



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS MEXICALI
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E
INGENIERÍA

Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California, México.

Tesis para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias

Presenta:

Mario González Durán

Director: Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma

Codirector: Dr. Ulises Mena Hernández.

Mexicali, B.C., 11 de agosto 2016

Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo en viviendas de 1 y 2 niveles en las ciudades de Baja California, México.

Índice

Resumen	4
Lista de tablas	7
Lista de Figuras	7
Lista de Ecuaciones	9
Agradecimientos	10
1. Introducción	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Sitios de estudio.....	16
1.3 Justificación.....	16
1.4 Hipótesis.....	17
1.5 Objetivos.....	17
1.5.1 Objetivo general.....	17
1.5.2 Objetivos particulares.....	17
1.6 Consideraciones metodológicas generales.....	18
1.7 Estructura de contenido.....	19
2. Marco teórico	20
2.1 Riesgo sísmico.....	20
2.2 Peligro sísmico regional y fuentes sísmicas.....	22
2.2.1 Leyes de atenuación.....	27
2.2.2 Efectos de sitio.....	32
2.3 Metodologías para la generación de escenarios de daño por sismo.....	34
2.4 Evaluación de daño en estructuras.....	37
2.5 Funciones de vulnerabilidad.....	38
2.5.1 Vulnerabilidad física.....	38
2.5.2 Vulnerabilidad humana.....	44
2.6 Impacto socioeconómico asociado a daños por sismo.....	46
2.7 Consideración de los indicadores socioeconómicos.....	49

3. Metodología de análisis	50
3.1 Peligro sísmico regional y local.	50
3.2 Comportamiento estructural de viviendas y sus funciones de vulnerabilidad.....	57
3.3 Indicadores socioeconómicos.....	61
3.4 Integración del peligro sísmico, comportamiento estructural y aspectos socioeconómicos.	63
3.5 Modelación probabilística del riesgo por sismo.	63
4. Resultados	67
4.1 Peligro sísmico	67
4.2 Comportamiento estructural de viviendas.....	71
4.3 Indicadores socioeconómicos.....	73
4.4 Análisis probabilísticos de riesgo sísmico.....	73
5. Conclusiones	81
5.1 Conclusiones teóricas	81
5.2 Conclusiones metodológicas	82
5.3 Conclusiones de los resultados de los casos de estudio	83
5.4 Conclusiones sobre limitantes del proyecto	84
5.5 Conclusiones generales.....	85
6. Líneas futuras de investigación	85
7. Bibliografía	86

Resumen

El propósito de este proyecto de tesis es obtener el impacto socioeconómico en función de las pérdidas físicas a las edificaciones, particularmente, las viviendas de uno y dos niveles; y la afectación a la población que las habita, en términos de daños o decesos, a consecuencia de la manifestación de sismos que tienen como fuente el sistema de falla geológica de rumbo e inversa dada en los límites de placas tectónicas Pacífico y Norteamérica, donde se genera una dinámica de movimiento transformante o traslación; tal impacto es determinado a partir de la generación de 252 escenarios del peligro sísmico dado por fuentes destacadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) como las más probables a liberar energía en la región en estudio: Coronado Bank, Rose Canyon, Laguna Salada, Imperial, San Jacinto 1 (Coyote Creek, Borrego, Superstition, y Mountain), San Jacinto 2 (San Bernardino, SJ Valley, Anza y Clark).

El cálculo del impacto socioeconómico se realizó mediante un análisis probabilístico del riesgo sísmico mediante la plataforma CAPRA, una iniciativa latinoamericana en conjunto con las Naciones Unidas y el Banco Mundial, la cual requirió la integración del peligro sísmico, mediante características de las fuentes, modelos de atenuación, e intensidad del suelo dado en unidades de aceleración, así como también, de un inventario de las características e integridad estructurales de las edificaciones, particularmente de las viviendas, tales como área de construcción, zona socioeconómica, edad de la vivienda y característica estructural de la vivienda en mediante relaciones de que asocian la intensidad del suelo (aceleraciones) y el relación media del daño (MRD), esto aunado a la relación de comportamiento de la población que habita tales edificaciones, mediante parámetros de ocupantes, atrapados, fatalidades y factor de colapso, para el caso de Tijuana se logró integrar una base de datos de 263, 914 construcciones, y para Mexicali con 9, 777 manzanas analizadas, y considerando que son 26 viviendas promedio, se revisaron 254, 202 viviendas.

