



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

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE INFRAESTRUCTURA DE
TRANSPORTE EN ZONAS URBANAS ANTE EVENTOS NATURALES
EXTREMOS

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

PRESENTA:
M.I. AZUCENA ROMÁN DE LA SANCHA

TUTOR PRINCIPAL
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., OCTUBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

Al equipo estrella:

Blanca, Luis, Juan Manuel, Fri, Mani, Nacho, Rey e Inés.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi gratitud y admiración al Dr. Rodolfo Silva por proporcionarme su excelente dirección académica en mis estudios de Doctorado. Gracias por confiar en mí, orientarme y motivarme durante este período. Este trabajo no hubiera sido posible sin su continuo y generoso apoyo. Contar con el Dr. Silva como tutor ha significado uno de los momentos más afortunados en mi trayectoria académica y profesional.

Así mismo, agradezco el valioso apoyo de mi comité tutor, a los investigadores Dr. Edgar Mendoza, Dra. Alexandra Ossa, Dra. Norma Patricia López y la Dra. Silvia García. Gracias por su tiempo y sus importantes contribuciones para enriquecer la investigación desde sus conocimientos y experiencia.

Deseo manifestar el mayor de los agradecimientos a mi familia. A mis padres por brindarme siempre su amor incondicional, por ser apoyo y aliento en cada proyecto emprendido en mi vida, y por cada uno de sus sabios consejos. Mi infinita gratitud a mi esposo Juan Manuel y mis hijos Frida Donatella y Juan Manuel, por el profundo amor, la paciencia y la alegría que me regalan incluso en los momentos difíciles. Gracias a mis hermanos Luis Ignacio y Reynolds, y mi cuñada Inés, por siempre estar presentes y compartir conmigo este y todos los momentos trascendentes.

Finalmente quiero agradecer a mi *alma máter* la Universidad Nacional Autónoma de México, la que ha sido un segundo hogar desde mi adolescencia y en la cual hoy culmino una etapa más en mi vida académica. Gracias porque desde sus aulas me ofreció las herramientas necesarias para desarrollarme plenamente en todos los aspectos de mi vida.

¡México, Pumas, Universidad!

Contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1	Justificación e importancia de la investigación	1
1.2	Revisión de la literatura y estado del arte	4
1.2.1	Vulnerabilidad sísmico-estructural de infraestructura	4
1.2.2	Vulnerabilidad operativa de redes de transporte	6
1.2.3	Enfoques sistémicos de vulnerabilidad y resiliencia sísmica	11
1.2.4	Vulnerabilidad multi amenaza en zonas costeras	14
1.2.5	Vulnerabilidad, resiliencia y sostenibilidad	16
1.2.6	Comentarios	17
1.3	Objetivos de la investigación	18
1.4	Metodología	19
1.4.1	Análisis envolvente de datos	20
1.4.2	Caracterización del área de estudio	22
1.4.3	Estimación de la vulnerabilidad sísmica	27
1.4.4	Distribución espacial de daños	34
1.4.5	Respuesta dinámica de tráfico	36
1.4.6	Evaluación de vulnerabilidad sísmico-operativa	39
1.4.7	Respuesta secuencial sismo-tsunami en zonas urbanas costeras	40
1.5	Organización de la tesis	43
1.6	Principales aportaciones	43

Capítulo 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1	Introducción	45
2.2	Riesgo, peligro y vulnerabilidad sísmica	45
2.2.1	Análisis de peligro sísmico probabilista	45
2.2.2	Modelos de vulnerabilidad sísmica estructural	48
2.2.3	Funciones de fragilidad sísmica	49
2.3	Análisis dinámico de redes de transporte	52
2.4	Análisis de respuesta por sismo y tsunami en infraestructura de transporte	55
2.5	Simulación de propagación de tsunamis	54
2.6	Comentarios	57

Capítulo 3 CASO DE ESTUDIO 1: SISMOS NORMALES Y DE SUBDUCCIÓN, CIUDAD DE MÉXICO

3.1	Introducción	59
3.2	Caracterización de la zona de estudio	59
3.2.1	Ambiente sísmico	60

3.2.2	Características del suelo	61
3.2.3	Patrones de viaje	63
3.3	Caracterización de la infraestructura	66
3.4	Peligro sísmico	69
3.5	Análisis de respuesta de sitio	72
3.6	Probabilidad de daño en infraestructura	79
3.6.1	Curvas de fragilidad	79
3.6.2	Cálculo de probabilidades de daño	83
3.7	Modelo de distribución de daños	83
3.8	Simulación del comportamiento de la red de transporte	85
3.9	Modelo multivariable de vulnerabilidad sísmico-operativa de la red	92
3.9.1	Respuesta sísmico-operativa de la red vial	92
3.9.2	Fronteras de vulnerabilidad sísmico-operativa de la red	94
3.10	Comentarios	98
Capítulo 4 CASO DE ESTUDIO 2: RESPUESTA SECUENCIAL SISMO-TSUNAMI DE TERRAPLENES CARRETEROS COSTEROS, MANZANILLO		
4.1	Introducción	99
4.2	Caracterización de la zona de estudio	99
4.2.1	Caracterización sísmica y geotécnica	101
4.3	Modelo de respuesta secuencial sismo-tsunami	103
4.3.1	Ambiente sísmico	104
4.3.2	Análisis de respuesta de sitio	106
4.3.3	Caracterización de la resistencia a licuefacción	109
4.3.4	Fase 1: Modelo de respuesta sísmica	111
4.3.5	Fase 2: Simulación de generación y propagación de tsunami	128
4.3.6	Fase 3: Modelo de respuesta sismo-tsunami	136
4.4	Comentarios	139
Capítulo 5 CONCLUSIONES		
5.1	Conclusiones finales	141
5.1.1	Sobre la metodología	141
5.1.2	Sobre los casos de estudio	143
5.2	Futuras líneas de investigación	144
REFERENCIAS		146

Índice de figuras

Figura 1. Procesos de la ingeniería de resiliencia, y elementos en los que contribuyen los estudios de vulnerabilidad	17
Figura 2. Metodología de respuesta sísmica y evaluación de eficiencia de redes de transporte	19
Figura 3. Localización de fuentes sísmogénicas	23
Figura 4. Propiedades geo sísmicas en el área de estudio a través de perfiles genéricos	26
Figura 5. Distribución de la demanda y tiempos de viaje típicos en zonas urbanas	26
Figura 6. Curvas de peligro sísmico y espectro de peligro uniforme	28
Figura 7. Representación del problema de análisis de respuesta de sitio	29
Figura 8. Esquema de respuesta de sitio y propagación de ondas	30
Figura 9. Curvas de fragilidad para vialidades urbanas de 2 carriles o más en Estados Unidos, NIIBS 2012	31
Figura 10. Procedimiento general para el desarrollo de curvas de fragilidad de elementos de la red vial	33
Figura 11. Cálculo de la probabilidad de falla utilizando curvas de fragilidad. Modificado de Porter (2020)	33
Figura 12. Esquema de la integración en SIG del inventario de infraestructura y las probabilidades de daño obtenidas...	34
Figura 13. Ubicación de los edificios dañados durante el terremoto de la Ciudad de México de 2017	35
Figura 14. Esquema de la integración de las probabilidades de daño obtenidas y el criterio de bloqueo de vialidades.....	36
Figura 15. Estructura del algoritmo de solución del problema de asignación dinámica	38
Figura 16. Obtención de límites o fronteras de eficiencia sísmica de redes de transporte	39
Figura 17. Procedimiento de generación de mapas de eficiencia sísmico-operativa	40
Figura 18. Esquema secuencial de respuesta sísmo-tsunami en infraestructura de transporte	40
Figura 19. Geometría de la falla rectangular utilizando el modelo de Okada	42
Figura 20. Procedimiento del análisis de riesgo sísmico probabilista	46
Figura 21. Forma típica de curvas de fragilidad	49
Figura 22. Relación entre las curvas de capacidad y el espectro de demanda de estructuras	50
Figura 23. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería con confinamiento de (a) 1, (b) 2 y (c) 3 niveles	51
Figura 24. Edificio de mampostería con confinamiento típico	52
Figura 25. Estructura general de modelos de asignación dinámica de transporte	52
Figura 26. Localización de la zona de estudio y zonificación geo sísmica en la Ciudad de México	60
Figura 27. Fuentes sísmicas que afectan la Ciudad de México	60
Figura 28. Características del perfil de suelo, (a) Zona II, (b) Zona IIIa; and (c) Zona IIIb	62
Figura 29. Distribución de viajes durante el día en la Zona Metropolitana del Valle de México	63
Figura 30. Distritos considerados en el estudio, basados en la encuesta OD, INEGI (2018)	65
Figura 31. Matriz OD en la zona de estudio para la hora punta 7:15 – 8:14 am, INEGI (2018)	66
Figura 32. Trabajo de campo realizado para la caracterización de puentes en el área de estudio	67
Figura 33. Edificios e infraestructura de transporte en la zona de estudio	67
Figura 34. Zonas sísmogénicas estudiadas (a) sismos de pequeña a moderada intensidad, (b) sismos característicos	69
Figura 35. Espectros de peligro uniforme para eventos (a) normales y (b) de subducción	72
Figura 36. Columna de suelo del modelo tridimensional de diferencias finitas	73
Figura 37. Historias de aceleración semilla utilizadas en el modelo en el dominio del tiempo, (a) subducción, (b) normal.	74
Figura 38. (a) Módulo de rigidez normalizado, (b) curvas de amortiguamiento	75
Figura 39. Espectros de respuesta para Zona II (a) subducción y (b) evento normal	76
Figura 40. Espectro de respuesta para Zona IIIa (a) subducción y (b) normal	76
Figura 41. Espectros de respuesta para Zona IIIa (a) subducción y (b) normal	76
Figura 42. Aproximación de la distribución espacial de (a) PGA (b) PGD para sismos de subducción	78
Figura 43. Aproximación de la distribución espacial de (a) PGA (b) PGD para sismos normales	79
Figura 44. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería con confinamiento	80
Figura 45. Curvas de fragilidad para edificios de concreto reforzado	81
Figura 46. Curvas de fragilidad para puentes	81
Figura 47. Curvas de fragilidad para túneles	82
Figura 48. Curvas de fragilidad para vialidades	82
Figura 49. Distribución espacial de daños dentro del área de estudio (a) sismos de subducción y (b) sismos normales	84
Figura 50. Segmentos con probabilidad de cerrar como medidas de seguridad en (a) subducción (b) normales	85
Figura 51. Correlación entre datos de la simulación y mediciones	86
Figura 52. Tiempos de viaje obtenidos (a) condiciones típicas, (b) subducción $T_r=475$ años, (c) normales $T_r=475$ años ...	90
Figura 53. Volúmenes obtenidos (a) condiciones típicas, (b) subducción $T_r=475$ años, (c) normales $T_r=475$ años ...	90
Figura 54. Mapas de eficiencia sísmica para los escenarios estudiados	91
Figura 55. Fronteras de eficiencia sísmica entre (a) Volúmenes-PGA, (b) Velocidad-PGA, (c) Tiempo de viaje-PGA	92
Figura 56. Fronteras de eficiencia sísmica en función de la aceleración espectral S_a a 0.3 s	96
Figura 57. Sismicidad en la zona de Manzanillo y alrededores	97
Figura 58. Infraestructura de transporte en la zona urbana y alrededores de Manzanillo	99
Figura 59. Terraplenes localizados en la zona de estudio	94
Figura 60. Caracterización geotécnica en la zona de Manzanillo	95
Figura 61. Sitios de exploraciones	96
Figura 62. Perfiles de velocidad de onda de cortante reportados por Domínguez-Reyes et al. (2017)	96
Figura 63. Localización del terraplén	101
Figura 64. Geometría del terraplén analizado	101
Figura 65. Localización de la Estación Sísmica MZ01 y del epicentro del sismo de Manzanillo de 1995 ($M_w=8$)	103
Figura 66. Historias de aceleraciones del registro de la estación MZ01 durante el sismo de Manzanillo 1995 ($M_w=8.0$) ...	103
Figura 67. Espectro de respuesta del registro de la estación MZ01 durante el sismo de Manzanillo 1995 ($M_w=8.0$)	103
Figura 68. Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos sin corrección por línea base	104
Figura 69. Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos con corrección	104
Figura 70. Comparación entre el espectro registrado y el calculado después de la propagación del sismo deconvoluto.	106
Figura 71. Curvas de degradación de la rigidez normalizada G/G_{max}	104

Figura 72. Curvas de amortiguamiento	105
Figura 73. (a) Perfil de esfuerzo cortante máximo y (b) Perfil de cociente de esfuerzo cíclico	105
Figura 74. Número equivalente de esfuerzos cíclicos uniformes, N_{eq} , para diferentes magnitudes de sismos	106
Figura 75. Relación entre el cociente de resistencia cíclica que causa licuación y los valores de $(N1)_{60}$	106
Figura 76. Estratos de suelo y terraplén en el modelo tridimensional de diferencias finitas	109
Figura 77. Ilustración del modelo tridimensional de diferencias finitas desarrollado	110
Figura 78. Comparación entre las curvas obtenidas en el programa SHAKE y las obtenidas con el modelo sig3	111
Figura 79. Espectros de respuesta en superficie calculados con los diferentes tipos de análisis	113
Figura 80. Representación de casos analizados	113
Figura 81. Puntos de control para la medición de presión de poro, esfuerzos y desplazamientos	113
Figura 82. Factores de seguridad obtenidos en condición estática para cada caso de análisis	115
Figura 83. Caso 1, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final	115
Figura 84. Caso 2, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final	116
Figura 85. Caso 3, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final	117
Figura 86. Caso 4, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final	117
Figura 87. Caso 5, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final	118
Figura 88. Desplazamiento vertical final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	119
Figura 89. Desplazamiento horizontal final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	120
Figura 90. Vectores de desplazamiento final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	121
Figura 91. Historias de desplazamiento horizontal (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	123
Figura 92. Historias de desplazamiento vertical (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	125
Figura 93. Historias de velocidades (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	127
Figura 94. Relación de presión de poro (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5	128
Figura 95. Dominio establecido para el modelo de propagación de ola	129
Figura 96. Batimetría en el dominio de estudio	130
Figura 97. Curvas de nivel en un acercamiento a la ciudad de Manzanillo, obtenidas de los datos batimétricos	131
Figura 98. Geometría y localización de la falla	132
Figura 99. Deformación del fondo marino para el sismo de entrada	132
Figura 100. Perfil de deformación del fondo marino	132
Figura 101. Propagación de la altura de la superficie oceánica y velocidades	133
Figura 102. Localización de las boyas para la obtención de parámetros en el modelo de propagación de la ola	134
Figura 103. Profundidad oceánica en los puntos de ubicación de las boyas y distribución de elevaciones	135
Figura 104. Distribución de las componentes u y v de las velocidades de la ola para el periodo de simulación	135
Figura 105. Distribución de las componentes u y v de las velocidades de la ola para el periodo de simulación	135
Figura 106. Distribuciones en el punto más cercano a la costa, Boya 5	136
Figura 107. Escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m	136
Figura 108. Escenario 2 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica	136
Figura 109. Presión de poro obtenida para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m	137
Figura 110. Desplazamientos verticales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m	137
Figura 111. Desplazamientos horizontales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m	137
Figura 112. Vectores de desplazamiento obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m	138
Figura 113. Presión de poro obtenida para el escenario 2, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica	138
Figura 114. Desplazamientos verticales obtenidos para el escenario 1, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica	138
Figura 115. Desplazamientos horizontales obtenidos para el escenario , sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica	139
Figura 116. Vectores de desplazamiento obtenidos para el escenario 1, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica	139

Índice de tablas

Tabla 1. Curvas de fragilidad desarrolladas para infraestructura de transporte y edificios	6
Tabla 2. Algunas medidas de vulnerabilidad topográfica de redes	8
Tabla 3. Modelos de transporte aplicados a análisis de vulnerabilidad sísmica de redes	12
Tabla 4. Revisión de estudios sobre vulnerabilidad sísmica de redes	13
Tabla 5. Variables de entrada y salida utilizados en el modelo de eficiencia de una red vial	22
Tabla 6. Algunas tipologías de estructuras definidas para zonas urbanas	24
Tabla 7. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería obtenidas por distintos métodos	32
Tabla 8. Generación de viajes diarios dentro del área de estudio	64
Tabla 9. Tipologías de edificios e infraestructura de transporte	68
Tabla 10. Parámetros para las fuentes sísmicas que generan eventos pequeños y moderados	70
Tabla 11. Parámetros de zonas de ocurrencia de sismos característicos con $M > 7.0$	70
Tabla 12. Parámetros para el espectro de Fourier	71
Tabla 13. Eventos considerados para la definición de sismos semilla para los análisis en el dominio del tiempo	73
Tabla 14. Valores de aceleración máxima del terreno, PGA (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno	76
Tabla 15. Valores de aceleración espectral, Sa a 0.1 s (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno	77
Tabla 16. Valores de aceleración espectral, Sa a 0.3 s (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno	77
Tabla 17. Valores de desplazamiento máximo del terreno, PGD (m), obtenidos para cada zona y periodo de retorno	77
Tabla 18. Curvas de fragilidad seleccionadas para el área de estudio	80
Tabla 19. Curvas de fragilidad seleccionadas para el área de estudio	87
Tabla 20. Variaciones en las variables de comportamiento de tráfico para los tres escenarios evaluados	88
Tabla 21. Coeficiente de correlación, R2, relacionando variables sísmicas y de comportamiento de tráfico	94
Tabla 22. Características del sismo de Manzanillo 1995 y del registro de la estación MZ01	104
Tabla 23. Correlaciones para la estimación de velocidad de onda de cortante	109
Tabla 24. Número de golpes	109
Tabla 25. Corrección de la relación $CRRM/CRRM=7.5$ por magnitud del sismo	110
Tabla 26. Factor de seguridad ante licuación	111
Tabla 27. Propiedades del suelo en el modelo geotécnico	112
Tabla 28. Propiedades del terraplén en el modelo geotécnico	112
Tabla 29. Coeficientes de modelo de Finn/Byrne empleados en el análisis tridimensional	114
Tabla 30. Elevación del nivel de mar para cada caso de análisis	114
Tabla 31. Características del mecanismo de falla del sismo de Manzanillo de octubre de 1995	131
Tabla 32. Localización de los puntos de control en el modelo de simulación de tsunami	134

Resumen

La evaluación de la vulnerabilidad de las redes de transporte en zonas urbanas ante eventos extremos, como sismos de gran magnitud, se ha estudiado marginalmente, debido a las complejas interacciones entre el comportamiento de las estructuras (como puentes, túneles y líneas de metro, y el sistema de edificaciones) y los esquemas de operación y comportamiento de las redes de transporte que prevalecen en zonas urbanas densamente pobladas. Es común realizar simplificaciones en el modelado de las redes de transporte para abordar su respuesta durante y después de eventos naturales extremos. En esta investigación doctoral, se propone y aplica una metodología integral multidisciplinaria basada en el modelado de tráfico dinámico a macro escala, con la evaluación probabilística de riesgo sísmico, para estudiar el comportamiento y desempeño de dichas redes frente a eventos sísmicos de gran magnitud. Se toma como primer caso de estudio un sector de la zona sur de la Ciudad de México. El entorno sísmico se estableció utilizando espectros de peligro uniforme derivados en suelo firme. Se analizaron los efectos del sitio utilizando perfiles de suelo representativos de las zonas de suelo lacustre y firme. Se utilizaron curvas de fragilidad sísmica de estructuras, cuyas capacidades de predicción se establecieron con base en medidas directas de daños observados durante el terremoto del 19 de septiembre de 2017. Una vez establecidos los escenarios sísmicos se implementó un modelo dinámico de tráfico, que permitió representar la interacción entre oferta y demanda de transporte. Se evaluó la distribución y comportamiento de los flujos de tráfico para diferentes estados de daño y escenarios sísmicos, con los que se determinaron elementos críticos de la red vial. A partir del estudio, se estableció una nueva medida de vulnerabilidad y eficiencia operativa de la red, que combina variables sísmicas y de tráfico fundamentales utilizando el método de envolvente de datos. El método permite establecer límites de vulnerabilidad en redes a escala urbana. Un segundo caso de estudio fue la ciudad de Manzanillo, en el cual se analizó el efecto combinado de sismo y tsunami que enfrenta la infraestructura de transporte en zonas costeras. Para ello se propuso un esquema de modelado secuencial basado en la aplicación de métodos numéricos como volúmenes finitos y diferencias finitas.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e importancia de la investigación

En las décadas recientes, las pérdidas asociadas a desastres naturales debidos a sismos y fenómenos hidrometeorológicos se han incrementado en todas las regiones del mundo (Botzen et al. 2019; Toya & Skidmore 2007; Kazama & Noda, 2012). Una de las razones principales es el rápido crecimiento de la población en zonas urbanas, por esta razón los estudios enfocados en el análisis de riesgo y la estimación de la vulnerabilidad y funcionamiento de infraestructuras urbana y estratégica han ganado relevancia y ampliando sus alcances. En zonas urbanas densamente pobladas, las redes de transporte se consideran infraestructura crítica que debe garantizar continuidad operativa tanto en condiciones normales como extremas. Sin embargo, la experiencia de eventos pasados, como en los casos de terremotos y tsunamis en las zonas urbanas de Palu, Indonesia en 2018, , Kaikoura, Nueva Zelanda en 2016, Italia central en 2016, Kumamoto, Japón en 2016, y Sendai, Japón en 2011, muestra que durante los eventos relacionados con peligros geo sísmicos, las redes urbanas son altamente vulnerables, y el daño a elementos de la red y estructuras cercanas impacta la funcionalidad y el desempeño operativo de estas redes tanto a corto como a mediano plazo, causando pérdidas sociales y económicas importantes (Amirsardari et al. 2019 ; Sarkis et al. 2018 ; Düzgün et al. 2011 ; Durante et al. 2018 ; Romeo et al. 2017; Martino et al. 2019; Kazama y Noda 2012; Nakanishi et al. 2014; Kawashima 2012; Yasuda et al. 2013). En entornos urbanos, las alteraciones en las condiciones del tráfico asociadas con daños a edificios y estructuras pueden aumentar de manera significativa e inmediata la congestión y los tiempos de traslado. Dichos efectos tienden a propagarse ampliamente en la zona afectada, impactando los esfuerzos de rescate y las actividades de recuperación posteriores al desastre así como actividades de logística urbana y otros servicios relacionado con la seguridad, salud y actividades económicas. Así, en el ámbito urbano, las redes de transporte constituyen una pieza fundamental de la infraestructura, no sólo por su capacidad de facilitar los desplazamientos de millones de personas y mercancías diariamente, sino al convertirse en las vías de rescate de personas y bienes y de reconstrucción de otras infraestructuras cuando se presenta un evento catastrófico. En el mundo, muchas zonas urbanas y metropolitanas están localizadas en regiones altamente sísmicas, en las cuales los requerimientos de movilidad y desplazamiento implican millones de viajes diarios, a través de sistemas de transporte público y redes viales. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por ejemplo, la red de transporte atiende una demanda de más de 22 millones de viajes al día. Dada la alta sismicidad y la demanda de viajes en dichas zonas, un pronóstico acertado sobre las condiciones de tráfico, puntos de conflicto, congestión y demoras esperadas justo después del abanico de escenarios sísmicos probables, proporciona información valiosa para la toma de decisiones sobre los modelos de planeación urbana, la ubicación y rutas de servicios de emergencias, planes y protocolos de prevención y respuesta ante dichos fenómenos, así como sobre la designación de

recursos para disminuir la vulnerabilidad e incrementar la adaptabilidad y resiliencia de zonas urbanas ante eventos sísmicos extremos.

Modelar el comportamiento de la red de transporte en escenarios de emergencia es uno de los retos más desafiantes en la planificación urbana. Por un lado, en escenarios sísmicos extremos, el desempeño post sismo de las redes de transporte está estrechamente relacionado con los escenarios de daños esperados en las estructuras. Determinar estas relaciones es complejo, ya que se deben considerar las interdependencias de los componentes de la red, las variaciones espaciales de los movimientos del suelo en una región determinada y la respuesta esperada de cada tipo de estructura. Así, dado que la infraestructura de transporte tiene varios componentes con diferentes características estructurales y condiciones de mantenimiento, el espectro de daños después de un terremoto puede ser amplio y complejo. Por otro lado, aunado a las condiciones geotécnicas y del sistema de edificaciones, en áreas urbanas densamente pobladas se presentan patrones de movilidad complejos a lo largo del día, lo que produce variaciones temporales significativas en la demanda de viajes y fenómenos de tráfico como horas pico, congestión, formación de colas y patrones de viaje pendulares. De esta manera, la interacción entre la demanda asociada a las redes de transporte y el desempeño de la infraestructura, conforman una vulnerabilidad combinada ante eventos sísmicos extremos.

Pronosticar los impactos de los eventos sísmicos extremos es un proceso clave para planificar áreas urbanas sostenibles y resilientes. Dadas las interrelaciones de los distintos sistemas urbanos, es necesario plantear nuevos esquemas metodológicos multidisciplinarios que consideren de manera integral el riesgo, la vulnerabilidad y la eficiencia operativa de las redes de transporte ante dichos eventos, y permitan construir pronósticos más precisos a través de modelos. Así mismo, es necesario el desarrollo de herramientas específicas que permitan evaluar el desempeño de dichas redes, identificar elementos críticos y el grado de afectación esperado en función de las características del evento. Dichas herramientas deben permitir relacionar las principales variables geosísmicas, como son las aceleraciones y desplazamientos máximos en el terreno, con variables de comportamiento de flujo en redes de transporte.

Para realizar modelos de predicción precisos sobre la respuesta del de redes viales y de transporte público durante sismos es necesario integrar y armonizar modelos y metodologías que logren representar el comportamiento y fenómenos comunes en las redes en zonas urbanas densamente pobladas. Fundamentalmente, es necesario considerar que la demanda de viajes se distribuye en intervalos de tiempo a lo largo de día, y que, dado que la respuesta en las estructuras depende del tipo de estructura y del contenido de frecuencias del sismo, la localización de los daños y las interrupciones inducidas en la red no serán las mismas para cada sismo. Hasta ahora, la investigación ha abordado el problema desde una perspectiva que evalúa el posible daño estructural en los elementos que conforman las redes de transporte. Otros estudios han incorporado modelos simplificados de comportamiento operativo de redes que, si bien contribuyen en

comprender las interrelaciones entre las respuestas estructurales y operativas de dichas redes, no logran capturar el comportamiento dinámico observado en zonas urbanas congestionadas. En este sentido, actualmente existe un vacío en el análisis y la comprensión del impacto de los eventos sísmicos en la respuesta y el funcionamiento de las redes de transporte en zonas urbanas, así como en la modelación conjunta de los parámetros inherentes al evento sísmico como los contenidos de frecuencia e intensidad, y los parámetros dinámicos asociados al comportamiento de los flujos en la red en etapas posteriores a corto y mediano plazo.

Esta investigación doctoral tiene como propósito el desarrollo de una nueva metodología, que permita comprender las relaciones entre la respuesta del tráfico y las características de eventos naturales extremos, como pueden ser sismos de gran magnitud, en entornos urbanos, así como las variables fundamentales asociadas a estos fenómenos. Para ello, se parte del hecho de que el funcionamiento de sistemas y procesos pueden ser estudiados desde un enfoque de eficiencia o desempeño, en el cual la eficiencia de un sistema, o una red de transporte, puede plantearse como la evaluación de un resultado o funcionamiento en función de los recursos o condiciones dados para alcanzarlo. El planeamiento de modelos de eficiencia para el análisis de redes de transporte es factible a través de modelos basados en análisis de datos y optimización matemática, como lo es el método de envolvente de datos DEA, por sus siglas en inglés, el cual permite representar de manera práctica el desempeño de sistemas y procesos. Esta aproximación permite estudiar la influencia del contenido de frecuencias y la magnitud de los sismos en la respuesta esperada de la red. Los resultados del modelo de vulnerabilidad sísmico-operativa son analizados desde un enfoque espacial que permite ubicar puntos de conflicto en mapas de vulnerabilidad sísmica, y a través de un conjunto de curvas límite de eficiencia que representan las mejores condiciones de tráfico alcanzadas en distintos puntos de la red en función de los efectos del sismo.

Por otro lado, en zonas urbanas costeras en regiones de alta sismicidad, la infraestructura de transporte está expuesta tanto al peligro sísmico como a la amenaza de ocurrencia de tsunamis. Con el objetivo de analizar el efecto acumulado de ambos fenómenos en redes viales urbanas, se propone un modelo de respuesta secuencial sismo-tsunami, en el cual se combinan modelos numéricos de respuesta suelo-estructura y de generación y propagación de tsunamis.

La metodología de eficiencia sísmica propuesta se aplicó para estudiar la respuesta y el desempeño post sismo de un sector de la red de transporte en el sur de la Ciudad de México. En un segundo caso de estudio en la ciudad de Manzanillo, se abordó el problema de los efectos combinados de daños por sismo y tsunami en terraplenes carreteros costeros. La metodología y los modelos presentados brindan una herramienta para la toma de decisiones de políticas públicas y protocolos de respuesta ante contingencias, así como en la planeación, diseño y operación de redes de transporte más flexibles y sísmicamente resilientes.

1.2. Revisión de la literatura y estado del arte

En general, los impactos y consecuencias de interrupciones en redes de transporte inducidas por eventos sísmicos varían en función de diversos factores relacionados con el ambiente sísmico de la región, la respuesta sísmica esperada en las estructuras, así como las características topológicas y de comportamiento de la demanda en las redes. En el caso de zonas urbanas, los patrones de viajes y desplazamientos a lo largo del día generan fenómenos propios que constituyen un factor adicional de gran influencia tanto en el comportamiento diario de los flujos como durante eventos disruptivos. La funcionalidad de las redes de transporte después de eventos naturales extremos suele ser analizada en función del comportamiento sísmico de los elementos o estructuras de la red o bien desde un punto de vista exclusivamente operativo. En el primer caso, se han utilizado métodos para predecir el comportamiento y los daños esperados en cada elemento de las redes de transporte utilizando como variables principales aquellas asociadas a la magnitud o la intensidad del evento, por ejemplo, aceleraciones o desplazamientos máximos en el terreno en el caso de sismos, así como a las características estructurales como los materiales y sistemas estructurales. En el segundo enfoque se ha buscado medir los efectos en la funcionalidad de las redes ocasionados por los daños en puntos o segmentos de ésta, utilizando modelación matemática de redes y modelos de tráfico basados en variables como la capacidad, los tiempos de viaje, las demoras y la densidad de los segmentos de la red. Finalmente, las metodologías más recientes proponen una perspectiva holística para abordar el problema, por lo que buscan integrar ambos enfoques con el objetivo realizar predicciones más exactas que brinden una mejor comprensión de los fenómenos de tráfico post desastre, tanto a nivel urbano como regional, así como de los elementos y variables asociados con éstos. A continuación, se presenta un resumen de los estudios más recientes que abordan el análisis de la vulnerabilidad sísmica de redes de transporte.

1.2.1. Vulnerabilidad sísmico-estructural de infraestructura de transporte

Tradicionalmente, los efectos de los eventos sísmicos en la infraestructura de transporte se han estudiado desde un punto de vista de comportamiento, desempeño y seguridad estructural, utilizando modelos de confiabilidad, fragilidad y vulnerabilidad sísmica, que examinan la susceptibilidad de las estructuras a sufrir daños por los movimientos del suelo. Uno de los modelos más comunes es el de las funciones de fragilidad, que consisten en evaluar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel dado de daño en un edificio o estructura, en función de una variable o medida de intensidad sísmica, como las aceleraciones máximas o las aceleraciones espectrales. La literatura sobre modelos de fragilidad sísmica es amplia, tanto en el tipo de métodos para su derivación como respecto a los tipos de estructuras y consideraciones de comportamiento. En general, dichos modelos pueden ser agrupados de acuerdo con la metodología aplicada como: empíricos, experimentales y analíticos.

Las curvas de fragilidad empíricas se desarrollan utilizando distribuciones de daños post sismo observados en campo. Basöz y Kiremidjian (1997) y Yamazaki et al. (2000) fueron pioneros en el desarrollo de este tipo de curvas, desarrollándolas con base en observaciones de los sismos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995. Así, varios autores han propuesto y aplicado metodologías para el desarrollo de curvas empíricas para un gran número de estructuras (Der Kiureghian, 2002; Elnashai et al. 2004; Shinozuka et al. 2000). Por ejemplo, Basöz y Kiremidjian (1997) realizaron análisis de regresión logístico y una matriz de frecuencia de daño con datos del terremoto de Northridge. Shinozuka et al. (2000) aplicaron el método de máxima verosimilitud para estimar los parámetros de una distribución de probabilidad logarítmica normal que describe la fragilidad de estructuras usando datos de daños del terremoto de Kobe, mientras que Der Kiureghian (2002) adoptó un modelo bayesiano para desarrollar curvas de fragilidad empíricas. Aunque estos modelos representan una imagen realista de la fragilidad de las estructuras, carecen de generalidad en su aplicabilidad al vincularse a un evento sísmico particular. Además, suelen ser asociadas con un alto grado de incertidumbre, dada la discrepancia en las observaciones entre los diferentes equipos de inspección, lo que reduce significativamente su utilidad y confiabilidad.

El desarrollo de curvas de fragilidad experimentales no es muy común, dado que los experimentos que involucran modelos de estructuras completas o componentes a gran escala son costosos. Aunque los resultados experimentales proporcionan una base para definir varias medidas de daño para las curvas de fragilidad analíticas, su aplicación es aún muy limitada. Entre los estudios que aplican un enfoque experimental se encuentran los de Vosooghi y Saiidi (2012), quienes desarrollaron curvas de fragilidad con base en los resultados de una mesa vibradora y pruebas de carga cíclica en los pilares de puentes. Con ello, desarrollaron una relación probabilística entre los datos experimentales de daños y los parámetros de respuesta sísmica en forma de curvas de fragilidad. Así mismo, Banerjee y Chi (2013) desarrollaron curvas de fragilidad utilizando datos de daños obtenidos en pruebas de una mesa vibradora de un puente casi a escala real.

Por otro lado, las funciones de fragilidad se han desarrollado mayoritariamente utilizando diversos métodos analíticos como el análisis elástico espectral en Hwang (2000), el modelo probabilístico de demanda sísmica (PSDM), enfoques bayesianos por Gardoni et al. (2002) y Gardoni et al. (2003), análisis estático no lineal por Mander y Basoz, 1999 y Moschonas et al. (2009), análisis de historias en el tiempo lineal / no lineal (NLTHA) en (Bhuiyan y Alam 2012; Choi et al. 2004; Nielson y DesRoches 2007; Pan et al. 2010; Ramanathan et al. 2012) y el análisis dinámico incremental (IDA) por (Alam et al. 2012; Billah et al. (2013); Zhang y Huo 2009). En particular las funciones de fragilidad analíticas han demostrado un mayor nivel de confiabilidad, sin embargo, suelen ser computacionalmente demandantes, ya que se requieren un gran número de análisis para representar completamente las incertidumbres estructurales y del movimiento del suelo involucrados en la respuesta sísmica de estructuras y edificios.

Actualmente se dispone de un gran número de curvas de fragilidad sísmica de infraestructura de transporte, como puentes, túneles, terraplenes, autopistas y elementos de infraestructura portuaria. Así mismo, dado que los daños causados por terremotos en áreas urbanas se observan principalmente en edificios, las investigaciones enfocadas en zonas urbanas han tendido a examinar la respuesta y fragilidad de las tipologías comunes de edificios. En la Tabla 1 se muestran algunas funciones de fragilidad desarrolladas recientemente para edificios e infraestructura de transporte.

Tabla 1. Curvas de fragilidad desarrolladas para infraestructura de transporte y edificios

Enfoque	Referencia	Infraestructura
Empírico	Maruyama et al. (2010)	Terraplenes carreteros
	Maruyama et al. (2008)	
Analítico	Huang et al. (2020)	Túneles en suelos blandos
	Pitilakis et al. (2014)	Túneles en suelos blandos y en roca
	NIBS (2012)	
	Pitilakis et al. (2014)	Puentes carreteros
	NIBS (2012)	
	Misra y Padgett (2019)	Puentes ferroviarios
	Anelli et al. (2020)	Red vial urbana
	Pitilakis et al. (2014)	
	NIBS (2012)	
	Pitilakis et al. (2014)	Autopistas
	NIBS (2012)	
	Argyroudis y Kaynia (2015)	Terraplenes ferroviarios
	Pitilakis et al. (2014)	
	NIBS (2012)	
	NIBS (2012)	Muelles
Ko et al. (2010)		
Kakderi y Pitilakis (2010)		
Villar-Vega et al. (2017)	Edificios de mampostería confinados y no confinados	
NIBS (2012)		
Villar-Vega et al. (2017)	Edificios de concreto reforzado	
NIBS (2012)		

1.2.2. Vulnerabilidad operativa de redes de transporte

La vulnerabilidad de las redes de transporte durante interrupciones y condiciones de emergencia se ha estudiado, en muchos casos desde el punto de vista de su funcionalidad y operatividad utilizando distintos enfoques y herramientas matemáticas, los cuales pueden clasificarse en dos grupos principales: los basados en la topología de las redes y los llamados modelos integrales de transporte.

1.1.1.a. Modelos basados en características topológicas de redes

El primer grupo podría denominarse como análisis de vulnerabilidad topológica, en cual incluye modelos en los que la red se representa en forma de una red abstracta o grafo simplificado, es decir, un par ordenado $G(N,A)$ compuesto por un conjunto de nodos N (o vértices) y un conjunto de enlaces A (o arcos). La red puede ser no dirigida, es decir que no se asume ningún orden entre los nodos conectados por un enlace, o dirigida cuando se establece un nodo inicial y otro final de cada enlace; y no ponderada cuando todos los enlaces tienen la misma capacidad o ponderada si los enlaces tienen diferentes capacidades. Los nodos y enlaces en la red abstracta pueden tener diferentes contrapartes en la red real dependiendo del modelo. Se ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar métodos y enfoques para explorar los posibles resultados de las interrupciones o bloqueos no programados en las redes de infraestructura crítica. La gran mayoría se centra en plantear una interrupción hipotética de la red y luego evaluar su impacto en su rendimiento o eficiencia. En muchos casos, la elección de interrupciones hipotéticas se basa en la importancia percibida de una instalación o infraestructura para mantener la conectividad del sistema. En otras palabras, a los elementos que conforman la red a menudo se les asigna un valor o importancia en la operatividad del sistema. Estas clasificaciones *a priori* de la importancia de dichos elementos se basan generalmente en medidas simples y descriptivas basadas en teoría de grafos. En la mayoría de los casos, estas medidas ofrecen una estimación aproximada de la importancia de los arcos o nodos de la red para el rendimiento del sistema. Por lo tanto, las conclusiones con respecto a la vulnerabilidad de la red también son aproximadas. Este tipo de enfoques se han utilizado para investigar la resiliencia, robustez, confiabilidad y vulnerabilidad de las redes de transporte y otras infraestructuras críticas. El trabajo de Jenelius y Mattsson (2015) describe el proceso de análisis de vulnerabilidad topológica de redes desde la conceptualización hasta la definición de una serie de indicadores para cada segmento o sector afectado por interrupciones. Freiria et al. (2015) proponen la aplicación de técnicas de agrupamiento de datos para la identificación de los segmentos más importantes en autopistas con objetivos de gestión de riesgos y de diseño de redes más eficientes. Schintler et al. (2007) presentan una evaluación de la resiliencia de las redes de transporte utilizando métricas basadas en teoría de grafos como la longitud de ruta promedio y la centralidad.

Existen dos tipos de medidas que se utilizan para evaluar las características de la red desde este enfoque. Las medidas globales que proporcionan una métrica única que resume la estructura de la red y, por lo tanto, se pueden utilizar para comparar diferentes redes. Estos índices se basan en gran medida en tres componentes: nodos, arcos y subgrafos. Su cálculo es relativamente sencillo y proporciona una perspectiva topológica útil del sistema. Las medidas locales, por otro lado, se calculan para arcos o nodos individuales dentro de una red, enfatizando sus características topológicas relativas. Quizás la medida local más simple de accesibilidad nodal es el grado del nodo. Dada una matriz de adyacencia nodal en un sistema, C , con elementos C_{ij} , es posible determinar el

grado de cada nodo sumando el número total de conexiones directas (un solo paso) entre el nodo i y todos los demás nodos del sistema. Se supone que los nodos de mayor grado son más críticos para el funcionamiento de la red dada su mayor asociación directa con otros nodos. En muchos casos, las conexiones más directas suelen indicar la función de un nodo como centro de un sistema determinado Grubestic et al. (2003). Existe también otra corriente de indicadores llamados “estructurados” que también utilizan la teoría de grafos para evaluar el comportamiento de redes y la complejidad de las relaciones entre sus componentes para hacer frente a eventos disruptivos. Para ello se valen de modelos matemáticos, como los basados en optimización matemática, (Gomez y Baker 2019; Liao et al. 2018; Fan y Tangqing 2010; Chen y Yang 2007) y eficiencia (Russo y Rindone 2010; Üstün 2015). Este tipo de modelos analiza el comportamiento de las redes de transporte principalmente desde cuatro características o grupos de características: 1) los atributos de la red, 2) la conectividad, 3) la capacidad, y 4) su desempeño. La Tabla 2 presenta algunas de las medidas globales, locales y estructurales para evaluar la vulnerabilidad topográfica de redes.

Tabla 2. Algunas medidas de vulnerabilidad topográfica de redes

Medida	Expresión	Notas
Índice alfa, α	$\alpha = \frac{(e - v + 1)}{(e_{max} - (v - 1))}$	Representa el ratio entre el número de ciclos y el número máximo de posibles ciclos.
Índice beta, β	$\beta = \frac{e}{v}$	Ratio entre el número de arcos y el número de nodos.
Índice gama, γ	$\gamma = \frac{e}{3(v - 2)}$	Ratio entre el número de arcos y el máximo número de arcos posibles.
Número ciclomático, μ	$\mu = e - v + G$	Número de circuitos en la red.
Centralidad, BC	$BC_i = \frac{\sigma_{jk_i}}{\sigma_{jk}}$	Número de veces que el nodo es parte de las rutas más cortas en la red
Diámetro, D	$D = \max (d_{ij})$	Distancia máxima entre las distancias más cortas entre todos lo pares OD de la red

Nota: donde e es el número de arcos, v el número de nodos y G el número de subgrafos en la red.

Estas métricas permiten evaluar distintos aspectos operativos de las redes, su principal ventaja recae en el hecho de que no requieren grandes cantidades de datos sino solo parámetros geométricos y topológicos, ya que no consideran variables relacionadas con la demanda. Sin embargo, este último punto conlleva a que no logren capturar fenómenos y/o características en los que los flujos y viajes juegan un papel primordial, como la congestión y la accesibilidad, Cascetta (2009). Por ello, surge otro grupo de métodos en los que el desempeño de la red se establece en función de los modelos que

relacionan tanto parámetros de la oferta como el comportamiento de la demanda en redes de transporte.

1.1.1.b. Modelos integrales de redes de transporte

El segundo grupo de modelos utiliza un enfoque que podría denominarse modelación integral o sistémica de redes de transporte, en el cual las redes se representan más ampliamente que solo su estructura, sino también se consideran submodelos de interacción entre la oferta y demanda de viajes. En este tipo de estudios, la red de transporte también se representa de manera abstracta como un grafo, y los nodos y enlaces normalmente corresponden a intersecciones físicas y enlaces reales. Generalmente se ponderan pesos en cada enlace, que pueden corresponder a las longitudes, tiempos de viaje, costos o una combinación de estos en forma de costos generalizados. Sin embargo, además del grafo, la interacción entre oferta y demanda se simula mediante modelos integrales de comportamiento de flujos y tráfico que en su mayoría se basan en el procedimiento secuencial de 4 etapas: generación/atracción de viajes, distribución, reparto modal y asignación de rutas.

La asignación de rutas a su vez suele modelarse bajo teorías como la del equilibrio de la red o el usuario, teniendo en cuenta la interacción con la congestión y las demoras. Los modelos de asignación pueden aplicarse desde un enfoque estático o dinámico, dependiendo del objetivo que se persiga, de los datos con que se cuente para su desarrollo y de las capacidades computacionales disponibles. A su vez, los modelos de asignación tanto estáticos como dinámicos pueden aplicarse desde dos enfoques dependiendo de su escala de análisis y la abstracción del comportamiento de los flujos: microscópico y macroscópico. Los modelos microscópicos representan a los conductores individualmente, sus decisiones e interacciones con un alto nivel de detalle. Las interacciones pueden incluir el seguimiento de automóviles, el cambio de carril y los movimientos que determinan indirectamente la capacidad de la red y el tráfico como un fenómeno dinámico. Los modelos macroscópicos tratan al tráfico como un flujo uniforme u homogéneo, y normalmente adaptan conceptos físicos para aproximar su propagación a través de la red. Finalmente, existen aproximaciones que combinan algunos elementos de enfoques tanto microscópicos como macroscópicos, para lograr representar a los conductores individuales y sus decisiones de viaje, reemplazando las interacciones de los vehículos con las relaciones de tráfico macroscópicas, los llamados modelos mesoscópicos. Estas relaciones suelen reflejar las interrelaciones entre flujos, velocidades y densidades en los distintos enlaces de la red.

1.1.1.c. Modelos de asignación dinámica

En los modelos de asignación de viajes la oferta del sistema está representada por una red $S(A, C)$, compuesta por un conjunto de arcos o segmentos A y un costo asociado C . Los costos son a su vez función de una serie de atributos relacionados con las características de los segmentos como su longitud (distancia), velocidad de flujo libre y capacidad. Por su parte, la demanda está conformada por el número de viajes entre un par origen-destino,

OD. Las relaciones entre la oferta y demanda de viajes presentes dará como resultado un cierto nivel de servicio en la red o el segmento, el cual está determinado por variables como el tiempo o el costo del viaje. Existen tres consideraciones comunes que se aplican en los modelos de asignación estática, las cuales han permitido generar modelos simplificados para determinar una solución única de equilibrio de la red, estas condiciones son:

1. Que el usuario tiene conocimiento pleno de los costos generalizados de viajar en todos los enlaces y rutas de la red (suposición de información perfecta).
2. Que las demoras en los enlaces se pueden describir utilizando una función de los flujos en ese enlace particular (suposición de separabilidad).
3. Que la demanda y los flujos durante un período modelado no cambian con el tiempo (suposición de estado estacionario).

En la realidad, cuando se tienen redes cogestionadas, como en el caso de zonas urbanas densamente pobladas, ninguna de estas suposiciones logra reflejar los fenómenos de tráfico que se presentan. Así, incluso con la utilización de tecnologías de navegación, el conocimiento de los usuarios sobre los costos de viaje en cualquier red no es perfecta, sobre todo entre dos puntos distantes de la red. Además, durante el día existen variaciones temporales de la demanda, a corto y mediano plazo, que producen efectos importantes en los tiempos de viaje experimentados, por lo que en realidad la selección de rutas por parte de los usuarios es altamente dependiente de dichas variaciones. Tomando en cuenta estas limitaciones en los modelos estáticos, se han desarrollado herramientas que permitan la ejecución de modelos dinámicos a micro y macro escala. En los modelos DTA el costo generalizado de un viaje suele estar definido por el tiempo que un vehículo o usuario permanece en la red, aunque puede haber otras definiciones dependiendo del objetivo del modelo. Para realizar una mejor estimación sobre dichos costos, los modelos de tráfico incluyen términos que capturen parámetros relacionados con la propagación del tráfico o la formación de colas.

1.1.1.d. Modelos microscópicos, macroscópicos y mesoscópicos

Como se ha mencionado existen tres enfoques para modelar la propagación dinámica del tráfico en las redes: microscópico, macroscópico y mesoscópico. Primero, el enfoque microscópico describe cada vehículo individualmente, es decir, su longitud, velocidad y ubicación, etc., y restringe el comportamiento de los vehículos para obedecer las señales de tráfico, su reacción con el tráfico aguas abajo (modelo de seguimiento de automóvil), cambio de carril, etc. Dado el detalle del modelado a nivel de vehículo, este tipo de enfoques permite desarrollar estudios en una diversidad de comportamientos de los usuarios (seguimiento de automóvil o cambio de carril) y composición del tráfico o tipos de vehículos (por ejemplo, camiones, automóviles o autobuses). Sin embargo, como resultado de esta complejidad, estos modelos suelen ser computacionalmente costosos y difíciles de calibrar (debido a una gran cantidad de atributos). Algunas referencias sobre este tipo de modelos se encuentran en los trabajos de Punzo et al. (2005) y Rahman et al. (2013).

Por otro lado, los enfoques macroscópicos modelan el flujo de tráfico de manera agregada obedeciendo las relaciones fundamentales del flujo vehicular. Por lo tanto, éstos utilizan un número menor de variables para caracterizar el estado de la red. Sin embargo, uno de los inconvenientes, es que es imposible describir la ruta para cada vehículo en la red.

Los enfoques híbridos o modelos mesoscópicos combinan las ventajas de los dos enfoques anteriores al considerar la elección de ruta individualmente pero agregando la propagación del tráfico en los enlaces, lo que significa que los vehículos no tienen una trayectoria individual dentro del enlace, sino que siguen un modelo de tráfico macroscópico. Por ejemplo, el modelo CONTRAM de Taylor (2003), agrupa los vehículos en grupos donde su velocidad se decide por la densidad para una función de relación velocidad-densidad dada. Otros modelos como DYNASMART (Jayakrishnan et al. 1994; DTASQ Mahut et al. 2003) están basados en teoría de colas en los que una carretera se divide en dos partes, es decir, fluyendo aguas abajo y generando colas o congestión aguas arriba. Liu y Shi (2019) aplicaron el método de autómatas celulares y redes neuronales, según el cual los vehículos siguen un conjunto mínimo de reglas de comportamiento para determinar su recorrido sobre celdas en una red. La desventaja de los modelos mesoscópicos es la integración de modelos micro y macroscópicos que requiere una interacción compleja entre el estudio de la elección de ruta (a nivel micro) y la propagación del tráfico (a nivel macro). Para una discusión más detallada sobre este tipo de modelos se pueden consultar los trabajos de Kessels (2019), Nuzzolo et al. (2016) y Toledo et al. (2010).

Una de las aplicaciones de los modelos DTA es la predicción de las condiciones de tráfico en la red ante eventos disruptivos o no planeados, lo que permite estimar las rutas que seguirán los flujos ante interrupciones temporales, así como los volúmenes vehiculares, velocidades y tiempos de viaje esperados (Feng et al. 2020; Alam y Habib 2019; Marcianò et al. 2013; Han et al. 2010). Algunos de los modelos recientes desarrollados bajo los enfoques descritos se presentan en la Tabla 3.

1.2.3. Enfoques sistémicos de vulnerabilidad y resiliencia sísmica de redes de transporte

El paradigma más actual para abordar el estudio de vulnerabilidad en redes considera una perspectiva holística o sistémica de las redes y su entorno. En estudios como los presentados por (Argyroudis et al. 2020; Argyroudis et al. 2019; Zhang y Wang 2016) los autores utilizan métodos analíticos y técnicas de simulación para considerar la distribución espacial de factores relacionados con las amenazas, como el peligro sísmico, y modelos integrales de vulnerabilidad de redes de consideren el comportamiento específico del tipo de flujo.

Tabla 3. Modelos de transporte aplicados a análisis de vulnerabilidad sísmica de redes

Enfoque	Referencia	Modelo
Topográfico	Nabian y Meidani (2018)	Aplicación de un enfoque basado en inteligencia artificial y redes neuronales para estudiar la vulnerabilidad y confiabilidad de redes carreteras ante sismos.
	Nkioo et al. (2018)	Aplicación de optimización matemática y teoría de grafos para determinar rutas óptimas durante emergencias sísmicas en áreas urbanas.
	Cantillo et al. (2018)	Utilización de indicadores de accesibilidad para determinar la vulnerabilidad de redes ante sismos, considerando los económicos y sociales.
	Freiria et al. (2015)	Aplicación de técnicas de agrupamiento de datos para identificar patrones en las características de los segmentos.
	Argyroudis et al. (2015)	Se emplea el modelo RISK-UE para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de infraestructura en la zona urbana y un modelo de distribución de flujos en la red de transporte utilizando teoría de grafos.
	Schintler et al. (2007)	Se utiliza teoría de grafos y técnicas de GIS para determinar la vulnerabilidad y confiabilidad de redes de transporte en Estados Unidos.
Modelos integrales de transporte	Feng et al. (2020)	Se utiliza un modelo de asignación dinámico basado en agentes para estudiar la respuesta de una red de transporte ante sismos.
	Aghababaei et al. (2020)	Se aplicó un modelo dinámico mesoscópico de análisis de tráfico para evaluar el impacto del escenario sísmico de magnitud $M_w = 7.8$ en Kaikura, Nueva Zelanda, en el desempeño operativo de la red carretera a nivel regional. Se analizó la variación de parámetros como la velocidad, densidad y tiempo de viaje. El modelo utilizó datos registrados en los días subsecuentes al evento.
	Kalanitis y Sextos (2019)	Se utilizan curvas de fragilidad y un modelo dinámico de tráfico macroscópico para evaluar el desempeño de una red de autopistas a escala regional.

Actualmente, el incremento de las capacidades computacionales y la disponibilidad de una mayor cantidad de datos, ha permitido que surjan cada vez más estudios en los que el comportamiento del tráfico durante condiciones de emergencia, sea evaluado utilizando modelos de tráfico, con objetivos tales como optimizar las operaciones de semáforos durante los procesos de evacuación Marcianò et al. (2015), proponer esquemas de modelación dinámica que pronostique cambios en la demanda de viajes, (Chilá et al. 2016; Musolino y Vitetta 2011) y, para el aprovechamiento de la información generada por sistemas inteligentes de transporte Marcianò et al. (2011). Uno de los principales desafíos de muchos de estos enfoques es la cantidad de datos necesarios para el desarrollo y la calibración de los modelos, cuya recopilación puede ser compleja y costosa. Así mismo, todavía existe debate sobre aspectos como la validez de los datos de demanda recopilados en el campo durante escenarios de emergencia y su utilización en modelos de pronóstico de demandas post desastre.

Los modelos sistémicos u holísticos brindan la oportunidad de capturar el comportamiento de las redes de transporte y las interrupciones, de manera más integral y realista. Dado que éstos requieren una mayor cantidad de información y de modelos de oferta y demanda calibrados, así como modelos de asignación sofisticados para simular el tráfico y los flujos en redes de transporte público su aplicación en estudios integrales de respuesta post desastre ha sido limitada, Koc et al. (2019). Esto significa que la disponibilidad de datos y los modelos utilizados son determinantes en este tipo de enfoques y es posible que no siempre se logre contar con ellos de manera unificada, en contraste con los métodos basados en la topología de la red. Mattson y Jenelius (2015) presentan una discusión detallada de los beneficios y desventajas de los dos tipos de enfoques para el análisis de vulnerabilidad de redes y sistemas de transporte.

En la Tabla 4 se presentan algunas investigaciones recientes que emplean cada uno de los enfoques de vulnerabilidad sísmica de redes de transporte.

Tabla 4. Estudios recientes sobre vulnerabilidad sísmica de redes

Enfoque	Referencia	Modelo
Vulnerabilidad sísmica de infraestructura de transporte	Liu et al. (2020)	Se emplea el modelo RISK-UE para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de infraestructura en la zona rural de Weinan, considerando diferentes vulnerabilidades regionales y comportamientos sísmicos.
	Nabian y Meidani (2018)	Se aplica una combinación del modelo de vulnerabilidad sísmica HAZUS y métodos cognitivos basados en redes neuronales para realizar un análisis de confiabilidad de infraestructura. Se presenta el caso estudio de una red de transporte en California en la que se analiza la confiabilidad ante eventos sísmicos. El modelo ofrece un menor tiempo de análisis respecto a otros métodos, sin embargo, se

		requiere mayor desarrollo del modelo para considerar todas las variables sísmicas necesarias.
Vulnerabilidad operativa de redes de transporte	Yun de Shuping y (2019)	El método de red bayesiana se aplica para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de redes viales urbanas considerando la distribución espacial de peligro sísmico con diferentes niveles de intensidad sísmica, la vulnerabilidad de los componentes y el efecto del daño estructural de los componentes dentro de la red vial en la funcionalidad de la red.
	Li et al. (2016)	Se utiliza el modelo HAZUS desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (FEMA), para generar escenarios sísmicos con magnitudes $M_w=5.0$, 6.0 y 7.0 , y evaluar los impactos de sismos en infraestructura de transporte en la región de la ciudad de Oklahoma.
Enfoque sistémico	Aghababaei et al. (2020)	Se aplicó un modelo dinámico mesoscópico de análisis de tráfico para evaluar el impacto del escenario sísmico de magnitud $M_w=7.8$ en Kaikura, Nueva Zelanda, en el desempeño operativo de la red carretera a nivel regional. Se analizó la variación de parámetros como la velocidad, densidad y tiempo de viaje. El modelo utilizó datos registrados en los días subsecuentes al evento.
	Kalanitis y Sextos (2019)	Se utilizan curvas de fragilidad y un modelo dinámico de tráfico para evaluar el desempeño de una red de autopistas a escala regional.
	Kermanshah y Derrible (2016)	Se aplica un criterio geográfico de riesgo basado en mapas de distribución de aceleraciones y parámetros de accesibilidad y centralidad.
	Argyroudis et al. (2015)	Se emplea el modelo RISK-UE para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de infraestructura en la zona urbana y un modelo de distribución de flujos en a red de transporte utilizando teoría de grafos.

1.2.4. Vulnerabilidad multi amenaza de infraestructura de transporte en zonas urbanas costeras

Las infraestructuras y redes de transporte y movilidad ubicadas en zonas urbanas costeras poseen un elemento adicional cuando se habla de su vulnerabilidad ante eventos sísmicos extremos. La experiencia de eventos sísmicos recientes por mecanismos de subducción ha mostrado que la vulnerabilidad y el daño potencial de dicha infraestructura se asocian

tanto a los movimientos del suelo como a las fuerzas hidrodinámicas inducidas por tsunamis (Williams et al. 2020; Sarkis et al. 2020; Rowell & Goodchild 2017; Bhattacharya et al. 2018; Koshimura et al. 2014).

Las metodologías existentes para analizar la respuesta esperada de infraestructura de transporte durante condiciones de sismo y tsunami a menudo consideran el problema como dos fenómenos separados (Argyroudis and Kaynia, 2015; Maruyama et al. 2010; NIBS, 2004; Werner et al. 2006; ALA, 2001; Briaud and Maddah, 2016). Algunos ejemplos de enfoques de peligros múltiples incluyen el análisis probabilístico multi riesgo, así como curvas de fragilidad multi riesgo, que tienen como objetivo determinar la probabilidad de ocurrencia de ambos fenómenos simultáneamente y el nivel esperado de daño de las estructuras después del evento (Akiyama et al. 2020; Burns et al. 2020). La literatura reciente sobre peligros múltiples en zonas costeras se ha centrado en estructuras como muelles y rompeolas, SYNER-G (2012). En el ámbito urbano se ha analizado la respuesta de sistemas como edificios y puentes ubicados en la zona oceánica (Ishibashi et al. 2020; Burns et al. 2020; Attary et al. 2019; Karafagka et al. 2018). Sin embargo, se ha prestado poca atención a la respuesta combinada sismo-tsunami de redes carreteras urbanas, Iai (2019).

Los impactos del fenómeno combinado sismo-tsunami en redes de transporte urbano han tenido grandes efectos económicos y sociales, a mediano y largo plazo. Dichos impactos se asocian fundamentalmente a la pérdida de conectividad de sectores o ciudades, lo que genera interrupciones y dificultades para continuar con actividades de rescate, reconstrucción, logística urbana, salud, seguridad, entre otras (Sarkis et al. 2020; Dizhur et al. 2017). Se ha identificado que gran parte de los efectos negativos están asociados a daños parciales o totales en tramos carreteros tanto urbanos como interurbanos Cubrinovski et al. (2013).

Una fuente importante de daños provocados por sismos en estructuras ubicadas en las zonas costeras es al aumento de las presiones en la masa de suelo inducidas por cargas sísmicas y por la acumulación de presión hidrodinámica en suelos saturados no cohesivos que prevalecen en estas zonas. La licuefacción de suelos arenosos sueltos y saturados que a menudo prevalecen en las áreas costeras, especialmente en tierras recuperadas y rellenos no compactados, es una de las fuentes más común de daño sísmico a las estructuras en estas zonas. Las observaciones de eventos recientes han confirmado que incluso niveles moderados de intensidad sísmica pueden causar licuefacción, lo que resulta en la reducción de la rigidez y la pérdida de la resistencia al corte de los suelos licuados. Esto puede provocar asentamientos del suelo, aumento de las presiones laterales del terreno contra las estructuras de contención y pérdida de la resistencia contra muros y anclajes, Kakderi and Pitilakis (2014).

Por otro lado, uno de los aspectos más importantes en los tsunamis es el comportamiento de la ola cuando se acerca a la costa. Sin embargo, la información sobre los parámetros físicos que caracterizan a las olas a menudo es limitada debido a las dificultades para lograr mediciones precisas en el momento del evento. El impacto de un

tsunami en la costa se rige por la física no lineal, como la turbulencia con variabilidad espacial y temporal Klapp et al. (2020), por ello, el comportamiento hidrodinámico durante un tsunami es complejo y puede afectar significativamente la integridad estructural de los edificios. Las fuerzas hidrodinámicas resultantes se rigen por varios parámetros del fluido, como la densidad, la velocidad y profundidad del flujo, así como por la geometría de la estructura. Estas fuerzas hidrodinámicas inducidas por las presiones y velocidades de los tsunamis son particularmente importantes en la estabilidad y comportamiento de estructuras costeras, ya que generalmente ocurren alrededor de estructuras como muelles, terraplenes, apoyos de puentes o edificios y, como resultado, afectan su integridad estructural, Chinnarasri et al (2013).

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica y daño potencial de infraestructura de transporte se han seguido enfoques numéricos basados en métodos como elemento finito (McKenna et al. 2021; Argyroudis & Kaynia, 2015) y diferencias finitas (Mayoral et al, 2016; Mayoral et al. 2017). Así mismo, los efectos de cargas hidrodinámicas en estructuras se han estimado a través de métodos de modelado, como el método de volúmenes finitos, Jose et al. (2017) y el método de hidrodinámica de partículas *SPH* (Klapp et al. 2020; Altomare et al. 2015), los cuales ha demostrado capturar con precisión el comportamiento de las olas de tsunami.

Así, a pesar de que existen muchos modelos de simulación disponibles para evaluar los efectos individuales de los peligros de sismos y tsunamis en infraestructura de transporte, los enfoques de modelado para predecir los daños y efectos secuenciales son limitados. La revisión de la literatura sobre los modelos de fragilidad y vulnerabilidad reveló que la mayoría de los estudios se centran en componentes de transporte individuales o en redes, por lo general considerando solo un peligro o fenómeno a la vez. Estos estudios se enfocaron principalmente en la vulnerabilidad de los puentes y túneles, y el énfasis principal se ha centrado en los movimientos del suelo debido a las excitaciones sísmicas. Se han realizado investigaciones basadas en modelos simplificados para otras estructuras como terraplenes, taludes, muros de contención y estribos. Los modelos existentes para estos elementos se basan en datos empíricos o juicios de expertos, principalmente para el análisis sísmico, y se enfocan en un universo de tipologías limitadas. Actualmente existe un área de oportunidad en la investigación centrada en la mejora de los modelos disponibles para un mayor número de tipologías estructurales considerando peligros múltiples, incluidos sismos y tsunamis.

1.2.5. Vulnerabilidad, resiliencia y sostenibilidad

A pesar de la gran cantidad de estudios dedicados a estudiar los efectos de interrupciones en las redes de transporte, debidas tanto a fenómenos externos como internos, no existe una definición universalmente aceptada para referirse a su vulnerabilidad. Una de las definiciones más utilizadas es la de Berdica (2002), quien sugiere que *“la vulnerabilidad de redes de transporte es la susceptibilidad de éstas a sufrir incidentes o disrupciones que puedan provocar una reducción considerable en su funcionalidad”*. Bajo este

argumento, la vulnerabilidad de dichas redes, así como los procesos de prevención, mitigación y recuperación, requieren de herramientas diferentes y específicas para su análisis dependiendo del origen o fuente del evento disruptivo, Mattsson and Jenelius (2015). Así mismo, recientemente diversos autores recalcan la necesidad e importancia de considerar que las redes de transporte son en realidad un subsistema dentro del sistema urbano, metropolitano o regional, por lo que su vulnerabilidad está estrechamente relacionada con la vulnerabilidad de otros elementos o subsistemas. Así, la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas de transporte forma parte procesos de análisis más amplios, y de los nuevos paradigmas de planeación regional y urbana, los cuales se orientan en el desarrollo de ciudades y regiones resilientes y sustentables. Con ello, actualmente los análisis de vulnerabilidad pueden contribuir en varios de los procesos principales del concepto de ingeniería de resiliencia propuesto por autores como Hollnagel (2013): pronóstico, monitoreo, respuesta y aprendizaje. Los modelos de vulnerabilidades de redes urbanas, como las redes de transporte, favorecen principalmente en el pronóstico de escenarios y el monitoreo del comportamiento de los sistemas al evaluar mediadas o estrategias previsoras, Figura 1.

