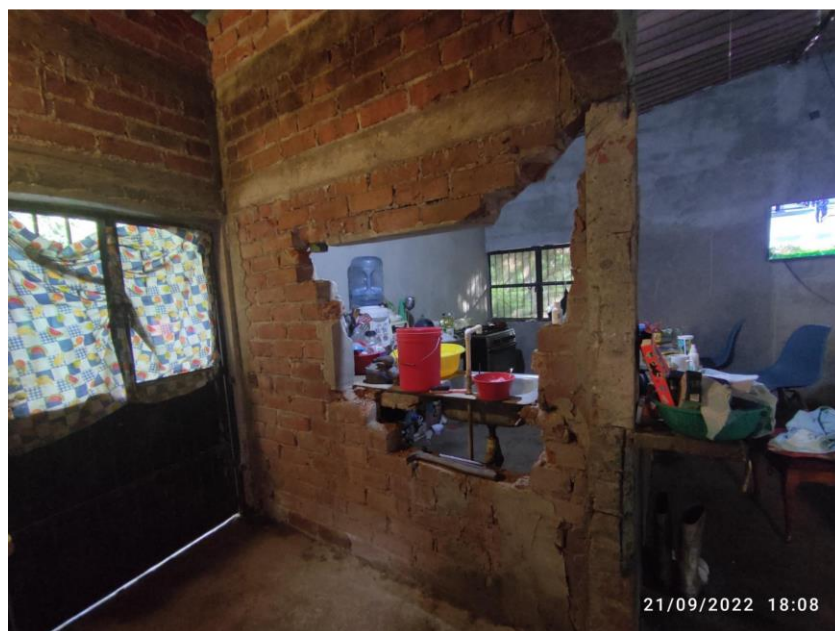


Figura 9.3 Muro interior con daño por cortante ya acción fuera del plano. *Fuente: CENAPRED (2022)*

En la Figura 9.4 se aprecia una vivienda típica de autoconstrucción, sin elementos de confinamiento y techo de lámina. Uno de los muros colapsó en su totalidad por acciones fuera de su plano.

A la izquierda, se observa otro muro parcialmente colapsado. Se aprecia una especie de marco de madera. Estos elementos parecen típicos en la región. El elemento horizontal suele servir de remate del muro y el elemento vertical se coloca como un elemento de confinamiento en la intersección de muros.



Figura 9.4 Vivienda de autoconstrucción elementos de confinamiento y techo de lámina. *Fuente: CENAPRED (2022)*

A la izquierda de la fotografía es claro el apoyo del techo sobre el elemento de madera de remate. Posiblemente, el elemento de madera horizontal facilita la fijación del techo con clavos u otro sistema de fijación.

El muro de mampostería de la Figura 9.5 está hecho a base de block de concreto. El muro tiene una abertura rellena con celosía y elementos verticales de confinamiento, pero no hay dala. El sistema de piso se apoya directamente sobre el muro. El daño es debido al movimiento del muro fuera del plano.



Figura 9.5 Muro con abertura rellena de celosía, daño fuera del plano. *Fuente: CENAPRED (2022)*

La Figura 9.6 ilustra nuevamente la deformación de un muro fuera del plano. El dintel está hecho con un elemento de concreto, pero el resto de la abertura de la puerta no tienen ningún refuerzo y el muro carece de dala de remate. En vez de la dala se tiene la cuerda de madera de la armadura de techo y la cubierta es de lámina. Claramente, la cuerda de la armadura fue ineficaz para resistir carga fuera de su plano; porque no estaba debidamente sujeta al muro, de tal forma que el muro deslizó por debajo de la cuerda de madera.



Figura 9.6 Muro con desplazamientos fuera del plano. *Fuente: CENAPRED (2022)*

La estructura hecha a base de mampostería confinada de la Figura 9.7a tiene los elementos de confinamiento alrededor del muro, y refuerzo alrededor de la puerta. Se tiene una dala a nivel superior de la puerta y una dala de remata al nivel de losa.



