

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



**Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Campus Ensenada**

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

“Escenario de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana, Baja California”

TESIS
que para obtener el grado de
MAESTRA EN INGENIERÍA

Presenta:
Patricia Romero Bada

Ensenada, Baja California, agosto de 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

Escenario de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana, Baja California

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRA EN INGENIERÍA

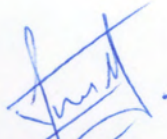
Presenta

Patricia Romero Bada

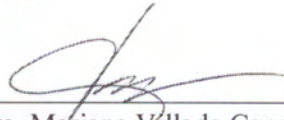
Aprobada por:



Dr. Mario González Durán
Director de Comité de Tesis



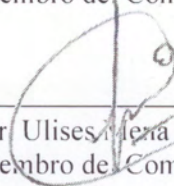
Dr. José Rubén Campos Gaytán
Miembro del Comité de Tesis



Dra. Mariana Villada Canela
Miembro del Comité de Tesis



Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro
Miembro del Comité de Tesis



Dr. Ulises Mena Hernández
Miembro del Comité de Tesis

Ensenada Baja California, México. Agosto de 2020

Resumen de la tesis de Patricia Romero Bada, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRA EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, agosto de 2020.

ESCENARIO DE RIESGO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE TIJUANA, BAJA CALIFORNIA

Resumen Aprobado por:



Dr. Mario González Durán
Director de Tesis

La importancia de la realización del escenario de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana, Baja California, es evaluar las posibles pérdidas económicas por daños a las edificaciones y a las personas que las ocupan ante la manifestación de sismo. El escenario se realizó considerando edificaciones de tipo habitacional, industrial y comercial. La generación de un escenario sísmico se llevó a cabo con la integración de tres componentes: peligro sísmico, exposición y vulnerabilidad de los elementos que integran la exposición. El peligro sísmico fue desarrollado por el grupo I de trabajo integrado por el Capítulo San Diego del Earthquake Engineering Research Institute (EERI) del “San Diego Earthquake Planning Scenario, Magnitude 6.9 on the Rose Canyon Fault”. Con la suposición de que ocurra un sismo con $M_w = 6.9$, a una profundidad de 7.7 km con periodo de retorno de 1000 años, epicentro localizado $N33.01^\circ W117.32^\circ$, con una directividad hacia el sur.

El inventario de elementos expuestos se basa en la encuesta intercensal Nacional de 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Conformado por 505, 631 edificaciones y 1, 617, 559 habitantes. Las curvas de vulnerabilidad atienden principalmente los cuatro sistemas constructivos predominantes de la región que son mampostería, acero, concreto y madera, tomadas por las publicaciones realizadas por la fundación Global Earthquake Model (GEM) en Latinoamérica.

El escenario de riesgo sísmico fue desarrollado mediante la herramienta OpenQuake Engine, una iniciativa la fundación Global Earthquake Model (GEM). Al aplicar esta herramienta, se encontró que las afectaciones económicas totales son de 4, 798 millones USD, incidiendo en un total de 60 personas.

AGRADECIMIENTOS

A Conacyt por apoyarme y tener confianza en mi proyecto de superación y crecimiento profesional.

A la Universidad Autónoma de Baja California, por proveerme de las herramientas e instalaciones para mi desarrollo académico, por sus excelentes profesores de actitud proactiva y alegre en todo momento.

Al Dr. Mario González Durán, por ser mi director de tesis y guiarme siempre con optimismo hacía mi meta, incansable al momento de buscar soluciones a los obstáculos del desarrollo de mi investigación.

A mis sinodales de tesis, Dr. José Rubén Campos Gaytán, Dra. Mariana Villada Canela, Dr. Ulises Mena, Hernández y al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro, por estar al pendiente de mi crecimiento académico y enseñarme disciplina en los procedimientos para realizar una investigación.

A mi comité de examen, Dr. José Rubén Campos Gaytán, Dra. Mariana Villada Canela, Dr. Álvaro López Lambraño, y al Dr. Efraín Gómez Arias, por su tiempo y recomendaciones de valiosa utilidad.

A mi compañero de posgrado, Francisco Damián Díaz Guzmán, por estar conmigo en todo momento para resolver mis dudas, y por su apoyo y consejos morales.

A mi esposo, Gerardo Díaz Carrillo, por estar de la mano conmigo siempre, por respetar mis decisiones con afecto y entendimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
CAPÍTULO I. Introducción.....	9
1. 1 Antecedentes.....	9
1.1.1 Sitio de estudio.....	11
1.1.2 Geología de Tijuana y condiciones de sitio	12
1.2 Planteamiento del problema.....	14
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivo general.....	17
1.4.1 Objetivos particulares	17
1.5 Marco Teórico.....	18
1.5.1 Metodología de estimación de pérdidas de FEMA.	25
1.5.2 Metodología de riesgo sísmico OpenQuake	26
1.6 ESTUDIOS PREVIOS.....	27
CAPÍTULO 2. Metodología	32
2.1 Estimación del riesgo sísmico.....	32
2.1.1 Pasos para el cálculo del escenario de riesgo sísmico de OpenQuake	34
2.1.2 Cálculo de peligro sísmico por OpenQuake	35
2.1.3 Exposición por OpenQuake	37
2.1.4 Cálculo de funciones de vulnerabilidad por OpenQuake	38
2.1.5 Método analítico GEM para la determinación de curvas de vulnerabilidad.....	38
2.1.6 Clasificación de las estructuras: definición de taxonomía	40
2.1.7 Derivación de curvas de vulnerabilidad.....	42

2.2 Escenario de Peligro sísmico	43
2.2.1 Características del escenario Rose Canyon.....	45
2.2.2 Incertidumbre del escenario de peligro.....	47
2.3 MODELO DE EXPOSICIÓN	48
2.3.1 Recopilación de los elementos expuestos	48
2.3.2 Información de viviendas.....	48
2.3.3 Modelo de exposición de viviendas	53
2.3.4 Información de industrias	54
2.3.5 Modelo de exposición de industria	57
2.3.6 Información de comercios.....	58
2.3.7 Modelo de exposición del comercio	61
2.4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL	62
2.4.1 Tipologías estructurales comunes en Tijuana	64
2.4.2 Curvas de vulnerabilidad para casa habitación.....	69
2.4.3 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para casa habitación	69
2.4.4 Curvas de vulnerabilidad para industria	71
2.4.5 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para industria.....	71
2.4.6 Curvas de vulnerabilidad para comercio.....	72
2.4.7 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para comercio.....	72
2.4.8 Vulnerabilidad humana.....	74
CAPÍTULO 3. Resultados	77
3.1 ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO.....	77
3.1.1 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-casa habitación	78
3.1.2 Zonas residenciales de mayor riesgo	79
3.1.3 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-casa habitación.....	82

3.1.4 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-industria.....	83
3.1.5 Zonas industriales de mayor riesgo.....	84
3.1.6 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-industria	86
3.1.7 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-comercio	87
3.1.8 Zonas comerciales de mayor riesgo	88
3.1.9 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-comercios.....	90
CAPÍTULO 4. Discusiones, conclusiones y recomendaciones	91
4.1 Discusión de resultados.....	91
4.2 Conclusión general.....	92
4.3 Recomendaciones para futuras investigaciones:.....	93
REFERENCIAS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sismología histórica a nivel mundial (USGS, 2019).....	9
Figura 2. Muertes históricas estimadas por impacto sísmico a nivel mundial (USGS, 2019).....	10
Figura 3. Localización de la ciudad de Tijuana.	11
Figura 4. Mapa geológico de Tijuana, tomado del conjunto de datos vectoriales serie I (INEGI, 1982).	12
Figura 5. Mapa de velocidades de onda de corte (EERI, 2020).	14
Figura 6. Fallas activas del sur de California con sus correspondientes desplazamientos anuales. (Rockwell, 2010).....	15
Figura 7. Historia sismológica del estado de Baja California. Eventos sísmicos con magnitud mayor o igual a 4 ($M \geq 4$) ocurridos en Baja California durante el periodo 1800-2019 (USGS, 2019).	16
Figura 8. Regionalización sísmica de la República Mexicana (MDOC-2015, 2015).	16
Figura 9. Riesgo sísmico, una relación intrínseca entre peligro sísmico, exposición y vulnerabilidad (elaboración propia).	18
Figura 10. Liberación de energía producida por un sismo. Imagen tomada de (Tarbuck and Lutgens, 2018).	20
Figura 11. Función de vulnerabilidad discreta, en términos de porcentaje de daño por aceleraciones máximas del terreno (PGA) como medida de intensidad (GEM, 2019).	21
Figura 12. Diagrama de la Metodología de Estimación de Pérdidas basado en FEMA.	25
Figura 13. Interfaz de la plataforma OpenQuake.....	26
Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología OpenQuake del escenario de riesgo sísmico (Silva <i>et al.</i> , 2014)	33
Figura 15. Esquema que describe las principales líneas de trabajo para el cálculo del peligro sísmico por OpenQuake.....	37
Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología analítica de curvas de vulnerabilidad.....	39
Figura 17. Escenario para Rose Canyon $M_w=6.9$, profundidad 7.7 km (USGS, 2017).....	43

Figura 18. Mapa que muestra la localización aproximada de las fallas costeras (Grant y Shearer, 2004), (NIFZ) Zona de fallas Newport-Inglewood, (RCF) Falla Rose Canyon, (ABFZ) Zona de fallas Agua Blanca, (SMFZ) Zona de fallas San Miguel.....	44
Figura 19. Falla Rose Canyon y localización de epicentro.....	45
Figura 20 (a-d). Escenarios para Rose Canyon Rose Canyon Mw=6.9, profundidad 7.7 km, representado en Qgis.....	46
Figura 21. Desviaciones estándar para las medidas de intensidad PGA, S. A. (0.3), S. A. (1.0) y S. A. (3.0) (elaboración propia).	47
Figura 22. Representación de AGEB como el conjunto de 63 manzanas.	51
Figura 23. Determinación de áreas con herramientas del Mapa Digital de México.....	51
Figura 24. Verificación de número de pisos para determinación de área con “Google Street View”.	52
Figura 25. Representación de viviendas a nivel manzana de Tijuana en QGIS.	53
Figura 26. Porcentaje de materiales de construcción de edificios industriales en Tijuana (CICT, 2020).	55
Figura 27. Determinación de área, industria por industria.....	56
Figura 28. Representación de industrias de Tijuana en Qgis.....	57
Figura 29. Porcentaje de materiales de construcción de edificios comerciales en Tijuana (CICT, 2020).	59
Figura 30. Determinación de área, comercio por comercio.....	60
Figura 31. Verificación de número de pisos para determinación de área con Google Street View.	60
Figura 32. Representación de comercios de Tijuana en QGIS.	61
Figura 33. Materiales predominantes en paredes de México, Baja California y Tijuana.	64
Figura 34. Materiales predominantes en paredes de Tijuana (INEGI, 2015)	64
Figura 35. Materiales predominantes en países de Sudamérica (Villar-Vega <i>et al.</i> , 2017).....	65
Figura 36. Casa habitación en Sudamérica y la ciudad de Tijuana	66

Figura 37. Industrias en Sudamérica y la ciudad de Tijuana	67
Figura 38. Comercios en Sudamérica y la ciudad de Tijuana.....	68
Figura 39. Diagrama de árbol de la distribución de probabilidades para casa habitación.....	70
Figura 40. Diagrama de árbol de la distribución de probabilidades para comercios.	73
Figura 41. Función de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería (Capra, 2005).	75
Figura 42. Cálculo del factor de colapso (FC) dada la pérdida del estudio de riesgo sísmico (Capra, 2005).	76
Figura 43. Escenario de riesgo sísmico residencial, pérdidas económicas.	78
Figura 44. Escenario de riesgo sísmico Paseo Playas de Tijuana.....	79
Figura 45. Escenario de riesgo sísmico El Lago.....	79
Figura 46. Escenario de riesgo sísmico Zona Río.....	80
Figura 47. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en casa habitación	80
Figura 48. Escenario de riesgo sísmico residencial, afectaciones humanas.	82
Figura 49. Escenario de riesgo sísmico industrial, pérdidas económicas	83
Figura 50. Escenario de riesgo sísmico Parque Industrial.	84
Figura 51. Escenario de riesgo Boulevard de las Américas Norte.	84
Figura 52. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en Industria	85
Figura 53. Escenario de riesgo sísmico industrial, afectaciones humanas.	86
Figura 54. Escenario de riesgo sísmico comercial, pérdidas económicas.	87
Figura 55. Escenario de riesgo Jardines Playas de Tijuana.	88
Figura 56. Escenario de riesgo Boulevard Independencia.....	88
Figura 57. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en comercio.....	89
Figura 58. Escenario de riesgo sísmico comercial, afectaciones humanas.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de onda de corte promedio para los siete tipos principales de litología superficial en la ciudad de Tijuana, (Acosta-Chang <i>et al.</i> , 2009).....	13
Tabla 2. Velocidades de onda de corte promedio por las diferentes durezas de roca de acuerdo al International Building Code (IBC, 2006).	13
Tabla 3. Regionalización sísmica (MDOC-2015, 2015).	17
Tabla 4. Típica matriz de probabilidad de daño usada en ATC-13 (1985). Ejemplo para Tanques de almacenamiento.....	23
Tabla 5. Materiales de paredes en casa habitación (INEGI, 2017).....	49
Tabla 6. Viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según clase de vivienda particular (INEGI, 2015).....	50
Tabla 7. Materiales de construcción para modelo de exposición de acuerdo con el número de niveles. En concordancia con el Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana (CICT, 2020).	50
Tabla 8. Extracto de la información de identificación por manzana para viviendas.	54
Tabla 9. Extracto de la información de identificación para la industria.	58
Tabla 10. Extracto de la información de identificación para el comercio.	62
Tabla 11. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para casa habitación.....	69
Tabla 12. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.....	71
Tabla 13. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para industria	71
Tabla 14. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.....	71
Tabla 15. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para comercio	72
Tabla 16. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.....	73
Tabla 17. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en casa habitación.	81
Tabla 18. Afectaciones humanas en casa habitación	82
Tabla 19. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en Industria.	85
Tabla 20. Afectaciones humanas en industria.....	86

Tabla 21. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en Comercio.	89
Tabla 22. Afectaciones humanas en comercio.....	90
Tabla 23. Estudios de riesgo sísmico realizados en Tijuana y resultados generales.	91

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1. Riesgo Sísmico	19
Ec. 2 Distribución de probabilidad	34
Ec. 3 Porcentaje de pérdida.....	35
Ec. 4 Área promedio por vivienda	50
Ec. 5 Costo de vivienda	52
Ec. 6 Costo de industria	56
Ec. 7 Costo de comercio	61
Ec. 8 Porcentaje de fatalidad.....	74
Ec. 9 Número de víctimas	75
Ec. 10 Factor de colapso	76
Ec. 11 Cálculo de Θ	76

CAPÍTULO I. Introducción

1. 1 Antecedentes

Históricamente, los daños socioeconómicos por actividad sísmica, han propiciado que se creen organizaciones a nivel mundial para la mitigación y prevención de desastres (González, 2016). Internacionalmente, el Marco Sendai para la reducción de riesgo de Desastres 2015-2030 se encuentra en vigor; adoptada en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas celebrada en Sendai (Japón) el 18 de marzo de 2015 (UNISDR, 2015). En México, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) y el Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED) fueron fundados posteriormente al sismo de 1985, en 1986 y 1988, respectivamente. En las figuras 1 y 2 se presenta el registro sísmico a nivel mundial 1900-2018 para magnitudes iguales y mayores a 5 y las muertes estimadas a nivel mundial 1900-2015 respectivamente.

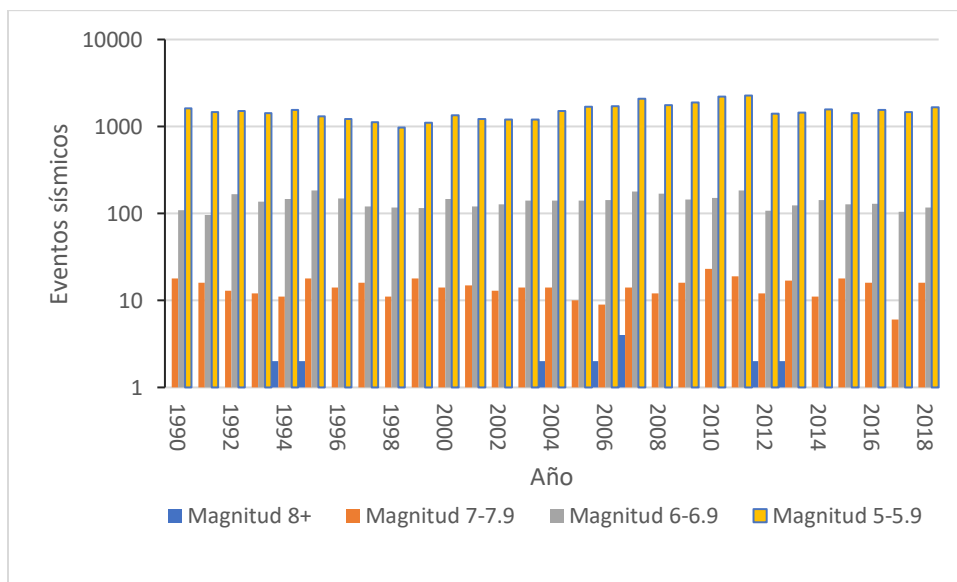


Figura 1. Sismología histórica a nivel mundial (USGS, 2019).

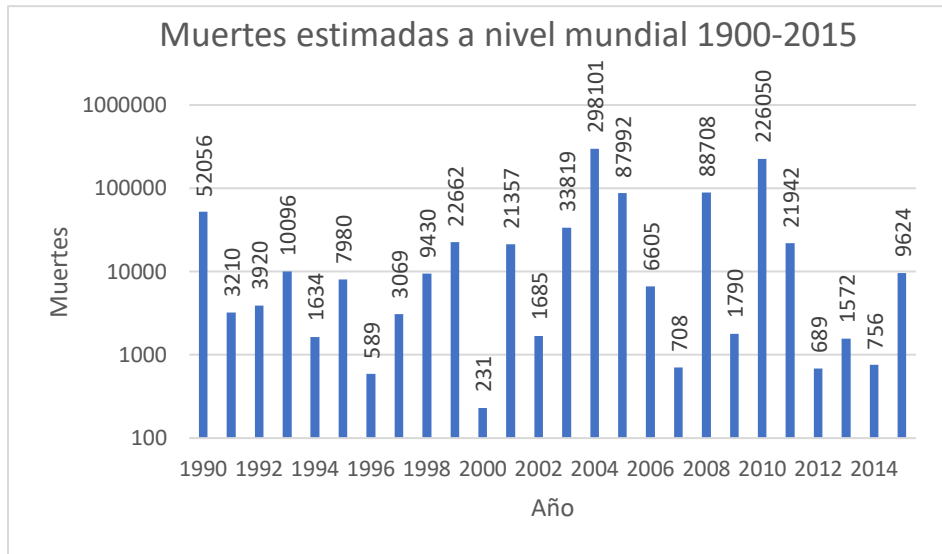


Figura 2. Muertes históricas estimadas por impacto sísmico a nivel mundial (USGS, 2019).

Alrededor del mundo, la realización de diversos escenarios de riesgo se han aprovechado para la mitigación de riesgo, por mencionar algunos países: Venezuela (Schmitz *et al.*, 2020) cuyos resultados de costos de reposición de las posibles edificaciones vulnerables son tomadas como circunstancias claves para el desarrollo de mandatos para cinco condados en la región metropolitana de Caracas, de las cuales un mandato ya ha sido aprobado por el alcalde respectivo, y los otros cuatro están en proceso. En China (Su *et al.*, 2020), su estudio está realizado de acuerdo a las leyes nacionales, que se han practicado a nivel condado. Estas leyes han probado ser altamente efectivas en actividades a gran escala para la reducción de riesgo de desastre. En Portugal (Anglade *et al.*, 2020), el estudio estuvo dirigido a la reducción de riesgo sísmico para edificaciones de importancia histórica en la ciudad de Leiria, donde desarrollaron escenarios probabilistas relacionados con planes de emergencia, en los que abordaron inaccesibilidad de áreas urbanas, personas aisladas y posibles rutas de evacuación. En Japón (Kohiyama *et al.*, 2008), la elaboración de escenarios de riesgo sísmico ha tenido el objetivo de mejorar las políticas para la gestión de riesgo sísmico de los propietarios de viviendas, en el que la información de costos de reposición entre propietarios y contratistas sea más clara. En Italia se está implementando un impuesto voluntario para los propietarios de casa habitación, que sirve como seguro de sus bienes en caso de daño sísmico (DM65, 2017).

1.1.1 Sitio de estudio

El proyecto de investigación se realizó en la zona urbana de la Ciudad de Tijuana, Baja California, México (figura 3).

Baja California cuenta con una población total de 3, 433, 792; y, se estima, la existencia de 58, 694 comercios e industrias públicas y privadas en la ciudad de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015b). De acuerdo con el Instituto Metropolitano de Planeación (IMPLAN) de Tijuana 2008-2030 (IMPLAN, 2010), Baja California representa el 30% de la población total de todos los estados fronterizos, mientras que la ciudad de Tijuana conforma el 45% de la población del Estado con 1, 559, 683 de habitantes (INEGI, 2015b).

Asimismo, la ciudad de Tijuana se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, debido a su cercanía con el límite de placas Norteamericana y del Pacífico y a una serie de fallas a lo largo del Golfo de California. (Contreras, Ramírez y Negrete, 2012).

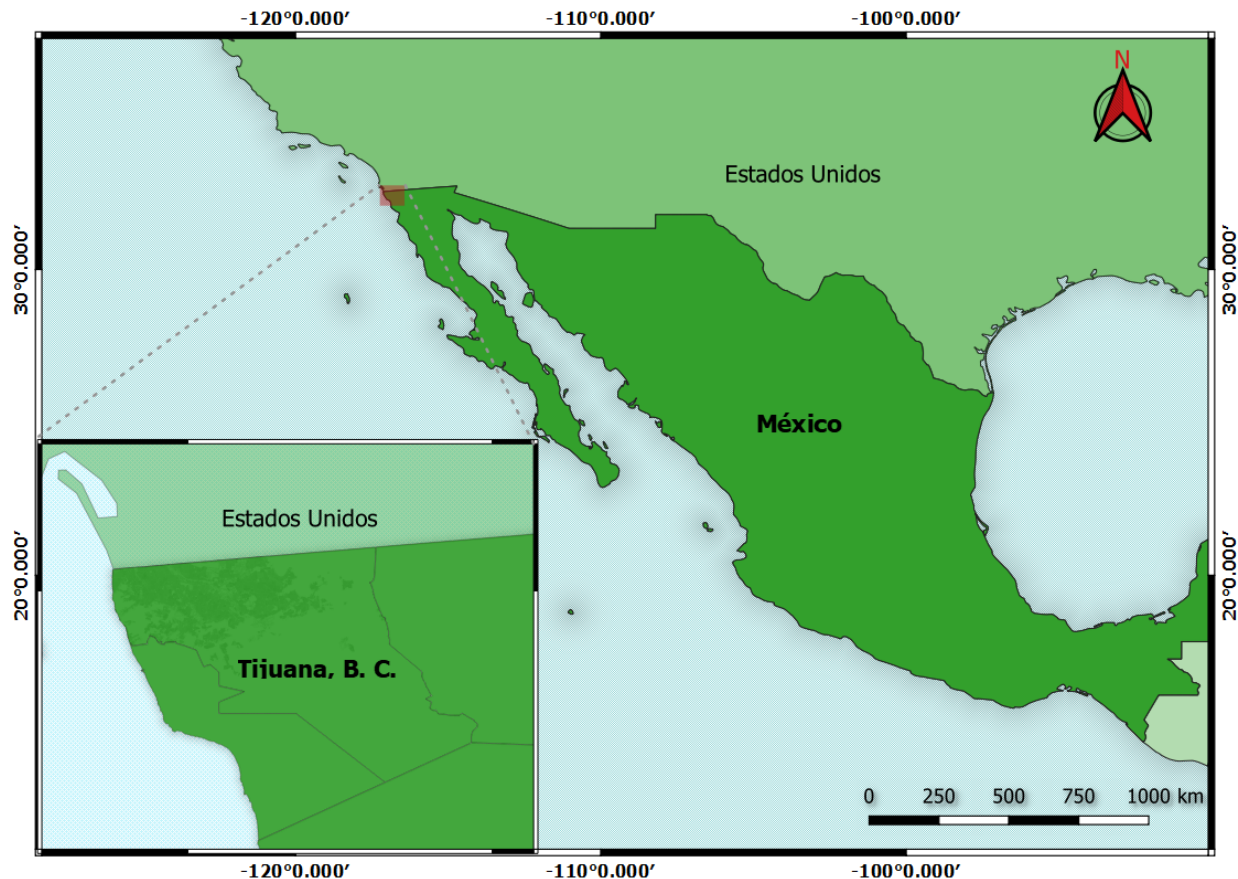


Figura 3. Localización de la ciudad de Tijuana.

1.1.2 Geología de Tijuana y condiciones de sitio

La ciudad de Tijuana sobreyace un basamento constituido por la formación Alisitos (Batolito Peninsular), la cual es una secuencia de roca vulcano-sedimentaria (Cretácico Temprano), formada por aglomerados, brechas, lutitas, sedimentos calcáreos, derrames dacíticos y andesíticos, grauvacas, tobas soldadas y subarcosas (Gastil, Phillips y Allison, 1975). La mayor concentración de población de Tijuana se encuentra en las formaciones geológicas de San Diego y Lindavista (Plio-Pleistoceno), las cuales están conformadas por sedimentos pobremente consolidados; en gran parte, estos sedimentos son areniscas amarillas de grano fino a medio y lentes de conglomerados, el resto, son granos medios con intercalados de conglomerados, (Acosta-Chang *et al.*, 2009). La figura 4 es un mapa que muestra la distribución espacial de cada tipo de roca en Tijuana.

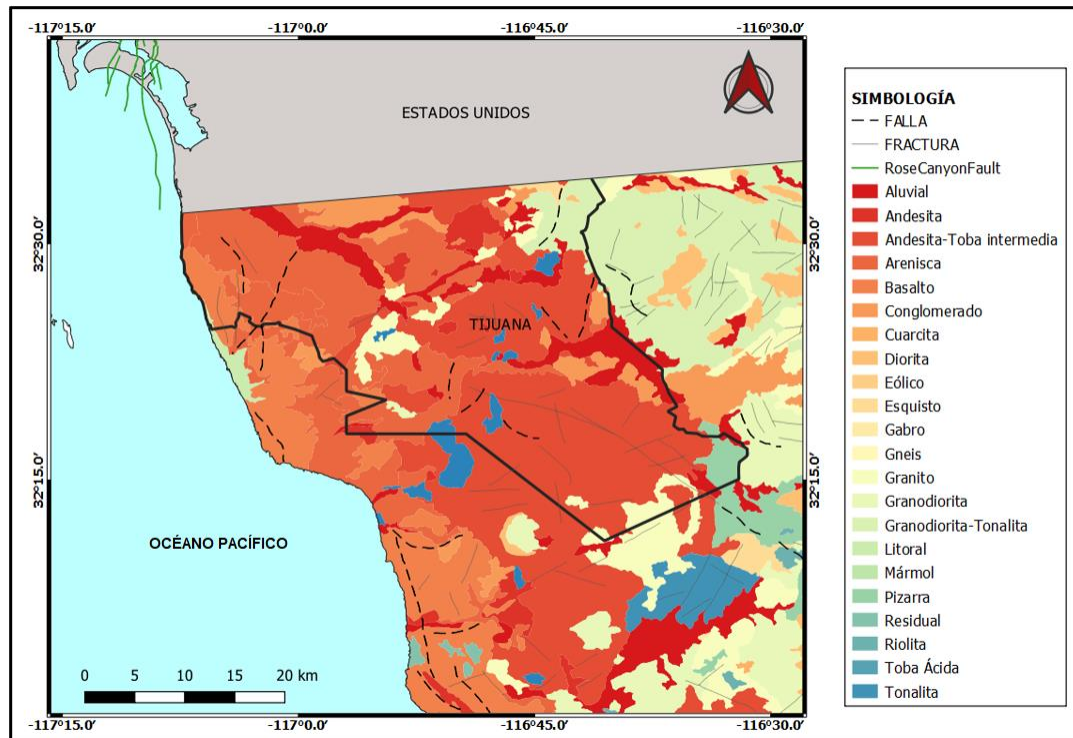


Figura 4. Mapa geológico de Tijuana, tomado del conjunto de datos vectoriales serie I (INEGI, 1982).

Los efectos que producen las condiciones de sitio sobre el movimiento del terreno debido a ondas sísmicas son relevantes y ha sido comprobado que las ondas se propagan y amplifican a través de determinados tipos de suelo, (Kawase y Aki, 1989; Joyner, 2000; Bard, 2016). En 1990 un estudio en la cuenca de Seattle, U. S., debido a dos sismos originados en Chi-Chi, Taiwan con

una magnitud de momento $M_w = 7.6$ mostró amplificaciones de ondas sísmicas (Pratt *et al.*, 2003). También, cabe recordar, los resultados de la amplificación de ondas sísmicas producidas por el sismo de magnitud de onda superficial (M_s) de 8.1 de 1985, en Michoacán, donde fue registrado un daño moderado en las zonas cercanas al epicentro, mientras que en la ciudad de México se presentaron daños severos (Moreno-Murillo, 1995), mismo fenómeno ocurrió 32 años después en 2017 en la ciudad de México con un sismo $M_w = 7.1$ (Singh *et al.*, 2018).