Los resultados están dados en términos de daño físico en moneda nacional y en porcentaje de probables afectaciones a la población. En el caso de Tijuana, en un periodo de retorno se esperan pérdidas por daños a viviendas por un monto de \$2,750 millones de pesos MN., y una población ocupante de dichas viviendas de 1,450 personas. Para Mexicali, en un periodo de retorno de 100 años se estima una pérdida de daño a viviendas por \$125 millones de pesos MN., y en el caso de la población se estima una afectación para ese mismo periodo de retorno de 1,400 personas.

Abstract

The purpose of this thesis project is to obtain the socio-economic impact in terms of physical losses to buildings, particularly housing one and two levels; and the effect on the population that lives in terms of damage or deaths as a result of the demonstration of earthquakes that have as their source the system fails geological course and reverse given at the boundaries of tectonic plates Pacific and North America, where a dynamic transforming translational movement or is generated; such an impact is determined from the generation of 252 scenarios of seismic hazard given by sources highlighted by the US Geological Survey (USGS) as the most likely to release energy in the region under study: Coronado Bank, Rose Canyon, Laguna Salada, Imperial, San Jacinto 1 (Coyote Creek, Borrego, Superstition, and Mountain), San Jacinto 2 (San Bernardino, SJ Valley, Anza and Clark).

The calculation of the economic impact was performed using a probabilistic analysis of seismic risk by CAPRA platform, a Latin American initiative in conjunction with the United Nations and the World Bank, which required the integration of seismic hazard, by characteristics of the sources, models attenuation, and intensity of soil given in units of acceleration, as well as, an inventory of the characteristics and structural integrity of the buildings, particularly housing, such as construction area, socio-economic area, age of housing and structural feature of housing in through relationships that associate the intensity of soil (accelerations) and the average ratio

of damage (MRD), this coupled with the relationship of behavior of the population living in such buildings, using parameters occupants trapped, fatalities and collapse factor, in the case of Tijuana were able to integrate a database of 263, 914 buildings, and Mexicali with 9, 777 apples analyzed, and found to be 26 average homes, 254, 202 homes were reviewed.

The results are given in terms of physical damage in national currency and as a percentage of likely impacts to the population. In the case of Tijuana, in a return period of expected losses for damage to homes in the amount of \$ 2, 750 million pesos MN., And an occupying such housing population of 1, 450 people. To Mexicali, on a return period of 100 years, a loss of damage to homes is estimated at \$ 125 million MN pesos., And in the case of the population an affectation for the same period of return of 1, 400 people are estimated.

Lista de tablas

Tabla 1 Periodo de retorno (años) Vs Probabilidad de manifestación en 30 años, en el sur de Ca, EUA [15].....	22
Tabla 2. Registro de sismos $M \geq 6.5$, desde 1850 de acuerdo a fuente y magnitud [18]. .	24
Tabla 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas dadas por la relación Gutenberg-Richter modificada [13] en la región de Baja California.	27
Tabla 4. Modelos de aceleración de suelo utilizados en el oeste de EUA en el 2014.	30
Tabla 5. Fuentes sísmicas en California, EUA, que contribuyen a incrementar las aceleraciones	30
Tabla 6. Definición de los tipos de suelo usando $V_s(30)$ [21].	33
Tabla 7. Propuestas de FV para muros de carga en mampostería simple[45].	42
Tabla 8. Los diez principales sismos desde 1900, en función del número de damnificados [52].	46
Tabla 9. Los diez principales sismos desde 1900, en función de las pérdidas económicas y el PIB [52].	47
Tabla 10. Modelos para el cálculo del peligro sísmico a nivel mundial [53].	50
Tabla 11. Fuentes sísmicas consideradas en modelo CRISIS2007 [55].	54
Tabla 12. Parámetros de sismicidad para CRISIS2007	55
Tabla 13. Parámetros utilizados para la generación de funciones de vulnerabilidad [44][45][56][57]	57
Tabla 14. Periodos fundamentales de vibrar, del suelo y vivienda [58].....	59
Tabla 15. Parámetros requeridos y arreglo para archivos de exposición	62
Tabla 16. Escenarios críticos de acuerdo con Evaluación Probabilística de Riesgo, en Tijuana, B.C.....	73