Figura 9.7a Estructura de mampostería confinada con daño menor reparable. *Fuente: CENAPRED (2022)*



Figura 9.7b Otro caso mostrando la eficacia de los elementos de confinamiento. *Fuente: CENAPRED (2022)*

Es evidente la eficacia del refuerzo alrededor de la puerta y del confinamiento en general alrededor del muro, que, aunque sufrió agrietamiento por tensión diagonal, quedó perfectamente estable y es reparable sin mayores inconvenientes.

En la Figura 9.7b, se muestra otro caso en el que se observan los elementos de confinamiento del muro y los refuerzos alrededor de la abertura de la venta. El muro no muestra daño alguno.

En la Figura 9.8 se muestra una falla típica de un segmento de muro que colinda con una abertura para ventana, del lado derecho, y por una abertura para una puerta, del lado izquierdo. Las aberturas no muestran refuerzo alguno. El segmento de muro recibe una concentración de fuerza cortante por su reducida altura, como en el caso de columnas cortas. Se observa el severo agrietamiento por tensión diagonal. Debido a la falta de elementos de refuerzo en las aberturas el agrietamiento en el muro se conserva muy localizado que separa al muro en regiones que están cercanas a su colapso.



Figura 9.8 Segmento de muro con concentración de fuerza cortante. *Fuente: CENAPRED (2022)*

El muro colapsado que se muestra en la Figura 9.9 tiene agrietamientos por tensión diagonal que generaron un debilitamiento muy importante del muro en el sentido fuera del plano. Este debilitamiento eventualmente se tradujo en una falla fuera del plano que produjo el colapso. Este tipo de secuencia en el que el daño es inicialmente por tensión diagonal en el plano y posterior falla en fuera de él se ha observado en el laboratorio.

En la Figura 9.10 se presenta un caso de una estructura formal, en la que existen elementos de confinamiento, castillos en los extremos de muros, dala a nivel superior de ventana. Desafortunadamente, el refuerzo alrededor de la ventana no incluyó el borde inferior. Se observa además que se omitió el refuerzo vertical del lado izquierdo de la ventana. Estas omisiones dejaron desprotegidos al muro del lado izquierdo de la abertura que fue el que resultó más dañado y la parte inferior de la ventana del lado derecho. Además, el muro perpendicular, que presentó agrietamiento por tensión diagonal, tuvo un mejor comportamiento.

El desprendimiento de un pretil unido a un techo se muestra en la Figura 9.11, el cual estaba desplantado sobre la dala de remate del muro en el nivel inferior. Sin embargo, el pretil no cuenta con castillos anclados a dicha dala. Existen muros en el sentido perpendicular al pretil, pero la intersección esta “a tope” como puede observarse en el muro perpendicular que se observa en el extremo izquierdo, que muestra una superficie limpia. En los otros muros perpendiculares no hay la misma limpieza en la superficie, pero no hay evidencia de la existencia de un castillo. Entre las intersecciones, claramente, no hay ningún castillo. Aunque la estructura parece formal, cuenta con un techo de lámina. Es posible que las láminas hayan sido colocadas posteriormente después del colapso. Este hecho dejó al muro de fechada libre para desplazarse en dirección perpendicular a su plano. Dado el peso del pretil que estaba unido a un pequeño techo, las fuerzas de inercia desprendieron al pretil fuera de su plano, ya que prácticamente estaba sobrepuesto.



Figura 9.9 Colapso de muro con agrietamiento por tensión diagonal y posterior falla fuera del plano



Figura 9.10 Vivienda formal en Calcomán Michoacán, con daño severo por tensión diagonal



Figura 9.11 Desprendimiento de pretil, por falta de castillos

9.3. Referencias

CENAPRED (2022). *Resultado de la visita de campo a la zona epicentral del estado de Colima, después del sismo del 19 de septiembre de 2022*, Nota Informativa, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 27 de septiembre de 2022, 6 pp.