Una forma común de caracterizar las condiciones de sitio del terreno es mediante la velocidad promedio de onda de corte en los primeros 30 m (V_{s30}), (Borcherdt, 1994). En las siguientes tablas, 1 y 2, se muestran las velocidades de onda de corte promedio de Tijuana y las velocidades de onda de corte promedio para diferentes durezas de roca, respectivamente. En la figura 5 se presentan las velocidades de onda de corte de Tijuana provistas por el USGS como parte del equipo Earthquake Engineering Research Institute (EERI).

Tabla 1. Velocidades de onda de corte promedio para los siete tipos principales de litología superficial en la ciudad de Tijuana, (Acosta-Chang *et al.*, 2009).

Litología superficial	Velocidad de corte (V_{s30}), m/s
Aluvión	200
Basalto	500
Limolita-arenisca	210
Arenisca-conglomerado	400
Conglomerado	384
Arena	220
Ígnea Intrusiva	700

Tabla 2. Velocidades de onda de corte promedio por las diferentes durezas de roca de acuerdo al International Building Code (IBC, 2006).

Tipo de suelo	Velocidad de onda de corte V_{s30}, m/s
Roca dura	$\bar{V}_s > 5,000$
Roca	$2,500 < \bar{V}_s < 5,000$
Roca muy densa a roca suave	$1,200 < \bar{V}_s < 2,500$
Consolidado	$600 < \bar{V}_s < 1,200$
Suelo suave, limos y arcillas	$\bar{V}_s < 600$

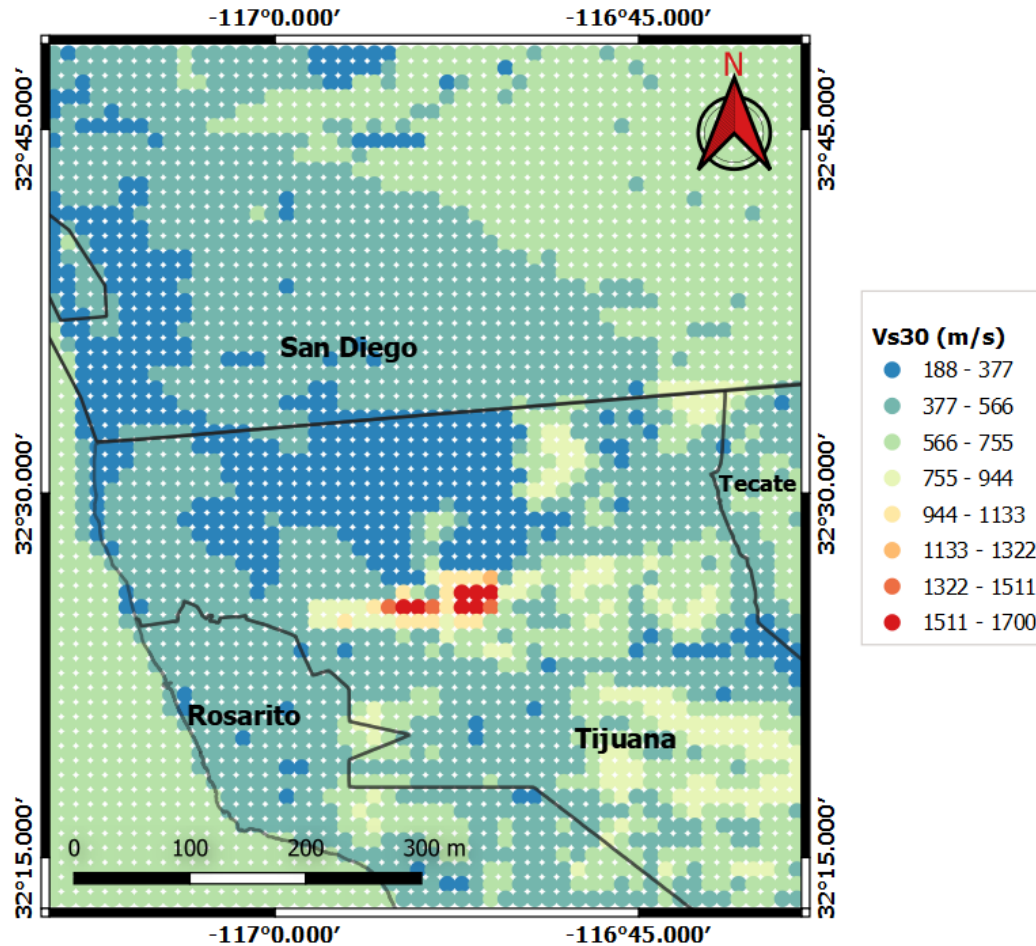


Figura 5. Mapa de velocidades de onda de corte (EERI, 2020).

1.2 Planteamiento del problema

El norte de Baja California, donde se encuentra el sitio de estudio, se localiza dentro de un sistema de fallas geológicas con un continuo movimiento de rumbo dependiente del sistema tectónico San Andrés-Golfo de California que forma el límite de placas Norteamericana y del Pacífico (V. Wong O, M. Legg, 1987). La falla San Andrés se extiende desde el sur, aproximadamente 1 100km desde la frontera de Estados Unidos, pasando primero por Salton Sea, extendiéndose hacia San Francisco, hasta llegar al noroeste de Estados Unidos en Cape Mendicino (Catchings *et al.*, 2002), es una falla lateral dextral que puede producir sismos con magnitudes de hasta $M=7.0$ (Legg, 1991; Lindvail y Rockwell, 1995). Las ciudades de San Diego, CA., Tijuana y Ensenada, B.C se ven afectadas directamente por el sistema Rose Canyon-Vallecitos-San Miguel (V. Wong O, M. Legg, 1987). Los datos indican que un desplazamiento mínimo de 5mm/año distribuidos entre la falla Coronado

Bank y Rose Canyon ocurren en las cercanías de San Diego. Estas fallas juntas comprenden el mayor peligro sísmico para San Diego y Tijuana (J. Anderson, T. Rockwell, 1989). Según (Singleton et al., 2019), una porción del desplazamiento está potencialmente distribuido hacia la zona de falla Rose Canyon por el sistema de fallas de Agua Blanca. Así mismo, se considera que las fallas Agua Blanca, Ojos Negros y el sistema de fallas Cerro Prieto e Imperial, representan un gran peligro sísmico (Cruz-Castillo y Mexicano, 2002). En la figura 7 se muestra la historia sismológica del estado de Baja California. Las fallas que destacan entre Tijuana y San Diego, según Rockwell se muestran en la figura 6:

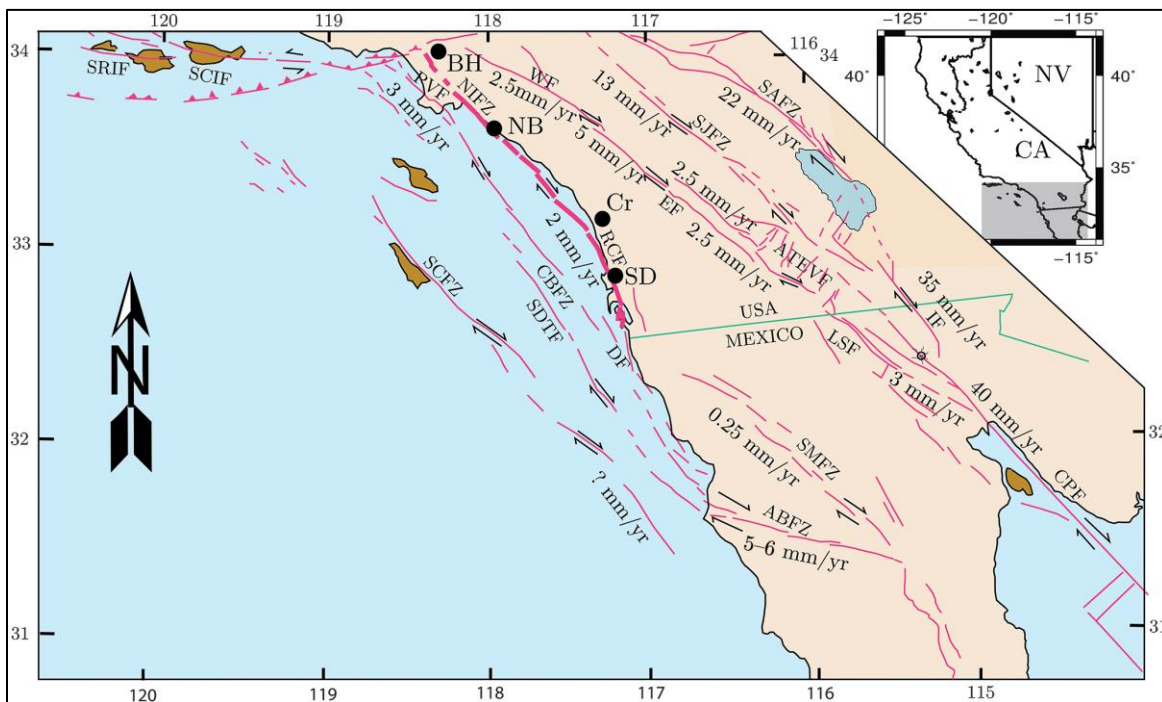


Figura 6. Fallas activas del sur de California con sus correspondientes desplazamientos anuales. (Rockwell, 2010). Newport–Inglewood–Rose Canyon (NIRC), falla Agua Blanca (ABFZ), falla Coronado Bank (CBFZ), falla Cerro Prieto (CPFZ), falla Descanso (DF), Falla Imperial (IF), falla Elsinore (EF), falla Laguna Salada (LSF), Newport–Inglewood (NIFZ), falla Palo Verde (PVF), Zona de falla Rose Canyon (RCF), falla San Andrés (SAFZ), falla San Clemente (SCF), falla Santa Cruz Island (SCIFZ), falla San Jacinto (SJFZ), falla San Miguel (SMFZ), Falla Santa Rosa Island (SRIF), Falla Whittier (WF). Beverly Hills (BH), Newport Beach (NB), Carlsbad (Cr), San Diego (SD).

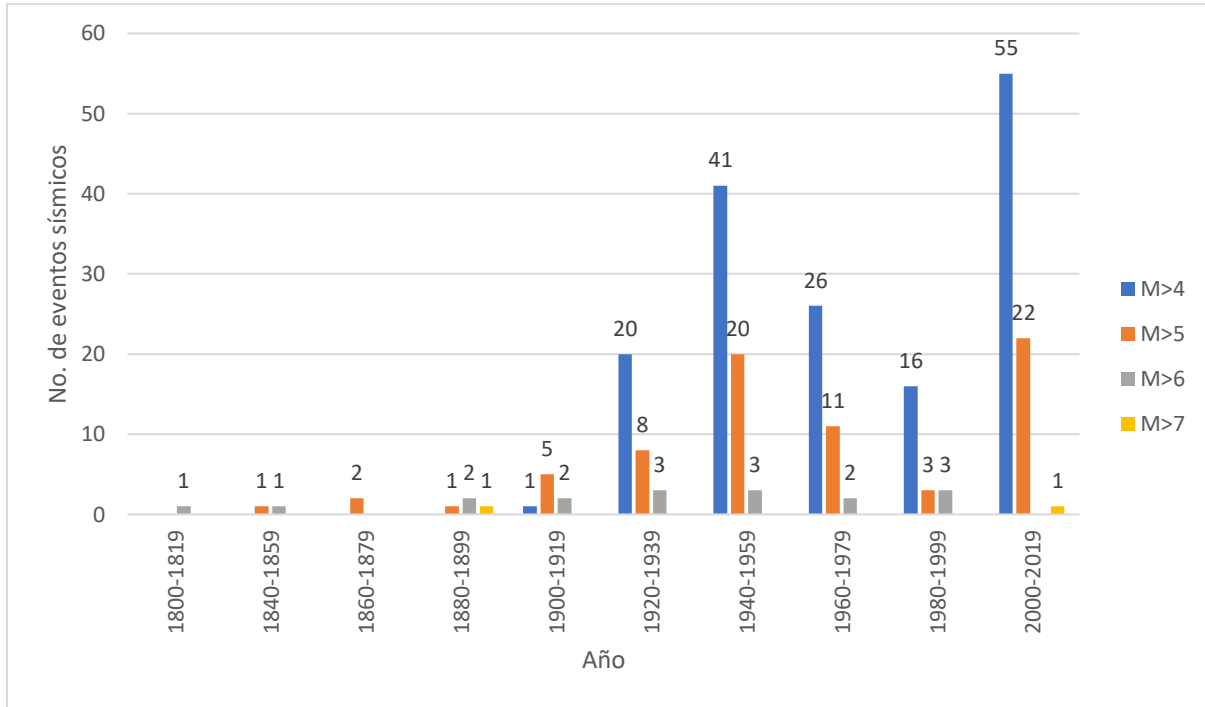


Figura 7. Historia sísmológica del estado de Baja California. Eventos sísmicos con magnitud mayor o igual a 4 ($M \geq 4$) ocurridos en Baja California durante el periodo 1800-2019 (USGS, 2019).

El Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED), de acuerdo con el Manual de diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), regionaliza sísmicamente a México en cuatro zonas de A a D. Tijuana se encuentra en la región sísmica C (Figura 8, Tabla 3), que indica que es una zona de intensidad sísmica alta.

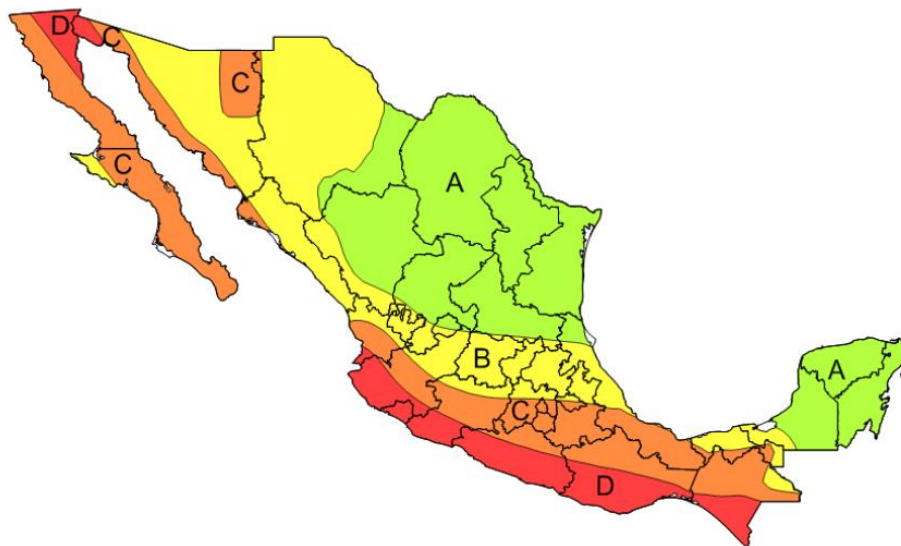


Figura 8. Regionalización sísmica de la República Mexicana (MDOC-2015, 2015).

Tabla 3. Regionalización sísmica (MDOC-2015, 2015).

Aceleración máxima en roca, a_0^r (cm/s ²), correspondiente al nivel de referencia ER	Zona	Intensidad sísmica
$a_0^r \geq 200$	D	Muy Alta
$100 \leq a_0^r < 200$	C	Alta
$50 \leq a_0^r < 100$	B	Moderada
$a_0^r < 50$	A	Baja

1.3 Justificación

De acuerdo con los antecedentes en Tijuana, existen estudios respecto al análisis de riesgo sísmico, pero debido al crecimiento de la ciudad de manera continua y permanente, tanto la vulnerabilidad como los elementos expuestos de infraestructura y población se han estado modificando, por lo tanto, se necesita una continua actualización de análisis de riesgo sísmico, que a su vez complemente los estudios existentes.

1.4 Objetivo general

Elaborar un escenario por riesgo sísmico para la zona urbana de Tijuana, considerando las características de la fuente sísmica Rose Canyon con una $M=6.9$, infraestructura tipo vivienda, industrial y comercial, para estimar el impacto en términos de pérdidas económicas y la afectación a la población usuaria.

1.4.1 Objetivos particulares

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Integrar una base de datos de exposición de la vivienda, industria y comercio distribuida espacialmente en la zona urbana de Tijuana, de acuerdo con la información disponible en el INEGI, que comprenda rubros de características de edificación, población, costos y dimensiones para integrar al modelo de estimación del riesgo.
- Revisar las funciones de vulnerabilidad disponibles en estudios realizados en Latinoamérica mediante la metodología establecida por la fundación GEM para asociarlo a los sistemas constructivos de la ciudad de Tijuana.

- Desarrollar un análisis de riesgo con un escenario de sismo $M=6.9$ generado en la fuente sísmica Rose Canyon, integrando la base datos de exposición y las funciones de vulnerabilidad correspondientes para la zona urbana de Tijuana, para realizar análisis de costos por daño estructural y afectación a la población.

1.5 Marco Teórico

En 1980, en el reporte Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad (UNDRO) por sus siglas en inglés (UNDRO, 1979), se propuso una metodología para la determinación del riesgo sísmico en el que establecen una relación intrínseca entre los conceptos de peligro sísmico, vulnerabilidad y exposición (Figura 9), derivando en investigaciones para la determinación del riesgo sísmico en el que se destaca la iniciativa internacional de análisis de riesgo por Applied Technology Council (ATC) en 1985, en contrato con la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (ATC-13, 1985).



Figura 9. Riesgo sísmico, una relación intrínseca entre peligro sísmico, exposición y vulnerabilidad (elaboración propia).

Actualmente, existen numerosas metodologías para la evaluación probabilista del riesgo sísmico como son el proyecto RISK-UE creada en 1999 en Europa (Mouroux P., et al., 2004), Hazard United Estates (HAZUS) fundada en 1999 (Federal Emergency Management Agency, 2015) y Applied Technology Council 13 (ATC-13, 1985); en Estados Unidos, las plataformas probabilistas de riesgo sísmico de Central American Probabilistic Risk Assessment (CAPRA), fundada en 2008 (Cardona, et al., 2012), Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic disasters (RADIUS), fundada en 1996 (Radius, 2000), y la fundación (GEM) Global EarthQuake Model, creada en 2006 (Silva *et al.*, 2012).

En el reporte de 1979 de la UNDRO, se definieron los conceptos relacionados a la determinación del riesgo sísmico:

Riesgo sísmico: De acuerdo con Fournier d'Albe de la UNESCO, en su documento “Predicción de terremotos y manejo del riesgo”, el riesgo sísmico es la posibilidad o probabilidad de pérdidas, y define el riesgo como el producto del peligro sísmico, vulnerabilidad y elementos en riesgo, en el que la vulnerabilidad es una medida de la proporción de las pérdidas esperadas por un sismo dado.

Ec. 1. Riesgo Sísmico

$$SR = PS \times V \times E$$

Donde: SR: Riesgo Sísmico; PS: Peligro sísmico; V: Vulnerabilidad; E: Elementos en riesgo

Peligro sísmico: La probabilidad de ocurrencia, de un sismo potencialmente dañino, dentro de un periodo de tiempo específico en una región dada.

Cuando ocurre un sismo las ondas sísmicas irradian desde la fuente y se distribuyen a través de la corteza de la tierra (Figura 10). Una vez alcanzada la superficie del terreno, estas ondas producen un temblor que dura desde segundos hasta minutos. La fuerza y duración de un temblor depende del punto de propagación, tamaño y características de la zona de propagación, es decir,

las condiciones de sitio. El suelo actúa como un “filtro” que puede bien atenuar o amplificar las ondas sísmicas (Kramer y Mitchell, 2006).

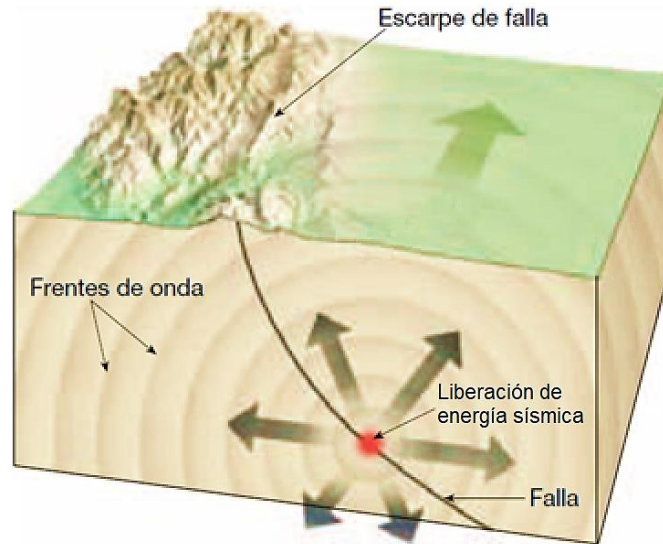


Figura 10. Liberación de energía producida por un sismo. Imagen tomada de (Tarbuck y Lutgens, 2018).

Elementos en riesgo o elementos expuestos: Se refiere a la población, edificaciones, trabajos de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos, infraestructura, etc., en una región en riesgo específica.

El modelo de exposición es un conjunto de datos que describe los elementos que pueden sufrir daño por un fenómeno natural o antrópico, como en este estudio, por impacto sísmico. Los elementos expuestos, como parte del análisis de riesgo sísmico, son de suma importancia, ya que su relación es directamente proporcional: entre más elementos expuestos existan, mayor es el riesgo.

El modelo de exposición se realiza ordenando en un listado los elementos expuestos, indicando su localización geográfica, cantidad de habitantes y edificios, y sus características estructurales (en el caso de edificaciones e infraestructura) descritas con curvas de vulnerabilidad (CIMNE *et al.*, 2013; Grigoratos *et al.*, 2016; Perrone *et al.*, 2020)(FEMA, 2002). Todos estos datos son almacenados en el sistema de información geográfica “QGIS”.

Vulnerabilidad: Es el grado de pérdida en medidas de porcentaje de 0 a 1, de un determinado elemento de riesgo, o conjunto de elementos, por la ocurrencia de un sismo de cierta magnitud.

Para que el modelo de exposición esté completo, es necesario integrar la vulnerabilidad sísmica. Las funciones de vulnerabilidad son curvas que describen el porcentaje de pérdidas por acciones sísmicas (o medidas de intensidad), es decir, son funciones que describen el desempeño de una estructura ante excitaciones sísmicas (figura 11). Usando información de vulnerabilidad sísmica, se puede predecir un daño debido a diferentes intensidades sísmicas para diferentes tipologías estructurales. Esta es la clave para la preparación de escenarios sísmicos, ya que las pérdidas económicas y afectaciones humanas están fuertemente relacionadas a la tipología estructural y a su daño esperado (Dolce *et al.*, 2003). Por lo tanto, una función de vulnerabilidad debe ser capaz de correlacionar el movimiento del terreno con el daño de la edificación.

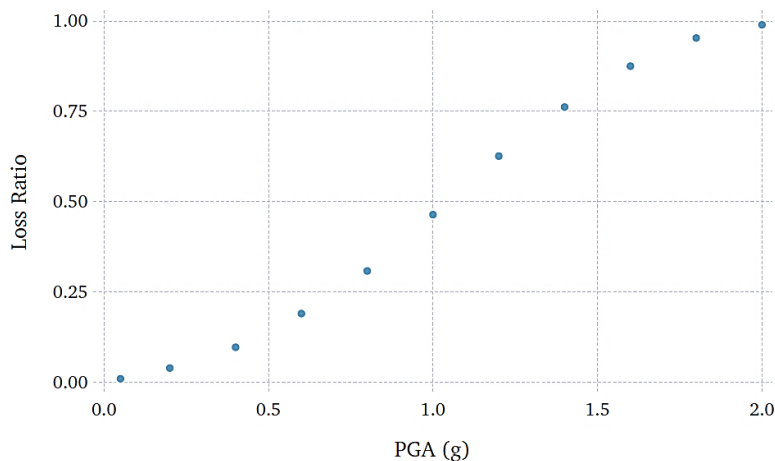


Figura 11. Función de vulnerabilidad discreta, en términos de porcentaje de daño por aceleraciones máximas del terreno (PGA) como medida de intensidad (GEM, 2019).

Existen dos métodos principales en las que se agrupan las diferentes metodologías para la determinación de funciones de vulnerabilidad: métodos empíricos y analíticos (Dolce *et al.*, 2003), los cuales se basan en: Matrices de Probabilidad de Daños (DPM's), y funciones de vulnerabilidad, respectivamente. Actualmente se usa también la metodología basada en opinión de expertos (Jaiswal *et al.*, 2012).

Método empírico: Matrices de probabilidad de daño

La función de una matriz de probabilidad de daño es representar una probabilidad de distribución discreta de daño, para una tipología estructural específica bajo acciones sísmicas determinadas. En otras palabras, la probabilidad condicional de sufrir un daño j , debido a un movimiento del terreno de intensidad i , $P[D = j | i]$ (Calvi *et al.*, 2006).

Originalmente las DMP introducidas por (Whitman, 1973), describen que cada valor de una columna particular, es la probabilidad de que un estado de daño en particular ocurra, dado el nivel de intensidad del sismo que es experimentado. De esta forma, la suma de todas las probabilidades en cada columna es del 100%. Categoriza los niveles de daño de dos maneras, (a) por una descripción escrita del nivel de daño estructural y no estructural, y (b) por una relación del costo de reposición respecto al costo de reparación de la edificación. La escala que utilizó Whitman fue la Intensidad Modificada de Mercalli (MMI), aunque acepta que es una forma pobre de caracterizar el movimiento del terreno, la utiliza debido a que los registros históricos de la zona este de Estados Unidos fueron realizados con la escala MMI y, por lo tanto, los registros de daños observados.

Históricamente se han estado haciendo modificaciones y mejoras a esta metodología, de acuerdo con las exigencias, alcances y condiciones de las investigaciones. La modificación realizada por el ATC-13, 1985 sobresale por su propuesta en la que más de 50 expertos en ingeniería sísmica proveyeron estimaciones de factores de daño alto, promedio y bajo en factores de porcentaje de pérdida de reposición, para intensidades MMI y para 36 tipologías estructurales distintas. En la tabla 4 se presenta un ejemplo de matriz de probabilidad de daño (ATC-13, 1985).

Tabla 4. Típica matriz de probabilidad de daño usada en ATC-13 (1985). Ejemplo para Tanques de almacenamiento.

Factor de daño promedio	Intensidad modificada de Mercalli						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.00	94.0	2.5	0.4	***	***	***	***
0.50	6.0	92.9	30.6	2.1	***	***	***
5.00	***	4.6	69.0	94.6	25.7	2.5	0.2
20.00	***	***	***	3.3	69.3	58.1	27.4
45.00	***	***	***	***	5.0	39.1	69.4
80.00	***	***	***	***		0.3	3.0
100.00	***	***	***	***	***	***	***

*** Baja probabilidad

Los valores en las columnas de intensidades sísmicas son las probabilidades de que dicha intensidad ocurra, produciendo el correspondiente factor de daño.

Método analítico: Curvas de vulnerabilidad

El método analítico para desarrollar curvas de vulnerabilidad se basa en análisis computacionales en los que se simulan las fuerzas sísmicas actuando sobre una edificación y se obtienen los correspondientes desplazamientos de la estructura, y, por lo tanto, el nivel de daño o pérdidas.

Son cuatro los análisis computacionales principales que se utilizan para la simulación de los movimientos de la estructura (Bonett, 2003):

Análisis estático lineal

Se modela la estructura con un grado de libertad, con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. Al estimar la primera frecuencia fundamental de la estructura, se determina una aceleración espectral, que es multiplicada por la masa obteniendo el cortante basal. La fuerza del cortante basal es distribuida en la estructura y, mediante un análisis estático lineal, se obtienen las fuerzas internas y desplazamientos de la estructura.

Análisis estático no lineal

La modelación de la estructura representa directamente las características no lineales de la relación fuerza-deformación de los elementos por la respuesta inelástica del material. La forma más usual de representar los resultados de este análisis es mediante la curva de capacidad o curva push-over, la cual es un gráfico que muestra la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura.

Análisis dinámico lineal

Se modela la estructura con múltiples grados de libertad usando una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica es simulada por medio de un análisis espectral modal o análisis temporal.

Análisis dinámico no lineal

El análisis de la estructura es similar al análisis estático no lineal, con la diferencia de que la acción sísmica se modela con acelerogramas reales o simulados. Aquí se recomienda utilizar varios registros de historias temporales de aceleración por la sensibilidad de la respuesta estructural.

Entre los estudios actuales que se pueden mencionar donde se utilizaron métodos analíticos es el de Abo-El-Ezz, quienes realizaron un estudio de vulnerabilidad sísmica en edificios de mampostería no reforzada en Canadá, en la que indican que las fallas fuera de plano en los muros son los causantes del daño principal de la estructura, así como el hecho, de que estas edificaciones fueron construidas antes de la existencia de un código de diseño sísmico. Por esta razón, realizaron un análisis de vulnerabilidad de los muros de mampostería no confinada, realizando un modelo considerando el muro con un grado de libertad y una curva de capacidad fuerza deformación (Abo-El-Ezz *et al.*, 2017).

En Croacia Pavić, realizaron un análisis de vulnerabilidad para edificios históricos de mampostería no confinada de ladrillos sólidos. Utilizaron la metodología del espectro de capacidad, que se basa en el desplazamiento máximo de un entrepiso que está dominado por la deformación del modo fundamental de un sistema originalmente elástico. Un análisis estático no lineal fue la representación equivalente de la caracterización de las edificaciones y las acciones sísmicas (Pavić *et al.*, 2019).