Lista de Figuras

Figura 1. Afectación a la población por manifestación de sismo, con base en datos del Servicio Geológico de Estados Unidos[2], elaboración propia.	12
Figura 2. Principales fallas geológicas en el sur de California y norte de Baja California [6]	13
Figura 3. Características del sismo 15 de octubre de 1979, con epicentro en la falla Imperial [4].	14
Figura 4. Características del sismo del 04 de abril del 2010, con epicentro en las fallas Laguna Salada-Cucapa [5]	15
Figura 5. Tijuana y Mexicali, B.C. sitios con mayor peligro sísmico y densidad de Población en Baja California.....	16
Figura 6. Metodología de análisis proyecto de tesis.....	19
Figura 7. Fuentes sísmicas superficiales en México [12].....	23
Figura 8. Mapa de registro de sismos desde 1850, considerando tipo de fuente y epicentro, líneas azules son fuentes A y B, zonas rosas con fuentes tipo C [17].....	26

Figura 9. Modelo general en la estimación de escenarios de daño. Elaboración propia....	36
Figura 10. Curvas de fragilidad y los estados de daño en edificaciones [40].....	39
Figura 11. Factor de colapso(FC), dada la pérdida obtenida del estudio de riesgo sísmico [43]......	46
Figura 12. Diagrama de flujo del CRISIS2007 [58]......	53
Figura 13 Fuentes sísmicas consideradas de acuerdo a tabla 10 en Modelo CRISIS2007	55
Figura 14. Parámetros de sismicidad para las fuentes 3, 4 y 5 en CRISIS2007	56
Figura 15. Función de vulnerabilidad para un sistema constructivo de mampostería, en ERN-Vulnerabilidad v2.0	60
Figura 16. Función de vulnerabilidad humana, asociada a un sistema constructivo de mampostería, generada en modelo ERN-Vulnerabilidad v2.0.....	61
Figura 17. Modelo Probabilista de Riesgo (CAPRA) y aplicaciones para la gestión del riesgo de desastre [42].	64
Figura 18. Peligro sísmico en la región Tijuana-Mexicali. $T= 1$ seg., Periodo de retorno= 50 años, elaborado en CRISIS2007. Elaboración propia.....	66
Figura 19. Función de vulnerabilidad dada para una vivienda de 1 nivel y deteriorada obtenida mediante ERN Vulnerabilidad. Elaboración propia.	67
Figura 20. Archivo de exposición de la Ciudad de Tijuana requerida por CAPRA. Elaboración propia.	67
Figura 21. Tasas de excedencia y espectro de respuesta para la ciudad de Tijuana, B.C.	68
Figura 22. Tasa de excedencia y espectro de respuesta para la ciudad de Mexicali, B.C.	69
Ilustración 23. Peligro sísmico para la Ciudad de Tijuana, para un periodo(T) de 1 segundo y periodo de Retorno de 50 años.	70
Figura 24. Peligro sísmico para la Ciudad de Mexicali, para un periodo(T) de 1 segundo y un periodo de retorno de 50 años.....	70
Figura 25. Función de vulnerabilidad, en una vivienda de 1 nivel, estado físico nuevo.	71
Figura 26. Función de vulnerabilidad, en una vivienda de 2 niveles, estado físico nuevo.	72
Figura 27. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de pérdidas físicas, en Tijuana, B.C. Elaboración propia.	75
Figura 28. Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico, afectaciones humanas, Tijuana, B.C. Elaboración propia.	76
Figura 29. Pérdida Máxima Probable(PMP) en daños a viviendas, Tijuana, B.C. Elaboración propia.	77
Figura 30. Pérdida Máxima Probable(PMP) en afectaciones humanas, Tijuana, B.C. Elaboración propia.	77
Figura 31. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de pérdidas físicas, Mexicali, B.C. Elaboración propia.	78
Figura 32. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de afectaciones a la población, en Mexicali, B.C. Elaboración propia.....	79
Figura 33. Pérdida Máxima Probable(PMP) en daños a viviendas, Mexicali, B.C. Elaboración propia.	80