Aquila, Michoacán Mexico September 19, 2022, Mw 7.6 Earthquake: Preliminary Virtual Reconnaissance Report (PVRP), Virtual Earthquake Reconnaissance Team (VERT), EERI, SMIS, September 30, 2022.

Anexo A. Caídos en carreteras

La visita de reconocimiento de daños geotécnicos, por parte del GdeG del IIUNAM, fue algunos días posteriores al evento. Debido a esto, no fue posible visualizar caídos o derrumbes en carreteras propiciados por el sismo, ya que los materiales térreos ya habían sido retirados para facilitar el tránsito vehicular. Sin embargo, se recopilaron algunos casos documentados en notas periodísticas y reportes de internet, los cuales se presentan en el este anexo. En la mayoría de los casos solo se identifica el tramo carretero, ya que se desconoce el sitio exacto donde estos sucedieron. Se debe reconocer que, aunque la búsqueda fue exhaustiva, seguramente hubo muchos caídos y deslizamiento que no fueron documentados.

A.1 Carretera Chinicuila-Coalcomán

En la carretera que comunica a los municipios de Chinicuila y Coalcomán, sucedieron 22 derrumbes de materiales térreos como gravas, boleos y rocas. Se puede apreciar un caído en la zona en comento. El material se visualiza con cierta humedad. Posiblemente, las lluvias de temporada colaboraron a la inestabilidad, siendo el sismo el detonante del derrumbe.

Más de 150 derrumbes fueron detectados en la carretera que une los municipios de Aquila y Coalcomán, 80 de los cuales impedían el tránsito vehicular. Uno de ellos se muestra en la Figura A.1 y A.2, en donde se observan masas de roca de volúmenes considerables.



Figura A.1 Caídos en la carretera Chinicuila-Coalcomán (Quadratin San Luis Potosí, 2022)



Figura A.2 Derrumbe en la carretera Chinicuila-Coalcomán (El Sol de Morelia, 2022)

A.2 Carretera Villa Victoria-Coalcomán

Se reportó también un derrumbe en la carretera que va de los municipios Villa Victoria a Coalcomán, el cual se muestra en la Figura A.3.



Figura A.3 Caídos en la carretera Villa Victoria-Coalcomán (El Sol de Morelia, 2022)

A.3 Carretera Colima-Tecomán

La Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), mediante su página de internet, reportó la liberación de caminos obstruidos. Se presentaron diversos derrumbes entre los kilómetros 19 y 22 de la carretera Colima-Tecomán “La Salada”; en la Figura A.4 se muestra uno de ellos.



Figura A.4 Rocas caídas en la carretera Colima-Tecomán (SICT, 2022)

A.4 Autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas

En el kilómetro 228 de la autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas-Silo XXI, la SICT retiró una roca que se encontraba obstruyendo en el camino, Figura A.5.



Figura A.5 Roca retirada de la autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas (SICT, 2022)

A.5 Carretera Playa Azul-Manzanillo

Personal de la SICT detectó algunas grietas y derrumbes, Figura A.6, en la carretera Playa Azul-Manzanillo, tramo Playa Azul-Límite estados Michoacán-Colima, kilómetro 106+000 y del 192+000 al 229+600.



Figura A.6 Derrumbe en la carretera Playa Azul-Manzanillo (SICT, 2022)

Anexo B. Otros daños en edificaciones e infraestructura

Como se menciona en el cuerpo del presente informe, además de los daños asociados a aspectos geotécnicos, el GdeG-IIUNAM también identificó algunos daños de naturaleza puramente estructural durante el recorrido a las zonas afectadas por el sismo. Debido al enfoque del presente informe, principalmente asociado a aspectos geotécnicos, la identificación de estos daños estructurales mencionados se concentra en este anexo. A continuación, en la Figura B1, se ubican los lugares que se visitaron durante el trayecto que va de Michoacán a Colima. Y en la Tabla B1 se listan los lugares visitados.