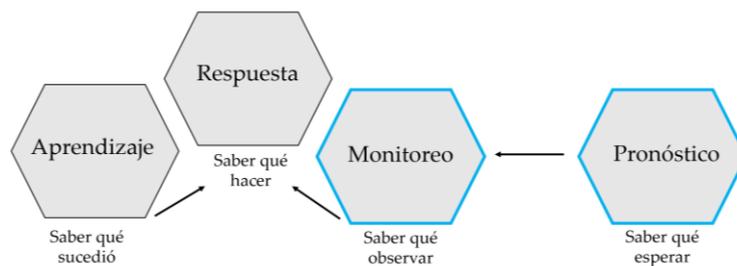


Figura 1. Proceso de la ingeniería de resiliencia, en azul lo elementos en los que contribuyen los estudios de vulnerabilidad. (Modificada de Hollnagel, 2013)

1.2.6. Comentarios

El estado del arte actual en el estudio de la vulnerabilidad sísmica de redes de transporte incluye metodologías que utilizan curvas de fragilidad y modelos estáticos simplificados de tráfico en redes, los cuales no logran capturar los fenómenos reales observados en zonas urbanas congestionadas, como las demoras y formación de colas o cuellos de botella. Por otro lado, los indicadores de vulnerabilidad de redes ante eventos catastróficos están basados en variables relacionadas solo con las características topológicas de la red y/o con algunas variables de comportamiento de tráfico. Para estudiar la vulnerabilidad de redes de transporte urbano ante sismos extremos en esta investigación se examina la aplicación de modelos dinámicos de vanguardia para análisis de tráfico, con lo cual se busca determinar las relaciones entre la respuesta del tráfico a corto plazo y las características del sismo. Se plantea también una nueva medida para evaluar conjuntamente la vulnerabilidad sísmica y operativa de la red, a partir de un modelo de eficiencia, en el que intervienen tanto variables relacionadas con el sismo como aquellas que describen en comportamiento tráfico.

Los estudios sobre la respuesta de infraestructura de transporte localizada en zonas urbanas costeras se han centrado en la evaluación del comportamiento de puentes y elementos portuarios como muelles y estructuras de contención. A pesar de que los daños que afectan redes carreteras derivados de eventos sísmicos extremos e inundaciones por tsunami implican impactos importantes a corto y mediano plazo, actualmente existe un vacío en el conocimiento del comportamiento esperado en redes carreteras costeras ante el efecto secuencial de cargas derivadas de sismo y tsunami.

1.3. Objetivos de la investigación

El objetivo general de esta investigación doctoral consiste en el desarrollo de una metodología que permita evaluar la vulnerabilidad de redes de transporte ubicadas en zonas urbanas densamente pobladas ante los efectos de sismos extremos. Las no-linealidades asociadas tanto a la respuesta sísmica de la infraestructura estratégica y edificios, y el comportamiento dinámico de los flujos en las redes de transporte son incorporadas explícitamente en la formulación.

El objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- Planteamiento de un modelo de evaluación de vulnerabilidad sísmico-operativa de redes de transporte. Determinando las variables de entrada y salida de modelo, considerando el contenido de frecuencias del sismo y el comportamiento operativo de la red.
- Evaluación de la vulnerabilidad sísmico-estructural de los elementos de propios de la red de transporte en zonas urbanas incluyendo vialidades, puentes vehiculares, túneles, pasos a desnivel, estaciones de metro; así como de edificios adyacentes la red vial.
- Generación y análisis de escenarios de daño considerando la influencia del contenido de frecuencias y la magnitud del sismo, tomando en cuenta eventos de subducción y de falla normal.
- Desarrollo de un modelo de simulación a macro escala para el análisis de la respuesta de la red a corto plazo, ante la pérdida de funcionalidad y capacidad inducida por el sismo.
- Definición de indicadores de vulnerabilidad sísmico-operativa de redes de transporte en función de variables sismológicas y de tráfico.
- Planteamiento de un modelo secuencial de daño por sismo y tsunami en infraestructura de transporte en zonas urbanas costeras.

1.4. Metodología

La metodología desarrollada tiene como objetivo pronosticar la respuesta de infraestructura y redes de transporte ante eventos sísmicos y desarrollar una nueva medida de vulnerabilidad operativa que refleje el desempeño que tendrá cada segmento después del evento. En la Figura 2 se presenta el esquema metodológico planteado, el cual se puede resumir en seis pasos:

1. Definición de variables de entrada y salida, tanto sismológicas como de tráfico, para calcular el índice de vulnerabilidad sísmico-operativa de redes, denominado EST o TSP, por sus siglas en inglés, Román-de la Sancha y Silva (2020).
2. Caracterización del área de estudio y selección de escenarios.
3. Evaluación del riesgo sísmico y vulnerabilidad sísmico-estructural, incluidos los análisis de respuesta del sitio.
4. Obtención de la distribución espacial de los escenarios de daños y criterio de bloqueos en vialidades, utilizando técnicas de sistemas de información geográfica (SIG).
5. Desarrollo del modelo de comportamiento del tráfico y simulación de escenarios.
6. Evaluación del desempeño de la red, a través del índice EST, y desarrollo de mapas y curvas de eficiencia sísmica.

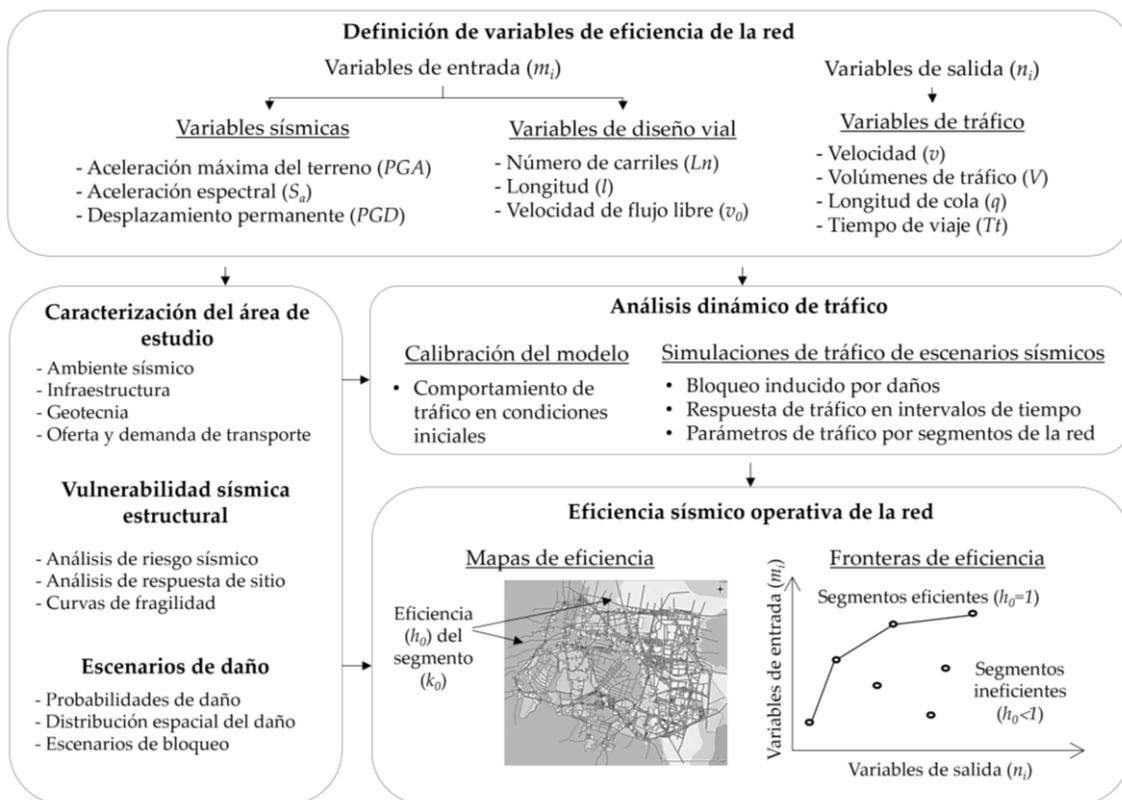


Figura 2. Metodología de respuesta sísmica y evaluación de eficiencia de redes de transporte.

La metodología representa un enfoque de análisis novedoso y replicable que contribuye en vincular modelos de riesgo sísmico y modelos de tráfico urbano. Para ello, se determina el grupo de variables que funcionarán como variables de entrada y salida del modelo como las aceleraciones máximas y espectrales, así como desplazamientos máximos en el terreno asociados al evento sísmico, además de los volúmenes de tráfico, velocidades medias y tiempos de viaje relacionados con el comportamiento de los flujos en la red, con lo cual se logra establecer un modelo de vulnerabilidad sísmico-operativa. Dicha vulnerabilidad se evalúa mediante un valor obtenido para cada segmento de la red, denominado índice de eficiencia sísmica de redes de transporte EST, denominado TSP en inglés. Se asume que aquellos segmentos con un valor EST igual a uno muestran una alta eficiencia sísmico-operativa, mientras que a menor valor se tiene una mayor vulnerabilidad del elemento.

Para abordar el problema de variabilidad temporal de flujos en la red, se empleó un modelo dinámico de asignación de tráfico, basado el modelo de equilibrio del usuario, el en cual se simula el comportamiento de la red de transporte asignando los viajes realizados a la red en intervalos de tiempo. Así mismo, se utilizaron modelos numéricos ampliamente aceptados para la caracterización del ambiente sísmico, la propagación de ondas en el suelo y el cálculo de la respuesta sísmica, así como los daños esperados en las estructuras (i.e. análisis probabilístico de peligro sísmico, análisis de respuesta del sitio y curvas de fragilidad sísmica).

Para caracterizar las correlaciones entre el comportamiento de la red y las características sísmicas, se propuso una solución desde un enfoque de desempeño multivariable, el cual se basa en la aplicación del modelo de optimización análisis envolvente de datos.

1.4.1. Análisis envolvente de datos

DEA es un modelo de optimización matemática, que se utiliza para evaluar la eficiencia de sistemas y procesos. Se entiende por eficiencia a una medida de la productividad, donde las variables de entrada, o recursos, se utilizan para obtener una determinada salida o producción. El objetivo principal del modelo es evaluar la eficiencia de un grupo de elementos o unidades de decisión DMU, por sus siglas en inglés. En el modelo, se utiliza un conjunto de variables de entrada y salida para caracterizar las DMU, y se calcula un valor de eficiencia para cada DMU. Usando estos valores, es posible construir una curva envolvente o frontera, usando las DMU con valores de eficiencia igual a uno. La envolvente o frontera de eficiencia representa la producción máxima de un conjunto dado de recursos. Dependiendo del problema, el modelo de optimización puede expresarse como orientado a la producción (*outputs*) u orientado a los recursos (*inputs*). En el primero, se busca maximizar las salidas, o la producción, considerando una cantidad fija de recursos, mientras que en el segundo caso se busca minimizar los recursos o insumos para obtener una determinada salida o producción. De forma general, la eficiencia de un grupo DMU se obtiene como solución al siguiente problema, Charnes et al. (1978):

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar } h_0 = \theta_0 \\
 & \text{Sujeto a } \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ik} = x_{ik0}, \\
 & \quad \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{jk} = \theta_0 y_{jk0} \quad \theta_0 \geq 1 \\
 & \quad \sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, \\
 & \quad \lambda_k \geq 0, \\
 & \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } h_0 = \theta_0 \\
 & \text{Sujeto a: } \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ik} = \theta_0 x_{ik0} \quad 0 \leq \theta_0 \leq 1, \\
 & \quad \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{jk} = y_{jk0}, \\
 & \quad \sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, \\
 & \quad \lambda_k \geq 0, \\
 & \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{2}$$

donde h_0 es la eficiencia de la DMU, k_0 del conjunto de DMUs. K , Φ_0 y θ_0 son los factores de eficiencia del modelo orientado a *output* (1) y el modelo orientado al *input* (2). El subíndice i corresponde a las m variables de entrada, mientras que j se refiere a las n salidas. En la ecuación (2) λ_k denota el peso de una unidad virtual de referencia.

En esta metodología, el modelo DEA se utilizó para determinar la eficiencia operativa de las redes de transporte urbano, donde los segmentos de la red representan los elementos que definen las DMU. Un grupo de variables que caracterizan el evento sísmico y la geometría y topología de la red se consideran como variables de entrada, asumiendo que durante un evento sísmico extremo, el desempeño de la red depende de características tales como parámetros relacionados con la capacidad de los segmentos, es decir, longitud, velocidad libre y número de carriles; así como en los parámetros de intensidad sísmica, como las aceleraciones espectrales y aceleraciones máximas. A continuación, se definen las variables de salida, las cuales se asocian a aquellas que describen el comportamiento de viaje después del evento, como tiempos o velocidades de viaje, flujos o volúmenes de tráfico, longitudes de cola, etc. Bajo esta hipótesis, aplicando un enfoque orientado al *output*, se identifican los segmentos con mejores condiciones de flujo de tráfico, dadas las características del sismo y de la red. Así el modelo asigna un valor de eficiencia de uno, o eficiencia perfecta. El resto de los segmentos se comparan con las DMU perfectamente eficientes y se les asigna una puntuación de eficiencia correspondiente. De esta manera, se obtiene un valor de eficiencia para cada segmento, que expresa su eficiencia sísmica. El índice EST de una red de transporte podría definirse como:

$$\text{Max } EST_j = \frac{\sum_{m=1}^M u_m^j y_m^j}{\sum_{n=1}^N w_n^j x_n^j} \tag{3}$$

donde el índice EST del segmento j , se obtiene en función de las M variables de salida y , y las N variables de entrada x , y los correspondientes pesos u y w , respectivamente. La Tabla 5 presenta variables de entrada y salida para modelar la eficiencia y obtener el índice EST de una red vial urbana.

Tabla 5. Variables de entrada y salida utilizados en el modelo de eficiencia de una red vial

Modelo	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA
Orientado al output	Longitud del segmento (l) (m)	
	Número de carriles (Ln)	
	Velocidad libre (v_0) (km/h)	Velocidad del modelo (v) (km/h)
	Aceleración máxima del terreno (PGA) (g) ¹	Volúmenes vehiculares (V) (veh/int. de tiempo)
	Aceleración espectral a 0.1 s ($Sa_{0.1}$) (g) ¹	Longitud de cola (q) (1/m) ¹
	Aceleración espectral a 0.3 s ($Sa_{0.3}$) (g) ¹	Tiempo de viaje (Tt) (1/s) ¹

Nota: 1 Se utilizan los valores inversos

El índice EST para una red vial urbana es entonces definido como:

$$EST_i = \frac{f(u_1v, u_2V, u_3q, u_4Tt)}{f(w_1l, w_2Ln, w_3v_0, w_4PGA, w_5Sa_{0.1}, w_6Sa_{0.3})} \quad (4)$$

donde v es la velocidad promedio, V es el volumen de tráfico, q es la longitud de la cola y Tt el tiempo de viaje, en el segmento durante el intervalo de tiempo analizado. l es la longitud del segmento, Ln es el número de carriles, v_0 la velocidad de flujo libre, PGA la aceleración máxima del terreno, $Sa_{0.1}$ y $Sa_{0.3}$ las aceleraciones espectrales a 0.1 y 0.3 s en la ubicación de los segmentos. $u_1, u_2, u_3, u_4, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$ y w_6 son parámetros numéricos calculados durante el proceso de optimización realizado con el esquema de solución DEA.

1.4.2. Caracterización del área de estudio

La caracterización del área de estudio incluyó una investigación y trabajo de campo de los entornos construido y sísmico, tomando en cuenta las fuentes sísmicas activas, las estructuras y edificios, la infraestructura de transporte, las condiciones del suelo y los patrones de viaje predominantes en la zona.

1.4.2.1. Ambiente sísmico

El ambiente sísmico preponderante en el área de estudio se caracterizó identificando todas las fuentes sísmicas activas, que podrían producir movimientos relevantes del suelo. La sismicidad puede conocerse mediante registros de aceleraciones o mediante evidencia geológica y tectónica. El ambiente sísmico de una región está influenciado por factores

tales como la magnitud máxima del sismo, distancia del sitio a la fuente de liberación de energía, el mecanismo de la fuente del sismo, efectos de interferencia de la onda relacionada con la dirección y velocidad de ruptura de la falla y las condiciones locales del subsuelo, Seed et al. (1988). Así el ambiente sísmico se definió por medio de un espectro de peligro uniforme en el cual están incluidos implícitamente los factores antes mencionados. En esta etapa, la caracterización de la fuente considera la definición de la geometría o zonas, y la distribución de magnitudes y distancias de la fuente al sitio de los eventos desde cada fuente, Figura 3.

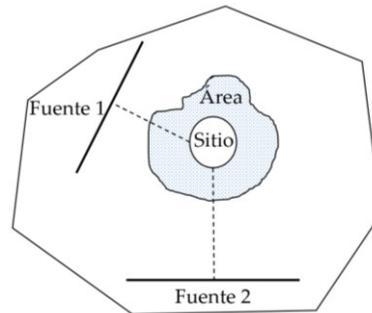


Figura 3. Localización de fuentes sísmogénicas. Modificado de Kramer (1996)

1.4.2.2. Ambiente construido

La metodología requirió la obtención o generación de una base de datos que integra el inventario de edificios e infraestructura estratégica localizada en el área de estudio. Las características estructurales deben incluir detalles específicos sobre sistemas estructurales, material, número de pisos, ductilidad, antigüedad y, cuando sea posible, detalles, como el código de construcción y el estado de mantenimiento de las estructuras. Los datos sobre la red de transporte deben considerar características tales como la jerarquía del segmento o vialidad, la capacidad y los límites de velocidad, así como la ubicación de los elementos de transición como los semáforos y la duración de los ciclos correspondientes. La caracterización del entorno construido debe considerar la agrupación de edificios e infraestructura estratégica en tipologías. Algunas tipologías comunes en zonas urbanas utilizadas para estudios sobre riesgo y vulnerabilidad urbana han sido propuestas por, Villar-Vega et al. (2017), Pitilakis (2014) y NIBS (2012), se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Algunas tipologías de estructuras definidas para zonas urbanas

Infraestructura	Tipologías	Referencia
Edificios de mampostería en Sudamérica	Edificios de mampostería confinados (1, 2 y 3 niveles) Edificios de mampostería no confinados (1, 2 y 3 niveles)	Villar-Vega et al. (2017)
Edificios de concreto reforzado en Sudamérica	Edificios de marcos de concreto, comportamiento dúctil (2, 3, 4, 5, 6 y 7 niveles) Edificios de marcos de concreto, comportamiento no dúctil (2, 3, 4, 5, 6 y 7 niveles) Edificios de muros de concreto (5, 6, 7, 8, 9 y 10 niveles)	Villar-Vega et al. (2017)
Edificios de mampostería en Estados Unidos	Edificio de mampostería con marcos de concreto (1, 2 y 3 niveles) Edificio de mampostería con marcos de concreto (4, 5, 6 y 7 niveles) Edificio de mampostería con marcos de concreto (Más de 8 niveles) Edificio de mampostería reforzada con muros de carga y diafragmas de plataforma de madera o metal (1, 2 y 3 niveles) Edificio de mampostería reforzada con muros de carga y diafragmas de plataforma de madera o metal (Más de 4 niveles)	NIBS (2012)
Edificios de concreto reforzado Estados Unidos	Edificios de marcos de concreto con muros de internos de mampostería no reforzada (1, 2 y 3 niveles) Edificios de marcos de concreto con muros de internos de mampostería no reforzada (4, 5, 6 y 7 niveles) Edificios de marcos de concreto con muros de internos de mampostería no reforzada (Más de 8 niveles)	NIBS (2012)
Puentes urbanos en Estados Unidos	Puente de concreto/simplemente apoyado/tablero con múltiples traveses o cajón/múltiples columnas/diseño sísmico Puente de concreto monolítico/una sola columna/cajón de traveses/diseño sísmico	NIBS (2012)

	Puente de concreto monolítico/tablero con múltiples trabes/diseño sísmico Puente de acero/tablero con múltiples trabes/múltiples columnas/simplemente apoyado/diseño sísmico Puente de concreto pre esforzado/tablero con múltiples trabes/múltiples apoyos/diseño sísmico	
Autopistas y vialidades urbanas en Estados Unidos	Vialidades urbanas con 1 ó 2 carriles Vialidades primarias con 2 o más carriles	NIBS (2012)
Puentes carreteros y urbanos en Europa	Puente de concreto reforzado/continuos/un solo tablero Puente de concreto reforzado/continuo/viga tabular/múltiples apoyos Puente de concreto reforzado/continuo/viga tabular/apoyos laterales Puente de acero/tablero con múltiples trabes	Pitilakis (2014)
Túneles en Europa	Túneles en roca con buena construcción Túneles en roca con construcción pobre Túneles urbanos o de metro en suelos blandos tipo B Túneles urbanos o de metro en suelos blandos tipo C Túneles urbanos o de metro en suelos blandos tipo D Pasos a desnivel con buena construcción Pasos a desnivel con construcción pobre	Pitilakis (2014)
Autopistas y vialidades urbanas en Europa	Vialidades urbanas con 1 ó 2 carriles Vialidades urbanas con 2 o más carriles	Pitilakis (2014)

1.4.2.3. Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica del área de estudio se realizó considerando las posibles diferencias en las condiciones del suelo dentro de la zona. Esto se puede hacer utilizando una zonificación geo sísmica previa o perfiles de suelo genéricos, siempre que se disponga de información sobre las propiedades dinámicas de los estratos del suelo (i.e. velocidades de onda de cortante, relaciones G/G_{max}), Figura 4.



Figura 4. Propiedades geo sísmicas en el área de estudio a través de perfiles genéricos

1.4.2.4. Caracterización de la red y demanda de transporte

La caracterización de la red y la demanda de transporte en la zona de estudio y sus relaciones se realizó utilizando datos provenientes de levantamientos en campo, la encuesta origen-destino (OD). Con ello, esencialmente se deben determinar la topografía de la red, los patrones de viaje predominantes, la distribución modal y las condiciones de horas pico en términos de matrices origen-destino y funciones de distribución dinámica, Figura 5. Esta información permitió, por un lado, generar el modelo dinámico tráfico adecuado, y por otro, la selección de los escenarios de interés a ser simulados y a la determinación de los periodos e intervalos más convenientes para el modelo.

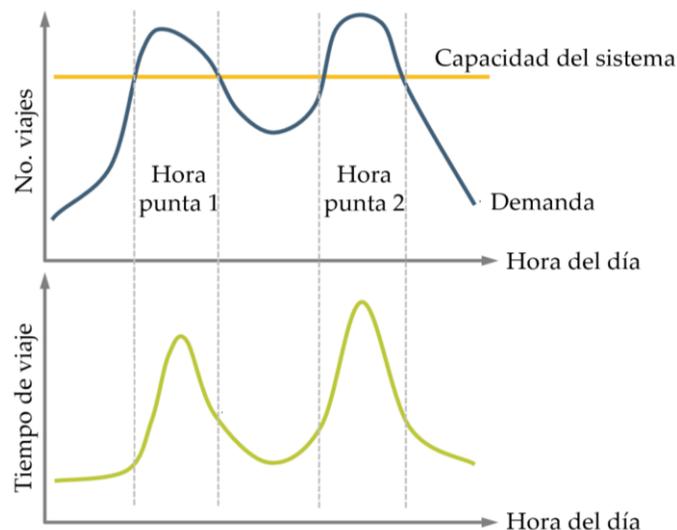


Figura 5. Distribución de la demanda y tiempos de viaje típicos en zonas urbanas. Modificado de Jean-Paul Rodrigue (2020)

1.4.2.5. Selección de escenarios

Los escenarios simulados fueron definidos en función del entorno sísmico y los patrones de viaje en el área de estudio. De esta forma, se consideraron todas las fuentes sísmicas activas, tomando en cuenta períodos de retorno correspondientes a eventos extremos y períodos de simulación correspondientes a los horarios punta de demanda de viajes. La información correspondiente a las horas valle de condiciones de tráfico, es decir, de demanda mínima, se utilizaron en el proceso de calibración del modelo.

1.4.3. Estimación de la vulnerabilidad sísmica

La sismicidad del área se estableció siguiendo el análisis de riesgo sísmico probabilístico convencional PSHA, por sus siglas en inglés. Este análisis permite generar espectros de peligro uniformes EPU, para diferentes períodos de retorno. Dado que uno de los propósitos de la metodología es examinar las variaciones asociadas con el contenido de frecuencia de cada evento sísmico, es necesario obtener EPU independiente por cada fuente sísmica que afecte la zona de estudio. De esta manera, se determina el peligro sísmico para un conjunto de posibles eventos sísmicos.

Los pasos mínimos para el análisis PSHA son, Cornell (1968):

1. Caracterización de todas las fuentes sísmicas en términos de su probabilidad de ocurrencia;
2. Selección, desarrollo, modelos de recurrencia apropiados, basados en la sismicidad histórica y los registros disponibles, para estimar la tasa de excedencia de un evento dado, para cada zona sismogénica;
3. Selección de las relaciones o leyes de atenuación, para estimar un conjunto de parámetros de intensidad sísmica para el sitio;
4. Generación de curvas de peligro sísmico;
5. Desarrollo de un EPU a partir de las curvas de riesgo para un período de retorno determinado.

1.4.3.1. Peligro sísmico

El análisis de riesgo sísmico probabilístico define el ambiente sísmico por medio de un espectro de peligro uniforme, el cual es una representación de la relación entre el periodo natural de vibración, T , y una aceleración espectral, S_a , para una probabilidad de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno.

Para obtener el espectro de peligro uniforme, se requiere definir los modelos de recurrencia correspondientes, los cuales son modelos que permiten determinar el tiempo promedio que tarda en repetirse un sismo de características iguales, en un sitio dado. Así mismo, se requiere establecer el modelo de predicción del movimiento del suelo en el sitio o ley de atenuación. Dicho modelo relaciona el movimiento del terreno en un sitio, a través de un parámetro del movimiento genérico, que normalmente es una aceleración

o velocidad, con el parámetro que establece el tamaño del sismo en la fuente como la magnitud M , la distancia epicentral de la fuente al sitio R , y una medida de la dispersión del modelo. Una vez establecidos los modelos de recurrencia sísmicos, las zonas sismogénicas donde éstos ocurren, y los modelos de predicción del movimiento del suelo en el sitio, se tienen todos los elementos necesarios para resolver la integral de peligro sísmico, según el planteamiento probabilista de Cornell (1968). El peligro se evalúa entonces como la probabilidad de superar un valor umbral del parámetro de movimiento en el sitio, debido a la actividad de todas las zonas sismogénicas que rodean al mismo, y que pueden contribuir al movimiento esperado. La forma funcional de la integral de peligro sísmico debido a un conjunto de N fuentes sísmicas es la siguiente:

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^N v_i \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} P_i[y > Y | M, R] f_{M_i}(M) f_{R_i}(R) dM dR \quad (5)$$

donde la doble integral tiene como límites las magnitudes y distancias, mínimas y máximas de la fuente. $\lambda(y > Y)$ representa la tasa anual de excedencia del nivel del movimiento, Y , debida a la ocurrencia de terremotos en las N fuentes, que es suma de las tasas anuales de excedencia $\lambda(y > Y)$ en cada una de las fuentes (las cuales presentan una tasa anual de ocurrencia de terremotos v_i). El término, $P_i [y > Y | M, R]$ devuelve la probabilidad de excedencia de Y condicionada a las variables M y R . Por último, $f_{M_i}(M)$ y $f_{R_i}(R)$ son las funciones de densidad de probabilidad (FDP) de la magnitud y la distancia, respectivamente. A partir de este procedimiento se obtiene un conjunto de funciones llamadas curvas de peligro sísmico para diferentes periodos T , Figura 6.

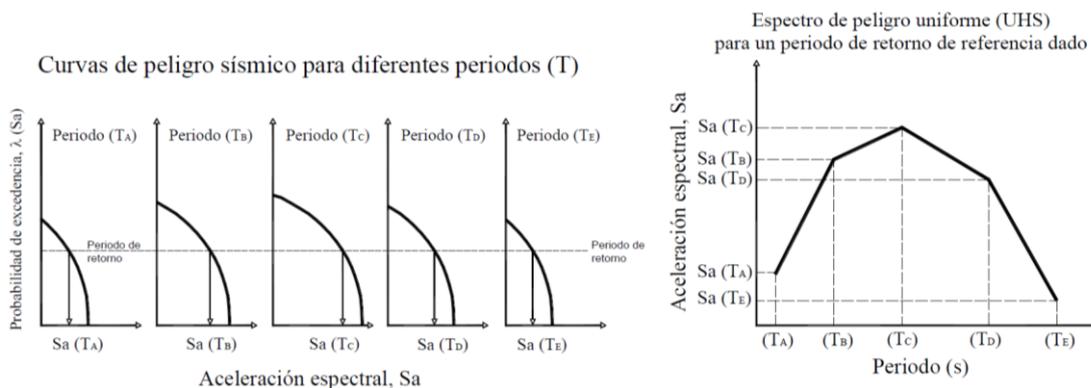


Figura 6. Curvas de peligro sísmico y espectro de peligro uniforme

1.4.3.2. Análisis de respuesta de sitio

Una vez que se determinaron los espectros UHS y que se establecieron las propiedades geotécnicas, se calcularon efectos del sitio a través de análisis unidimensionales de propagación de ondas SH. Con ello, se tuvieron en cuenta los cambios en las propiedades dinámicas con carga cíclica dentro de los depósitos de suelo, en los casos en que se espera

que las no linealidades del suelo sean significativas, se requirió además desarrollar análisis en el dominio del tiempo.

Los análisis de respuesta de sitio permiten encontrar la respuesta de un perfil geológico a una carga cíclica dada. La excitación sísmica se define con una historia de aceleraciones o movimiento de entrada que se aplica a un perfil estratigráfico en una posición definida, resolviendo el problema de propagación de ondas, se puede calcular el movimiento en otro punto del perfil, Figura 7.

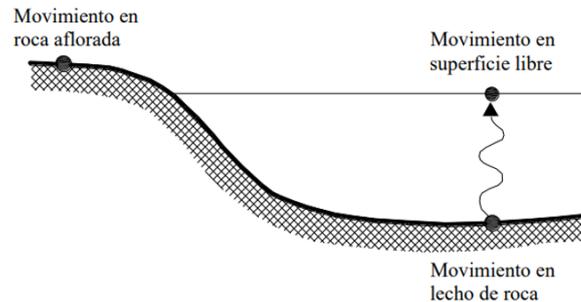


Figura 7. Representación del problema de análisis de respuesta de sitio

Así, el análisis de respuesta de sitio de un depósito de suelo consiste en predecir el comportamiento de éste ante una excitación sísmica. De este análisis, generalmente se obtienen historias de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, esfuerzos y deformaciones dinámicas para estimar riesgos asociados con los movimientos del terreno, y así determinar las fuerzas inducidas por un sismo que puedan llevar a la inestabilidad del terreno y las estructuras que soporta. Los análisis de respuesta de sitio unidimensionales se basan en la suposición de que todas las fronteras son horizontales y que la respuesta de un depósito de suelo es predominantemente causada por las ondas de corte horizontales, SH, que se propagan verticalmente desde los estratos de mayor impedancia dinámica, comúnmente llamada lecho de roca. Para estos análisis se asume que el suelo y la superficie de la base se extienden infinitamente en la dirección horizontal, Figura 8. Los análisis de respuesta de sitio unidimensionales y tridimensionales son ampliamente utilizados para calcular los efectos de propagación de movimientos sísmicos en el suelo tanto en investigación como en la práctica.

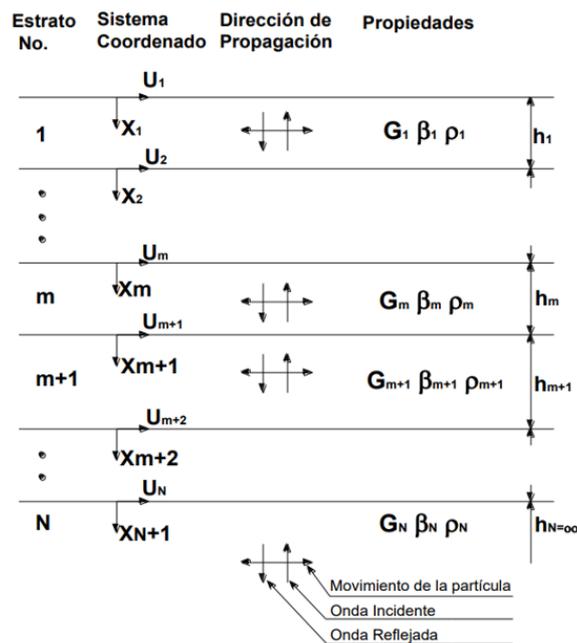


Figura 8. Esquema de respuesta de sitio y propagación de ondas

Los análisis de respuesta de sitio tradicionalmente son subdivididos en aquellos que resuelven el problema de propagación de ondas en el dominio de la frecuencia y los que lo resuelven en el dominio del tiempo. La primera categoría, incluyen códigos como SHAKE, Schnabel et al. (1972), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio unidimensional y FLUSH, Lysmer et al. (1975), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio bidimensional. En la segunda categoría podemos citar programas como QUAD4, Idriss et al. (1973) y QUAD4M Hudson et al. (1994). Todos estos códigos usan un procedimiento lineal equivalente originalmente propuesto por Seed e Idriss (1969), en el cual se aproxima el comportamiento no lineal del suelo a través de una rigidez y amortiguamiento representativos obtenidos de un proceso iterativo que los hace compatibles con una fracción determinada de la deformación angular máxima observada durante el sismo. Esta fracción generalmente varía entre 0.40 y 0.75, para niveles de excitación de moderada a alta respectivamente. Los análisis de respuesta de sitio también se pueden clasificar en deterministas y probabilistas (atendiendo al tipo del movimiento de entrada), siendo un ejemplo del primero los análisis de respuesta de sitio realizados con el programa SHAKE, y del segundo los realizados con el programa RADSH, Bárcena y Romo (1994).

Se ha observado que la respuesta calculada por un procedimiento determinista es significativamente dependiente de la historia de aceleraciones usada, mientras que un análisis con enfoque probabilista considera los movimientos sísmicos como fenómenos aleatorios, suponiéndolos como un proceso gaussiano con media cero, con lo que el fenómeno aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia; físicamente, tal definición del ambiente sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas.

1.4.3.3. Curvas de fragilidad

La probabilidad de daño en las estructuras en el área de estudio se evaluó utilizando curvas de fragilidad sísmica, que son funciones que describen la probabilidad de que una estructura exceda un nivel específico de daño en respuesta a un valor de intensidad sísmica dado Porter (2015). Las curvas de fragilidad son funciones, $P_f(\alpha)$, que expresan la probabilidad de que las estructuras fallen debido a una carga sísmica α , donde el parámetro α representa la medida de intensidad sísmica IM . Dado que la curva de peligro sísmico $H(\alpha)$ expresa la probabilidad de exceder la intensidad de carga sísmica α , la probabilidad de falla resultante $P_{f,total}$ se obtiene a partir de la integración de la fragilidad con respecto a peligro sísmico:

En estas funciones, la intensidad sísmica se puede caracterizar por parámetros como la aceleración espectral S_a , la velocidad espectral S_v , el desplazamiento espectral S_d , la aceleración máxima del suelo PGA , la velocidad máxima del suelo PGV y la deformación permanente del suelo PGD . En la Figura 9 se muestra un ejemplo de curvas de fragilidad desarrolladas para vialidades en Estados Unidos.

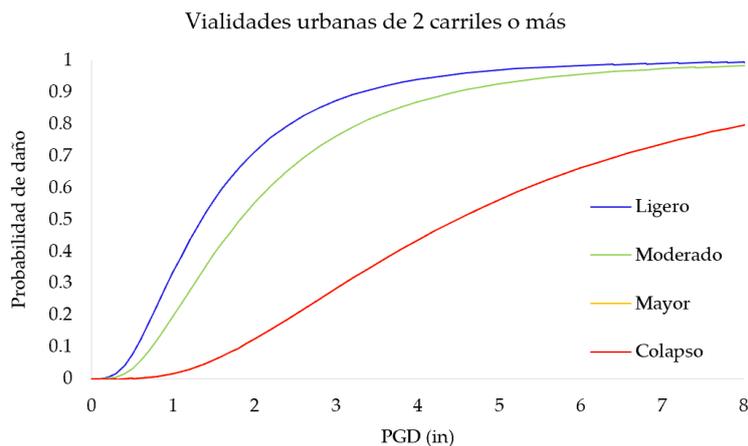


Figura 9. Curvas de fragilidad para vialidades urbanas de 2 carriles o más en Estados Unidos, NIIBS 2012.

Existen diversos métodos para definir curvas de fragilidad, entre ellos se encuentran los métodos basados en opiniones expertas, los métodos empíricos y los métodos basados en análisis numéricos. Sin embargo, se ha demostrado que las curvas de fragilidad desarrolladas a partir de métodos analíticos muestran mayor precisión que las curvas empíricas o experimentales. Numerosas funciones de fragilidad están disponibles en la literatura para una amplia gama de tipos de edificios e infraestructura. Sin embargo, dado que las pautas de diseño, los tipos de estructuras, los métodos de construcción, la sismicidad y las condiciones del suelo difieren en cada sitio en el mundo, se debe contar con ciertos criterios para aplicar las funciones de fragilidad de manera general. El siguiente paso de la metodología propuesta consistió en seleccionar un grupo de funciones de fragilidad para determinar las probabilidades de daño para los diferentes escenarios

sísmicos en el área de estudio, tomando en consideración las diferentes tipologías de edificaciones e infraestructura estratégica localizadas en el sitio.

Las curvas de fragilidad analíticas son generadas partiendo de elaboraciones estadísticas de distribuciones de daño que son simuladas con análisis de modelos estructurales bajo incrementos de cargas sísmicas. En estas metodologías el efecto de las condiciones del suelo y las características de los movimientos del terreno en la respuesta general de la estructura se toma en cuenta utilizando distintos perfiles de suelo y de registros sísmicos. Dos de los modelos analíticos más utilizados son: los análisis estáticos no lineales y los análisis dinámicos no lineales. Los primeros consisten en aplicar fuerzas a un modelo estructural que considera propiedades no lineales de los materiales, las fuerzas totales se presentan gráficamente con el desplazamiento de la estructura para definir la curva de capacidad. La capacidad estructural puede definirse utilizando un sistema equivalente de un grado de libertad. Mientras que la demanda sísmica normalmente se representa con una curva de demanda con la forma de los espectros de respuesta en términos de aceleraciones o desplazamientos. El segundo enfoque se basa en un modelo estructural más detallado que está sujeto a registros sísmicos. Este tipo de análisis suele requerir más tiempo, pero se acerca más a la realidad y permite observar el efecto de cada registro en la respuesta de la estructura. En la Tabla 7 se presentan algunas referencias de curvas generadas con distintos métodos para edificios de mampostería.

Tabla 7. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería obtenidas por distintos métodos

Método	Referencia
Empírico	Rosti et al. (2020)
	Colombi et al. (2008)
	Rota et al. (2008)
	Lagomarsino and Giovinazzi (2006)
Analítico – Estático no lineal	Milosevic et al. (2020)
	Ahmad et al. (2015)
	Karantoni et al. (2011)
	Oropeza et al. (2010)
Analítico – Dinámico no lineal	Cavaliere et al. (2020)
	Villar-Vega et al. (2017)
	Rota et al. (2010)
	RISK-UE (2003)
	Erberik (2008)

El procedimiento general para el desarrollo de curvas de fragilidad para infraestructura vial y de transporte se presenta en la Figura 10. Este enfoque permite la evaluación de curvas de fragilidad considerando las características particulares de cada elemento de la red vial, las características de los movimientos del terreno y las propiedades del perfil de suelo. Los efectos de las condiciones del suelo y las características de los movimientos

del terreno en la respuesta global de interacción suelo-estructura se toma en cuenta utilizando diferentes perfiles de suelo típicos, así como diferentes registros sísmicos. La respuesta en campo libre para los perfiles de suelo se realiza a través de análisis numéricos unidimensionales, mientras que la respuesta de la interacción suelo-estructura se calcula a través de análisis numéricos dinámicos 2D y 3D.

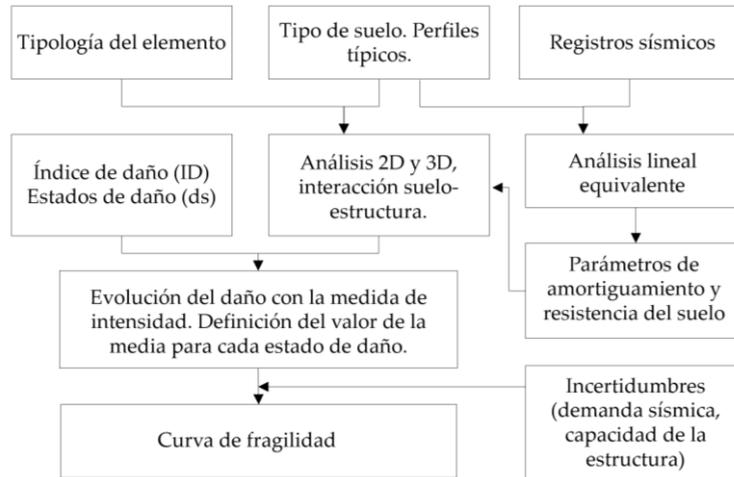


Figura 10. Procedimiento general para el desarrollo de curvas de fragilidad de elementos de la red vial. Modificado de Pitilakis et al. (2012).

1.4.3.4. Probabilidad de daño

Las probabilidades de alcanzar o superar diferentes niveles de daño, (i.e. menor, moderado, mayor o colapso) para los sismos asociados a cada uno de los EPU obtenidos previamente, se determinaron utilizando las curvas de fragilidad seleccionadas para cada tipología de edificación y elemento de la red de transporte, Figura 11. Los parámetros de intensidad sísmica se obtuvieron a partir de los análisis de respuesta del sitio realizados previamente.

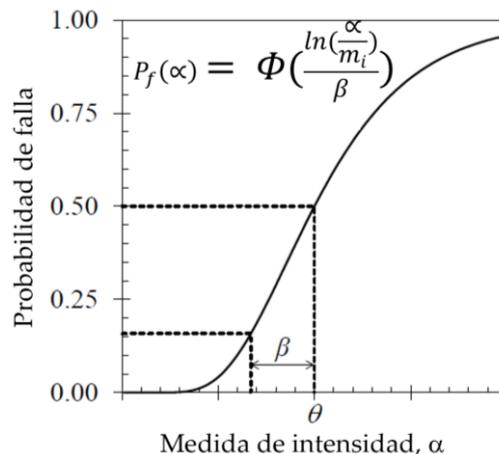


Figura 11. Cálculo de la probabilidad de falla utilizando curvas de fragilidad. Modificado de Porter (2020)

1.4.4. Distribución espacial de daños

1.4.4.1. Distribución espacial de daños

Las probabilidades calculadas se representaron espacialmente, utilizando técnicas de análisis espacial basadas en GIS, para generar la distribución espacial de las probabilidades de alcanzar un estado de daño dado dentro del área para cada evento sísmico. Dichas distribuciones pueden generarse considerando cada estructura individualmente, o agrupando los edificios en bloques con elementos con características estructurales similares. De esta forma, se generaron conjuntos de mapas de distribución de daños para cada evento sísmico analizado, Figura 12.

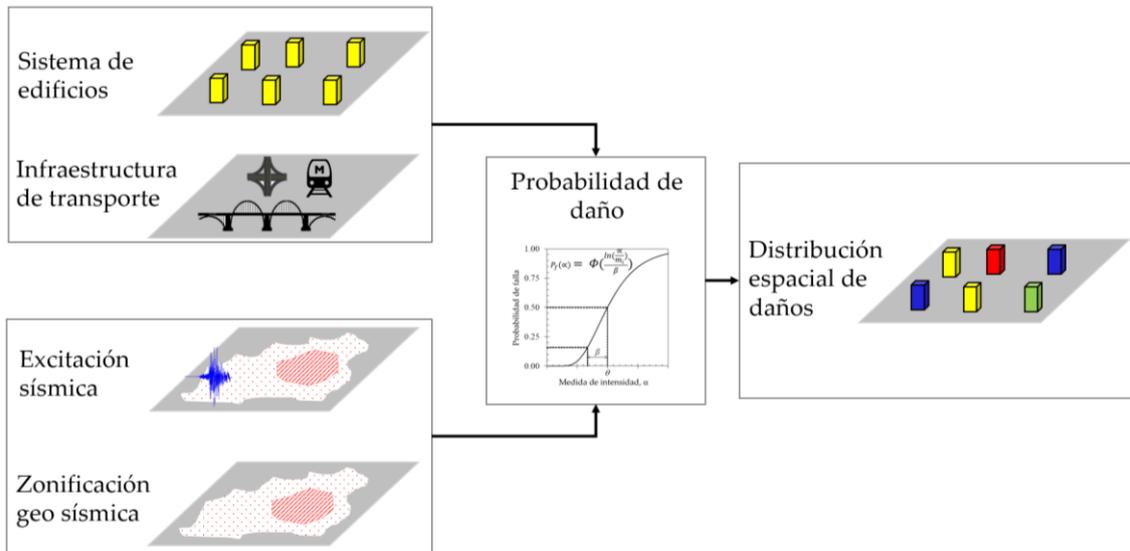


Figura 12. Esquema de la integración en SIG del inventario de infraestructura y las probabilidades de daño obtenidas.

1.4.4.2. Criterio de cierres en vialidades

Los escenarios de bloqueo de vialidades después de un sismo pueden ser realizados utilizando metodologías basadas en el volumen esperado de escombros causado por daños a los edificios, o en la probabilidad de daños a edificios, puentes y fallas en el suelo. Sin embargo, las observaciones posteriores al terremoto de 2017 en la Ciudad de México mostraron que, en áreas densamente pobladas, las autoridades pueden ordenar cierres de vialidades a corto y mediano plazo en los sitios con daños en estructuras adyacentes evaluados preliminarmente como moderados o mayores, como procedimientos de seguridad.

El trabajo de campo coordinado por el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) informó que dicho evento provocó el colapso de 36 edificios, 311 severamente dañados y daños moderados en otros 958. Según informes de los medios de comunicación, las políticas de seguridad de las autoridades de la ciudad generaron el cierre de 75 tramos de vialidades. Las avenidas cercanas a edificios colapsados o severamente dañados fueron inmediatamente cerradas por completo en el caso de vías

con dos o menos carriles, y parcialmente cerradas en el caso de vías con más de dos carriles, como en los casos documentados por Galvis et al. (2017) y GEER (2017), donde se presentan ejemplos del patrón de daño observado que corresponden al criterio de cierre mencionado. La Figura 13 muestra algunas de las calles y avenidas cerradas dentro de dos de las áreas más afectadas de la ciudad. Además, se documentaron cierres totales y parciales en tramos de vialidades donde había edificios con daños moderados. En la mayoría de los casos, los cierres permanecieron de 5 a 28 días por políticas de seguridad. Por ejemplo, la autopista urbana de cinco carriles, Viaducto Miguel Alemán, fue parcialmente cerrada en el tramo cercano al derrumbe de un edificio de seis pisos. Además, un edificio de dos pisos en la Avenida Ámsterdam de dos carriles sufrió daños moderados y se informó un cierre total de la vía.

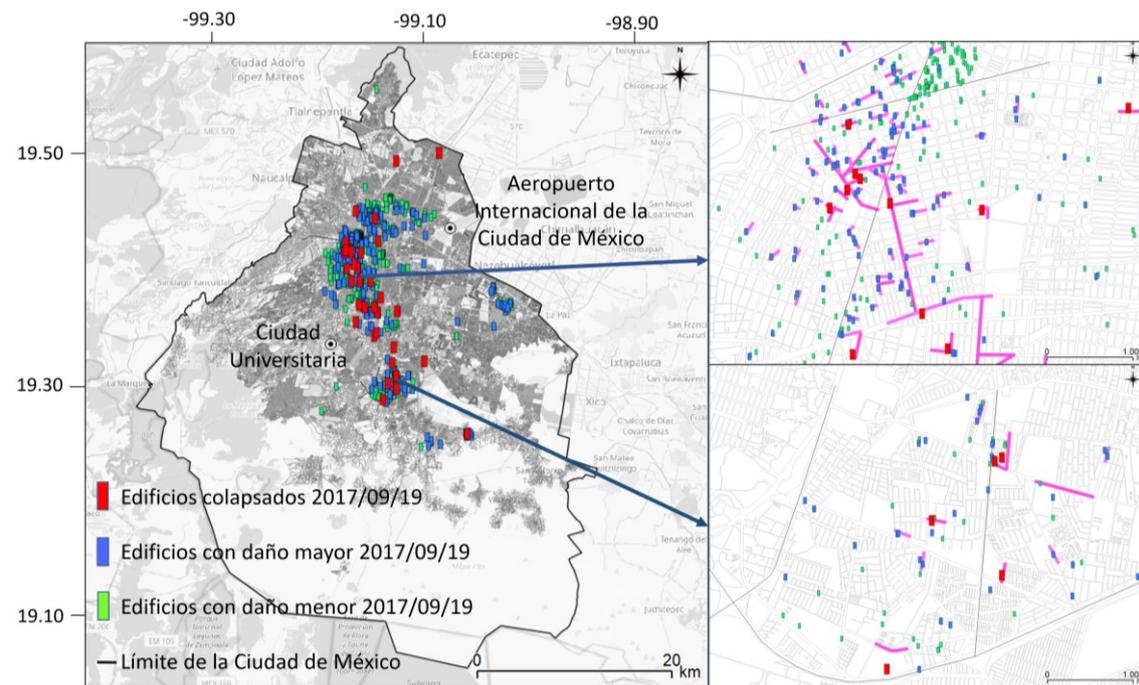


Figura 13. Ubicación de los edificios dañados durante el terremoto de la Ciudad de México de 2017. Las líneas rosas indican vialidades cerradas debido al daño a los edificios cercanos.

Como resultado de las investigaciones generadas sobre el mismo evento, Román-de la Sancha et al. (2019) identificaron las relaciones entre los estados de daño considerados en algunas curvas de fragilidad y el daño estructural observado en edificios por el terremoto. Teniendo en cuenta esas relaciones y el patrón de cierre observado, para esta investigación se adoptó un nuevo criterio de bloqueo o cierre de vialidades, que puede ser replicado en áreas urbanas densamente pobladas, donde se emplean políticas de seguridad luego de presentarse eventos sísmicos extremos, Figura 14. El criterio considera que se producirá el cierre total de vías con dos carriles o menos, y el cierre parcial de avenidas con más de dos carriles, cerca de edificios con probabilidad de alcanzar daños moderados o mayores.

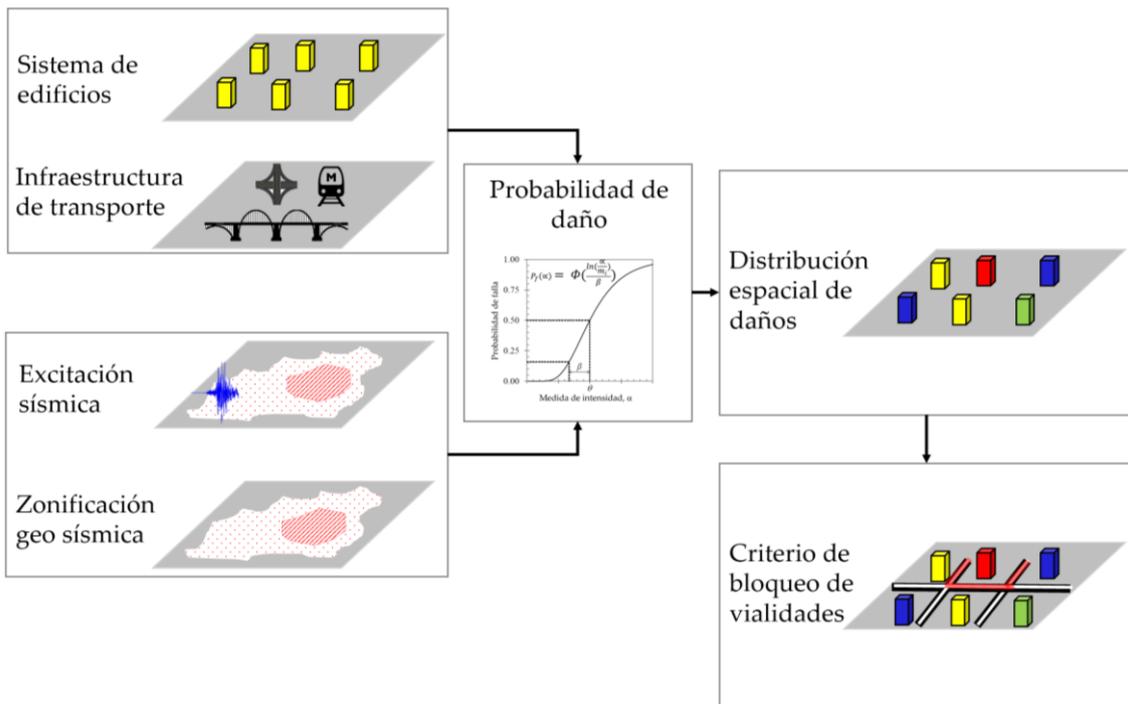


Figura 14. Esquema de la integración de las probabilidades de daño obtenidas y el criterio de bloqueo de vialidades.

1.4.5. Respuesta dinámica de tráfico

1.4.5.1. Modelo de respuesta de tráfico

La respuesta del tráfico se simuló utilizando un modelo de asignación dinámica de tráfico DTA, que describe el comportamiento del tráfico resultante de interrupciones inducidas por sísmicos en la red de carreteras. Los modelos DTA implican determinar las opciones de ruta en una red dada una demanda de viajes variable en el tiempo. A partir de los estudios de Lighthill y Whitham (1955), y Gazis et al. (1959), los enfoques de modelado de asignación de tráfico han evolucionado a métodos de vanguardia, en los cuales se aprovecha la información de tráfico generada en tiempo real y los sistemas inteligentes de transporte para pronosticar el comportamiento y las opciones de ruta con mayor precisión con diversas aplicaciones prácticas, como los presentados por Wang et al. (2018), Pi et al. (2019) y Zhang et al. (2019). Como se ha mencionado, las suposiciones consideradas para el desarrollo de dichos modelos pueden incluir el principio de equilibrio del usuario de Wardrop (1952) y/o métodos estocásticos para determinar las opciones de ruta y la distribución del flujo dentro de la red, Ortúzar y Willumsen (2011).

Los modelos DTA consisten en un modelo de demanda, un modelo de red y un grupo de modelos de impactos. El modelo de demanda contiene datos de demanda de viajes. El modelo de red contiene un grupo de zonas de tráfico que representan el origen y el destino de los viajes y un conjunto de nodos y enlaces que representan vialidades y vías férreas. A su vez, los modelos de tráfico DTA pueden resolver el problema con métodos analíticos o con algoritmos basados en simulación. Los primeros utilizan variaciones del principio de equilibrio del usuario estático u optimización matemática,

mientras que los segundos desarrollan iteraciones entre tres elementos: un módulo de simulación de tráfico, un módulo de ruta más corta y un módulo de carga de red, Peeta y Ziliaskopoulos (2001). El comportamiento del tráfico y de flujos en redes de transporte se puede caracterizar a través de parámetros como los volúmenes de tráfico, los tiempos de viaje, la formación de colas y las velocidades alcanzadas en los segmentos, los cuales son obtenidos en los modelos DTA.

En general, la estructura de los modelos dinámicos, Figura 15, incluye un algoritmo para la solución al problema de equilibrio del usuario que tiene dos componentes principales: un modelo para determinar un conjunto de flujos o volúmenes de viajes para cada ruta en distintos períodos de tiempo, dados los resultados de la iteración previa; así como, un modelo para determinar los tiempos de viaje reales que resultan del conjunto de flujos para cada ruta. Dado que el algoritmo requiere un conjunto inicial de flujos por ruta, éste se determina con un modelo de asignación estático que distribuye los viajes a las rutas más cortas asumiendo condiciones de flujo libre. La siguiente etapa consiste en la carga de la red y puede ser realizada empleando cualquier modelo dinámico de ruteo.

La formulación matemática para resolver el problema de equilibrio dinámico está hecha en términos de flujos por ruta $h_k(t)$, para todas las rutas k que pertenezcan al conjunto K_i para un par origen-destino $i \in I$ en el tiempo t . Las demandas dinámicas, por intervalos de tiempo, se definen como $g_i(t)$. Los cambios en los flujos por ruta en la región Ω satisfacen el principio de conservación de flujos y la no negatividad de las restricciones para $t \in T_d$, donde $(0, T_d)$ es el período durante el cual está definida la demanda temporal. Esto es:

$$\Omega = h(t): \sum_{k \in K_i} h_k(t) = g_i(t), \quad i \in I; h_k(t) \geq 0 \quad \text{para casi toda } t \in T_d \quad (6)$$

La definición del equilibrio óptimo del usuario está dada por la versión dinámica del principio de Wardrop, o equilibrio del usuario estático:

$$s_k(t) = u_i(t) \quad \text{si } h_k(t) > 0 \quad \text{para toda: } k \in K_i, i \in I \quad \text{para casi toda } t \in T_d \quad (7)$$

$$s_k(t) \geq u_i(t) \quad \text{para cualquier otro caso}$$

Donde $h_k \in \Omega$, $u_i(t) = \min_{k \in K_i \{s_k(t)\}}$ para casi toda $t \in T_d$ y $s_k(t)$ es el tiempo de viaje de la ruta determinado por la carga dinámica en la red.

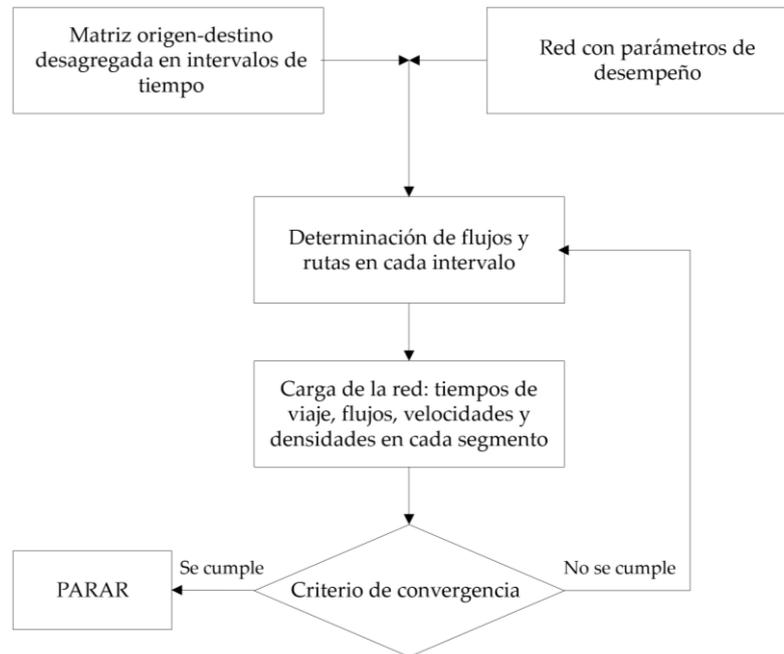


Figura 15. Estructura del algoritmo de solución del problema de asignación dinámica

1.4.5.2. Calibración del modelo

Los modelos DTA generalmente se calibraron utilizando datos provenientes de aforos de tráfico obtenidos en el campo. Aunque no existe un procedimiento único para la calibración de dichos modelos, un proceso general bien descrito se presenta en Mahut et al. (2014), el cual incluye los datos empíricos requeridos, la observación de discrepancias entre los datos empíricos y la salida del modelo, y los análisis y corrección de estas diferencias.

1.4.5.3. Simulación de tráfico ante escenarios sísmicos

Una vez calibrado el modelo de tráfico, el siguiente paso consistió en simular los escenarios sísmicos seleccionados considerando los cierres de segmentos parciales y totales esperados. El modelo DTA puede incluir la red de vial transporte, las redes de transporte público, o ambas, según las capacidades computacionales y la disponibilidad de datos sobre cada una de las redes. Además, algunos modelos DTA permiten la integración de matrices OD dinámicas, lo que mejora la precisión de los resultados del modelo. Sin embargo, es importante señalar que actualmente el considerar los cambios en los patrones de viaje posteriores a desastres como sismos extremos sigue siendo un reto mayor, ya que los datos sobre los patrones de movilidad posteriores a sismos de gran magnitud generalmente no existen. Así mismo, su estimación puede ser complejo e impreciso, ya que son escasos los estudios o registros sobre los patrones esperados o las preferencias de viaje de los usuarios después de emergencias sísmicas, por lo que es común realizar aproximaciones considerando los patrones de viaje en condiciones normales. En este sentido, el aumento en el uso de tecnologías de la información y comunicación en áreas urbanas en los últimos años, proporciona datos sobre las

tendencias de movilidad permanentemente, incluyendo los eventos sísmicos más recientes, con el potencial de ser útiles para futuras investigaciones.

1.4.6. Evaluación de vulnerabilidad sísmico-operativa de redes de transporte

1.4.6.1. Indicador de eficiencia sísmico-operativa

Para correlacionar la respuesta del comportamiento del tráfico con las características sismológicas del evento sísmico, se aplicó un modelo de desempeño o eficiencia sísmica de la red. En este modelo, para cada escenario, se obtiene un valor de eficiencia por DMU o segmento, denominado índice EST. El conjunto de valores de desempeño se puede expresar de dos formas: en forma gráfica como un grupo de límites o fronteras de eficiencia y espacialmente como un grupo de mapas de eficiencia sísmica.

1.4.6.2. Fronteras de eficiencia sísmica de la red

Utilizando los resultados del índice EST del modelo de eficiencia, se generó un conjunto de curvas o fronteras de eficiencia sísmica. Primero, se identificaron los DMU o segmentos con valores de índice EST iguales a uno. Luego, los valores de las variables de entrada y salida correspondientes a dichas DMU se relacionaron y graficaron. Las curvas resultantes crean una envolvente o límite de eficiencia, donde los segmentos con las mejores características y condiciones para enfrentar el comportamiento del tránsito inducido por sismos envuelven los segmentos vulnerables, Figura 16. Estas curvas permiten identificar y comparar las características de los elementos de la red que exhibe el mejor desempeño durante diferentes terremotos.

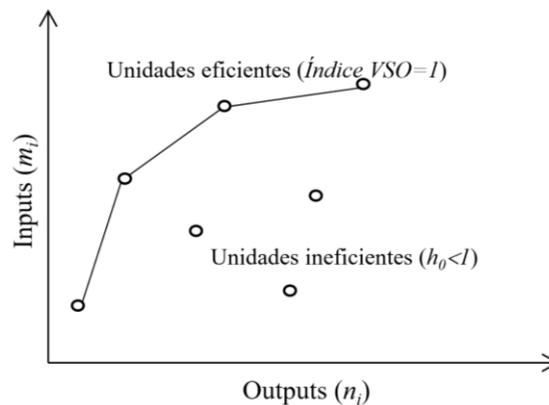


Figura 16. Obtención de límites o fronteras de eficiencia sísmica de redes de transporte

1.4.6.3. Mapas de eficiencia sísmica de la red

Los valores EST obtenidos para cada segmento de la red pueden expresarse a través de su distribución espacial, la cual se generó integrando los resultados en SIG. La Figura 17 muestra el esquema de generación de mapas de eficiencia sísmico-operativa.

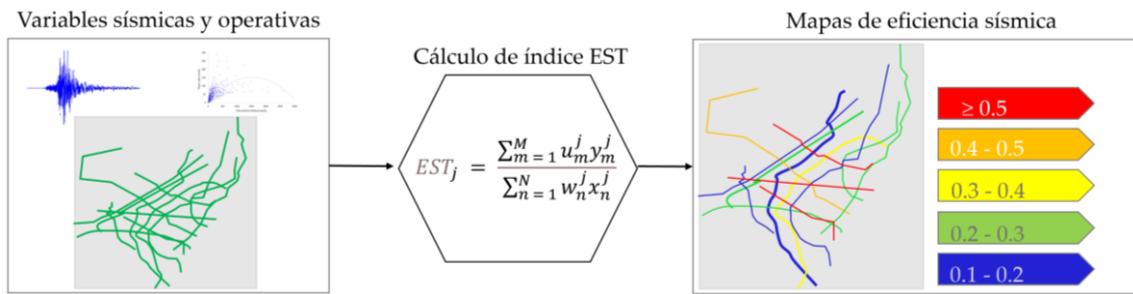


Figura 17. Procedimiento de generación de mapas de eficiencia sísmico-operativa

1.4.7. Respuesta secuencial sismo-tsunami de infraestructura de transporte en zonas urbanas costeras

Se propuso un enfoque numérico con el objetivo de capturar los efectos secuenciales por sismo-tsunami en infraestructura de transporte ubicada en zonas costeras, considerando las deformaciones y presiones agregadas durante ambos eventos, Figura 18. El primer paso del proceso consistió en modelar la carga cíclica dinámica aplicada al sistema suelo-estructura utilizando una aproximación en diferencias finitas para determinar los asentamientos diferenciales, los desplazamientos laterales y el potencial de licuefacción del suelo. A continuación, utilizando un modelo basado en el método de volúmenes finitos, se simuló la propagación de la ola del tsunami y el potencial de inundación en la costa. Finalmente, las cargas hidrodinámicas resultantes se aplicaron al estado de deformación post-sismo de la estructura para obtener un segundo estado de deformación o daño del sistema suelo-estructura.