Figura 34. Perdida Máxima Probable (PMP) en afectaciones a la población, Mexicali, B.C.
 Elaboración propia. 80

Lista de Ecuaciones

Ec. 1. Riesgo 20

Ec. 2. Riesgo sísmico 20

Ec. 3. Riesgo sísmico 02..... 21

Ec. 4. Periodo de retorno 21

Ec. 5. Tasa de excedencia..... 26

Ec. 6. Intensidad con la distancia 27

Ec. 7. Intensidad en el epicentro I_0 27

Ec. 8. Intensidad en el epicentro con R en términos de Δ y h 27

Ec. 9. Ley de atenuación sur de California y norte de B. C..... 28

Ec. 10. Desviación estándar de atenuación..... 29

Ec. 11. Riesgo sísmico 35

Ec. 12. Distribución de Probabilidad..... 39

Ec. 13. Función de probabilidad para la representación de la vulnerabilidad. 40

Ec. 14. Determinación de función de vulnerabilidad [48][49][50][45] 41

Ec. 15. Distorsión máxima de entrepiso 41

Ec. 16. Construcción de funciones de vulnerabilidad..... 42

Ec. 17. Numero de victimas [46]. 45

Ec. 18. Factor de colapso. 45

Ec. 19. Relación de pérdidas de la edificación..... 45

Ec. 20. Ley de atenuación utilizada en CRISIS2007 [18]. 55

Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos a las Instituciones, profesores, familiares y amigos:

- A la Universidad Autónoma de Baja California y al Sindicato de Profesores de Superación Universitaria por contribuir en mi formación Doctoral y realización plena, mediante el Plan de Becas, movilidades y estancias.
- A mi Director de Tesis y amigo el Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma, por sus consejos, observaciones oportunas, disponibilidad y apoyo hasta en el último instante, y que permanentemente me ha considerado parte de su equipo de trabajo.
- Al Subcomité de Ingeniería Civil (SAAC), de la Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali, integrado por la Dra. Michelle Hallack Alegría, Dr. Álvaro Alberto López Lambrao, que de muy buena intención nos realizaron las observaciones pertinentes durante el desarrollo de la investigación.
- A mi codirector y amigo el Dr. Ulises Mena Hernández, por orientarme y mostrarme el camino que debíamos seguir en la investigación, y su apoyo y disponibilidad permanente.
- Al Dr. Daniel Hernández Balbuena, por su plena disposición para que proceso administrativo no se detuviera en ningún momento.
- Al Dr. Joel Martínez Martínez, por orientación y apoyo inicial en el proceso de investigación
- A la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas, mi lugar de trabajo, por permitirme en todo momento cumplir con mis compromisos académicos.
- A mi comité de tesis a los Doctores Luis Enrique Fernández Baqueiro, Ricardo González Alcorta, y Joel Martínez Martínez, por aceptar ser parte del proceso de revisión y contribución de comentarios en el documento de Tesis.
- Al Lic. Juan Guillermo Espinoza Aguilar, amigo y compañero, por su respaldo y gestión de apoyos económicos en el SPSU, que permitió en buena parte que este proyecto pudiera seguir adelante, asimismo, al Mtro. Javier Márquez

Cortez y Mtro. Juan Manuel Armenta Pacheco, compañeros y amigos de respaldo permanente.