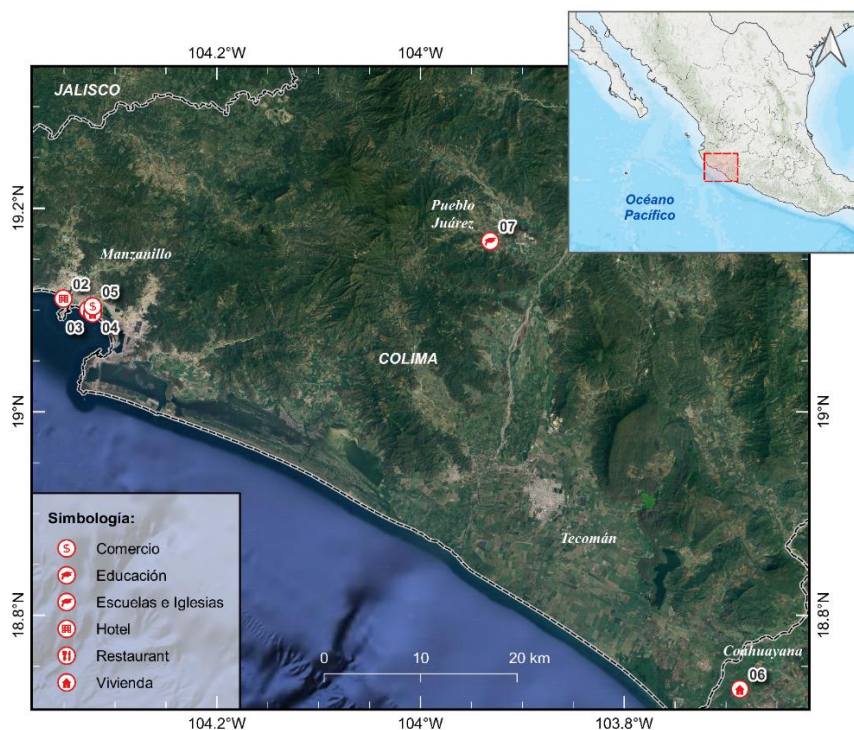


Figura B1. Localización de los lugares visitados por el GdeG IIUNAM, durante el trayecto de Michoacán a Colima, con reporte de daños estructurales observados

Tabla B1. Listado de los lugares visitados por el GdeG-IIUNAM durante el trayecto de Michoacán a Colima, con reporte de daños estructurales observados

ID	Sitio	Uso	Municipio	Estado	Latitud	Longitud
01	Condominio Gran Pacífico	Vivienda	Manzanillo	Colima	19.100299	-104.326474
02	Hotel Anita	Hotel	Manzanillo	Colima	19.111185	-104.350768
03	Restaurant El Bigotes	Restaurant	Manzanillo	Colima	19.096934	-104.322402
04	Condominio La Vista	Vivienda	Manzanillo	Colima	19.096736	-104.321994
05	Parque Contenedores	Comercio	Manzanillo	Colima	19.103611	-104.321944
06	Poblado San Vicente (Vivienda)	Vivienda	Coahuayana	Michoacán	18.727500	-103.686389
07	Pueblo Juárez (Escuelas e Iglesias)	Escuela e Iglesias	Pueblo Juárez	Colima	19.167778	-103.931667

B.1 Condominio Gran Pacífico, Manzanillo, Colima

El Condominio Gran Pacífico se ubica en el Boulevard Miguel de la Madrid 1847, en Manzanillo, Colima, Figura B1 sitio 01. Este conjunto consiste en edificios de concreto reforzado de 9 niveles en su sección máxima, y se compone de varios cuerpos conformados en forma de herradura, Figura B2 y B3.