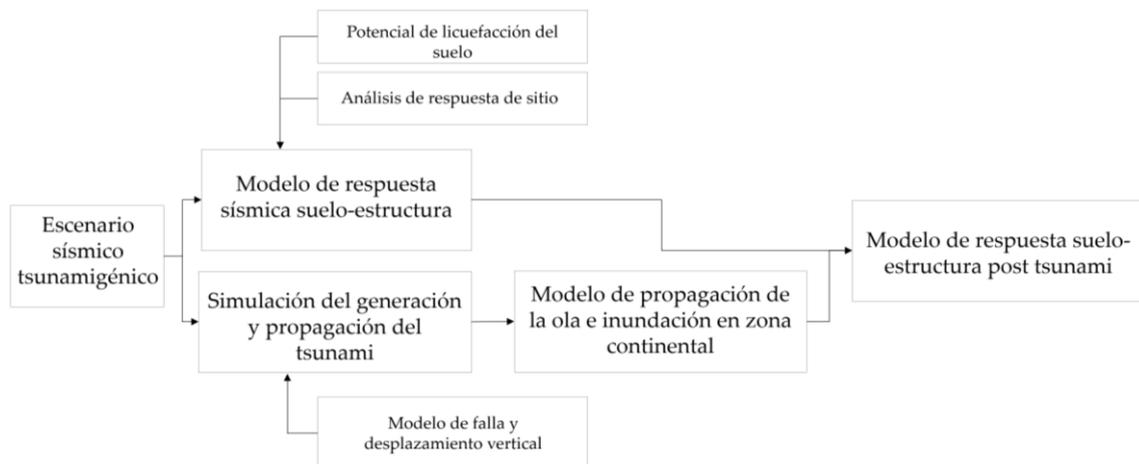


Figura 18. Esquema secuencial de respuesta sismo-tsunami en infraestructura de transporte

1.4.7.1. Escenario sísmico tsunamigénico

Dado que no todos los sismos son capaces de generar tsunamis. Es necesario realizar un análisis de riesgo de eventos tsunamigénicos, que permita identificar las características

de intensidad, magnitud y período de retorno que deben cumplirse para considerar que un sismo tiene el potencial de provocar un desplazamiento vertical entre las placas tal que genere una ola de gran altura o tsunami.

1.4.7.2. Respuesta sísmica suelo-estructura

La respuesta sísmica del sistema suelo-estructura se modeló a través del método de diferencias finitas, el cual permite modelar el comportamiento no lineal de un depósito de suelo. Para ello es necesario contar con la caracterización de las propiedades dinámicas del suelo.

1.4.7.3. Estimación del potencial de licuación

Derivado de los sismos en Alaska y Niigata, Japón en 1964, Seed e Idriss (1971) publicaron el desarrollo de un método simplificado para evaluar la resistencia de los suelos a licuación. La evaluación del potencial de licuación parte de la demanda sísmica expresada en términos del cociente de esfuerzo cíclico, CSR, y la capacidad del suelo para resistir licuación, expresada en términos del cociente de resistencia cíclica, CRR. Seed e Idriss (1971) formularon la siguiente ecuación para el cálculo del cociente de esfuerzo cíclico:

$$CSR = (\tau_{av}/\sigma'_{vo}) = 0.65(a_{m\acute{a}x}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d \quad (21)$$

Donde a_{max} es la aceleración horizontal máxima en la superficie del terreno; g , es la aceleración de la gravedad; σ_{vo} y σ'_{vo} son el esfuerzo total y efectivo; r_d es el coeficiente de reducción de esfuerzo que toma en cuenta la flexibilidad del perfil de suelo. Liao y Whitman (1986) proponen las siguientes expresiones para la estimación del factor r_d .

$$CSR = (\tau_{av}/\sigma'_{vo}) = 0.65(a_{m\acute{a}x}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{para } 9.15 \text{ m} < z < 23 \text{ m} \quad (22)$$

La carga es descrita en términos de los ciclos de esfuerzo cortante, y el potencial de licuación es evaluado con base en la amplitud y el número de ciclos de esfuerzo cortante que el sismo induce. Este enfoque es conocido como esfuerzos cíclicos, Seed e Idriss (1971) Kramer (1996).

1.4.7.4. Generación de tsunami y modelo de propagación de la ola

Para conocer el nivel de inundación que puede esperarse en la zona urbana costera se desarrolló un modelo de propagación oceánica de la ola. Para ello fue necesario caracterizar el desplazamiento vertical generado por el movimiento de las placas.

El modelo de generación de tsunami consiste en la representación del mecanismo de falla ocasionado por el sismo en el fondo marino. El modelo propuesto por Okada (1985) y (1992) permite estimar el desplazamiento vertical en la superficie del fondo marino de una falla rectangular, para lo cual es necesario establecer parámetros

relacionados con la geometría de la falla, que están a su vez asociados a la magnitud del evento sísmico, como su longitud L , su ancho W y ángulo de desplazamiento δ , Figura 19.

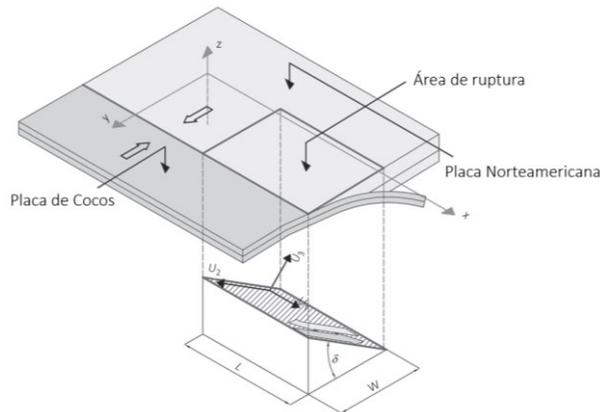


Figura 19. Geometría de la falla rectangular utilizando el modelo de Okada (1985), (Modificado de Jaimes et al. 2016).

Una vez conocida la deformación inducida por el sismo en la zona de la falla, se desarrolló un modelo de propagación de la ola hacia la costa, a través de la resolución de las ecuaciones de aguas someras utilizando el método de volúmenes finitos, incluido en el código Geoclaw (LeVeque et al. 2011).

1.4.7.5. Respuesta suelo-estructura sismo-tsunami

El efecto de la inundación o incremento en la altura de la superficie oceánica en la costa en el comportamiento del sistema suelo-estructura se modeló considerando el estado post sismo obtenido en la etapa anterior. Así, en esta etapa se consideraron tanto los efectos en el incremento de la presión de poro como las presiones hidrodinámicas actuando en la estructura.

1.5. Organización de la tesis

La tesis está organizada de la siguiente manera, en este capítulo, Capítulo 1, se presenta una introducción que incluye la justificación e importancia de la investigación y el estado del arte en el tema estudiado, así como los objetivos generales que se persiguen, la estructura de metodología propuesta y las principales aportaciones alcanzadas. En el Capítulo 2, se presentan los materiales y métodos utilizados en las distintas etapas de la metodología, como son el modelo de análisis probabilístico de riesgo sísmico, las funciones de fragilidad sísmica, los modelos de asignación dinámica de transporte, el modelo de eficiencia de la envolvente de datos, así como los modelos de propagación de tsunamis tanto en la parte oceánica como a nivel costero. En el Capítulo 3 se introduce la aplicación de la metodología planteada a un caso de estudio en un sector de la red vial de la Ciudad de México, analizando la vulnerabilidad de la red frente a sismos de falla normal y de subducción. En el Capítulo 4 se presenta el análisis de un segundo caso de estudio en la ciudad costera de Manzanillo, en el cual se estudió el efecto secuencial en la respuesta de estructuras de transporte en zonas costeras frente a fuerzas sísmicas y fuerzas hidrodinámicas inducidas por tsunamis. En el Capítulo 5 se discuten los resultados y las conclusiones de la investigación, así como algunas futuras líneas de investigación.

1.6. Principales aportaciones

Hasta ahora, las investigaciones enfocadas en estudiar la respuesta de redes de transporte ante eventos sísmicos no habían considerado modelar la vulnerabilidad sísmico-operativa de las redes y el correspondiente comportamiento del tráfico en zonas urbanas densamente pobladas, en función de los principales parámetros sismológicos y de tráfico. Esta investigación presenta una metodología novedosa para analizar la vulnerabilidad de dichas redes desde una perspectiva de eficiencia operativa ante escenarios sísmicos con distintas características. Las principales contribuciones de esta investigación doctoral incluyen:

- El planteamiento de un enfoque metodológico que relaciona las variables de intensidad sísmica y las variables de comportamiento del tráfico, aplicando un modelo dinámico de tráfico, análisis de peligro sísmico y curvas de fragilidad integrados en un modelo de eficiencia multivariable basado en el análisis envolvente de datos.
- El análisis de las correspondencias entre las variaciones en el comportamiento del tráfico y las características del evento sísmico, como su intensidad y contenido de frecuencias.
- La introducción de un nuevo indicador de vulnerabilidad sísmico-operativa de redes de transporte que evalúa de manera directa su eficiencia en función de los principales parámetros sismológicos, es decir, la aceleración máxima del terreno, la aceleración espectral y los desplazamientos permanentes, en términos de las

variables del comportamiento del flujo en la red, es decir, los volúmenes de tráfico, los tiempos de viaje y las velocidades medias.

- El planteamiento de un esquema numérico secuencial para la evaluación del comportamiento de carreteras urbanas frente a eventos sismo-tsunami.

La metodología y los modelos planteados contribuyen en brindar una nueva perspectiva para el estudio de la vulnerabilidad de los sistemas de transporte urbanos frente a eventos sísmicos extremos, en la cual se comprueba la relevancia del diseño y modelo de gestión operativa de la red y del contenido de frecuencias de los sismos en el desempeño de ésta y en las condiciones del tráfico, así como la influencia de factores multirriesgo en el comportamiento y vulnerabilidad de dichas redes. Se aporta además una herramienta de análisis cuantitativa para evaluar la vulnerabilidad sísmico-operativa de las redes de transporte en entornos urbanos. Su aplicación permite la identificación de los elementos vulnerables en las redes urbanas y los efectos potenciales de los peligros geo sísmicos en estas, lo cual es vital en la planificación de áreas urbanas sostenibles y resilientes.

Capítulo 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La metodología propuesta combina un conjunto de modelos numéricos comenzando con el análisis probabilista de riesgo sísmico, curvas de fragilidad sísmica, análisis dinámico de tráfico y análisis de generación y propagación de tsunamis. En este capítulo se describen los principios fundamentales de dichos modelos y los métodos disponibles para llevarlos a cabo.

2.2. Riesgo, peligro y vulnerabilidad sísmica

El riesgo sísmico es el resultado de la interacción entre la amenaza o peligro sísmico en una región y su vulnerabilidad asociada a factores humanos y el ambiente construido o infraestructura. Así por un lado, el peligro sísmico se refiere a los fenómenos sísmicos como los movimientos del terreno, fallas o licuación del suelo con el potencial de causar daños, mientras que el riesgo sísmico corresponde a la probabilidad de que se presenten daños o pérdidas en la infraestructura al exponerse al peligro o amenaza sísmica. De esta manera, puede ser o no posible mitigar el peligro sísmico, pero siempre es posible reducir el riesgo sísmico, ya sea mitigando la amenaza sísmica, reduciendo la vulnerabilidad o ambas. Para estimar el riesgo sísmico es necesario generar modelos que describan las relaciones entre el peligro sísmico y la vulnerabilidad en una región, uno de los modelos con mayor aceptación es el análisis de peligro sísmico probabilista.

2.2.1. Análisis de peligro sísmico probabilista

El análisis de peligro sísmico probabilista es un modelo que consiste en obtener probabilidades anuales de excedencia para el parámetro del movimiento del terreno que se considera representativo del riesgo sísmico. En las primeras etapas de desarrollo del método, el parámetro de referencia era la aceleración máxima del terreno. Con el desarrollo de leyes de atenuación para parámetros espectrales fue posible la construcción de espectros de diseño en los que se considera la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los periodos de interés en ingeniería sísmica. De este modo surgen los espectros de peligro uniforme, que se construyen representando punto a punto las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo período de retorno.

El objetivo de muchos de los análisis en la ingeniería sísmica es garantizar que una estructura resistirá un nivel de movimiento del suelo dado, mientras mantiene un nivel de eficiencia deseado, por lo que un primer objetivo es determinar el nivel del movimiento sísmico que deberá ser usado para realizar el análisis. La definición de un movimiento sísmico futuro es un proceso complejo, ya que existen incertidumbres alrededor de los parámetros de ubicación, tamaño e intensidad. El análisis del peligro sísmico probabilista

permite cuantificar y combinar estas incertidumbres para generar una descripción explícita de la distribución de sismos futuros que pueden ocurrir en un sitio dado. Los primeros investigadores que desarrollaron este tema fueron Esteva (1967) y Cornell (1968); después de ellos, este tema ha sido abordado por otros investigadores en todo el mundo tomando como base los trabajos desarrollados en los años 60s, (i.e. McGuire 1976; Youngs y Coppersmith 1985; Chapman 1995; McGuire 1995; Ordaz y Reyes 1999; Cramer 2003; Bommer y Abrahamson 2006). Con este método se define el peligro sísmico como la probabilidad de que ocurra un movimiento fuerte del terreno que exceda una cierta intensidad, en un sitio dado dentro un periodo de tiempo determinado.

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

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

En la Figura 20 se presenta en forma gráfica los pasos que se siguen en un análisis de peligro sísmico probabilista.

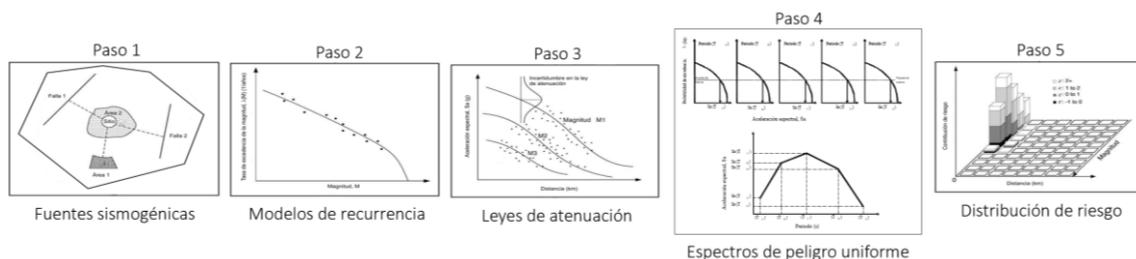


Figura 20. Procedimiento del análisis de riesgo sísmico probabilista

2.2.1.1. Ambiente Sísmico

Se puede decir entonces que el análisis PSHA permite definir el ambiente sísmico de la zona, el cual está influenciado por factores tales como la magnitud máxima del sismo, distancia del sitio a la fuente de liberación de energía; características geológicas de la roca a lo largo de la trayectoria de transmisión de la onda de la fuente al sitio; mecanismo de la fuente del sismo; efectos de interferencia de la onda relacionada con la dirección y velocidad de ruptura de la falla; y condiciones locales del subsuelo, Seed et al. (1983). En última instancia, el ambiente sísmico se puede caracterizar por medio de un espectro de peligro uniforme en el cual están incluidos implícitamente los factores antes mencionados. El primer paso del modelo PSHA consiste en la identificación del conjunto de fuentes sísmogénicas con influencia en la zona de estudio, así como su mecanismo de falla y distancia al sitio o sitios de interés.

2.2.1.2. Modelos de recurrencia de sismos

A continuación, se definen los modelos de recurrencia, los cuales son funciones que permiten determinar el tiempo promedio que tarda en repetirse un sismo de características iguales, en un sitio dado. La elección de un modelo apropiado es de suma importancia ya que se ha observado que la variabilidad de la periodicidad sísmica puede ser significativa, llegando hasta el 40% del intervalo de recurrencia promedio, Goes (1996).

2.2.1.3. Leyes de atenuación

Una vez determinado el modelo de sismicidad de la región de interés, incluyendo los parámetros característicos de cada zona sísmogénica, se debe establecer el modelo de predicción del movimiento del suelo en el sitio o ley de atenuación. Dicho modelo relaciona el movimiento del terreno en un sitio, a través de un parámetro del movimiento genérico Y , que normalmente es una aceleración o velocidad, con el parámetro que establece el tamaño del sismo en la fuente (magnitud, M), la distancia epicentral de la fuente al sitio, R , y una medida de la dispersión del modelo.

2.2.1.4. Resolución de la integral de peligro sísmico

Una vez establecidos los modelos de recurrencia sísmicos, las zonas sísmogénicas donde éstos ocurren, y los modelos de predicción del movimiento del suelo en el sitio, se tienen todos los elementos necesarios para resolver la integral de peligro sísmico, según el planteamiento probabilista de Cornell (1968). La forma funcional de la integral de peligro sísmico debido a un conjunto de N fuentes sísmicas se observa en la ecuación (5).

Si se considera que la probabilidad de excedencia de Y es función de las variables M y R únicamente, entonces $P_i[y > Y | M, R]$ sólo puede tomar los valores uno o cero. Cuando se produce excedencia del movimiento, es decir, los valores de las variables R y M usados para evaluar el movimiento y son tales que $y > Y$, la probabilidad de excedencia vale uno. En caso de que no se produzca excedencia, entonces la probabilidad condicionada $P_i[y > Y | M, R]$, toma el valor cero.

2.2.1.5. Curvas de peligro sísmico y espectro de peligro uniforme

A través de la resolución de la integral de peligro sísmico se obtienen las curvas de peligro sísmico para diferentes periodos. Con ello, es posible determinar el espectro de peligro uniforme UHS, el cual es una representación de la relación entre el periodo natural de vibración, T , y una aceleración espectral, S_a , para una probabilidad de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno. Los espectros de peligro sísmico resultantes son utilizados en modelos de análisis de riesgo y vulnerabilidad sísmica.

2.2.2. Modelos de vulnerabilidad sísmica

Uno de los principales componentes de los análisis de riesgo sísmico son los modelos de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, en ellos las condiciones de vulnerabilidad de una estructura pueden expresarse en términos de funciones de vulnerabilidad y/o funciones de fragilidad. Las primeras describen la probabilidad de tener ciertas pérdidas (sociales, económicas, etc.) dado un nivel de intensidad sísmica, mientras que las segundas describen la probabilidad de exceder diferentes estados límite (como estados de daño) dado un nivel de intensidad sísmica. Los primeros modelos de vulnerabilidad se realizaron en los años 70's Calvi et al. (2006) empleando métodos empíricos basados en los daños observados después de terremotos que eran relacionados con los movimientos del terreno. Así se construyeron matrices de probabilidad de daños y funciones de vulnerabilidad. Con el incremento en el desarrollo de leyes de atenuación en términos de ordenadas espectrales y de mapas de peligro sísmico se favoreció el desarrollo de modelos de vulnerabilidad y fragilidad sísmica analíticos. Los modelos analíticos permiten realizar una evaluación más detallada y clara, basada en algoritmos que se asocian a daños físicos directos. Estas características representan grandes ventajas frente a los métodos empíricos colocando a los modelos analíticos como los ideales para llevar a cabo análisis paramétricos que busquen la definición y calibración de políticas públicas orientadas a la planeación urbana y acciones de refuerzo de estructuras.

En las últimas décadas se ha publicado un número importante de funciones de vulnerabilidad y fragilidad en todo el mundo considerando un abanico de condiciones estructurales y sismológicas. Proyectos internacionales como Global Earthquake Model (GEM) y SYNER-G han recopilado más de mil curvas de fragilidad y vulnerabilidad, modelos de daños a pérdidas y curvas de capacidad. Su investigación se ha centrado en recopilar curvas de fragilidad y vulnerabilidad que pueden usarse directamente en el análisis de riesgo sísmico. GEM clasifica las curvas en dos compendios: 157 curvas empíricas de fragilidad y vulnerabilidad Rossetto et al. (2014) y 145 curvas de fragilidad analíticas, D'Ayala y Meslem (2012). Por su parte en el proyecto europeo SYNER-G, Crowley et al. (2014), recogieron 415 curvas de fragilidad para edificios y 217 para puentes. En el caso de países latinoamericanos, recientemente Villar-Vega et al. (2017) desarrollaron un modelo de fragilidad uniforme para los tipos de construcción más representativas en la región andina, para utilizarse en el análisis de riesgos a gran escala. Mientras que Mayoral et al. (2017) desarrollaron funciones de fragilidad para una

evaluación de vulnerabilidad y evaluación del tiempo de recuperación de puentes urbanos en la Ciudad de México. Otros autores como Díaz et al. (2018) han validado los índices de daños basados en la capacidad y los modelos paramétricos propuestos por Pujades et al. (2015), para edificios de acero ubicados en suelos blandos de la Ciudad de México. El aumento en la generación de estos modelos se debe principalmente a las mayores capacidades computacionales actuales.

2.2.3. Funciones de fragilidad sísmica

El análisis probabilista de riesgo sísmico describe la confiabilidad estructural a través de las curvas de fragilidad $P_f(\alpha)$, las cuales son componentes importantes de las evaluaciones del riesgo sísmico, que proporcionan el vínculo entre la evaluación del peligro sísmico en un sitio y los efectos de los movimientos del suelo previstos en el entorno construido. Las curvas de fragilidad son funciones que expresan la probabilidad de que las estructuras fallen debido a una carga sísmica α , donde el parámetro α representa la medida de intensidad sísmica IM . Dado que la curva de peligro sísmico $H(\alpha)$ expresa la probabilidad de exceder la intensidad de carga sísmica α , la probabilidad de falla resultante $P_{f,tot}$ se obtiene a partir de la integración de la fragilidad con respecto a peligro sísmico, EPRI (2003), Kennedy et al. (1980):

$$P_{f,tot} = \int_0^{\infty} P_f(\alpha)p(\alpha)d\alpha \quad (8)$$

Donde la medida de intensidad sísmica más apropiada dependerá de tipo de estructura. Ya que las curvas de fragilidad se definen como la probabilidad condicional de falla de una estructura, elemento o componente, dada una carga sísmica α . En estos modelos el daño no es necesariamente el colapso. Si el desempeño de la estructura o componente es descrito por una medida de daño DM , entonces el daño puede expresarse por medio de un umbral D_S . De acuerdo con esta definición, la falla ocurre cuando la demanda sísmica excede la capacidad límite definida. La expresión más general de las curvas de fragilidad como una función de probabilidad condicional se muestra en la ecuación (9) mientras que la forma típica que adopta la curva se muestra en la Figura 21:

$$P_f(\alpha) = P(DM > D_S | IM = \alpha) \quad (9)$$

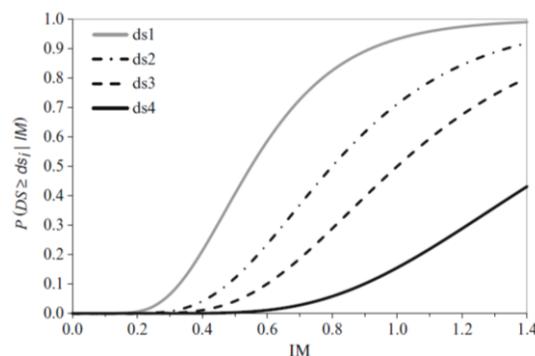


Figura 21. Forma típica de curvas de fragilidad, Rossetto et al. (2014)

En la práctica, las curvas de fragilidad generalmente se expresan como distribuciones logarítmicas normales. Por lo que se supone que la capacidad estructural tiene distribución log normal con la mediana de la desviación estándar A_m y desviación estándar β . Esto permite escribir las curvas de fragilidad como la función de distribución acumulativa:

$$P_f(\alpha) = \Phi\left(\frac{\ln\alpha - \ln A_m}{\beta}\right) \quad (10)$$

donde Φ es la función de distribución acumulativa estándar, y m_i y β son la mediana y la desviación estándar de la distribución logarítmica normal, respectivamente. Las curvas de fragilidad analíticas son generadas partiendo de elaboraciones estadísticas de distribuciones de daño que son simuladas en análisis de modelos estructurales bajo incrementos de cargas sísmicas. En estas metodologías el efecto de las condiciones del suelo y las características de los movimientos del terreno en la respuesta general de la estructura se toma en cuenta utilizando distintos perfiles de suelo y de registros sísmicos. Los modelos analíticos pueden agruparse en dos categorías: análisis no lineales y análisis dinámicos no lineales. Los primeros consisten en aplicar fuerzas a un modelo estructural que considera propiedades no lineales de los materiales, las fuerzas totales se presentan gráficamente con el desplazamiento de la estructura para definir la curva de capacidad. La capacidad estructural puede definirse utilizando un sistema equivalente de un grado de libertad. Mientras que la demanda sísmica normalmente se representa con una curva de demanda con la forma de los espectros de respuesta en términos de aceleraciones o desplazamientos. El segundo enfoque se basa en un modelo estructural más detallado que está sujeto a registros sísmicos. Este tipo de análisis suele requerir más tiempo, pero se acerca más a la realidad y permite observar el efecto de cada registro en la respuesta de la estructura. En la Figura 22 se muestra la relación entre las curvas de capacidad de una estructura y el espectro de demanda.

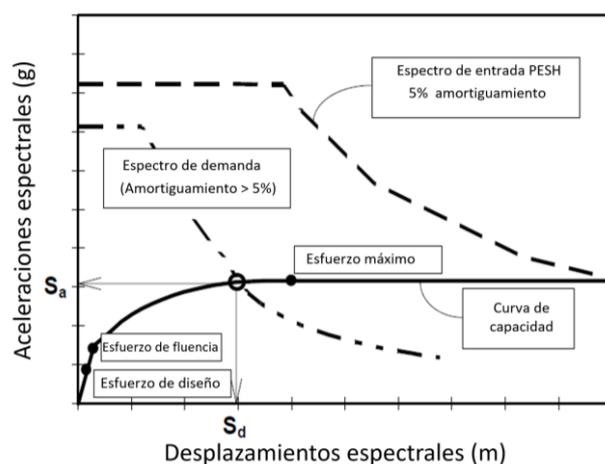


Figura 22. Relación entre las curvas de capacidad y el espectro de demanda de estructuras. Modificado de (NIBBS 2012)

2.2.3.1. Definición de funciones y estados de daño

Cada curva de fragilidad está definida por la media del parámetro de demanda, es decir, ya sea el desplazamiento espectral S_d , aceleración espectral S_a , la aceleración máxima del terreno PGA o el desplazamiento máximo del terreno PGD , que corresponde al umbral del estado de daño y por la variabilidad asociada con ese estado de daño. Los valores de desplazamiento y/o aceleración espectral medios y la variabilidad total se desarrollan para cada uno de los tipos de construcción de estados de daño de interés mediante modelos de desempeño, opiniones expertas o mediante la combinación de ambos. La respuesta en edificios es caracterizada a través de funciones llamadas curvas de capacidad, las cuales describen los desplazamientos obtenidos de análisis *pushover* en lo que se aplican cargas sísmicas laterales incrementales.

En la Figura 21 se ilustra la intersección de una curva de capacidad típica y un espectro de demanda típico (reducido para una amortiguación efectiva superior al 5% del crítico). Los puntos de diseño, rendimiento y capacidad máxima definen la forma de las curvas de capacidad de la estructura. La respuesta máxima del edificio (ya sea desplazamiento espectral o aceleración espectral) en el punto de intersección entre la curva de capacidad y el espectro de demanda es el parámetro que se utiliza en las curvas de fragilidad para estimar las probabilidades del estado de daño.

2.2.3.2. Definición de tipologías estructurales

El conjunto de estructuras o edificios para los cuales son aplicables las curvas de fragilidad deben ser clasificados de acuerdo con un conjunto de categorías o tipologías de edificios que indican las características estructurales y el comportamiento esperado bajo carga sísmica. En estudios regionales suelen utilizarse bases de datos basadas en clasificaciones previas oficiales o realizarse levantamientos con el fin de identificar las principales topologías de edificios. En la Figura 23 se muestran algunas curvas de fragilidad para diferentes tipologías de edificios de mampostería desarrolladas por Villar-Vega et al. (2017), basadas en tipologías propuestas por Yepes-Estrada et al. (2017), Figura 24.

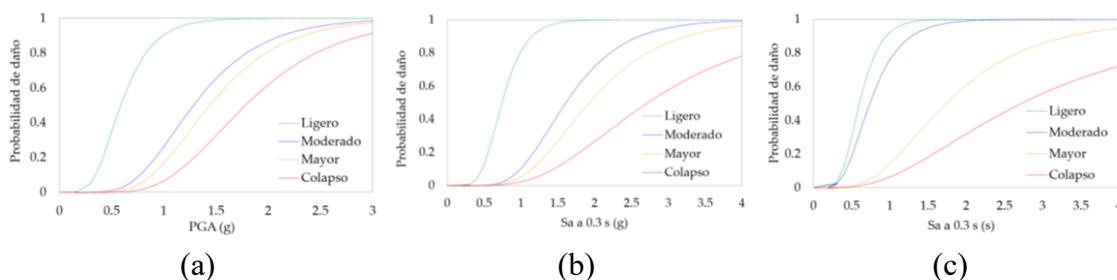


Figura 23. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería con confinamiento de (a) 1, (b) 2 y (c) 3 niveles, (Villar-Vega et al. 2017)



Figura 24. Edificio de mampostería con confinamiento típico de acuerdo con la clasificación de Yepes-Estrada et al. (2017)

2.3. Análisis dinámico de redes de transporte

Los modelos dinámicos de tráfico intentan replicar los fenómenos complejos que ocurren entre los componentes de oferta y demanda de transporte y sus interacciones para así simular el desempeño de las redes viales y de transporte público. La estructura genérica de estos modelos se presenta en la Figura 25. Como se observa, inicialmente los modelos de demanda estiman o predicen los patrones de viajes origen-destino y simulan el comportamiento individual de los conductores. Los modelos de oferta de transporte procesan los fenómenos de tráfico a través de la representación detallada de las capacidades de los elementos de la red, la dinámica del tráfico que resulta de las velocidades y aceleraciones, los cambios de carril y el impacto de incidentes y eventualidades. Actualmente existen diversos algoritmos que permiten ajustar las demandas y ofertas para asignar demandas dinámicas a la red y así determinar la propagación del flujo en distintos períodos de tiempo. Las condiciones de tráfico resultantes incluyendo velocidades, densidades, tiempos de viaje y demoras pueden ser utilizados para estudiar y gestionar de redes de transporte y movilidad.

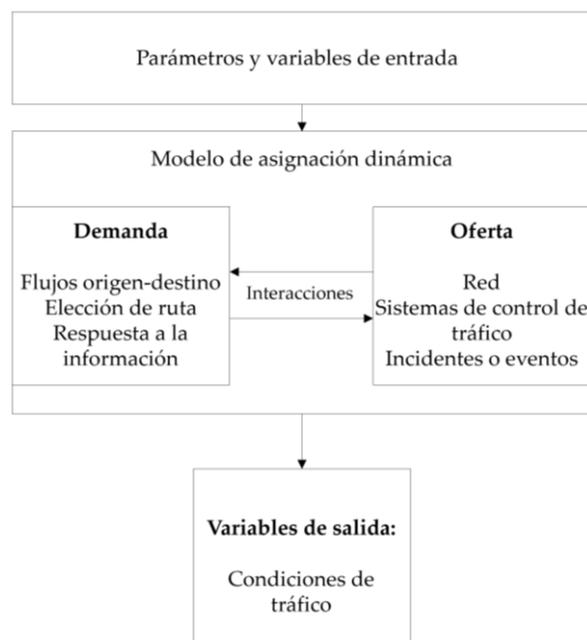


Figura 25. Estructura general de modelos de asignación dinámica de transporte

Los modelos de asignación dinámica de tráfico pueden clasificarse en tres grupos dadas las características y enfoques de modelado. El primer grupo reúne los desarrollos iniciales cuasi dinámicos que dividían el proceso de asignación en las fases pre incidente, incidente y post incidente y que resuelven el problema estático de equilibrio del usuario. Posteriormente los análisis subsecuentes, lograron modelos con mejores aproximaciones al resolver el problema por períodos de diez minutos. Algunos de estos modelos pueden encontrarse en (Leonard et al. 1978; Leonard et al. 1989; Hall et al. 1980; Vliet 1982). Las principales limitaciones de estos modelos son que asumen que la propagación de los viajes por intervalos es instantánea ignorando los impactos de las interacciones de los vehículos con la capacidad y la dinámica del tráfico.

Estas limitaciones llevaron al desarrollo de modelos dinámicos que pudieran capturar la interacción de los vehículos con las dinámicas del tráfico de manera directa o indirecta. Los modelos de asignación dinámica analíticos son esquemas que se enfocan en un objetivo específico empleando formulaciones matemáticas. Las soluciones pueden obtenerse a través de la aplicación de algoritmos tradicionales de optimización.

Los enfoques analíticos propuesto formulaciones matemáticas rigurosas de complejidad cada vez mayor, en un intento por cerrar la brecha entre las capacidades de los modelos y la realidad observada. Sin embargo, tales esfuerzos, han tenido éxito limitado en los resultados en redes pequeñas con suposiciones muy simplificadas sobre su comportamiento, mientras que no logran captar las características verdaderamente dinámicas que se manifiestan en el mundo real. Finalmente, los modelos basados en simulaciones son actualmente los que brindan mayores capacidades para estimar y predecir flujos OD, tiempos de viaje, retrasos y colas.

Los modelos de simulación de tráfico pueden clasificarse según su nivel de abstracción de los conductores y del comportamiento de conducción. Los modelos microscópicos representan a los conductores individualmente, sus decisiones e interacciones con un alto nivel de detalle. Las interacciones pueden incluir el seguimiento de automóviles, el cambio de carril y los movimientos que determinan indirectamente la capacidad de la red y el tráfico como un fenómeno dinámico. Los modelos macroscópicos tratan al tráfico como un flujo uniforme u homogéneo, y adaptan conceptos físicos (como dinámica de fluidos) para aproximar su propagación a través de la red. Dichos enfoques no pueden capturar elementos de comportamiento como la ruta y la elección del tiempo de salida, la respuesta a la información o las interacciones de los conductores con los vehículos contiguos. Los modelos mesoscópicos combinan algunos elementos de enfoques tanto microscópicos como macroscópicos, que representan a los conductores individuales y sus decisiones de viaje, pero reemplazan las interacciones de los vehículos con las relaciones de tráfico macroscópicas. Estas relaciones suelen reflejar las interrelaciones entre flujos, velocidades y densidades en los distintos enlaces de la red.

Dado el interés en modelar el tráfico dinámico para aplicaciones tanto de planeación como para la gestión de tráfico en tiempo real, se han desarrollado numerosos modelos de simulación. Algunos de los primeros modelos de simulación microscópica fueron

NETSIM, TRAF-NETSIM, INTRAS y FRESIM. Las herramientas macroscópicas también se han utilizado ampliamente para el modelado de redes y la optimización de sistemas de control, incluyendo TRANSYT, FREQ, FREFLO, KRONOS y CORQ. El modelo INTEGRATION, junto con las versiones posteriores de CONTRAM y SATURN.

La revisión de la literatura muestra algunas limitaciones de estos modelos, relacionadas con no considerar adecuadamente aspectos críticos como la replicación de patrones de congestión, el comportamiento del conductor en los segmentos de la red y la respuesta de los conductores a la información en tiempo real.

Finalmente, entre los modelos más recientes que incluyen la utilización de rutas alternativas entre pares OD, y el modelado de las percepciones de los conductores se encuentran los modelos microscópicos de CORSIM por Sysematics (2005), PARAMICS de Smith et al. (1995), AIMSUN2 de Barcelo y Casas (2002), MITSIMLab en (Yang y Koutsopoulos 1996; Yang et al. 2000), VISSIM en PTV (2006) y Trans-Modeler, por Ghobadi et al. (2012). Dichos modelos han sido aplicados en numerosos estudios en contextos de planeación y diseño de redes de transporte Abdulhai et al. (1999). Así mismo, entre los modelos de simulación macroscópica que permiten simular redes a gran escala destacan METANET de Papageorgiou et al. (2010), EMME/2 de INRO (2006), VISUM de PTV (2006) y CTM por Daganzo (1995).

Los modelos de tráfico y redes de transporte basados en simulaciones tienen el potencial de complementar los análisis de vulnerabilidad de redes de transporte ante eventos disruptivos, como es el caso de sismos de gran magnitud, que generen cambios en los patrones de viaje o interrupciones parciales o totales de vialidades debido a daños en edificios e infraestructura de la red de transporte.

2.4. Análisis de respuesta por sismo y tsunami en infraestructura de transporte

El término tsunami generalmente se refiere a cualquier ola de gravedad generada por un impulso. Los tsunamis pueden surgir de muchas fuentes diferentes, sin embargo, la mayoría de los grandes tsunamis se generan por el desplazamiento vertical del fondo del océano durante terremotos en las zonas de subducción. En una zona de subducción, una placa (típicamente una placa oceánica) desciende debajo de otra placa (típicamente continental). La tasa de movimiento de esta placa es del orden de centímetros por año. En la parte poco profunda de la zona de subducción, a profundidades inferiores a 40 km, las placas suelen estar pegadas entre sí y el borde de la placa superior se arrastra hacia abajo. El deslizamiento ocurrido durante un terremoto libera esta parte de la placa, lo que generalmente causa una deformación tanto hacia arriba como hacia abajo del fondo del océano, y por lo tanto de toda la columna de agua sobre él. El desplazamiento vertical puede ser de varios metros y puede extenderse por áreas de decenas de miles de kilómetros cuadrados. El desplazamiento de esta cantidad de agua por varios metros inyecta una enorme cantidad de energía potencial en el océano, esta energía propaga olas que tienden a causar daños principalmente en las cercanías, pero si el tsunami es lo suficientemente grande también puede provocar graves inundaciones y daños a miles de

kilómetros de distancia. Los tsunamis de largo alcance a menudo se denominan teletsunamis o tsunamis de campo lejano, para distinguirlos de los tsunamis locales que afectan solo a las regiones cercanas a la fuente.

Las fuerzas hidrodinámicas inducidas por las presiones y velocidades de los tsunamis son particularmente importantes, ya que ocurren generalmente alrededor de una estructura costera o un edificio y, como resultado, afectan su integridad, Chinnarasri et al. (2013). Dichas fuerzas están influenciadas por varios parámetros del fluido, como su densidad, velocidad y profundidad del flujo, así como por la geometría de la estructura. El enfoque más aceptado para modelar numéricamente la propagación tanto de tsunamis transoceánicos como de inundaciones a nivel local se basa en la aplicación de las ecuaciones de comportamiento de aguas poco profundas, (Yeh et al. 1994; Titov y Synolakis 1995 y 1998). Para el desarrollo de estos modelos uno de los aspectos más importantes es lograr representar la respuesta de la ola cuando se acerca a la costa. Dicho enfoque permite tomar en cuenta el comportamiento no lineal que rige el fenómeno, como la turbulencia con variabilidad espacial y temporal Klapp et al. (2020).

2.5. Simulación de propagación de tsunamis

El modelado numérico de la propagación transoceánica de tsunamis, junto con el modelado detallado de la inundación de regiones costeras a pequeña escala, conlleva diversos retos algorítmicos. La información sobre los parámetros físicos que caracterizan las olas suele ser limitada debido a las dificultades para lograr mediciones precisas en el momento del evento.

Modelar la propagación y la inundación de las olas de un tsunami requiere lograr una buena descripción del fenómeno físico en términos de ecuaciones matemáticas, así como métodos apropiados para resolver estas ecuaciones. Algunos enfoques para simular los fenómenos de propagación de la ola y la superficie inundable están basados ya sea en la resolución de las ecuaciones de aguas poco profundas, en la de las ecuaciones de Boussinesq o en las ecuaciones de Navier-Stokes. En cualquiera de los casos se requiere de la utilización de métodos numéricos adecuados que permitan encontrar soluciones o aproximaciones de sistemas hiperbólicos. Entre los métodos más utilizados están el método de diferencias finitas, métodos de Galerkin y el de volúmenes finitos.

2.5.1. Ecuaciones lineales y no lineales en aguas poco profundas

La teoría lineal y no lineal de aguas poco profundas se ha utilizado tradicionalmente en modelos de propagación y predicción de tsunamis. Este enfoque ha sido una aproximación exitosa del fenómeno, ya que hasta una profundidad del agua correspondiente a las regiones cercanas a la costa (cerca de los 50 m), las suposiciones de simplificación de esta aproximación a las ecuaciones generales del comportamiento de las olas están relativamente bien ajustados. En particular, se supone que la altura de las olas es pequeña en comparación con la profundidad media del agua H ($h \ll H$), y que la longitud de onda característica es grande en comparación con la profundidad del agua (H

« L). En tal régimen, las componentes verticales de la aceleración y la velocidad de las partículas de agua se desprecian mientras que las componentes horizontales son independientes de la profundidad del agua. Bajo estas suposiciones, se puede derivar el conjunto no lineal de ecuaciones de aguas someras Behrens y Días (2015), dado por:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}(H + h)) &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \nabla (gh) &= S(\mathbf{v}, h) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

donde h es la elevación de la superficie del mar (desviación de la superficie media del mar), H la profundidad media del océano, v la velocidad horizontal (de partículas) promediada en profundidad bidimensional, g la aceleración debida a la gravedad y S un término que comprende el coeficiente de Coriolis, la fricción del fondo, la viscosidad, etc.

Dado que la propagación de la ola en las profundidades del océano está básicamente representada por un comportamiento de onda de gravedad, las velocidades de las partículas son insignificantes y, por lo tanto, el término no lineal en la ecuación de momento puede despreciarse. Además, como $h \ll H$, la ecuación de continuidad se puede escribir como $\partial h / \partial t = -H \nabla \cdot \mathbf{v}$. Juntas, estas dos modificaciones forman las ecuaciones lineales de aguas poco profundas. Muchas implementaciones permiten resolver la ecuación lineal o no lineal establecida con solo un intercambio de parámetros.

Existen varios códigos computacionales que implementan el conjunto de ecuaciones (2.5), como MOST, Titov y González (1997), TUNAMI y NAMI-DANCE, ambos originados en la misma fuente Imamura et al. (2006), COMCOT, el modelo CornellMulti-Grid Coupled Tsunami, Wang (2009), y el código CEAsusedatCENALT, (Gailler et al. 2013; Hébert et al. 2006; Reymond et al. 2012). Estos métodos se basan en la discretización de las ecuaciones de aguas poco profundas en una malla de diferencias finitas. En otros modelos, las alternativas de malla más flexibles se implementan mediante discretizaciones de elementos finitos, como en SELFE, Zhang y Baptista (2008) y TsunAWI, Harig et al. (2008).

Por otro lado, los esquemas de discretización de volumen finito han mostrado robustez, flexibilidad y aplicabilidad a los sistemas hiperbólicos subyacentes de ecuaciones diferenciales parciales en códigos como VOLNA Dutykh et al. (2011) y en la implementación del modelo usando una malla adaptativa en el código GeoClaw, George y Le Veque (2006). Específicamente, el código VOLNA combina técnicas numéricas modernas para sistemas hiperbólicos con diseño orientado a aplicaciones del mundo real. Se puede ejecutar de manera eficiente en entornos realistas y utiliza mallas no estructuradas. Para mayor eficiencia, el código se ha adaptado recientemente a arquitecturas de unidades de procesamiento de gráficos (GPU). Le Veque et al. (2011) presentan una buena revisión sobre el método de volúmenes finitos y la implementación de refinamiento de la malla adaptativa. Un código de investigación adicional basado en los métodos de Galerkin (continuos y discontinuos) es el código TsunaFlash o TAM, Pranowo et al. (2008). Comprende el refinamiento de la malla triangular basada en árboles

y actualmente se sigue desarrollando en el marco del proyecto ASCETE, Vater y Behrens (2014).

2.5.2. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos se basa en la forma continua del sistema de ecuaciones para lograr la discretización del sistema de ecuaciones (2.6):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) = S(\mathbf{U}) \text{ en } \Omega \times T \quad (12)$$

Donde \mathbf{U} es el vector balanceado $T \subset R$ es el intervalo de tiempo y $\Omega \subset R^d$ es el dominio del modelo espacial de d dimensiones, F es la función de flujo continuo y S es la función de las fuentes. Computacionalmente el dominio Ω se aproxima a una fracción de volúmenes finitos desagregados τ_e , $e = 1: M$. De esta manera el movimiento del flujo puede escribirse como flujos continuos en las caras de cada volumen τ_e . Las celdas referentes a variables de conservación (masa y energía) se balancean a través de los flujos en las caras de las celdas.

$$Q_{\tau_e}(t + \Delta t) = Q_{\tau_e}(t) + \nu \cdot \sum_{f \in \partial \tau_e} F_f(t) \quad (13)$$

Donde $Q_{\tau_e}(t) \approx (1/|\tau_e|) \int \mathbf{U}(x, t) dx$ es una aproximación discretizada a la celda promedio de U ; el término $F_f(t) \approx (1/\Delta t) \int_t^{t+\Delta t} (1/|f|) \int_f \mathbf{F} ds dt$ es una aproximación de la integración del flujo respecto al tiempo en la cara f ; y $|\tau_e|$, Δt y $|f|$ son la relación volumen/área de la celda τ_e , la longitud del intervalo de tiempo y la relación área/longitud de la cara respectivamente; ν es un factor de escala.

Las implementaciones más recientes del método de volúmenes finitos incluyen los códigos VOLNA, Dutykh et al. (2011) y el modelo con refinamiento de malla adaptativa GeoClaw, Berger et al. (2011).

2.6. Comentarios

Los modelos presentados forman parte del nuevo esquema multivariable propuesto en este trabajo, para la evaluación de vulnerabilidad sísmica de redes de transporte en zonas urbanas. Como se ha expuesto en este capítulo, los enfoques comúnmente utilizados dividen la vulnerabilidad de la infraestructura de transporte en aquella ocasionada por el riesgo sísmico de la zona y la fragilidad de las estructuras que conforman la infraestructura de transporte; y en la derivada de la configuración topológica de las redes y su interacción con la demanda de viajes. Esta división proporciona una captura limitada del comportamiento de las redes de tráfico y movilidad en zonas urbanas densamente pobladas, en las cuales tanto la respuesta estructural como el comportamiento esperado de la demanda, es decir los usuarios, en la red contribuyen en la capacidad o eficiencia con la que el sistema operará en las etapas posteriores a un evento sísmico de gran magnitud. La combinación de dichos enfoques, tradicionalmente estudiados de manera segregada, en un marco metodológico integral es aplicada en esta investigación con el

objetivo de considerar las distintas variables e incertidumbres, contribuyen en la formación de la vulnerabilidad total de los sistemas de transporte. Así mismo, esta aproximación permite investigar las relaciones entre las variables sísmicas asociadas al fenómeno, como las aceleraciones y desplazamientos en el terreno, con las variables de comportamiento de tráfico, como los volúmenes de tráfico y tiempos de desplazamientos en los distintos elementos de las redes.

Capítulo 3 CASO DE ESTUDIO 1: SISMOS NORMALES Y DE SUBDUCCIÓN, CIUDAD DE MÉXICO

3.1. Introducción

La Ciudad de México y su área metropolitana, con más de 22 millones de habitantes, es el núcleo de una de las regiones urbanas más densamente pobladas del mundo, con alrededor de 6000 habitantes por km². Ubicada en la cuenca de dos antiguos lagos, la ciudad es vulnerable a sismos de subducción que se originan en el suroeste del Pacífico mexicano y a sismos por mecanismos de falla normal, originados dentro del continente. Adicionalmente, las condiciones del suelo generan patrones irregulares de propagación de ondas sísmicas en algunas áreas. Los fenómenos de amplificación de las ondas asociados con la arcilla de alta plasticidad que se encuentra en estos antiguos lagos también son una amenaza para los edificios de la ciudad y sus alrededores, así como para la infraestructura estratégica como las redes de transporte y movilidad. Ante sismos extremos, existe una alta probabilidad de que se produzcan interrupciones en la infraestructura de transporte. A pesar de las sólidas redes de transporte público y vialidades, la región es una de las más congestionadas del mundo. Se estima que todos los días se realizan alrededor de 18 millones de viajes dentro del área metropolitana de la Ciudad de México con un tiempo de desplazamiento promedio de 1.5 h, utilizando tanto transporte público como modos de transporte privados INEGI (2018). Un área en el sur de la Ciudad de México se utilizó como caso estudio para la aplicación de la metodología de esta investigación.

3.2. Caracterización de la zona de estudio

El área de estudio se ubica al sur de la Ciudad de México, está limitada al sur y al poniente por la autopista Periférico Sur, al norte por Circuito Interior, y al oriente por las vialidades Canal Nacional y Av. Tláhuac. La densidad de población es de 6000 hab/km² en promedio. En ella se encuentran 182 km de vialidades principales, 12 estaciones de Metro, 18 estaciones de Metrobús, 18 tramos de puentes y 5 tramos de pasos a desnivel. Dentro del área de estudio se localizan principalmente usos de suelo residenciales y comerciales, así como escuelas, estadios de fútbol y la Ciudad Universitaria más grande del país. Desde el punto de vista geotécnico, la zona se extiende en las tres zonas sísmicas de la ciudad: Zona de Lomas (Zona I), Zona de Transición (Zona III) y Zona de Lago (Zona IIIa, Zona IIIb y Zona IIIc), Figura 26.

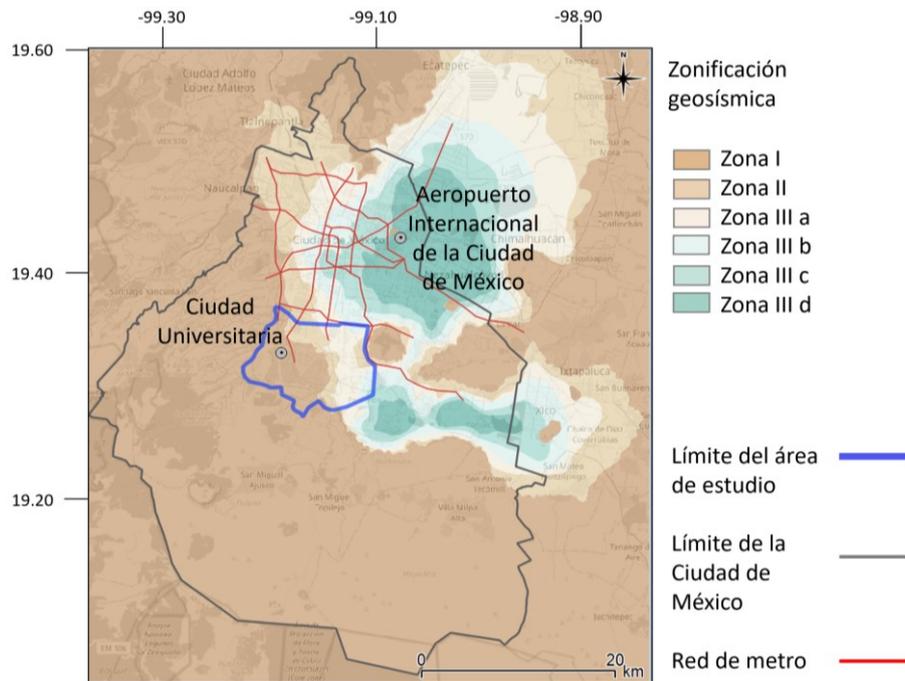


Figura 26. Localización de la zona de estudio y zonificación geo sísmica en la Ciudad de México

3.2.1. Ambiente sísmico

La Ciudad de México se ubica en una región propensa a sismos de gran magnitud e intensidad. Las principales fuentes sísmicas que la afectan pueden clasificarse en cuatro grupos, Rosenblueth et al. (1987), Figura 27: (1) Sismos locales ($M_w \leq 5.5$), originados dentro o cerca de la cuenca; (2) Sismos tipo Acambay ($M_w \leq 7.0$), que se originan en el resto de la placa de Norteamérica; (3) Sismos de profundidad intermedia de falla normal, causados por rompimientos de la placa de Cocos ya subducida, pudiendo llegar hasta $M_w = 7.5$ debajo del Valle de México; y (4) Sismos de subducción ($M_w \leq 8.6$).

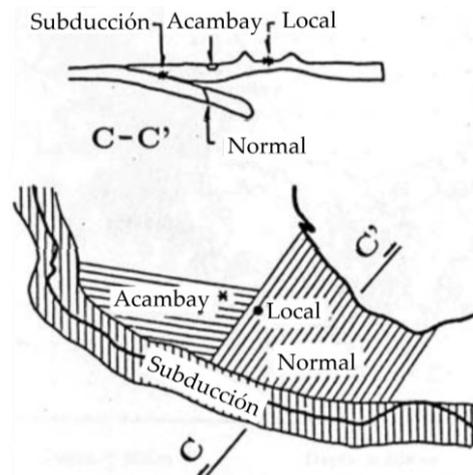


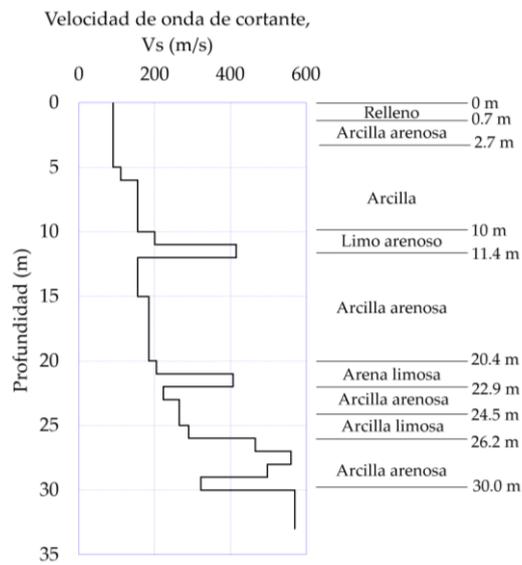
Figura 27. Fuentes sísmicas que afectan la Ciudad de México. Modificado de Rosenblueth et al. (1987)

Históricamente, los sismos de subducción y de falla normal han sido los que han causado el mayor daño a las estructuras. La magnitud máxima registrada desde 1800 es $M_w = 8.4$ durante el terremoto de Jalisco, sin embargo, los eventos de las costas de Guerrero y Michoacán son los que han producido los movimientos más violentos en el valle, como el devastador terremoto de Michoacán de 1985. Asimismo, se pueden esperar daños significativos causados por sismos de falla normal como el evento de Ciudad de México-Puebla de 2017.

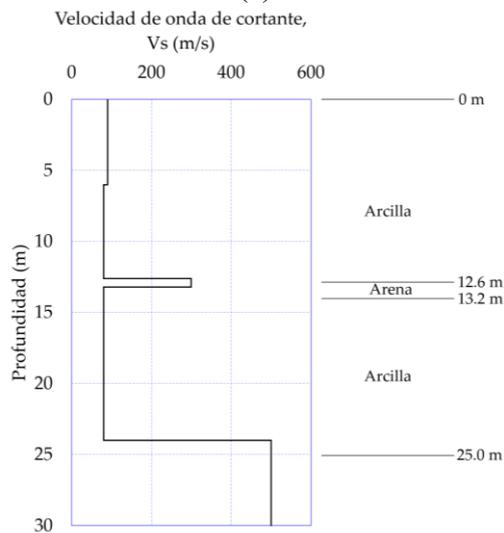
3.2.2. Características del suelo

Desde el evento de 1985, las condiciones del subsuelo han sido objeto de varios estudios y proyectos de investigación en la Ciudad de México y, por lo tanto, están razonablemente bien documentadas. La ciudad está ubicada en el sitio de dos antiguos lagos, drenados desde 1530: Lagos Xochimilco-Chalco y Texcoco. La parte occidental de la ciudad está construida sobre rocas y depósitos de suelo duro, mientras que la parte al oriente se encuentra sobre capas blandas de arcilla, Mayoral et al. (2019a). Las arcillas de alta plasticidad bajo la Ciudad de México exhiben una respuesta casi elástica para deformaciones cortantes medianas a grandes, lo que puede conducir a una alta amplificación de las ondas sísmicas.

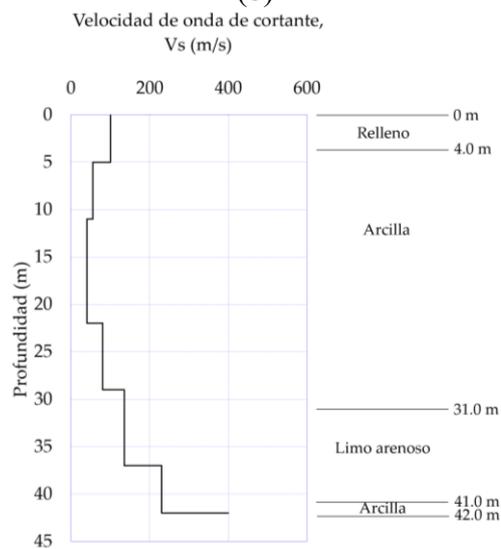
Como se muestra en la Figura 26, la zona de estudio incluye tres zonas geosísmicas de acuerdo con el código de construcción de la Ciudad de México, RCDF (2004). En la Zona I (Lomas), conformada principalmente por suelos firmes y rocas; en la Zona II (Transición), con depósitos de arena limosa y capas de limo arenoso, de hasta 20 m de profundidad, que suelen combinarse con capas de arcilla lacustre; la Zona III (Lago) en la que se encuentran depósitos que contienen arcilla altamente compresible, intercalados por capas arenosas de contenido variable de limo o arcilla. En la Zona del Lago, la profundidad de los depósitos de arcilla aumenta desde las zonas de lomas hacia el centro de los antiguos lagos, por lo que la Zona III se subdivide en IIIa, IIIb, IIIc y IIId, ver Figura 26. El área se caracterizó utilizando perfiles de suelo genéricos, que corresponden a la estratigrafía del suelo representativa para cada zona estudiada, y que fueron derivados de exploraciones de campo y reportados en (Mayoral et al. 2019a; Seed 1988; Romo 1995) Figura 28.



(a)



(b)



(c)

Figura 28. Características del perfil de suelo, (a) Zona II, (b) Zona IIIa; and (c) Zona IIIb.

3.2.3. Patrones de viaje

La caracterización de la demanda de viajes en la zona de estudio se realizó a partir de la encuesta origen destino en hogares de 2017 de la Ciudad de México, INEGI (2018). Con ello se determinaron los patrones de viaje predominantes entre semana en el área, así como parámetros de comportamiento de la demanda necesarios para el modelo de tráfico, como la distribución modal. Adicionalmente se realizaron conteos de tráfico y grabaciones de video con drones en algunos segmentos e intersecciones dentro del área de estudio, lo que permitió estimar los volúmenes, velocidades y tiempos de desplazamiento en dichos segmentos.

Se identificaron tres horas punta de demanda de viajes en la Ciudad de México, 7:15-8:14, 12:30-13:29 y 18:45-19:44 h, siendo el primer período el de mayor número de viajes, Figura 29. Además, la distribución modal durante la hora punta matutina se reparte en un 37% en transporte público, 27% en transporte privado y 36% a pie y en bicicleta. En particular los viajes realizados en transporte público se reparten en autobuses en un 70%, metro 20%, taxi 8% y otros modos 2%, como autobús de tránsito rápido, BRT y tren ligero. El 70% de los viajes en transporte público que se realizan en autobús, se ejecutan utilizando flotas de vehículos de baja capacidad que no tienen un esquema de operación regular, es decir sin horarios o frecuencias fijos. Estos servicios, operan con algunas paradas bien establecidas y otras sin alguna regulación. Dado que al momento de la realización de este trabajo no existía una base de datos oficial sobre los derroteros y frecuencias de este tipo de servicio, la presencia de minibuses y vehículos de transporte público de baja capacidad en la red vial, se tomó en cuenta considerando un número proporcional de vehículos como parte del flujo de tráfico, con una ocupación según un porcentaje correspondiente de viajes.

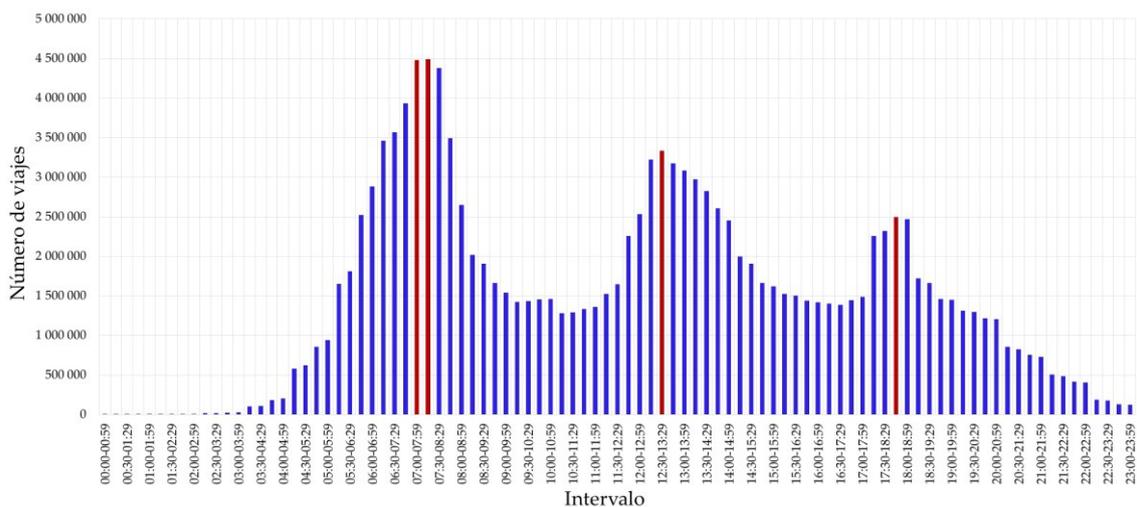


Figura 29. Distribución de viajes durante el día en la Zona Metropolitana del Valle de México, las barras en rojo indican las horas de máxima demanda de viajes.

La Encuesta Origen Destino utilizada divide el área metropolitana en 300 distritos, de los cuales 11 están dentro del área de estudio y 12 son distritos colindantes. Dichos

distritos, así como un resumen de los viajes generados en un día entre semana, se presentan en la Tabla 8 y la Figura 30.

Tabla 8. Generación de viajes diarios dentro del área de estudio

Distrito	Viajes como origen	Viajes como destino	Viajes internos	Total de viajes en el distrito
13	209 018	208 640	63 312	118 560
14	221 118	223 193	37 333	108 104
15	371 644	372 454	79 297	179 949
40	179 418	179 220	60 058	103 558
41	165 589	164 890	53 827	100 849
42	158 643	159 804	54 820	97 547
43	208 544	206 366	72 299	146 760
44	238 532	240 120	67 607	166 570
45	196 707	197 915	53 908	137 205
46	209 063	207 641	53 486	136 805
47	309 963	312 510	54 801	181 022
48	161 936	162 082	50 639	116 839
49	220 028	216 329	92 410	172 827
50	101 628	102 759	13 618	67 512
51	303 680	303 179	24 900	148 546
52	198 585	197 376	70 102	130 030
53	172 471	171 375	57 050	107 809
55	155 574	155 194	55 910	82 828
63	173 083	171 843	58 477	108 979
64	240 915	242 425	57 513	163 182
66	168 983	167 679	60 731	133 397
68	178 227	17 7 680	61 121	126 804
69	200 815	199 473	73 281	116 652
Total				2 952 334

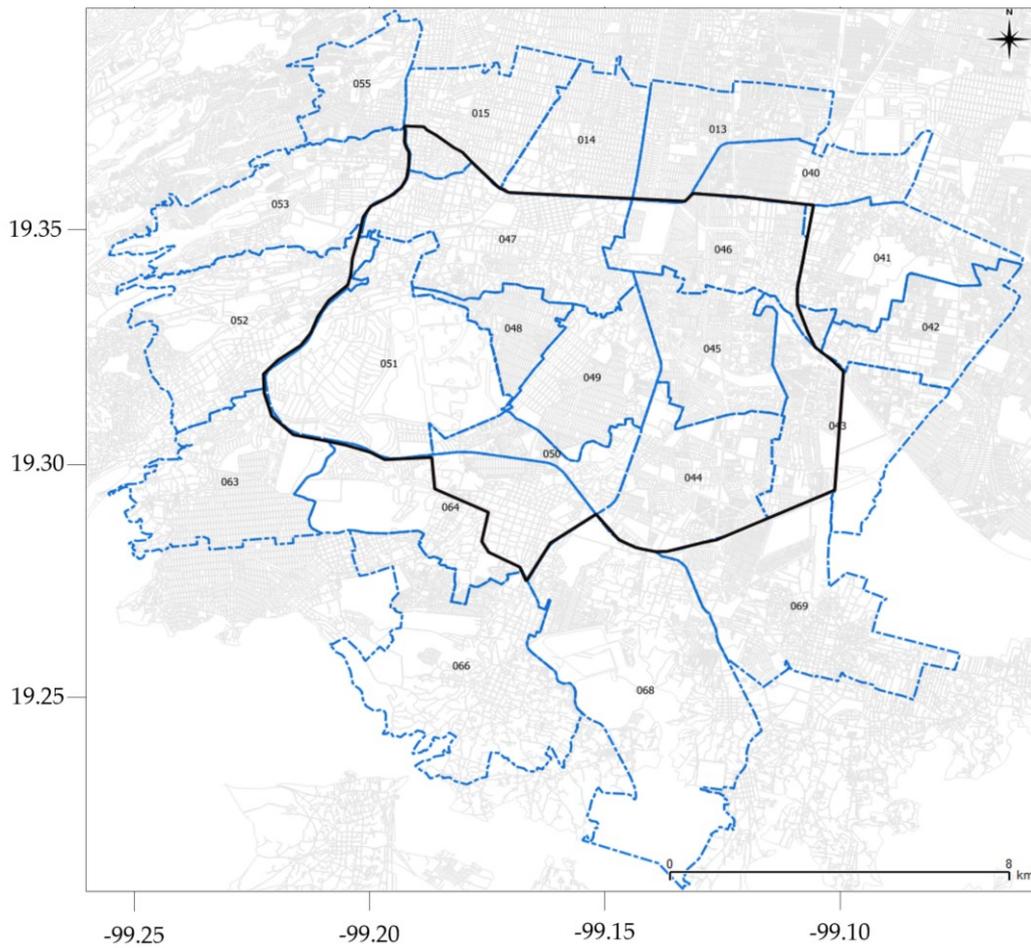


Figura 30. Distritos considerados en el estudio, basados en la encuesta OD, INEGI (2018).