- A los Doctores Roberto Arroyo Matus, Carlos M. Valdés González y Xyoli Pérez Campos, por creer en mi y contribuir con asesorías del camino a seguir, préstamo de equipo y capacitación.
- Al Arq. Luis Fernando Cañez, al Ing. Alfredo Nava, al Dr. Marco Antonio Torres, al Mtro. Ismael Eduardo Arzola, al Ing. Roberto Ramírez y el Ing. Marco A. Berumen, por todo el apoyo técnico y moral recibido.
- A los chicos del Verano Delfín 2016: Jaqueline, Nixe, Romelus, Adrian, Eliel, Fernando y Gerardo, por su apoyo y disponibilidad en la actualización de la base de datos de Tijuana y Mexicali.
- A mi esposa Talía Isabel Hernández Sánchez, de quien he tenido en todo momento un apoyo incondicional, su amor y respaldo, a mis hermosas y amadas hijas Marifer y Bella, de quienes aún en su inocencia sé que me apoyan y me motivan a seguir adelante, las tres son mi motivación, el termino de este proyecto sabemos que es un logro de los cuatro. A mis Padres Pedro y Florencia por su apoyo incondicional, a mis hermanos Carlos, Erika, Flor, mis sobrinos Emil, Denisse, Carlitos, Blanquita, Edgar, Pablo y Marijosé, por todo el apoyo moral recibido, a mi cuñada Blanca Esthela⁺, que aunque ya no estés físicamente, sé que siempre estaba en tus oraciones que todo saliera bien en mi preparación. A mi querida suegra Juventina Sánchez Castro, por su apoyo moral y oraciones, a mis cuñados Martín, Giovanni y Blanca. A mis amigos María Chávez, Edgar Moreno, Carlos Lagunés y Michelle Hallack, Juan Gutiérrez, Rubén Sánchez, Jared Romero y Dante Lucena por su apoyo y buenas vibras. A mis compañeros de batalla en la última etapa del proceso previa a la defensa Leo, Julio y Cynthia.
- Y finalmente agradecer a Dios todopoderoso y sus intercesores, por iluminar mi camino, proporcionarme entendimiento y fortalecerme espiritualmente, porque sin ello, este proyecto no hubiese sido posible.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Es reconocido que los sismos se producen por el constante movimiento en la corteza terrestre, integrada por placas tectónicas, con lo que se libera energía a través de diversos medios, destacando los volcanes y fallas geológicas, esta energía se cuantifica actualmente de cuatro formas; de manera local o Richter (M_L), tipos de onda de cuerpo-superficiales(M_b) y magnitud de momento (M_w) [1].

El impacto negativo a la población de la manifestación de sismos a nivel mundial, entre otros fenómenos naturales, es relevante en términos de pérdida de vidas humanas y afectación a la infraestructura, fig. 1.