Los edificios presentaron algunos daños en elementos estructurales, relacionados con agrietamientos y desprendimiento del recubrimiento principalmente. Adicionalmente, las mayores afectaciones ocurrieron en elementos no estructurales, mampostería y fachadas. Según nos fue informado, durante el sismo de Tecmán de 2003 también se produjeron daños similares. Al visitarlo, el condominio se encontraba en proceso de evaluación del siniestro por parte de la aseguradora.



Figura B2. Entrada principal del Condominio Gran Pacífico



Figura B3. Fachada con daños en la zona de albercas, hotel Gran Pacífico

B.2 Hotel Anita

El Hotel Anita, una edificación de la primera mitad del siglo pasado, se encuentra ubicado en Playa Santiago, Figura B1 sitio 02. Es importante mencionar que esta edificación aparentemente no presentó daños en la cimentación o algún problema relacionado con aspectos geotécnicos. Sin embargo, debido a su condición actual particularmente precaria, se cree necesario su inclusión en el presente informe.

Esta edificación presenta dos tipos de daños importantes, los primeros relacionados con el sismo y los restantes, los más llamativos, relacionados con el deterioro de la estructura debido a décadas sin mantenimiento y a la exposición a los agentes atmosféricos, salinidad y, probablemente, al daño acumulado producto de la acción de sismos anteriores. Es sorprendente que este edificio estuviera parcialmente en funcionamiento como hotel antes del sismo. Por las condiciones en las que se observa la estructura, esta debió de haber sido demolida hace bastante tiempo, ya que representa un gran riesgo para los ocupantes.

En la Figura B4 (a y b) se observan grietas en elementos estructurales causadas por este sismo. En la Figura B4 (c y d) se observan daños en los muros de mampostería por acción del sismo. En la Figura B5a se presenta la fachada del hotel en la actualidad y en la Figura B5b, en sus inicios de funcionamiento.



Figura B4. Daños (a y b) estructurales y (c y d) en muros por el sismo

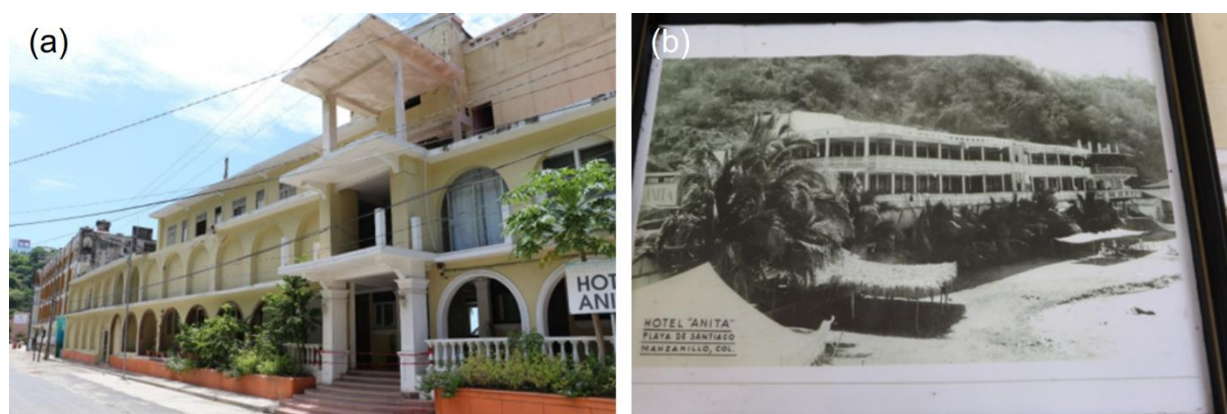


Figura B5. a) Fachada del Hotel Anita en la actualidad y b) el hotel en sus años “dorados” (foto ubicada en la recepción)

En la Figura B6 a se observan grietas en el piso de una de las habitaciones, las cuales pueden haber ocurrido por el pandeo de las vigas que soportan estas losas planas y en la Figura B6 b las grietas que pudieron haber incrementado su extensión por acción del sismo.