La proporción de viajes durante la hora punta más desfavorable (7:15 – 8:14 am) se presenta en forma de una matriz OD, Figura 31. En esta matriz se agregaron los viajes generados desde el resto de los distritos que tiene como destino a los distritos dentro o en el límite de zona de estudio.

id	DESTINO																											
	13	14	15	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	55	63	64	66	68	69					
13	18,845	10,501	13,394	7,478	1,109	1,090	600	2,003	1,101	2,898	2,063	1,536	155	338	2,241	567	886	3,443	513	385	0	392	569					
14	2,553	16,452	9,231	780	653	90	314	721	330	798	2,317	135	327	293	2,254	0	673	4,083	242	802	117	0	0					
15	1,953	8,434	39,674	2,142	198	0	194	428	0	277	4,524	163	0	302	3,370	615	3,373	9,933	154	465	0	0	0					
40	4,829	5,141	5,507	19,187	4,046	1,032	383	841	600	2,106	544	340	107	77	1,406	89	625	2,872	0	188	0	75	432					
41	4,877	7,026	5,268	4,835	12,543	5,784	2,453	1,046	1,341	6,643	800	477	417	276	1,740	387	516	2,840	117	382	0	86	344					
42	2,971	7,372	7,649	3,650	6,619	18,094	3,109	1,425	1,615	2,577	2,095	667	124	0	1,191	254	1,130	3,471	553	2,079	337	759	362					
43	4,404	6,745	6,198	2,423	1,951	2,274	15,999	5,303	7,773	3,639	2,180	1,174	881	1,023	3,249	130	777	4,607	467	1,600	260	719	449					
44	2,126	3,301	8,860	1,266	1,182	467	3,351	15,197	3,291	1,248	2,568	856	432	468	2,653	470	404	4,960	968	2,383	187	1,024	1,986					
45	1,867	4,953	8,081	1,627	1,784	1,019	1,735	3,551	10,572	4,398	3,963	860	791	227	3,665	0	1,250	3,926	114	1,631	123	435	85					
46	2,806	7,509	7,195	2,883	1,521	1,340	2,504	1,269	4,010	13,571	2,796	297	296	291	1,701	227	1,094	3,725	0	343	0	205	281					
47	2,331	5,923	9,770	1,205	516	276	116	729	302	762	14,084	1,762	1,107	978	9,474	1,460	1,964	5,979	441	1,500	392	207	0					
48	1,242	5,747	7,213	1,997	831	168	493	1,541	945	1,060	8,952	14,345	5,373	2,904	4,055	293	585	2,900	562	1,607	207	655	718					
49	1,794	4,197	3,560	920	759	558	1,123	4,435	1,825	2,076	7,006	2,201	16,454	4,263	6,859	445	992	2,721	240	2,841	576	691	495					
50	505	2,791	2,366	172	55	0	248	1,180	489	261	968	41	1,190	3,225	3,491	231	149	1,212	93	1,284	246	362	41					
51	390	1,098	3,748	402	185	103	130	613	67	0	1,974	351	68	320	10,318	1,070	1,272	2,627	739	1,187	83	277	260					
52	870	3,113	10,492	204	220	214	116	730	229	585	4,724	899	210	625	10,923	19,561	3,603	5,979	2,944	242	284	0	118					
53	1,058	4,046	12,888	669	554	0	0	1,109	282	134	4,026	268	63	226	3,650	2,446	18,772	12,560	724	1,107	0	137	104					
55	1,948	4,780	11,670	397	539	0	0	77	229	514	1,494	535	0	0	2,944	570	4,874	31,252	232	1,180	123	56	104					
63	729	2,840	6,996	561	108	210	765	704	760	441	2,547	1,018	699	941	9,696	3,445	809	3,385	17,260	6,971	367	170	477					
64	1,579	2,831	6,743	249	407	216	527	2,880	287	616	2,973	821	1,099	2,380	4,057	821	1,499	18,970	725	16,363	2,877	823	206					
66	620	4,383	6,194	525	234	108	1,071	3,294	486	128	2,469	1,417	1,022	2,366	6,926	509	1,194	2,980	1,323	17,275	16,510	3,564	255					
68	1,577	3,369	6,003	482	711	107	814	3,718	1,413	1,168	1,194	570	1,350	2,146	5,626	555	1,025	1,886	404	6,017	2,985	17,642	4,675					
69	1,155	4,016	2,775	998	763	867	2,042	4,382	1,218	627	876	199	879	1,595	3,471	527	439	2,057	422	1,487	594	5,028	22,407					

Figura 31. Matriz OD en la zona de estudio para la hora punta 7:15 – 8:14 am, INEGI (2018).

3.3. Caracterización de la infraestructura en zona de estudio

El conjunto de edificios localizados en la zona de estudio es una combinación de estructuras residenciales y comerciales que varían de 1 a 37 pisos. Los edificios de 1 a 3 pisos, que corresponden al 91.5%, son en su mayoría estructuras de mampostería reforzada, mientras que los edificios de 4 a 10 pisos, el 8%, son en su mayoría construidos con muros de concreto reforzado. El material utilizado en edificios de 11 pisos y más, el 0.5%, consiste principalmente en marcos de concreto reforzado o una mezcla de acero y concreto armado. En total, se consideraron 45,500 edificios, que luego se agruparon en 2,180 cuadras, de acuerdo con el criterio de agrupamiento del último censo de población y vivienda.

A partir de trabajos de levantamiento en campo se identificó la infraestructura de transporte urbano en la zona, como se muestra en las Figuras 32 y 33. A partir de dichos trabajos, se identificaron 48 puentes urbanos, 5 túneles y 148 km de vías urbanas, así como 18 estaciones de Metrobús o BRT, 12 estaciones de metro, 10 estaciones de tren ligero, 14,5 km de vías de metro y 9 km de vías de tren ligero. Los edificios y la infraestructura que se encuentran en esta área se clasificaron e integraron en un sistema de información geográfica utilizando las tipologías presentadas en la Tabla 9.



Figura 32. Trabajo de campo realizado para la caracterización de puentes en el área de estudio

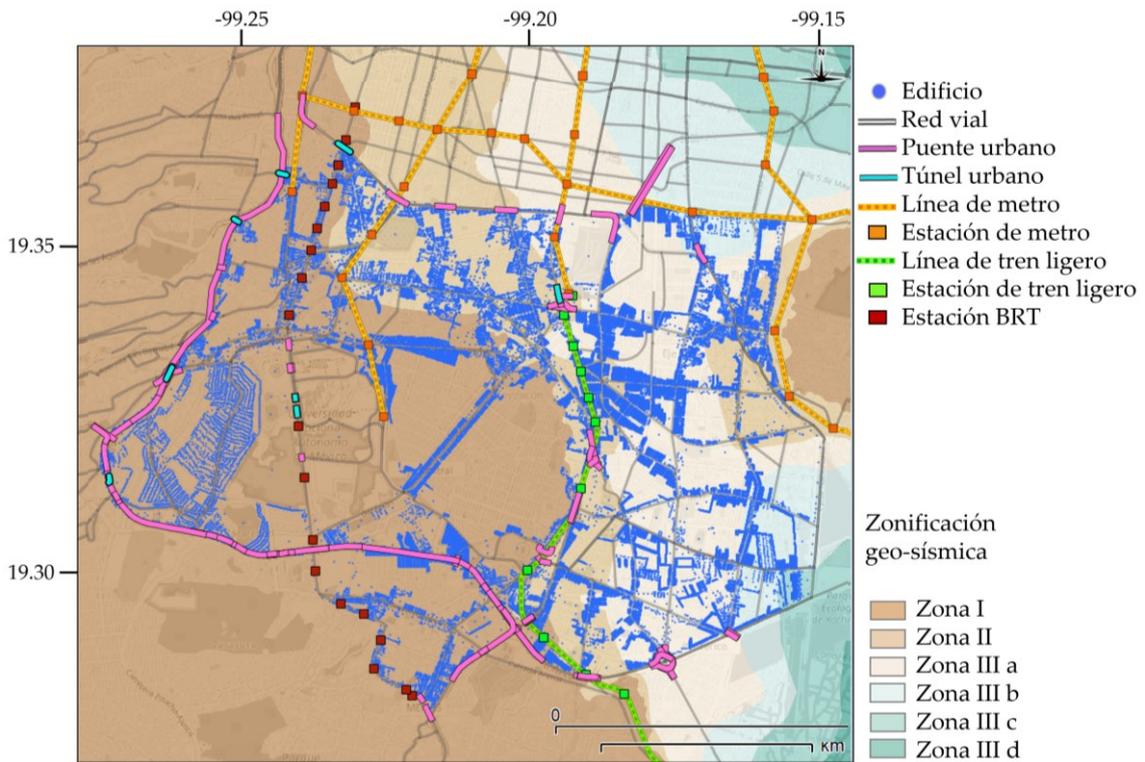


Figura 33. Edificios e infraestructura de transporte en la zona de estudio

Tabla 9. Tipologías de edificios e infraestructura de transporte

	Clasificación	Abreviatura	Descripción
Edificios	Edificio de mampostería de 1 piso	1 MB	Mampostería con confinamiento
	Edificio de mampostería de 2 pisos	2 MB	Mampostería con confinamiento
	Edificio de mampostería de 3 pisos	3 MB	Mampostería con confinamiento
	Edificio de marcos de concreto de 4 pisos	4 CB	Concreto reforzado, comportamiento dúctil
	Edificio de marcos de concreto de 5 pisos	5 CB	Concreto reforzado, comportamiento dúctil
	Edificio de marcos de concreto de 6 pisos	6 CB	Concreto reforzado, comportamiento dúctil
	Edificio de marcos de concreto de 7 pisos	7 CB	Concreto reforzado, comportamiento dúctil
	Edificio de muros de concreto de 8 pisos	8 CB	Concreto reforzado
	Edificio de muros de concreto de 9 pisos	9 CB	Concreto reforzado
	Edificio de concreto de 10 pisos	10 CB	Concreto reforzado
Infraestructura de transporte	Puentes con un solo claro	SP B	Todos los puentes con un solo claro
	Puentes de concreto, apoyo con columnas múltiples, simplemente apoyado, con diseño por sismo.	CSS B	Losa de concreto, vigas múltiples en cajón.
	Puentes de concreto, continuos, una columna, vigas tipo cajón, diseño por sismo.	CCSC B	De concreto con vigas tipo cajón.
	Puentes de concreto, continuos, diseño por sismo.	CC1 B	Losa de concreto, vigas múltiples en cajón.
	Puentes de acero, apoyos con columnas múltiples, simplemente apoyado, diseño por sismo	SSS B	Losa de acero, vigas múltiples en cajón.
	Puentes de concreto pre esforzado, apoyo con columnas múltiples, simplemente apoyado, diseño por sismo	PS SS B	Losa de concreto pre esforzado, vigas múltiples en cajón.
	Puentes de concreto pre esforzado, columna única, vigas tipo cajón, diseño sísmico	PS B	Vigas en cajón de concreto pre esforzado.
	Puentes de concreto, continuos, diseño por sismo	CC2 B	Losa de concreto, vigas múltiples en cajón.
	Túnel excavado	BD T	Túnel excavado
	Paso a desnivel	CC T	Paso a desnivel
Estación de metro	MS	Edificios de 2 a 3, muros de concreto	

Vías de metro y tren ligero	MT	reforzados, comportamiento dúctil.
Avenidas	MR	Terraplén
Autopistas urbanas	UR	Hasta 2 carriles
		Más de 2 carriles

3.4. Peligro sísmico

La sismicidad de la zona se caracterizó con información utilizada por Reyes (1999) y Zúñiga (1996), que contiene sismos superficiales registrados de 1900 a 1995 con magnitudes M_w a partir de 4.5. El trabajo de Reyes corroborara los datos del catálogo base con el catálogo publicado por Singh et al. (1984), estableciéndose que este catálogo cumple las características de un catálogo completo para magnitudes iguales o mayores que siete de 1900 a 1995, para magnitudes iguales o mayores que seis de 1955 a 1995, y para magnitudes iguales o mayores que 4.5 de 1965 a 1995. Además, se tomaron en cuenta actualizaciones del Instituto de Ingeniería sobre el sismo del 2017. En la Figura 34 se presentan las zonas sismo génicas estudiadas y en las Tablas 10 y 11 se presentan los parámetros correspondientes.

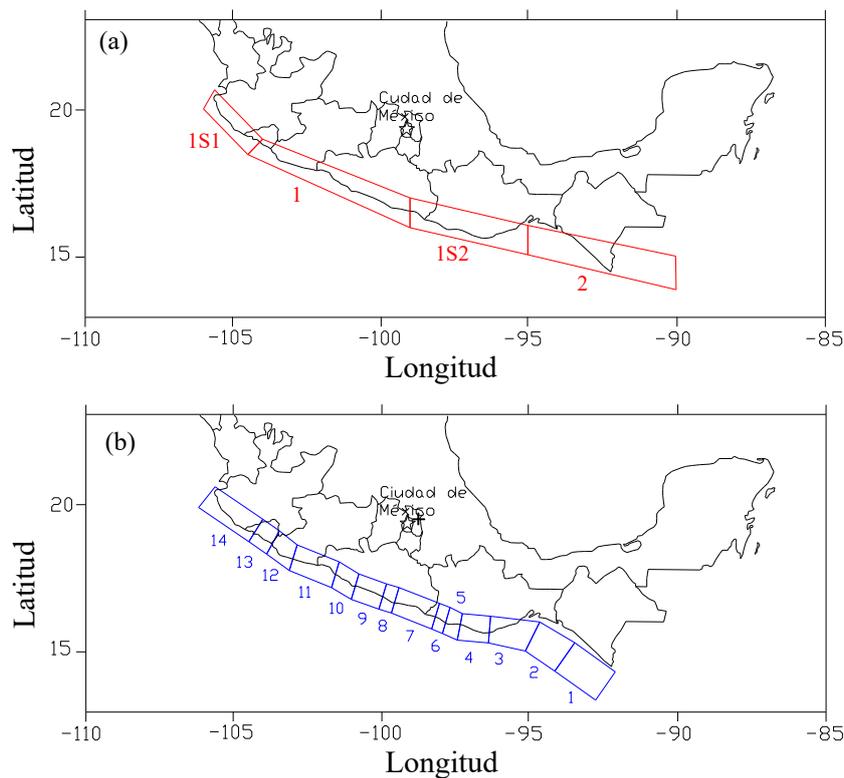


Figura 34. Zonas sismogénicas estudiadas (a) sismos de pequeña a moderada intensidad, (b) sismos característicos

Tabla 10. Parámetros para las fuentes sísmicas que generan eventos pequeños y moderados, en todos los casos $M_0 = 4.5$ y $M_u = 7.0$, Ordaz y Reyes (1999)

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

Tabla 11, Parámetros de zonas de ocurrencia de sismos característicos con $M > 7.0$, Ordaz y Reyes (1999)

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

Se adopta el modelo de recurrencia para sismos característicos propuesto por Ordaz y Reyes (1999), en el cual se asume que el comportamiento de los sismos característicos observados por muchos años por Singh et al. (1983) en la zona de subducción mexicana tiene una distribución Gaussiana, y está definida para cada fuente, con la siguiente expresión:

$$\lambda(M) = \lambda(7) \left[1 - \Phi \left(\frac{M - EM}{\sigma_M} \right) \right], \text{ si } M > 7 \quad (14)$$

Donde, $\lambda(7)$ es la tasa de excedencia para $M > 7$, EM y σ_M son, respectivamente, la media y la desviación estándar de la magnitud, y $\Phi()$ es la función de distribución acumulativa normal.

La sismicidad de las zonas sismo génicas se modela con la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter modificada, para definir la tasa de excedencia de sismos con magnitudes mayores que 4.5 y menores que 7. En tanto que, para definir la tasa de excedencia de sismos con magnitudes mayores que 7, se utiliza la ley de recurrencia definida en la expresión 3.1, correspondiente a sismos característicos. Los parámetros que definen la sismicidad de las zonas sismo génicas estudiadas para el modelo Gutenberg-Richter modificado, se presentan en la Tabla 10. Asimismo, en la Tabla 11 se muestran los parámetros que definen la sismicidad de las zonas sismo génicas estudiadas para el modelo de sismos característicos.

3.4.1. Leyes de atenuación para sismos de subducción

A continuación, se empleó la ley de atenuación propuesta por Reyes (1999), la cual permite estimar la aceleración espectral, Sa , en la zona de lomas de la Ciudad de México, Ciudad Universitaria (CU), y tiene la siguiente forma funcional:

$$\ln y(T) = \ln Sa(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)(M - 6) + \alpha_3(T)(M - 6)^2 + \alpha_4(T) \ln R + \alpha_5(T)R + \varepsilon(T) \quad (15)$$

donde y representa la aceleración máxima del terreno en alguna de las direcciones ortogonales, o su media geométrica, MG , en cm/s^2 ; Mw la magnitud de momento sísmico; R la distancia mínima al área de ruptura, en km; α_i son coeficientes presentados en Reyes (1999)

3.4.2. Leyes de atenuación para sismos normales

De acuerdo con Rosenbleuth et al. (1989) para sismos de tipo normal los parámetros para obtener los modelos de predicción de movimiento del suelo se pueden obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$A(\omega) = C M_0 S(\omega, \omega C) P(\omega, \omega_m) \exp(-\omega R / 2Q\beta) / R \quad (16)$$

donde C es una constante que depende del patrón de radiación en campo libre. M_0 es el momento sísmico en ergs; $S(\omega, \omega C)$ es el espectro de la fuente (Aki, 1968; Brune, 1970); ωC es la frecuencia $2\pi f_c$; $f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3}$; β es la velocidad de onda de cortante (km/s); $\Delta\sigma$ gradiente del esfuerzo; $P(\omega, \omega_m)$ es un filtro de altas frecuencias; $\omega_m = 2\pi f_m$; f_m es la frecuencia máxima; R es la distancia focal, Q es un factor que controla la atenuación. Los parámetros adoptados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros para el espectro de Fourier

Evento	Mw	R	M0	fc	$\Delta\sigma$	P	B	Te
Normal	6.5	80	7.0x10 ²⁵	0.22	200	3.1	3.2	30

En todos los casos $C=3.74$, $Q=200$, $f_m=8$ Hz

Siguiendo las metodologías antes descritas para sismos de subducción y normales, se obtuvieron espectros de peligro uniforme para períodos de retorno de 125, 250, 475 y 2475 años para un sitio con afloramiento en roca en Ciudad Universitaria, Figura 35.

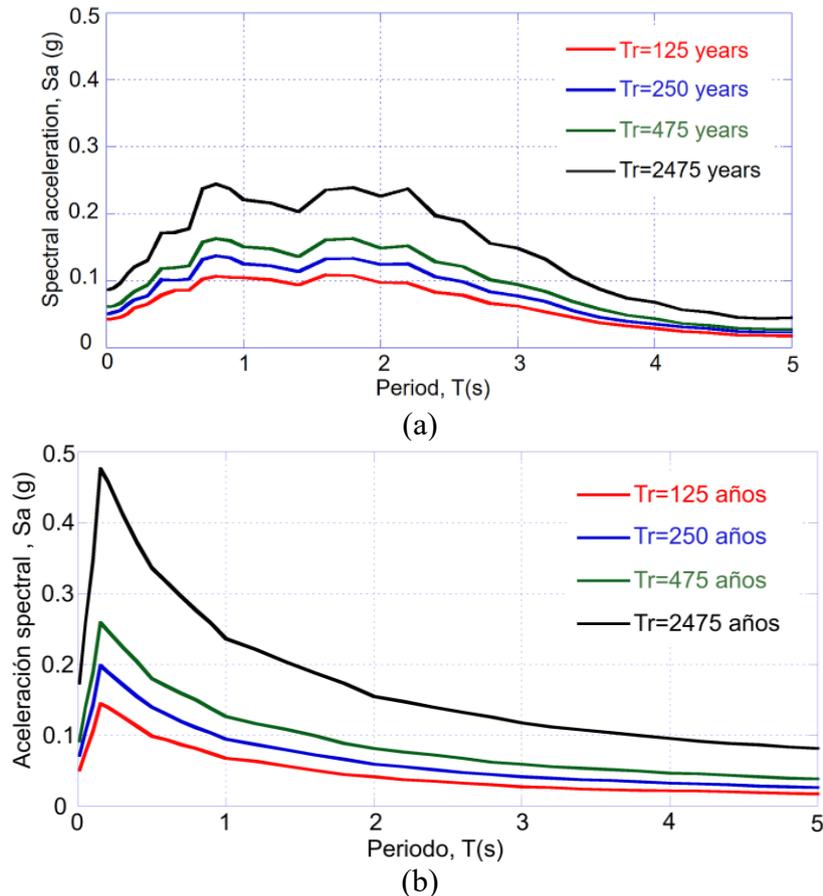


Figura 35. Espectros de peligro uniforme para eventos (a) subducción y (b) normales

3.5. Análisis de respuesta de sitio

Para estimar la amplificación del suelo para cada uno de los espectros de peligro uniformes presentados en la Figura 35, en las zonas II, IIIa y IIIb, se llevaron a cabo análisis de propagación de ondas unidimensionales, utilizando el programa RADSH, Bárcena y Romo (1994). La respuesta sísmica de cada perfil de suelo genérico se obtuvo mediante la teoría de vibraciones aleatorias.

El algoritmo empleado para calcular la respuesta probabilística del sitio de depósitos de suelo estratificados horizontalmente, sujetos a ondas SH bidimensionales, que se propagan verticalmente, se describe en Osorio y Mayoral (2013). El movimiento de entrada se define en términos de un espectro de respuesta, a partir del cual se calcula un espectro equivalente del movimiento sísmico del suelo. Usando la teoría de la vibración aleatoria, se calculan las respuestas máximas de un sistema lineal excitado por un proceso estocástico para un nivel de confianza dado. Por lo tanto, los espectros de peligro

uniformes calculados para cada período de retorno se utilizaron directamente como variable de entrada en el modelo.

Para establecer los desplazamientos permanentes correspondiente, se realizaron análisis en el dominio del tiempo utilizando columnas de suelo tridimensionales, Figura 36, para cada perfil genérico de suelo que se muestra en la Figura 28, éstos fueron simulados con modelos de diferencias finitas, los cuales fueron desarrollados utilizando el software FLAC, Itasca (2005).

Las historias de tiempo semilla presentadas en la Figura 37, corresponden a los movimientos del suelo registrados en la estación sísmica de Ciudad Universitaria para los dos terremotos (19/09/17 y 19/09/85). Una historia de tiempo semilla es un acelerograma registrado en suelo firme o roca durante un sismo de gran magnitud que ocurre en una zona sismogénica determinada. Esta historia semilla se modifica también en el dominio del tiempo para que coincida con los espectros de respuesta específicos. Así, se ajustaron a los espectros de peligro uniformes que definen el ambiente sísmico para cada período de retorno, utilizando el método propuesto por Lilhanand y Tseng (1988) modificado por Abrahamson (1988). Los parámetros sísmicos de estos terremotos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13 Eventos considerados para la definición de sismos semilla para los análisis en el dominio del tiempo.

Evento	Estación	Magnitud	Distancia epicentral (km)	Profundidad focal (km)	PGA (g)
19/09/2017	C.U.	M _w =7.1	114	57	0.059
19/09/1985	C.U.	M _w =8.1	398	5	0.033

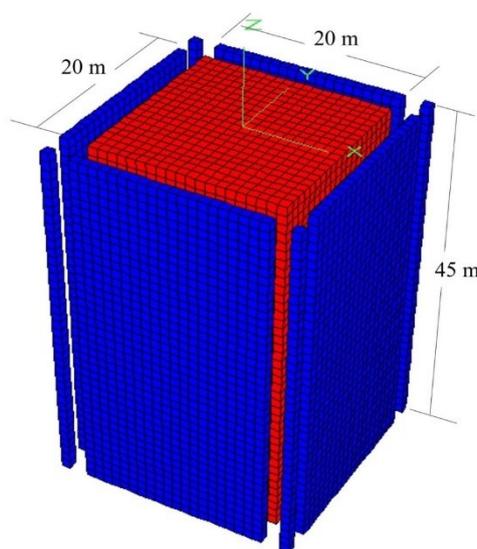


Figura 36. Columna de suelo del modelo tridimensional de diferencias finitas

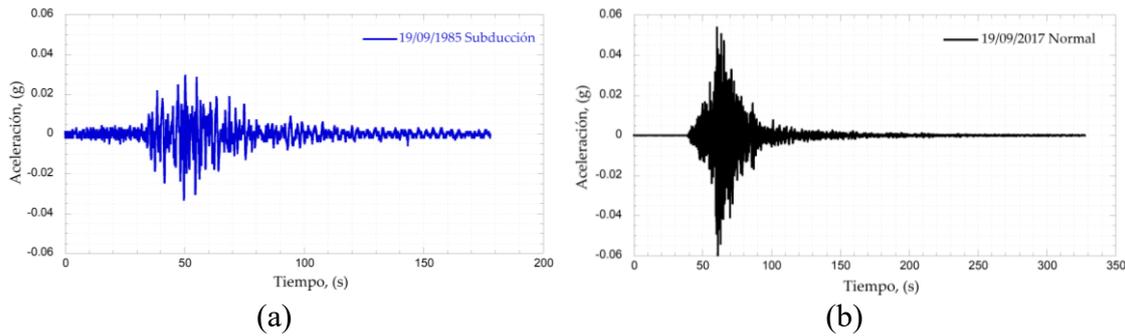


Figura 37. Historias de aceleración semilla utilizadas en el modelo en el dominio del tiempo, (a) subducción, (b) normal.

Para cada período de retorno (125, 250, 475 y 2475 años) y zona sismogénica (subducción y normal), las historias de tiempo de aceleración se deconvolvieron y se aplicaron en la base del modelo de diferencias finitas que se muestra en la Figura 36. El proceso de deconvolución se llevó a cabo con el modelo incluido en el código SHAKE (Schnabel, 1972) descrito en Mayoral et al. (2019a). Se han desarrollado varios modelos constitutivos para considerar las no linealidades del suelo (Chong, 2017; Liu et al. 2015; Groholski et al. 2016), sin embargo, la ausencia de datos experimentales ha impedido el desarrollo y calibración de un modelo constitutivo confiable para las arcillas de alta plasticidad de la Ciudad de México. Así, para tratar adecuadamente tanto la degradación de la rigidez del módulo como la variación de amortiguamiento, durante sismos, se aplicó el modelo histerético incluido en FLAC^{3D}, llamado “sig3”. Este modelo ha sido utilizado con éxito en el pasado por otros autores para predecir respuestas sísmicas medidas en sitios instrumentados en la Ciudad de México (Mayoral et al. 2008; Mayoral et al. 2016). En el modelo se considera un suelo hipotético ideal, donde el esfuerzo es función de la deformación y no del número de ciclos de la carga sísmica. Una relación constitutiva incremental de la curva de degradación se expresa como $\tau_n / \gamma = G / G_{max}$, donde τ_n es el esfuerzo cortante normalizado, γ es la deformación cortante y G / G_{max} el módulo secante normalizado. El modelo sig3 es entonces:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{L - x_0}{b}\right)} \quad (18)$$

donde L es la deformación logarítmica definida como $L = \log_{10}(\gamma)$

Se aplicó un enfoque de ajuste iterativo a las curvas del módulo de degradación y las ecuaciones del modelo para obtener los parámetros a , b y x_0 . La amortiguación correspondiente viene dada directamente por el ciclo de histéresis durante la carga cíclica. Para los casos modelados en esta investigación, los parámetros a , b y x_0 varían de 1,00 a 1,02, -0,46 a -0,55 y -1,50 a 0,20 respectivamente. Como señala Mayoral y Ramírez (2011), el comportamiento no lineal del suelo depende del nivel de excitación, que, si es alto, conduce a la degradación de la rigidez al cortante y a un aumento del amortiguamiento.

La Figura 38 muestra la degradación del módulo y las curvas de amortiguamiento utilizadas en los análisis de respuesta del sitio estocástico, junto con las curvas de ajuste

correspondientes para los análisis en el dominio del tiempo realizados con FLAC^{3D}. Estas curvas se consideraron apropiadas, ya que se han utilizado con éxito para simular el comportamiento sísmico de las arenas limosas y los limos arenosos encontrados en la Ciudad de México por otros investigadores (Mayoral et al. 2019a; Mayoral et al. 2016; Mayoral et al. 2019b; Mayoral et al. 2019c; Peeta y Ziliaskopoulos, 2011).

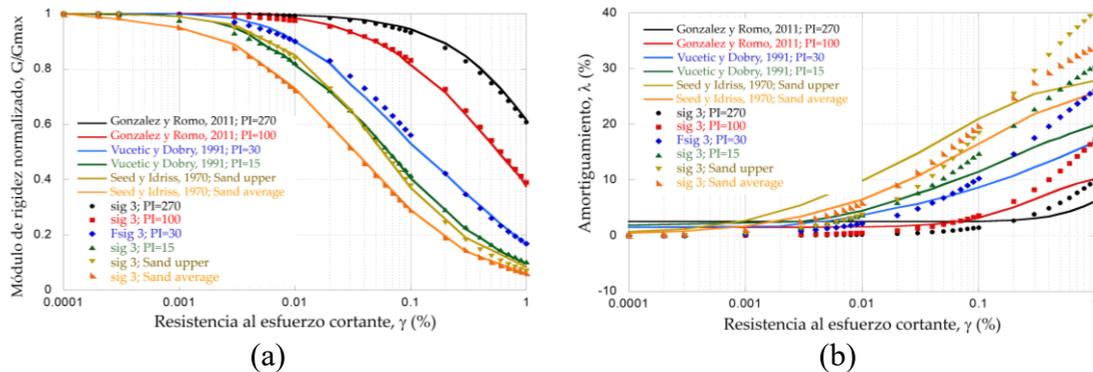


Figura 38. (a) Módulo de rigidez normalizado, (b) curvas de amortiguamiento

Las Figuras 39 a 41 muestran los espectros de respuesta calculados para las Zonas II, IIIa y IIIb, respectivamente, para eventos normales y de subducción. Los resultados de los análisis en el dominio de la frecuencia y el tiempo se incluyen en estas figuras.

Como se mencionó previamente, los análisis realizados con el código RADSH son de enfoque estocástico. En ellos, se representa un número infinito de historias de aceleración, con el mismo contenido de frecuencia media, pero con fases distribuidas aleatoriamente. Mientras que, los resultados obtenidos con FLAC son deterministas, y específicos a las historias de aceleración consideradas, que se relacionan con los movimientos del suelo registrados en la Ciudad de México, durante los terremotos de 1985 y 2017, que son los eventos más fuertes que han azotado la ciudad en los últimos años.

Teniendo en cuenta que las condiciones del subsuelo en la Zona I están asociadas con rocas y limos arenosos rígidos o arenas limosas, se asumió que el espectro de peligro uniforme de control que se muestra en la Figura 35 es una buena estimación de los movimientos del suelo esperados en esta área para fines prácticos. La aceleración máxima del suelo (es decir, S_a en el período T igual a 0 s) y los desplazamientos permanentes del suelo para cada escenario sísmico se obtuvieron con base en los resultados del análisis de respuesta sísmica. También se determinó la aceleración espectral a 0.1 s y 0.3 s, como se muestra en las Tablas 14 a 17.

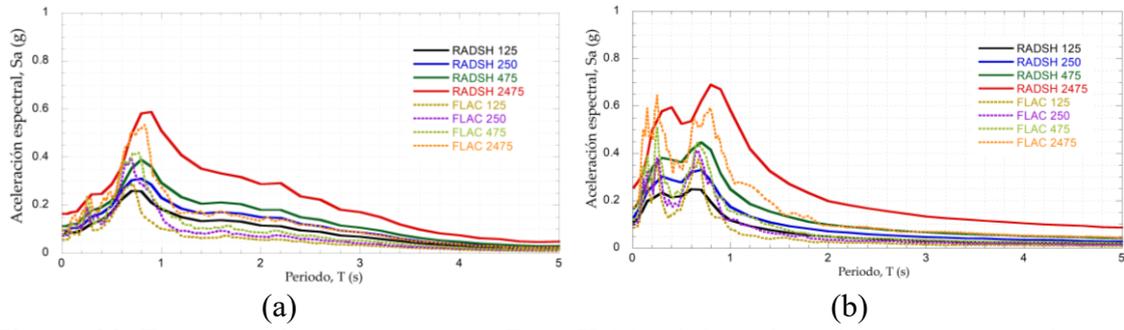


Figura 39. Espectros de respuesta para Zona II (a) subducción y (b) evento normal.

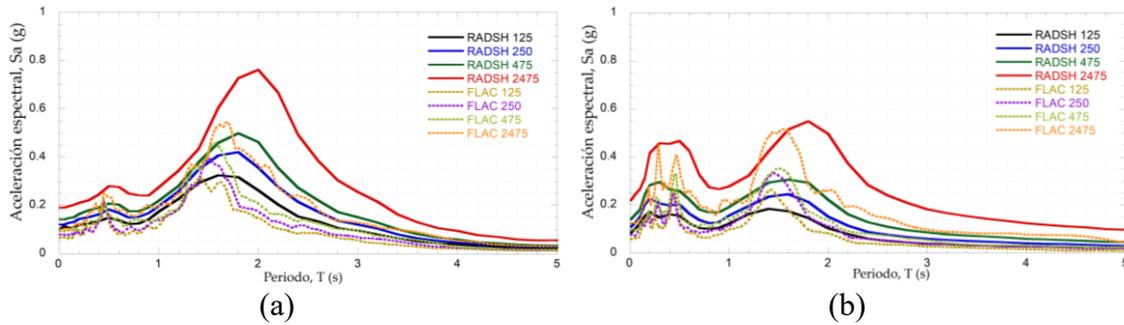


Figura 40. Espectro de respuesta para Zona IIIa (a) subducción y (b) normal.

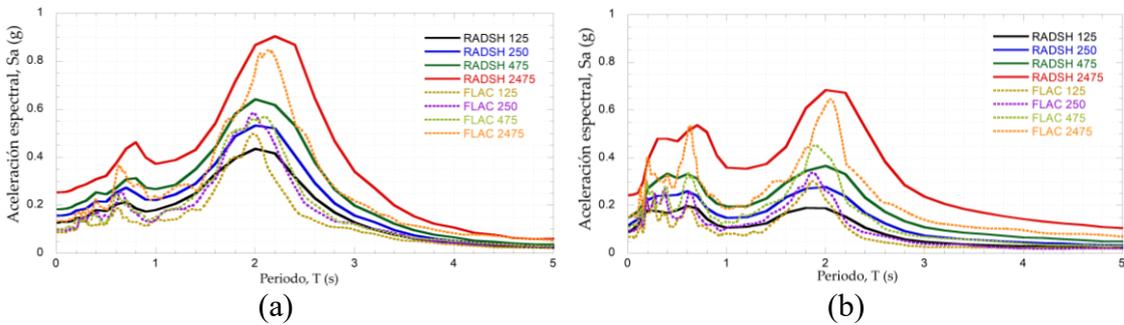


Figura 41. Espectros de respuesta para Zona IIIa (a) subducción y (b) normal.

Tabla 14. Valores de aceleración máxima del terreno, PGA (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno.

	Periodo de retorno, Tr (años)	Zona I	Zona II	Zona IIIa	Zona IIIb
Sismo de subducción	125	0.0438	0.0772	0.1000	0.1260
	250	0.0530	0.0942	0.1210	0.1570
	475	0.0625	0.1127	0.1410	0.1830
	2475	0.0892	0.1637	0.1910	0.2540
Sismo normal	125	0.0764	0.1099	0.0840	0.0900
	250	0.1055	0.1299	0.1100	0.1180
	475	0.1406	0.1665	0.1390	0.1510
	2475	0.2599	0.2558	0.2190	0.2430

Tabla 15. Valores de aceleración espectral, S_a a 0.1 s (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno.

	Periodo de retorno, Tr (años)	Zona I	Zona II	Zona IIIa	Zona IIIb
Sismo de subducción	125	0.0458	0.0866	0.1073	0.1301
	250	0.0560	0.1051	0.1274	0.1600
	475	0.0662	0.1230	0.1480	0.1861
	2475	0.0968	0.1716	0.1964	0.2559
Sismo normal	125	0.1060	0.1580	0.1224	0.1193
	250	0.1427	0.1941	0.1505	0.1430
	475	0.1885	0.2341	0.1805	0.1760
	2475	0.3465	0.3110	0.2662	0.2537

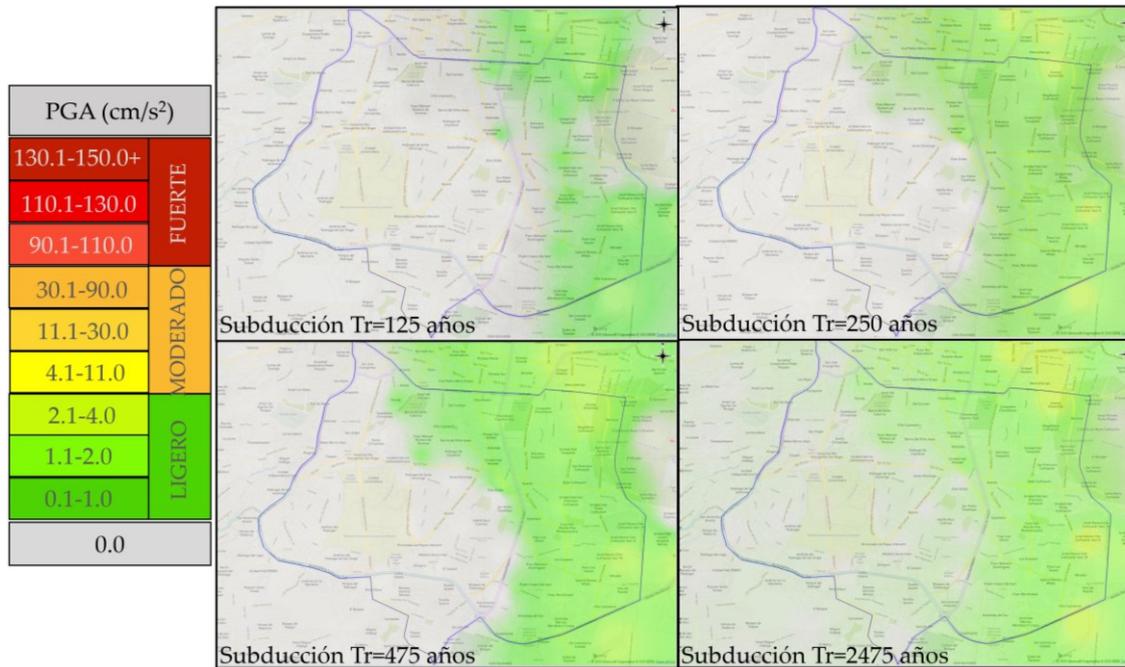
Tabla 16. Valores de aceleración espectral, S_a a 0.3 s (g), obtenidos para cada zona y periodo de retorno.

	Periodo de retorno, Tr (años)	Zona I	Zona II	Zona IIIa	Zona IIIb
Sismo de subducción	125	0.065 2	0.1238	0.1244	0.1511
	250	0.077 4	0.1526	0.1521	0.1868
	475	0.093 7	0.1772	0.1809	0.2198
	2475	0.130 4	0.2453	0.2221	0.2874
Sismo normal	125	0.126 4	0.2343	0.1485	0.1770
	250	0.172 2	0.3025	0.2062	0.2408
	475	0.225 2	0.3815	0.2960	0.3067
	2475	0.412 8	0.5779	0.4580	0.4800

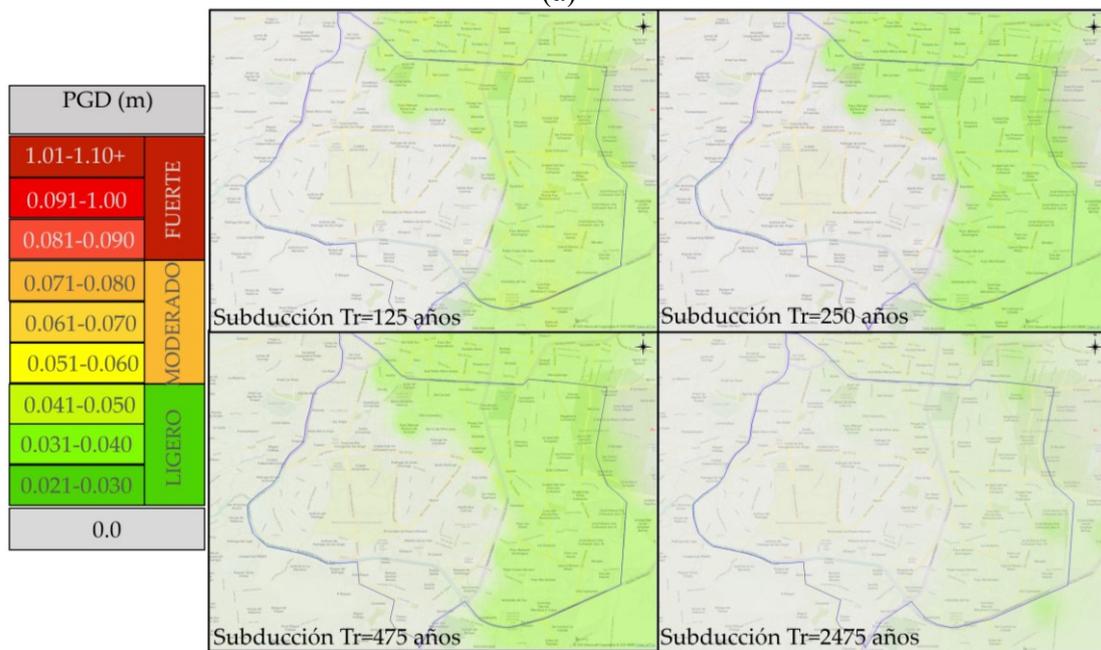
Tabla 17. Valores de desplazamiento máximo del terreno, PGD (m), obtenidos para cada zona y periodo de retorno.

	Periodo de retorno, Tr (años)	Zona I	Zona II	Zona IIIa	Zona IIIb
Sismo de subducción	125	0.000	0.036	0.035	0.034
	250	0.000	0.034	0.034	0.031
	475	0.000	0.050	0.048	0.048
	2475	0.000	0.012	0.013	0.019
Sismo normal	125	0.000	0.001	0.001	0.000
	250	0.000	0.005	0.005	0.004
	475	0.000	0.015	0.016	0.015
	2475	0.000	0.038	0.038	0.038

Partiendo de los resultados obtenidos para cada escenario sísmico se realizó una aproximación de la distribución espacial de las aceleraciones y desplazamientos en el área de estudio, utilizando el método de interpolación de distancia inversa, Figuras 42 y 43. Los rangos de valores obtenidos en estas distribuciones tanto para aceleraciones como para desplazamientos permiten asumir que, dada la variabilidad en dichos parámetros en la zona de estudio, la utilización de perfiles genéricos es aceptable.



(a)



(b)

Figura 42. Aproximación de la distribución espacial de (a) PGA (b) PGD para sismos de subducción.

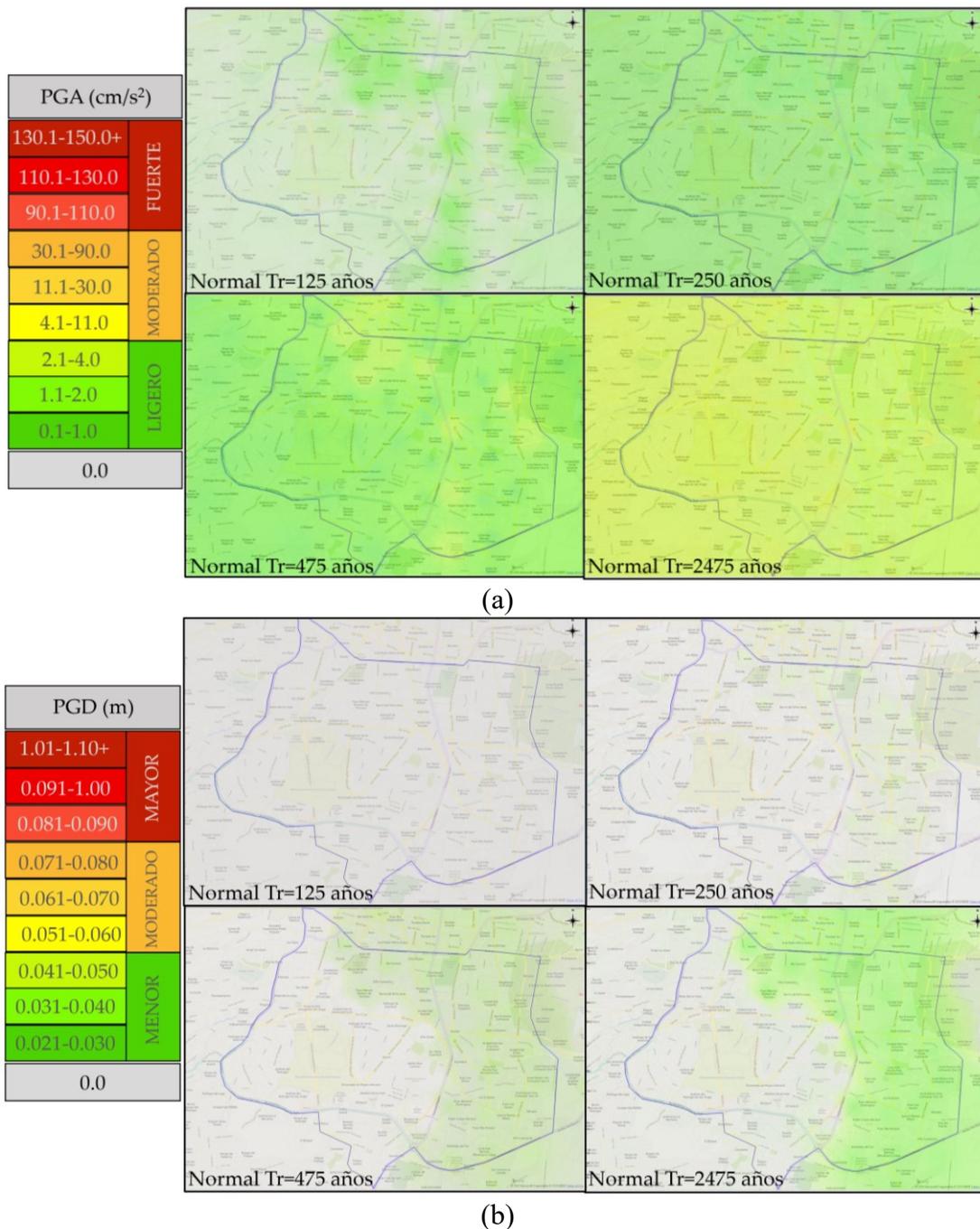


Figura 43. Aproximación de la distribución espacial de (a) PGA (b) PGD para sismos normales.

3.6. Probabilidad de daño en infraestructura

3.6.1. Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad para el conjunto de edificios e infraestructura de transporte en América Latina se pueden encontrar en (Díaz et al. 2018; Mayoral et al. 2017; Villar-Vega et al. 2017; Jara et al. 2017; Mayoral et al. 2016; Ruiz-García et al. 2009). Estas curvas se basan en análisis de historias de tiempo no lineales (NLTHA) y se desarrollaron

para predecir daños a edificios y estructuras, como puentes de concreto armado, estructuras subterráneas y pasos elevados urbanos.

Las curvas de fragilidad analíticas, presentadas en la Tabla 18 y las Figuras 44 a 48, fueron seleccionadas para determinar la probabilidad de daño a las estructuras en el área de estudio. Las capacidades de predicción de daños de estas funciones se evaluaron después del terremoto de Ciudad de México de 2017, Román-de la Sancha et al. (2019). Sin embargo, los autores reconocen que todavía existe un grado de incertidumbre relacionado con las suposiciones particulares inherentes a las funciones de fragilidad seleccionadas para los análisis.

Tabla 18. Curvas de fragilidad seleccionadas para el área de estudio.

Infraestructura	Referencia	Medida de intensidad
Edificios de mampostería confinados (1, 2, 3 pisos)	Villar-Vega et al. (2017)	PGA y Sa
Edificios de concreto reforzado (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 pisos)	Villar-Vega et al. (2017)	PGA y Sa
Puentes	NIBS (2012)	PGA
Túneles	Pitilakis et al. (2014)	PGD
Estaciones de metro	Villar-Vega et al. (2017)	PGA y Sa
Vías ferroviarias	Pitilakis et al. (2014)	PGD
Autopistas	Pitilakis et al. (2014)	PGD
Avenidas	Pitilakis et al. (2014)	PGD

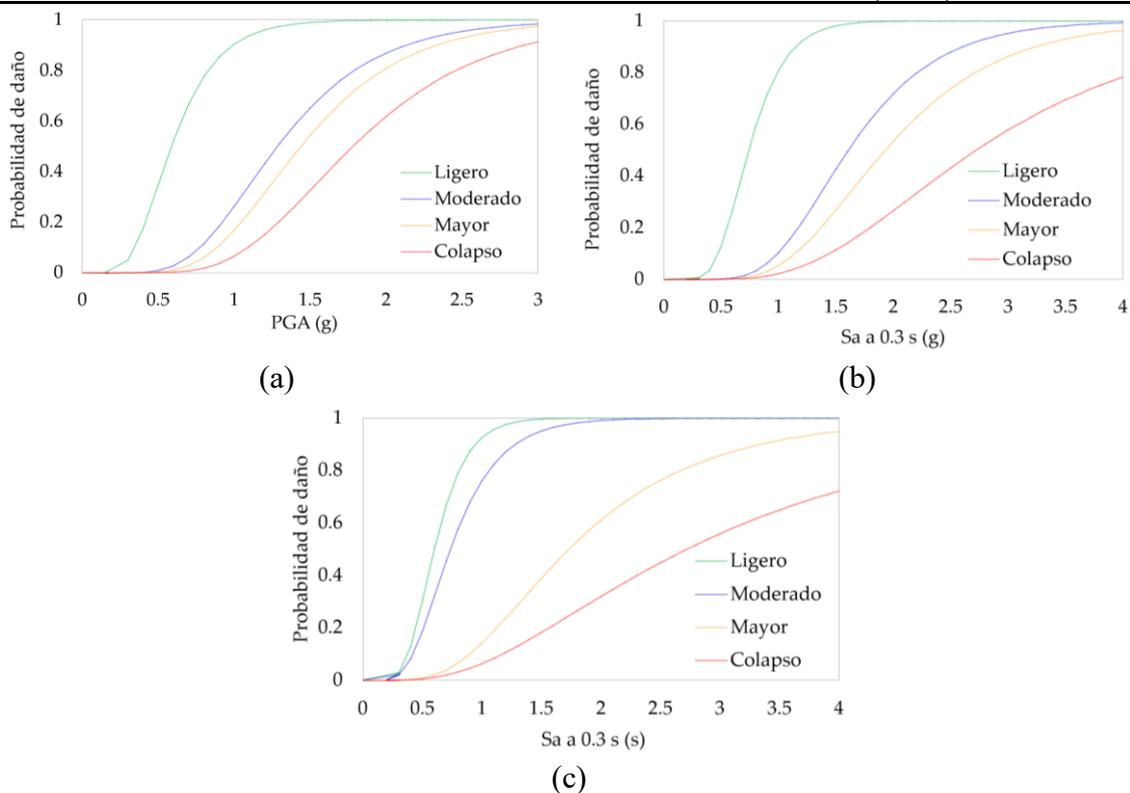


Figura 44. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería con confinamiento reforzado (a) 1 piso, (b) 2 pisos, (c) 3 pisos, desarrolladas por Villar-Vega et al. (2017)

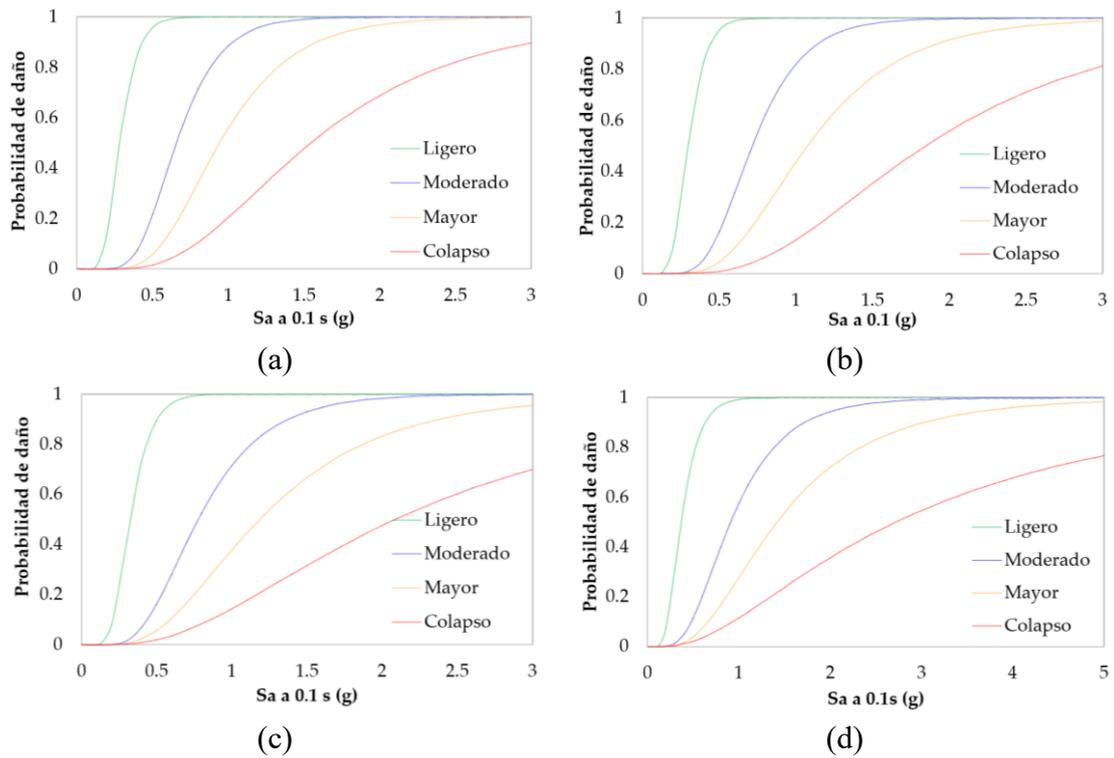


Figura 45. Curvas de fragilidad para edificios de concreto reforzado (a) 4 pisos, (b) 5 pisos, (c) 6 pisos, (d) 7 pisos, desarrolladas por Villar-Vega et al. (2017).

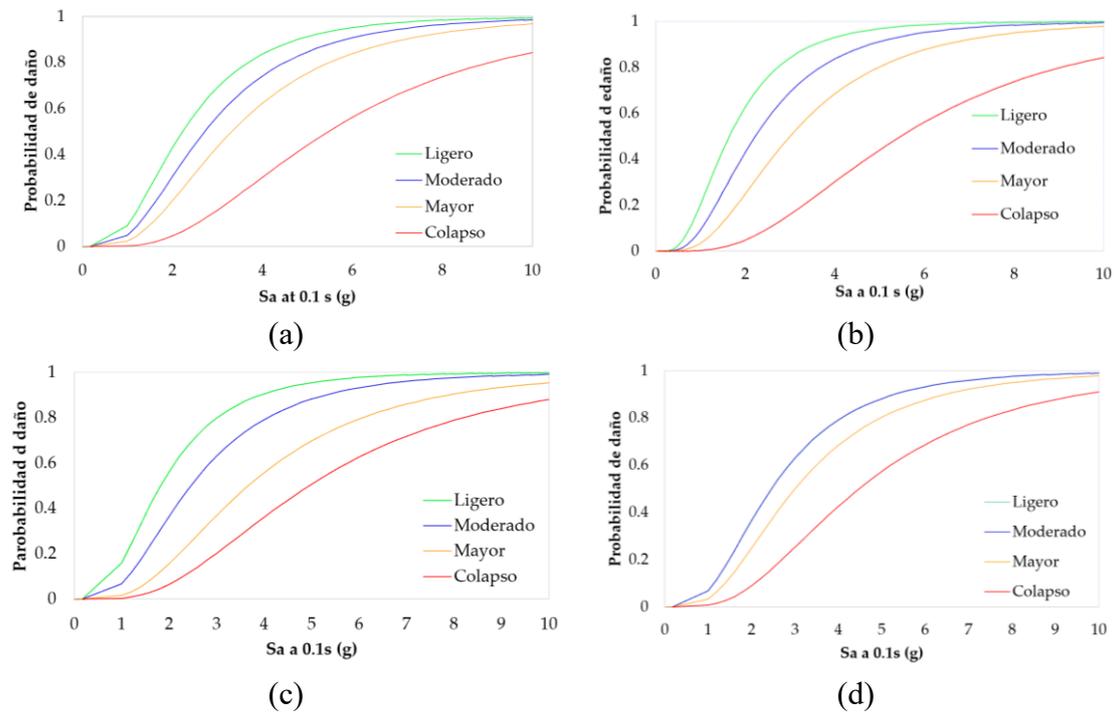


Figura 46. Curvas de fragilidad para puentes (a) HWB4 (SPB), (b) HWB7 (CSSB), (c) HWB9 (CCSC B), (d) HWB11 (CC1B), desarrolladas por NIBS (2012).

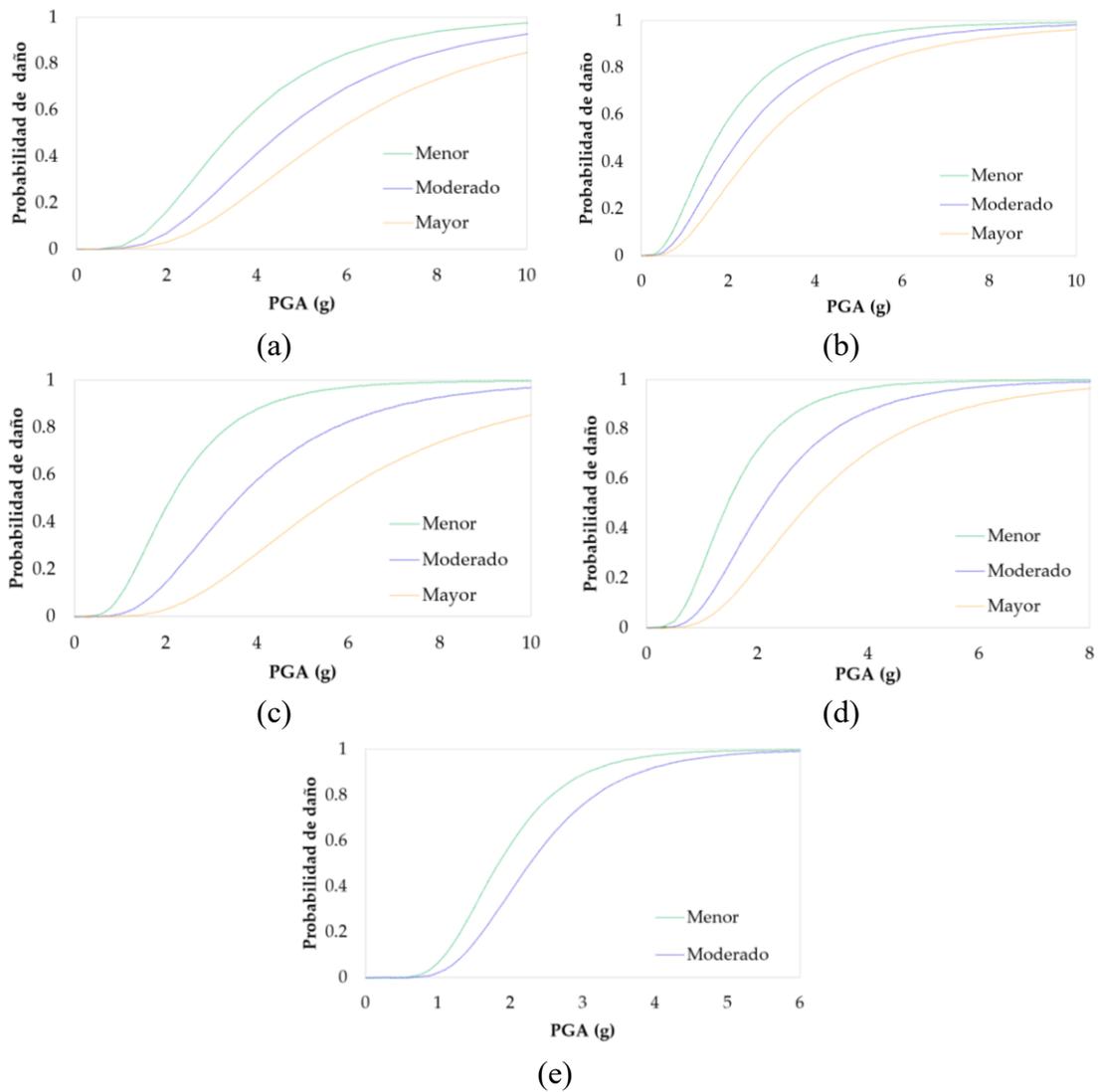


Figura 47. Curvas de fragilidad para túneles (a) túneles excavados en suelos con depósitos de arena, grava y arcilla rígida, (b) túneles excavados suelos con depósitos de arena densa, grava y arcilla rígida, (c) pasos a desnivel en suelos con depósitos de arena, grava y arcilla rígida, (d) pasos a desnivel en suelos con depósitos de arena densa, grava y arcilla rígida, (e) túneles construidos en roca, Ptilakis et al. (2014).

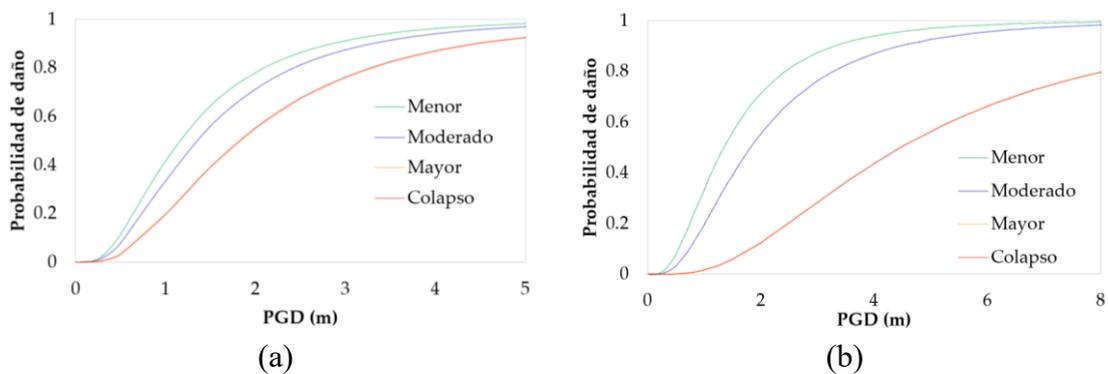


Figura 48. Curvas de fragilidad para vialidades (a) autopistas, (b) avenidas, desarrolladas por Ptilakis et al. (2014).