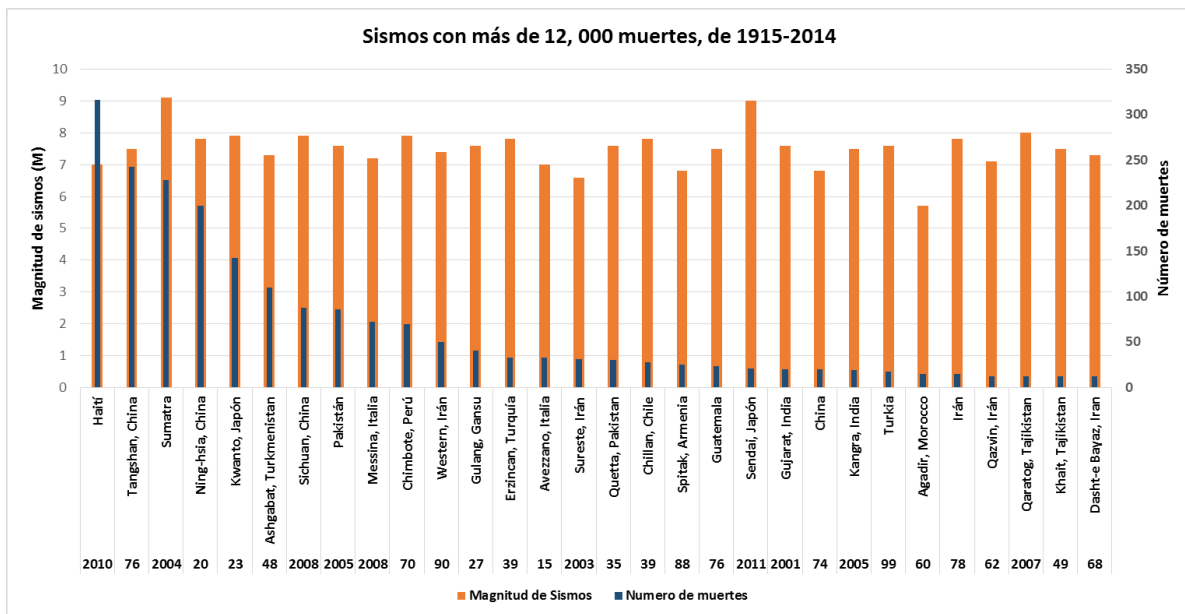


Figura 1. Afectación a la población por manifestación de sismo, con base en datos del Servicio Geológico de Estados Unidos[2], elaboración propia.

En Baja California, México, existe un peligro sísmico alto, asociado a las condiciones tectónicas de la región, la cual se localiza en los límites de las Placas del Pacífico y Norteamérica, este límite se caracteriza por un sistema transformante, en donde resalta la falla de rumbo denominado como Falla de San Andrés, el cual se extiende desde San Francisco, California, hasta el Golfo de California [3]. Localmente en el

caso de las ciudades de mayor importancia por tamaño de población, Tijuana y Mexicali; se tiene que para Tijuana se considera que la principal fuente de liberación de energía es a través del sistema Rose Canyon Fault, en el caso de Mexicali se tiene como fuentes sísmicas los sistemas de la sierra Cucapah (falla Laguna Salada, falla Cerro Prieto) del lado oeste e Imperial del lado este, figura 2.

En el caso de la ciudad de Mexicali, ya se han registrado sismos de magnitud importante como es el caso del sismo del 15 de octubre de 1979, con $M_w = 6.5$, profundidad de hipocentro de 12 kilómetros, con localización latitud 32.60 N, longitud 115.30 W [4] y 04 de abril del 2010, con $M_w = 7.2$, profundidad de hipocentro de 10 kilómetros, localización latitud 32.26 N, 115.29 W [5], con afectaciones importantes a la infraestructura urbana, figuras 3 y 4.