Figura B6. a) Agrietamiento en la losa de una habitación y b) y pandeo en las vigas que la soportan. Hotel Anita

En la Figura B7 y B8 se observan sistemas rudimentarios de apuntalamiento deteriorados, los cuales sostienen algunas zonas de la edificación, siendo posible que en algunos sitios de la edificación pudieran haber evitado colapsos debido al sismo.



Figura B7. Daños estructurales por deterioro y puntales usados para mantener en pie algunos sectores de la estructura, del Hotel Anita



Figura B8. Apuntalamiento que pudo haber evitado el colapso de una sección del edificio. Se observa desprendimiento de materiales por acción del sismo. Hotel Anita

En las Figuras B9 y B10 se muestra el grado de deterioro estructural que ha sufrido el Hotel.

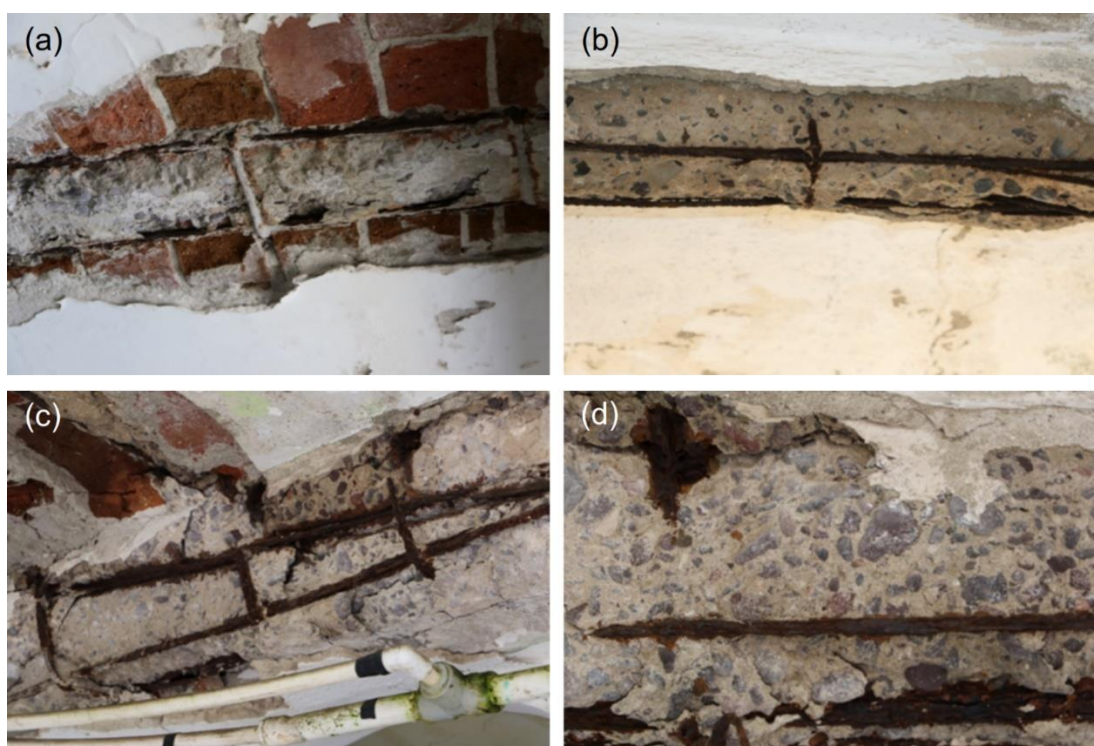


Figura B9. Daños estructurales por deterioro



Figura B10. Daños estructurales por deterioro

B.3 Restaurante El Bigotes

El restaurante El Bigotes se ubica contiguo a la playa, en la ciudad de Manzanillo Figura B1 sitio 03. Se trata de un edificio de un solo nivel construido en diferentes etapas a través del tiempo. El procedimiento constructivo, así como su diseño mismo, ha sido con base en el conocimiento empírico de los propietarios (autoconstrucción). Debido a esto, no contaban con una memoria de cálculo o planos constructivos. Para su construcción se emplearon diversos materiales e incluso se identifican diferentes niveles de techo, Figura B11. Las conexiones entre los diferentes espacios que conforman el restaurante presentaban numerosas grietas no estructurales de poca importancia, Figura B12. Una grieta que llamó la atención por su tamaño y ubicación fue la existente en un muro de colindancia. Esta grieta comienza en un muro y se prolonga hasta el piso, Figura B13. Aparentemente, por lo que pudimos apreciar a primera vista, dicha grieta es atribuible al asentamiento generado por el edificio de condominios vecino debido al sismo.



Figura B11. Diferentes niveles de losa



Figura B12. Grietas no estructurales



Figura B13. Grieta en muro de colindancia que continúa hasta el piso

B.4 Condominio La Vista

El edificio de condominios que colinda con el restaurante los Bigotes, llamado “La Vista”, Figura B1 sitio 04, está conformado por una planta baja y cuatro niveles; en el cuarto nivel hay una terraza. Este edificio presentó agrietamiento sistemático en todas las ventanas, dado que no cuentan con un confinamiento adecuado por medio de elementos estructurales, Figura B14 a. Debido a que las grietas que se presentaron no fueron en elementos estructurales, simplemente se procedió a retirar el recubrimiento Figura B14 b y reemplazar el material. Se presentaron otras grietas en el resto del edificio, como se puede apreciar en la Figura B15.