En el 2019, Zain y colaboradores, ejecutaron un análisis de vulnerabilidad para escuelas en la zona sísmica 4 de Pakistán, por el último sismo en 2005 que cobró 19 000 vidas de niños que atendían clases. De los 19 edificios escolares estudiados se seleccionó uno como el más representativo de acuerdo con la opinión de expertos de la región, además de ser el de mayor capacidad estudiantil. Las curvas de fragilidad fueron desarrolladas a partir de un análisis dinámico no lineal por ser el

análisis más riguroso y confiable sobre los análisis estáticos y dinámicos. De las curvas de fragilidad, finalmente, se derivaron las curvas de vulnerabilidad en la que se definieron estados límites específicos, indicadores de daño e indicadores de intensidades sísmicas (Zain *et al.*, 2019).

1.5.1 Metodología de estimación de pérdidas de FEMA.

La (FEMA) de Estados Unidos, y el National Institute of Building Science (NIBCS), desarrolló un manual que describe las metodologías para la determinación de pérdidas por sismo a nivel regional, denominado HAZUS.

La primera emisión de HAZUS se realizó en 1997 y, hoy en día, cuenta con tres emisiones posteriores. Los resultados de las estimaciones de pérdidas pueden ser usados principalmente por autoridades locales, estatales y regionales para la planeación y estimulación de esfuerzos para la reducción de riesgos por sismo y para preparar la respuesta de recuperación ante una emergencia. De forma secundaria, HAZUS es un proyecto que provee las bases para la determinación a nivel nacional de las pérdidas por riesgo sísmico. La estructura de la metodología HAZUS incluye los componentes que se muestran en la figura 12.

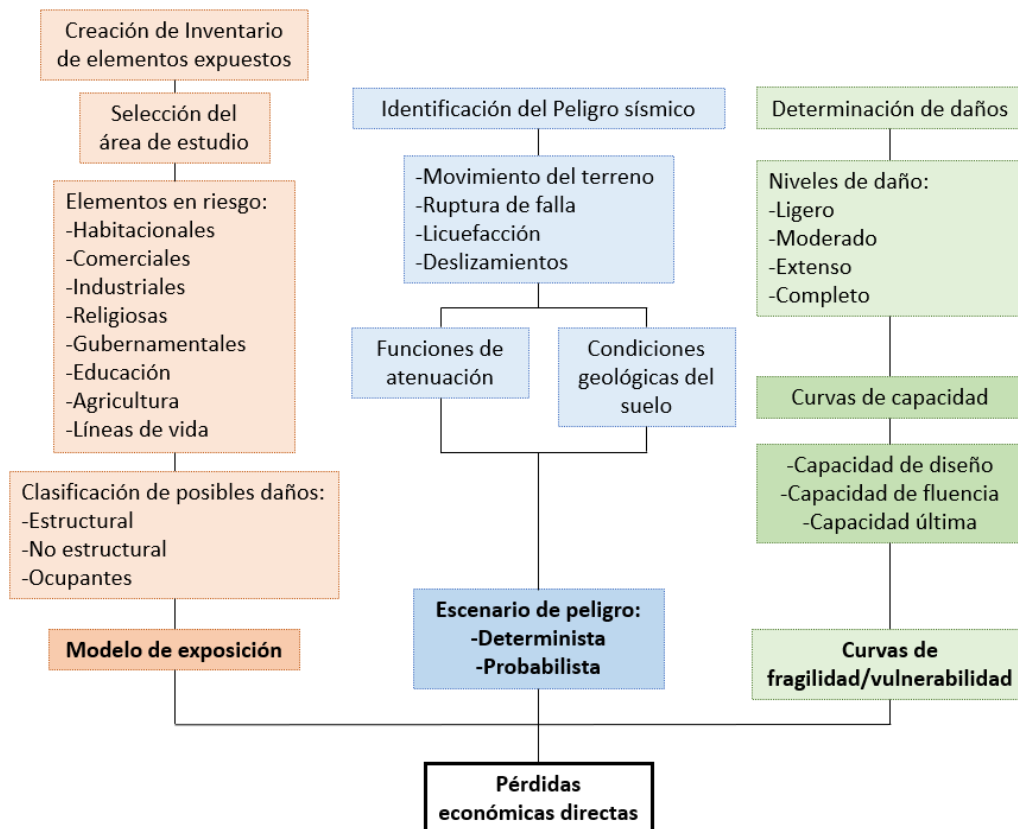


Figura 12. Diagrama de la Metodología de Estimación de Pérdidas basado en FEMA.

1.5.2 Metodología de riesgo sísmico OpenQuake

El proyecto OpenQuake es parte de la fundación Global Earthquake Model (GEM), cuyo objetivo es establecer estándares abiertos para el cálculo y comunicación del riesgo sísmico a nivel global.

OpenQuake realiza cinco cálculos principales de riesgo sísmico: Escenario de riesgo sísmico, escenario de daño sísmico, cálculo probabilista de riesgo sísmico basado en un evento, Clásico PSHA (Análisis Probabilista de Peligro Sísmico) basado en riesgo, Relación costo-beneficio.

Las principales virtudes de esta plataforma son su disposición gratuita y abierta a todo público interesado en la creación de escenarios de peligro, curvas de vulnerabilidad y fragilidad, y a los diversos análisis de riesgo sin importar la parte del mundo donde se realice. Además, cuenta con soporte y documentación técnica gratuita y manuales e instructivos para el aprovechamiento de la plataforma. Se pueden generar; espectros completos de peligro y riesgo sísmico, como eventos estocásticos, movimientos del terreno, espectro de peligro uniforme, curvas y mapas de peligro, diagramas de desagregación, curvas y mapas de daños y pérdidas. En la figura 13 se muestra una captura de pantalla de la interfaz de la plataforma.

INPUT PREPARATION TOOLKIT

Exposure Fragility Consequence Vulnerability Earthquake Rupture Configuration File

1. Use this form to modify the table header.

Description:

Structural Costs: None

Nonstructural Costs: None

Contents Costs: None

Business Interruption Costs: None

Occupants: ☐ Day ☐ Night ☐ Transit

Tags: for each tag: type its name and press enter

Select type of exposure: ☒ CSV Exposure (one XML plus one or more CSV files) ☐ XML Exposure (all in one file)

CSV Header Description				
id	lon	lat	taxonomy	number
Exposure CSV file(s) : Exposicion.csv Upload				

Figura 13. Interfaz de la plataforma OpenQuake.

1.6 ESTUDIOS PREVIOS

Existen varios estudios similares al que se reporta en esta tesis. Uno de ellos se realizó un mapa de riesgo sísmico a nivel nacional en Italia. Los autores consideraron fuentes sísmicas con la capacidad de producir sismos con $M=6$, utilizaron ecuaciones del movimiento del terreno (GMPE) propuestas por (Bindi *et al.*, 2011) en conjunto con un mapa del suelo de velocidades de onda de corte en los primeros 30 metros de la superficie (V_{s30}) provisto por el United States Geological Survey (USGS), tomando en cuenta aceleraciones máximas del terreno (PGA). El modelo de exposición se realizó para edificaciones habitacionales a nivel municipal, utilizando ocho diferentes taxonomías correspondientes a edificaciones de concreto y mampostería confinada, relacionadas con funciones de fragilidad con cuatro niveles de daño; ligero, moderado, extenso y colapso. Respecto a las estructuras de concreto, juzgaron si eran diseñadas bajo cargas gravitacionales o sísmicas y edad de construcción para identificación del código de diseño. Para las estructuras de mampostería se ampliaron las consideraciones tomando en cuenta los niveles de 1 a 3 y de 3 en adelante; y si estas estructuras eran entera o parcialmente de mampostería. Los resultados obtenidos se representaron en términos de pérdidas anuales por municipio (MEAL) y pérdidas anuales por m^2 por municipio (UNMEAL) (Zanini, Hofer y Pellegrino, 2018).

En la Ciudad de los Angeles, C. A., se realizó un estudio cuyo objetivo principal fue evaluar el riesgo por réplicas al sismo principal para estructuras de concreto reforzado. Para esto, se caracterizó un primer conjunto de movimientos del terreno originarios de las fallas Puente Hills, con la plataforma OpenSHA IM. Se analizaron 24 eventos principales y sus réplicas; los rangos de magnitudes para eventos principales variaron de 5.8 a 7.6, y para las réplicas se usaron rangos de 5.2 a 6.5. Para el análisis de daño por réplicas sísmicas, se realizó un análisis probabilista basado en la teoría de Markov, el cual calcula la probabilidad de cada estado límite de daño al final de cualquier movimiento del terreno, tanto para el evento principal como para las réplicas. La clasificación de los edificios de concreto reforzado está basado en la Metodología HAZUS, identificando ocho clases de estructuras según un rango de número de niveles. Estos rangos fueron clasificados a su vez en tres grupos según el tipo de diseño estructural; para estructuras dúctiles, para marcos a momento y estructuras con muros de mampostería no confinados. El estudio concluyó que la probabilidad de daño completo anual por riesgo sísmico se incrementó en un 50%, considerando la existencia de réplicas una semana después de un evento principal de magnitud 7.0,

y un incremento del 25% en las probabilidades de pérdidas económicas (Shokrabadi y Burton, 2019).

Un estudio de riesgo sísmico se llevó a cabo para la Sylhet City Corporation, Bangladesh; cuyo objetivo fue dar un diagnóstico del estado de riesgo sísmico de la ciudad. Usaron la plataforma de riesgo RADIUS y un sistema de información geográfica GIS. Dos escenarios de daño se tomaron en cuenta, uno para magnitud de momento (M_w) de 7.6 de la falla Dauki y otro para la magnitud $M_w=8$ proveniente de la falla Plate Boundary. Consideraron tres ecuaciones de movimiento para obtener las máximas aceleraciones del terreno (PGA); Joyner y Boore (1981), Campbell (1981) y, Fukushima y Tanaka (1990). El estudio se utilizó únicamente para el 12% de las edificaciones de la ciudad correspondientes a 5271 edificaciones en 24 km². Para la caracterización de las edificaciones, se apoyaron de imágenes satelitales y datos de exploración de campo. Debido a que Bangladesh no cuenta con curvas de fragilidad para sus edificaciones, las curvas de fragilidad utilizadas fueron extraídas de la plataforma RADIUS, la cual posee curvas de fragilidad definidas para diferentes tipologías estructurales que describen estructuras similares a las estructuras existentes a la ciudad de Bangladesh. Los resultados obtenidos se dieron en términos de niveles de daño para las edificaciones y cantidad de muertes (Mazumder y Salman, 2019).

En 2006 se presenta la metodología RISK-UE para la creación de escenarios de riesgo para la ciudad de Thessaloniki, Grecia. Para el apartado de modelado de peligro sísmico, cinco escenarios de peligro fueron desarrollados, dos modelos deterministas y tres probabilistas con 475 años de periodo de retorno. Se generaron mapas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos, (PGA, PGV y PGD) para un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años. Para el modelo de exposición, la ciudad se dividió en 20 unidades homogéneas en el uso de suelo. Cada unidad se clasificó de acuerdo con su importancia frente a riesgo por medio de un proceso de toma de decisiones de (Saaty, 1987), que se basa en un cuestionario que refiere porcentajes de importancia. La elección de curvas de capacidad y fragilidad se convino para edificaciones de concreto reforzado y estructuras de mampostería no confinada. Cada curva de fragilidad se realizó respecto a aceleraciones máximas y desplazamientos espectrales respectivamente. Para el escenario de riesgo se consideraron los daños a las edificaciones y la cantidad de escombros que pueden generar, esto, para considerarlo como otro factor de riesgo para el habitante. El escombros

fue clasificado en dos tipos, concreto reforzado y acero, madera y otros. El número de muertes se hizo en función de parámetros de estado probabilista de daño, porcentaje de ocupación de la edificación, el tiempo de ocurrencia del sismo y el tipo de respuesta de la comunidad. Esta información se analizó con el modelo de Coburn y Spence del 2002. Se obtuvieron resultados en niveles de daño, pérdidas económicas y número de muertes. Además, propusieron una política de reposición y una estrategia de mitigación de riesgo sísmico (Pitilakis, Alexoudi, y Argyroudis, 2006).

Un estudio de riesgo sísmico se llevó a cabo en las ciudades de Mérida, Venezuela y Barcelona, España, estudio en el que incluyeron una evaluación de la fragilidad social y falta de resiliencia. Esta evaluación atiende aspectos como la ausencia de desarrollo económico y social, deficiencias en la administración de instituciones gubernamentales, y falta de capacidad de respuesta y recuperación; utilizando conjuntos difusos y un proceso jerárquico analítico (AHP). Para Mérida, Venezuela, la investigación se centró en dos eventos sísmicos de magnitudes $M=8$ y $M=9$ en términos de intensidades macrosísmicas según la escala Europea EMS-98. Además, se evaluaron las posibles consecuencias por deslizamientos y licuefacción a través de la metodología HAZUS-99(Castillo, Pujades Lopez Almansa, 2008). La clasificación de los elementos expuestos se hizo de acuerdo con RISK-UE Project, evaluando estructuras de concreto reforzado, adobe, acero y materiales considerados precarios. En el caso de Barcelona, España, se utilizaron magnitudes de $M=6$ y $M=7$, los datos por daño sísmico fueron tomados del reporte del Instituto de estadística de Catalunya (IDESCAT) del Instituto de Estadística de Catalunya, 2010. En este reporte se muestran los resultados de diferentes escenarios de daño por impacto sísmico para edificaciones y población. La vulnerabilidad de las edificaciones fue caracterizada por el método Vulnerability Index Method de Risk-UE Project. Los resultados de este estudio se mostraron a nivel vecindario en términos de áreas destruidas, heridos y muertes (Jaramillo, Carreño y Lantada, 2016).

De manera regional se han desarrollado los siguientes análisis de riesgo: En 1990, el “Planning Scenario for a Major Earthquake, San Diego-Tijuana Metropolitan Area” y en 1982 el “Earthquake Planning Scenario for a Magnitude 8.3 Earthquake on the San Andreas Fault in Southern California”. Actualmente Earthquake Engineering Research Institute (EERI)

mostró sus resultados en “San Diego Earthquake Planning Scenario, Magnitude 6.9 on the Rose Canyon Fault Zone, 2020” en el que es fuertemente considerada la relación socioeconómica con Tijuana.

Localmente se destacan los trabajos de investigación realizados por: RADIUS (Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic Disasters), es un documento basado en una iniciativa creada en 1996 por las Naciones Unidas, con apoyo financiero del gobierno de Japón, con el objetivo de promover actividades en todo el mundo para la prevención de desastres en concentraciones urbanas y particularmente en el desarrollo de ciudades. En RADIUS se proveen nueve escenarios de riesgo sísmico para nueve regiones del mundo, una de ellas es Tijuana, Baja California. RADIUS proveyó las herramientas para la creación de escenarios de pérdidas y planes de acciones para la reducción del riesgo, en el que se involucraron tomadores de decisiones, científicos y oficiales de gobierno locales, representantes de localidades y los medios. Los resultados del escenario de riesgo en Tijuana mostraron que más de 18 000 personas fallecerían y casi 37, 000 necesitarían hospitalización. El estudio incluso mostró que Tijuana requeriría aproximadamente de un mes para recuperar el sistema de abasto de agua del 30% de los daños por sismo, y dos meses para recuperarse completamente (Radius, 2000).

En 2016, se realizó un análisis probabilista del riesgo sísmico en las ciudades de Tijuana y Mexicali para viviendas de 1 y 2 niveles, tomando en consideración ocho fuentes sísmicas: Coronado Bank, Rose Canyon, Laguna Salada, Imperial, San Jacinto 1, San Jacinto 2, San Bernardino y San Joaquin Valley. El análisis fue realizado mediante la plataforma de análisis de riesgo probabilista CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment). Para Tijuana lograron estudiarse 263, 914 edificaciones, y en Mexicali 254 ,202 viviendas. Los resultados de este estudio mostraron pérdidas económicas por daño estructural de 2, 750 millones de pesos y 1, 450 personas afectadas en la ciudad de Tijuana, mientras en Mexicali se estimó una pérdida de 125 millones de pesos y 1 400 personas afectadas (González, 2016).

En 2013, se realizó la evaluación determinista del riesgo sísmico en el área urbana de Tijuana. En este estudio se desarrollaron los modelos de peligro sísmico, exposición, vulnerabilidades estructural y socioeconómica. El peligro sísmico, por su parte, representa el

posible rompimiento de la falla La Nación y la falla Silver Strand, ambos rompimientos generando un sismo de magnitud $M=6.5$. La determinación de la vulnerabilidad se realizó al considerar las edificaciones de más de tres niveles, tras calcular su periodo natural de vibración, se contrastó con el periodo natural del suelo, considerando como más vulnerables a las edificaciones que poseen periodos similares a las del suelo (Garatachia, 2013).

CAPÍTULO 2. Metodología

2.1 Estimación del riesgo sísmico

La metodología empleada para desarrollar el escenario presentado en esta investigación se puede encontrar en los libros “OpenQuake Engine Book: Risk” (Crowley y Silva, 2013) y “OpenQuake Engine Book: Hazard” (Paganini *et al.*, 2017).

La metodología OpenQuake describe el cálculo en el que se obtienen las afectaciones y estadística de pérdidas debido a un escenario sísmico particular, para un grupo de elementos expuestos (activos), resaltando que este cálculo es importante, por ejemplo, para la planeación de manejo de emergencia y para incrementar la conciencia social ante el riesgo.

La ruta de trabajo del cálculo del escenario de riesgo empieza con la integración de los datos de peligro sísmico. El peligro consiste en una ruptura finita y en una GMPE. Al repetir la misma ruptura y calcular la variabilidad dentro y entre evento para la GMPE cada vez, muchos movimientos del terreno pueden producirse para mostrar la variabilidad aleatoria en el movimiento del terreno. Durante la generación de cada movimiento del terreno, la variabilidad espacial entre evento puede ser considerado, para asegurar que los activos localizados muy cerca unos respecto a otros tengan niveles de movimiento del terreno similares.

Una vez definido el movimiento del terreno debido al evento sísmico, se integra a la herramienta de cálculo del escenario de riesgo de OpenQuake, junto con las ecuaciones de vulnerabilidad y modelos de exposición, para así obtener los resultados de pérdidas por activo debido a un movimiento del terreno determinado (Figura 14).

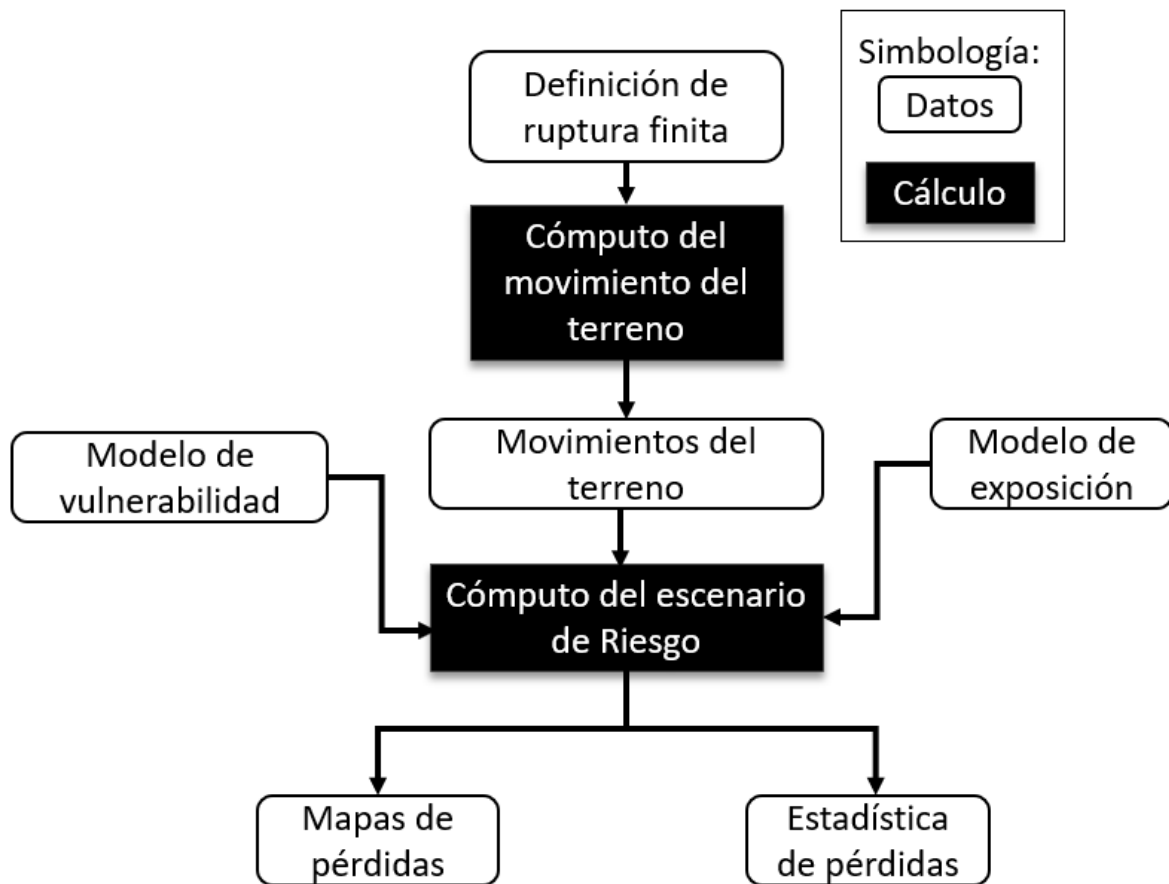


Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología OpenQuake del escenario de riesgo sísmico (Silva *et al.*, 2014)

2.1.1 Pasos para el cálculo del escenario de riesgo sísmico de OpenQuake

1. Para cada campo del movimiento del terreno, una medida de intensidad en la localización del elemento expuesto es usado para obtener el porcentaje de pérdida del coeficiente de variación de la curva de vulnerabilidad asociado. En funciones de vulnerabilidad discretas, es probable que la medida de intensidad provista por el campo del movimiento del terreno no esté contenida en la función. En estos casos, métodos de interpolación lineal son utilizados para calcular el porcentaje de pérdida en la medida de intensidad de interés.
2. El programa OpenQuake toma la función de vulnerabilidad asignada a cada elemento expuesto (activo) y revisa si el coeficiente de variación es cero. Si es así, el porcentaje de pérdida se obtiene del porcentaje de pérdida de cada nivel de intensidad. Si no es cero, y la incertidumbre está definida, el porcentaje de pérdida es seleccionado aleatoriamente siguiendo la distribución de probabilidad de la respectiva función de vulnerabilidad, como se describe:

Ec. 2 Distribución de probabilidad

$$\log LR_n = \mu + \epsilon\sigma$$

donde: μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo de los porcentajes de pérdida, respectivamente, y ϵ es un término que tiene una distribución estándar normal con una media de cero y desviación estándar de uno.

El método utilizado para la obtención de ϵ depende de si se va a considerar la correlación entre las incertidumbres de las curvas de vulnerabilidad de cada elemento expuesto dada su taxonomía:

- Perfectamente correlacionado: el término ϵ es obtenido aleatoriamente una vez para el primer elemento expuesto, y este resultado es usado para derivar el porcentaje de pérdida para todos los demás elementos expuestos con la misma taxonomía.
- Correlacionado: el término ϵ es obtenido aleatoriamente para cada elemento expuesto considerando el coeficiente de correlación entre elementos expuestos.

- Sin relación: el término ϵ siempre es obtenido aleatoriamente para cada elemento expuesto y por lo tanto la correlación entre la vulnerabilidad de los elementos expuestos es ignorada.

El porcentaje de pérdida media para cada elemento expuesto a través de todas las posibles simulaciones del escenario de un evento pueden ser calculados con la fórmula:

Ec. 3 Porcentaje de pérdida

$$LR = \frac{\sum_{n=1}^m LR_n | IML}{m}$$

donde: m significa el número de campos del movimiento del terreno simulados.

La pérdida media puede ser calculada multiplicando el porcentaje de pérdida media por el valor de elemento expuesto contenido en el archivo del modelo de exposición.

2.1.2 Cálculo de peligro sísmico por OpenQuake

OpenQuake define el modelo de peligro sísmico como una fuente de información de la localización, geometría, y actividad de las fuentes sísmicas, manejando cuatro tipologías de fuentes sísmicas:

- Área: Una región poligonal que describe el área de sismicidad uniforme.
- Punto: Una sola ubicación que describe la concentración de la sismicidad.
- Falla simple: Una superficie 3D que describe la sismicidad en un plano simple de falla.
- Falla compleja: Una superficie 3D que describe la sismicidad en un plano complejo de falla.

The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP), utiliza ampliamente la caracterización de las fuentes sísmicas por áreas, una recopilación de fuentes sísmicas a manera de punto se usa comúnmente para representar modelos sísmicos en forma de cuadrícula, mientras que las fallas simples son utilizadas para describir fallas superficiales activas, y las fallas complejas son usualmente adoptadas para la modelación de interfaces de subducción. La caracterización de las fallas de forma puntual, falla simple y compleja, es utilizada por la metodología HAZUS (Giardini, 1999).

Líneas de trabajo

El cálculo del peligro que provee OpenQuake ofrece cuatro líneas de trabajo (Figura 15):

- El clásico análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA), realiza curvas y mapas de peligro, y un mapa de espectro del peligro uniforme mediante la solución de integración que ofrece el mismo método. Este es un procedimiento muy usual utilizado a para cálculos de peligro a nivel regional, nacional y para sitios de estudios específicos.
- El PSHA basado en eventos, calcula un conjunto de eventos estocásticos y movimientos del terreno para cada ruptura, tomando en consideración la correlación espacial de los residuos entre eventos. Este es esencialmente una simulación Monte Carlo.
- Desagregación. Dado un modelo PSHA, se calcula el escenario de peligro contribuyendo el más probable nivel de peligro a un lugar en específico Actualmente, esto se hace siguiendo la metodología clásica PSHA.
- El análisis de peligro sísmico basado en un escenario (SHA). Dado una ruptura y un modelo del movimiento del terreno, un grupo de movimientos del terreno pueden ser calculados. Este estudio es típicamente usado para el análisis de pérdidas a un nivel urbano. Este grupo de movimientos del terreno pueden ser empleados junto con curvas de vulnerabilidad o fragilidad para calcular la distribución de daños en un grupo de elementos expuestos (activos).

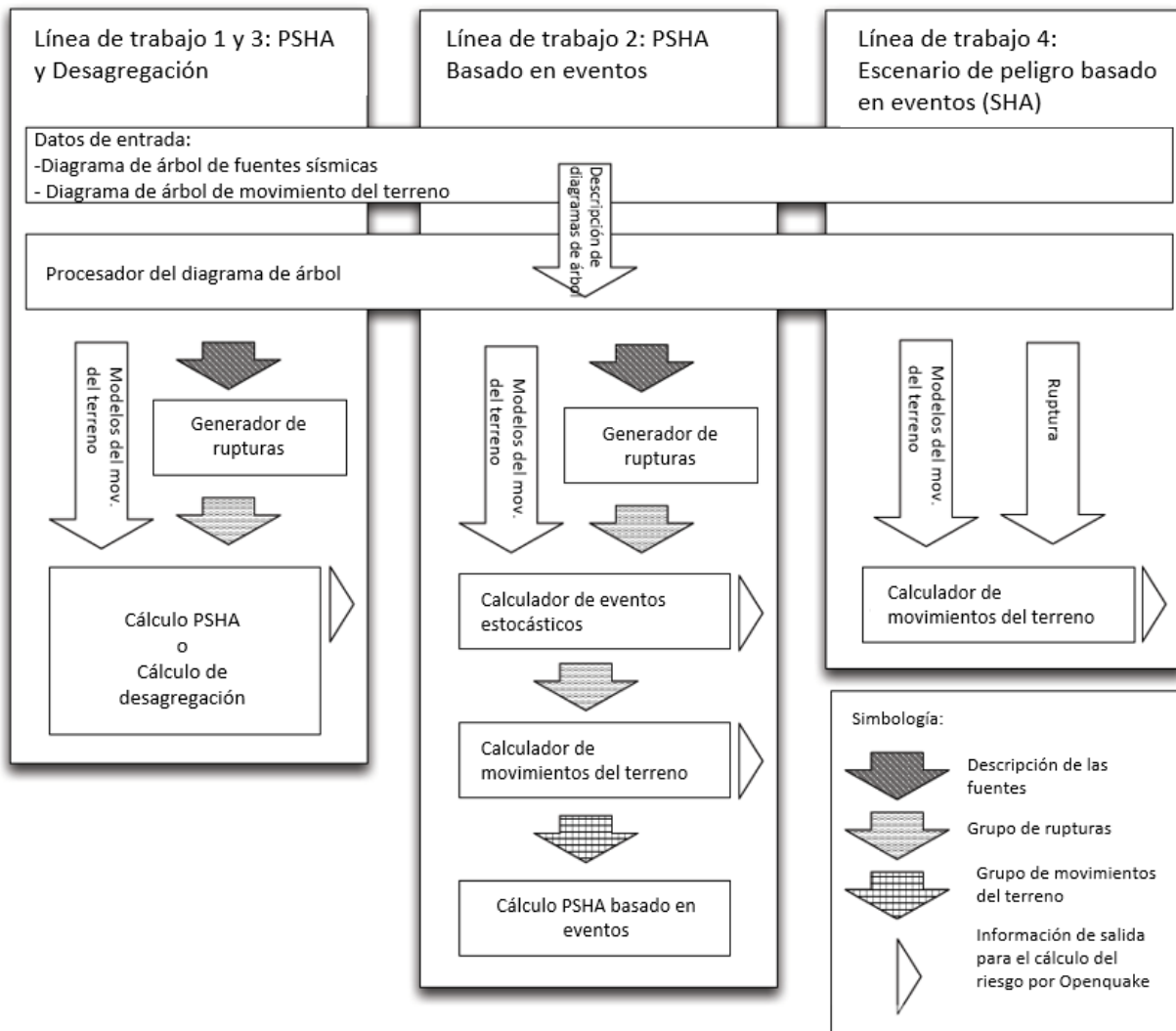


Figura 15. Esquema que describe las principales líneas de trabajo para el cálculo del peligro sísmico por OpenQuake.