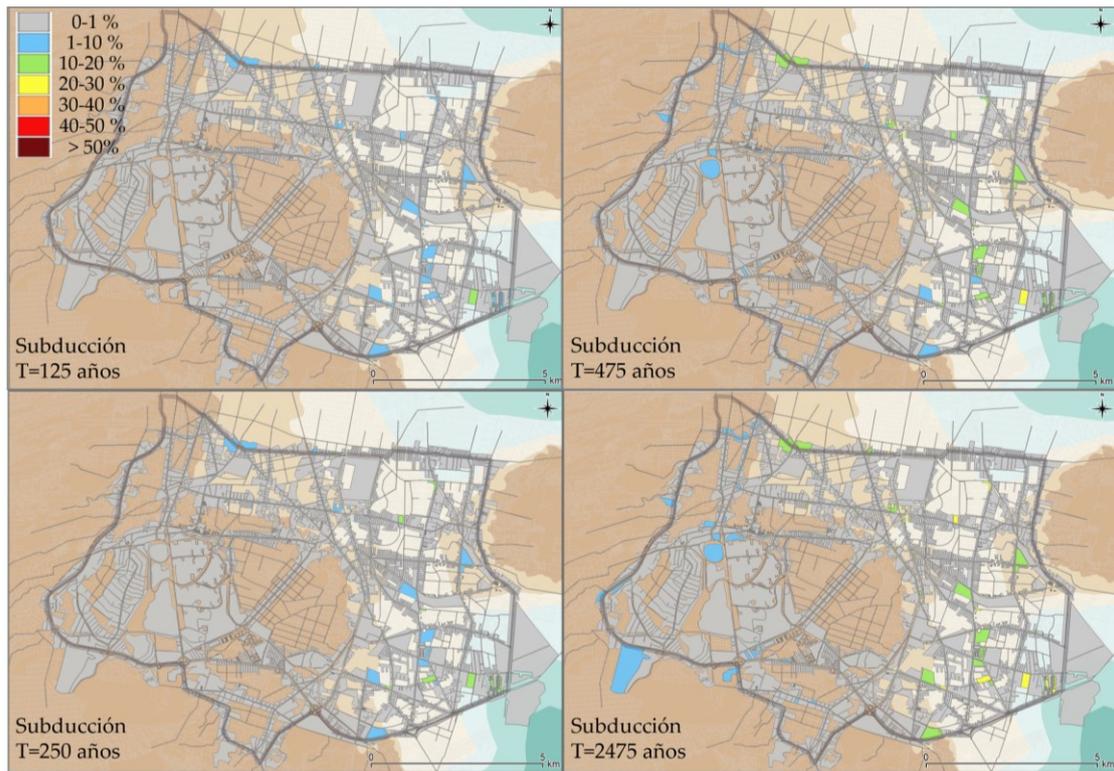
3.6.2. Cálculo de probabilidades de daño

La probabilidad de alcanzar o superar diferentes estados de daño se estimó utilizando los parámetros de intensidad obtenidos del análisis numérico anterior. De acuerdo con las curvas de fragilidad consideradas, es probable que en el área de estudio solo se produzcan daños en las edificaciones. La probabilidad de alcanzar algún tipo de daño en puentes, túneles y vías férreas es alrededor de 0.01% para todos los escenarios estudiados.

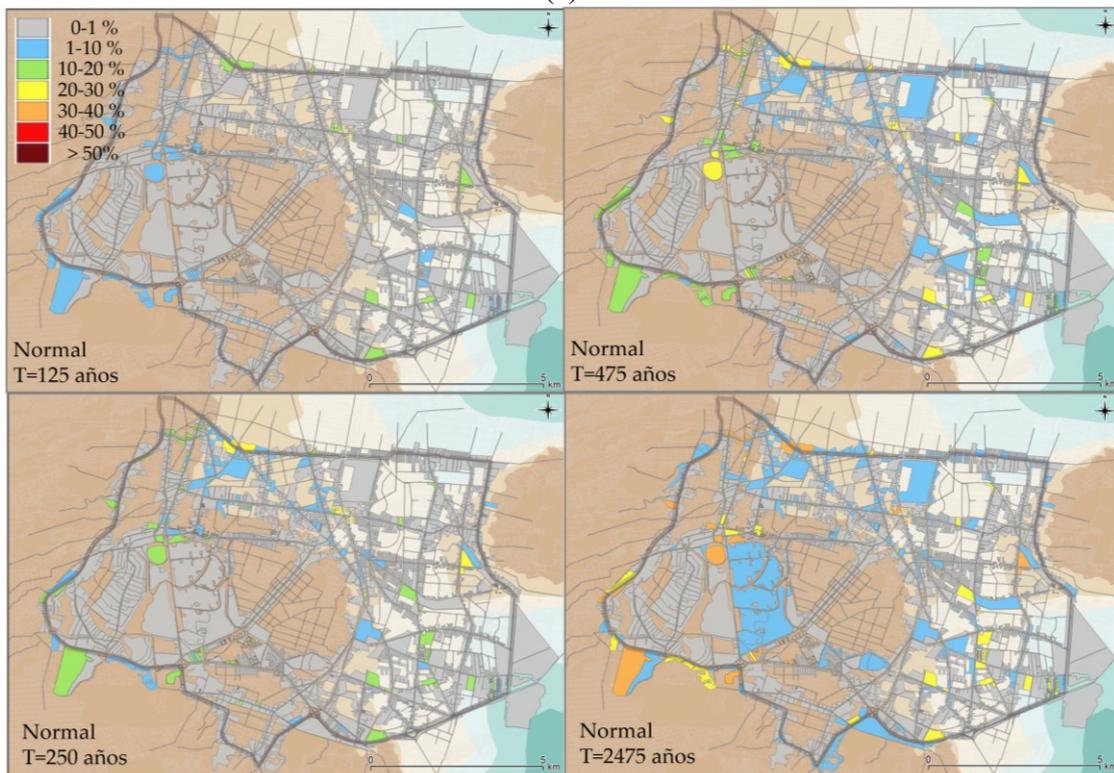
3.7. Modelo de distribución de daños

La probabilidad de alcanzar diferentes estados de daño obtenida para edificios, calculada directamente a partir de curvas de fragilidad, se procesó en un modelo GIS para generar una distribución espacial para 8 escenarios diferentes: periodos de retorno $Tr = 125, 250, 475$ y 2475 años tanto para falla normal como para subducción.

Para los eventos de subducción, la probabilidad de alcanzar un estado de daño moderado fue inferior al 20% para la mayoría de las cuadras para eventos de $Tr=250$ años y $Tr=475$ años. Esta probabilidad aumenta para eventos de $Tr=2475$ años en edificios ubicados en las Zonas IIIa y IIIb. Para los mismos eventos, la probabilidad de alcanzar un estado de daño mayor se espera en algunas cuadras ubicadas en la Zona IIIb, mientras que para $Tr=2475$ años, esta probabilidad aumenta a más del 20% para las mismas estructuras y se extiende a la Zona IIIa. En el caso de eventos de falla normal con periodo de retorno $Tr=250$ años, la probabilidad de alcanzar un daño moderado alcanza el 50% en varios bloques de edificios ubicados en la Zona II y 40% en los de la Zona IIIa. Para escenarios de fallas normales $Tr = 475$, la probabilidad de alcanzar daño moderado aumenta a más del 50% en el bloque ubicado en la Zona II, mientras que para $Tr=2475$ años alcanzar daño moderado es más del 50% probable en varias cuadras ubicadas en las Zonas II, IIIa y IIIb. Alcanzar estados de daño mayor durante escenarios de fallas normales $Tr=250$ y 475 años es menos del 20% probable solo en alguna cuadra ubicada en la Zona II, mientras que para $Tr=2475$ años esa probabilidad es superior al 40%. La Figura 49 muestra los mapas de las distribuciones de la probabilidad promedio de estados de daño (es decir, leve, moderado, mayor y colapso) para edificios, subducción y eventos normales.



(a)



(b)

Figura 49. Distribución espacial de daños dentro del área de estudio (a) sismos de subducción y (b) sismos normales.

3.7.1. Criterio de bloqueo de vialidades

Siguiendo las observaciones del terremoto de 2017, el criterio de cierre de vialidades adoptado en este estudio considera que un cierre total de vías con dos o menos carriles, y un cierre parcial de vías con más de dos carriles ocurrirá cerca de edificios con probabilidad de experimentar daños moderados y daños mayores. La Figura 50 muestra los tramos de vialidades afectados por escenarios normales y de subducción para diferentes períodos de retorno.

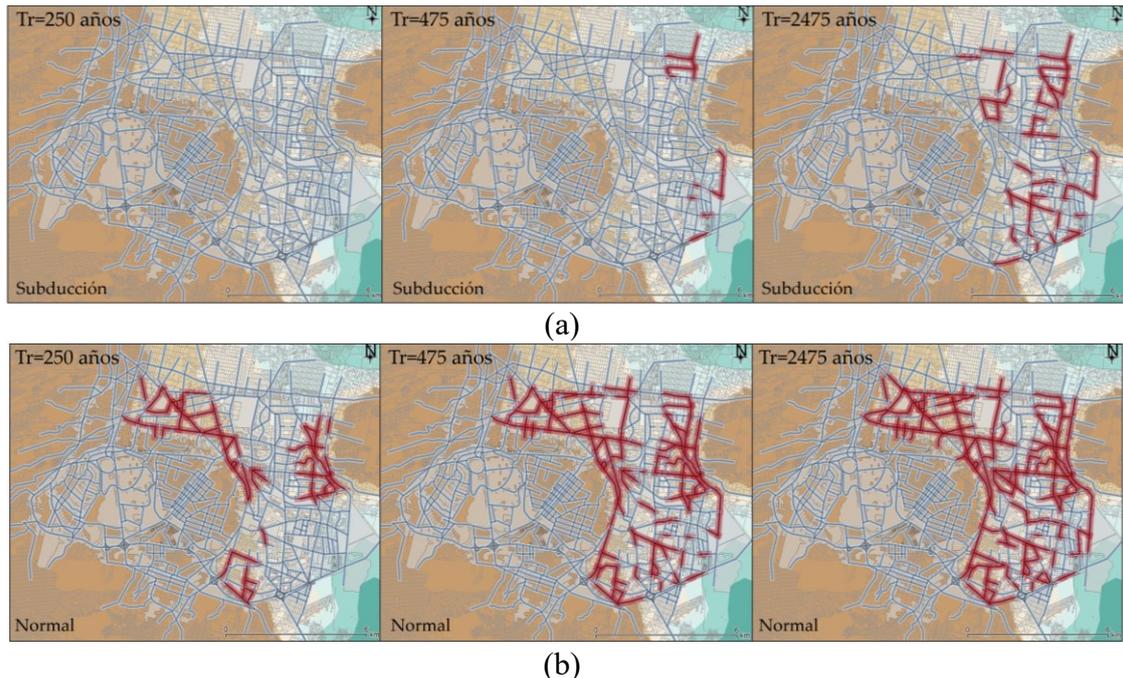


Figura 50. Segmentos con probabilidad de cerrar como medidas de seguridad en (a) sismos de subducción (b) sismos normales.

3.8. Simulación del comportamiento de la red de transporte

El modelo de asignación dinámica basado en simulaciones incluido en el código VISUM, PTV, (2006), se utilizó para simular el comportamiento de la red de vial después de escenarios sísmicos. Este modelo fue desarrollado utilizando los algoritmos presentados por Mahut (2001), combinando los métodos macroscópico y mesoscópico, incorporando un modelo de seguimiento vehicular en el cual se representa individualmente a los vehículos y su comportamiento a través de los segmentos en la red. El modelo de tráfico en esta investigación consideró solo el enfoque de simulación macroscópica, el cual incorpora variables que describen la topología de la red y la dinámica de la demanda de viajes. Para ello se modela un proceso de asignación de tráfico de equilibrio de usuario dinámico iterativo, dando como resultado las rutas seguidas y los tiempos de viaje en intervalos cortos de tiempo. Como se define en (Mahut, 2001; Florian y Mahut, 2008), en el espacio de los flujos de la ruta $hk(t)$, para todas las rutas k que pertenecen al conjunto K_i , para un origen-destino $i \in I$, en el tiempo t , el problema de equilibrio dinámico se puede expresar como:

$$\Omega = h(t): \sum_{k \in K_i} h_k(t) = g_i(t), i \in I; h_k(t) \geq 0 \text{ para casi todas } t \in T_d \quad (19)$$

donde las tasas de flujo de la trayectoria en la región factible Ω satisfacen la conservación del flujo y las restricciones de no negatividad para $t \in T_d$, el período que define las demandas temporales es $(0, T_d)$ y $g_i(t)$ representa las demandas variables en el tiempo. Entonces, la versión dinámica de las condiciones de equilibrio del usuario estático (Wardrop) donde $h_k \in \Omega$, está definida por,

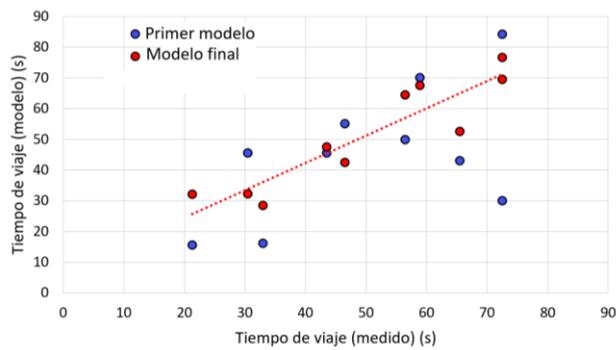
$$\begin{aligned} s_k(t) &= u_i(t) \text{ if } h_k(t) > 0 \\ s_k(t) &\geq u_i(t) \text{ otherwise} \\ \text{para todo } : k \in K_i, i \in I \text{ para casi todo } t \in T_d \end{aligned} \quad (20)$$

$u_i(t) = \min_{k \in K_i} \{s_k(t)\}$ para casi todos los $t \in T_d$; y $s_k(t)$ es el tiempo de viaje de la ruta determinado en la carga dinámica de la red. La solución para resolver el problema continuo en (19) y (20), el esquema de carga de la red y el enfoque de simulación se describen en detalle en (PTV, 2006; Mahut, 2001). Se pueden encontrar más detalles sobre el enfoque de asignación y el algoritmo en VISUM en (PTV, 2006; Mahut, 2001). El modelo de tráfico permite generar matrices OD dependientes para cada intervalo de tiempo. Este proceso se llevó a cabo en el estudio ajustando la matriz OD inicial con los conteos de tráfico obtenidos en algunos segmentos de la red. De esta forma, se consideró la dinámica de la demanda de viajes dentro del período de simulación.

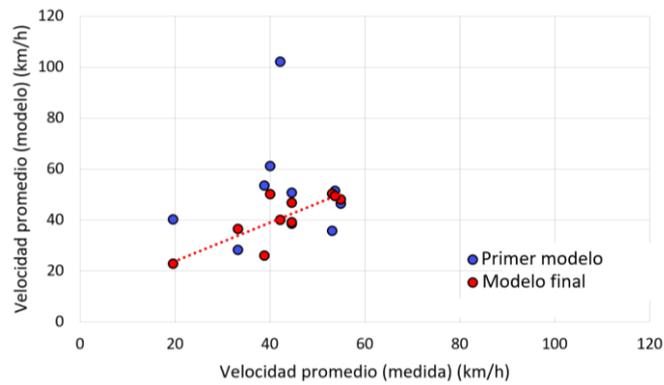
La calibración del modelo de tráfico se realizó utilizando conteos de tráfico y grabaciones de video de drones obtenidas en campo en algunos segmentos e intersecciones para un escenario matutino, tanto en condiciones de tráfico sin congestión, 5: 00-6: 00 am, como en horas pico 7: 15- 8:15 am. Se reconoce la limitación del modelo, asociada a la falta de una base de datos de tráfico más grande, sin embargo, se espera que investigaciones como esta, estimulen a la comunidad técnica y científica local, a realizar más investigaciones para generar estos datos en lugares como la Ciudad de México. El modelo de tráfico considera una red de 23 zonas de tráfico, 782 nodos y 2354 enlaces, que representan vías principales y urbanas dentro del área. Se calibró utilizando los volúmenes de tráfico y las velocidades obtenidos en el campo, que se introdujeron en el modelo para ajustar el modelo de elección de ruta. Se utilizaron diez segmentos como elementos de control para el proceso de calibración, donde los conteos de tráfico y la grabación de video con drones se realizaron periódicamente 10 días (miércoles), a la misma hora e intervalo. A partir del trabajo de campo realizado, se obtuvieron los valores promedio de velocidades, tiempos de viaje y volúmenes de tráfico. Se calculó un valor de coeficiente de correlación cada vez que se actualizó el modelo con nuevos datos de campo, comparando valores medidos y modelados para tiempos de viaje, volúmenes de tráfico y velocidades promedio. Los valores de correlación correspondientes al primer y último modelo de tráfico se presentan en la Tabla 19. La Figura 51 (a), (b) y (c) representan las curvas de correlación para algunos de los segmentos de control.

Tabla 19. Curvas de fragilidad seleccionadas para el área de estudio.

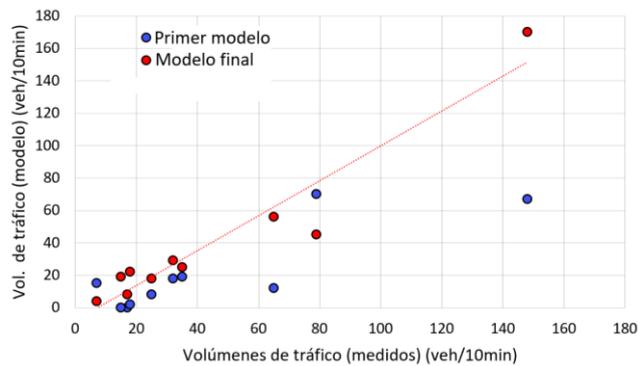
	Tiempo de viaje promedio	Velocidad promedio	Volúmenes de tráfico
R ² Primer modelo (5 segmentos de control)	0.3433	0.0070	0.7153
R ² Modelo final (10 segmentos de control)	0.8368	0.6529	0.9196



(a)



(b)



(c)

Figura 51. Correlación entre datos de la simulación y mediciones de (a) tiempos de viaje, (b) velocidad promedio y (c) volúmenes de tráfico.

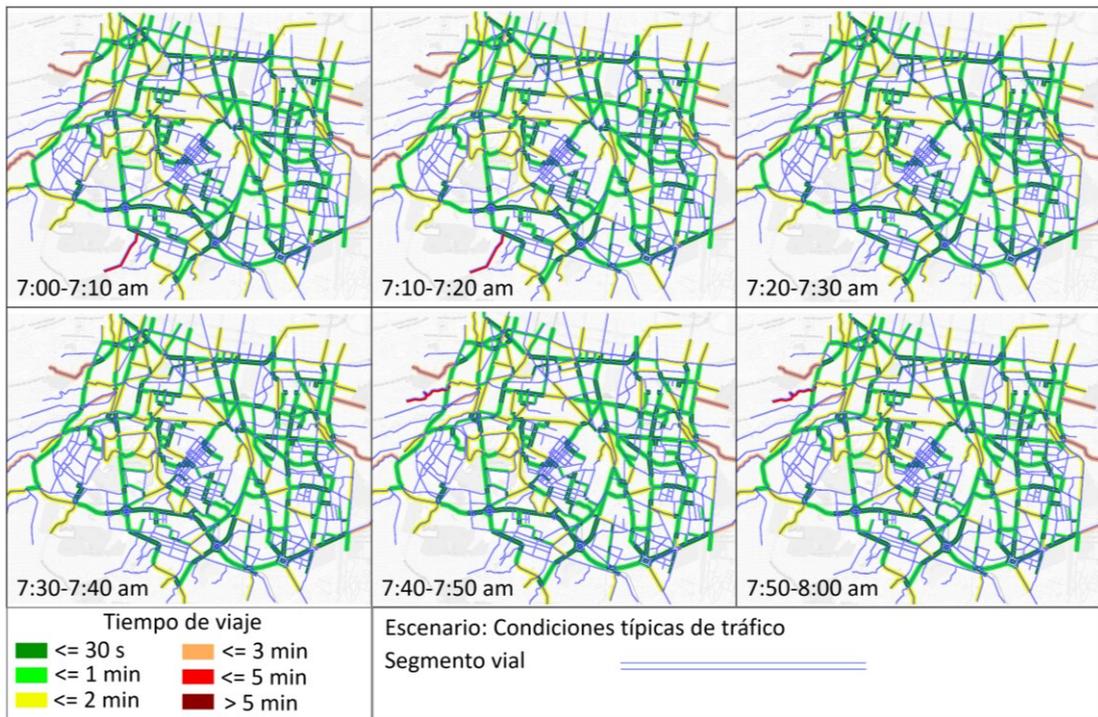
Para evaluar los impactos en las condiciones del tráfico en el área de estudio se seleccionó la hora pico de la mañana, de 7:15 a 8:14 am. En primer lugar, para reproducir las condiciones de tráfico típicas, el modelo de tráfico calibrado se alimentó con la demanda de viaje de la red vial durante un período de simulación de 1 hora, y períodos de precarga de 2 horas y de descarga de 2 horas.

Dada la carencia de información precisa sobre los cambios en los patrones de viaje posteriores a eventos sísmicos en la zona, se consideró que los viajes seguían los mismos orígenes y destinos después de cada escenario. La distribución del flujo de tráfico y los parámetros como los tiempos de viaje, las velocidades y la formación de colas se obtuvieron para intervalos de tiempo de 10 minutos. Para el estudio se simularon tres escenarios post sismo, el evento de subducción $T_r=475$ años y dos eventos normales $T_r=475$ años y $T_r=2475$ años.

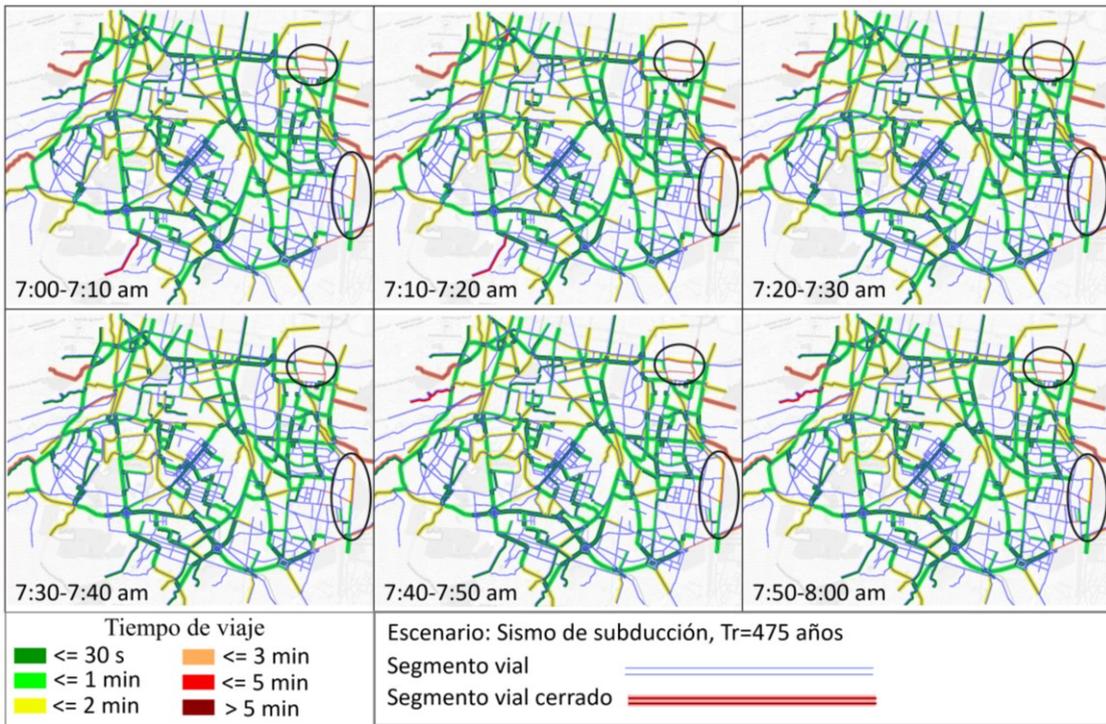
Las Figuras 52 y 53 muestran los tiempos de viaje y volúmenes de tráfico para escenarios sísmicos de $T_r=475$ años para eventos de falla normales y subducción. En esos escenarios, los volúmenes de tráfico aumentaron en los tramos de viales cercanos a segmentos bloqueados, lo que produjo un aumento en los tiempos de viaje y la longitud de las colas, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Variaciones en las variables de comportamiento de tráfico para los tres escenarios evaluados.

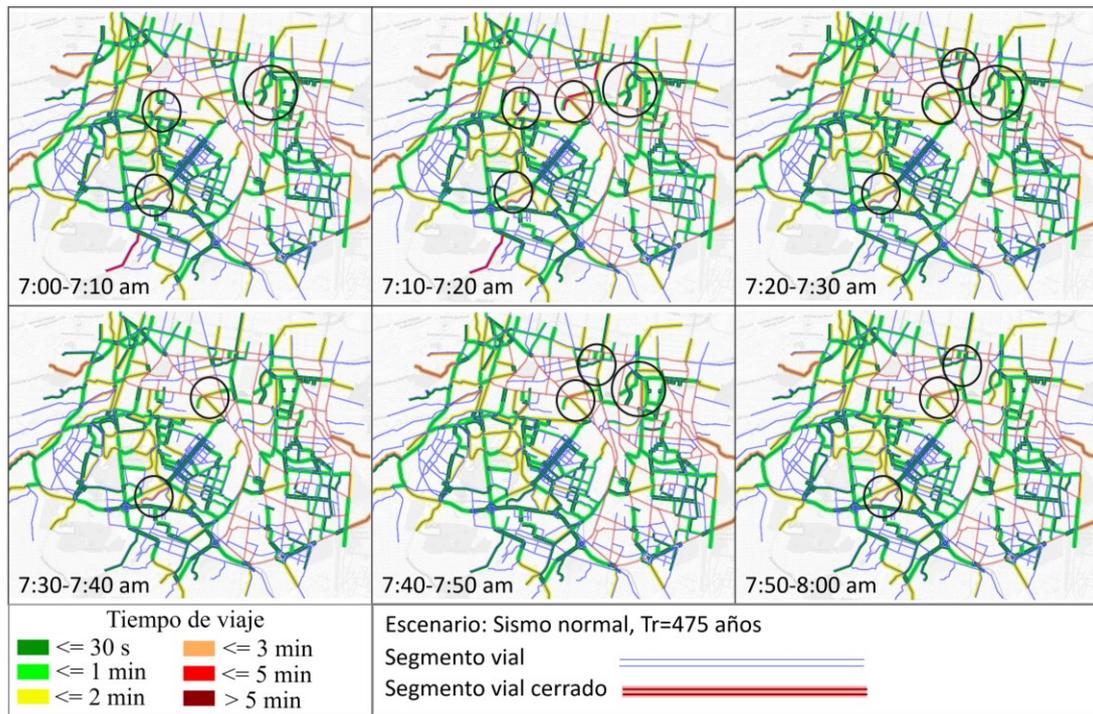
Escenario		Velocidad promedio (km/h)	Tiempo de viaje promedio (s)	Longitud de cola máxima (m)
Condiciones pre-sismo		49.42	15.40	56.23
Sismo de subducción	$T_r=475$ años	22.10	33.62	61.24
Sismos normales	$T_r=475$ años	44.19	827.89	156.03
	$T_r=2475$ años	41.07	1304.01	145.93



(a)

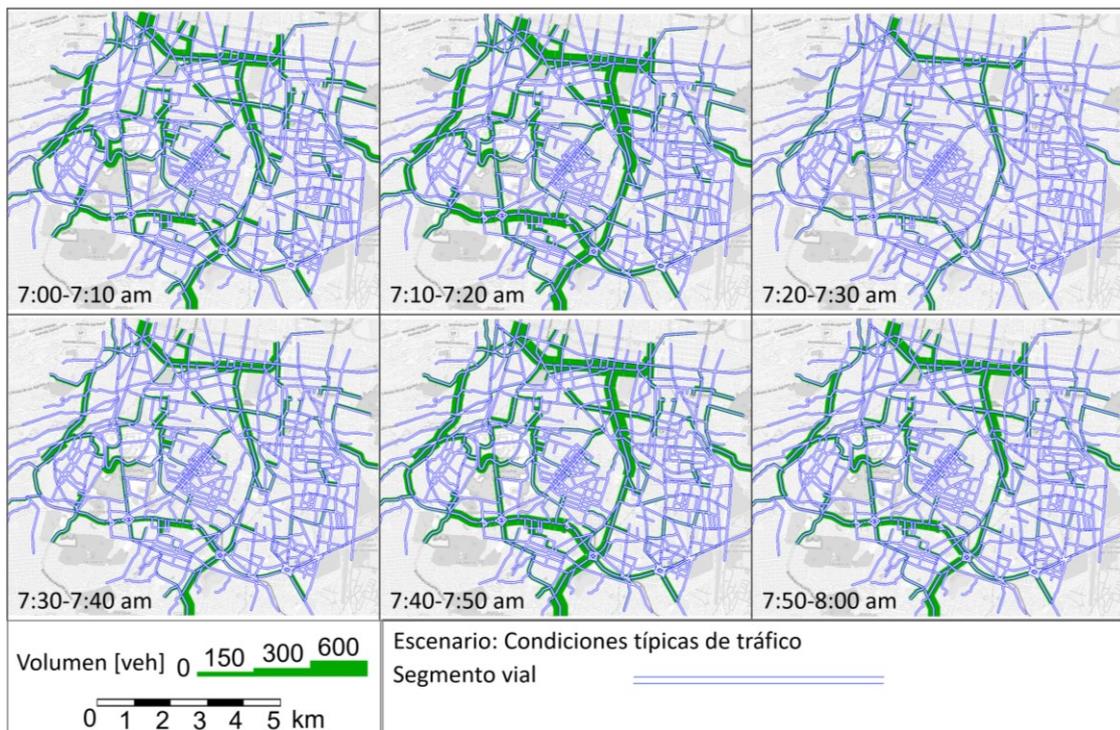


(b)

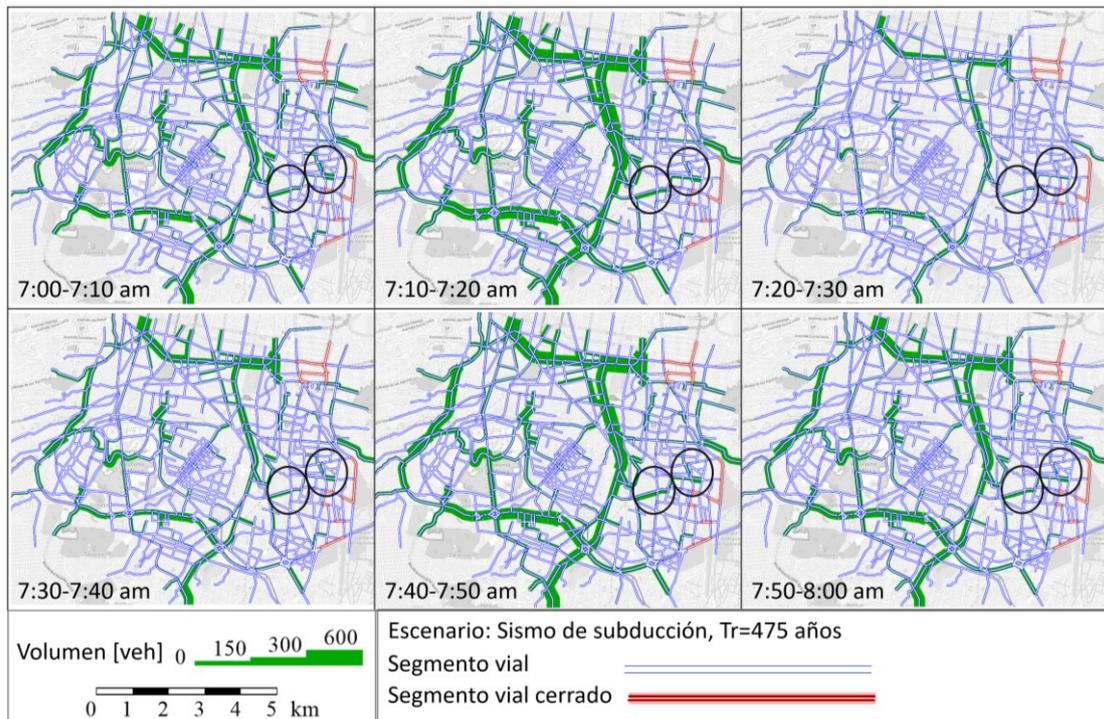


(c)

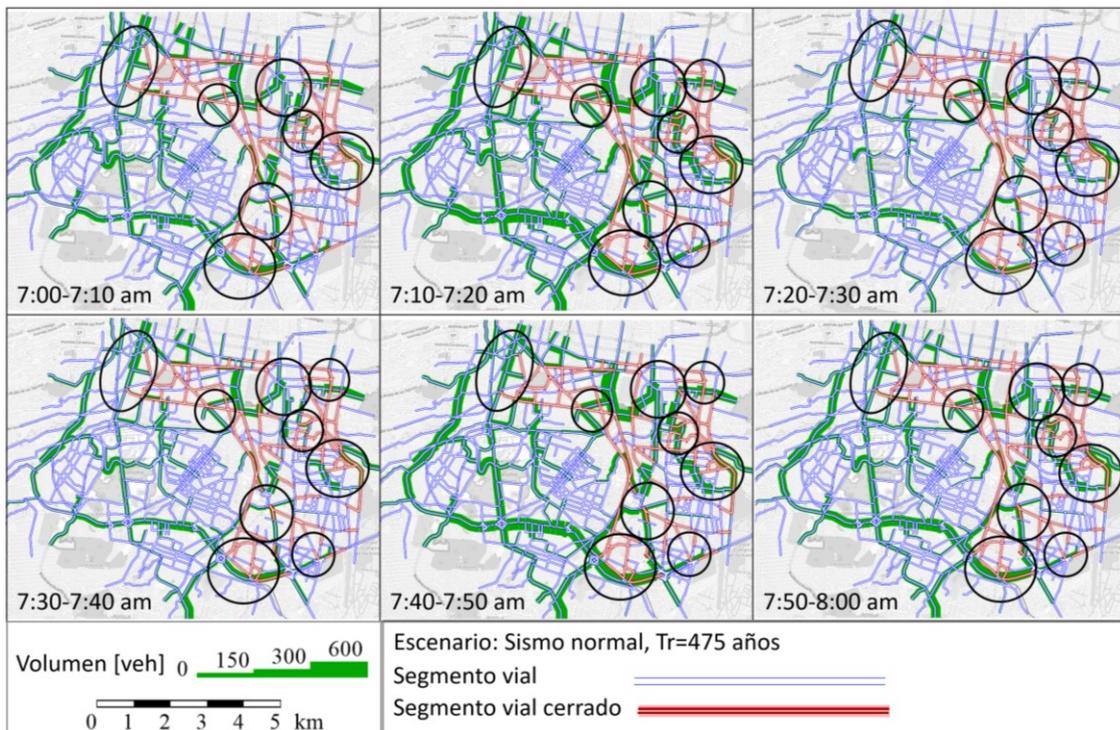
Figura 52. Tiempos de viaje obtenidos para el horario pico matutino (a) condiciones típicas, (b) sismo de subducción $Tr=475$ años, (c) sismos normales $Tr=475$ años. Los círculos negros indican la áreas en las que se presentan incrementos en los tiempos de viaje con respecto a las condiciones iniciales.



(a)



(b)



(c)

Figura 53. Volúmenes vehiculares obtenidos para el horario pico matutino (a) condiciones típicas, (b) sismo de subducción $Tr=475$ años, (c) sismos normales $Tr=475$ años. Los círculos negros indican la áreas en las que se presentan incrementos en los tiempos de viaje con respecto a las condiciones iniciales.

3.9. Modelo multivariable de vulnerabilidad sísmico-operativa de la red

Utilizando los resultados del análisis de respuesta del sitio y las simulaciones de tráfico, se llevó a cabo una evaluación de eficiencia sísmico-operativa de la red para tres escenarios. Primero, se evaluaron los escenarios de sismo normales para dos períodos de retorno $Tr=475$ años y $Tr=2475$ años para determinar la influencia de la magnitud del sismo en el comportamiento del tráfico. Se realizó una segunda comparación entre escenarios de sismos normales y de subducción, ambos con períodos de retorno $Tr=475$ años, para examinar el efecto del contenido de frecuencias del sismo en la evolución del tráfico. El enfoque DEA, descrito anteriormente, se aplicó para evaluar la eficiencia de cada segmento vial, utilizando las variables presentadas en la Tabla 5. Los análisis se realizaron utilizando el código MaxDEA, RRCC (2014).

3.9.1. Respuesta sísmico-operativa de la red vial

Los valores de eficiencia obtenidos para la red en condiciones de tráfico típicas y los valores del índice de eficiencia sísmico-operativa EST, para sismo de falla normales $Tr=475$ años y $Tr=2475$ años, y el sismo de subducción $Tr=475$ años se representan como mapas de eficiencia sísmica en la Figura 54. En estos mapas, los segmentos con valores de índice EST más bajos coinciden con aquellos con un aumento en el tiempo de viaje y una reducción en la velocidad en los modelos de tráfico.

Se observaron algunas diferencias en la respuesta de la red en función de la ubicación geotécnica de los segmentos. Una de ellas fue que los tramos de rutas ubicados en suelo blando, como las Zonas IIIa y IIIb, operan de manera menos eficiente tanto para escenarios de sismos normales como de subducción, mientras que se espera que las rutas con segmentos en las Zonas I y II operen con una eficiencia de más del 80%. Este resultado es predecible en términos de respuestas del sitio, ya que se esperan grandes amplificaciones y daños en suelos blandos. Sin embargo, también se encontraron bajas eficiencias asociadas a características del diseño de la red, como la capacidad de los tramos y los sistemas de control de tráfico en las intersecciones, Figura 54. Los valores más bajos del índice EST se obtuvieron en los tramos de baja capacidad (1 o 2 carriles), en las áreas de suelo blando. En estas áreas hay muy pocos tramos de alta capacidad, la mayoría de las intersecciones están controladas por semáforos y hay pocos puentes o pasos elevados para facilitar la continuidad de los flujos. Por lo tanto, se encontró que un efecto combinado de la respuesta esperada del sitio y el diseño de la red influía en el desempeño después de un escenario sísmico extremo. Por otro lado, se obtuvieron valores altos del índice EST principalmente para los segmentos en la Zona I. En esta área, no se esperan amplificaciones del movimiento del suelo y por lo tanto la mayoría de las estructuras mostrarán un mejor comportamiento sísmico. Además, la red vial de la Zona I cuenta con un mayor número de avenidas, puentes, pasos elevados y enlaces de alta capacidad que permiten que el tráfico fluya con continuidad.

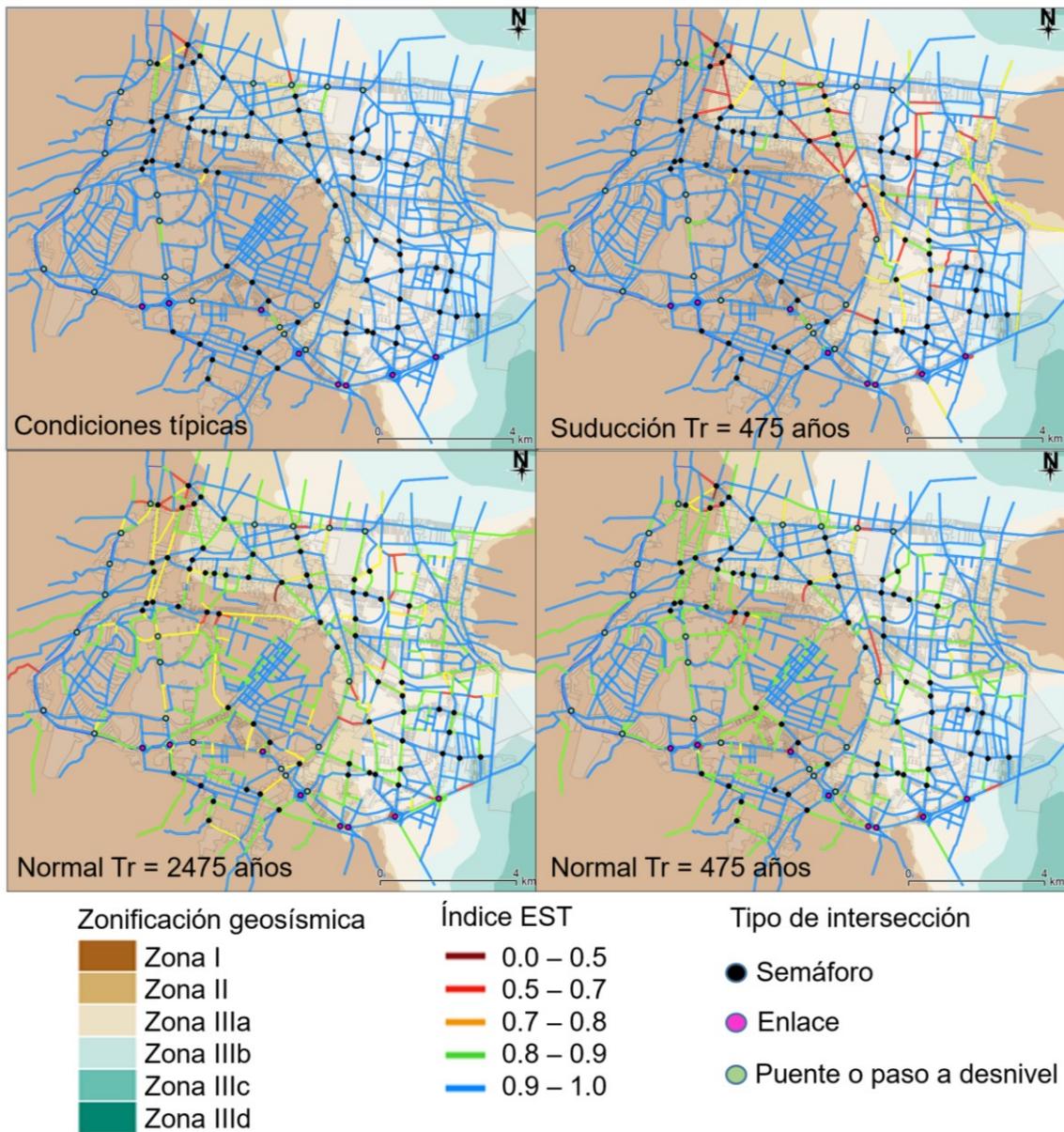


Figura 54. Mapas de eficiencia sísmica para los escenarios estudiados.

Los hallazgos muestran una fuerte dependencia del desempeño de la red de transporte en el contenido de frecuencia del sismo, que está directamente asociado con el mecanismo sismogénico (es decir, falla normal o subducción). Esto es claro cuando se comparan mapas de desempeño sísmico para sismos normales y de subducción para el mismo período de retorno, $Tr=475$ años. En el primer caso, la eficiencia se ve afectada en un área más extensa, mientras que, en el segundo, el número de segmentos afectados es menor, pero la reducción del índice EST es más significativa. La influencia de la magnitud del sismo también se registró en el modelo de eficiencia, como se observa en los mapas para sismos normales $Tr=475$ años y $Tr=2475$ años, Figura 54. En ambos casos los impactos se concentran en las mismas ubicaciones y segmentos. Sin embargo, en el caso del evento $Tr=2475$ años, la reducción en el índice EST es significativamente mayor.

3.9.2. Fronteras de eficiencia sísmico-operativa de la red

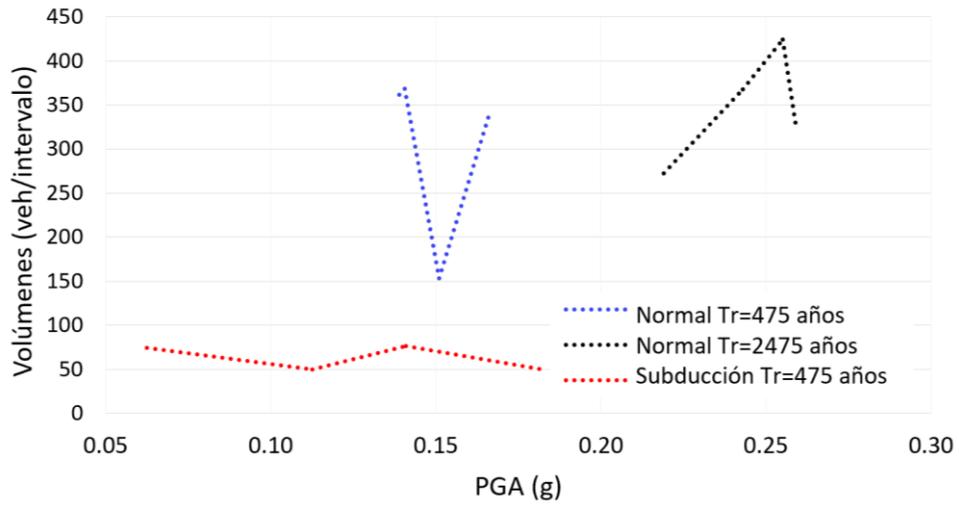
Como parte del modelo se desarrolló un conjunto de curvas o fronteras sísmico-operativa, las cuales relacionan las variables de entrada y salida, para todas las DMU con índice EST igual a 1. Estas relaciones también se confirmaron mediante la estimación de los coeficientes de correlación R^2 presentados en la Tabla 21. A partir de estos valores, en el caso de eventos de fallas normales, se identificó la correlación más fuerte entre aceleraciones espectrales, S_a , y la capacidad, la velocidad real y el tiempo de viaje. Para los sismos de subducción, se observó una alta correlación entre la aceleración máxima del suelo y la espectral con la velocidad y los volúmenes de tráfico.

Tabla 21. Coeficiente de correlación, R^2 , relacionando variables sísmicas y de comportamiento de tráfico

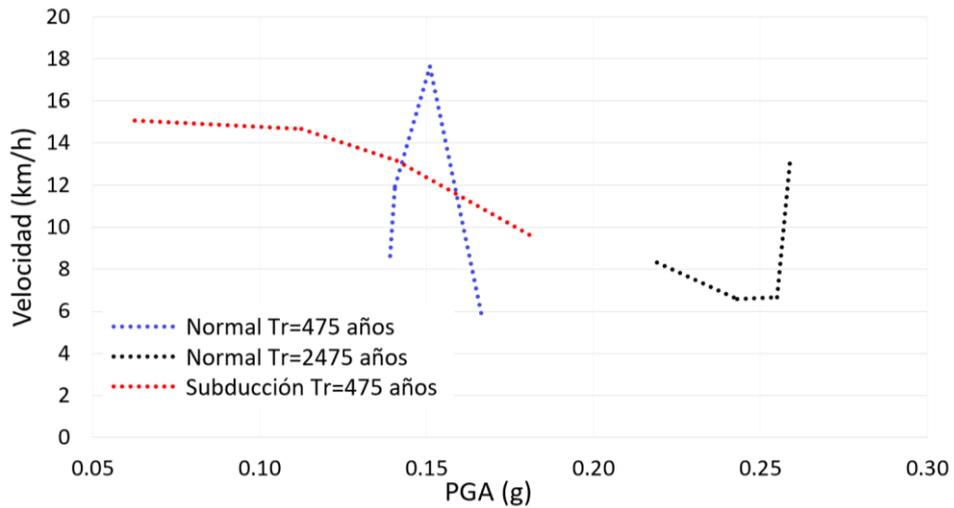
	Sismo normal Tr = 475 años			Sismo normal Tr = 2475 años			Sismo de subducción Tr = 475 años		
	PGA	Sa _{0.1}	Sa _{0.3}	PGA	Sa _{0.1}	Sa _{0.3}	PGA	Sa _{0.1}	Sa _{0.3}
Capacidad	0.429	0.681	0.687	0.008	0.011	0.785	0.456	0.426	0.402
Velocidad	0.413	0.642	0.699	0.000	0.002	0.769	0.692	0.631	0.455
Tiempo de viaje	0.552	0.633	0.856	0.035	0.010	0.882	0.334	0.277	0.109
Longitud de cola	0.113	0.036	0.015	0.062	0.122	0.010	0.315	0.256	0.098
Volúmenes	0.481	0.036	0.490	0.007	0.245	0.680	0.769	0.716	0.565

Dado que los edificios de 1 a 3 pisos comprenden más del 90% de las estructuras en el área de estudio, la intensidad sísmica se presenta en términos de PGA y S_a a 0.3 s. La Figura 55 muestra las fronteras de eficiencia sísmica que relacionan cada parámetro de tráfico con las aceleraciones máximas del terreno, para sismos normales, con periodo de retorno $Tr=475$ años y $Tr=2475$ años, y para un sismo de subducción $Tr=475$ años. Las fronteras obtenidas para el caso estudio, destacan las diferencias en el comportamiento esperado del tráfico dentro del área de estudio cuando ocurren sismos con diferente contenido de frecuencia, donde las variables de tráfico muestran patrones particulares para cada escenario sísmico analizado. En el caso de eventos de subducción, se espera que el tráfico se distribuya a lo largo de más segmentos de la red que muestren valores más bajos de volúmenes de tráfico. En el caso de eventos normales, se espera que los volúmenes de tráfico se concentren y, por lo tanto, sean mayores. Las velocidades alcanzadas en el escenario de subducción muestran un patrón de disminución cuando aumentan los movimientos del suelo. Sin embargo, para eventos normales, el patrón de velocidades muestra picos y valles que pueden estar relacionados con las diferencias de la topología de la red en cada zona geo sísmica. Los valores de tiempo de viaje son más bajos en el escenario de subducción con un patrón de disminución en comparación con el crecimiento de los movimientos del suelo. Los tiempos de viaje siguen un comportamiento no lineal en escenarios normales y se espera que sean mayores que en el caso de subducción. La capacidad promedio de los segmentos, durante un intervalo de

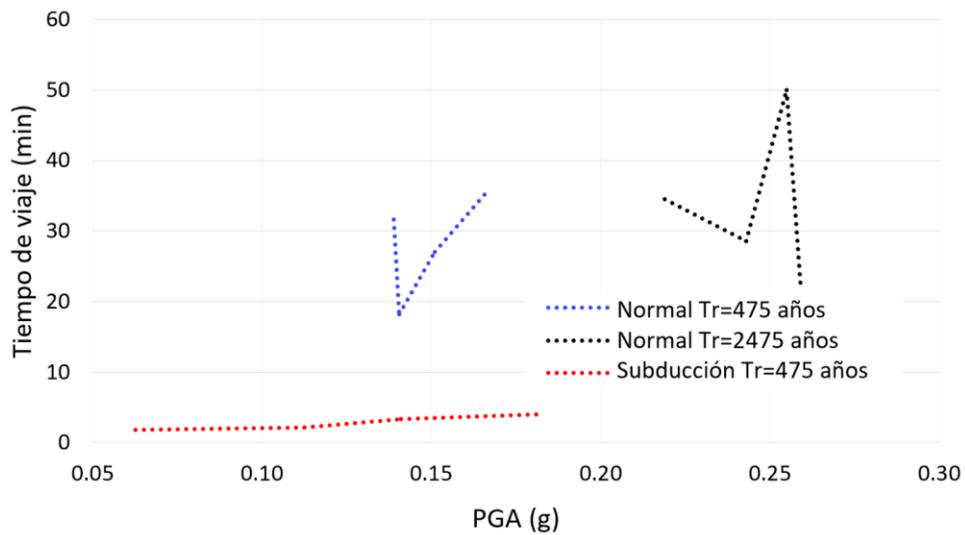
tiempo de 10 minutos, tiende a disminuir a medida que aumenta la intensidad sísmica, mostrando diferentes patrones de subducción y eventos normales.



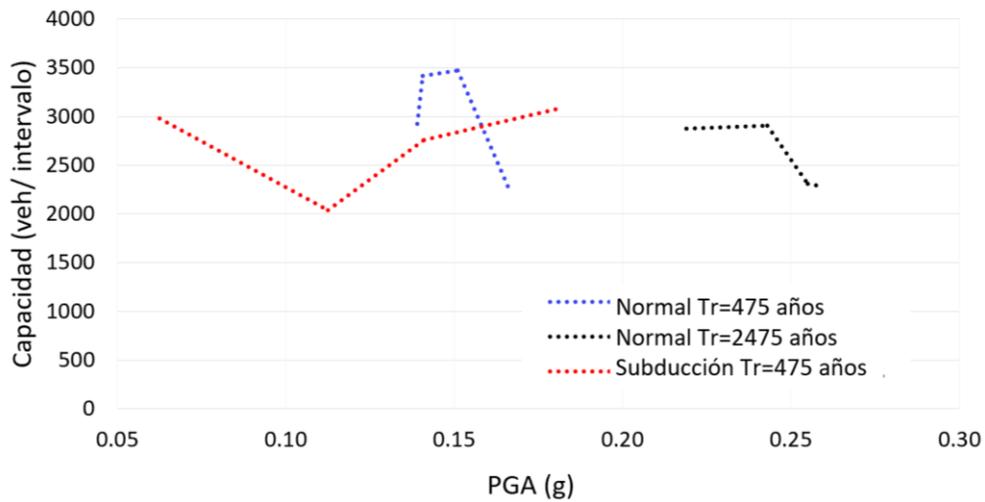
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 55. Fronteras de eficiencia sísmica entre (a) Volúmenes-PGA, (b) Velocidad-PGA, (c) Tiempo de viaje-PGA, (d) Capacidad-PGA.

La Figura 56 muestra las curvas en términos de aceleraciones espectrales S_a a 0.3 s. De acuerdo con las curvas obtenidas, después de un evento de subducción, se espera que los segmentos de la Zona I y IIIa sirvan a un mayor número de vehículos que los de las Zonas II y IIIb, sin embargo, las velocidades alcanzadas son mayores en las Zonas I y II, por lo que los segmentos en estas experimentan tiempos de viaje más cortos que en otras zonas. En el caso de sismos normales con periodo de retorno $Tr=475$ años, se esperan mayores volúmenes de tráfico dentro en las vialidades de la Zona I y II. Sin embargo, las Zonas I y IIIa muestran valores mayores de velocidad y tiempo de viaje. Por otro lado, se observan algunas variaciones con el aumento de magnitud, ya que el escenario sísmico normal $Tr=2475$ años, se presenta una disminución en las velocidades a lo largo de las Zonas II, IIIa y IIIb, y mayores tiempos de viaje en las mismas zonas que en la Zona I.

De acuerdo con estos resultados, los segmentos ubicados en las Zonas IIIa y IIIb eran más vulnerables a escenarios de sismos fuertes que en las Zonas I y II. Además, se encontró que la red estudiada es vulnerable principalmente a sismos de fallas normales, cuyos impactos fueron más extensos, afectando a un mayor número de vialidades, que los de eventos de subducción.

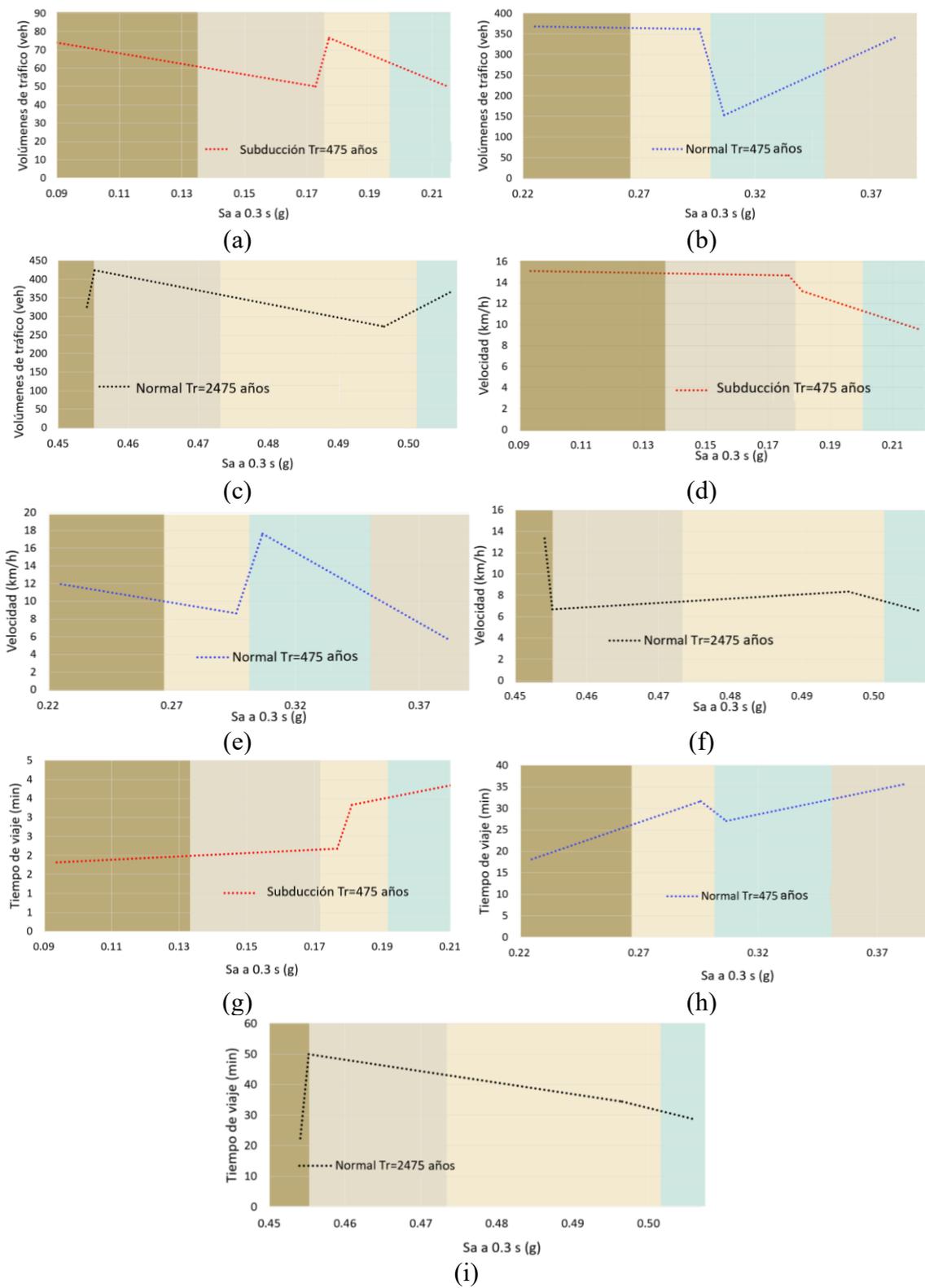


Figura 56. Fronteras de eficiencia sísmica en función de la aceleración espectral S_a a 0.3 s, para sismos normales y de subducción.

3.10. Comentarios

La metodología propuesta en la investigación se aplicó a la red vial ubicada en una zona del sur de la Ciudad de México. A partir de los resultados del caso estudio se observó que, para escenarios de sismos extremos, la funcionalidad y continuidad de la red depende de la interacción de las condiciones del suelo, las características del entorno de edificios y la capacidad de la red vial. En el caso de estudio, se demostró que la red vial es más vulnerable en áreas de suelo blando y en zonas de transición, donde los impactos en las condiciones del tráfico fueron más pronunciados, ya que los daños y cierres viales eran altamente probables. Además, los procedimientos de cierre de calles y avenidas crean patrones de comportamiento de tráfico más adversos en zonas donde la red tienen poca capacidad, las intersecciones están controladas por semáforos y no hay pasos elevados ni túneles. Por lo tanto, existe un efecto combinado entre la vulnerabilidad estructural y la vulnerabilidad de la red asociada con su topología que incrementa la vulnerabilidad de la red de transporte frente a sismos de gran magnitud.

El modelo de eficiencia también permitió determinar la influencia del contenido de frecuencia y la magnitud del evento en la red, a través del índice de eficiencia sísmico-operativo. En el caso de estudio, se observó que los eventos de fallas normales causaron un daño mayor, perturbando el tráfico en las zonas de suelos blandos principalmente.

La metodología y el modelo de eficiencia presentados introducen un procedimiento y una herramienta cuantitativa para evaluar la vulnerabilidad y el desempeño operativo de las redes de transporte urbano. La identificación de los elementos vulnerables en las redes urbanas y los efectos potenciales de los peligros geo sísmicos son vitales en la planificación de áreas urbanas sostenibles y resilientes. Las futuras líneas de investigación podrían abordar procedimientos de modelado más precisos, para determinar una distribución espacial detallada de los movimientos del suelo en un área, lo que podría reducir las incertidumbres en el modelado de escenarios de daños. Al extender el modelo para incluir redes de metro, sistemas ferroviarios y viajes que utilizan modos de transporte no motorizados, también sería posible una comparación de la eficiencia sísmica entre modos de transporte.

Capítulo 4 CASO DE ESTUDIO 2: RESPUESTA SECUENCIAL SISMO-TSUNAMI EN TERRAPLENES CARRETEROS COSTEROS, MANZANILLO

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta la aplicación del enfoque descrito en el Capítulo 1, que tiene como objetivo modelar los efectos secuenciales de sismos y tsunamis en infraestructuras de transporte ubicadas en las zonas urbanas costeras. El modelo secuencial se aplica a un estudio de caso en la ciudad de Manzanillo, donde se analiza la respuesta de una sección de la red vial urbana. Los registros de movimiento del suelo corresponden a los del terremoto-tsunami de Manzanillo de octubre de 1995.

4.2. Caracterización de la zona de estudio

Manzanillo es una ciudad de la Costa del Pacífico mexicano, donde se ubica el puerto comercial más importante del país. La zona es sísmicamente compleja debido a una triple unión entre las placas de subducción Cocos y Rivera que se mueven hacia y debajo del continente en la Placa Norteamericana, Figura 57. Por lo tanto, la ciudad se ha visto afectada por varios terremotos importantes en el último siglo, (EQE International 1997; Ovando y Romo 2004; Domínguez-Reyes et al., 2017). En 1995 un terremoto $M_w = 8$ causó daños importantes principalmente en la zona costera de la ciudad, donde se reportaron derrumbes de edificaciones y se observó licuefacción de suelos arenosos saturados en varios sitios del Puerto de Manzanillo.

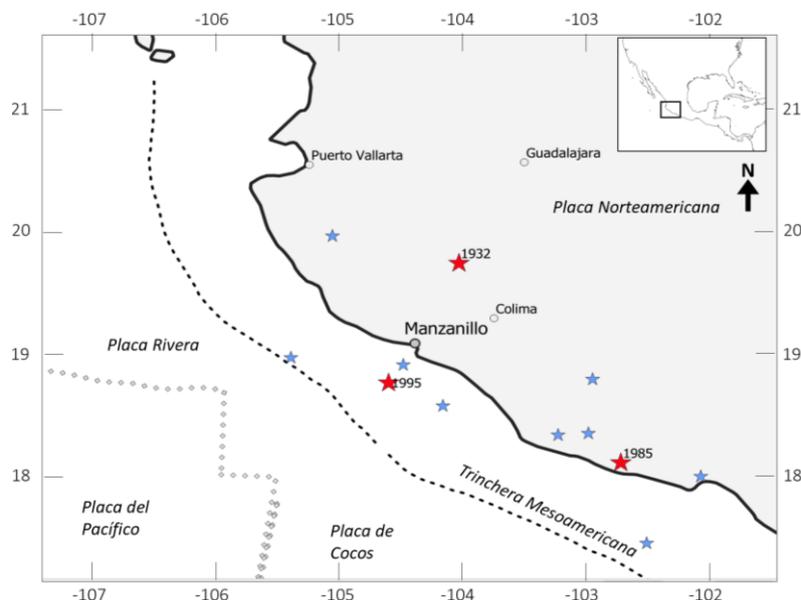


Figura 57. Sismicidad en la zona de Manzanillo y alrededores. Las estrellas azules indican los sismos de magnitud $7.0 \leq M < 8.0$. Las estrellas rojas indican sismos de magnitud $M \geq 8$. (Modificado de Dominguez-Reyes et al. 2017).

Tanto la zona urbana de Manzanillo como el puerto comercial están conectados con el resto de país a través de infraestructura de transporte como la autopista Colima-Manzanillo, Manzanillo-Puerto Vallarta y Cuyutlán-Manzanillo. En la Figura 58 se

presenta la infraestructura de transporte localizada en la zona, incluyendo el puerto comercial (API Manzanillo), el puerto turístico, las autopistas principales y el aeropuerto internacional. La Figura 59 muestra algunos ejemplos del tipo de terraplenes encontrados en la zona.

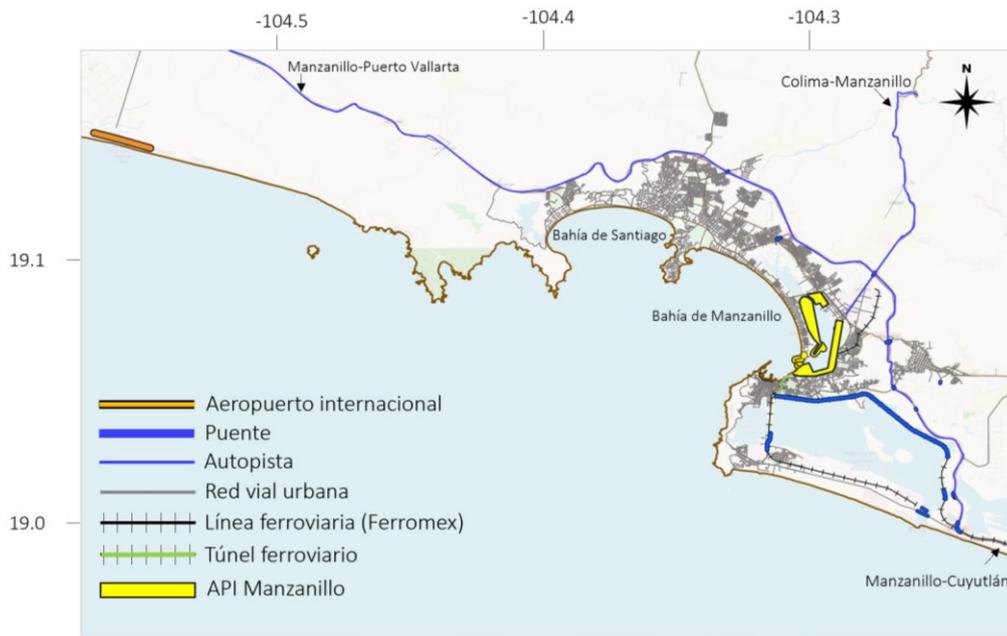


Figura 58. Infraestructura de transporte en la zona urbana y alrededores de Manzanillo.