Figura B14. a) Grietas presentes en ventanas y b) retiro del recubrimiento agrietado



Figura B15. Grietas en muros colindantes

B.5 Parque Contenedores

Ubicado en Avenida Paseo de Las Gaviotas 83, en la Ciudad de Manzanillo, Figura B1 sitio 05, esta estructura es un pequeño desarrollo comercial con un gimnasio, un centro educativo y algunos locales comerciales. Una parte del inmueble está construido a base de contenedores y elementos estructurales de acero, por lo cual es una estructura liviana y flexible. Los daños observados fueron principalmente en elementos no estructurales, en el gimnasio que se ubica en la planta alta, con desprendimiento de plafones, elementos de fachada y rotura de vidrios y espejos, Figura s B16 y Figura B17 (a y b).



Figura B16. Daño en fachada del gimnasio



Figura B17. Desprendimiento de plafones y rotura de cristales

B.6 Poblado de San Vicente

San Vicente es un pueblo del municipio de Coahuayana, Michoacán, con 516 habitantes y localizada 8 msnm, Figura B1 sitio 06. En este centro de población se observó, principalmente, el colapso de varias viviendas de una sola planta, en las cuales se hicieron evidentes las carencias constructivas en cuanto a pobres cuantías de acero en columnas y vigas, secciones de los elementos estructurales reducidas y deficiencias en los métodos constructivos, Figura B18 a, B18 b y B18 c. De igual forma, se observaron viviendas con daños menores, Figura B18d. Es necesario mencionar que las viviendas en estos poblados, además de los aspectos anteriores, sufren con cierta frecuencia la acción de sismos de magnitud significativa, lo cual induce daños que, por las condiciones socio económicas de la región, difícilmente serán reparados de forma adecuada con la consecuente acumulación de daños en el tiempo.



Figura B18. (a, b y c) Viviendas colapsadas y d) vivienda con daños menores

B.7 Pueblo Juárez

Pueblo Juárez es un poblado de unos 2,300 habitantes, a 268 msnm, en el estado de Colima, Figura B1 sitio 07. Los daños observados se pueden considerar menores, consistentes en grietas en algunas columnas y en muros de mampostería, Figura B19 y B20. Se estima que los daños observados, pueden ser reparados.



Figura B19. Daños en escuela secundaria en Pueblo Juárez, Colima



Figura B.20. Daños en la iglesia de Pueblo Juárez, Colima

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSP/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM®**