2.1.3 Exposición por OpenQuake

El modelo de exposición contiene la información concerniente a los elementos expuestos en la región de interés, donde el término activo se refiere a algo que tiene valor. Se necesita la definición de ciertos parámetros para definir las características de los activos (elementos expuestos), como la taxonomía, que permite que la plataforma de cálculo relacione el activo con la función de vulnerabilidad, el valor del activo y las coordenadas geográficas, que son las que permiten hacer la relación del activo con la correspondiente aceleración de la fuente sísmica.

2.1.4 Cálculo de funciones de vulnerabilidad por OpenQuake

GEM propone metodologías para la determinación de curvas de fragilidad y funciones de vulnerabilidad tomando en cuenta las diferencias regionales y factores culturales para la clasificación de tipologías y características estructurales (Rossetto *et al.*, 2014; D'Ayala *et al.*, 2015). Dichas metodologías están basadas en los tres tipos principales de metodologías: Empíricas, analíticas y de opinión de expertos, con el objetivo final de que éstas tres metodologías se puedan complementar entre ellas. GEM menciona, como ejemplo de esta mutua complementación, que los huecos de información al realizar un estudio empírico son llenados con el método analítico y si persiste la falta de información, se completa con base en la opinión de expertos.

2.1.5 Método analítico GEM para la determinación de curvas de vulnerabilidad

En la figura 16 se muestra a través de un diagrama de flujo y de manera simplificada la metodología para la creación de curvas de vulnerabilidad por el método analítico. Con base en el diagrama, se explicarán con mayor nivel de detalle los pasos necesarios para el desarrollo de la metodología de acuerdo con D'Ayala *et al.*, 2015.

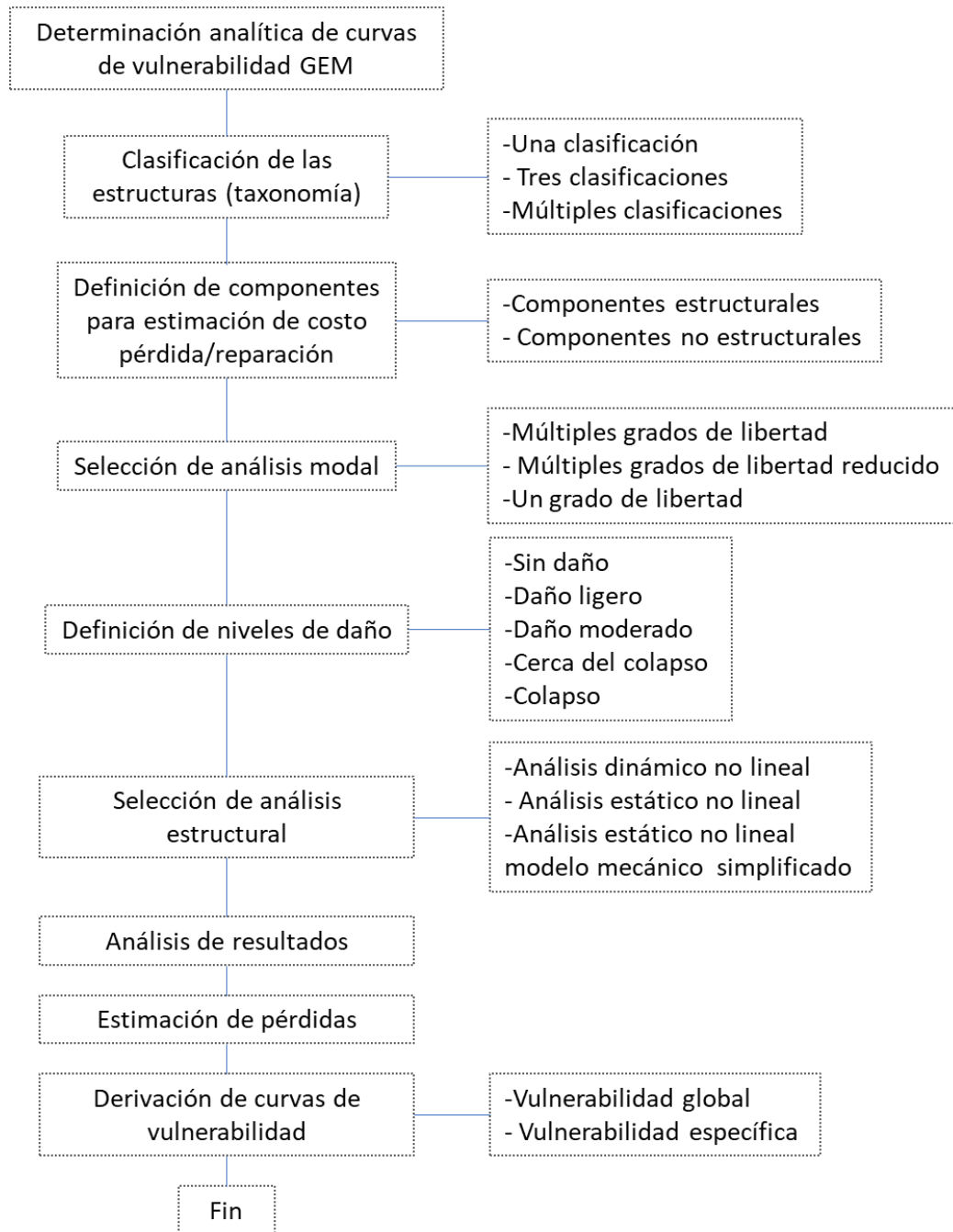


Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología analítica de curvas de vulnerabilidad.

2.1.6 Clasificación de las estructuras: definición de taxonomía

El primer paso para la creación de curvas de vulnerabilidad es la identificación de la taxonomía de las edificaciones, y está en función a la cantidad información que se posea.

Una clasificación: Se utiliza cuando la información a recabar está limitada en tiempo o si la recopilación de información es pobre. En estos casos se suele clasificar por el sistema de resistencia a cargas laterales y el material de construcción solamente.

Tres clasificaciones: La clase central está asociada al comportamiento típico de la estructura y las otras dos clases están asociadas a un comportamiento pobre y bueno, respectivamente. En esta clasificación es común especificar el sistema de resistencia a cargas laterales, material, características mecánicas, dimensiones, configuración geométrica y conexiones.

Múltiples clasificaciones: Aquí el analista puede cuantificar la variabilidad entre edificaciones utilizando la simulación Monte Carlo o el método de muestreo Hipercubo Latino. Este procedimiento permite una mayor cobertura de variabilidad entre edificios de la muestra. Sin embargo, es necesario un gran número de análisis aconsejándose utilizar modelos simples con periodos cortos de cálculo. También, se necesita que el analista cuente de habilidades avanzadas en simulación estadística.

Definición de componentes para estimación de costo pérdida/reparación

Aquí simplemente se definen los elementos que van a estar considerados para la determinación de costos de pérdidas, comúnmente son considerados los componentes estructurales y/o componentes no estructurales.

Selección de análisis modal

Se define el nivel de complejidad del análisis estructural, de acuerdo con los grados de libertad que se vayan a considerar.

- Múltiples grados de libertad (modelos 2D o 3D): Se realiza un modelo detallado 2D o 3D de la estructura, que incluye los elementos de resistencia a cargas laterales como son, muros, columnas, vigas, etc.
- Múltiples grados de libertad reducido: Un modelo 2D simplificado representa la edificación donde cada uno de los N pisos es representado por un nodo con tres grados de libertad, dos de traslación y uno de rotación, permitiendo la proyección de movimientos flectores y cortantes.
- Un grado de libertad: Se representa la estructura como un elemento unidimensional no lineal, del cual su rigidez, amortiguamiento de masa y ductilidad están definidas como un todo.

Definición de niveles de daño

Son cinco los niveles de daño que maneja GEM, sin daño, daño ligero, daño moderado, cerca del colapso y colapso. Aquí, los parámetros de demanda son definidos (como derivación máxima de entrepiso) para diferenciar entre los 5 daños. Estos parámetros son cantidades inherentemente aleatorias de las cuales se asume tener un comportamiento distribuido log-normalmente y necesitan de un valor de la mediana y de dispersión para ser definidos en su totalidad.

Selección de análisis estructural

Para evaluar la mediana y dispersión de la respuesta estructural para un dado nivel de intensidad, GEM opera con tres tipos de análisis estructurales:

- Análisis dinámico no lineal: Requiere un grupo de registros del movimiento del terreno para desempeñar una respuesta histórica de análisis para un modelo 2D o 3D.
- Análisis estático no lineal: Está basado en el patrón de carga del primer modo, desempeñando un análisis “pushover” en un modelo estructural 2D o 3D, después se ajusta la curva de capacidad resultante con una curva plástico-elástica.
- Análisis estático no lineal basado en un modelo mecánico simplificado: Análisis basado en métodos no numéricos. La curva de capacidad es obtenida a través de métodos

simplificados o numéricos de análisis que no requieren de modelado por medio de elementos finitos.

2.1.7 Derivación de curvas de vulnerabilidad

Para generar finalmente las curvas de vulnerabilidad, GEM utiliza dos procedimientos dependiendo del nivel de información disponible.

- Evaluación de vulnerabilidad global: La implementación de este cálculo está hecho para grupos grandes de edificaciones, como recomienda HAZUS-MH (FEMA, 2004), en cuyo procedimiento se generan curvas de vulnerabilidad al realizar la convolución de curvas de fragilidad con el costo acumulado de un estado de daño dado. Por lo tanto, el analista necesita primero producir las curvas de fragilidad a nivel global, o, seleccionar existentes de alguna literatura siempre y cuando sean consideradas como representativas del desempeño estructural del grupo de edificaciones en cuestión.
- Evaluación de vulnerabilidad específica: En este procedimiento las funciones de vulnerabilidad son obtenidas al correlacionar el nivel de desplazamiento de los componentes estructurales con la pérdida, como es recomendado en ATC-58 (Hamburger *et al.*, 2012). Este análisis se usa principalmente para estudiar un edificio individual y donde la mayoría de las pérdidas económicas están asociadas a los componentes no estructurales.

2.2 Escenario de Peligro sísmico

El escenario de peligro sísmico debido a la Falla Rose Canyon fue tomado del reporte “San Diego Earthquake Planning Scenario. Magnitude 6.9 Rose Canyon Fault Zone” de 2020. Creado por el Earthquake Engineering Research Institute (EERI) en colaboración con Structural Engineers Association of San Diego (SEAOSD) y otras organizaciones. Varias herramientas fueron utilizadas para la creación de este escenario, incluyendo el USGS ShakeMap, el USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER), y el software de estimación de pérdidas HAZUS de FEMA. En la figura 17 se muestra el escenario de peligro sísmico utilizado para este estudio, incluye aceleraciones máximas (PGA), velocidades máximas (PGV), magnitudes e intensidades sísmicas y posibles daños potenciales.

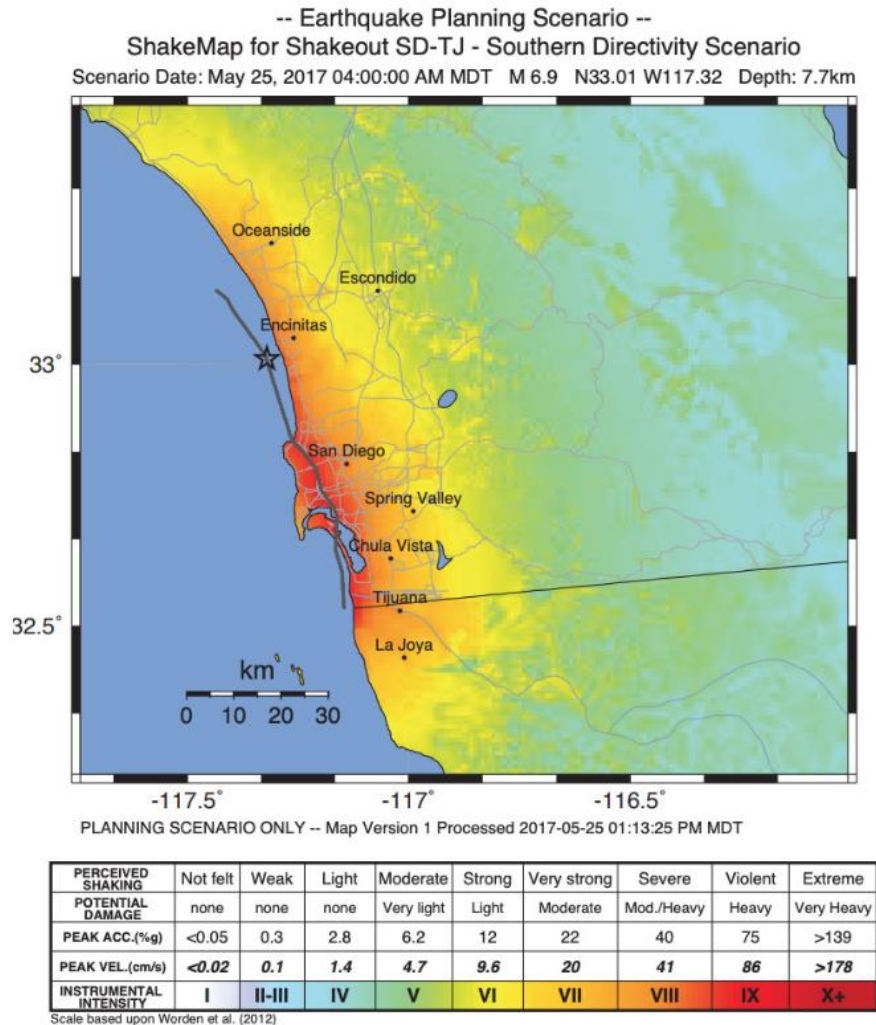


Figura 17. Escenario para Rose Canyon Mw=6.9, profundidad 7.7 km (USGS, 2017).

La Falla Rose Canyon cruza la ciudad de San Diego, y es responsable de la formación del Monte Soledad, cuya zona de subsidencia produjo el puerto de la bahía natural de San Diego (Rockwell, 2010). En el norte de Baja California, la zona de falla Rose Canyon ha sido constantemente interpretada como una extensión de las fallas Vallecitos-San Miguel y Agua Blanca, las cuales históricamente han generado sismos con magnitudes locales mayores a 4 (Richter, 1950). De aquí que gran parte del desplazamiento aparente de la falla Rose Canyon está localizado cerca de la costa de Tijuana (Legg, 1985; Wong y Legg, 1987).

Rose Canyon es una falla predominantemente de desplazamiento lateral dextral (Kennedy y Peterson, 1975), la cual, según proponen (Grant y Rockwell, 2000), es una zona activa de más de 300 km de longitud, que se extiende desde la cuenca de Los Ángeles (incluyendo la zona de fallas Newport-Inglewood) hasta la costa de Baja California uniéndose con la falla Agua Blanca (Figura 18). Se cree que está activa desde la época tardía del Plioceno (Ehlig P., 1980), dando, además, rastros de varias rupturas durante el Holoceno. Estudios de las rupturas en este periodo realizadas por (Lindvail y Rockwell, 1995), determinaron un desplazamiento de al menos 1mm/año.

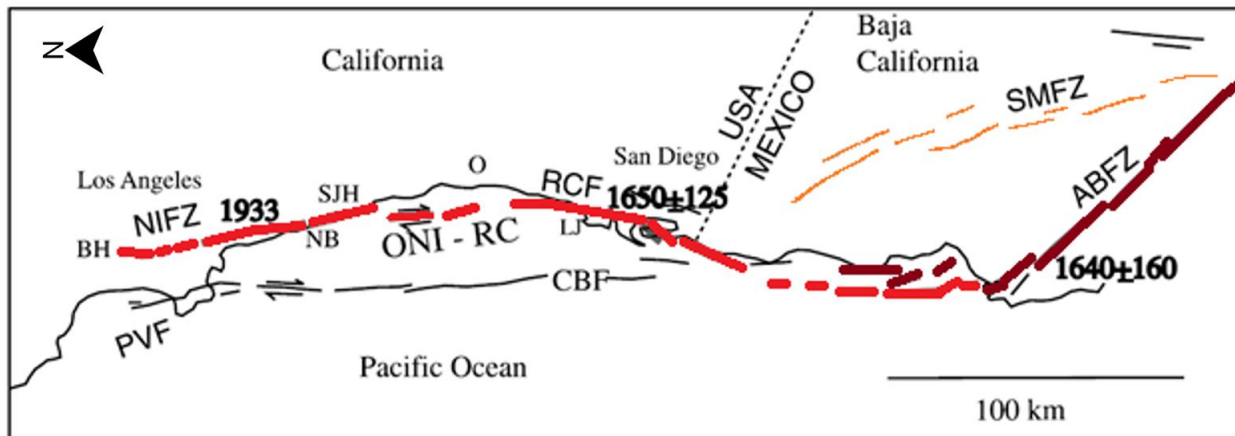


Figura 18. Mapa que muestra la localización aproximada de las fallas costeras (Grant y Shearer, 2004), (NIFZ) Zona de fallas Newport-Inglewood, (RCF) Falla Rose Canyon, (ABFZ) Zona de fallas Agua Blanca, (SMFZ) Zona de fallas San Miguel.

2.2.1 Características del escenario Rose Canyon

El escenario se realizó para una magnitud $M_w=6.9$ con una profundidad al hipocentro de 7.7 km, un área de ruptura de 830 km² longitud de ruptura de 69 km y un desplazamiento horizontal máximo de 2 m, localizado en N33.01° W117. 32°. El periodo de retorno se especificó de 1000 años con un desplazamiento de 2 mm/año (Figura. 19) con duración de movimiento del terreno entre 10 y 30 segundos. Este escenario fue seleccionado como el más probable de afectar a Tijuana y San Diego, el que más impacto produzca, y, por lo tanto, el más apropiado para la creación de planes basados en un escenario de desastre sísmico (EERI, 2020).

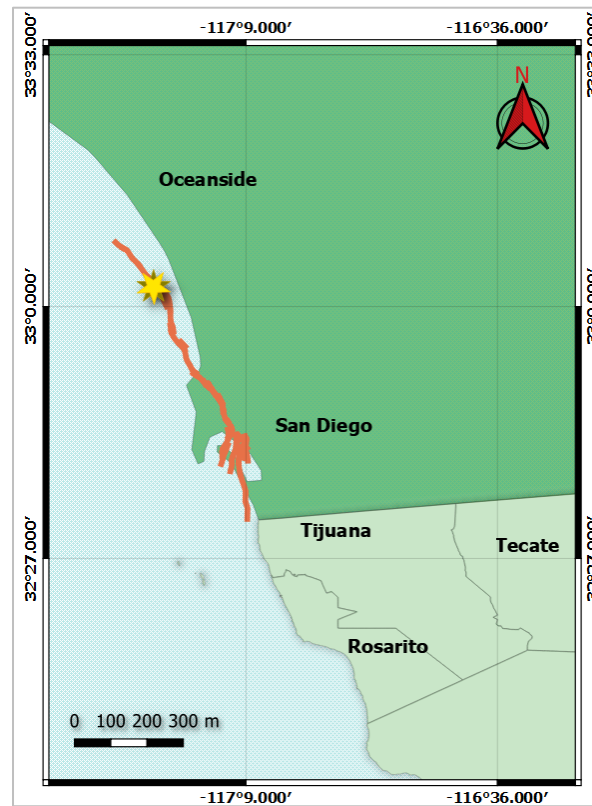


Figura 19. Falla Rose Canyon y localización de epicentro.

En las figuras 20 (a-d), se muestran escenarios para aceleraciones (PGA) y pseudo-aceleraciones S. A. (1.0), S. A. (0.3) y S. A. (0.6) respectivamente, provistos por USGS y representados en QGIS. Originalmente, el escenario de peligro que generó USGS consideró aceleraciones espectrales PGA, S.A. (0.1), S. A. (0.3), S.A. (1.0) y S.A. (3.0), sin embargo, debido a las curvas de vulnerabilidad de necesidad para este análisis, se requirió solicitar a USGS a través del Dr. Jorge Meneses la adición de la aceleración S. A. (0.6).

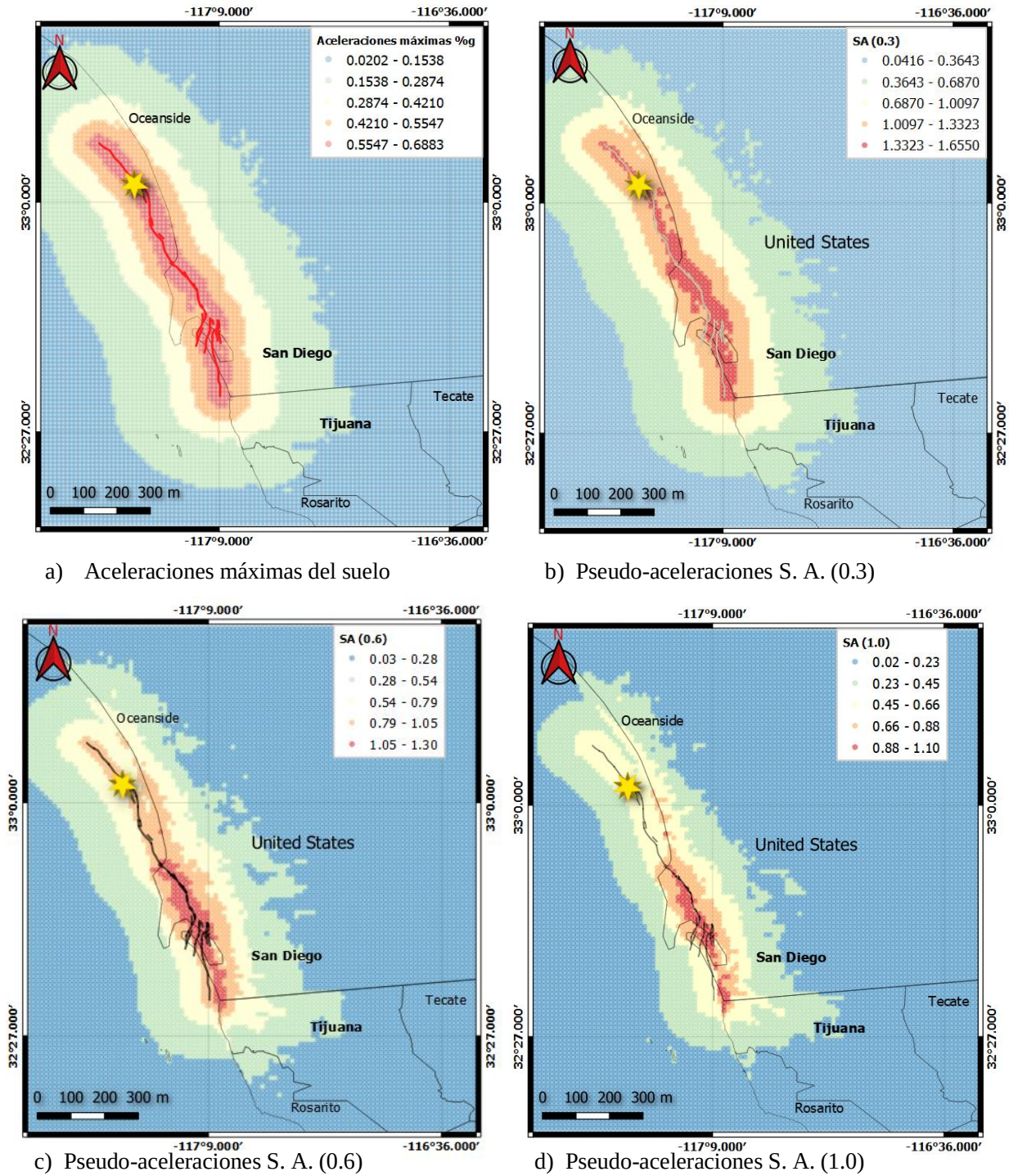


Figura 20 (a-d). Escenarios para Rose Canyon Rose Canyon Mw=6.9, profundidad 7.7 km, representado en Qgis.

2.2.2 Incertidumbre del escenario de peligro

Las incertidumbres en los fenómenos naturales son permanentes, en lo que se refiere al concepto general del escenario sísmico global, por ahora lo que se tiene disponible es la incertidumbre dada por las desviaciones estándar del movimiento del terreno (USGS, 2017), provista en términos de aceleraciones, asociadas a la aceleración máxima del terreno (PGA), con desviaciones estándar de entre 0.48 y 0.62, para las pseudo-aceleraciones de 0.3 segundos, se tienen desviaciones estándar de 0.51 a 0.68 y para aceleraciones de 1 segundo las desviaciones estándar están en orden de 0.66 y 0.75, considerando con ello que la incertidumbre menor está dada por las aceleraciones máximas del terreno (Figura 21).

Para el caso del modelo de exposición, la incertidumbre para este caso de estudio no se ha calculado debido a que la integración de la información está dada de manera cualitativa. En el caso de las funciones de vulnerabilidad, intrínsecamente su construcción integra un número de simulaciones, tal que, su incertidumbre está asociado con un modelo de consecuencias que, para el caso de las funciones utilizadas en este estudio, este modelo fue obtenido de eventos dados en otros países. Estas funciones de vulnerabilidad reflejan estados de perdidas dada por modelos de daño reflejadas en curvas de fragilidad que están asociadas aproximadamente a porcentajes del 25, 50, 75 y 100.

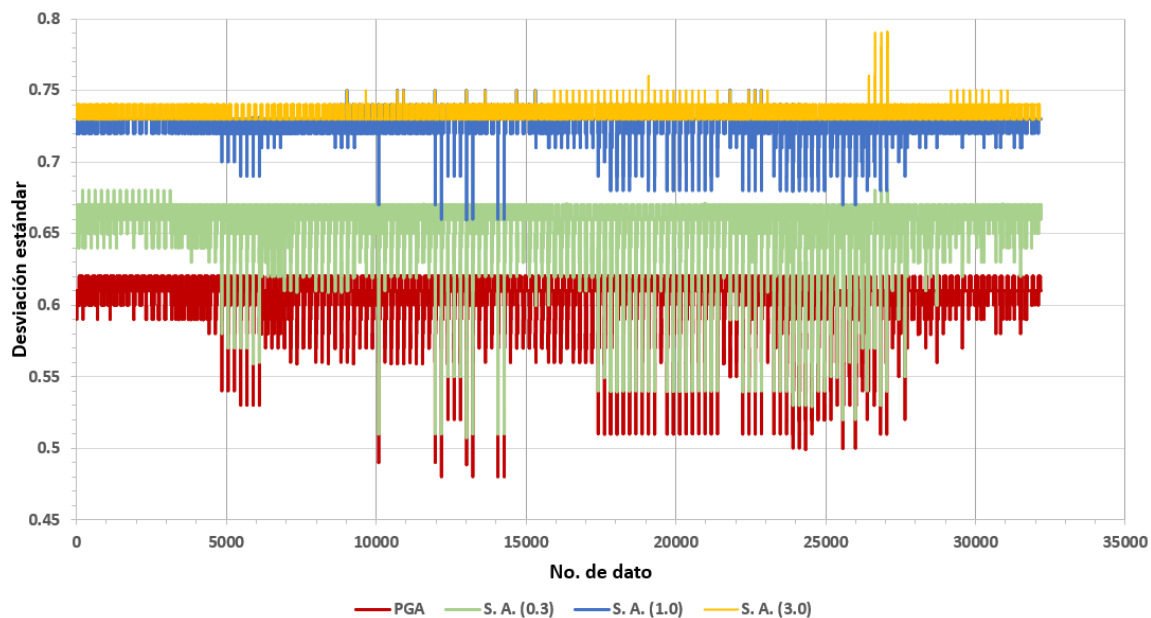


Figura 21. Desviaciones estándar para las medidas de intensidad PGA, S. A. (0.3), S. A. (1.0) y S. A. (3.0) (elaboración propia).

2.3 MODELO DE EXPOSICIÓN

Los elementos expuestos considerados en este estudio se limitan a edificaciones de uso habitacional, comercial e industrial, de forma similar a lo realizado por Silva *et al.*, 2020 y Yepes-Estrada *et al.*, 2016 en su modelo de riesgo sísmico a nivel mundial. No se consideraron líneas de vida, edificios públicos, ni hospitales y escuelas privadas. La decisión de considerar tres tipos de infraestructura estuvo alineada a las consideraciones hechas en el modelo global del GEM, con la intención de calibrar los resultados.

2.3.1 Recopilación de los elementos expuestos

La obtención y recopilación de la información de los elementos expuestos se realizó principalmente con la información libre que proporciona INEGI, complementándola con la herramienta “Google Street View” y la opinión de expertos.

2.3.2 Información de viviendas

La información necesaria para la caracterización de la vivienda es la siguiente:

- Localización geográfica.
- Número de viviendas.
- Número de habitantes.
- Material de construcción.
- Número de niveles.
- Costo de vivienda.