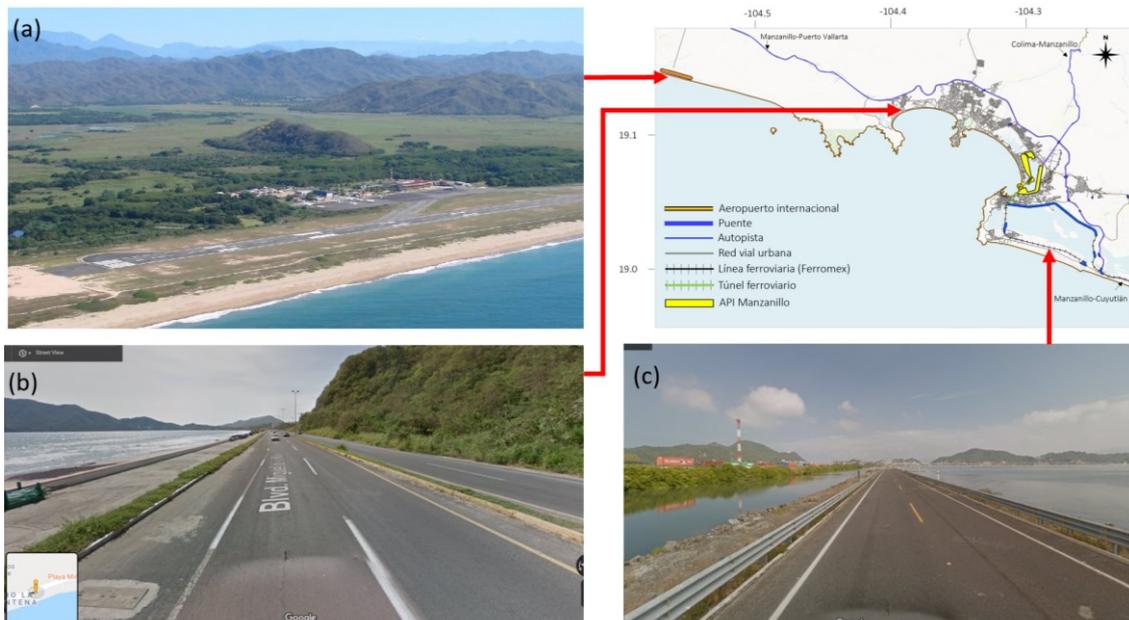


Figura 59. Terraplenes localizados en la zona. a) Pistas del aeropuerto internacional, b) Blvd. Miguel de la Madrid, c) Viaducto carretero y ferroviario API Manzanillo

4.2.1. Caracterización sísmica y geotécnica

Manzanillo se encuentra en la parte norte de la cadena montañosa Sierra Madre del Sur. De acuerdo con estudios geológicos presentados por Domínguez -Reyes et al. (2017), en la región se pueden encontrar materiales como intrusiones graníticas, afloramientos ígneos extrusivos y depósitos de piedra caliza. Además, se encuentran depósitos de arcilla y materiales orgánicos en las dos lagunas de agua salada de la zona. Los depósitos de arena se encuentran a lo largo de la costa de la ciudad. Alrededor de los depósitos ígneos se encuentran depósitos aluviales compuestos por grava, arena y limo, Figura 60.

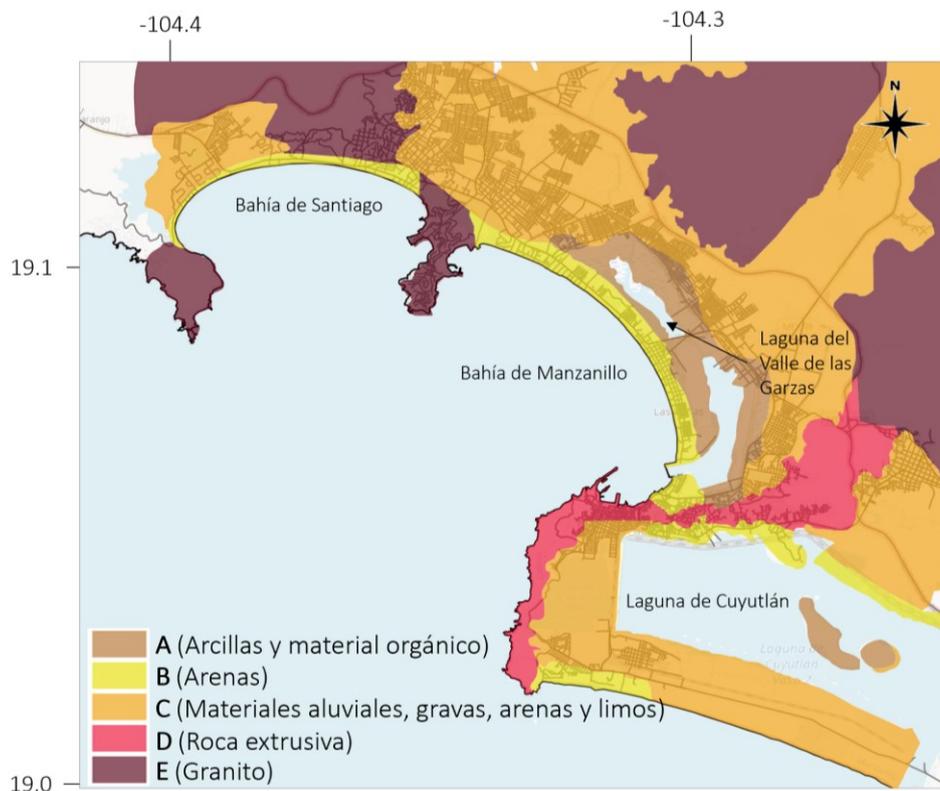


Figura 60. Caracterización geotécnica en la zona de Manzanillo. (Modificado de Domínguez-Reyes et al. 2017)

Domínguez-Reyes et al. (2017), presentan una caracterización *in situ* de algunas propiedades dinámicas como velocidades de onda de cortante basada en exploraciones geofísicas en cinco puntos de la ciudad. Los sitios de exploración y perfiles de velocidad de onda de cortante reportados se muestran en las Figuras 61 y 62.

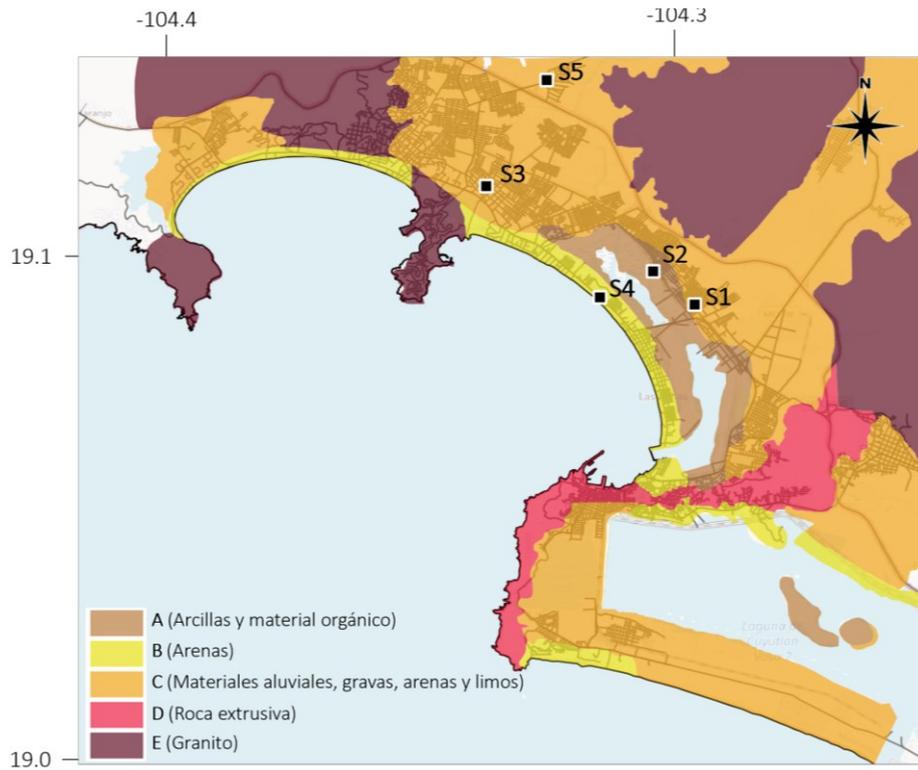


Figura 61. Sitios de exploraciones. (Modificado de Domínguez-Reyes et al. 2017)

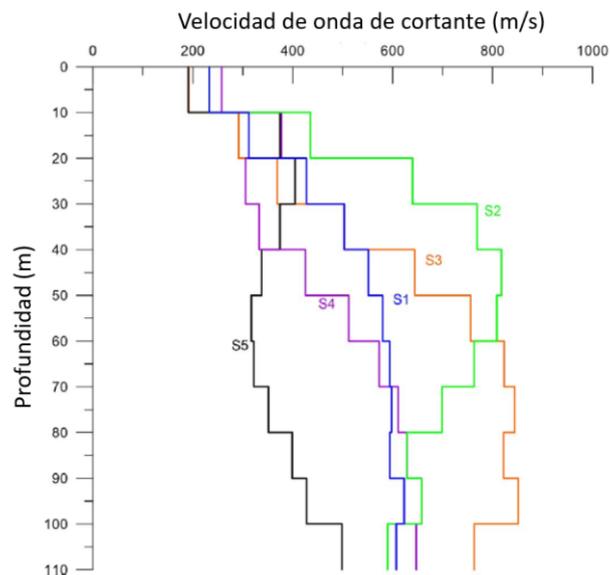


Figura 62. Perfiles de velocidad de onda de cortante reportados por Domínguez-Reyes et al. (2017). (Modificado de Domínguez-Reyes et al. 2017)

Los estados del Pacífico mexicano Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca están situados en la zona de subducción entre las placas Rivera y Cocos con la placa Norteamericana. En esta zona la tasa de desplazamiento en las superficies de contacto es de cerca de 50 a 70 mm por año, DeMets et. al. (1994), por lo que la probabilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud es alta. En zonas de subducción como en este

caso, existe el potencial de generación de tsunamis dados los desplazamientos verticales que llegan a generarse en el fondo del océano, los cuales pueden ser de varios metros y extenderse por áreas de decenas de miles de kilómetros cuadrados. Históricamente se han registrado numerosos sismos de gran magnitud, causando movimientos en el terreno de gran intensidad tanto en la región continental como en la línea de costa, así como daños por tsunami en las costas. De acuerdo con los registros históricos, en esta zona del Pacífico mexicano la altura de la ola asociada a los tsunamis ha alcanzado los 10 m en sitios específicos. Los eventos tsunamigénicos ocurridos en esta región se caracterizan por ser de magnitudes $M_w \geq 8$, entre ellos se encuentran el sismo de 1787, el evento de 1932 en Jalisco, el sismo de 1985 en Michoacán y el evento de 1995 en Jalisco y Colima.

4.3. Modelo de respuesta secuencial sismo-tsunami

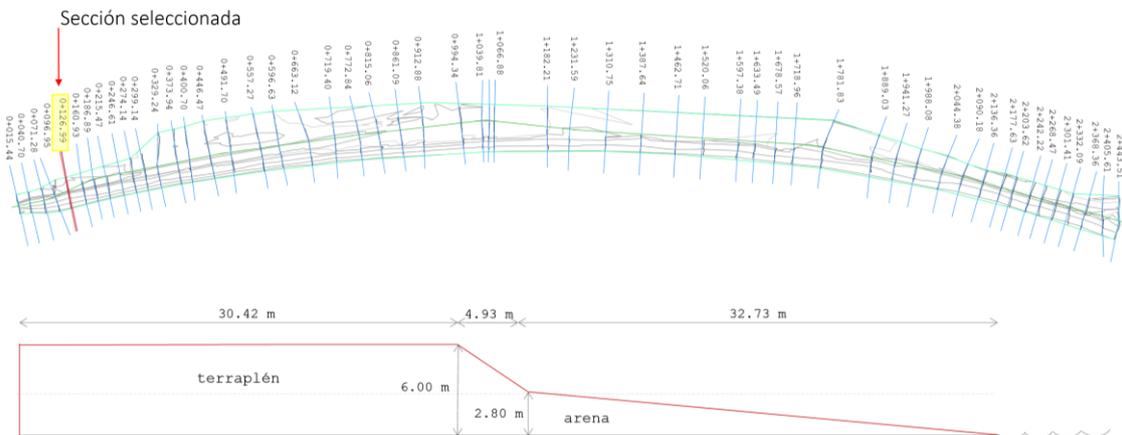
El modelo propuesto está estructurado en tres etapas que relacionan los modelos de respuesta sísmica suelo-estructura y los de generación y propagación del tsunami. Como se explicó en el Capítulo 1, la primera etapa consiste en el análisis numérico de la respuesta sísmica de la estructura, la siguiente etapa corresponden al modelo de generación y propagación de la ola en la parte oceánica y hasta la costa, la etapa final se refiere al análisis numérico de la respuesta de la estructura, dado un estado de deformación previo inducido por la excitación sísmica, ante un nuevo estado de esfuerzos inducido por las presiones hidrodinámicas de la inundación. Para el desarrollo del modelo fue necesario realizar análisis complementarios como el de respuesta de sitio y el de estimación del potencial de licuación, explicados a continuación.

Se analizó el comportamiento de un terraplén localizado en un tramo del Boulevard Miguel de la Madrid en la zona urbana de Manzanillo, Figura 63. El sitio está localizado en suelo predominantemente arenoso con las características de velocidad de onda de cortante correspondiente a la exploración S4, Figura 62.



Figura 63. Localización de tramo carretero en estudio

Las características geométricas del terraplén fueron obtenidas a través de un levantamiento realizado en un tramo de 2 km, a partir del cual se generaron 54 secciones transversales de la carretera urbana. La sección mostrada en la Figura 64 se seleccionó para llevar a cabo el análisis secuencial dada su importancia en la conectividad entre la zona centro y la zona poniente de la ciudad.



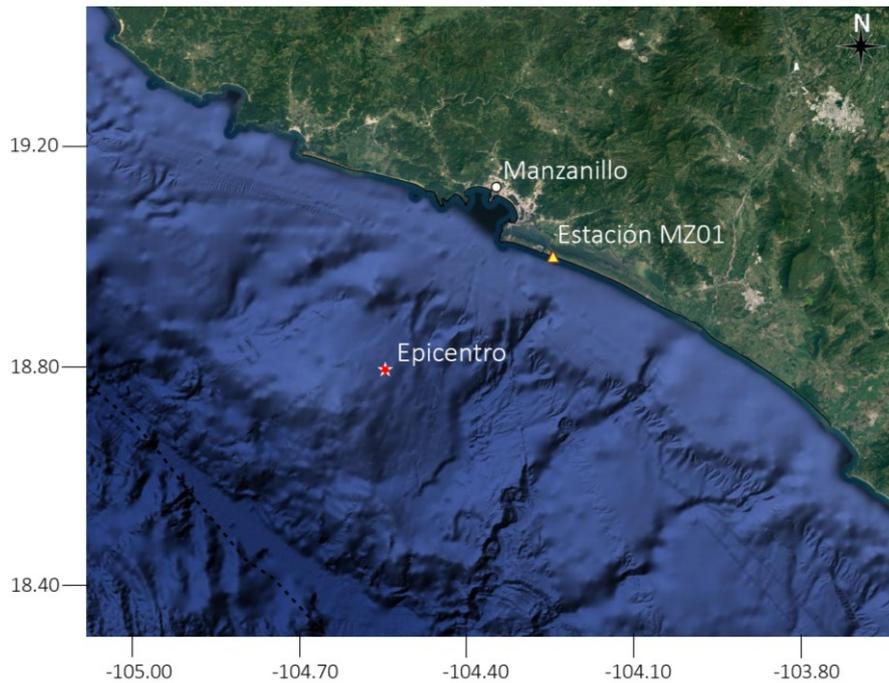


Figura 65. Localización de la Estación Sísmica MZ01 y del epicentro del sismo de Manzanillo de 1995 ($M_w=8$)

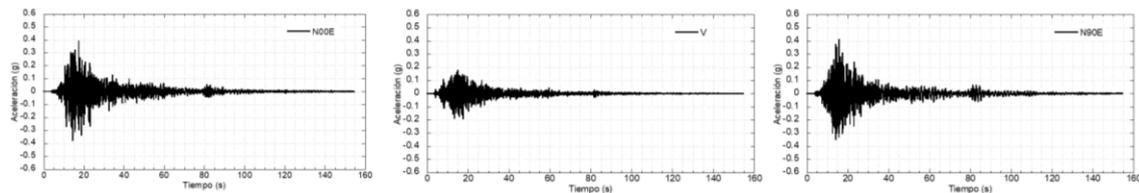


Figura 66. Historias de aceleraciones del registro de la estación MZ01 durante el sismo de Manzanillo 1995 ($M_w=8.0$)

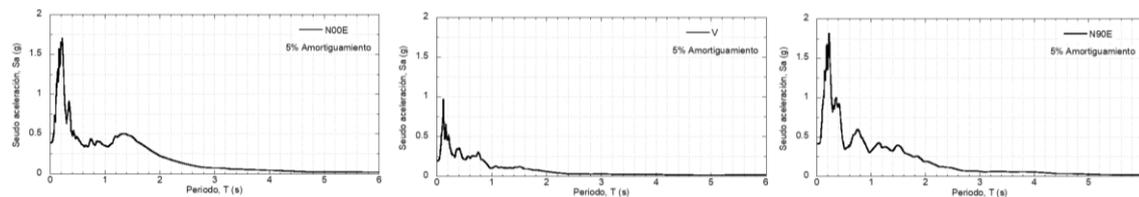


Figura 67. Espectro de respuesta del registro de la estación MZ01 durante el sismo de Manzanillo 1995 ($M_w=8.0$)

Para realizar el análisis de respuesta sísmica se seleccionó el registro de la componente N90E, debido a que es la componente que presenta las mayores aceleraciones y pseudo aceleraciones. La historia de aceleraciones, fue corregida por línea base para evitar que se presenten velocidades o desplazamientos residuales al terminar el movimiento, los cuales podrían ser confundidos con desplazamientos permanentes. Las Figuras 68 y 69 presentan las historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, antes y después de la corrección, respectivamente.

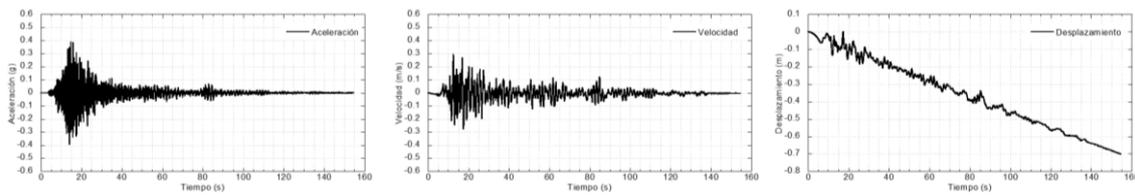


Figura 68. Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos sin corrección por línea base

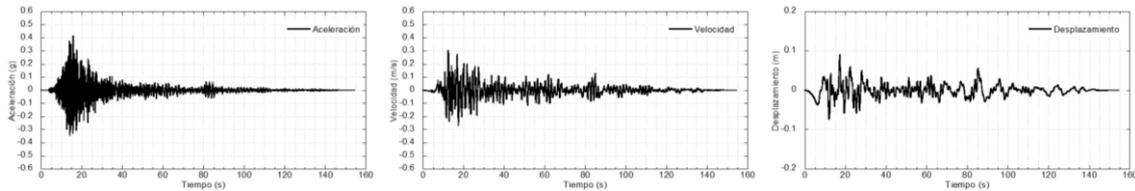


Figura 69. Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos con corrección

4.3.2. Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio fue realizado utilizando la historia de aceleraciones N90E, para ello el registro se deconvolvió y propagó a través del perfil de suelo del sitio S4, realizando un análisis determinista unidimensional, Figura 70. De esta manera se obtiene una primera aproximación de la amplificación dinámica esperada en el depósito de suelo, lo cual es útil previo al análisis no lineal en el dominio del tiempo. Así mismo este análisis permite obtener los esfuerzos cortantes dinámicos máximos en el suelo, que se utilizan en los métodos simplificados para estimar el potencial de licuación.

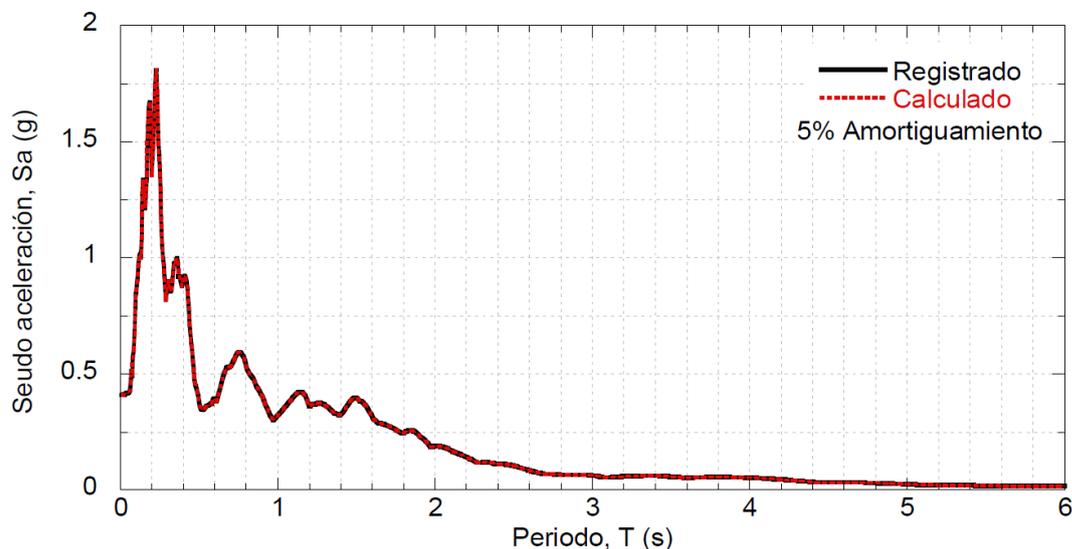


Figura 70. Comparación entre el espectro registrado y el calculado después de la propagación del sismo deconvuelto.

Debido a que no se han realizado pruebas dinámicas de laboratorio en muestras recuperadas cerca del área de estudio, se consideró adecuado utilizar las curvas de amortiguamiento y relación de módulo de rigidez al cortante presentadas por Seed e Idriss (1970) para arenas, Figuras 71 y 72.

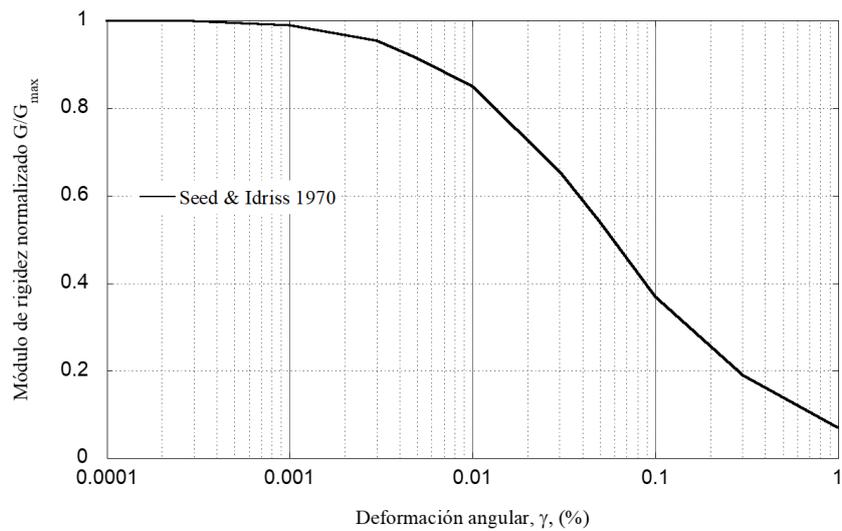


Figura 71. Curvas de degradación de la rigidez normalizada G/G_{max}

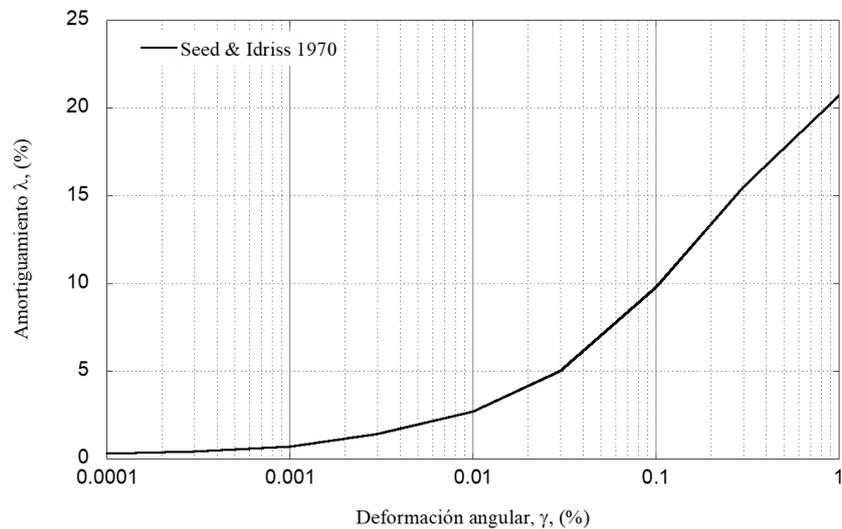


Figura 72. Curvas de amortiguamiento, λ

Con base en la historia de esfuerzos cortantes dinámicos, se obtuvo el esfuerzo cortante equivalente, con lo cual se toma en cuenta la intensidad del movimiento sísmico, su duración, y la variación de esfuerzo cortante con la profundidad, Figura 73. Para fines prácticos, el número equivalente de ciclos de esfuerzo cortante, τ_{av} , se puede estimar como el 65% del esfuerzo máximo, τ_{max} , Seed y Idriss (1971).

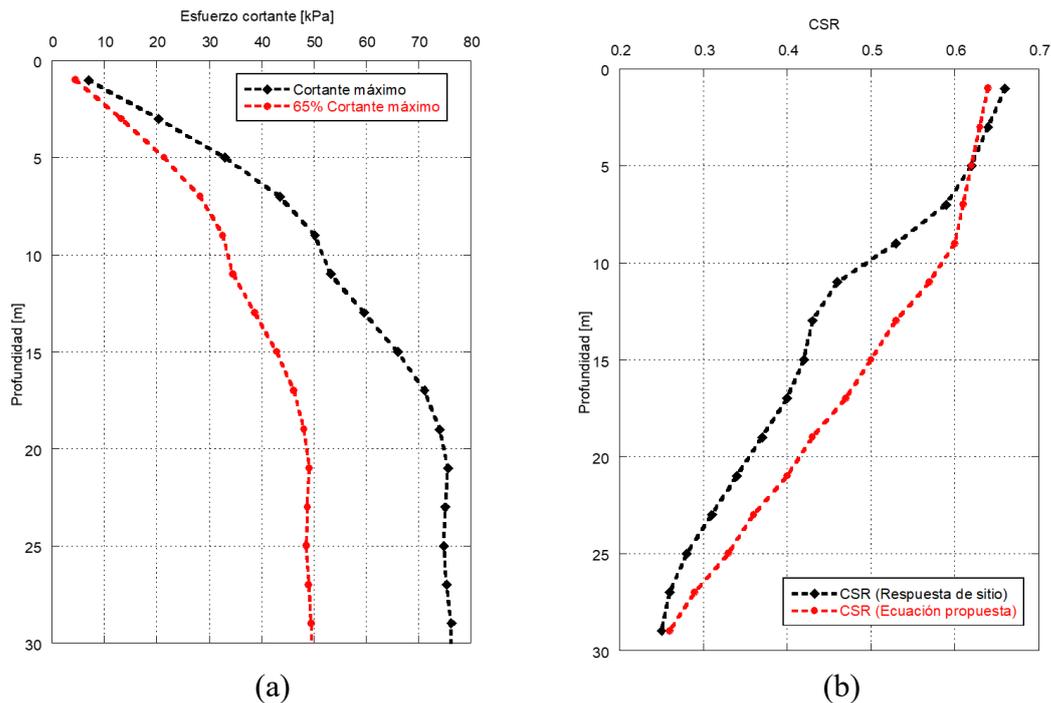


Figura 73. (a) Perfil de esfuerzo cortante máximo para el sitio en estudio y (b) Perfil de cociente de esfuerzo cíclico empleando la ecuación propuesta por Seed e Idriss (1971) y el análisis de respuesta de sitio.

Dado que número de ciclos de esfuerzo equivalente, N_{eq} , depende de la magnitud y duración del sismo, se aplicó el procedimiento de ponderación propuesto por Seed et al. (1975), para establecer el número uniforme de ciclos de esfuerzo cortante, N_{eq} , (con una amplitud del 65% del esfuerzo cortante cíclico máximo, e.g. $\tau_{cyc}=0.65\tau_{max}$) que producirían una presión de poro equivalente, donde el número de ciclos de esfuerzo cortante uniforme incrementa con el incremento de la magnitud del sismo. Para el caso de análisis se consideró una magnitud $M_w=8.0$, que corresponde a un número equivalente de ciclos de esfuerzo cortante uniforme igual a 21, Figura 74.

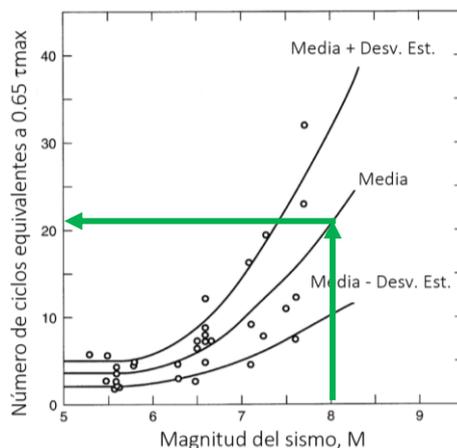


Figura 74. Número equivalente de esfuerzos cíclicos uniformes, N_{eq} , para diferentes magnitudes de sismos, Martin et al. (1975).

4.3.3. Caracterización de la resistencia a licuefacción

El potencial de licuación en el depósito de suelo se evaluó utilizando el criterio de esfuerzos cíclicos (Seed e Idriss 1971; Kramer 1996). Uno de los métodos más utilizados para evaluar la resistencia a la licuación está basado en pruebas de penetración estándar, SPT, por sus siglas en inglés. Este criterio considera la obtención del cociente de resistencia cíclica, CRR, a partir del número de golpes de la prueba SPT, corregida a un 60% de la energía, N_{60} . Así, de acuerdo con el perfil de velocidades de onda de cortante del sitio en estudio, se estimó el número de golpes, N_{60} , utilizando las expresiones mostradas en la Tablas 23 y 24. De acuerdo con este criterio, se obtuvo un valor de 27 en el número de golpes promedio, $(N_1)_{60}$, para los primeros 10 m de profundidad, Figura 75.

Tabla 23. Correlaciones para la estimación de velocidad de onda de cortante.

Referencia	Correlación	N_{60}
Pitilakis et al 1999	$V_s = 145N_{60}^{0.178}$	$N_{60} = (V_s/145)^{(1/0.178)}$
Dickmen 2009	$V_s = 73N^{0.33}$	$N = (V_s/73)^{(1/0.33)}$
Imai 1977	$V_s = 80.6N^{0.331}$	$N = (V_s/80.6)^{(1/0.331)}$

N , número de golpes de la prueba SPT.

N_{60} , número de golpes corregido a un 60% de la energía.

Tabla 24. Número de golpes

Profundidad		Pitilakis et al. (1999)	Dickmen (2009)		Imai (1977)	
De [m]	a [m]	N_{60}	N	N_{60}	N	N_{60}
0.00	10.00	25	45	32	33	24
10.00	20.00	214	145	103	106	75
20.00	30.00	65	76	54	56	40

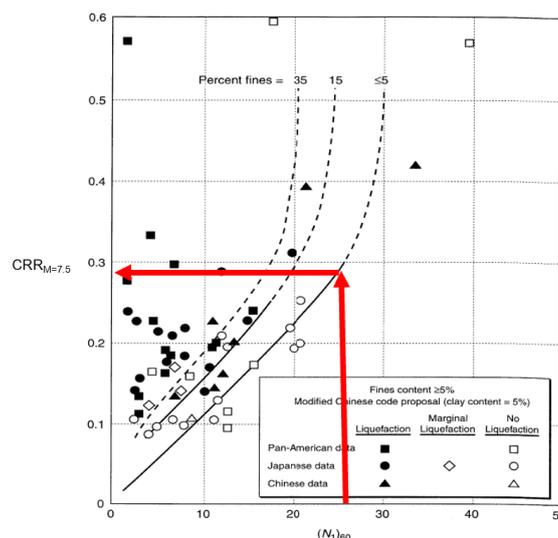


Figura 75. Relación entre el cociente de resistencia cíclica que causa licuación y los valores de $(N_1)_{60}$ para arenas para sismos de magnitud $M=7.5$.

A continuación, se aplicó un factor de corrección por magnitud del sismo, a partir de los valores mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25. Corrección de la relación $CRR_M/CRR_{M=7.5}$ por magnitud del sismo.

Magnitud, M	$CRR_M / CRR_{M=7.5}$
5 ¼	1.50
6	1.32
6 ¾	1.13
7 ½	1.00
8 ½	0.89

Para el caso en estudio el cociente $CRR_M/CRR_{M=7.5}$ corresponde a 0.94. Por lo que, el cociente de resistencia cíclica, CRR, que caracteriza el sismo resultó 0.263. Rauch et al. (1997), aproximaron la curva correspondiente a arenas limpias, a través de la siguiente expresión:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10*(N_1)_{60}+45]^2} - \frac{1}{200} \quad (26)$$

Esta ecuación es válida para $(N_1)_{60} < 30$, dado que se considera que suelos con $(N_1)_{60} \geq 30$, son no licuables (Youd 2001). Con ello el cociente de resistencia cíclica para el caso analizado, $CRR_{7.5}$ es igual a 0.34. Por otro lado, de acuerdo con Andrus y Stokoe (1997) al factor de corrección por magnitud MSF es igual a 0.85:

$$MSF = \left(M_w / 7.5 \right)^{-2.56} \quad (27)$$

4.3.3.1. Factor de seguridad

El factor de seguridad del terraplén se evaluó con base en el cociente de esfuerzo cíclico, CSR, derivado del análisis de respuesta de sitio. El cociente de resistencia cíclica, CRR, puede obtenerse empleando la aproximación de Raunch (1998), y el factor de corrección por magnitud, MSF, propuesto de Andrus y Stokoe (1997).

$$FS = \left(CRR_{7.5} / CSR \right) MSF \quad (28)$$

Como se observa en la Tabla 26, un resultado preliminar muestra que los primeros 10 m del perfil de suelo presentan potencial de licuación.

Tabla 26. Factor de seguridad ante licuación.

Profundidad. media (m)	CSR	CRR _{7.5}	MSF	FS
1.00	0.66	0.34	0.85	0.44
3.00	0.64	0.34	0.85	0.45
5.00	0.62	0.34	0.85	0.46
7.00	0.59	0.34	0.85	0.49
9.00	0.53	0.34	0.85	0.54
11.00	0.46	No licuable	0.85	>1.0
13.00	0.43	No licuable	0.85	>1.0
15.00	0.42	No licuable	0.85	>1.0
17.00	0.40	No licuable	0.85	>1.0
19.00	0.37	No licuable	0.85	>1.0
21.00	0.34	No licuable	0.85 <td >1.0	
23.00	0.31	No licuable	0.85	>1.0
25.00	0.28	No licuable	0.85	>1.0
27.00	0.26	No licuable	0.85	>1.0
29.00	0.25	No licuable	0.85	>1.0

4.3.4. Fase 1: Modelo de respuesta sísmica

La respuesta en el comportamiento sísmico de terraplén se analizó utilizando un modelo tridimensional de diferencias finitas, Figura 76. En el modelo se consideró una profundidad de 113 metros en el perfil de suelo, así como la exploración del sitio S4. Las Tabla 27 y 28 muestran las características consideradas para los estratos de suelo y el terraplén, respectivamente.

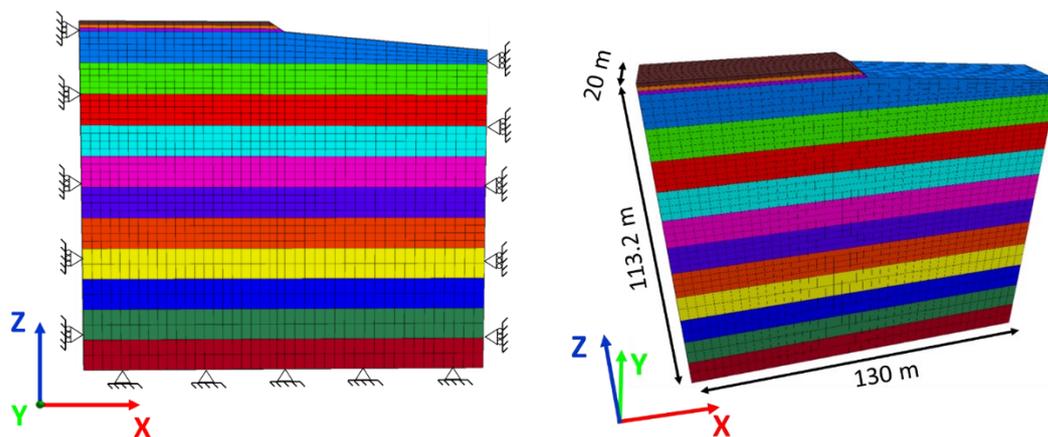
**Figura 76.** Condiciones de frontera del modelo tridimensional de diferencias finitas

Tabla 27. Propiedades del suelo en el modelo geotécnico

Profundidad (m)	Densidad (UTM)	Poisson	C (ton/m ²)	Φ (°)	Vs (m/s)	E (ton/m ²)	G (ton/m ²)	K (ton/m ²)
0-10	0.173	0.3	0.5	30	257	29759.08	11445.80	24799.23
10-20	0.173	0.3	0.5	35	377	64037.73	24629.90	53364.78
20-30	0.173	0.3	0.5	35	305	41913.40	16120.54	34927.84
30-40	0.173	0.3	0.5	35	332	49662.60	19101.00	41385.50
40-50	0.173	0.3	0.5	35	424	80999.99	31153.84	67499.99
50-60	0.173	0.3	0.5	35	510	117190.83	45073.39	97659.02
60-70	0.173	0.3	0.5	35	572	147416.24	56698.55	122846.86
70-80	0.173	0.3	0.5	38	610	167653.62	64482.16	139711.35
80-90	0.173	0.3	0.5	38	628	177693.91	68343.81	148078.26
90-100	0.173	0.3	0.5	38	656	193892.47	74574.03	161577.06
100-110	0.173	0.3	0.5	38	646	188026.17	72317.76	156688.47

Tabla 28. Propiedades del terraplén en el modelo geotécnico

Altura (m)	Densidad (UTM)	Poisson	C (ton/m ²)	φ (°)	Vs (m/s)	E (ton/m ²)	G (ton/m ²)	K (ton/m ²)
0-1.3	0.143	0.35	0.5	30	285	31393.30	11627.15	34881.44
1.3-2.6	0.143	0.35	0.5	30	264	26843.40	9942.00	29826.00
2.6-4.0	0.143	0.35	0.5	30	241	22293.60	8256.89	24770.67

El modelo de diferencias finitas fue calibrado con los resultados obtenidos del modelo unidimensional. Se desarrolló un modelo elástico-lineal tridimensional caracterizado con las propiedades derivadas del análisis lineal equivalente. Para realizar la calibración se generó un modelo de 110 m de profundidad y una sección transversal de 10m por 10m, Figura 77. El modelo histéretico con orientación práctica disponible en FLAC^{3D} denominado *sig3* fue empleado para considerar la variación del módulo de rigidez y de relación de amortiguamiento durante el evento sísmico. Este modelo considera un suelo ideal, en el cual el esfuerzo depende solo de la deformación y no del número de ciclos, con estas suposiciones una relación constitutiva incremental de la curva de degradación puede ser descrita por $\tau_n/\gamma = G/G_{max}$, donde τ_n es el esfuerzo cortante normalizado, γ es la deformación angular y G/G_{max} el módulo secante normalizado. El modelo *sig3* se define según la siguiente expresión:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{L-x_0}{b}\right)} \quad (29)$$

donde L es la deformación logarítmica definida como $L = \log_{10}(\gamma)$, y los parámetros a , b y x_0 , utilizados por el modelo *sig3*, se obtuvieron a través de un proceso iterativo, en el que las curvas de degradación del módulo se ajustaron con las ecuaciones del modelo. El amortiguamiento correspondiente está dado directamente por el ciclo de histéresis durante la carga cíclica. Para este caso, los parámetros a , b y x_0 toman los valores 1.014, -0.50 y

-1.25, respectivamente. La Figura 78, muestra una comparación entre las curvas empleadas en el modelo determinista unidimensional, Seed e Idriss (1991) y las obtenidas con el modelo sig3. La Figura 79 muestran una comparación entre los espectros calculados en la superficie con el análisis determinista unidimensional, el lineal equivalente y el análisis no lineal, donde se observa buena correspondencia entre los resultados.



Figura 77. Ilustración del modelo tridimensional de diferencias finitas desarrollado.

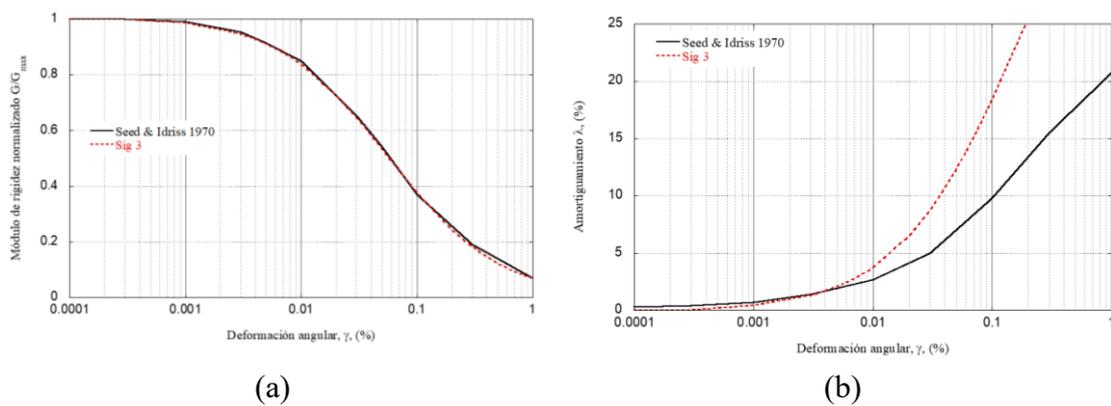


Figura 78. Comparación entre las curvas obtenidas en el modelo determinista (Seed & Idriss 1991) y aquellas obtenidas con el modelo sig3.

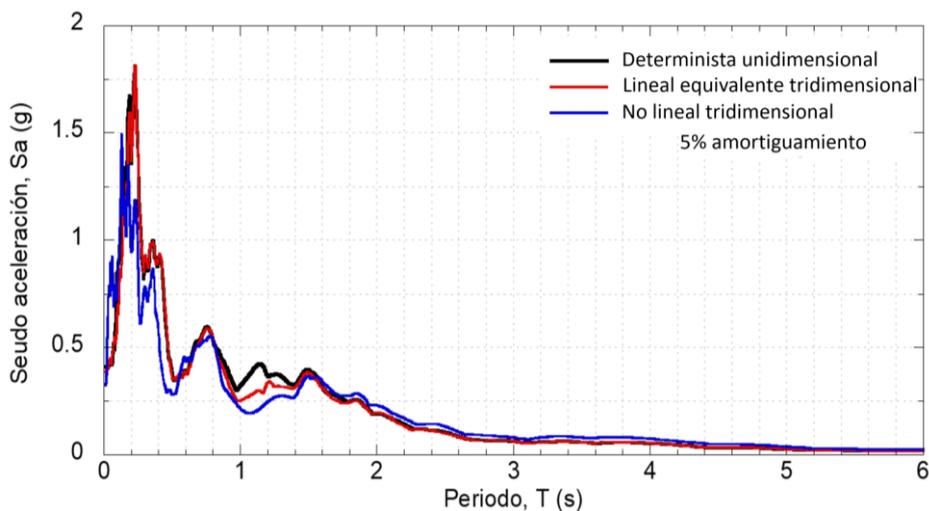


Figura 79. Espectros de respuesta en superficie calculados con los diferentes tipos de análisis.

El modelo de Finn/Byrne implementado en el código FLAC^{3D} se utilizó para modelar el potencial de licuación en el depósito de suelo, este modelo está definido por medio de la siguiente formulación:

$$(\Delta\epsilon_{vd})_{\frac{1}{2}ciclo} = C_1 \exp\left(-C_2 \left(\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}\right)\right) \quad (30)$$

donde $\Delta\epsilon_{vd}$ es el incremento de la disminución de volumen por medio ciclo de deformación; γ es la deformación angular, y C_1 y C_2 son constantes que pueden calcularse como:

$$C_1 = \frac{1}{2} C_1^c; C_2 = \frac{0.4}{C_1^c}; C_1^c = 87 (N_1)_{60}^{-1.25} \quad (31)$$

Estos parámetros se calcularon utilizando los valores promedio de $(N_1)_{60}$ que se presentan en la Tabla 30, para los primeros 10 metros de suelo y el terraplén.

Tabla 29. Coeficientes de modelo de Finn/Byrne empleados en el análisis tridimensional

Elemento	Cc1	C1	C2
Suelo (0 a 10 m)	0.14161	0.07081	2.82464
Terraplén (0 a 1.3 m)	0.08488	0.04244	4.71264
Terraplén (1.3 a 2.6 m)	0.12459	0.06230	3.21053
Terraplén (2.6 a 4.0 m)	0.19360	0.09680	2.06613

Para verificar el comportamiento dinámico del terraplén se evaluaron cinco casos considerando las variaciones en el nivel de mar registradas en la zona de estudio, así como el caso de presentarse pleamar y saturación del suelo debido a precipitación, Tabla 31 y Figura 80.

Tabla 30. Elevación del nivel de mar para cada caso de análisis

Caso	Marea	Elevación del mar a partir de la cota 0.00 m
1	Bajamar inferior	0.00 m
2	Nivel medio del mar	0.38 m
3	Pleamar media	0.68 m
4	Pleamar máxima	1.28 m
5	Pleamar y tormenta	1.28 m

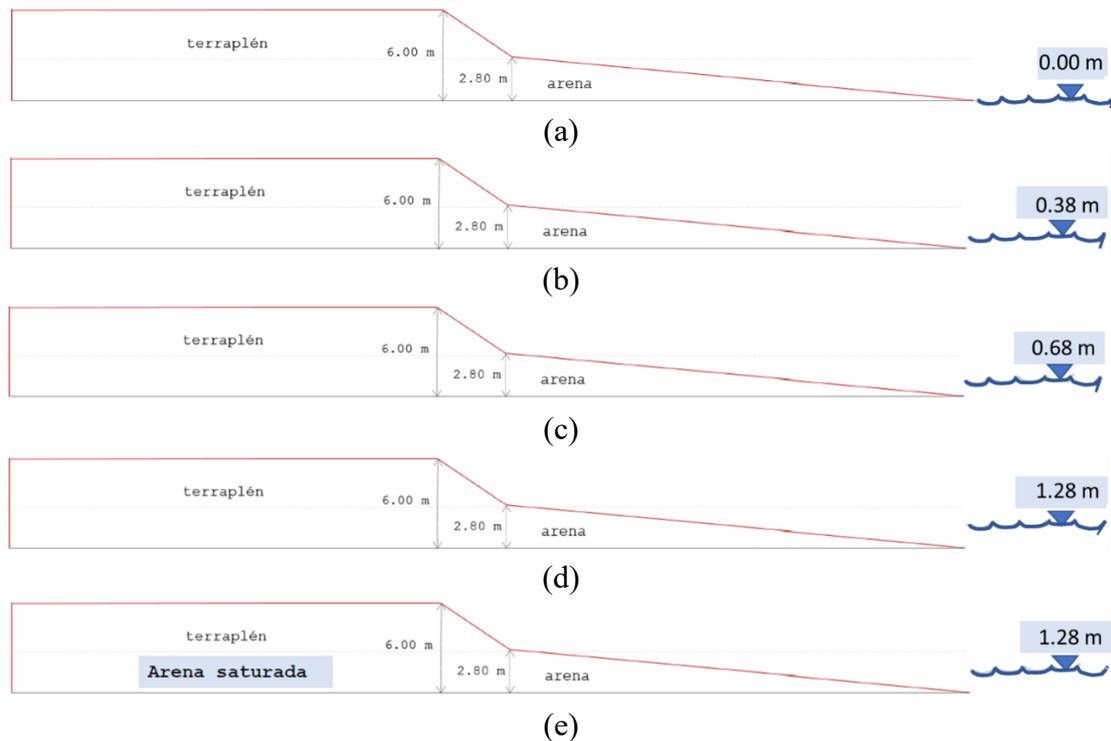


Figura 80. Representación de los casos analizados

Así mismo se establecieron siete puntos de control para obtener los parámetros de comportamiento del suelo, ubicados a lo largo de la superficie de falla, al pie del terraplén, en el punto más alto y dentro del depósito de suelo, Figura 81.

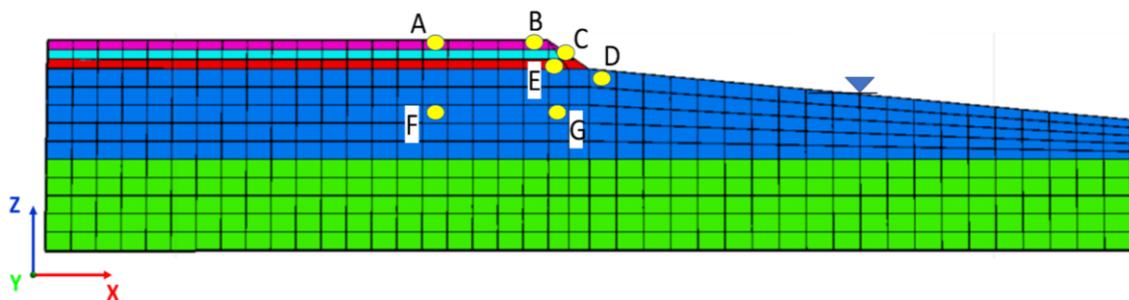


Figura 81. Puntos de control para la medición de presión de poro, esfuerzos y desplazamientos.

4.3.4.1. Análisis estático

Se realizó la evaluación de la estabilidad general del terraplén en condición estática para cada caso, de acuerdo con la teoría del equilibrio límite empleando el concepto de factor de seguridad, el cual está basado en la estabilidad de la masa de suelo a partir de la relación de las fuerzas y/o momentos resistentes entre actuantes generados por elementos de como el peso propio. Los resultados del análisis de falla estática se muestran en la Figura 82.

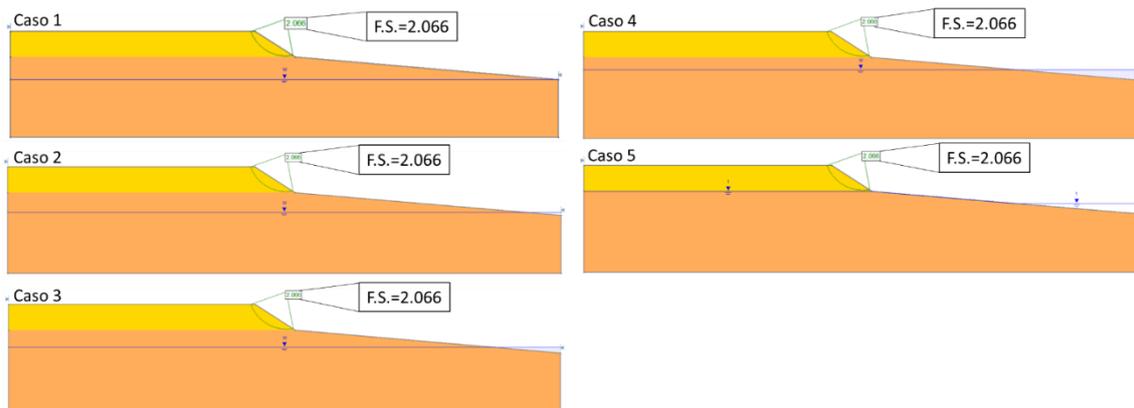


Figura 82. Factores de seguridad obtenidos en condición estática para cada caso de análisis.

4.3.4.2. Análisis de dinámico

A continuación, se realizó el análisis de respuesta sísmica aplicando la historia de aceleraciones N90E, Figura 65. Las Figuras 83 a 87 muestran los contornos de presión de poro iniciales y finales para cada caso. La Figura 88 presenta los resultados de desplazamiento vertical al final del sismo. Se observó que en el caso 5 se registró el desplazamiento vertical mayor, presentado sobre la corona del terraplén con valor de 73 cm. La Figura 89 presenta los resultados del desplazamiento horizontal para cada caso. La Figura 90 muestra los vectores de desplazamiento al final del evento sísmico. Se observó un desplazamiento del suelo en dirección vertical y una tendencia de desplazamiento lateral del cuerpo del talud que se incrementa con la profundidad. El desplazamiento vertical mayor se observó en el caso 5 con un valor de 78 cm.

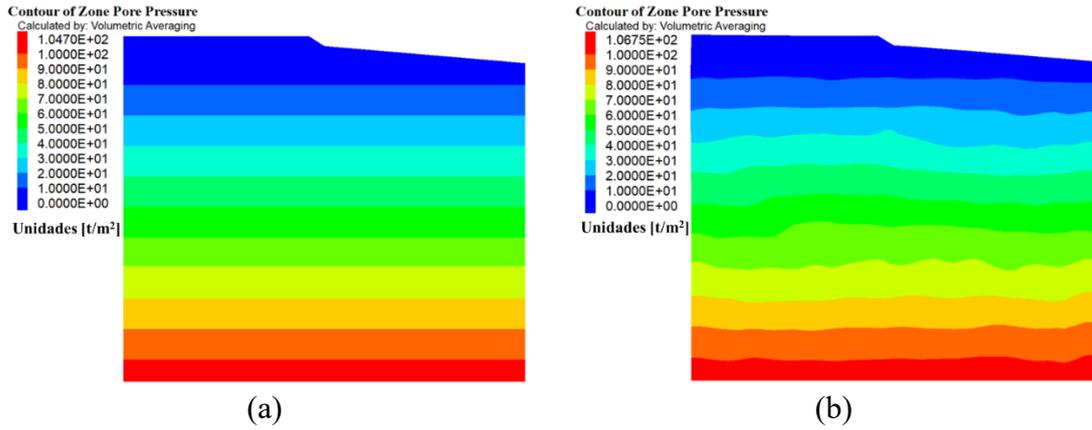


Figura 83. Caso 1, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final.

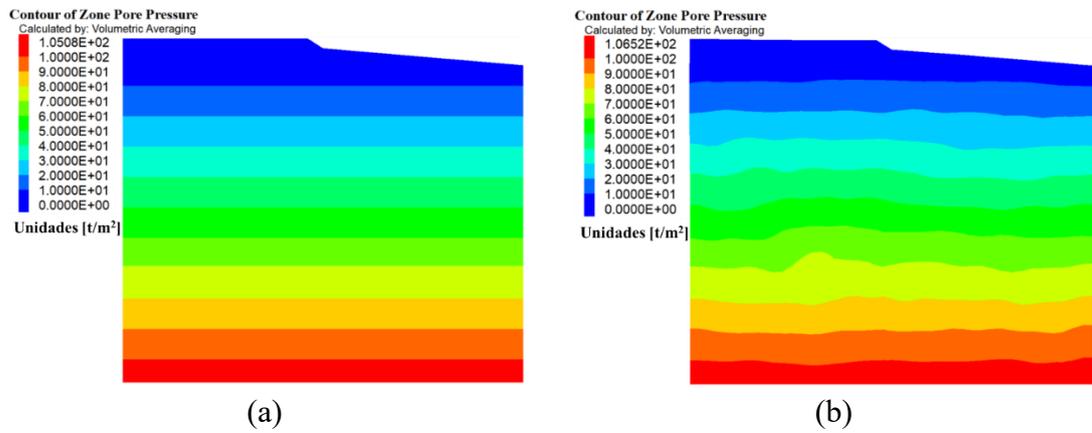


Figura 84. Caso 2, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final.

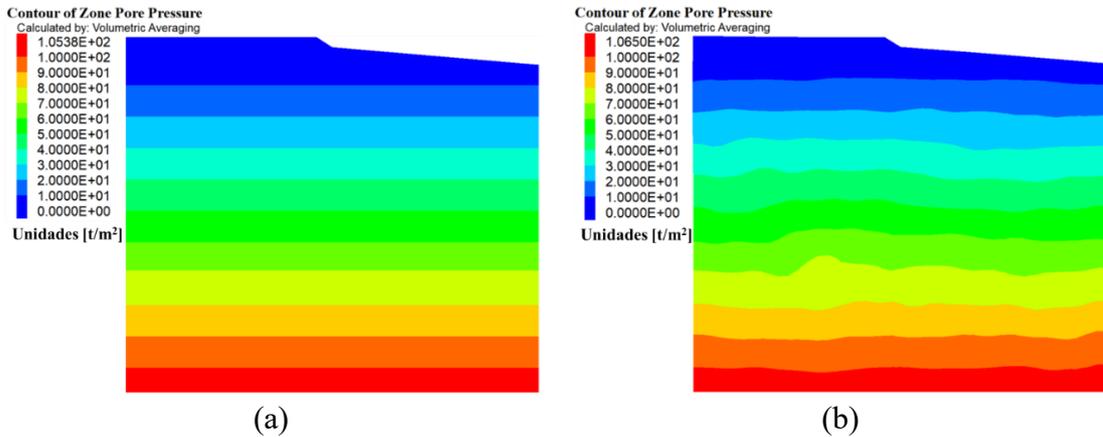


Figura 85. Caso 3, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final.

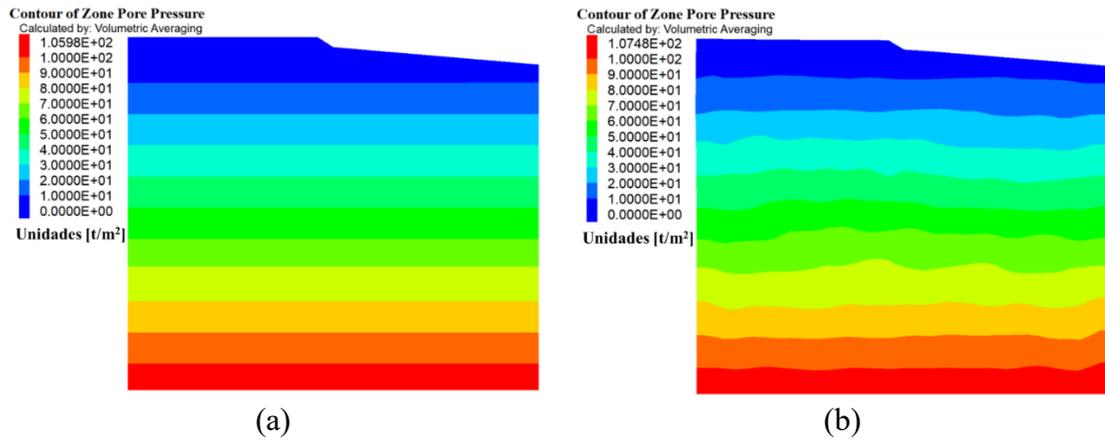


Figura 86. Caso 4, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final.

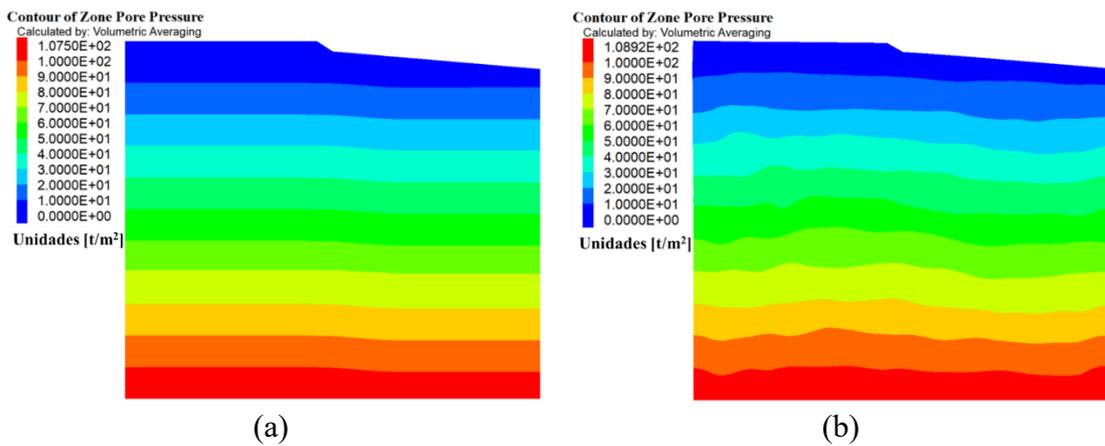


Figura 87. Caso 5, contorno de presión de poro (a) inicial, (b) final.

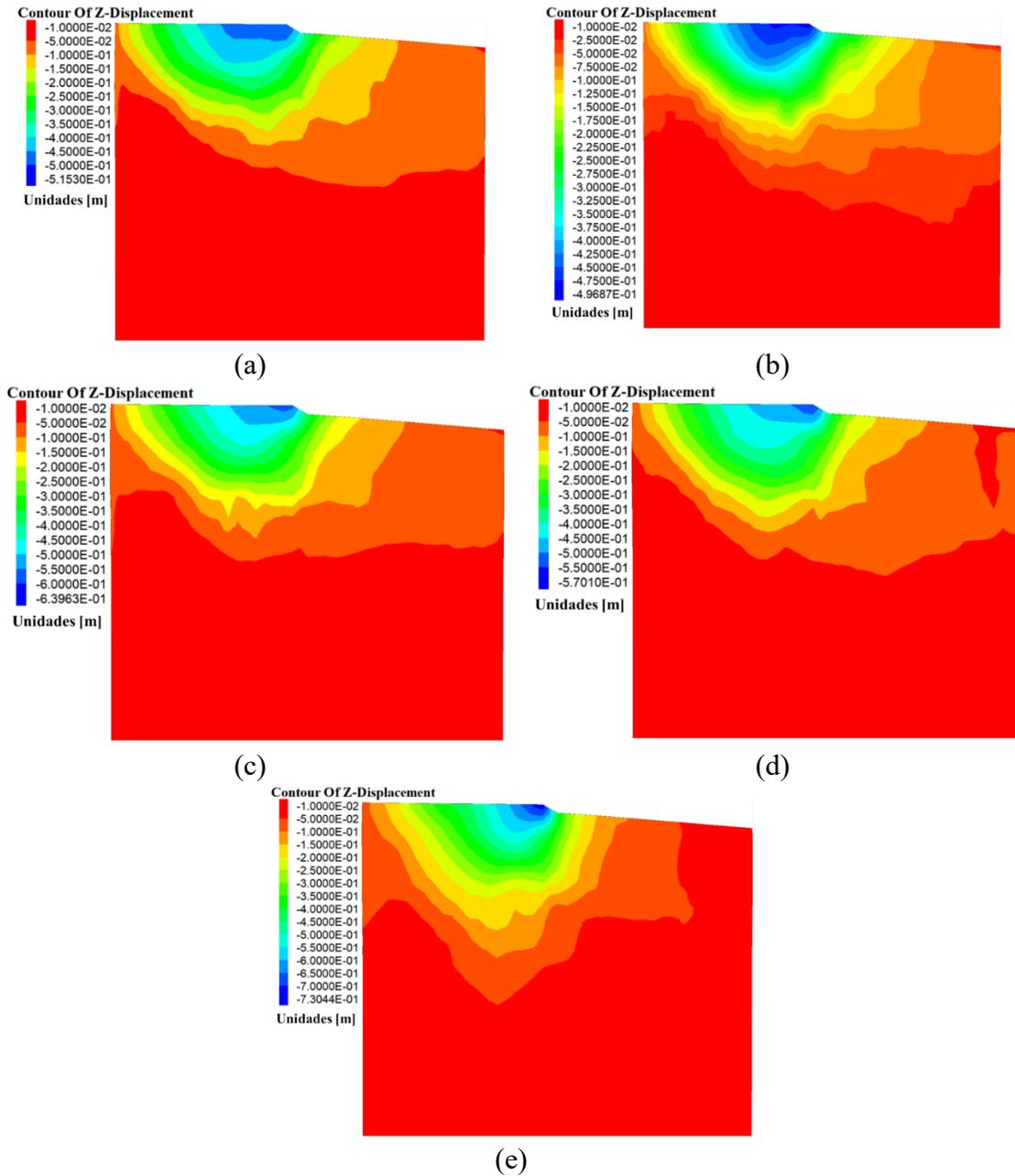


Figura 88. Desplazamiento vertical final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.