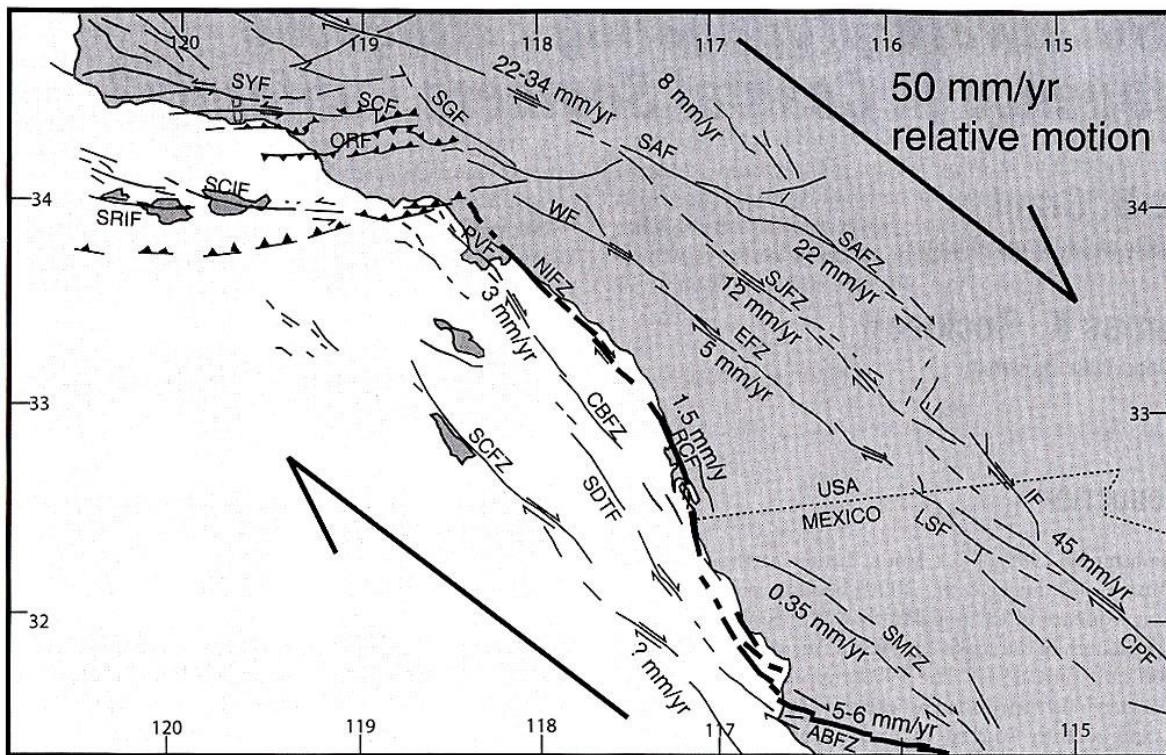
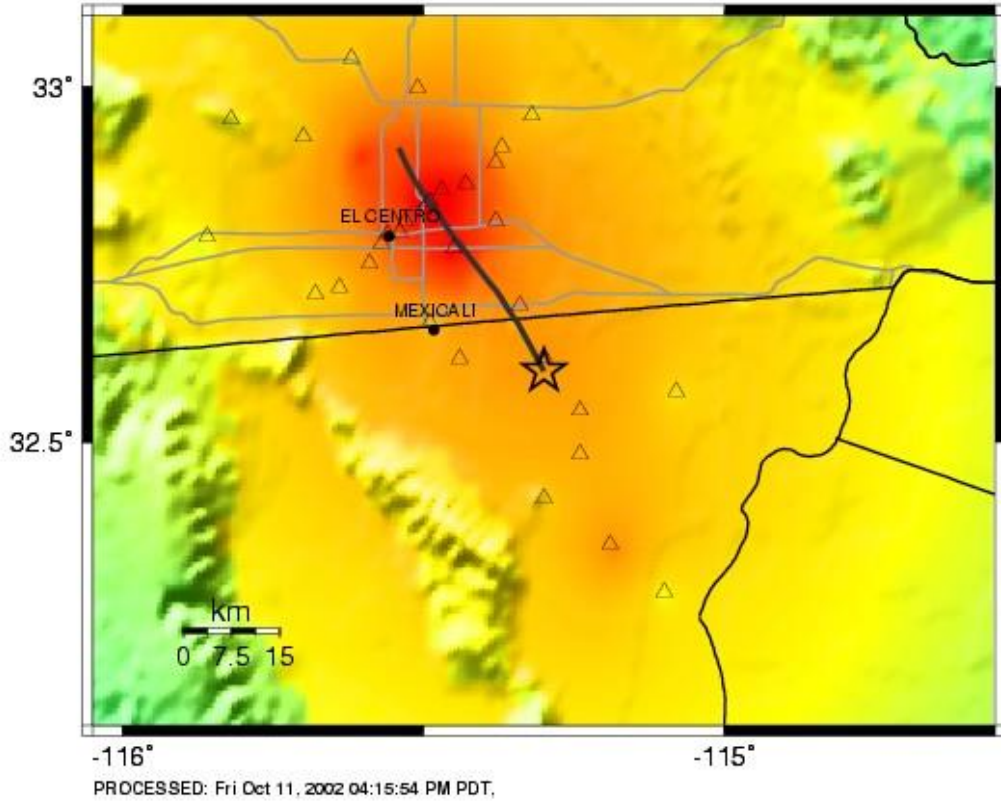