1. Localización geográfica, número de viviendas y número de habitantes

Esta información fue recopilada de la encuesta intercensal INEGI 2015, encuesta creada para la actualización demográfica a la mitad del periodo de censos para colocarse entre el censo 2010 y el censo 2020, por lo tanto, la más actual (INEGI, 2015). La encuesta INEGI 2015 provee datos tabulados en formato “.xls ” a nivel manzana, es decir, se tiene la localización, número de habitantes y de viviendas por manzana, en el que se identifica cada manzana con un código denominado AGEB (Área Geoestadística Básica urbana) (Figura 22). El trabajo principal respecto al informe del INEGI fue el tratamiento, ordenamiento y filtración de los datos para ser transformados en archivos “shapefile” y poder ser reconocidos por QGIS. El modelo de exposición

no contiene la totalidad de las manzanas existentes en Tijuana, solo las manzanas con información completa por parte de INEGI. De las 19, 995 manzanas se trabajaron 17, 360 correspondientes a 503, 689 viviendas y 1, 441, 394 habitantes.

2. Material de construcción

Los materiales de construcción de las viviendas provistos por INEGI solo se encontraron disponibles a nivel municipal y únicamente el material de las paredes (Tabla 5). Cuyos materiales se clasificaron en tres grupos principales: mampostería (bloque y ladrillo), concreto y madera. Ya que, según la opinión de 67 expertos de Tijuana pertenecientes al Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana (CICT) (asamblea del 19 de febrero de 2020), son los materiales que imperan en la ciudad, rechazando la existencia de otros materiales de menor calidad por la escasa existencia de estas.

Tabla 5. Materiales de paredes en casa habitación (INEGI, 2017).

Municipio	Total a/	Resistencia de los materiales en paredes (Porcentaje)				
		Material de desecho o lamina de carton	Embarro o bajareque, lámina de asbesto o metálica, carrizo, bambú o palma	Madera o adobe	Tabique, ladrillo, bloque, piedra, cantera, concreto.	Material no especificado
Tijuana	474 316	0.36	0.35	22.48	76.61	0.19

a/ Excluye las siguientes clases de vivienda: locales no construidos para habitación, viviendas móviles y refugios.

3. Número de niveles

El número de niveles se infirió con base en el tipo de viviendas (Tabla 6), ya que no se cuenta con un banco de datos de confianza que contenga esta información. Se hicieron dos grupos, en un grupo pertenecen las viviendas de 1 a 3 niveles y en el otro grupo las viviendas de 3 a 6 niveles; en concordancia con el CICT (Tabla 7).

Tabla 6. Viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según clase de vivienda particular (INEGI, 2015).

Municipio	Total	Clase de vivienda particular (porcentaje)				
		Casa a/	Departamento en edificio	Vivienda en vecindad o cuartería	Otro tipo de vivienda b/	No especificado
Tijuana	475 341	88.65	6.4	4.21	0.24	0.5

Donde:

a/ Incluye las siguientes clases de vivienda: casa única en el terreno, casa que comparte terreno con otra(s) y casa dúplex, triple o cuádruple.

b/ Incluye las siguientes clases de vivienda: cuarto en la azotea de un edificio, local no construido para habitación, vivienda móvil y refugio.

Tabla 7. Materiales de construcción para modelo de exposición de acuerdo con el número de niveles. En concordancia con el Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana (CICT, 2020).

Madera	Mampostería	Concreto	Niveles	Clase de vivienda particular (porcentaje)
22%	78%		1-3	Casa, vivienda en vecindad, otro tipo, no especifica
	70%	30%	3-6	Depto. en edificio, condomnio

4. Costo de vivienda

El costo de vivienda se asignó por AGEB, que es un conjunto de manzanas (figura 26). Para la determinación de los costos, se exploró AGEB por AGEB mediante la herramienta “Google Street View”, “GoogleMaps” y el mapa digital de México (INEGI, 2015) y se seleccionaron las 10 viviendas más representativas del AGEB (Figuras 23 y 24). De estas 10 viviendas se determinaron sus áreas respectivas y se promediaron para obtener un área promedio por AGEB (Ec. 4).

Ec. 4 Área promedio por vivienda

$$A_p = (\sum_{i=1}^{i=10} A_i)/10$$

donde: A_p : Área promedio en m^2 por AGEB; A : área de casa habitación en m^2 .

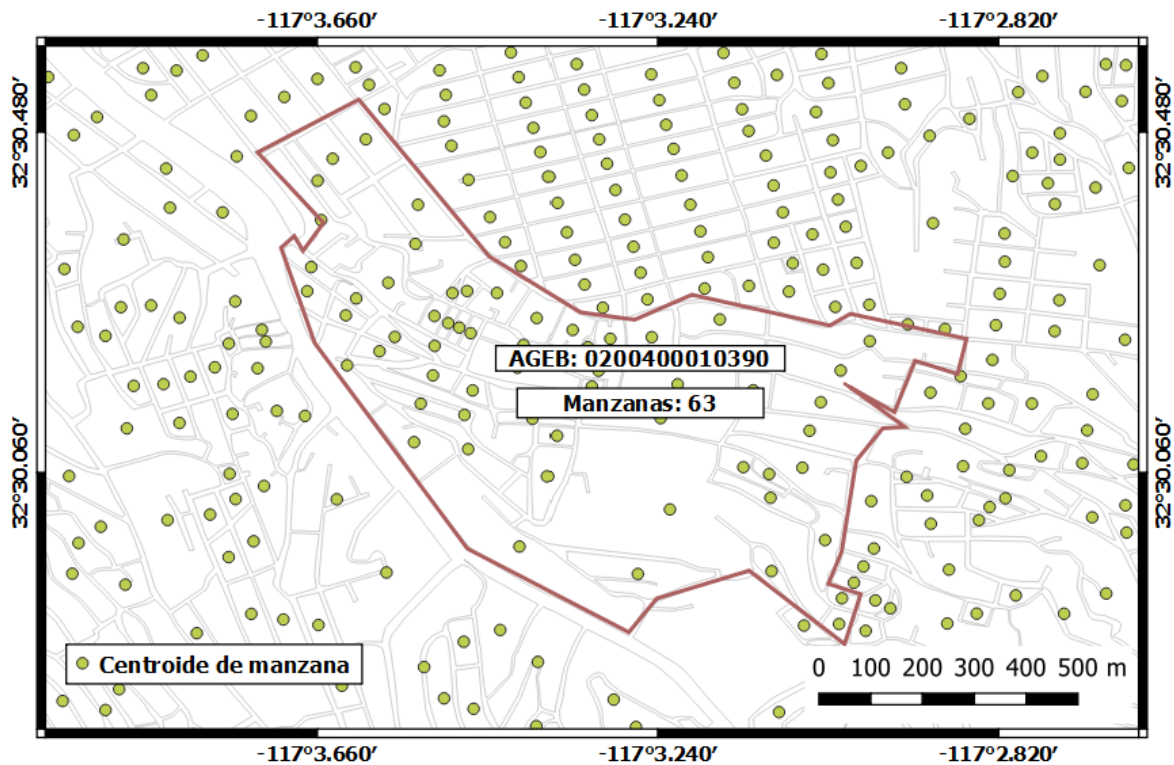


Figura 22. Representación de AGEB como el conjunto de 63 manzanas.



Figura 23. Determinación de áreas con herramientas del Mapa Digital de México.



Figura 24. Verificación de número de pisos para determinación de área con “Google Street View”.

El costo de reposición por m^2 fue proporcionado por el Colegio de Valuadores de Baja California A.C. (2018), correspondiente al Presupuesto de prototipos de casa habitación en Tijuana. Puesto que hay limitado acceso público a la información del estado de las viviendas y su distribución en Tijuana, se resolvió por simplicidad tomar el costo de reposición por m^2 para una casa habitación de nivel económico bajo, que corresponde a \$6, 413.03 M. N.

El costo por casa habitación por manzana se calculó multiplicando el costo de reposición por m^2 por el área promedio por AGEB (Ec. 5).

Ec. 5 Costo de vivienda

$$\text{Costo por vivienda} = A_p * C_r$$

donde: A_p : Área promedio en m^2 por AGEB; C_r : Costo de reposición por m^2 .

2.3.3 Modelo de exposición de viviendas

En la figura 25 se muestran los resultados del modelo de exposición, por medio de puntos localizados en el centro geométrico de cada colonia y alimentados con la información recabada. Además, se provee una muestra de la información en cada punto (Tabla 8).

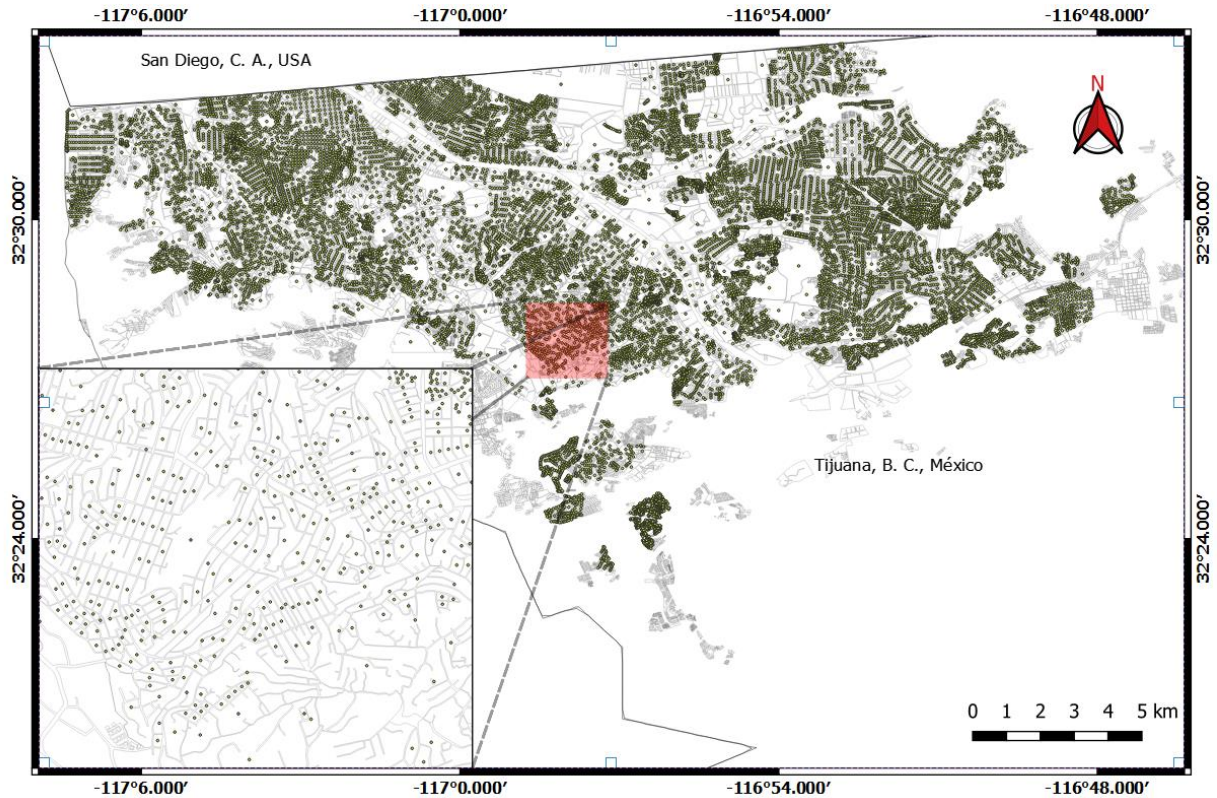


Figura 25. Representación de viviendas a nivel manzana de Tijuana en QGIS.

Tabla 8. Extracto de la información de identificación por manzana para viviendas.

id	lon	lat	number	structural	night
0200400010032019	-117.068973	32.5362971	6	233787.19	31
0200400010032020	-117.068334	32.5365234	28	233787.19	86
0200400010032021	-117.068906	32.5368395	10	233787.19	21
0200400010032022	-117.06881	32.5374182	5	233787.19	16
0200400010032023	-117.068323	32.5377051	44	233787.19	97
0200400010032024	-117.067712	32.5377284	29	233787.19	59
0200400010032025	-117.066995	32.5376893	32	233787.19	87
0200400010032026	-117.064557	32.5339272	46	233787.19	118
0200400010032028	-117.064601	32.5327883	24	233787.19	60

Donde:

id: Es el código AGEB de manzana que maneja INEGI

lon: Longitud

lat: Latitud

number: Número de viviendas en la manzana

structural: Costo de reposición estructural en dólares estadounidenses por una vivienda.

night: Ocupantes en la vivienda durante la noche

Los encabezados deben ser los mostrados en la tabla para la lectura de los datos en OpenQuake.

2.3.4 Información de industrias

1. Localización geográfica, número de industrias y número de ocupantes

Del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), se obtuvieron la localización, número de industrias y de ocupantes de forma individual, industria por industria, con sus respectivos ocupantes. Esto hace que la información sea más precisa. El modelo de exposición no contiene la totalidad de las industrias existentes en Tijuana, solo las industrias con información completa por parte del DENUE. De las 1, 030 industrias se estudiaron 765 edificios y 102, 030 ocupantes.

2. Material de construcción

Los materiales de construcción de las industrias no son provistos por INEGI, por lo que se optó por practicidad, continuar bajo la opinión de CICT. Quienes observaron que las industrias en Tijuana están presentes en tres materiales: concreto (50%), mampostería (30%) y acero (20%) (Figura 26).

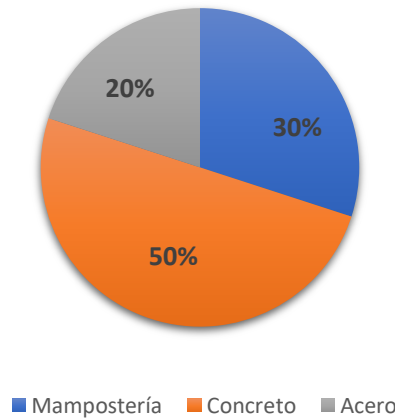


Figura 26. Porcentaje de materiales de construcción de edificios industriales en Tijuana (CICT, 2020).

3. Costo de industria

En relación con la base de datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción de 2017, se obtuvieron los costos de reposición por m^2 de los edificios industriales de Tijuana correspondiente a \$13, 496 M.N. Al igual que en casa habitación, se realizó una exploración con ayuda del Mapa Digital de México, “GoogleMaps” y “Google Street View”, en este caso de edificación por edificación industrial (Figura 27).



Figura 27. Determinación de área, industria por industria.

El costo de cada industria se calculó multiplicando el costo de reposición por m^2 por el área de la industria (Ec. 6).

Ec. 6 Costo de industria

$$\text{Costo por industria} = AI * Cr$$

donde: AI: Área de industria en m^2 ; Cr: Costo de reposición por m^2 .

2.3.5 Modelo de exposición de industria

Se muestra en la figura 28 todos los puntos correspondientes a cada una de las industrias de Tijuana, y en la tabla 9 una muestra de los datos por industria.

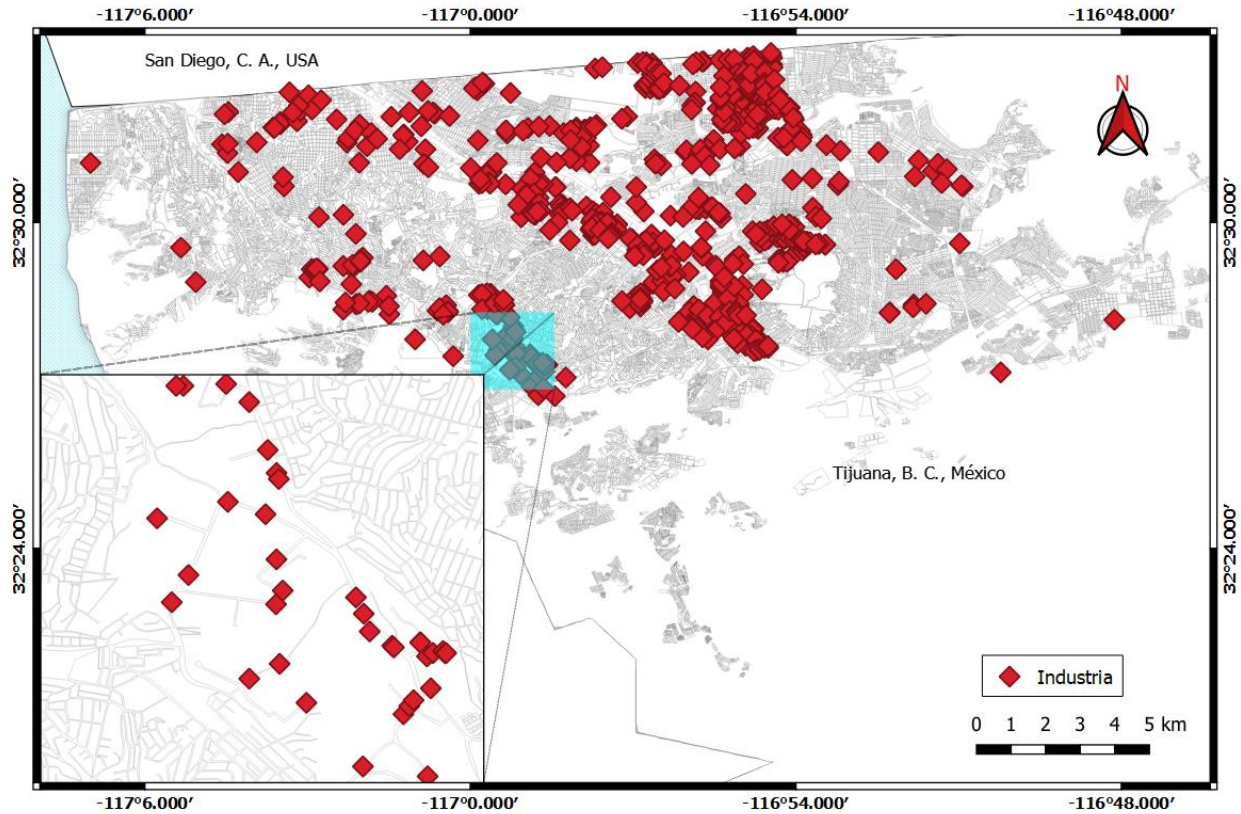


Figura 28. Representación de industrias de Tijuana en Qgis.

Tabla 9. Extracto de la información de identificación para la industria.

id	lon	lat	number	structural	night
0200400010051017	-117.041011	32.5314748	1	1030505.32	30
0200400010136003A	-116.961596	32.5470697	1	1110770.41	30
0200400010136003B	-116.995598	32.5424434	1	1110770.41	30
0200400010136003C	-116.95939	32.5474935	1	1110770.41	30
0200400010136003D	-116.98761	32.5395827	1	1110770.41	30
0200400010189003E	-117.058366	32.5301867	1	1250659.21	250
0200400010189003F	-117.058303	32.5306451	1	1250659.21	50
0200400010189003G	-117.060236	32.5289928	1	1250659.21	250
0200400010189003H	-117.0583	32.5300258	1	1250659.21	250

Donde:

id: Es el código AGEB de manzana que maneja INEGI

lon: Longitud

lat: Latitud

number: Número de industrias en la respectiva localización

structural: Costo de reposición estructural en dólares estadounidenses por la industria.

night: Ocupantes en la industria, en este caso se consideran los mismos ocupantes día y noche.

Los encabezados deben ser los mostrados en la tabla para la lectura de los datos en OpenQuake.

2.3.6 Información de comercios

1. Localización geográfica, número de comercios y número de ocupantes

Este tipo de información, al igual que en la industria, fue recabada comercio por comercio; aun así, a diferencia de la industria, la información de los ocupantes en el comercio es menos precisa, ya que los censos del DENU consideraban el número de empleados del comercio, no el número de personas que suele estar dentro de las instalaciones; por lo tanto, los elementos expuestos considerados en este estudio son mayores que los reales. También, el número de comercios fue reducido a los comercios “formales”, es decir, que se encuentran dentro de un local o edificación, descartando todo aquel comercio sobre ruedas o ambulante. En total se observaron 1, 177 edificaciones y 74, 135 ocupantes.

2. Material de construcción

Al igual que en la base de datos de la industria, los materiales de construcción de los comercios no son provistos por INEGI, por lo que se continuó bajo la opinión del CICT. Quienes observaron que los comercios en Tijuana están presentes en tres materiales principales; mampostería (40%), concreto (35%) y acero (25%) (Figura 29).

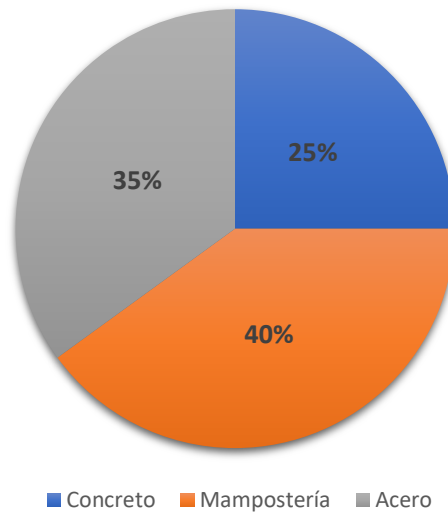


Figura 29. Porcentaje de materiales de construcción de edificios comerciales en Tijuana (CICT, 2020).

3. Costo de comercio

En concordancia con la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2017), los costos de reposición por m² de los edificios comerciales de Tijuana correspondiente a \$11,513 M.N. Al igual que en la industria, se realizó una exploración con ayuda del Mapa Digital de México, “GoogleMaps” y “Google Street View”, edificación por edificación comercial (Figuras 30 y 31).



Figura 30. Determinación de área, comercio por comercio.

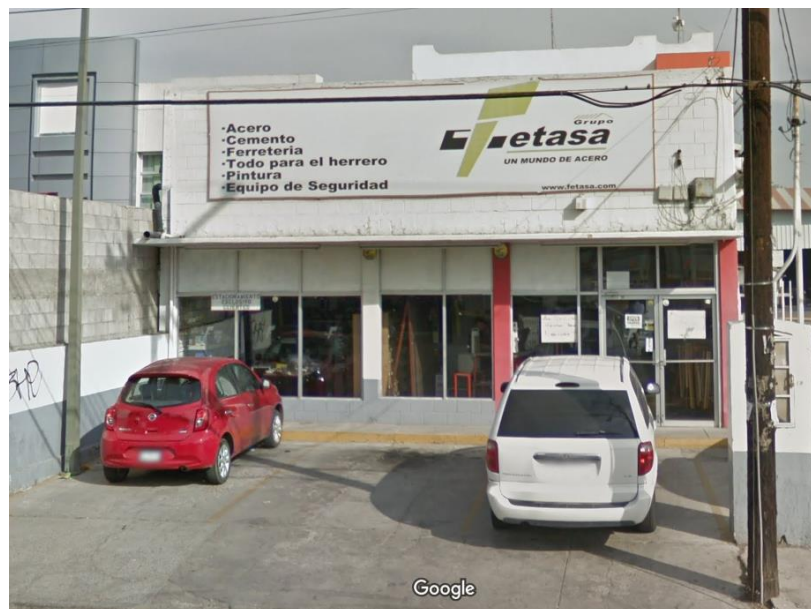


Figura 31. Verificación de número de pisos para determinación de área con Google Street View.

El costo para cada comercio se calculó multiplicando el costo de reposición por m² por el área del comercio (Ec. 7).

Ec. 7 Costo de comercio

$$\text{Costo por comercio} = A_c * C_r$$

donde: A_c : Área de comercio en m²; C_r : Costo de reposición por m².

2.3.7 Modelo de exposición del comercio

Se muestra en la figura 32 todos los puntos correspondientes a cada uno de los comercios de Tijuana, y en la tabla 10 una muestra de los datos del modelo de exposición comercial.

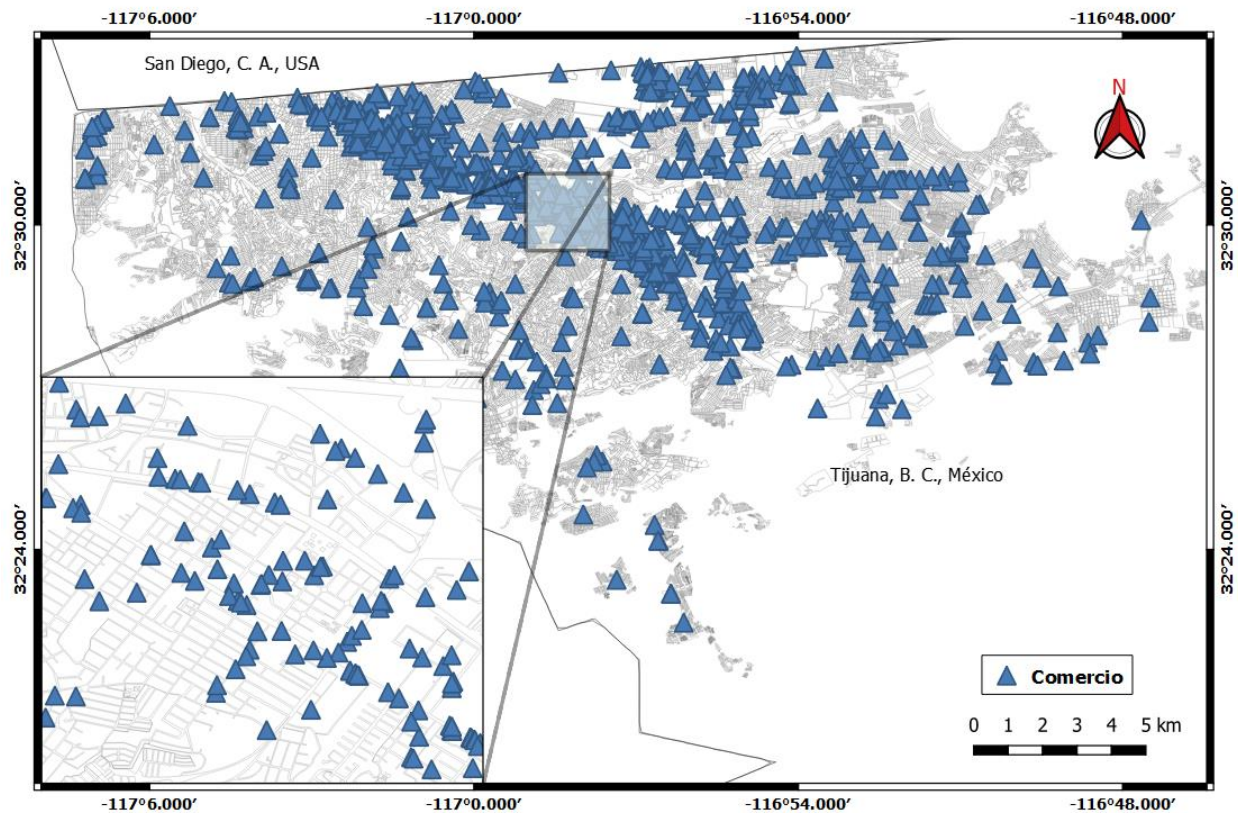


Figura 32. Representación de comercios de Tijuana en QGIS.

Tabla 10. Extracto de la información de identificación para el comercio.

id	lon	lat	number	structural	day
0020040001048A017A	-116.850677	32.4846283	1	17386040	30
0020040001048A017B'	-116.850079	32.4953268	1	7737320.38	250
0020040001048A018	-116.996454	32.511997	1	2441452.12	30
0020040001048A020	-116.978543	32.503098	1	102814.6	30
0020040001048A027A	-117.05691	32.5119791	1	102628.6	30
0020040001048A027B	-117.022903	32.5107408	1	101407.2	30
0020040001048A030A	-117.032326	32.5229193	1	101071.78	100
0020040001048A030B	-116.903188	32.5476218	1	99561.46	250
0020040001048A037	-117.023027	32.4557035	1	99200	30

Donde:

id: Es el código AGEB de manzana que maneja INEGI

lon: Longitud

lat: Latitud

number: Número de comercios en la respectiva localización

structural: Costo de reposición estructural en dólares estadounidenses por comercio.

day: Ocupantes en el comercio, en este caso se considera que el mayor no. de ocupantes están durante el día.

Los encabezados deben ser los mostrados en la tabla para la lectura de los datos en OpenQuake.

2.4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

Las curvas de vulnerabilidad fueron obtenidas por medio de curvas existentes de otras regiones del mundo cuyas características estructurales son las más similares a las que se encuentran en la ciudad de Tijuana, debido a la carencia de curvas de vulnerabilidad propias de las estructuras de la región.

El proceso de selección de curvas de vulnerabilidad para las edificaciones habitacionales, industriales y comerciales se basan en el documento “A global database of vulnerability models for seismic risk assessment” (Martins y Silva, 2018); estudio donde se desarrollaron curvas de fragilidad y vulnerabilidad de las edificaciones más comunes en el mundo realizando un acercamiento analítico. Se consideraron cerca de 200 tipologías estructurales; las cuales fueron seleccionadas para cubrir las combinaciones más significativas del material de construcción, altura, sistema de resistencia lateral y nivel de diseño.

Para cada tipología estructural, 150 modelos de un grado de libertad fueron generados asumiendo una distribución normal de fluencia, capacidad última y la realización de un análisis dinámico no lineal. Además, para el proceso de selección se considera en conjunto el estudio “Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America” (Villar-Vega et al., 2017), donde se obtienen los modelos de fragilidad más representativos de las tipologías estructurales de la región Andina (Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú, y Venezuela) para un análisis de riesgo a gran escala. Este estudio también forma parte del programa South America Risk Assessment Project (SARA) liderado por GEM.

Sí bien es cierto que es importante el tipo de movimiento del terreno que produce las aceleraciones, en este trabajo de tesis consideramos en una buena parte las funciones de vulnerabilidad que se obtuvieron para el modelo de peligro hecho para México con el desarrollo de curvas de vulnerabilidad a nivel mundial de GEM, y otra parte se complementó con el proyecto SARA, las curvas de vulnerabilidad utilizadas en este trabajo se encuentran disponibles en la plataforma GEM.