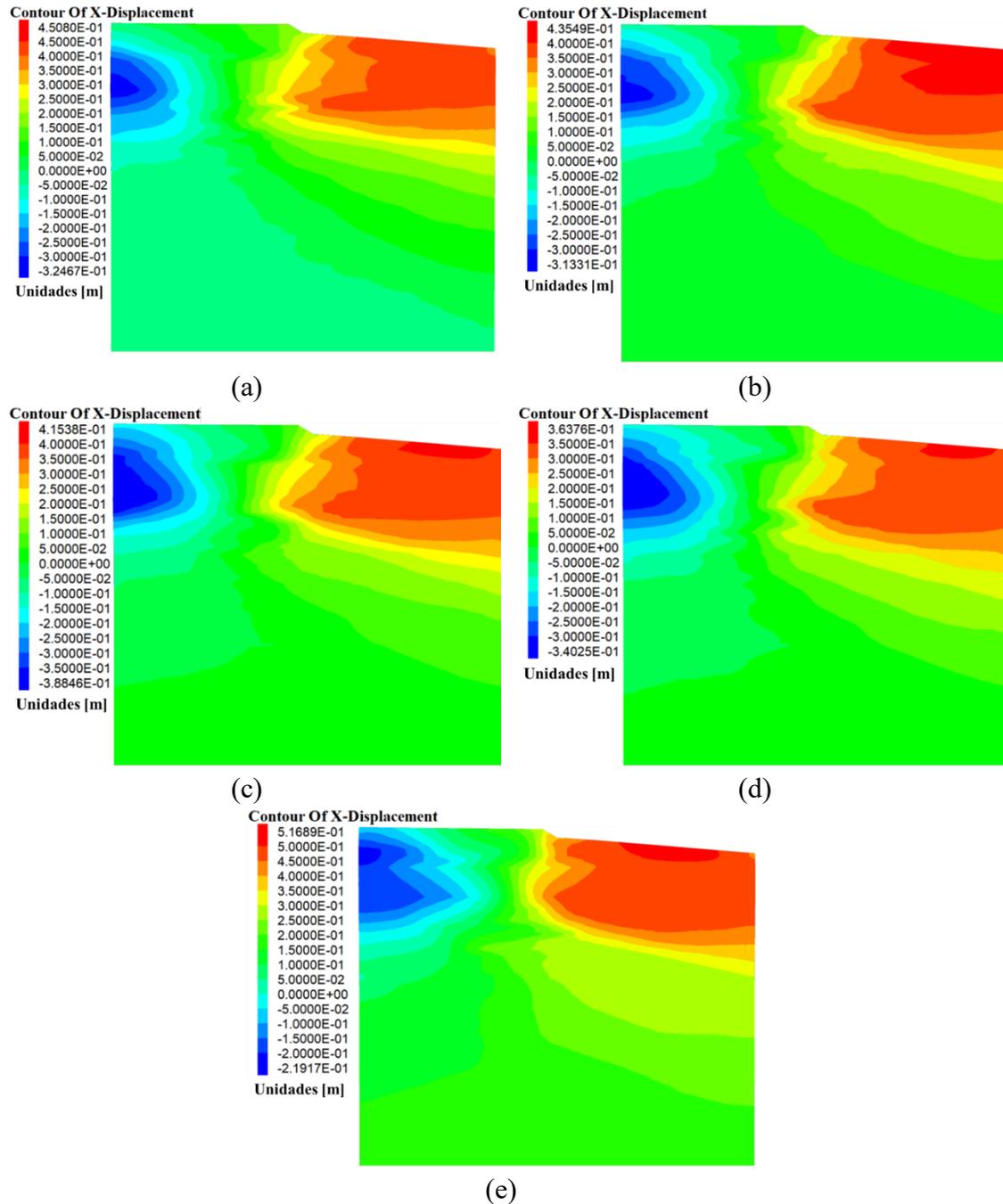


Figura 89. Desplazamiento horizontal final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.

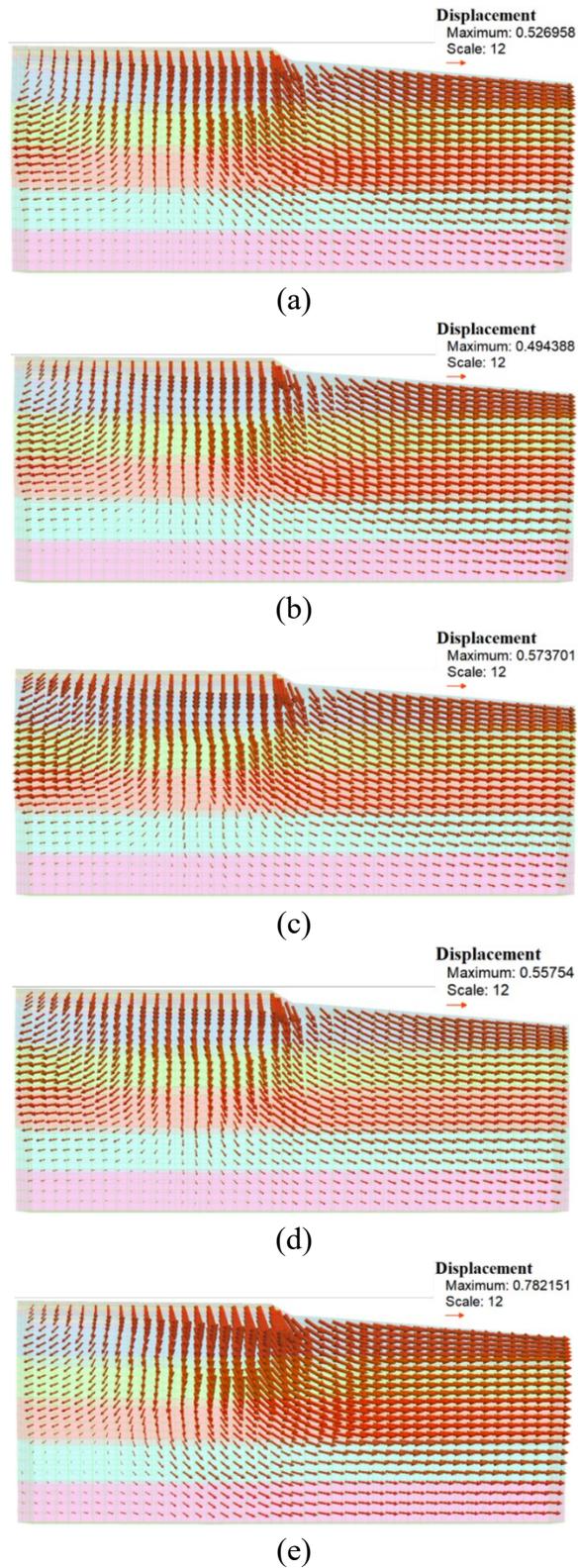
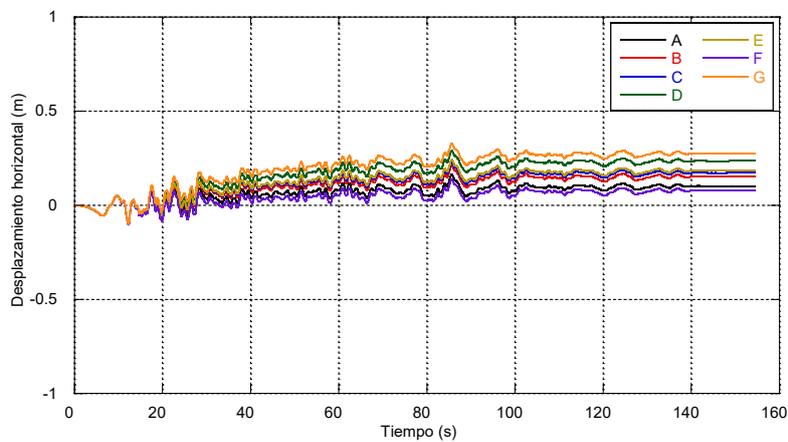


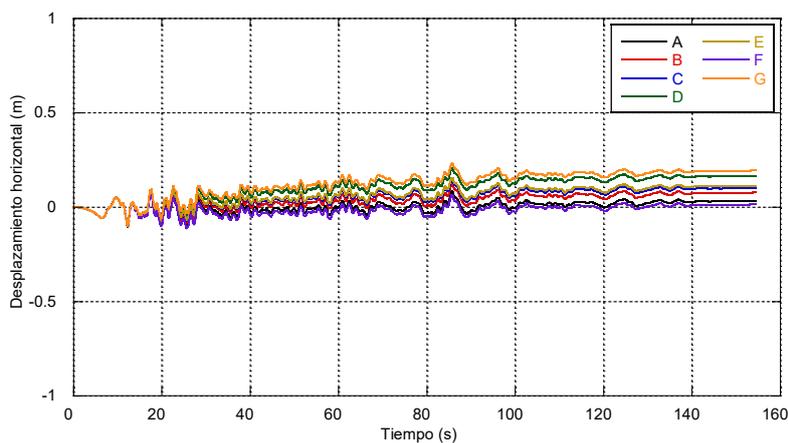
Figura 90. Vectores de desplazamiento final, (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.

En las Figuras 91 y 92 se muestran las historias de desplazamiento horizontal y vertical para los puntos de control indicados en la Figura 80. Se observó que tanto los desplazamientos verticales como los horizontales se acentúan en el punto de control B en

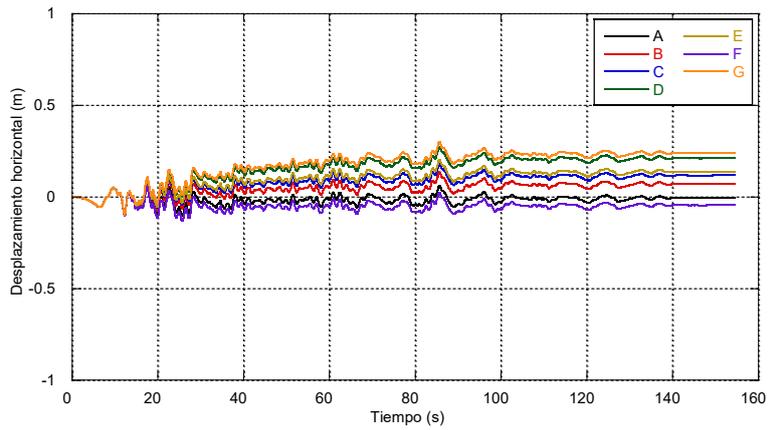
todos los casos, ubicado en la superficie del terraplén. Para los casos 4 y 5, se observa además un incremento en los desplazamientos en los puntos A y C, localizados en la superficie del terraplén y cara del talud respectivamente. En el punto de control E, ubicado en la superficie de falla, se presentaron valores altos de desplazamientos verticales en los casos 4 y 5. Por otro lado, las historias de velocidades obtenidas y la evolución de la relación de poro, $r_u = \Delta u / \sigma_c'$, se presentan en las Figuras 93 a 94. En estas gráficas se observa la generación de presión de poro en los puntos G y F, la cual se mantiene en todos los casos de análisis. Si embargo, con el aumento en el nivel del mar, se observó un incremento de la relación de presión de poro en el punto D, localizado en el pie del talud, el cual continúa en los casos 2, 3 y 4, hasta alcanzar valores mayores a 0.7 en el Caso 5. Finalmente, en el Caso 5 se observó un incremento adicional en esta relación en el punto E, localizado en la superficie de falla del talud.



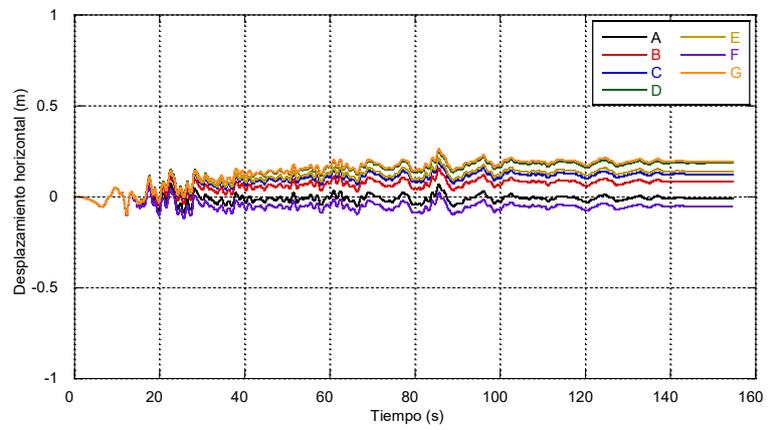
(a)



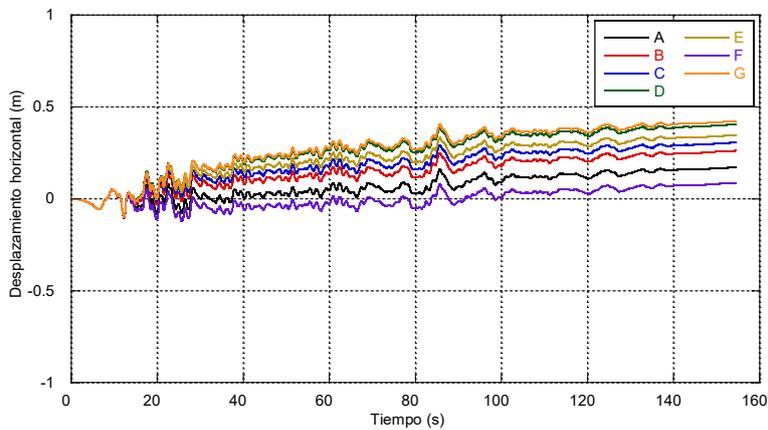
(b)



(c)

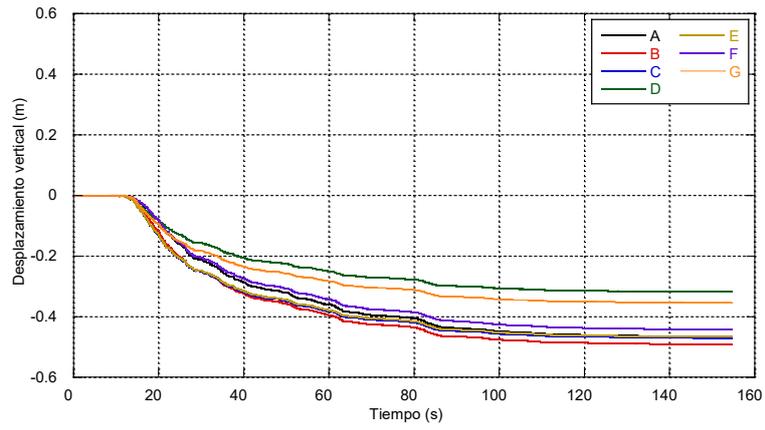


(d)

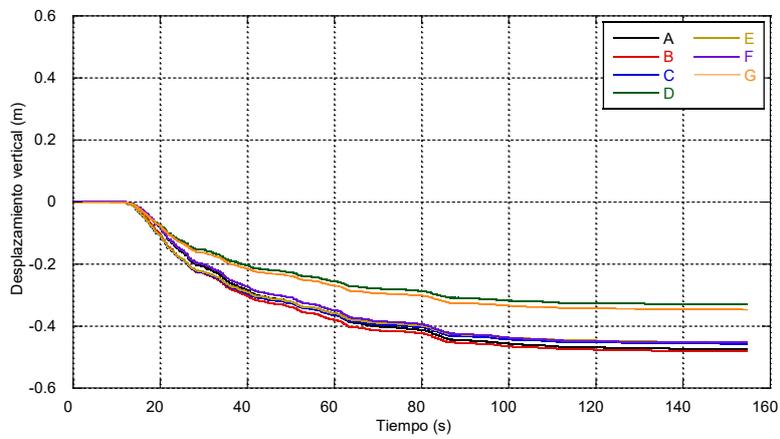


(e)

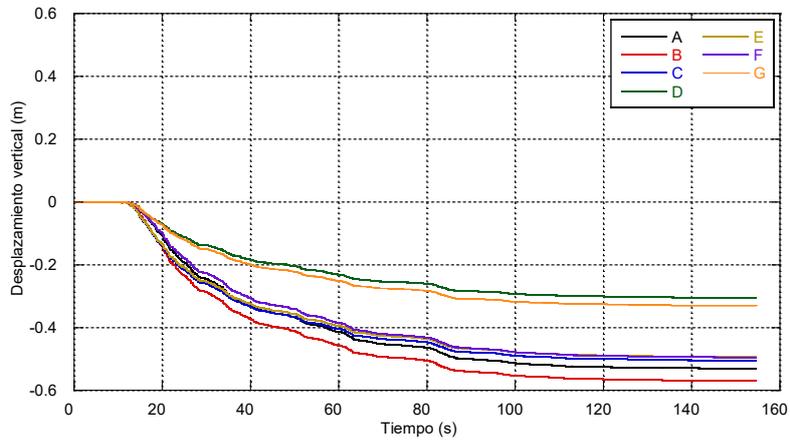
Figura 91. Historias de desplazamiento horizontal (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.



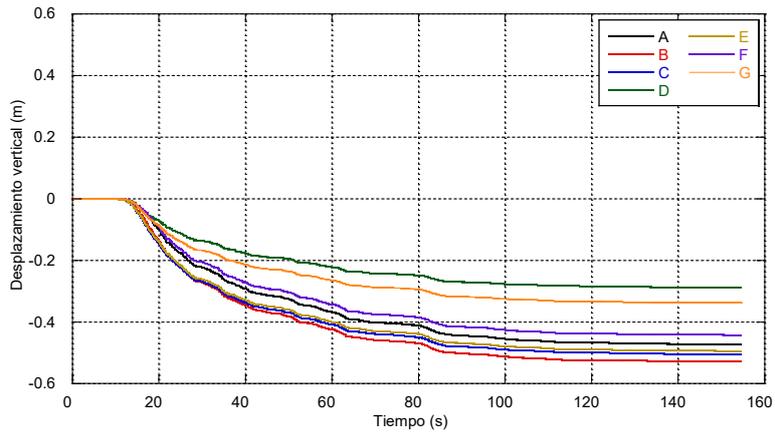
(a)



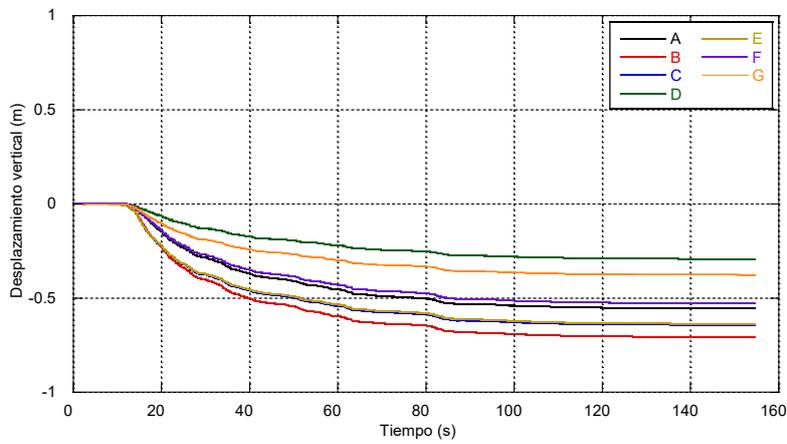
(b)



(c)

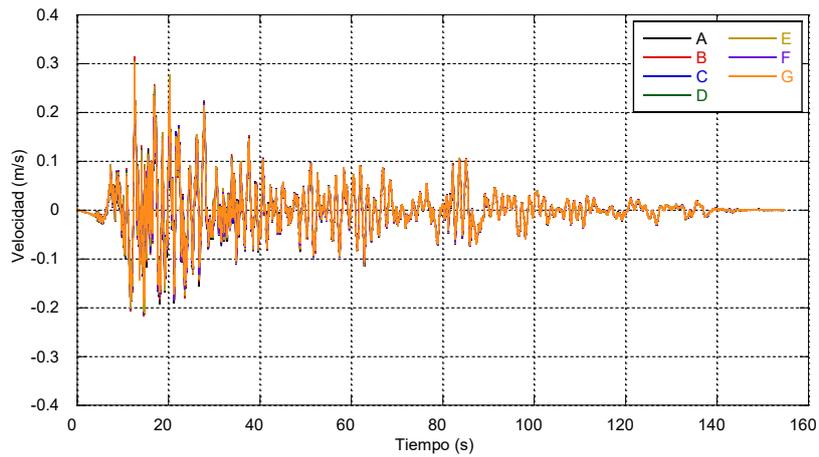


(d)

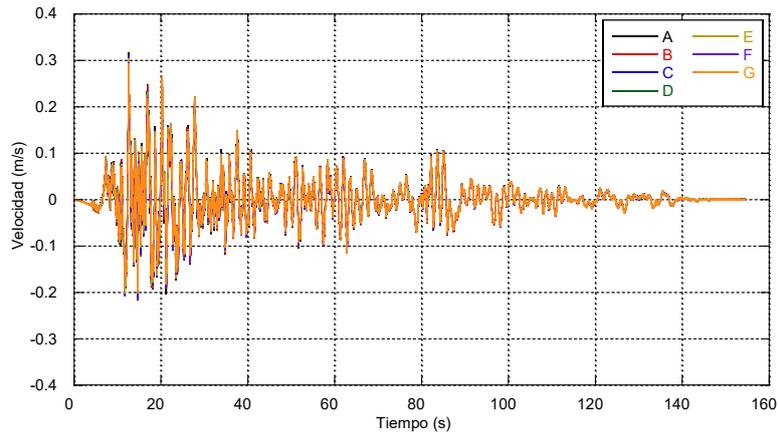


(e)

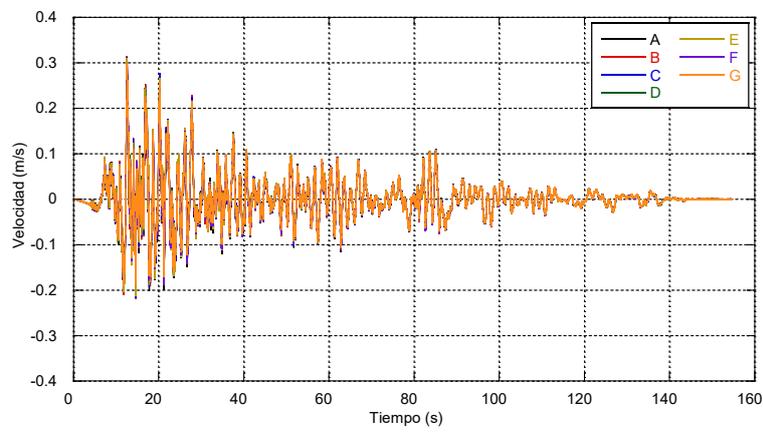
Figura 92. Historias de desplazamiento vertical (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.



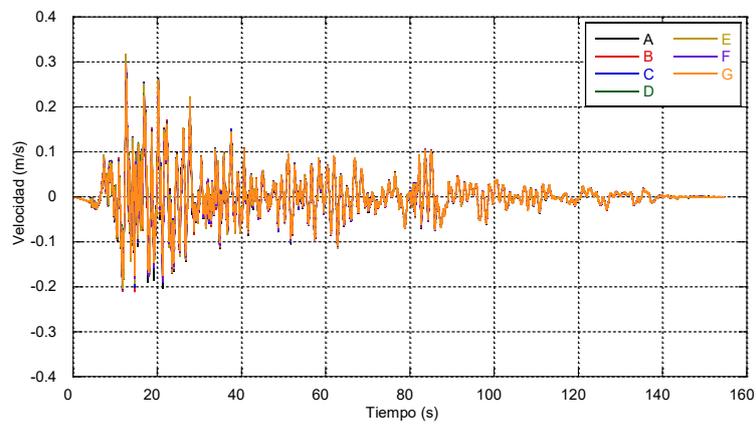
(a)



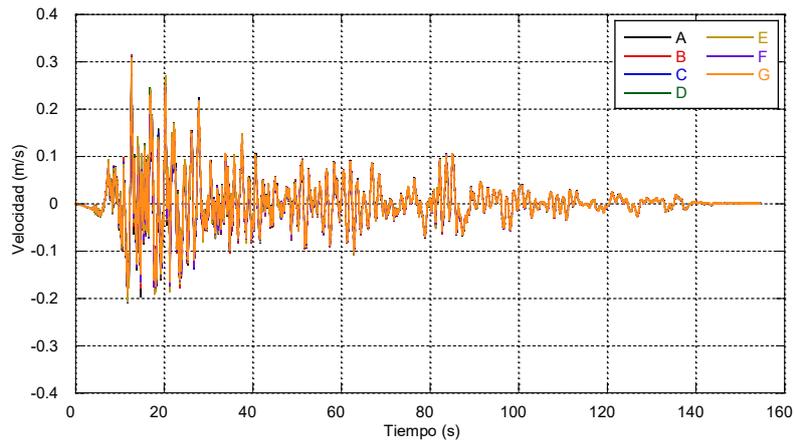
(b)



(c)

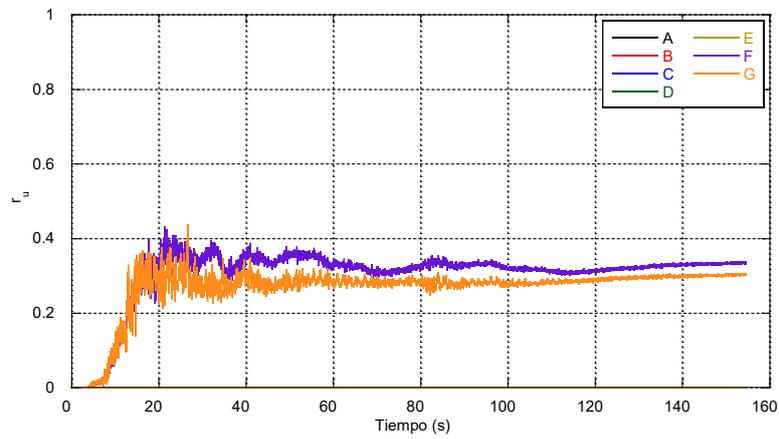


(d)

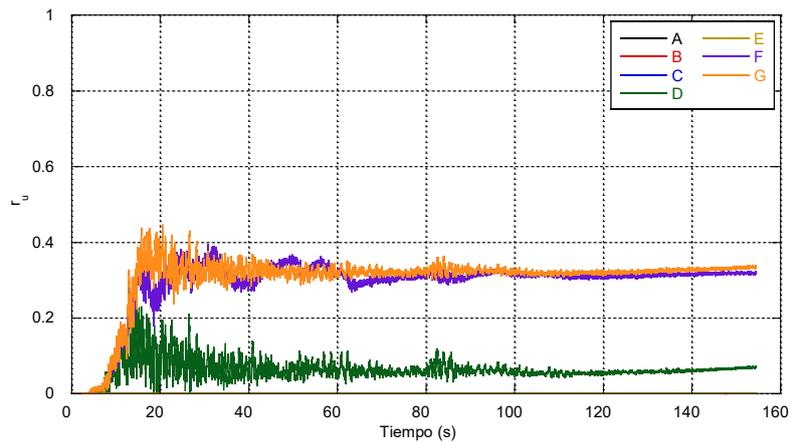


(e)

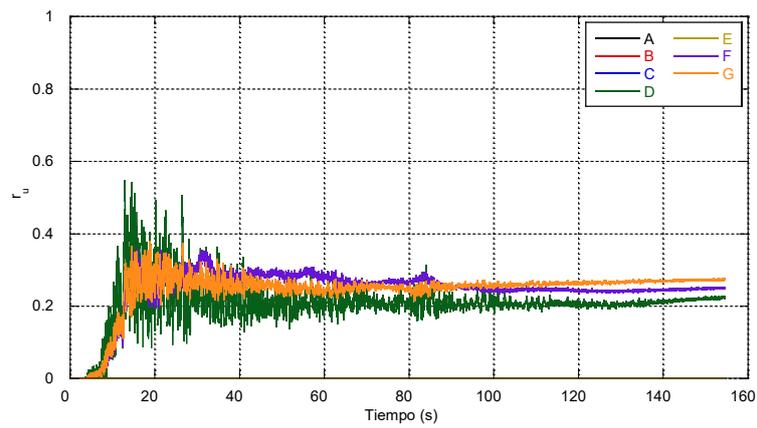
Figura 93. Historias de velocidades (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.



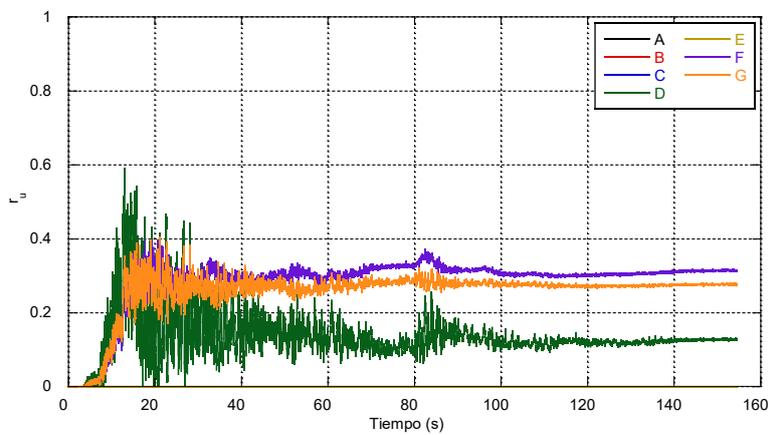
(a)



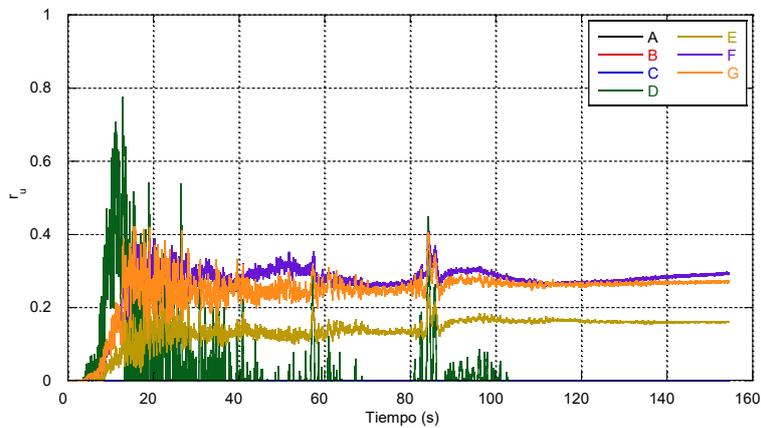
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 94. Relación de presión de poro (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4, (e) Caso 5.

4.3.5. Fase 2: Simulación generación y propagación de tsunami

La simulación de propagación del tsunami se realizó utilizando el modelo implementado en el código GeoClaw (LeVeque et al. 2011), el cual se basa en la resolución de las ecuaciones de aguas someras a través del método numérico de volúmenes finitos. Para

ello se estableció un dominio espacial en el cual se simula la propagación de las olas derivadas por el evento, Figura 95; se utilizó información batimétrica y topográfica obtenida de la base de datos GEBCO generada por la organización para la administración del océano y la atmósfera en Estados Unidos, NOAA por sus siglas en inglés, con una resolución de 15 segundos de arco, Figuras 96 y 97.

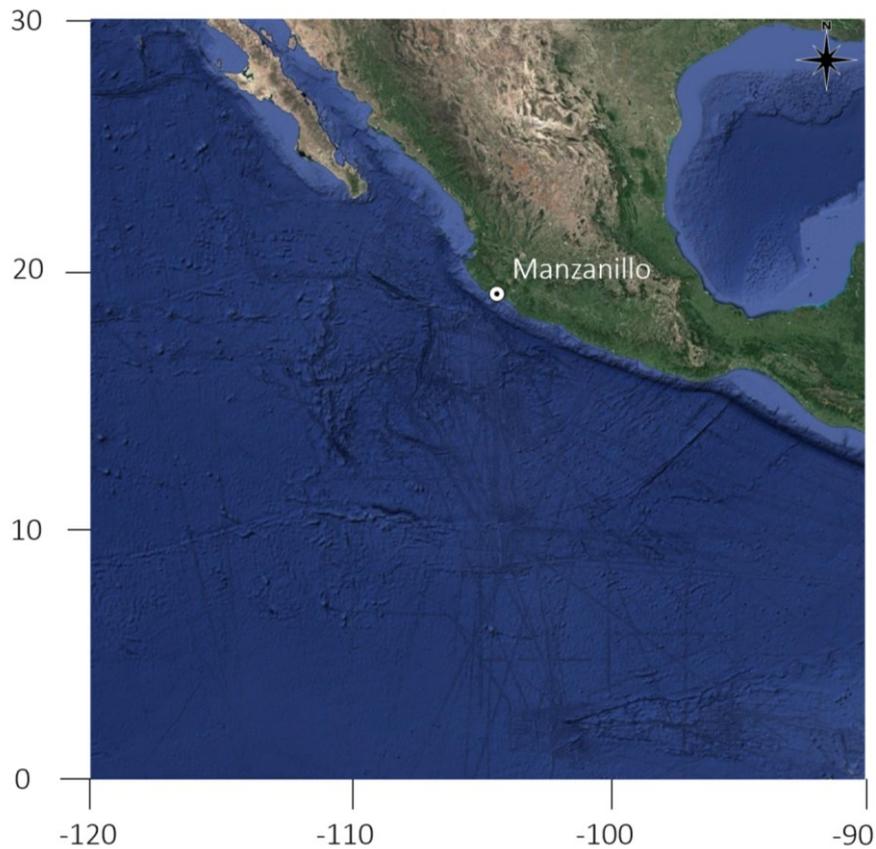


Figura 95. Dominio establecido para el modelo de propagación de ola

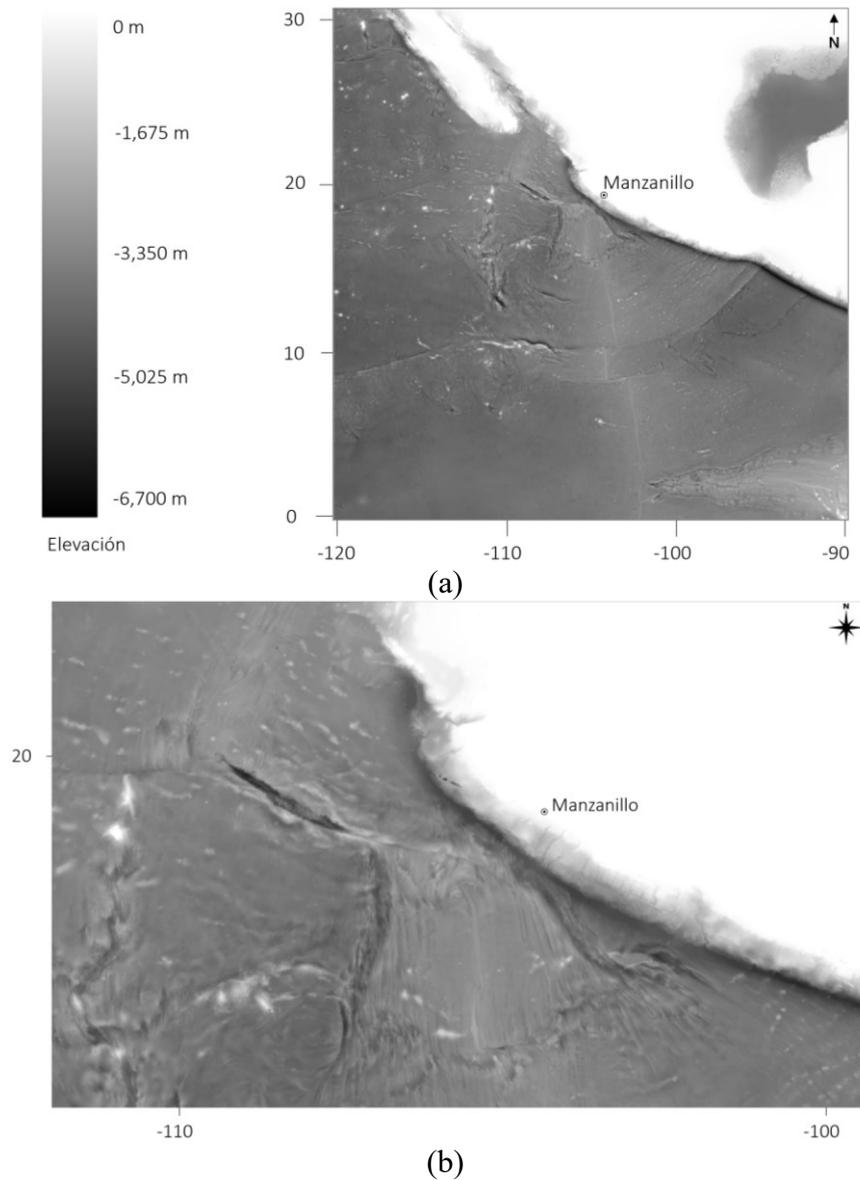


Figura 96. Elevaciones dentro del dominio establecido, generados a partir de la batimetría, (a) Del dominio establecido, (b) De la costa cercana a Manzanillo

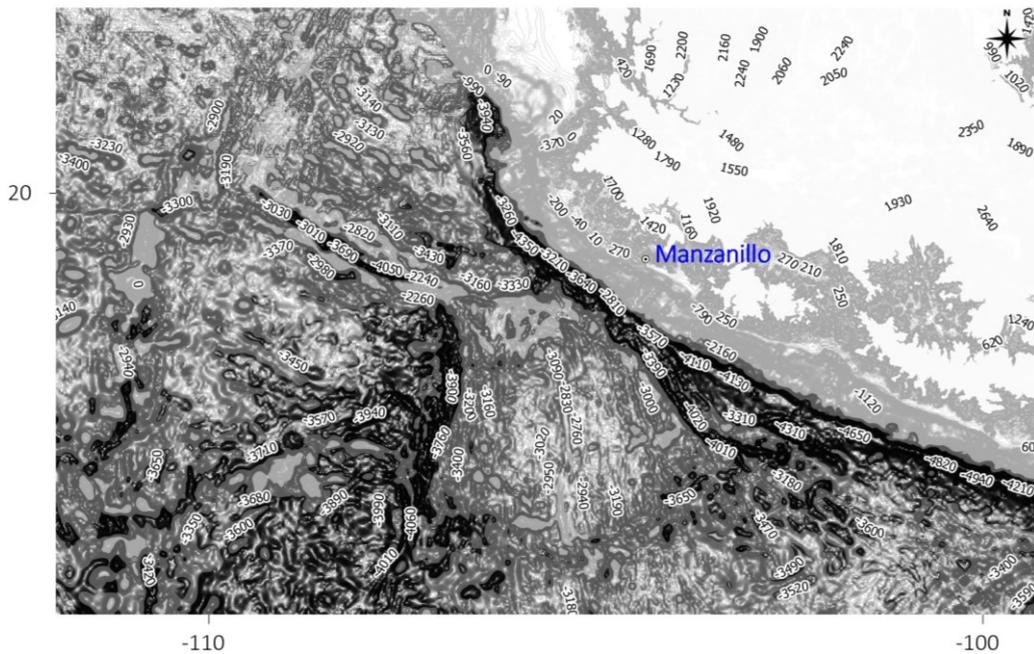


Figura 97. Curvas de nivel en un acercamiento a la ciudad de Manzanillo, obtenidas de los datos batimétricos.

Considerando las características del mecanismo de falla generado por el sismo de Manzanillo en octubre de 1995, Tabla 31, se utilizó el modelo de deslizamiento de Okada (1995), para estimar el desplazamiento vertical en el fondo marino causado por el evento sísmico.

Tabla 31. Características del mecanismo de falla del sismo de Manzanillo de octubre de 1995

Evento	Strike	Largo (km)	Ancho (km)	Profundidad (km)	Slip	Rake	Dip	Longitud	Latitud
09/10/1995	309	200	107 e3	10 e3	1.35	104	14	-104	19

Con los parámetros de entrada, el modelo de falla utilizado estimó que dichas características corresponden a un sismo de magnitud $M_w=8$, a una profundidad en el borde superior del plano de falla de 5 km. Las características de la falla obtenidas se muestran en la Figura 98. Las deformaciones estimadas por el modelo, así como el perfil de deformación del fondo marino calculado se presentan en las Figuras 99 y 100.

Con base en la deformación obtenida y las características del sismo, se generó un modelo de propagación de las elevaciones de la superficie libre del agua, así como de las velocidades en intervalos de 1 min para un período de simulación de 1 hora, el cual corresponde a un tiempo inicial aproximado de 15 min posterior al evento. En la Figura 101 se muestran los resultados de la simulación para el tiempo 3.5 min después del evento, el resto de los resultados se presentan en el Anexo B.

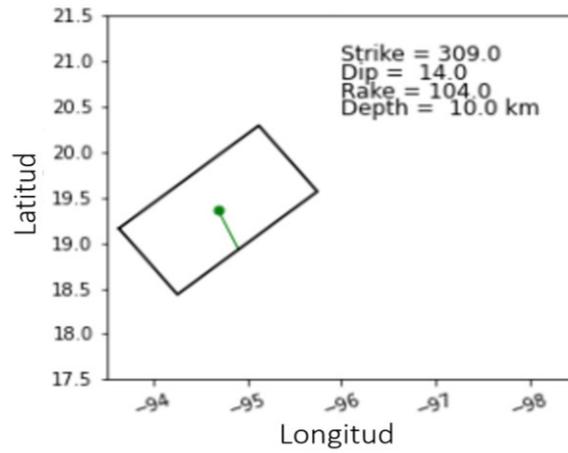


Figura 98. Geometría y localización de la falla

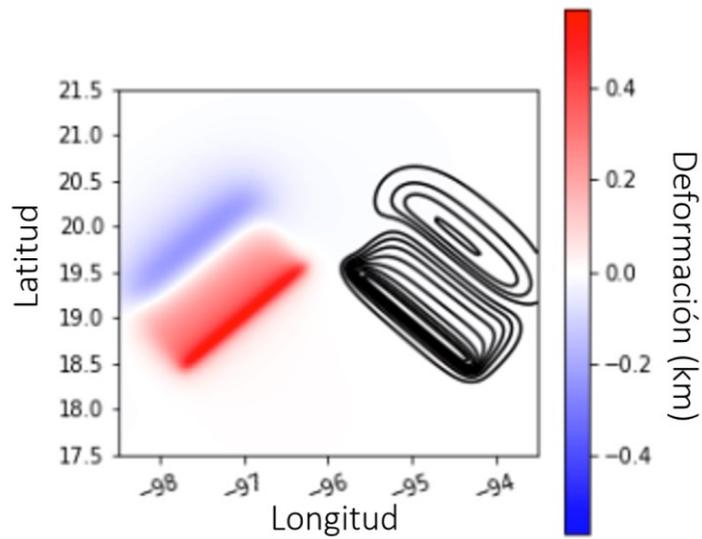


Figura 99. Deformación del fondo marino para el sismo de entrada

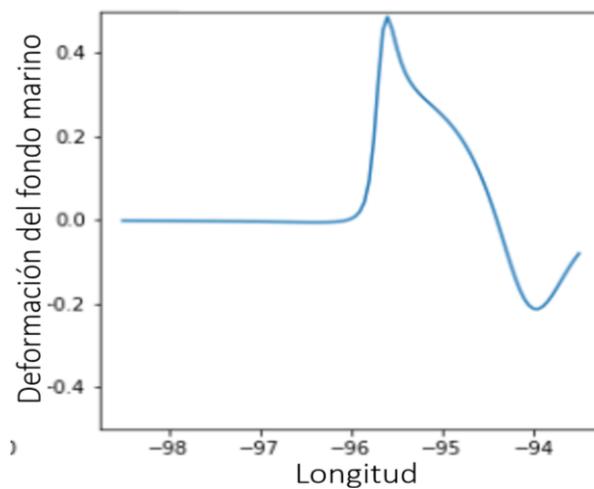


Figura 100. Perfil de deformación del fondo marino

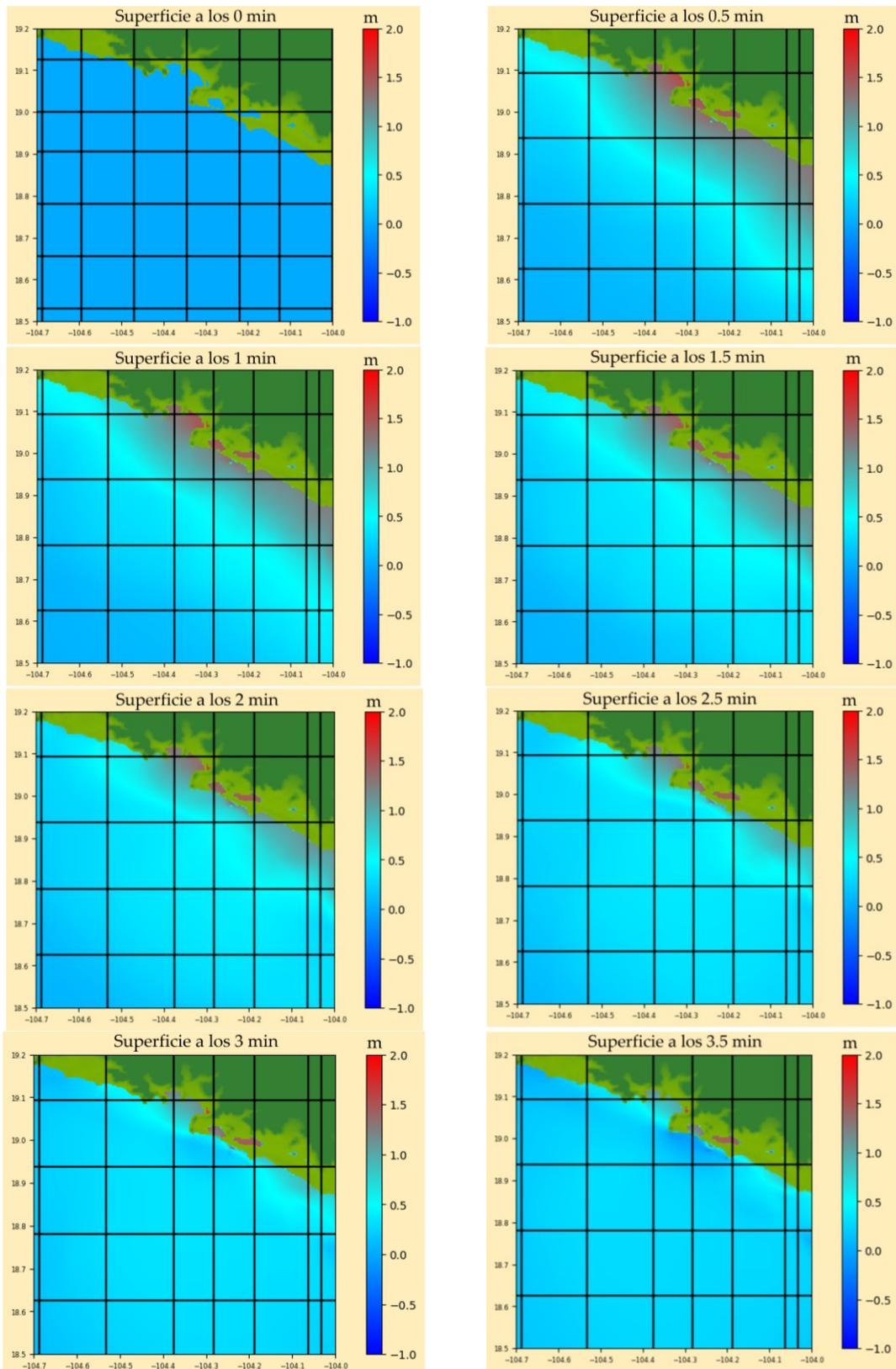


Figura 101. Propagación de la altura de la superficie oceánica y velocidades para los primeros 4 minutos de la simulación.

Las distribuciones de las elevaciones y velocidades de la ola fueron obtenidas en 5 puntos dentro de la Bahía de Santiago cercanos al tramo carretero en estudio, Tabla 32 y Figura 102.

Tabla 32. Localización de los puntos de control en el modelo de simulación de tsunami

Punto de control	Longitud	Latitud
Boya 1	-104.38 °W	19.07 °N
Boya 2	-104.38 °W	19.08 °N
Boya 3	-104.38 °W	19.09 °N
Boya 4	-104.38 °W	19.10 °N
Boya 5	-104.38 °W	19.11 °N

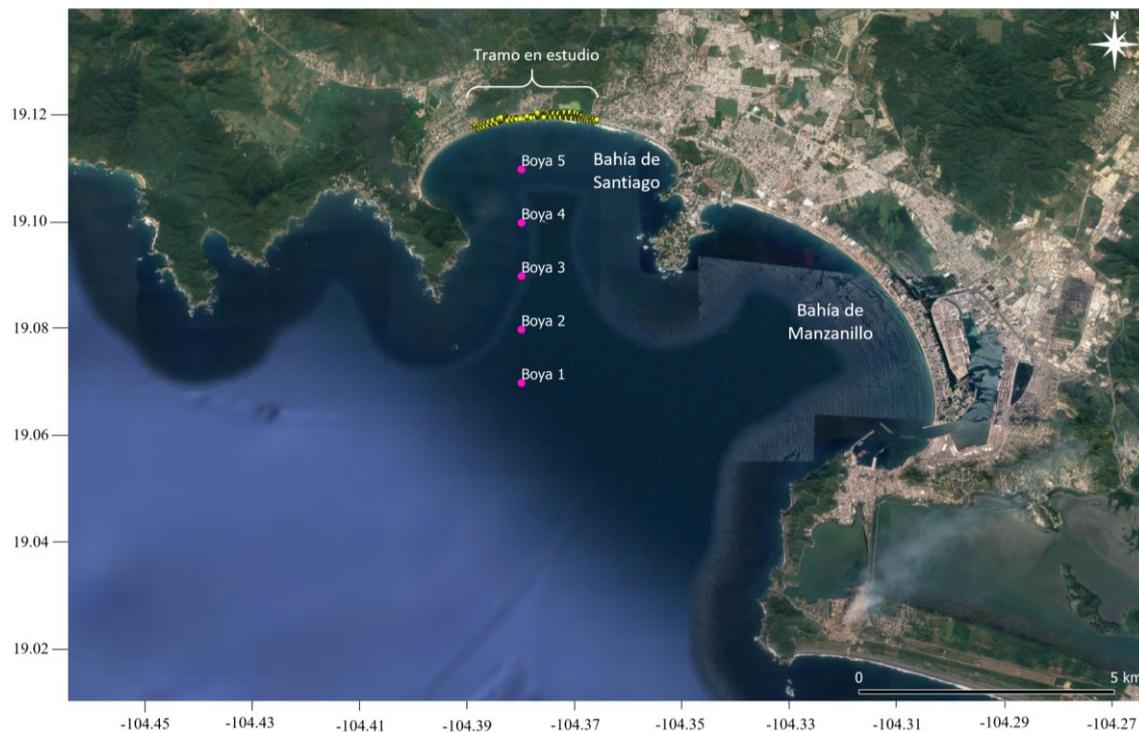


Figura 102. Localización de las boyas para la obtención de parámetros en el modelo de propagación de la ola

La Figura 103 muestra el cambio en la batimetría en los puntos de ubicación de las boyas así como las respectivas elevaciones obtenidas. Las Figuras 104 y 105 presentan las componentes u y v de las velocidades de la ola en cada boya o punto de control, así como la velocidad resultante, respectivamente.

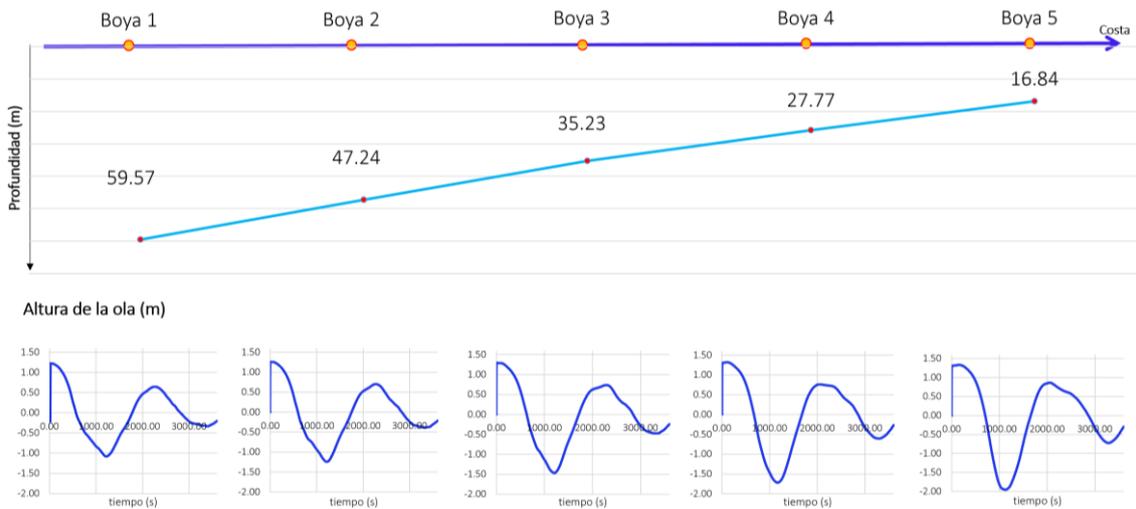


Figura 103. Profundidad oceánica en los puntos de ubicación de las boyas y distribución de elevaciones obtenidas para el periodo de simulación.

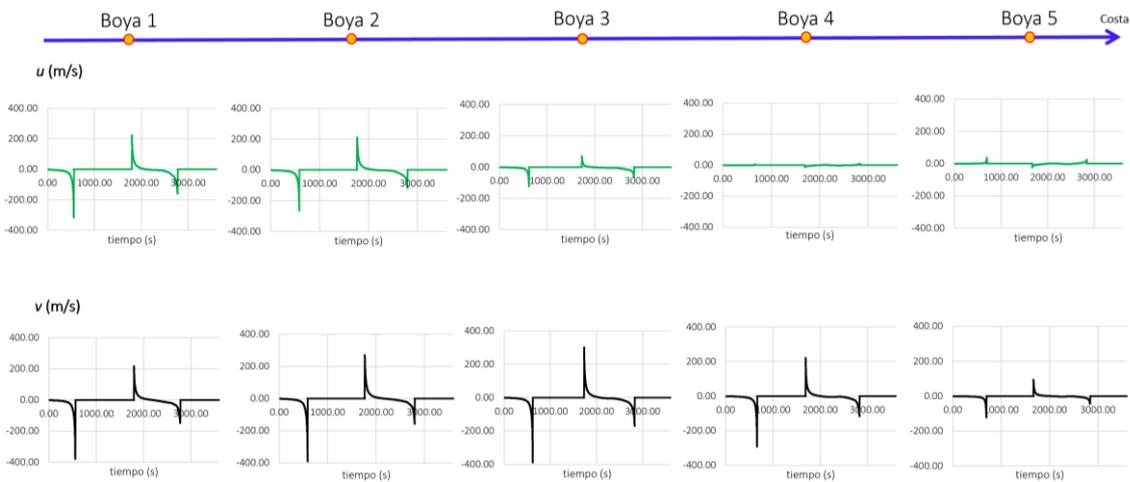


Figura 104. Distribución de las componentes u y v de las velocidades de la ola para el periodo de simulación

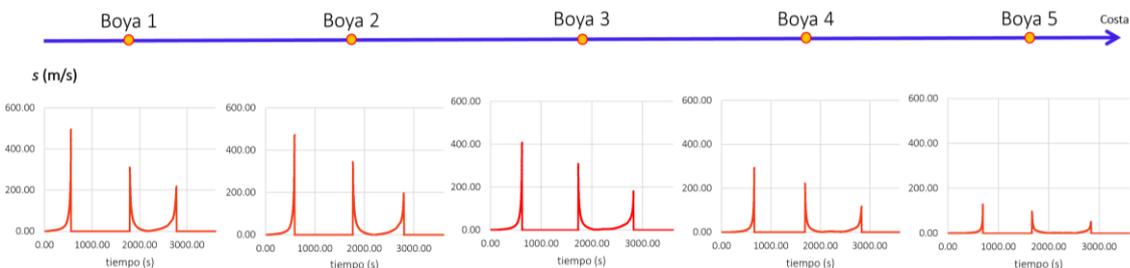


Figura 105. Distribución de las componentes u y v de las velocidades de la ola para el periodo de simulación

Los resultados más cercanos a la costa, Boya 5, mostraron una elevación máxima de ola de aproximadamente 1.4 m y velocidades de $u = 40$ m/s, $v = 85$ m/s y $s = 130$ m/s, Figura 106.

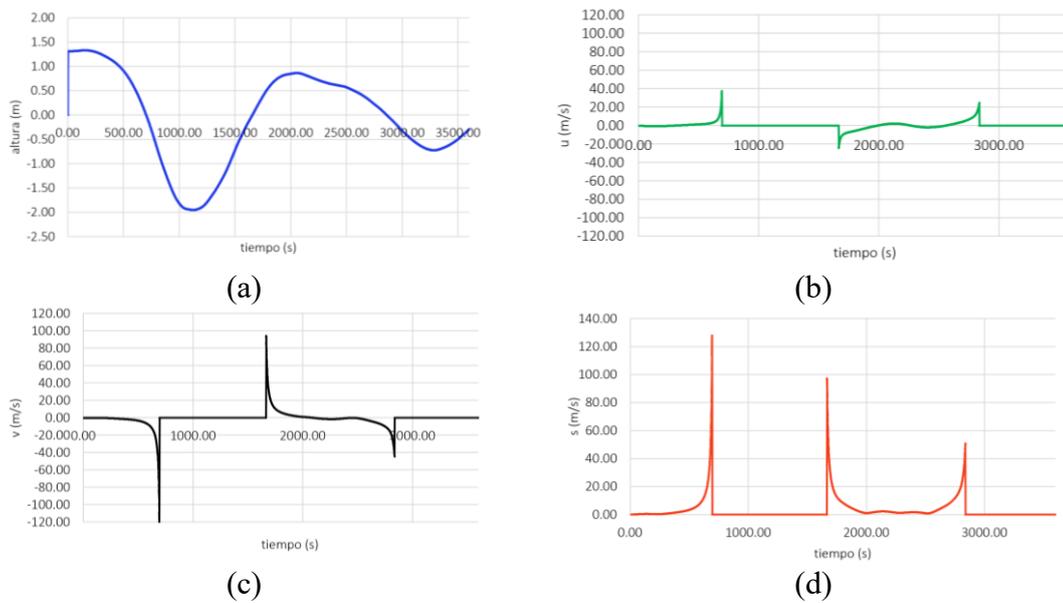


Figura 106. Distribuciones en el punto más cercano a la costa, Boya 5, (a) la altura de la ola, (b) velocidad u, (c) velocidad v, (d) velocidad s.

4.3.6. Fase 3: Modelo de respuesta sismo-tsunami

El comportamiento post sismo del terraplén se analizó con un esquema numérico similar al de la Fase 1. Para ello, se modeló el estado post-sismo del Caso 5, ante dos escenarios, el primero frente a un incremento en la elevación del mar de 1.5 m, Figura 107, de acuerdo con los resultados obtenidos en las Fases 1 y 2. En un segundo escenario se modeló tanto el incremento en la elevación de mar debida al tsunami como las cargas actuando horizontalmente en la cara del talud, en representación de la componente inercial de la masa de agua, Figura 108. En ambos escenarios se incluyeron los efectos de las cargas hidrostáticas debidas a la sobreelevación.

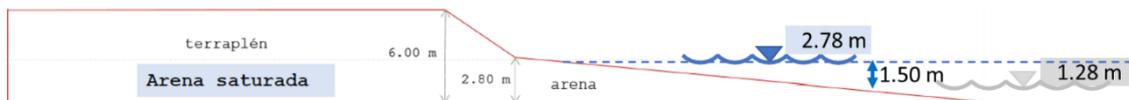


Figura 107. Escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m

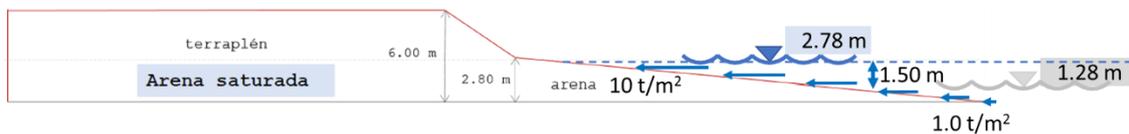


Figura 108. Escenario 2 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica

En la Figuras 109 a 116 se muestran los contornos de presión de poro, asentamiento vertical, desplazamiento horizontal y vectores de desplazamiento para ambos escenarios sismo-tsunami.