}

2.4.1 Tipologías estructurales comunes en Tijuana

De acuerdo con la encuesta intercensal INEGI 2015, en las figuras 33 y 34 se muestra la distribución de materiales de construcción de las paredes predominantes a nivel nacional, estatal (Baja California) y municipal (Tijuana).

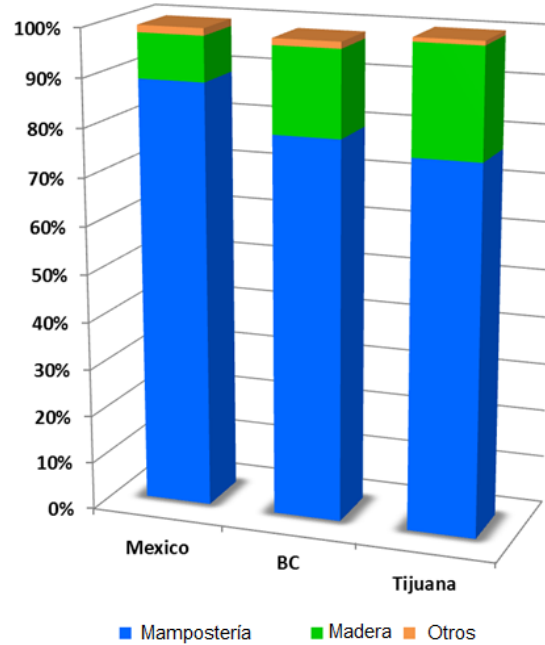


Figura 33. Materiales predominantes en paredes de México, Baja California y Tijuana.

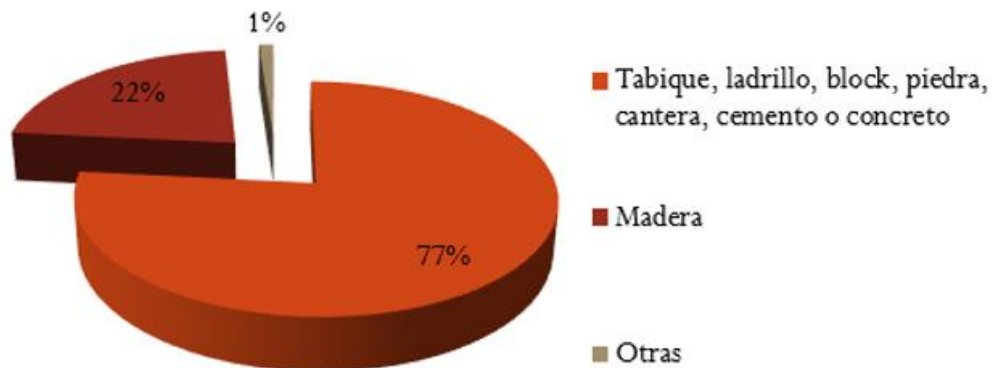


Figura 34. Materiales predominantes en paredes de Tijuana (INEGI, 2015)

Comparado con los resultados de Villar-Vega, en Sudamérica (Figura 35), los materiales de construcción utilizados en México y Tijuana resultan ser muy similares. Además, visualmente, se muestran en las figuras 36, 37 y 38 las similitudes en la configuración y materiales de construcción entre las estructuras de Tijuana y Sudamérica (Villar-Vega, et al., 2017).

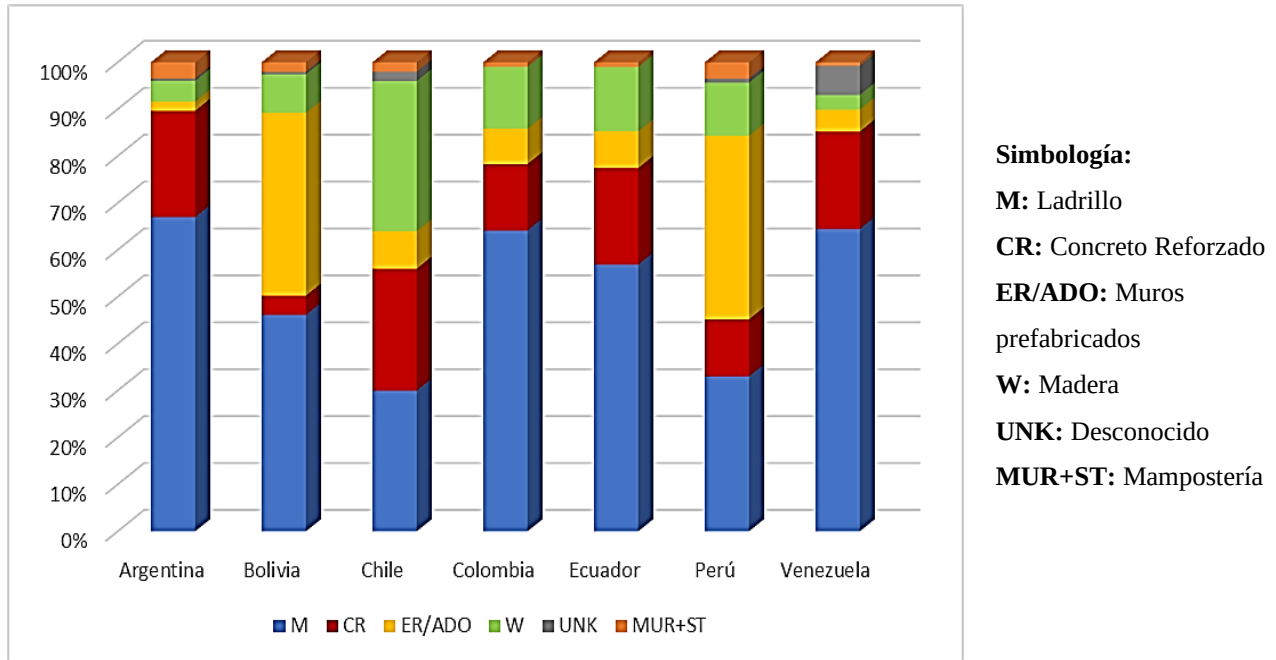


Figura 35. Materiales predominantes en países de Sudamérica (Villar-Vega *et al.*, 2017).

Se corroboraron visualmente los sistemas estructurales utilizados en Tijuana con los de los países sudamericanos:

Casa habitación en Sudamérica



Casa Habitación en Tijuana

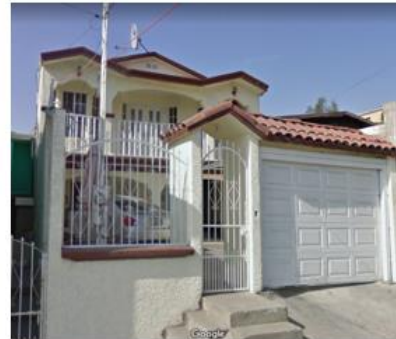


Figura 36. Casa habitación en Sudamérica y la ciudad de Tijuana

Industrias en Sudamérica



Industrias en Tijuana



Figura 37. Industrias en Sudamérica y la ciudad de Tijuana

Comercios en Sudamérica



Comercios en Tijuana



Figura 38. Comercios en Sudamérica y la ciudad de Tijuana

2.4.2 Curvas de vulnerabilidad para casa habitación

Un total de 11 funciones de vulnerabilidad se utilizaron para caracterizar las diferentes tipologías de casa habitación predominantes (Tabla 11).

Tabla 11. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para casa habitación

Taxonomía	Descripción
MCF/LWAL+DUM/H:1	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, un nivel
MCF/LWAL+DUM/H:2	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, dos niveles
MCF/LWAL+DUM/H:3	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, tres niveles
MCF/LWAL+DUM/H:4	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, cuatro niveles
MCF/LWAL+DUM/H:5	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, cinco niveles
MCF/LWAL+DUM/H:6	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, seis niveles
CR/LFINF+DUM/H:3	Concreto reforzado, colado en sitio, medianamente dúctil, tres niveles
CR/LFINF+DUM/H:4	Concreto reforzado, colado en sitio, medianamente dúctil, cuatro niveles
CR/LFINF+DUM/H:5	Concreto reforzado, colado en sitio, medianamente dúctil, cinco niveles
CR/LFINF+DUM/H:6	Concreto reforzado, colado en sitio, medianamente dúctil, seis niveles
W+WLI/LWAL+DNO/HBET:1-2	Madera, miembros ligeros, no dúctil, 1-2 niveles

2.4.3 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para casa habitación

Debido a que no se conoce la distribución de las diferentes tipologías estructurales (taxonomías) de casa habitación en la ciudad, se realizaron las siguientes consideraciones.

1. De acuerdo con la distribución porcentual de viviendas del NEGI, se consideró que las casas particulares, viviendas en vecindad, otro y no especificado se considerarán casa habitación de 1 a 3 niveles. Dando como resultado que el 93.6% corresponde a casas de 1 a 3 niveles y el restante 6.4% respectivo a departamentos en edificio de 4 a 6 niveles.
2. Del 93.6% de las casas de 1 a 3 niveles, se considera que hay una probabilidad del 33.33% que tal casa sea de uno, dos o tres niveles, es decir una probabilidad total de 31.2% por cada nivel. Del 6.4% correspondiente a casa de 4 a 6 niveles, se considera que hay una probabilidad del 33.33% que este tipo de casa sea de cuatro, cinco o seis niveles respectivamente, es decir una probabilidad total del 2.13% por cada nivel.
3. Las casas habitación de 1 a 2 niveles son de mampostería confinada o madera, las de 3 a 6 niveles de mampostería confinada o concreto reforzado.
4. Dentro de las casas habitación de 1 a 2 niveles, el 78% de ellas se consideran de mampostería confinada y el 22% de madera. Dentro de las casas de 3 a 6 niveles, se considera el 70% de mampostería confinada y el 30% de concreto reforzado.

La distribución de las probabilidades de cada curva de vulnerabilidad se explica con el siguiente diagrama de árbol (Figura 39) y la tabla 12:

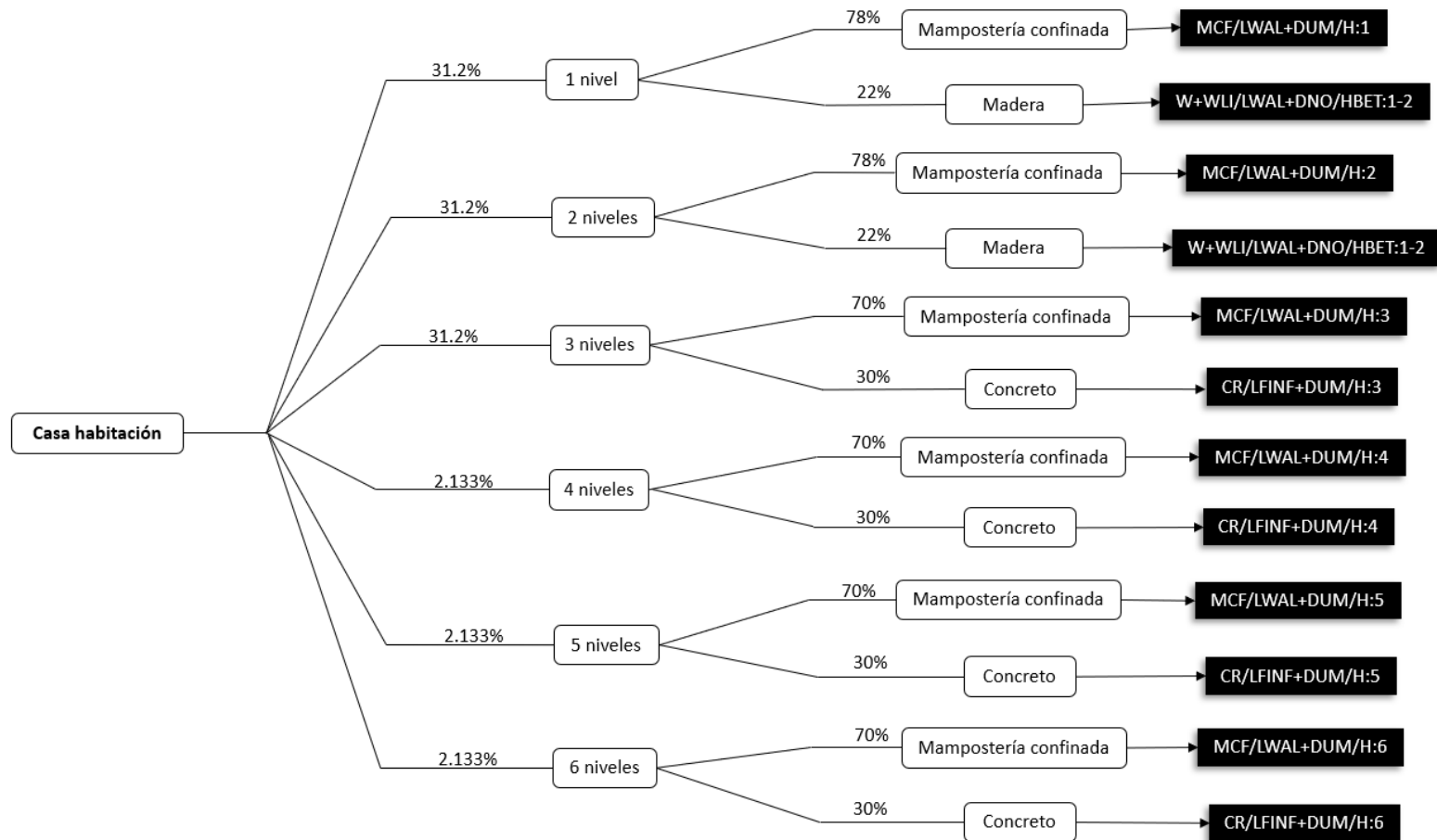


Figura 39. Diagrama de árbol de la distribución de probabilidades para casa habitación.

Tabla 12. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.

Taxonomía	Probabilidad
MCF/LWAL+DUM/H:1	0.24336
MCF/LWAL+DUM/H:2	0.24336
MCF/LWAL+DUM/H:3	0.2184
MCF/LWAL+DUM/H:4	0.01493333
MCF/LWAL+DUM/H:5	0.01493333
MCF/LWAL+DUM/H:6	0.01493333
CR/LFINF+DUM/H:3	0.0936
CR/LFINF+DUM/H:4	0.0064
CR/LFINF+DUM/H:5	0.0064
CR/LFINF+DUM/H:6	0.0064
W+WLI/LWAL+DNO/HBET:1-2	0.13728
Total	1

2.4.4 Curvas de vulnerabilidad para industria

Un total de 3 funciones de vulnerabilidad se utilizaron para caracterizar las diferentes tipologías de industrias predominantes (Tabla 13).

Tabla 13. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para industria

Taxonomía	Descripción
CR/LFINF+DUM/H:1	Concreto reforzado, colado en sitio, medianamente dúctil, un nivel
MCF/LWAL+DUM/H:1	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, medianamente dúctil, un nivel
S+SR/LFINF+DUM/H:1	Acero, muros entre marcos, medianamente dúctil, 1 nivel

2.4.5 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para industria

Las industrias se consideraron todas de un nivel donde, el 50% se consideró de concreto, el 30% de mampostería confinada y el 20% de acero.

Tabla 14. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.

Taxonomía	Probabilidad
CR/LFINF+DUM/H:1	0.5
MCF/LWAL+DUM/H:1	0.3
S+SR/LFINF+DUM/H:1	0.2
Total	1

2.4.6 Curvas de vulnerabilidad para comercio

Para el comercio, se utilizaron 7 funciones de vulnerabilidad con el objeto de caracterizar las estructuras (Tabla 15).

Tabla 15. Taxonomía de curvas de vulnerabilidad para comercio

Taxonomía	Descripción
CR/LFM+DUH/H:1	Concreto reforzado, resistencia lateral a base de marcos, altamente dúctil, un nivel
CR/LFINF+DUH/H:2	Concreto reforzado, colado en sitio, altamente dúctil, dos niveles
CR/LFINF+DUH/H:3	Concreto reforzado, colado en sitio, altamente dúctil, tres niveles
MCF/LWAL+DUH/H:1	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, altamente dúctil, un nivel
MCF/LWAL+DUH/H:2	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, altamente dúctil, dos niveles
MCF/LWAL+DUH/H:3	Mampostería confinada, resistencia lateral a base de muros, altamente dúctil, tres niveles
S+SR/LFM/DUH/H:1	Acero, resistencia lateral a base de marcos, altamente dúctil, 1 nivel

2.4.7 Consideraciones de las curvas de vulnerabilidad para comercio

Dentro de las edificaciones comerciales se hicieron las siguientes consideraciones:

1. El número de niveles de los comercios fue posible determinarlas al momento de explorar los AGEBS, por lo que no se necesitó hacer inferencias al respecto.
2. De los comercios de un nivel, el 25% se considera de concreto, el 40% de mampostería confinada y el 35% de acero. Los comercios de 2 y 3 niveles se consideran que el 40% de concreto y el 60% de mampostería confinada.

La distribución de las probabilidades de cada curva de vulnerabilidad se explica con el siguiente diagrama de árbol (Figura 40) y tabla 16:

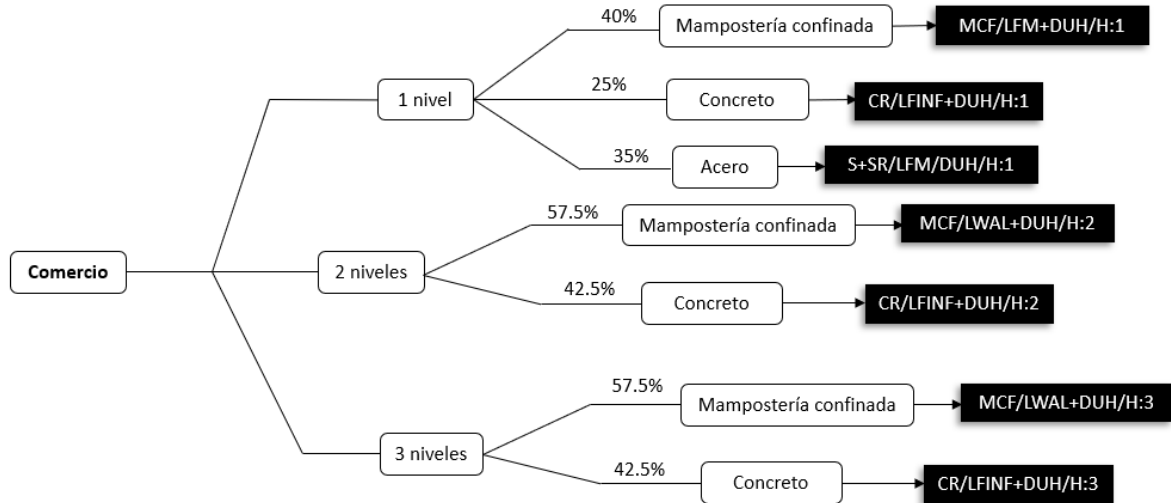


Figura 40. Diagrama de árbol de la distribución de probabilidades para comercios.

Tabla 16. Probabilidades totales asignadas por curva de vulnerabilidad.

Taxonomía	Probabilidad
CR/LFM+DUH/H:1	0.25
CR/LFINF+DUH/H:2	0.425
CR/LFINF+DUH/H:3	0.425
MCF/LWAL+DUH/H:1	0.4
MCF/LWAL+DUH/H:2	0.575
MCF/LWAL+DUH/H:3	0.575
S+SR/LFM/DUH/H:1	0.35

2.4.8 Vulnerabilidad humana

Para la creación de las curvas de fatalidad, GEM deriva las funciones de vulnerabilidad estructurales utilizando la ecuación 8, como se explica en “ Guidelines for component based analytical vulnerability assessment of buildings and nonstructural elements” (Porter *et al.*, 2015). Para el riesgo de pérdidas humanas, la función de vulnerabilidad media de ocupantes está definida como el porcentaje de muertes esperadas. Las pérdidas humanas se determinan en función de los edificios colapsados.

Ec. 8 Porcentaje de fatalidad

$$y(x) = Pc(x) \frac{(fL + fH)}{2}$$

Donde:

fL=Porcentaje mínimo de fatalidades.

fH= Porcentaje máximo de fatalidades.

y(x)=Valor esperado de porcentaje de fatalidades por una medida de intensidad x.

Pc(x)=Probabilidad de colapso (Edificios colapsados/edificios totales).

La metodología CAPRA en el apartado de vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura (Capra, 2005), también emplea una aproximación que toma en cuenta el número de heridos y muertos debido a colapso parcial o total de la estructura, basándose en factores de calificación que dependen del daño esperado de acuerdo a la tipología estructural de la edificación. Igualmente, las funciones de vulnerabilidad humanas se determinan en función del número esperado de muertes, las muertes en términos de porcentajes respecto al nivel de ocupación de la edificación en la figura 41 se presenta una función de vulnerabilidad humana de CAPRA en términos del valor esperado de víctimas en porcentaje con respecto a la ocupación y su varianza correspondiente.

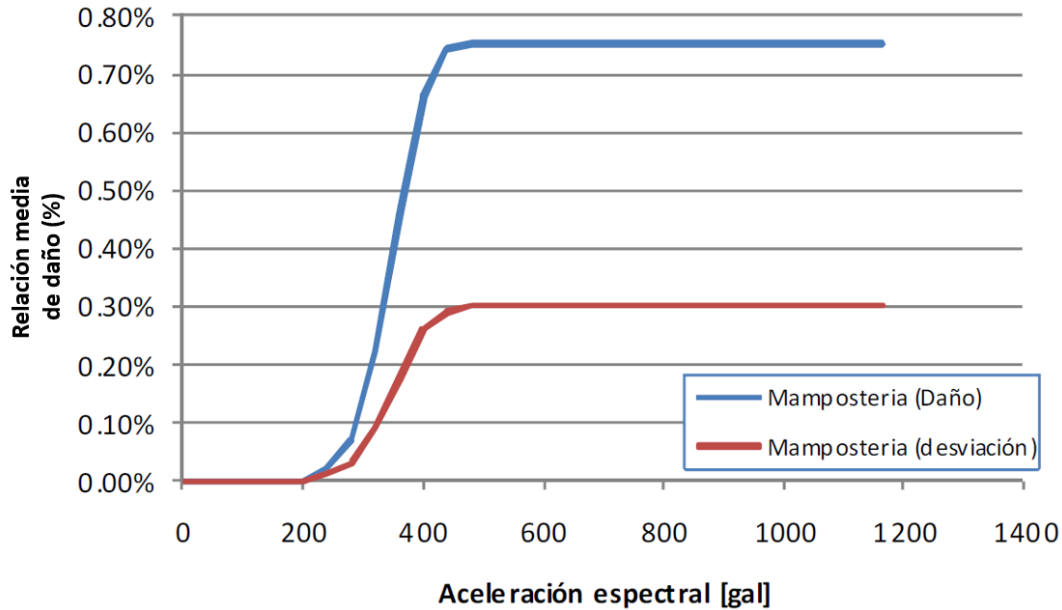


Figura 41. Función de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería (Capra, 2005).

La metodología de cálculo para el número de víctimas se muestra en la ecuación 9.

Ec. 9 Número de víctimas

$$NVi = Ocupantes\ i \times Atrapados\ (\%) \times Fatalidad\ (\%) \times FCj$$

Donde:

NVi = Número de víctimas para el edificio i .

Ocupantes= Número total de personas que están presentes en el edificio i a la hora que ocurre el sismo j . este dato se calcula para cada escenario con base en el área construida de la edificación y la densidad promedio de habitantes por metros cuadrado de construcción para cada región.

Atrapados= Porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapadas con vida debajo de los escombros de la edificación, este factor depende del tipo estructural. Se proponen algunos valores representativos para algunos tipos estructurales característicos.

Fatalidad= Relación porcentual del número estimado de atrapados que eventualmente mueren por el colapso o los daños en la edificación. Se proponen algunos valores representativos para algunos tipos estructurales característicos.

FC_j= Factor de Colapso, de cero a uno, obtenido a partir del cálculo del riesgo sísmico dado por un terremoto *j*; es una estimación de la probabilidad de colapso de la estructura a partir del daño de ésta. Para estimar la probabilidad de colapso de cualquier estructura se propone la siguiente función:

Ec. 10 Factor de colapso

$$FC = 1 - 0.5^{\theta}$$

Donde:

Ec. 11 Cálculo de θ

$$\theta = \left(\frac{\text{Pérdida del edificio (\%)}}{30} \right)^{3.5}$$

En la figura 42 se muestra el cálculo de FC en función de la pérdida obtenida por el estudio de riesgo sísmico.

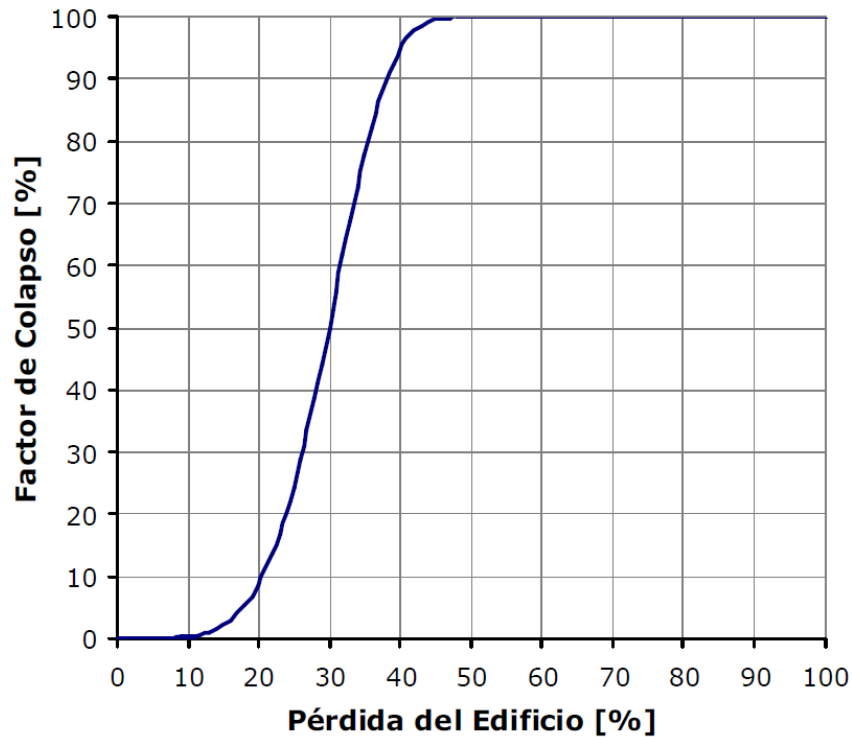


Figura 42. Cálculo del factor de colapso (FC) dada la pérdida del estudio de riesgo sísmico (Capra, 2005).

CAPÍTULO 3. Resultados

3.1 ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO

A continuación, se muestran los resultados del escenario de riesgo sísmico de la ciudad de Tijuana, cuyo escenario de peligro fue provisto por la USGS para un probable sismo cuyo origen proviene de la Falla Rose Canyon, con una posible magnitud $M=6.9$ a una profundidad de 7.7 km.

El modelo de exposición está conformado con una base de datos de 503, 698 casas habitación, 765 industrias y 1, 177 comercios, sumando un total de 505, 640 edificaciones. El personal ocupante total considerado fue de 1, 617, 559.

Las curvas de vulnerabilidad pertenecen a las curvas desarrolladas para países Sudamericanos por el GEM. Para casa habitación se utilizaron once funciones de vulnerabilidad de las distintas tipologías estructurales predominantes de Tijuana. Los materiales predominantes en casa habitación son la mampostería confinada, concreto reforzado y madera; con un rango de niveles que varía de 1-6 predominantemente. En la industria se utilizaron tres funciones de vulnerabilidad; que representan los materiales de concreto, acero y mampostería confinada presentes en sus construcciones de un nivel. La tipología del comercio se definió con siete funciones de vulnerabilidad para materiales de mampostería, concreto armado y acero con un rango de niveles de 1-3.

3.1.1 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-casa habitación

En la figura 43 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de pérdidas económicas estructurales totales por AGEB de casa habitación en dólar estadounidense. En las figuras 44, 45 y 46 se presentan las zonas de la ciudad de Tijuana donde se exponen las mayores pérdidas estructurales. En la figura 47 se indica la distribución de porcentaje de pérdidas económicas en casa habitación por manzanas, donde las mayores pérdidas estructurales sólo se presentan en el 1% de las manzanas de Tijuana.