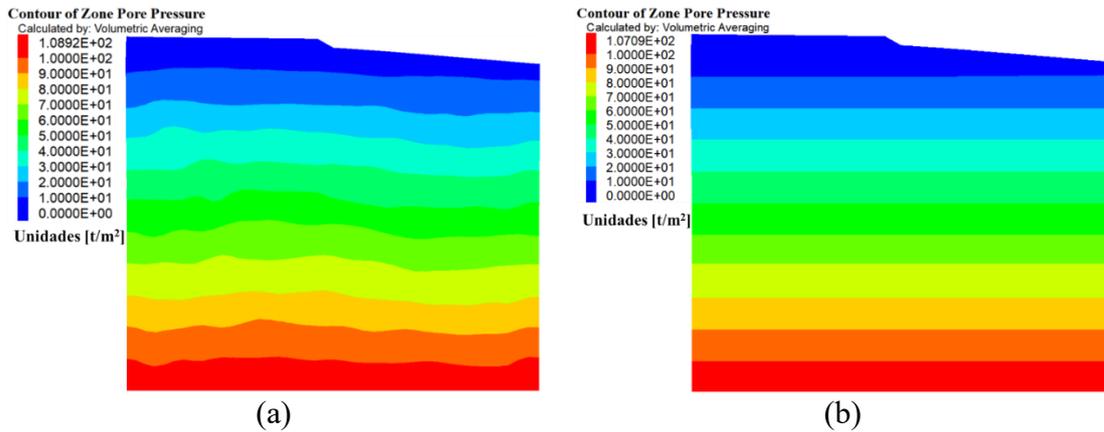


Figura 109. Presión de poro obtenida para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

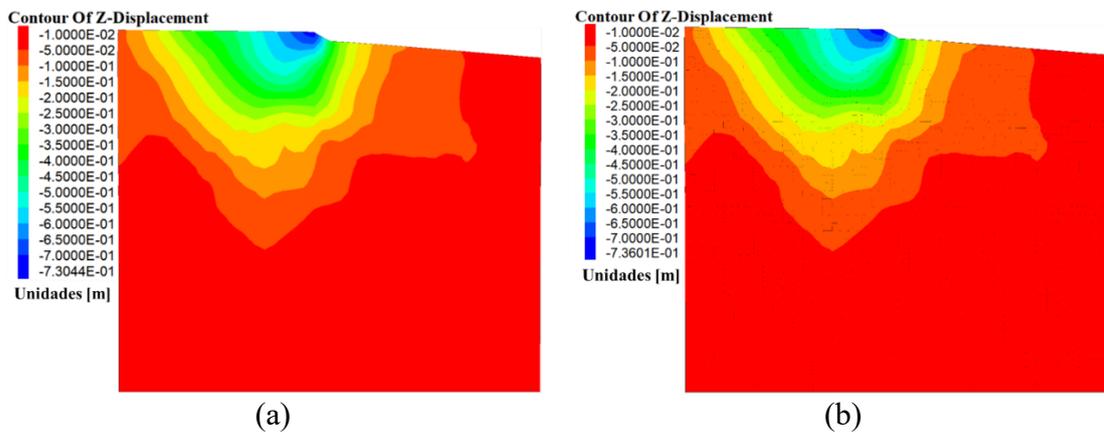


Figura 110. Desplazamientos verticales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

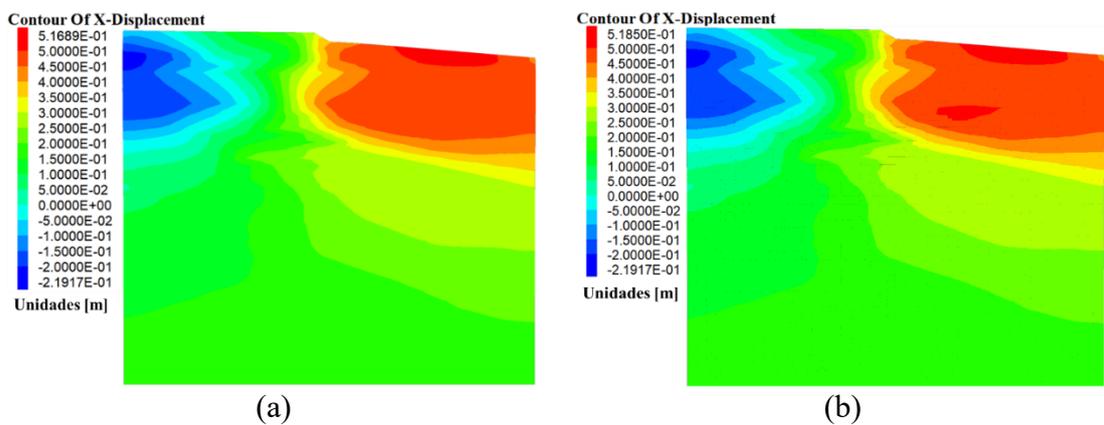


Figura 111. Desplazamientos horizontales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

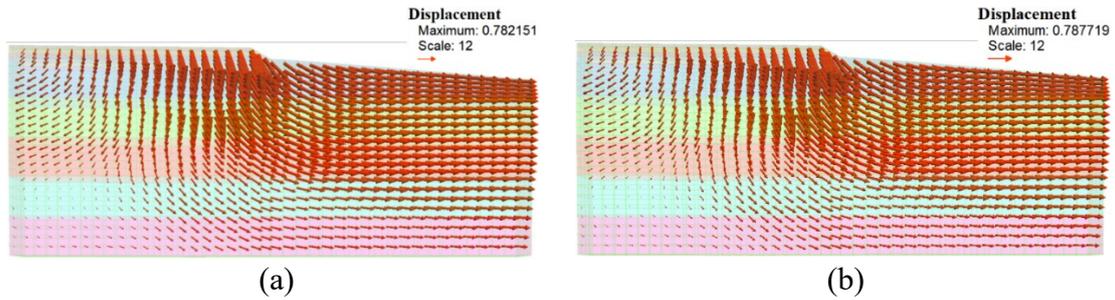


Figura 112. Vectores de desplazamiento obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

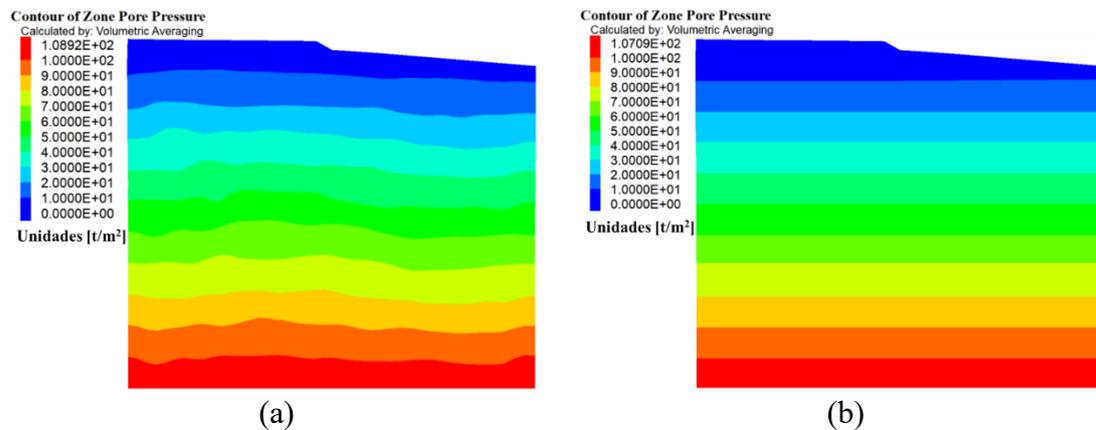


Figura 113. Presión de poro obtenida para el escenario 2 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

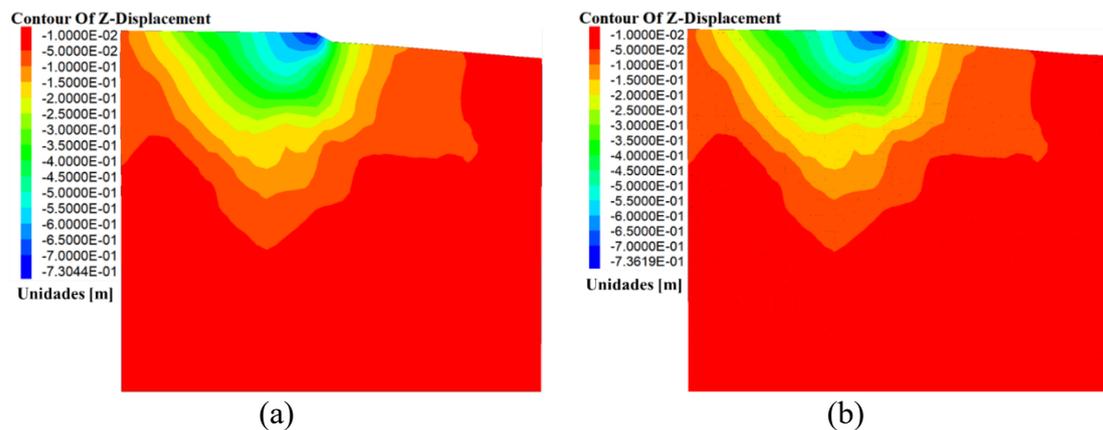


Figura 114. Desplazamientos verticales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

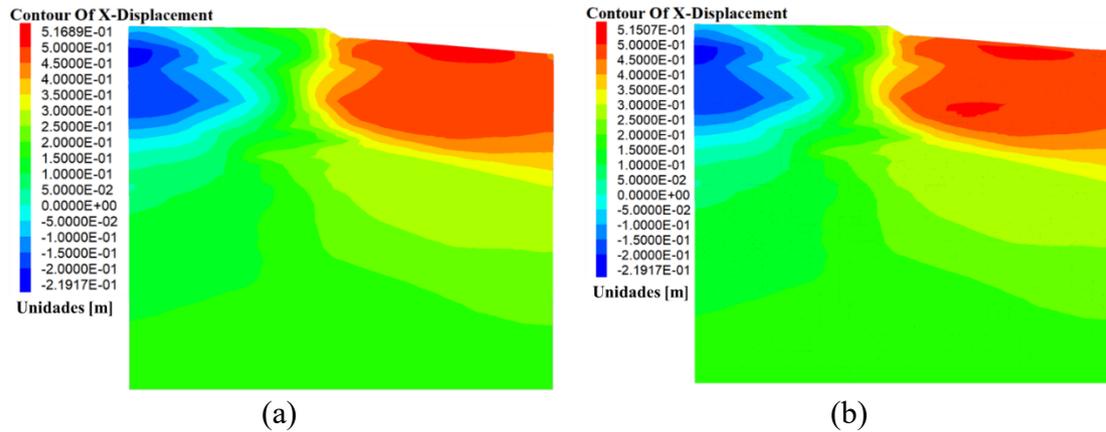


Figura 115. Desplazamientos horizontales obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

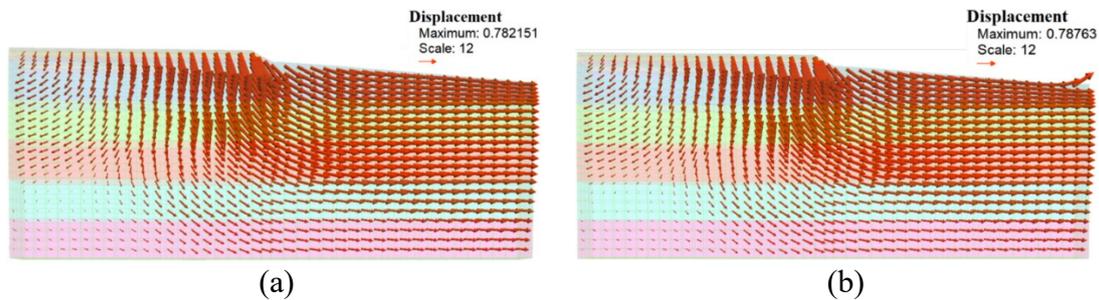


Figura 116. Vectores de desplazamiento obtenidos para el escenario 1 sismo-tsunami, sobreelevación de 1.5 m y carga hidrodinámica, (a) al final del sismo (b) sismo-tsunami

4.4. Comentarios

Se presentó una metodología secuencial para el análisis de la respuesta sismo-tsunami de infraestructura de transporte. La metodología se aplicó a un caso en la Ciudad de Manzanillo, en el cual se analizó el comportamiento de un terraplén carretero, considerando los efectos acumulados del sismo en términos de desplazamientos horizontales y verticales, y los inducidos por un incremento en el nivel de mar posterior al sismo.

En el caso estudiado se analizaron distintos escenarios en función de la elevación inicial del mar, los resultados indican que para todos los casos se generó una presión de poro importante, hasta $u_{max}=0.4$ en la cresta del terraplén, y hasta $u_{max}=0.6$ en el pie del talud por donde pasa la superficie de falla para una condición inicial de pleamar máxima y pleamar máxima con suelo saturado. La respuesta sísmica del terraplén mostró que la condición más crítica ocurrió en los escenarios de pleamar máxima y pleamar máxima con suelo saturado, en los cuales los desplazamientos verticales alcanzaron los 0.57 m y 0.73 m, respectivamente, ambos en la cresta del terraplén. Los valores de desplazamientos verticales y horizontales pueden interpretarse como una falla del terraplén que podría implicar la pérdida de su funcionalidad ya que significa una reducción del 20% en la dimensión vertical de la estructura.

La simulación de la propagación de la ola debida a un tsunami, con las características del mismo evento, mostró que la superficie libre del agua puede incrementarse hasta 1.5 m en la zona de la bahía de Manzanillo. Con ello, el análisis del comportamiento sismo-tsunami, mostró que para el escenario de pleamar máxima y suelo saturado, se presenta una variación mínima en los desplazamientos verticales en el suelo entre la etapa al final del sismo y la etapa al final de la inundación, de 0.73 m a 0.74 m concentrándose en la superficie y el pie del talud. En cuanto a los desplazamientos horizontales, no se observó variación en la etapa post sismo debida a la sobre elevación o las cargas hidrodinámicas.

En el caso de estudio analizado, el modelo secuencial presentado permitió identificar que la etapa de carga más crítica del terraplén fue debida a los movimientos del suelo, los cuales derivan en el incremento en la presión de poro que ocasionan la falla por desplazamiento vertical y horizontal. En el escenario sísmico analizado, el incremento en la elevación del mar no generó un efecto adicional importante en el comportamiento del terraplén. Sin embargo, no debe descartarse el análisis de escenarios con potencial de generar inundaciones de mayor altura y velocidad, dados los estados de deformación observados al final del sismo en los casos estudiados.

Capítulo 5 CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones finales

En este capítulo se presentan las conclusiones finales derivadas de la investigación doctoral. Por un lado, se discuten las contribuciones logradas a partir del marco metodológico introducido. Por otro lado, se analizan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología en los dos casos estudio presentados en los Capítulos 3 y 4. Finalmente se señalan algunas de las líneas de investigación futuras a desarrollar sobre el tema aquí estudiado.

5.1.1. Sobre la metodología

La predicción y el modelado precisos del impacto de sismos de gran magnitud en el comportamiento del tráfico en áreas urbanas conlleva grandes retos. El enfoque propuesto en esta investigación, basado en la modelación dinámica de tráfico, permitió obtener un resultado detallado y cercano de los impactos causados por los escenarios sísmicos en la operación y funcionalidad de redes de transporte en zonas urbanas. En estos sitios, los fenómenos de tráfico como la congestión y los patrones de desplazamiento pendulares son comunes y, sin duda, son susceptibles a acentuarse durante eventos naturales extremos. En esta investigación, se aplicó un marco metodológico multidisciplinario que incluye modelos numéricos de riesgo sísmico, análisis de respuesta del sitio, modelos de vulnerabilidad sísmico-estructural y modelos dinámicos de tráfico para obtener una representación precisa de la respuesta de la red de transporte durante escenarios sísmicos de magnitud importante.

Una de las principales observaciones derivada de la investigación es la confirmación de los efectos particulares provocados por sismos de diferentes fuentes en la misma zona, donde los daños esperados y los puntos de conflicto de tráfico pueden diferir de manera significativa, entre un evento y otro. Contar con una predicción más puntual de los posibles escenarios de daño y de respuesta de tráfico es valiosa en procesos como planeación urbana sostenible y resiliente, el diseño de protocolos ante desastres naturales y las políticas públicas orientadas a la prevención de pérdidas económicas y sociales durante eventos naturales extremos.

Los enfoques comúnmente utilizados para estudiar la vulnerabilidad de infraestructura de transporte en zonas urbanas la dividen en aquella ocasionada por el riesgo sísmico de la región y la fragilidad de las estructuras que conforman la infraestructura de transporte; y en la derivada de la configuración topológica de las redes y su interacción con la demanda de viajes. Esta división proporciona un análisis limitado sobre el comportamiento de las redes de tráfico y movilidad en zonas urbanas densamente pobladas, en las cuales tanto la respuesta estructural como el comportamiento esperado de la demanda, es decir los usuarios, en la red contribuyen en la capacidad o eficiencia con la que el sistema operará en las etapas posteriores a un evento sísmico de gran magnitud. La combinación de dichos enfoques, tradicionalmente estudiados de manera segregada, en un marco metodológico integral como el aplicado en esta investigación, permiten considerar las distintas variables e incertidumbres que contribuyen en la

formación de la vulnerabilidad total de los sistemas de transporte. Así mismo, esta aproximación permitió investigar las relaciones entre las variables sísmicas asociadas al fenómeno, como las aceleraciones y desplazamientos en el terreno, con las variables de comportamiento de tráfico, como los volúmenes de tráfico y tiempos de desplazamientos en los distintos elementos de las redes.

Un aspecto fundamental relacionado con los modelos numéricos aplicados en este estudio, son los datos requeridos para lograr resultados confiables, los cuales en muchos casos pueden no estar disponibles, completos, actualizados o representar dificultades para su obtención. En particular, en el caso analizado en la Ciudad de México, a pesar de ser una de las zonas metropolitanas más grandes ubicada en una región de alta sismicidad, se observó la disponibilidad sumamente limitada de curvas de fragilidad sísmica tanto para infraestructura estratégica (puentes, túneles, líneas ferroviarias, etc.), como para infraestructura residencial y comercial. En México, se han publicado un total de 11 documentos que incluyen artículos de revistas y actas de congresos desde 2008. Ponedá-Porras y Ordaz-Schroeder (2004), desarrollaron curvas de fragilidad para tuberías subterráneas basadas en relaciones empíricas observadas en el sistema primario de agua de la Ciudad de México. Posteriormente, otras funciones de fragilidad para muros confinados de mampostería fueron desarrolladas por Ruiz-García y Negrete (2009), obtenidas a partir de resultados experimentales de 118 especímenes de mampostería confinada ensayados bajo carga cíclica lateral, durante programas de investigación llevados a cabo en México. Otras investigaciones sobre edificios históricos se encuentran en Martínez et al. 2011, donde se ha modelado una antigua Catedral para determinar la fragilidad sísmica del edificio y los campanarios utilizando un método híbrido compuesto por un modelo analítico calibrado utilizando propiedades experimentales a partir de mediciones de vibraciones ambientales. Más recientemente curvas de fragilidad analíticas se presentaron en (Jara y Olmos 2011; Gómez-Soberón et al.2012; Jara et al.2013; Mayoral et al.2016; Jara et al.2017; Mayoral et al.2016; Jara et al.2017; Mayoral et al. 2017; Díaz et al.2018) para estudiar infraestructuras estratégicas como puentes de concreto reforzado, lumbreras, distribuidores viales urbanos y edificios de acero. Por otro lado, en el caso estudio de la ciudad de Manzanillo, se identificó que existe un área de oportunidad en la caracterización detallada de la batimetría en la zona del Pacífico Mexicano. Esta limitación conlleva a una incertidumbre sobre las elevaciones de tirante de agua obtenida a través de modelos numéricos. Un esfuerzo en la mejora del refinamiento de los datos batimétricos en la costa del Pacífico, mejoraría sustancialmente la confiabilidad de los modelos de predicción de propagación de tsunami en la zona de subducción mexicana.

Las limitaciones relacionadas con la cantidad y calidad de datos son una de las áreas de oportunidad más significativas en muchas zonas expuestas a peligros naturales, que restringen el desarrollo de modelos predictivos precisos y confiables sobre la magnitud de los daños y los escenarios de respuesta de infraestructura y redes urbanas.

5.1.2. Conclusiones sobre los casos de estudio

A partir de los resultados de la aplicación de la metodología en una parte de la red vial de la Ciudad de México se observó que, para escenarios de sismos extremos, la funcionalidad y continuidad de la red depende de la interacción de las condiciones del suelo, las características del entorno de edificios y la capacidad de la red vial. En el caso de estudio, se demostró que la red vial es más vulnerable ante sismos en áreas de suelo blando y en zonas de transición, donde los impactos negativos en las condiciones del tráfico fueron más pronunciados (i.e. incrementos de hasta 70% en los tiempos de viaje), ya que se alcanzaron altas probabilidades de daños moderados y mayores en las estructuras (i.e. hasta 45% de probabilidad de daño moderado en 192 cuadras para sismos normales con período de retorno $T_r=250$ años, más de 50% en 476 cuadras para $T_r=475$ años y en 726 cuadras para $T_r=2475$ años). Además, los procedimientos de cierre de calles y avenidas generan patrones de comportamiento de tráfico más adversos en zonas donde la red tienen poca capacidad, las intersecciones están controladas por semáforos y no hay pasos elevados ni túneles. De esta manera, se observó que existe un efecto combinado entre la vulnerabilidad estructural y la vulnerabilidad operativa, asociada con su topología y diseño geométrico, de las redes de transporte que amplifica la susceptibilidad de la red frente a eventos como sísmicos de gran magnitud.

El modelo de vulnerabilidad basado en la eficiencia operativa y las características del escenario sísmico permitió determinar la influencia del contenido de frecuencia y la magnitud del evento en la red. Este efecto se sintetizó a través de un indicador adimensional que involucra tanto las variables sismológicas asociadas al evento como las variables operativas tanto de oferta como de demanda de transporte, este indicador es el índice de vulnerabilidad sísmico-operativa. Para el caso estudio en la zona sur de la Ciudad de México, se observó que los eventos de fallas normales tienen el potencial de causar daños de moderados a mayores en un número más elevado de estructuras que aquellos eventos originados por mecanismo de subducción. Esta proporción de daños, ocasiona el cierre de una mayor cantidad de segmentos en la red, lo que disminuye las velocidades en muchos otros tramos e incrementa los tiempos de desplazamiento general en la red. En el caso de sismos de subducción, el número de segmentos clausurados temporalmente es menor que para un evento de falla normal con el mismo período de retorno. Sin embargo, el impacto en el comportamiento de tráfico resultó más significativo dado que de manera global se presentó una proporción mayor en la afectación de reducción de la velocidad y el incremento en los tiempos de viaje. Estas observaciones, tienen aplicaciones importantes en procesos de planeación de redes de transporte, logística urbana así como protocolos y rutas de prevención, evacuación y atención post desastre.

En un segundo caso se estudió el comportamiento de infraestructura de transporte localizada en la ciudad de Manzanillo, en la costa del Pacífico mexicano. Dado el riesgo múltiple inherente en zonas costeras en regiones de alta sismicidad, asociado a los movimientos del terreno y a la generación de inundaciones derivadas de tsunamis, se decidió evaluar el efecto secuencial al cual está sujeta la infraestructura de transporte cercana a la línea de costa. En el modelo propuesto se analizó la respuesta secuencial de

terraplenes carreteros construidos en suelos arenosos típicos de zonas costeras. El análisis se realizó, considerando el efecto acumulado de la deformación y la presión de poro en el suelo, ocasionados por una primera etapa de aplicación cargas cíclicas sísmicas, y una segunda etapa que consistió en el aumento de presiones hidrodinámicas asociadas al incremento de la altura del tirante de agua proveniente del océano. El análisis de zonas urbanas costeras conllevó el reto adicional de introducir un modelo numérico más para determinar la altura esperada de la inundación para el evento sísmico analizado. Esto se resolvió aplicando un modelo de simulación de propagación de tsunamis basado en las ecuaciones de aguas someras resuelto a través del método de volúmenes finitos. Se analizó la respuesta de un terraplén de la red vial urbana de la zona ante el escenario del sismo de Manzanillo en 1995, la respuesta se estudió en términos de fallas por desplazamientos permanentes y de fallas por licuación del suelo dados los incrementos en la presión de poro. Los resultados mostraron que, para la geometría analizada, los terraplenes localizados en el sitio, presentan susceptibilidad a presentar fallas por licuación. A través del caso estudio de la ciudad de Manzanillo, se lograron estudiar las variables adicionales que contribuyen en el incremento de la vulnerabilidad sísmica de redes de transporte en zonas urbanas costeras. Los elementos que conforman dichas redes deben planearse y diseñarse para admitir tanto las cargas asociadas a la propagación de los movimientos del terreno, como las probables cargas hidrodinámicas inducidas por fenómenos como los tsunamis, así como los efectos de licuación del suelo, comunes en suelos arenosos.

La metodología y el modelo de eficiencia presentados proporcionan un procedimiento y una herramienta cuantitativa para evaluar la vulnerabilidad y el desempeño operativo de las redes de transporte urbano. La identificación de los elementos vulnerables en las redes urbanas y los efectos potenciales de los peligros geo sísmicos son vitales en la planificación de áreas urbanas sostenibles y resilientes.

5.2. Futuras líneas de investigación

Dado el origen multidisciplinario de los modelos integrales de vulnerabilidad de redes urbanas ante eventos naturales extremos, como los presentados en este trabajo, existen diversas líneas de investigación que requieren continuar desarrollándose para alcanzar resultados cada vez más exactos.

Algunas futuras líneas de investigación podrían enfocarse en establecer procedimientos de modelado más precisos, para determinar una distribución espacial detallada de los parámetros del movimiento del suelo en áreas urbanas, lo que conduciría a reducir las incertidumbres en el modelado de escenarios de daño. En este mismo eje, es fundamental continuar con el desarrollo de curvas de fragilidad que consideren características de las estructuras que afectan su respuesta ante sismos como su estado de conservación, los efectos acumulados por eventos sísmicos previos o la interacción suelo-estructura. Con ello, se seguirá incrementando la capacidad predictiva de dichas funciones, mejorando así la confiabilidad de los modelos de vulnerabilidad y resiliencia a nivel urbano y regional.

Otra rama de investigación con el potencial de contribuir en mejorar los modelos de predicción de respuesta de redes ante eventos extremos podría enfocarse en extender los modelos de las redes de transporte para incluir sistemas de metro, sistemas ferroviarios y los viajes realizados en modos de transporte no motorizados. Esto permitirá contar una imagen completa del comportamiento de los sistemas de movilidad urbana, así como efectuar una comparación de la eficiencia sísmica entre las distintas redes o sistemas de transporte.

Finalmente, las tendencias actuales están orientadas a la integración de sistemas multirriesgo de predicción daños e impactos, que permitan conectar modelos de daños estructurales y operativos de diversas redes urbanas como transporte, electricidad, abastecimiento de agua y gas, los cuales son alimentados mutuamente tanto con datos históricos como con información en tiempo real. Dichos sistemas podrían reducir significativamente la vulnerabilidad de zonas urbanas ante eventos naturales extremos u otras emergencias.

REFERENCIAS

- Abdulhai, B., Porwal, H., & Recker, W. Short term freeway traffic flow prediction using genetically-optimized time-delay-based neural networks, California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-99-1, Report for MOU 360, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1999
- Abrahamson, N. A. Non-stationary spectral matching program RSPMATCH. Pacific Gas & Electric Company Internal Report, 1998
- Aghababaei, M. T., Costello, S. B., & Ranjitkar, P. Assessing operational performance of New Zealand's South Island road network after the 2016 Kaikoura Earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 101553.
- Ahmad, S., Kyriakides, N., Pilakoutas, K., Neocleous, K., & uz Zaman, Q.. Seismic fragility assessment of existing sub-standard low strength reinforced concrete structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2015, 14(3), 439-452.
- Aki, K. Seismic displacements near a fault. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(16), 5359-5376.
- Akiyama, M., Frangopol, D. M., & Ishibashi, H. (2020). Toward life-cycle reliability-, risk-and resilience-based design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1), 26-50.
- Alam, M. J., & Habib, M. A.. Mass Evacuation of Halifax, Canada: A Dynamic Traffic Microsimulation Modeling Approach. *Procedia Computer Science*, 2019, 151, 535-542.
- Altomare, C., Crespo, A. J., Domínguez, J. M., Gómez-Gesteira, M., Suzuki, T., & Verwaest, T. (2015). Applicability of smoothed particle hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering*, 96, 1-12.
- Amirsardari, A.; Sofi, M.; Lumantarna, E.; Imran, I.; Duffield, C. Impact of Earthquakes on the Transportation Infrastructure of Indonesia: A Preliminary Study. *Civ. Eng. Dimens.* 2019, 21, 19–28, doi:10.9744/ced.21.1.19-28.
- Anelli, A.; Mori, F.; Vona, M. Fragility Curves of the Urban Road Network Based on the Debris Distributions of Interfering Buildings. *Appl. Sci.*, 2020, 10, 1289, doi:10.3390/app10041289.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., & Hsein Juang, C. Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2), 285-308.
- Argyroudis, S.A.; Mitoulis, S.A.; Hofer, L.; Zanini, M.A.; Tubaldi, E.; Frangopol, D.M. Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets. *Sci. Total. Environ.*, 2020, 714, 136854, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136854.
- Argyroudis, S.; Selva, J.; Gehl, P.; Pitilakis, K. Systemic Seismic Risk Assessment of Road Networks Considering Interactions with the Built Environment. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 2015, 30, 524–540, doi:10.1111/mice.12136.
- Argyroudis, S.A.; Mitoulis, S.A.; Winter, M.G.; Kaynia, A.M. Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2019, 191, 106567, doi:10.1016/j.ress.2019.106567.
- Argyroudis, S., & Kaynia, A. M. (2015). Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11), 1863-1879.

- Attary, N., Van De Lindt, J. W., Barbosa, A. R., Cox, D. T., & Unnikrishnan, V. U. (2019). Performance-based tsunami engineering for risk assessment of structures subjected to multi-hazards: Tsunami following earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-20.
- Banerjee, S., & Chi, C. State-dependent fragility curves of bridges based on vibration measurements. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2013, 33, 116-125.
- Barceló, J., & Casas, J. Heuristic dynamic assignment based on microscopic traffic simulation. In *Proceedings of the 9th Meeting of the Euro Working Group on Bárcena, A.; Romo, M.P. RADSH: Programa de Computadora Para Analizar Depósitos de Suelo Estratificados Horizontalmente Sujetos a Excitaciones Dinámicas Aleatorias; Informe del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México, 1994*
- Transportation, 2002, 1-16
- Basöz, N. I., & Kiremidjian, A. S. Evaluation of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA. In *Technical Report NCEER. US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER); Japan International Center for Disaster Mitigation Engineering (INCEDE) 1997*
- Bhattacharya, S., Hyodo, M., Nikitas, G., Ismael, B., Suzuki, H., Lombardi, D., ... & Goda, K. (2018). Geotechnical and infrastructural damage due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 390-394.
- Behrens, J., Dias, F. 2015 New computational methods in tsunami science. *Phil. Trans. R. Soc. A373*: 20140382.<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0382>
- Berdica, K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport policy*. 2002, 9, 117-127.
- Berger M.J., George D.L., Le Veque R.J., Mandli K.T. The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Adv. Water Resour.*, 2011, 34, 1195–1206.
- Bommer, J. J., Abrahamson, N. A. Why do modern probabilistic seismic hazard analyses often lead to increased hazard estimates?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96: 1967-1977
- Botzen, W. W., Deschenes, O., & Sanders, M. (2019). The economic impacts of natural disasters: A review of models and empirical studies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2), 167-188.
- Brune, J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 1970, 75(26), 4997-5009.
- Burns, P. O., Barbosa, A. R., Olsen, M. J., & Wang, H. (2021). Multihazard Damage and Loss Assessment of Bridges in a Highway Network Subjected to Earthquake and Tsunami Hazards. *Natural Hazards Review*, 22(2), 05021002.
- Calvi G.M., Pinho R., Magenes G., Bommer J.J., Restrepo-Vélez L.F. and Crowley H. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *Journal of Earthquake Technology*, 2006 472, Vol. 43, No. 3 pp. 75-104
- Cantillo, V., Macea, L. F., & Jaller, M. Assessing vulnerability of transportation networks for disaster response operations. *Networks and Spatial Economics*, 2019, 19(1), 243-273.
- Cascetta, E. *Transportation systems analysis: models and applications*. Springer Science & Business Media. 2009
- Cavaleri, F., Correia, A. A., Crowley, H., & Pinho, R. Seismic fragility analysis of URM buildings founded on piles: influence of dynamic soil–structure interaction models. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2020

- Charnes, A.; Cooper, W.W.; Rhodes, E. Measuring the efficiency of decision making units. *Eur. J. Oper. Res.* 1978, 2, 429–444, doi:10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- Chen, A.; Yang, C.; Kongsomsaksakul, S.; Lee, M. Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Netw. Spat. Econ.* 2007, 7, 241–256, doi:10.1007/s11067-006-9012-5.
- Chilá, G.; Musolino, G.; Polimeni, A.; Rindone, C.; Russo, F.; Vitetta, A. Transport models and intelligent transportation system to support urban evacuation planning process. *IET Intell. Transp. Syst.* 2016, 10, 279–286.
- Chinnarasri, C., Thanasisathit, N., Ruangrassamee, A., Weesakul, S., & Lukkunaprasit, P.. The impact of tsunami-induced bores on buildings. In *Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering*, 2013, 166, 1, 14-24. Thomas Telford Ltd.
- Chiu, Y. C., Bottom, J., Mahut, M., Paz, A., Balakrishna, R., Waller, T., & Hicks, J. Dynamic traffic assignment: A primer. *Dynamic Traffic Assignment: A Primer*, 2011
- Choi, E., DesRoches, R., & Nielson, B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones. *Engineering structures*, 2004, 26(2), 187-199.
- Chong, S. H. Soil dynamic constitutive model for characterizing the nonlinear-hysteretic response. *Applied Sciences*, 2017, 7, 1110.
- Colombi, M., Borzi, B., Crowley, H., Onida, M., Meroni, F., & Pinho, R. Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6(3), 485-504.
- Cornell, C.A. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1968, 58, 1583–1606.
- Cramer, C. H. Site specific seismic hazard analysis that is completely probabilistic, *Bulletin of the Seismological Society of America* 2003, 93: 1841-1846
- Crowley, H., Colombi, M., and Silva, V. Epistemic Uncertainty in Fragility Functions for European RC Buildings. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities* (Pitilakis, Crowley, Kaynia, eds.), Springer, Netherlands, 2014
- Cubrinovski, M. (2013). *Liquefaction-Induced Damage in The2010-2011 Christchurch (New Zealand) Earthquakes.*
- Daganzo, C. F. Properties of link travel time functions under dynamic loads. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995, 29(2), 95-98.
- D’Ayala, D., and Meslem, A. Guide for Selection of existing analytical fragility curves and Compilation of the Database, Tech. Rep, GEM Foundation, Pavia, Italy, 2012
- Der Kiureghian, A. Bayesian methods for seismic fragility assessment of lifeline components. *Acceptable Risk Processes–Lifelines and Natural Hazards* 2002, 61-77.
- Díaz S., Pujades L., Barbat A., Hidalgo-Leiva D., Vargas-Alzate F. Capacity and fragility models for steel buildings: a probabilistic approach. *Bull Earthquake Eng*, 2018, 16: pp.1209–1243
- Dickmen U. “Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistant for soils”. *Journal of Geophysics and engineering* 6, 2009: 4167.
- Dizhur, D., Giaretton, M., & Ingham, J. M. (2017, June). *Damage Observations Following the M w 7.8 2016 Kaikoura Earthquake.* In *International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (pp. 249-261). Springer, Cham.
- Domínguez, R. T., Rodríguez-Lozoya, H. E., Sandoval, M. C., Sánchez, E. S., Meléndez, A. A., Rodríguez-Leyva, H. E., & Campos, R. A. Site response in a representative region of Manzanillo, Colima, Mexico, and a comparison between spectra from real records and spectra from normative. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 93, 113-120.

- Durante, M.G.; Di Sarno, L.; Zimmaro, P.; Stewart, J.P. Damage to Roadway Infrastructure from 2016 Central Italy Earthquake Sequence. *Earthq. Spectra* 2018, 34, 1721–1737, doi:10.1193/101317eqs205m.
- Dutykh D., Poncet R., Dias F. The VOLNA code for the numerical modeling of tsunami waves: generation, propagation and inundation. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 2011, 30, 598–615
- Düzgün, Ş.; Yüçemen, M.S.; Kalaycioglu, H.S.; Celik, K.; Kemeç, S.; Ertugay, K.; Deniz, A. An integrated earthquake vulnerability assessment framework for urban areas. *Nat. Hazards* 2011, 59, 917–947, doi:10.1007/s11069-011-9808-6.
- Electric Power Research Institute (EPRI), CEUS ground motion project, model development and results: Report 1008910, 2003
- Elnashai, A. S., Borzi, B., & Vlachos, S. Deformation-based vulnerability functions for RC bridges. *Structural Engineering and Mechanics* 2004, 17(2), 215-244.
- EQE International, "The October 9, 1995 Manzanillo, Mexico earthquake: Summary of structural damage", A summary report, EQE International, 1996, 6 - 14.
- Esteva, L. Criteria for the construction of spectra for seismic design, 3rd Pan-American Symposium of Structures, Caracas, Venezuela, 3-8 1967
- Fan, L.; Tangqing, L. Study on Optimization of Earthquake Transportation Emergency Management System. In *Proceeding of the 7th International Conference on Innovation and Management*, Tokyo, Japan, 7–10 February 2010; pp. 1851–1863.
- Feng, K., Li, Q., & Ellingwood, B. R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model. *Structure and Infrastructure Engineering* 2020, 1-15.
- Feng, K.; Li, Q.; Ellingwood, B.R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2020, 1–15, doi:10.1080/15732479.2020.1713170.
- Florian, M.; Mahut, M.; Tremblay, N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. *European Journal of Operational Research* 2008, 189, 1381-1392.
- Freiria, S., Ribeiro, B., & Tavares, A. O. Understanding road network dynamics: Link-based topological patterns. *Journal of transport geography* 2015, 46, 55-66.
- Gailler A, Hébert H, Loevenbruck A, Hernandez B. Simulation systems for tsunami wave propagation forecasting within the French tsunami warning system. *Nat. Hazards Earth Syst.Sci.* 2013, 13, 2465–2482.
- Galvis, F.; Miranda, E.; Heresi, P.; Dávalos, H.; Silos, J.R. Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in the September 19, 2017 Puebla-Morelos Earthquake; Blume Earthquake Engineering Center; Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University: Stanford, CA, USA, 2017.
- Gardoni, P., Der Kiureghian, A., & Mosalam, K. M. Probabilistic capacity models and fragility estimates for reinforced concrete columns based on experimental observations. *Journal of Engineering Mechanics* 2002, 128(10), 1024-1038.
- Gardoni, P., Mosalam, K. M., & Der Kiureghian, A. Probabilistic seismic demand models and fragility estimates for RC bridges. *Journal of earthquake engineering* 2003, 7, 79-106.
- Gazis, D.C.; Herman, R.; Potts, R.B. Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow. *Oper. Res.* 1959, 7, 499–505, doi:10.1287/opre.7.4.499.
- GEER. Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 19 September 2017 Mw 7.1 Puebla-Mexico City Earthquake, Version 2.0 Report No. GEER 055-A; Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association: Virginia, United States 2017. doi:10.18118/G6JD46.

- Geist, E. L. (1998). Local tsunamis and earthquake source parameters. *Advances in Geophysics*, 39, 117-209.
- George D.L., Le Veque R.L. Finite volume methods and adaptive refinement for global tsunami propagation and local inundation. *Sci. Tsunami Hazards* 24, 2006m 319–328. See <http://www.tsunamisociety.org/245george.pdf>
- Ghobadi, M., Salmon, G., Ganjali, Y., Labrecque, M., & Steffan, J. G. Caliper: Precise and responsive traffic generator. In 2012 IEEE 20th Annual Symposium on High-Performance Interconnects, 2012, 25-32. IEEE.
- Gobierno de la Ciudad de México. RCDF 2004 NTCDS-RCDF. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, Ciudad de México, México, 2004
- Goes, S. D. B. Irregular recurrence of large earthquakes: An analysis of historic and paleoseismic catalogs, *J. Geophys. Res.* 1996, 101(B3), 5739-5749
- Gomez, C.; Baker, J.W. An optimization-based decision support framework for coupled pre- and post-earthquake infrastructure risk management. *Struct. Saf.* 2019, 77, 1–9, doi:10.1016/j.strusafe.2018.10.002.
- Groholski, D. R.; Hashash, Y. M.; Kim, B.; Musgrove, M.; Harmon, J.; Stewart, J. P. Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142.
- Grubestic, T. H., Matisziw, T. C., Murray, A. T., & Snediker, D. Comparative approaches for assessing network vulnerability. *International Regional Science Review* 2008, 31(1), 88-112.
- Hall, M. D., Van Vliet, D. and Willumsen, L. G. (1980) “SATURN — a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes.” *Traffic Engineering and Control*, 21 (4): 168–176
- Han, S., Fang, S., Wang, X., Chen, X., & Cai, Y. A simulation-based dynamic traffic assignment model for emergency management on the hangzhou bay bridge. In *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable 2010*, pp. 883-895
- Harig S., Chaeroni X., Pranowo W.S., Behrens J. Tsunami simulations on several scales: comparison of approaches with unstructured meshes and nested grids. *Ocean Dyn.* 2008 58,429–440.
- Hébert H., Burg P.E., Binet R., Lavigne F., Allgeyer S., Schindelé F. The 2006 July 17 Java(Indonesia) tsunami from satellite imagery and numerical modelling: a single or complex source? *Geophys. J. Int.* 2012 191, 1255–1271.
- Hirokawa, N.; Osaragi, T. Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread. *J. Disaster Res.* 2016, 11, 175–187, doi:10.20965/jdr.2016.p0175.
- Hollnagel, E. (Ed.). *Resilience engineering in practice: A guidebook*. Ashgate Publishing, Ltd.. 2013
- Huang, Z. K., Pitilakis, K., Tsinidis, G., Argyroudis, S., & Zhang, D. M. Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2020, 98, 103341.
- Hudson, M., Idriss, I. M., & Beikae, M. QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis. 1994
- Hwang, H., Jernigan, J. B., & Lin, Y. W. Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems. *Journal of Bridge Engineering* 2000, 5(4), 322-330.

- Iai, S. (2019). Evaluation of performance of port structures during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105192.
- Idriss, I. M. Quad-4: a computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures. University of California. 1973
- INRO Consultants Inc. 1998. EMME/2 User's Manual Montreal
- Imai, T. "P and S wave velocities of the ground in Japan". *Proceedings of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 1977: 127-132.
- Imamura F., Yalciner A.C., Ozyurt G. 2006 Tsunami modelling manual. See <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/projects/manual-ver-3.1.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2018) Encuesta Origen-Destino en hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México, México.
- Ishibashi, H., Akiyama, M., Frangopol, D. M., Koshimura, S., Kojima, T., & Nanami, K. (2020). Framework for estimating the risk and resilience of road networks with bridges and embankments under both seismic and tsunami hazards. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-21.
- Itasca Consulting Group (2005) FLAC, fast lagrangian analysis of continua, user's guide. Minneapolis Minnesota, United States,
- Jaimes, M. A., Reinoso, E., Ordaz, M., Silva, R., Mendoza, E., Huerta, B., ... & Rodríguez, J. C. (2016, December). An earthquake-event-based method for mapping tsunami hazards. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 169, No. 4, pp. 148-162). Thomas Telford Ltd.
- Jara, J. M.; Olmos, B. A.; Martínez, G. (2017) Dynamic properties and seismic vulnerability of typical RC bridges located in México. *Procedia engineering* 199, 2973-2978.
- Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. S., & Hu, T. Y. An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1994, 2(3), 129-147.
- Jenelius, E., & Mattsson, L. G. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems* 2015, 49, 136-147.
- Jose, J., Choi, S. J., Giljarhus, K. E. T., & Gudmestad, O. T. (2017). A comparison of numerical simulations of breaking wave forces on a monopile structure using two different numerical models based on finite difference and finite volume methods. *Ocean Engineering*, 137, 78-88.
- Kakderi, K.; Ptilakis, K. *Seismic Analysis and Fragility Curves of Gravity Waterfront Structures*; Missouri University of Science and Technology: Rolla, MO, USA, 2010.
- Karafagka, S., Fotopoulou, S., & Ptilakis, K. (2018). Analytical tsunami fragility curves for seaport RC buildings and steel light frame warehouses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 112, 118-137.
- Karantoni, F., Tsionis, G., Lyrantzaki, F., & Fardis, M. N. Seismic fragility of regular masonry buildings for in-plane and out-of-plane failure. *Earthquakes and Structures* 2014, 6(6), 689-713.
- Kawashima, K. Damage of bridges due to the 2011 great east japan earthquake. *J. Jpn. Assoc. Earthq. Eng.* 2012, 12, 4, doi:10.5610/jaee.12.4_319.
- Kazama, M.; Noda, T. Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage). *Soils Found.* 2012, 52, 780-792, doi:10.1016/j.sandf.2012.11.003.

- Kennedy P.P., Cornell C.A., Campbell R.D., Kaplan S., Perla H.F. Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*. (1980) 59 (2), pp. 315-338
- Kermanshah, A.; Derrible, S. A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against extreme earthquakes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2016, 153, 39–49, doi:10.1016/j.ress.2016.04.007.
- Kessels, F. Mesoscopic Models. In *Traffic Flow Modelling* (pp. 99-106). Springer, Cham. 2019
- Kilanitis, I.; Sextos, A. Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas. *Bull. Earthq. Eng.* 2018, 17, 181–210, doi:10.1007/s10518-018-0457-y.
- Klapp, J., Areu-Rangel, O. S., Cruchaga, M., Aránguiz, R., Bonasia, R., Godoy, M. J., & Silva-Casarín, R. (2020). Tsunami hydrodynamic force on a building using a SPH real-scale numerical simulation. *Natural Hazards*, 100(1), 89-109.
- Klügel, J. U. Seismic Hazard Analysis - Quo vadis?, *Earth-Science Reviews* 2008, 88, 1-2, p.p 1-32, ISSN 0012-8252
- Ko, Y.Y.; Yang, H.H.; Chen, C.H. *Seismic Fragility Analysis for Sheet Pile Wharves—Case Study of the Hualien harbor in Taiwan*; Missouri University of Science and Technology: Rolla, MO, USA, 2010.
- Koc, E., Cetiner, B., Soibelman, L., & Taciroglu, E. System-Based Vulnerability and Resilience Assessment in Mega-Scale Transportation Systems: Towards Data and Model-Driven Methodologies. In *Computing in Civil Engineering 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience* Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2019, pp. 444-450
- Koshimura, S., Hayashi, S., & Gokon, H. (2014). The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction. *Soils and Foundations*, 54(4), 560-572.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2006, 4(4), 415-443.
- Le Veque R.J., George D.L., Berger M.J. 2011 Tsunami modeling with adaptively refined finite volume methods. *Acta Numer.* 20, 211–289.
- Leonard, D.R., Gower, P., Taylor, N.B., 1989. CONTRAM: Structure of the model. Transport and Road Research Laboratory (TRRL) Research Report 178. Department of Transport, Crowthorne.
- Li, G., West, A. J., Densmore, A. L., Hammond, D. E., Jin, Z., Zhang, F., ... & Hilton, R. G. Connectivity of earthquake-triggered landslides with the fluvial network: Implications for landslide sediment transport after the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 2016, 121(4), 703-724.
- Liao, T.-Y.; Hu, T.-Y.; Ko, Y.-N. A resilience optimization model for transportation networks under disasters. *Nat. Hazards* 2018, 93, 469–489, doi:10.1007/s11069-018-3310-3.
- Liao, S. S., Veneziano, D., & Whitman, R. V. (1988). Regression models for evaluating liquefaction probability. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(4), 389-411.
- Lighthill, M.J.; Whitham, G.B. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci.* 1955, 229, 317–345, doi:10.1098/rspa.1955.0089.

- Lilhanand, K.; Tseng, W. S. (1988) Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra. In Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 819-824.
- Liu X.; Cheng XH.; Scarpas A.; Blaauwendraad, J. (2015) Numerical modelling of nonlinear response of soil. Part 1: Constitutive model. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 1849–1881.
- Liu, M., & Shi, J. A cellular automata traffic flow model combined with a BP neural network based microscopic lane changing decision model. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 2019, 23(4), 309-318.
- Liu, Y., So, E., Li, Z., Su, G., Gross, L., Li, X., ... & Wu, L. Scenario-based seismic vulnerability and hazard analyses to help direct disaster risk reduction in rural Weinan, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 2020, 101577.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., & Seed, H. B. FLUSH-A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems (No. PB--259332). California Univ.. 1975
- Mahut, M.; Florian, M.; Tremblay, N.; Campbell, M.; Patman, D.; McDaniel, Z.K. Calibration and Application of a Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Model. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2004, 1876, 101–111, doi:10.3141/1876-11.
- Mahut, M. A multi-lane link model of traffic dynamics based on the "space-time" queue. In the Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference, Oakland, California, United States, IEEE, 122-126. 2001
- Marcianò, F. A., Musolino, G., & Vitetta, A. Within-day traffic assignment and signal setting in road evacuation: a procedure with explicit path enumeration. *International Journal of Safety and Security Engineering* 2013, 3(3), 196-205.
- Marcianò, F.A.; Musolino, G.; Vitetta, A. Signal setting optimization on urban road transport networks: The case of emergency evacuation. *Saf. Sci.* 2015, 72, 209–220, doi:10.1016/j.ssci.2014.08.005.
- Marcianò, F.A.; Musolino, G.; Vitetta, A. Within-day traffic assignment and signal setting in road evacuation: A procedure with explicit path enumeration. *WIT Trans. Built Environ.* 2011, 117, 403–414, doi:10.2495/safe110351.
- Martino, S.; Bozzano, F.; Caporossi, P.; D'Angiò, D.; Della Seta, M.; Esposito, C.; Marmoni, G.M. Impact of landslides on transportation routes during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Landslides* 2019, 16, 1221–1241.
- Maruyama, Y.; Yamazaki, F.; Mizuno, K.; Tsuchiya, Y.; Yogai, H. Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2010, 30, 1158–1167, doi:10.1016/j.soildyn.2010.04.024.
- Maruyama, Y.; Yamazaki, F.; Mizuno, K.; Yogai, H.; Tsuchiya, Y. Development of fragility curves for highway embankment based on damage data from recent earthquakes in Japan. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12–17 October 2008.
- Mattsson, L. G., & Jenelius, E. Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2015, 81, 16-34.
- Mayoral J., Badillo A., Alcaraz M. (2017) Vulnerability and recovery time evaluation of an enhanced urban overpass foundation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 100 pp. 1-15

- Mayoral, J. M.; Asimaki, D.; Tepalcapa, S.; Wood, C.; Roman-de la Sancha, A.; Hutchinson, T.; Montalva, G. (2019a) Site effects in Mexico City basin: Past and present. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 369-382.
- Mayoral, J. M.; Tepalcapa, S.; Roman-de la Sancha, A.; El Mohtar, C. S.; Rivas, R. (2019b) Ground subsidence and its implication on building seismic performance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 126, 105766.
- Mayoral, J. M.; De la Rosa, D.; Tepalcapa, S. (2019c) Topographic effects during the September 19, 2017 Mexico City earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125, 105732.
- Mayoral, J. M.; Badillo, A.; Alcaraz, M. (2017) Vulnerability and recovery time evaluation of an enhanced urban overpass foundation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 100, 1-15.
- Mayoral, J. M.; Castañón, E.; Alcantara, L.; Tepalcapa, S. (2016) Seismic response characterization of high plasticity clays. *Soil dynamics and earthquake engineering* 84, 174-189
- Mayoral, J. M.; Argyroudis, S.; Castañón, E. (2016) Vulnerability of floating tunnel shafts for increasing earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 80, 1-10.
- Mayoral, J. M.; Romo, M. P. Seismic response of bridges with massive foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2015, 71, 88-99.
- Mayoral, J. M.; Ramirez, J. Z. Site response effects on an urban overpass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2011, 31, 849-855.
- Mayoral, J. M.; Romo, M. P.; Osorio, L. Seismic parameters characterization at Texcoco lake, Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2008, 28, 507-521.
- Martin, G. R., Seed, H. B., & Finn, W. L. (1975). Fundamentals of liquefaction under cyclic loading. *Journal of the geotechnical engineering division*, 101(5), 423-438.
- McGuire, R. K., Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop, *Bulletin of the Seismological Society of America* 1995, 85: 1275-1284
- McGuire, R. K. FORTRAN computer program for seismic risk analysis. U.S. Geological Survey 76-67 Open-File Rept. 1976
- McKenna, G., Argyroudis, S. A., Winter, M. G., & Mitoulis, S. A. (2021). Multiple hazard fragility analysis for granular highway embankments: Moisture ingress and scour. *Transportation Geotechnics*, 26, 100431.
- Milosevic, J., Cattari, S., & Bento, R. Definition of fragility curves through nonlinear static analyses: procedure and application to a mixed masonry-RC building stock. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2020, 18(2), 513-545.
- Misra, S., & Padgett, J. E. Seismic Fragility of Railway Bridge Classes: Methods, Models, and Comparison with the State of the Art. *Journal of Bridge Engineering* 2019, 24(12), 04019116.
- Moschonas, I. F., Kappos, A. J., Panetsos, P., Papadopoulos, V., Makarios, T., & Thanopoulos, P. Seismic fragility curves for Greek bridges: methodology and case studies. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2009, 7(2), 439.
- Muntasir Billah, A. H. M., & Alam, M. S. Seismic fragility assessment of concrete bridge pier reinforced with superelastic shape memory alloy. *Earthquake Spectra* 2015, 31(3), 1515-1541.
- Musolino, G.; Vitetta, A. Short-term forecasting in road evacuation: Calibration of a travel time function. *Urban Transport XVII* 2011, 116, 615-626, doi:10.2495/ut110521.

- Nabian, M. A., & Meidani, H. Accelerating Stochastic Assessment of Post-Earthquake Transportation Network Connectivity via Machine-Learning-Based Surrogates (No. 18-05162). 2018
- Nakanishi, H.; Black, J.; Matsuo, K. Disaster resilience in transportation: Japan earthquake and tsunami 2011. *Int. J. Disaster Resil. Built Environ.* 2014, 5, 341–361, doi:10.1108/ijdrbe-12-2012-0039.
- NIBS. Users's manual and technical manuals. In Report Prepared for the Federal Emergency Management Agency; National Institute of Building Sciences: Washington, DC, USA, 2012
- Nielson, B. G., & DesRoches, R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States. *Earthquake Spectra* 2007, 23(3), 615-633.
- Nikoo, N., Babaei, M., & Mohaymany, A. S. Emergency transportation network design problem: Identification and evaluation of disaster response routes. *International journal of disaster risk reduction* 2018, 27, 7-20.
- Nuzzolo, A., & Lam, W. H. A Dynamic Strategy-based Path Choice Modelling for Real-time Transit Simulation. In *Modelling Intelligent Multi-Modal Transit Systems* (pp. 168-189). CRC Press. 2017
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135-1154.
- Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 82(2), 1018-1040.
- Ordaz, M., y Reyes, C. Earthquake hazard in Mexico City: Observations versus computations, *Bulletin of the Seismological Society of America* 1999, 89: 1379-1383
- Oropeza, M., Michel, C., Bigler, M., & Lestuzzi, P. New analytical fragility curves for existing URM buildings in regions with moderate seismicity. In *Eighth International Masonry Conference*. 2010
- Ortúzar, J.D.; Willumsen, L.G. *Modelling Transport*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2011
- Osorio, L.; Mayoral, J. M. (2013) Seismic microzonation for the northeast Texcoco lake area, Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 252-266.
- Ovando-Shelley, E. and Romo, M. P., "Three Recent Damaging Earthquakes in Mexico" (2004). *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.
- Pan, Y., Agrawal, A. K., Ghosn, M., & Alampalli, S. Seismic fragility of multispan simply supported steel highway bridges in New York State. II: Fragility analysis, fragility curves, and fragility surfaces. *Journal of Bridge Engineering* 2010, 15(5), 462-472.
- Papageorgiou, M., Papamichail, I., Messmer, A., & Wang, Y. (2010). Traffic simulation with METANET. In *Fundamentals of traffic simulation* (pp. 399-430). Springer, New York, NY.
- Peeta, S.; Ziliaskopoulos, A.K. Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future. *Netw. Spat. Econ.* 2001, 1, 233–265, doi:10.1023/a:1012827724856.
- Pi, X.; Ma, W.; Qian, Z. (Sean) A general formulation for multi-modal dynamic traffic assignment considering multi-class vehicles, public transit and parking. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2019, 104, 369–389, doi:10.1016/j.trc.2019.05.011.
- Pitilakis, K.; Crowley, H.; Kaynia, A.M. SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk. *Geotech. Geol. Earthq. Eng.* 2014, 27, 1–28.

- Pitilakis, K., Raptakis, D., Lontzetidis, K., Tika-Vassilikou, T., & Jongmans, D. (1999). Geotechnical and geophysical description of EURO-SEISTEST, using field, laboratory tests and moderate strong motion recordings. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(03), 381-409.
- Porter, K.R. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. *Eng. 2015*, 1–29, doi:10.1007/978-3-642-36197-5_256-1.
- Porter, K., A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. University of Colorado Boulder, 136 pp., <https://www.sparisk.com/pubs/Porter-beginners-guide.pdf>. 2020
- Pranowo W.S., Behrens J., Schlicht J., Ziemer C. 2008 Adaptive mesh refinement applied to tsunami modeling: TsunaFLASH. InProc. Int. Conf. on Tsunami Warning (ICTW)(ed.H Adrianto). Jakarta, Indonesia: State Ministry of Research and Technology, Republic of Indonesia (RISTEK)
- PTV (2006) <http://www.english.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf-vision.pl> Último acceso diciembre 5, 2018
- Pujades, L.G., Barbat, A.H., González-Drigo, R., Avila, J., Lagomarsino, S. (2012). Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1), pp. 331-349
- Punzo, V., & Simonelli, F. Analysis and comparison of microscopic traffic flow models with real traffic microscopic data. *Transportation Research Record* 2005, 1934(1), 53-63.
- Rahman Bhuiyan, M. A., & Alam, M. S. Seismic vulnerability assessment of a multi-span continuous highway bridge fitted with shape memory alloy bars and laminated rubber bearings. *Earthquake Spectra* 2012, 28(4), 1379-1404.
- Rahman, M., Chowdhury, M., Xie, Y., & He, Y. Review of microscopic lane-changing models and future research opportunities. *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 2013, 14(4), 1942-1956.
- Ramanathan, K., DesRoches, R., & Padgett, J. E. A comparison of pre-and post-seismic design considerations in moderate seismic zones through the fragility assessment of multispan bridge classes. *Engineering Structures* 2012, 45, 559-573.
- Rauch, A. F. (1997). EPOLLS: an empirical method for predicting surface displacements due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Realworld Research & Consultation Company, MaxDEA Basic [computer program]. Version 5.0. Beijing, Ltd, 2014.
- Reyes, C., El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios, Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado, 1999
- Reymond D., Okal E.A., Hébert H., Bourdet M. Rapid forecast of tsunami wave heights from a database of pre-computed simulations, and application during the 2011Tohoku tsunami in French Polynesia. *Geophys. Res. Lett.* 2012, 39, L11603.
- Rodrigue, J. P. *The geography of transport systems*. Routledge. 2020
- Roman-de la Sancha, A.; Mayoral, J.M.; Hutchinson, T.; Candia, G.; Montgomery, J.; Tepalcapa, S. Assessment of fragility models based on the Sept 19th, 2017 earthquake observed damage. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2019, 125, 105707, doi:10.1016/j.soildyn.2019.105707.
- Román-de la Sancha, A., & Silva, R. Multivariable Analysis of Transport Network Seismic Performance: Mexico City. *Sustainability*, 2020 12(22), 9726.

- Romeo, S.; Di Matteo, L.; Melelli, L.; Cencetti, C.; Dragoni, W.; Fredduzzi, A. Seismic-induced rockfalls and landslide dam following the October 30, 2016 earthquake in Central Italy. *Landslides* 2017, 14, 1457–1465, doi:10.1007/s10346-017-0841-8.
- Romo, M. P. Clay behavior, ground response and soil-structure interaction studies in Mexico City. *Proceeding of the 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, United States, April 1995.
- Rota, M., Penna, A., & Strobbia, C. L. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2008, 28(10-11), 933-947.
- Rosenblueth, E., Modelos probabilísticos de la ocurrencia de temblores, *Memorias del Simposio Generación, Propagación y Efectos de Temblores*, SMMS, SMIS, SMF, UGM, 1987
- Rossetto T., D’Ayala D., Ioannou I., Meslem A. Evaluation of Existing Fragility Curves. In: Ptilakis K., Crowley H., Kaynia A. (eds) *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, vol 27. Springer, Dordrecht, 2014
- Rosti, A., Del Gaudio, C., Rota, M., Ricci, P., Di Ludovico, M., Penna, A., & Verderame, G. M. Empirical fragility curves for Italian residential RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2020, 1-19.
- Rowell, M., & Goodchild, A. (2017). Effect of Tsunami Damage on Passenger and Forestry Transportation in Pacific County, Washington. *Transportation Research Record*, 2604(1), 88-94.
- Ruiz-García, J.; Negrete, M. Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones. *Engineering Structures*, 2009, 31, 170-181.
- Russo, F., & Rindone, C. *Data Envelopment Analysis (DEA) for evacuation planning* (pp. 455-467). WIT Press, Southampton. 2010
- Sarkis, A.I.; Palermo, A.; Kammouh, O.; Cimellaro, G.P. Seismic resilience of road bridges: Lessons learned from the 14 November 2016 Kaikōura Earthquake. In *Proceedings of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Melbourne, Australia, 9–13 July 2018*; p. 588.
- Sarkis, A. I., Palermo, A., Kammouh, O., & Cimellaro, G. P. (2020). Seismic resilience of road bridges: lessons learned from the 14 November 2016 Kaikōura Earthquake.
- Schintler, L. A., Kulkarni, R., Gorman, S., & Stough, R.. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks. *Networks and Spatial Economics* 2007, 7(4), 301-313.
- Schintler, L. A., Kulkarni, R., Gorman, S., & Stough, R. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks. *Networks and Spatial Economics* 2007, 7(4), 301-313.
- Schnabel, P.B. *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*; EERC Report 72-12; University of California: Berkeley, CA, USA, 1972.
- Seed, H.B.; Romo, M.P.; Sun, J.I.; Jaime, A.; Lysmer, J. The Mexico Earthquake of September 19, 1985—Relationships between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions. *Earthq. Spectra* 1988, 4, 687–729, doi:10.1193/1.1585498.
- Seed, H. B., Idriss, M. I. y Arango, I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 1983, 109(3): pp 458-82

- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Kiefer, F. W. Characteristics of rock motions during earthquakes. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 1969
- Seed H.B., e Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J Soil Mech Found Div, ASCE*, 1971, 1249-1273.
- Seed, H.B.; Idriss, I.M. *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis*; Calif. Report No. EERC 70-10; University of California: Berkeley, CA, USA, 1970
- Singh, S. K. y Ordaz, M., (1994). *Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual*. CENAPRED
- Sisiopiku, V.P.; Li, X. Overview of dynamic traffic assignment options. In *Proceedings of the 2006 Transportation Simulation Symposium*, Huntsville, AL, USA, 2-6 April 2006
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H. K., & Kim, S. H. Nonlinear static procedure for fragility curve development. *Journal of engineering mechanics* 2000, 126(12), 1287-1295.
- Smith, M. J., & Wisten, M. B.. A continuous day-to-day traffic assignment model and the existence of a continuous dynamic user equilibrium. *Annals of Operations Research*, 1995, 60(1), 59-79.
- Systematics, C. . *Traffic congestion and reliability: Trends and advanced strategies for congestion mitigation* (No. FHWA-HOP-05-064). United States. Federal Highway Administration, 2005
- Tang, Y., & Huang, S. Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach. *Transportation research part D: transport and environment* 2019, 77, 390-402.
- Taylor, N. B. The CONTRAM dynamic traffic assignment model. *Networks and spatial economics* 2003, 3(3), 297-322.
- Toledo, T., Cats, O., Burghout, W., & Koutsopoulos, H. N. Mesoscopic simulation for transit operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2010, 18(6), 896-908.
- Toya, H., & Skidmore, M. (2007). Economic development and the impacts of natural disasters. *Economics letters*, 94(1), 20-25
- Titov, V. V., & Synolakis, C. E.. Numerical modeling of tidal wave runup. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1998, 124(4), 157-171.
- Titov, V. V., & Synolakis, C. E. Extreme inundation flows during the Hokkaido-Nansei-Oki tsunami. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(11), 1315-1318.
- Titov VV, Gonzalez FI. Implementation and testing of the Method Of Splitting Tsunami(MOST) model. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112 1927, NOAA, Seattle, WA,USA. 1997
- Üstün, A.K. Evaluating İstanbul's disaster resilience capacity by data envelopment analysis. *Nat. Hazards* 2015, 80, 1603-1623, doi:10.1007/s11069-015-2041-y.
- Van Vliet, D. S. A. T. U. R. N. SATURN-a modern assignment model. *Traffic Engineering & Control*, 1982, 23(HS-034 256).
- Vater S., Behrens J. Well-balanced inundation modeling for shallow-water flows with discontinuous Galerkin schemes. In *Finite volumes for complex applications VII—Elliptic, parabolic and hyperbolic problems* (eds J Fuhrmann, M Ohlberger, C Rohde). Berlin, Germany: Springer 2014
- Villar-Vega, M.; Silva, V.; Crowley, H.; Yepes, C.; Tarque, N.; Acevedo, A.B.; Hube, M.A.; Gustavo, C.D.; María, H.S. Development of a Fragility Model for the

- Residential Building Stock in South America. *Earthq. Spectra* 2017, 33, 581–604, doi:10.1193/010716eqs005m.
- Vosooghi, A., & Saiidi, M. S. Experimental Fragility Curves for Seismic Response of Reinforced Concrete Bridge Columns. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(6).
- Williams, J. H., Wilson, T. M., Horspool, N., Paulik, R., Wotherspoon, L., Lane, E. M., & Hughes, M. W. (2020). Assessing transportation vulnerability to tsunamis: utilising post-event field data from the 2011 Tōhoku tsunami, Japan, and the 2015 Illapel tsunami, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 451-470.
- Wang X. 2009 User manual for COMCOT version 1.7. Ithaca, NY: Cornell University.
- Wang, Y.; Szeto, W.; Han, K.; Friesz, T.L. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transp. Res. Part B: Methodol.* 2018, 111, 370–394, doi:10.1016/j.trb.2018.03.011.
- Wardrop, J.G. Road paper. some theoretical aspects of road traffic research. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 1952, 1, 325–362, doi:10.1680/ipeds.1952.11259.
- Yang, Q., & Koutsopoulos, H. N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996, 4(3), 113-129.
- Yang, Q., Koutsopoulos, H. N., & Ben-Akiva, M. E. Simulation laboratory for evaluating dynamic traffic management systems. *Transportation Research Record*, 2000, 1710(1), 122-130.
- Yamazaki, F., Motomura, H., & Hamada, T.. Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering 2000*
- Yasuda, S.; Towhata, I.; Ishii, I.; Sato, S.; Uchimura, T. Liquefaction-induced damage to structures during the 2011 great east japan earthquake. *J. JSCE* 2013, 1, 181–193, doi:10.2208/journalofjsce.1.1_181.
- Yeh, H., Liu, P., Briggs, M., & Synolakis, C. Propagation and amplification of tsunamis at coastal boundaries. *Nature*, 1994, 372(6504), 353-355.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2001, 127(4), 297-313.
- Youngs, R. R. y Coppersmith, K. J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, *Bulletin of the Seismological Society of America* 1985, 75: 939-964
- Zhang, W.; Wang, N. Resilience-based risk mitigation for road networks. *Struct. Saf.* 2016, 62, 57–65, doi:10.1016/j.strusafe.2016.06.003.
- Zhang, Y.; Atasoy, B.; Akkinepally, A.; Ben-Akiva, M. Dynamic Toll Pricing using Dynamic Traffic Assignment System with Online Calibration. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2019, 2673, 532–546, doi:10.1177/0361198119850135.
- Zhang, J., & Huo, Y. Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method. *Engineering Structures*, 2009, 31(8), 1648-1660.
- Zhang Y.J., Baptista AM. An efficient and robust tsunami model on unstructured grids. Part I: inundation benchmarks. *Pure Appl. Geophys.* 2008, 165, 2229–2248