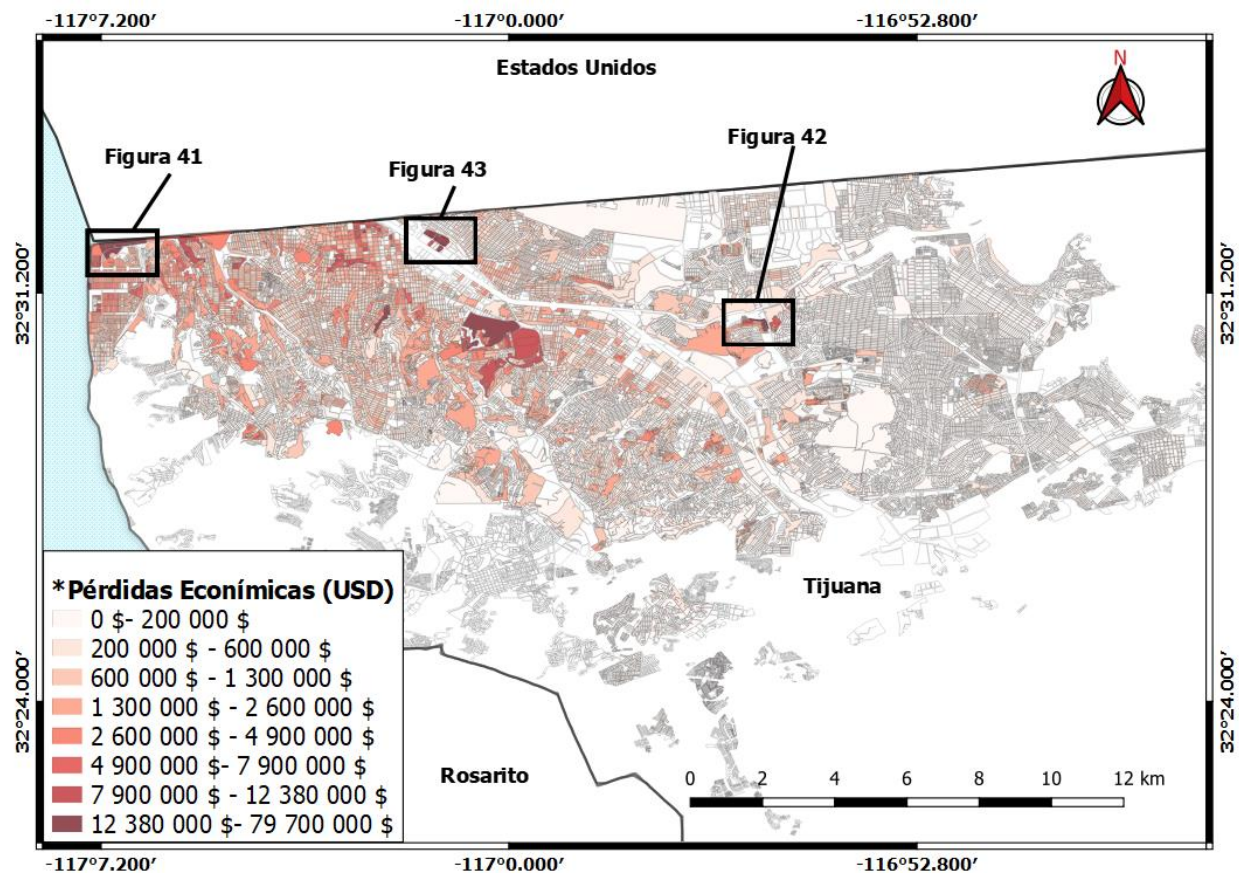


Figura 43. Escenario de riesgo sísmico residencial, pérdidas económicas.

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al rango de pérdidas totales máximas que se pueden presentar por AGEB.

3.1.2 Zonas residenciales de mayor riesgo

Paseo Playas de Tijuana (Figura 44). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$33, 111, 066 USD.



Figura 44. Escenario de riesgo sísmico Paseo Playas de Tijuana.

El Lago, Av. Cetys Universidad (Figura 45). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$14, 559, 789 USD.

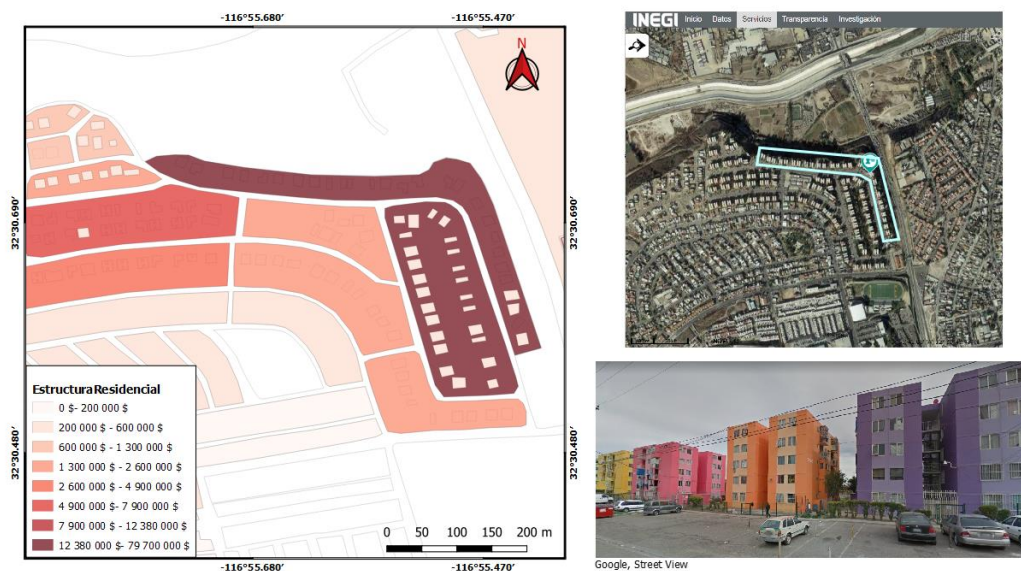


Figura 45. Escenario de riesgo sísmico El Lago.

Zona Río, edificaciones de interés social (Figura 46). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$49, 859, 539 USD.



Figura 46. Escenario de riesgo sísmico Zona Río

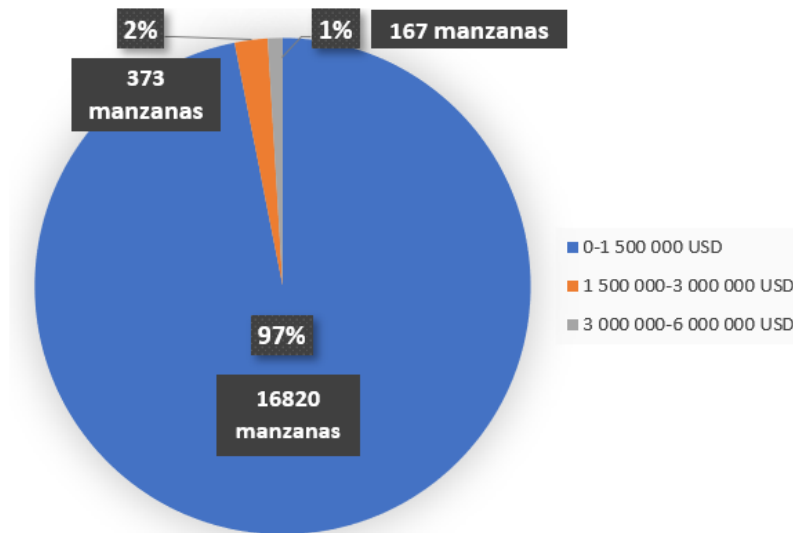


Figura 47. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en casa habitación

Las pérdidas totales esperadas son de **\$4, 781, 843, 582 USD**

En la tabla 17 se muestra la distribución de los rangos de pérdidas económicas y su respectiva pérdida total. La mayoría de las manzanas de Tijuana presentan pérdidas entre 0 a 1 500 000 dólares, representando el grueso de las pérdidas estructurales.

Tabla 17. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en casa habitación.

Pérdidas económicas	Total general
0-1500000	3006597732
1500000-3000000	758064220
3000000-4500000	319252150
4500000-6000000	152837810
6000000-7500000	80572230
7500000-9000000	92109680
9000000-10500000	124232560
10500000-12000000	88634800
12000000-13500000	12385200
13500000-15000000	13986900
16500000-18000000	16663700
18000000-19500000	36847300
79500000-81000000	79659300
Total general	4781843582

3.1.3 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-casa habitación

En la figura 48 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de afectaciones a los ocupantes por manzana. La tabla 18 provee más información para la interpretación de los datos mostrados en la figura 48.

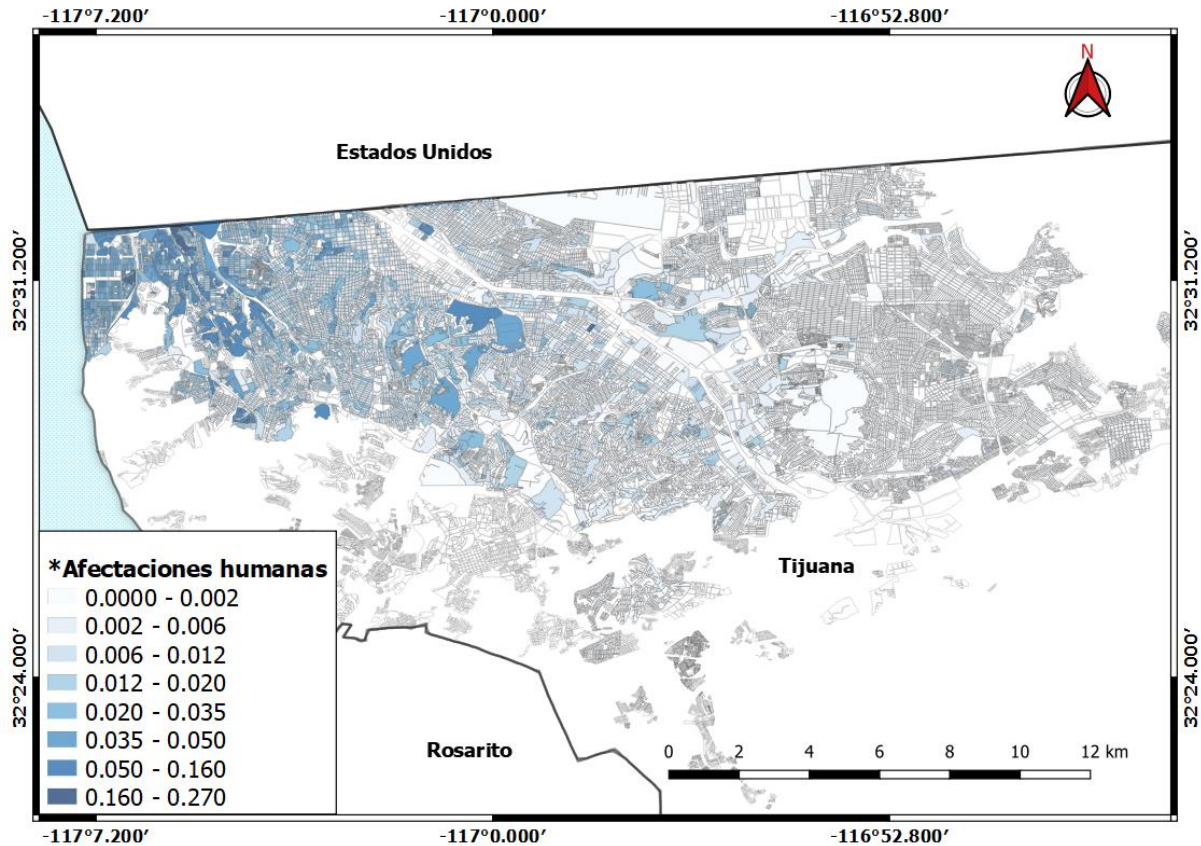


Figura 48. Escenario de riesgo sísmico residencial, afectaciones humanas.

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al número de personas afectadas por manzana.

Tabla 18. Afectaciones humanas en casa habitación

No. personas afectadas/manzana	Manzanas afectadas	Total afectados
0-0.05	17253	51.13581048
0.05-0.1	89	5.9761105
0.1-0.15	12	1.461206
0.15-0.2	3	0.483437
0.2-0.25	1	0.219535
0.25-0.3	2	0.531411
Total general	17360	59.80750998

Las personas afectadas esperadas son **60 personas** en casa habitación.

3.1.4 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-industria

En la figura 49 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de pérdidas económicas estructurales totales por AGEB de industrias en dólar estadounidense. En las figuras 50 y 51 se exponen las zonas de la ciudad de Tijuana donde se muestran las mayores pérdidas estructurales. En la figura 52 se indica la distribución de porcentaje de pérdidas económicas de las industrias, en el que el 97% de las industrias sufren pérdidas menores.

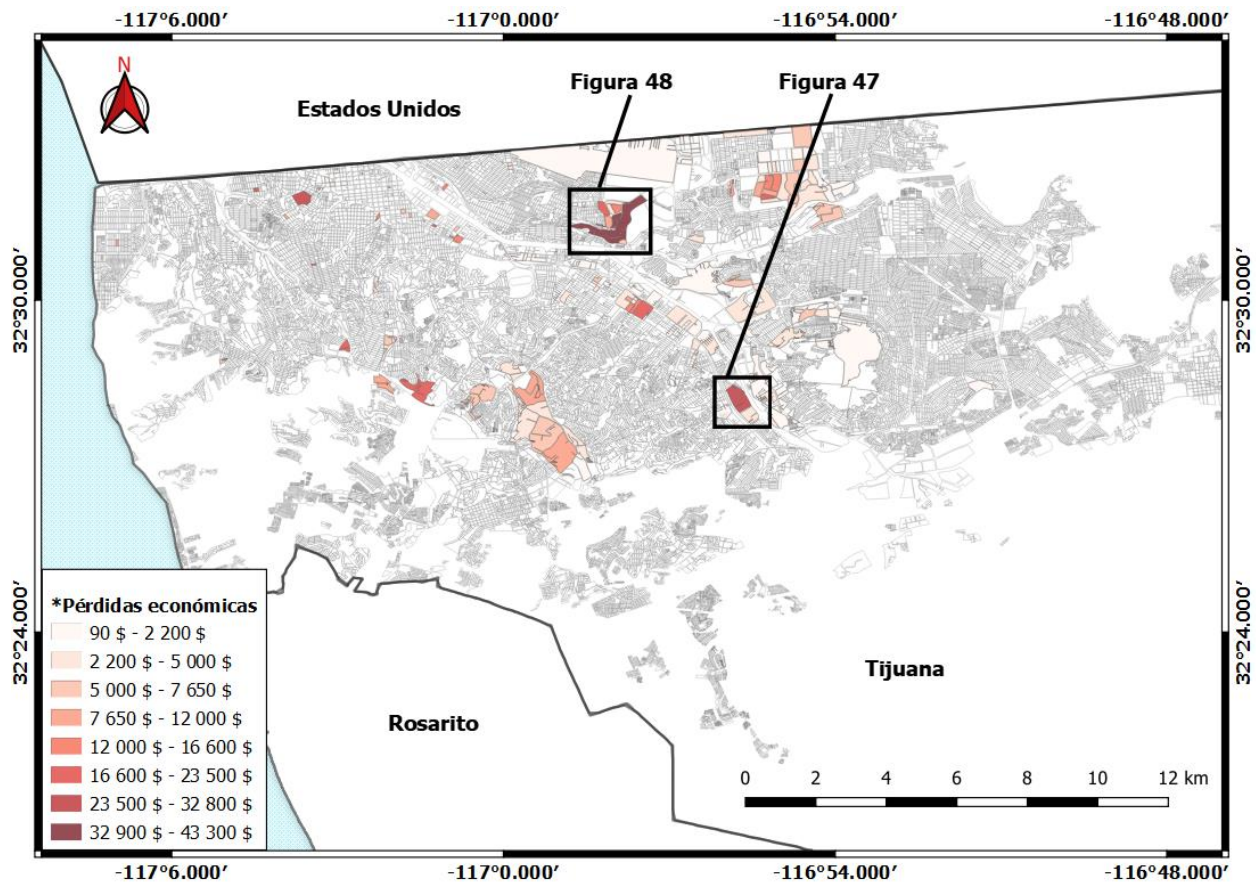


Figura 49. Escenario de riesgo sísmico industrial, pérdidas económicas

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al rango de pérdidas totales máximas que se pueden presentar por AGEB.

3.1.5 Zonas industriales de mayor riesgo

Parque Industrial Los Pinos (Figura 50). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$31, 891 USD.

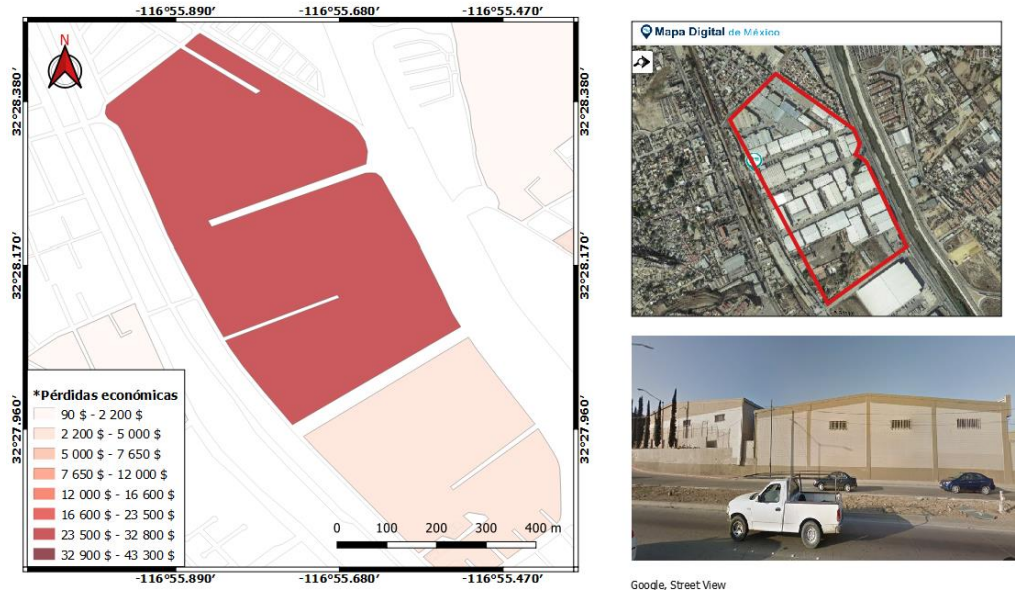


Figura 50. Escenario de riesgo sísmico Parque Industrial.

Boulevard de las Américas Norte (Figura 51). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$43, 278 USD.



Figura 51. Escenario de riesgo Boulevard de las Américas Norte.

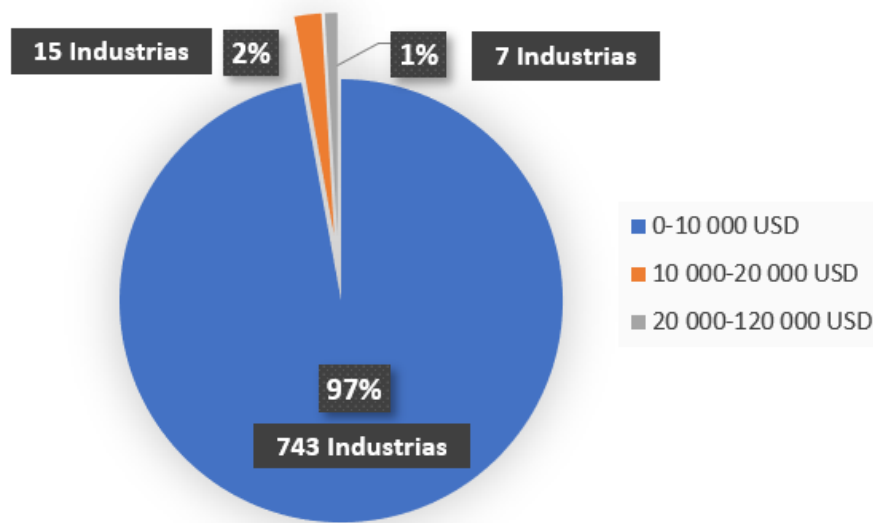


Figura 52. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en Industria

Las pérdidas totales esperadas son de **\$2, 374, 218 USD**

La tabla 19 se muestra la distribución de los rangos de pérdidas económicas y su respectiva pérdida total. La mayoría de las industrias de Tijuana presentan pérdidas entre 31 a 10 000 dólares representando el grueso de las pérdidas estructurales.

Tabla 19. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en Industria.

Pérdidas económicas	Total General
31.6099-10031.6099	1727466.6
10031.6099-20031.6099	193444
20031.6099-30031.6099	70083.9
40031.6099-50031.6099	41742.6
110031.6099-120031.6099	341481
Total General	2374218.1

3.1.6 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-industria

En la figura 53 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de afectaciones a los ocupantes por industria. La tabla 20 provee más información para la interpretación de los datos mostrados en la figura 53.

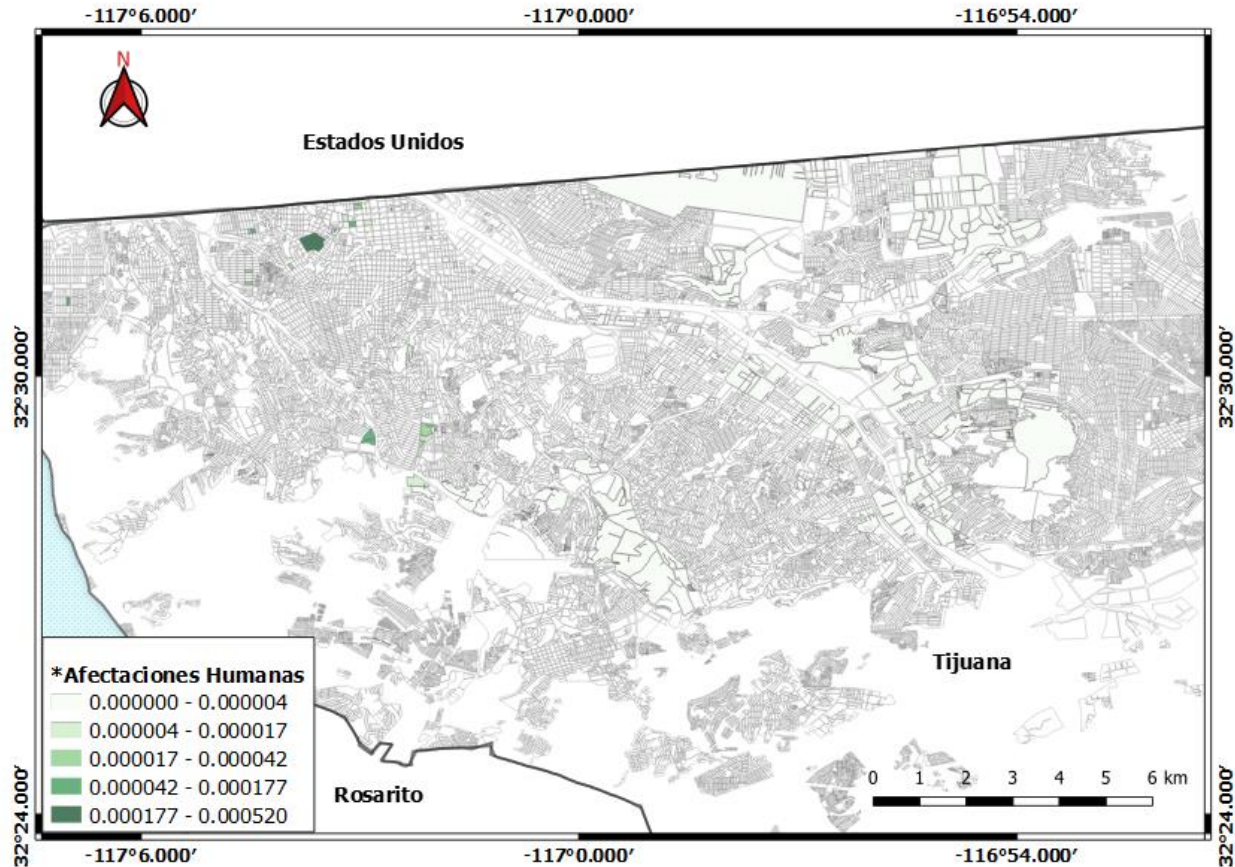


Figura 53. Escenario de riesgo sísmico industrial, afectaciones humanas.

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al número de personas afectadas por Industria.

Tabla 20. Afectaciones humanas en industria.

No. personas afectadas/industria	Industrias afectadas	Total afectados
0-0.0001	758	0.001263138
0.0001-0.0002	1	0.000176603
0.0002-0.0003	5	0.00106482
0.0003-0.0004	1	0.000353587
Total general	765	0.002858148

No se esperan personas afectadas.

3.1.7 Escenario de riesgo sísmico: Pérdidas económicas-comercio

En la figura 54 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de pérdidas económicas estructurales totales por AGEB de comercios en dólar estadounidense. En las figuras 55 y 56 se muestran las zonas de la ciudad de Tijuana donde se muestran las mayores pérdidas estructurales. En la figura 57 se indica la distribución de porcentaje de pérdidas económicas en comercios, donde las mayores pérdidas estructurales sólo se presentan en el 1.87% de los comercios en Tijuana.

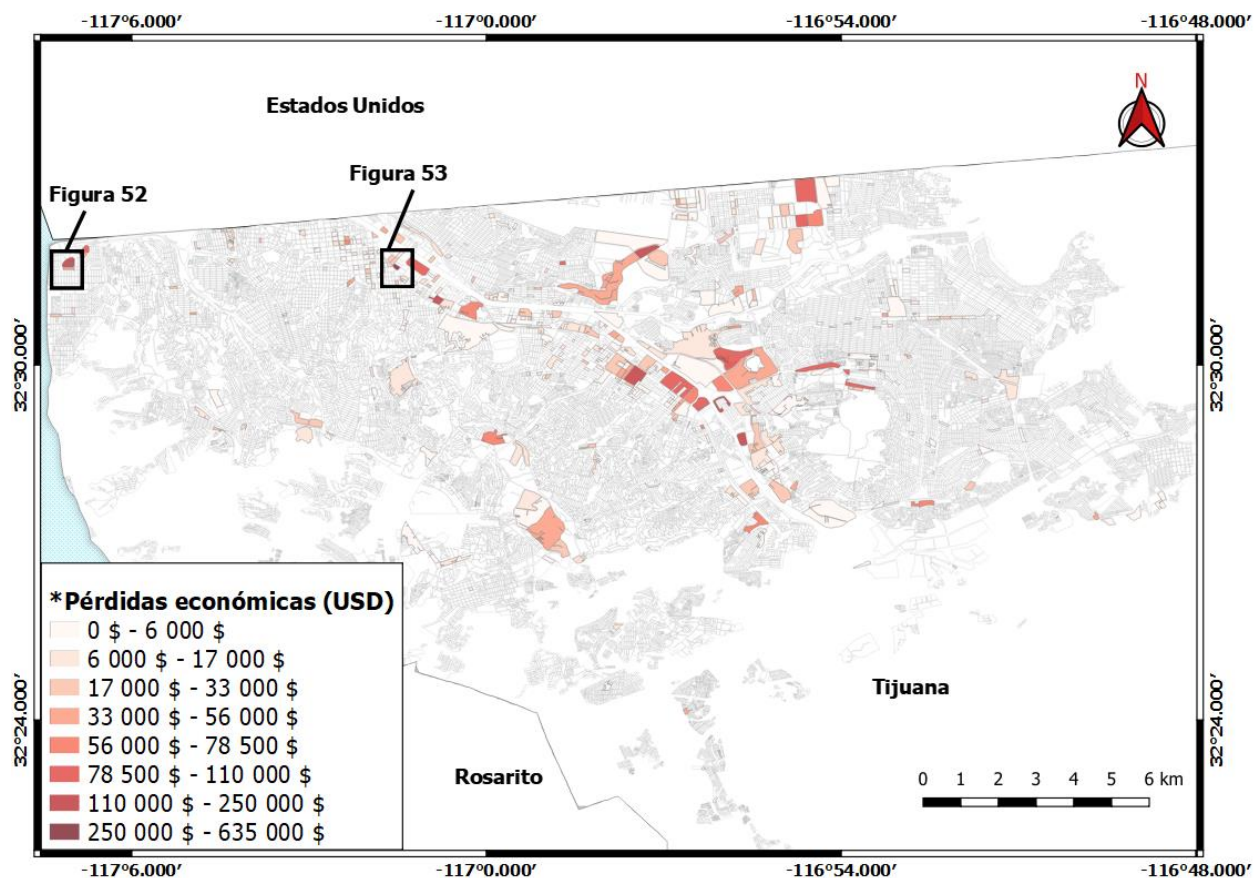


Figura 54. Escenario de riesgo sísmico comercial, pérdidas económicas.

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al rango de pérdidas totales máximas que se pueden presentar por AGEB.

3.1.8 Zonas comerciales de mayor riesgo

Jardines Playas de Tijuana (Figura 55). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$250, 000 USD

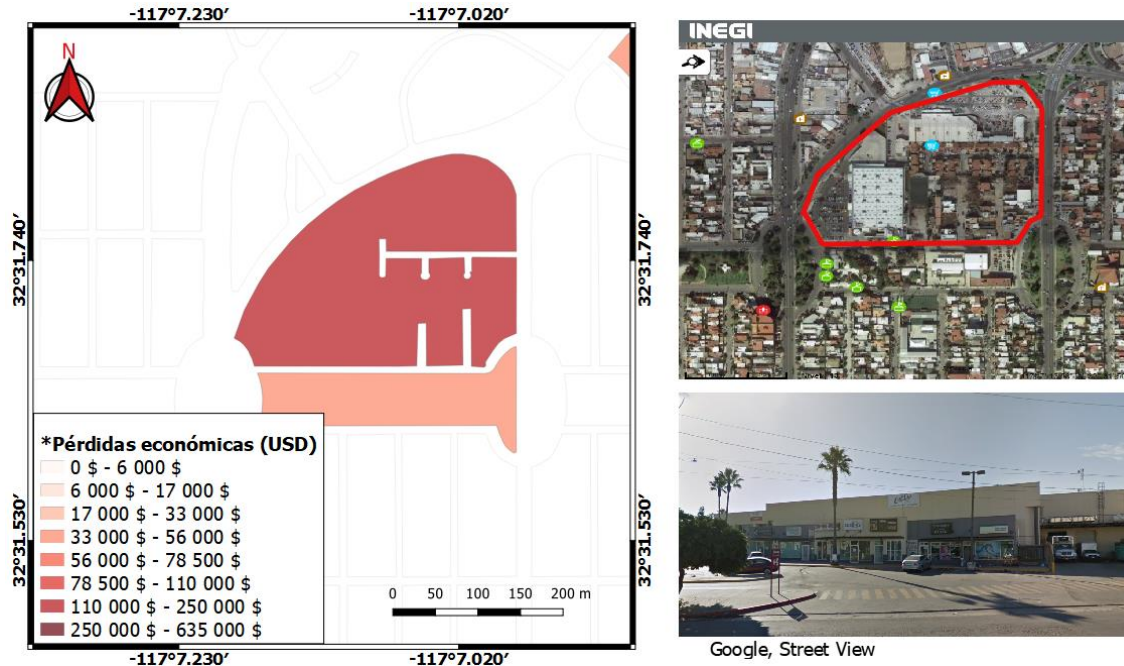


Figura 55. Escenario de riesgo Jardines Playas de Tijuana.

Boulevard Independencia (Figura 56). La pérdida máxima probable total en el AGEB mostrado es de \$635, 000 USD.

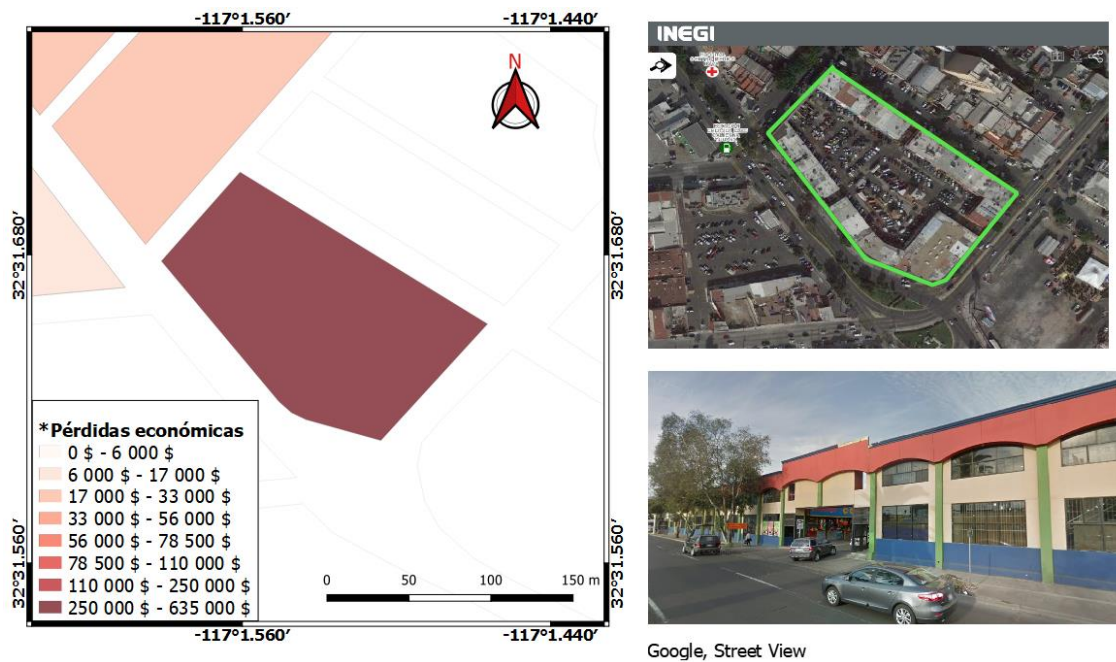


Figura 56. Escenario de riesgo Boulevard Independencia.

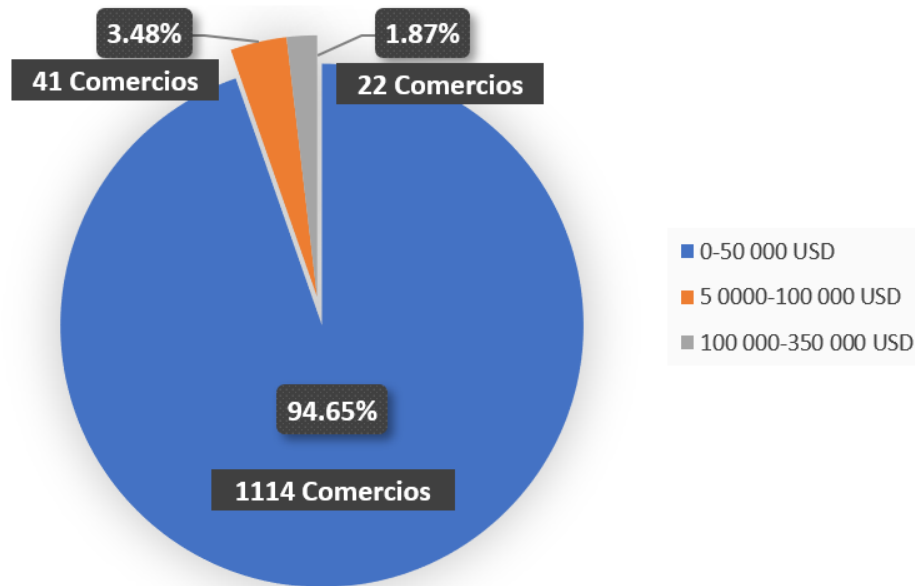


Figura 57. Distribución de porcentaje de pérdidas económicas en comercio

Las pérdidas totales esperadas son de **\$14, 533, 768 USD**

La tabla 21 se muestra la distribución de los rangos de pérdidas económicas y su respectiva pérdida total. La mayoría de los comercios de Tijuana presentan pérdidas entre 0 a 50 000 dólares representando el grueso de las pérdidas estructurales.

Tabla 21. Pérdidas económicas por riesgo sísmico en Comercio.

Pérdidas económicas	Total General
0-50000	7274029.445
50000-100000	3088710.7
100000-150000	864574
150000-200000	1728344
200000-250000	693834
250000-300000	269103
600000-350000	615173
Total general	14533768.15

3.1.9 Escenario de riesgo sísmico: Afectaciones a la población-comercios

En la figura 58 se muestra un escenario de riesgo sísmico donde se representan los rangos de afectaciones a los ocupantes por industria. La tabla 23 provee más información para la interpretación de los datos mostrados en la figura 58.

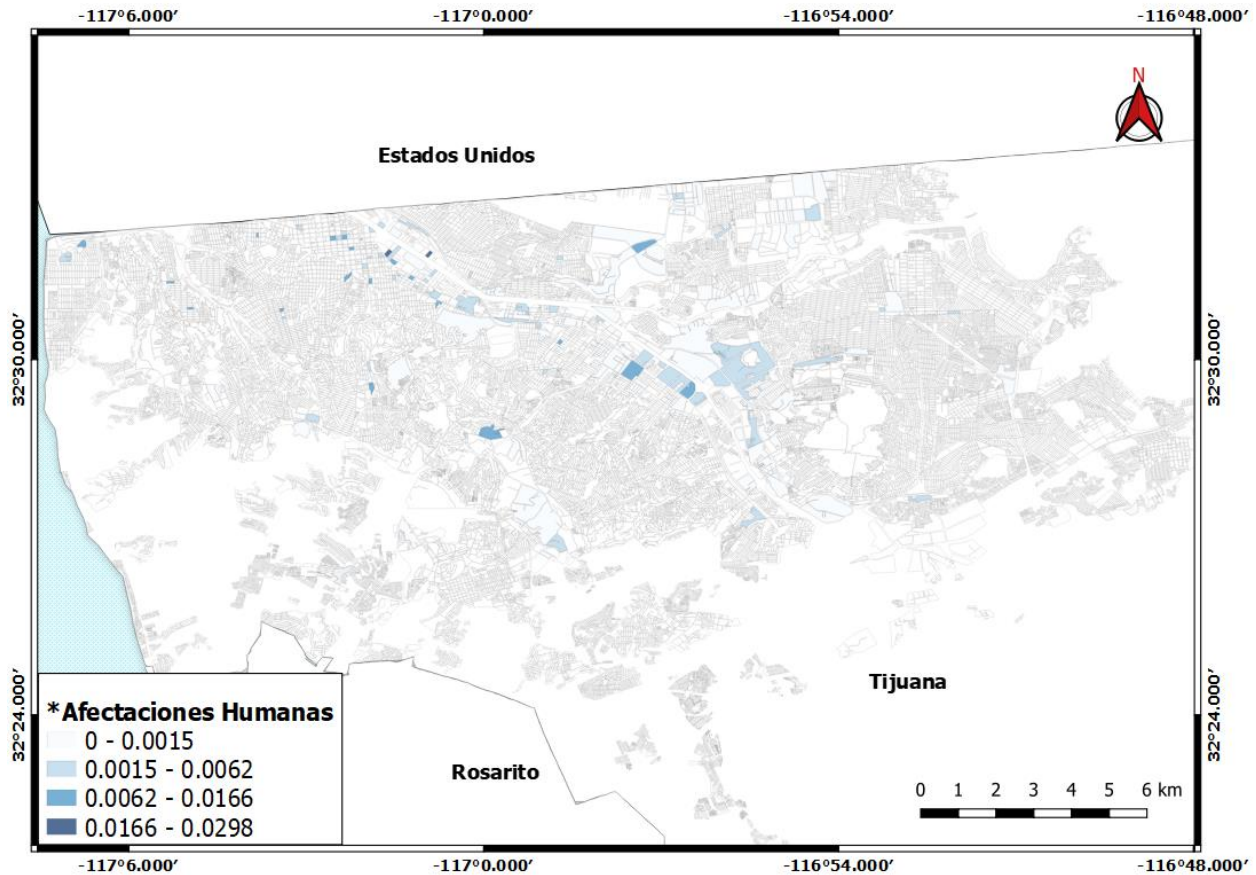


Figura 58. Escenario de riesgo sísmico comercial, afectaciones humanas.

*Los resultados en el cuadro de simbología se refieren al número de personas afectadas en comercios.

Tabla 22. Afectaciones humanas en comercio.

No. personas afectadas/comercio	Comercios afectados	Total afectados
0-0.005	1120	0.445319783
0.005-0.01	38	0.2654974
0.01-0.015	10	0.1316196
0.015-0.02	5	0.0874576
0.02-0.030	4	0.0917496
Total general	1177	1.021643983

No se esperan personas afectadas en edificaciones comerciales.

CAPÍTULO 4. Discusiones, conclusiones y recomendaciones

4.1 Discusión de resultados

Como ya se mencionó en apartados anteriores, ya existen estudios de riesgo sísmico en la región, cada uno apoyado en diferentes metodologías y con diferentes elementos de análisis. En la tabla 23 se muestran con fines de comparación, los estudios de riesgo sísmicos realizados en Tijuana, donde finalmente se encuentran los resultados generales de esta investigación.

Tabla 23. Estudios de riesgo sísmico realizados en Tijuana y resultados generales.

Estudio	Metodología	Fuente(s) sísmica(s)	Elementos Expuestos	Pérdidas económicas	Área afectada	Daño estructural	Afectaciones Humanas
Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California, México (González, 2016).	CAPRA	Fallas: Coronado Bank, Rose Canyon, Laguna Salada, Imperial, San Jacinto: Coyote Creek + Borrego + Superstition Mountain, San Jacinto: San Bernardino + SJ Valley + Anza + Clark	Viviendas de 1 y 2 niveles de mampostería no confinada y cubierta de concreto aligerada.	2 750 millones M.N.	-	-	1 500 personas
Evaluación del riesgo sísmico en el área urbana de Tijuana, baja california, mediante el uso de una Plataforma de sistema de información geográfica (Garatachia, 2013).	CENAPRED	Fallas: La Nacion y Silver Strand	Viviendas, industrias, comercios, edificios públicos, líneas de vida.	-	42.14 km ²	-	252 227 personas
Herramientas de Evaluación de Riesgo para Diagnóstico de Áreas Urbanas contra Desastres Sísmicos. Caso Tijuana (RADIUS, 1999).	RADIUS	Falla La Nacion	Viviendas, industrias, comercios, edificios públicos, líneas de vida, sistemas de transporte e infraestructura civil.	-	-	Mapas de niveles de daño	185 000 personas
Escenario de riesgo sísmico para la ciudad de Tijuana, Baja California.	OpenQuake	Falla Rose Canyon	Viviendas, industrias y comercios	4 798 millones USD	-	-	60 personas

Comparando los resultados con el estudio realizado por (González, 2016), las pérdidas económicas en este estudio contrastan significativamente, a simple vista, debido a la cantidad de edificaciones consideradas; contrariamente, el número de personas afectadas es varias veces mayor, lo que podría deberse principalmente a que los materiales de construcción considerados por González es mampostería no confinada, que se traduce a estructuras con baja ductilidad y pobre respuesta sísmica; mientras que las edificaciones residenciales y comerciales en este estudio se consideraron en su mayoría estructuras de mediana ductilidad, como ejemplo, las estructuras de mampostería fueron, en su mayoría, observadas como mampostería confinada.

Respecto al análisis realizado por (Garatachia, 2013) las afectaciones humanas son también mayores a las mostradas en este trabajo y el de (González, 2016) que es natural, dado el alcance de los elementos expuestos cubiertos.

El mayor resultado de personas afectadas lo arroja el estudio RADIUS, ellos también tomaron en cuenta el número de personas que se quedarían sin hogar, no solo las afectaciones físicas.

4.2 Conclusión general

Este estudio es un ejercicio que complementa los estudios previos que se han realizado en Tijuana. Se necesita de la continua realización de análisis de riesgo sísmico en el futuro, para el mejoramiento de resultados y por la dinámica de crecimiento continuo de la ciudad. Finalmente, los análisis de riesgo son una herramienta relevante para las instituciones de desarrollo urbano a nivel nacional, estatal, municipal y para las organizaciones encargadas de la prevención de desastres ya que pueden mejorar sus estrategias de ubicación de albergues, rutas de evacuación y organización en la distribución de esfuerzos en el área de rescate de las zonas más vulnerables o con mayores repercusiones socioeconómicas a nivel general.

4.3 Recomendaciones para futuras investigaciones:

1. Dentro del análisis de peligro sísmico, considerar los efectos de deslizamiento, licuación y efectos de sitio, ya que son particularmente importantes en la ciudad de Tijuana.
2. Mejorar la base de datos de los elementos expuestos respecto a los materiales y número de niveles de las edificaciones. Esta información es recabada periódicamente por el INEGI pero no está disponible públicamente, lograr un acuerdo con dicha institución para el empleo posterior de la información recabada sería una mejora importante para el análisis, lo cual, sin duda, se reflejaría en un estudio más completo.
3. Identificar las edificaciones realizadas bajo los criterios de códigos de diseño, así como las construcciones informales.
4. Realización de curvas de fragilidad/vulnerabilidad de las principales tipologías estructurales de Tijuana, y comparación con las curvas de vulnerabilidad utilizadas en Sudamérica.

REFERENCIAS

1. Abo-El-Ezz, A. *et al.* (2017) ‘Vulnerability assessment of seismic induced out-of-plane failure of unreinforced masonry wall buildings’, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(12), pp. 1045–1055. doi: 10.1139/cjce-2016-0555.
2. Acosta-Chang *et al.* (2009) ‘Microzonación sísmica en la zona urbana de Tijuana, B.C’, pp. 61–64.
3. Anglade, E. *et al.* (2020) ‘Seismic damage scenarios for the Historic City Center of Leiria, Portugal: Analysis of the impact of different seismic retrofitting strategies on emergency planning’, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier Ltd, 44, p. 101432. doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101432.
4. ATC-13 (1985) ‘Earthquake Damage Evaluation Data for California’, *Applied technology council, Redwood city*. Available at: <https://www.atcouncil.org/pdfs/atc13.pdf>.
5. Bard, P. (2016) ‘The seismic response of sediment-filled valleys . Part 2 . The case of incident P and SV waves’, (October 1980).
6. Bindi, D. *et al.* (2011) ‘Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database’, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), pp. 1899–1920. doi: 10.1007/s10518-011-9313-z.
7. Bonett, R. L. (2003) *Vulnerabilidad Y Riesgo Sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universidad Politécnica De Cataluña. Available at: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6230>.
8. Calvi, G. M. *et al.* (2006) ‘Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years’, *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), pp. 75–104.
9. Capra (2005) ‘Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura’, *Informe Técnico ERN-CAPRA*, p. 48.
10. Cardona, O., Ordaz, M. and Reinoso, E. (2012) ‘CAPRA–comprehensive approach to probabilistic risk assessment: international initiative for risk management effectiveness’, *Proceedings of the 15th World Conference on earthquake engineering*, 1, p. 10. Available at: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf.
11. Castillo, A., Pujades, L. and Lopez Almansa, F. (2008) ‘Seismic Risk Scenarios for Mérida, Venezuela’, *World Conference on Earthquake Engineering*, (January 2008), pp. 1–8. Available at: <http://www.14wcee.org/Proceedings/files/07-0193.pdf#page=1>.
12. Catchings, R. D. *et al.* (2002) ‘High-resolution seismic velocities and shallow structure of the San Andreas fault zone at Middle Mountain, Parkfield, California’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), pp. 2493–2503. doi: 10.1785/0120010263.
13. CIMNE *et al.* (2013) *Global Assesment Report on Disaster Risk-GAR 2013*. Geneva, Switzerland.
14. Contreras, J., Ramírez, N. and Negrete, R. (2012) ‘Modelos tectonoestratigráficos de las cuencas de Tiburón y Wagner en el norte del Golfo de California’, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), pp. 140–157.
15. Crowley, H. and Silva, V. (2013) *Openquake engine underlying risk science v 1.0.0*. GEM Foundation, Pavia, Italy.
16. Cruz-Castillo, M. and Mexicano, I. (2002) ‘Catálogo De Las Fallas Regionales Activas En El Norte De Baja California , México’, *Geos, Unión Geofísica Mexicana, A. C.*, pp. 37–42.

17. D'Ayala, D. *et al.* (2015) 'Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Vulnerability Global Component Project.', *GEM Technical Report 2015-08 v1.0.0*, 08, p. 162. doi: 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12.
18. DM65 (2017) 'Sisma Bonus-Linee guida per la cassificazione del rischio sismico delle costruzioni e relaviti allegati.', in *Modifiche all'articolo 3 del Decreto Ministeriale n° 58 del 28/02/2017. Ministero delle Infrastrutture e dei Transporti, Roma*.
19. Dolce, M. *et al.* (2003) 'Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) Including Site Effects', *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 115–140. doi: 10.1023/A.
20. EERI (2020) *San Diego Earthquake Planning Scenario*. Oakland, CA. Available at: <https://sandiego.eeri.org/>.
21. Family, I. C. (2006) *Internationa Building Code*.
22. Federal Emergency Management Agency (2015) 'Hazus–MH 2.1: Technical Manual', *National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency (NIBS and FEMA)*, p. 718. doi: <https://www.fema.gov/hazus-mh-user-technical-manuals>.
23. FEMA (2002) 'FEMA-155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation', *Federal Emergency Management Agency*, (January). doi: 10.4231/D3M90238V.
24. FEMA (2004) 'Using HAZUS-MH for Risk Assessment', (FEMA 433, August 2004), p. 226.
25. Garatachia, J. C. (2013) *Evaluación del Riesgo Sísmico en el área urbana de Tijuana, Baja California, mediante el uso de un a pataforma de sistema de información geográfica*. Universidad Autónoma del Estado de México.
26. Gastil, R. G., Phillips, R. P. and Allison, E. C. (1975) 'Reconnaissance Geology of the State of Baja California', in Gastil, R. G., Phillips, R. P., and Allison, E. C. (eds) *Reconnaissance Geology of the State of Baja California*. Geological Society of America, p. 0. doi: 10.1130/MEM140-p1.
27. GEM (2019) 'The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for engine version 3.3.2', p. 189. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.3.2.
28. Giardini, D. (1999) 'The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) - 1992/1999', *Annali di Geofisica*, pp. 957–974. doi: 10.4401/ag-3780.
29. González (2016) *Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California*.
30. Grant, L. B. and Rockwell, T. K. (2000) 'A Northward-propagating Earthquake Sequence in Coastal Southern California?', 73, pp. 461–469.
31. Grant, L. B. and Shearer, P. M. (2004) 'Activity of the Offshore Newport – Inglewood Rose Canyon Fault Zone , Coastal Southern California , from Relocated Microseismicity', 94(2), pp. 747–752.
32. Grigoratos, I. *et al.* (2016) 'Development of A Fragility and Exposure Model for Palestine - Application to the City of Nablus', *Procedia Engineering*, 161, pp. 2023–2029. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.797.
33. Hamburger, R. O. *et al.* (2012) 'FEMA P58: Next-generation building seismic performance assessment methodology', *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 10, p. 10.
34. IMPLAN (2010) 'Programa de desarrollo urbano del Centro de Población de Tijuana 2008-

2030’.

35. INEGI, I. N. de E. y G. (2015a) *Encuesta Intercensal INEGI 2015*. Available at: INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
36. INEGI, I. N. de E. y G. (2015b) *Indicadores de población*. Available at: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>.
37. INEGI, I. N. de E. y G. (2015c) *Mapa digital de México, Producción de café a nivel nacional*. doi: 10.1016/j.neuropharm.2014.03.021.
38. INEGI, I. N. de E. y G. (2017) *Anuario estadístico y geográfico de Baja California*. Available at: www.inegi.org.mx.
39. J. Anderson, T. Rockwell, D. A. (1989) ‘Past and Possible future Earthquakes of Significance to the San Diego region’, *Earthquake Spectra*, 5(No. 2), pp. 299–335.
40. Jaiswal, K. *et al.* (2012) ‘Use of expert judgment elicitation to estimate seismic vulnerability of selected building types’, 15 *Wcee*, p. 10pp. Available at: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_4542.pdf.
41. Jaramillo, N., Carreño, M. L. and Lantada, N. (2016) ‘Evaluation of social context integrated into the study of seismic risk for urban areas’, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier, 17, pp. 185–198. doi: 10.1016/j.ijdrr.2016.05.002.
42. Joyner, W. B. (2000) ‘Strong Motion from Surface Waves in Deep Sedimentary Basins’, (December), pp. 95–112.
43. Kawase, H. and Aki, K. (1989) ‘A study on the response of a soft basin for incident S , P , and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(October 1989), pp. 1361–1382.
44. Kennedy, P. and Peterson, G. L. (1975) *Geology of the San Diego Metropolitan Area, California*.
45. Kohiyama, M. *et al.* (2008) ‘Incentives and disincentives analysis for improving policy for seismic risk management of homeowners in Japan’, *Natural Hazards Review*, 9(4), pp. 170–178. doi: 10.1061/(ASCE)1527-6988(2008)9:4(170).
46. Kramer, S. L. and Mitchell, R. A. (2006) ‘Ground motion intensity measures for liquefaction hazard evaluation’, *Earthquake Spectra*, 22(2), pp. 413–438. doi: 10.1193/1.2194970.
47. Kyriazis Pitilakis, Maria Alexoudi, Sotiris Argyroudis, A. A. (2006) ‘Seismic risk scenarios for an efficient seismic risk management: the case of thessaloniki (greece)’, *Advances in Earthquake Engineering fot Urban reduction*, pp. 229–244.
48. Legg, M. R. (1985) ‘Geological structure and tectonics of the Inner Continental Borderland offshore northern Baja California, Mexico’, pp. xxii, 410 leaves. Available at: <file://catalog.hathitrust.org/Record/007233655>.
49. Legg, M. R. (1991) ‘Sea Beam evidence of recent tectonic activity in the California Continental Borderland. in: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias’, *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47*, pp. 179–196.
50. Lindvail, S. C. and Rockwell, T. K. (1995) ‘Holocene activity of the Rose Canyon fault zone in San Diego , California’, *Journal of Geophysical Research*, 100(No. B12), pp. 24, 121–24,132.
51. Martins, L. and Silva, V. (2018) ‘A global database of vulnerability models for seismic risk assessment’, *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, 4(June), pp. 1–10.

52. Mazumder, R. K. and Salman, A. M. (2019) 'Seismic damage assessment using RADIUS and GIS: A case study of Sylhet City, Bangladesh', *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier Ltd, 34, pp. 243–254. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.11.023.
53. MDOC-2015 (2015) 'Capítulo C1.3 Diseño por Sismo', *Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad*, p. 389.
54. Moreno-Murillo, J.-M. (1995) 'The 1985 Mexico earthquake'.
55. Paganini, M. et al. (2017) *The OpenQuake-engine Book: Hazard*. doi: 10.13117/-GEM.OPENQUAKE.TR2014.08.
56. Pavić, G. et al. (2019) 'Seismic Vulnerability Assessment of Historical Unreinforced Masonry Buildings in Osijek using Capacity Spectrum Method', *Acta Physica Polonica A*, 135(5), pp. 1138–1142. doi: 10.12693/APhysPolA.135.1138.
57. Perrone, D. et al. (2020) 'Assessing seismic risk in typical Italian school buildings: From in-situ survey to loss estimation', *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier Ltd, 44, p. 101448. doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101448.
58. Pierre Mouroux, Etienne Bertrand, Myriam Bour, Benoit Le Brun, Simon Depinois, Philippe Masure, y the R.-U. team (2004) 'THE EUROPEAN RISK-UE PROJECT : AN ADVANCED APPROACH TO EARTHQUAKE RISK SCENARIOS', *13 th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 3329*, (423).
59. Porter, K. et al. (2015) 'Guidelines for component- based analytical vulnerability assessment of buildings and nonstructural elements', *GEM Technical Report*, (October), p. 116. doi: 10.1037/0735-7044.122.2.416.
60. Pratt, T. L. et al. (2003) 'Amplification of seismic waves by the Seattle basin , Washington State Amplification of Seismic Waves by the Seattle Basin , Washington State', (April).
61. R.D., B. (1994) 'Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)'.
62. Radius (2000) 'Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters Final Report'.
63. Richter, B. G. and C. F. (1950) 'Seismicity of the earth and associated phenomena', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 40(1), p. 76.
64. Rockwell, T. (2010) 'The Rose Canyon Fault Zone in San Diego', *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
65. Rossetto, T. et al. (2014) 'Guidelines for Empirical Vulnerability Assessment, GEM Technical Report', *GEM Foundation*, p. 108. doi: 10.13117/ GEM.VULN-MOD.TR2014.11.
66. Saaty, T. L. (1987) 'The implementation of management science in higher education administration', *Omega*, 15(4), pp. 283–290. doi: 10.1016/0305-0483(87)90016-8.
67. Schmitz, M. et al. (2020) 'The Caracas, Venezuela, Seismic Microzoning Project: Methodology, results, and implementation for seismic risk reduction', *Progress in Disaster Science*. Elsevier Ltd, 5, p. 100060. doi: 10.1016/j.pdisas.2019.100060.
68. Shokrabadi, M. and Burton, H. V. (2019) 'Regional short-term and long-term risk and loss assessment under sequential seismic events', *Engineering Structures*. Elsevier, 185(January), pp. 366–376. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.105.
69. Silva, V. et al. (2012) *Development of an open-source platform for calculating losses from earthquakes*. Available at: <http://ria.ua.pt/handle/10773/9637>.

70. Silva, V. *et al.* (2014) 'Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment', *Natural Hazards*, 72(3), pp. 1409–1427. doi: 10.1007/s11069-013-0618-x.
71. Silva, V. *et al.* (2020) 'Development of a global seismic risk model', *Earthquake Spectra*, (February), p. 875529301989995. doi: 10.1177/8755293019899953.
72. Singh, S. K. *et al.* (2018) 'Deadly Intraslab Mexico Earthquake of 19 September 2017 (M_w 7.1): Ground Motion and Damage Pattern in Mexico City', 2017(September 2017). doi: 10.1785/0220180159.
73. Singleton, D. M. *et al.* (2019) *Late-Holocene Rupture History of the Rose Canyon Fault in Old Town , San Diego : Implications for Cascading Earthquakes on the Newport – Inglewood – Rose Canyon Fault System*. doi: 10.1785/0120180236.
74. Su, G. *et al.* (2020) 'The transdisciplinary construction of a seismic scenario as a process tool for addressing major gaps in earthquake disaster risk reduction in China', *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier Ltd, 44, p. 101433. doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101433.
75. Tarbuck, E. and Lutgens, F. (2018) *Ciencias De La Tierra 1, Geology*.
76. UNDRO (1979) *Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator (UNDRO)*.
77. UNISDR (2015) 'Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030', *Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015*, p. 26. Available at: http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf.
78. USGS (2017) 'PREPARING A REGION FOR EARTHQUAKE DISASTERS – THE SAN DIEGO - TIJUANA EARTHQUAKE SCENARIO PROJECT', in *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
79. USGS (2019) *New Earthquake Hazards Program*. Available at: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>.
80. Villar-Vega, M. *et al.* (2017) 'Development of a fragility model for the residential building stock in South America', *Earthquake Spectra*, 33(2), pp. 581–604. doi: 10.1193/010716EQS005M.
81. Whitman, R. V (1973) *Damage Probability Matrices for Prototype Buildings, Structures Publication*.
82. V. Wong O, M. Legg, F. S. V. (1987) 'SISMICIDAD Y TECTONICA DE LA MARGEN CONTINENTAL DEL SUR DE CALIFORNIA (USA) Y BAJA CALIFORNIA NORTE', in *Geofísica Internacional*, pp. 459–478.
83. Yepes-Estrada, C. *et al.* (2016) 'Seismic Risk Assessment for Colombian main cities : Bogota , Medellin and Cali'.
84. Zain, M. *et al.* (2019) 'Seismic Vulnerability Assessment of School Buildings in Seismic Zone 4 of Pakistan', *Advances in Civil Engineering*, 2019. doi: 10.1155/2019/5808256.
85. Zanini, M. A., Hofer, L. and Pellegrino, C. (2018) 'International Journal of Disaster Risk Reduction A framework for assessing the seismic risk map of Italy and developing a sustainable risk reduction program', *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier Ltd, (September), pp. 1–20. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.09.012.