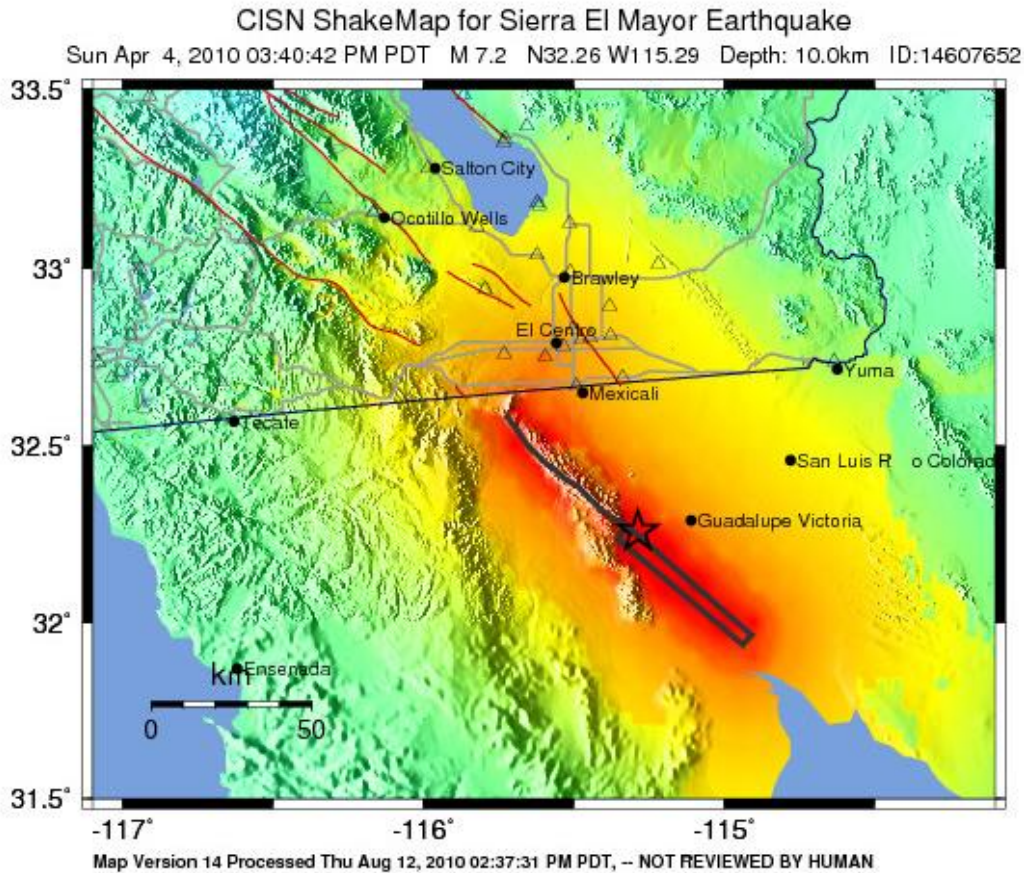
Figura 2. Principales fallas geológicas en el sur de California y norte de Baja California [6]

TriNet Rapid Instrumental Intensity Map for Imperial Valley Earthquake
 Mon Oct 15, 1979 04:16:00 PM PDT M 6.5 N32.60 W115.30 Depth: 12.0km ID:Imperial_Valley



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 3. Características del sismo 15 de octubre de 1979, con epicentro en la falla Imperial [4].



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 4. Características del sismo del 04 de abril del 2010, con epicentro en las fallas Laguna Salada-Cucapa [5]

Dado lo anterior el presente proyecto de tesis tiene como objeto revisar el impacto socioeconómico de daño por sismo en las dos principales zonas urbanas de Baja California, Tijuana y Mexicali, y que además están próximas a las fuentes sísmicas con mayor peligro sísmico. El impacto esta dado en términos de la afectación a la población y daño a las construcciones, con base al comportamiento de viviendas de mampostería de uno y dos niveles, distribuidas en las dos ciudades y al efecto de sitio, en términos de las aceleraciones del terreno.

1.2 Sitios de estudio

El desarrollo del proyecto de tesis está dado en las ciudades de Tijuana y Mexicali, B.C., ubicadas al noroeste de México, zonas urbanas con mayor población, donde se concentra el 79.3% de residentes del estado [7], así como también, son sitios cercanos a fuentes sísmicas con mayor peligro sísmico en el Estado, fig. 5

Localización de los sitios de estudio

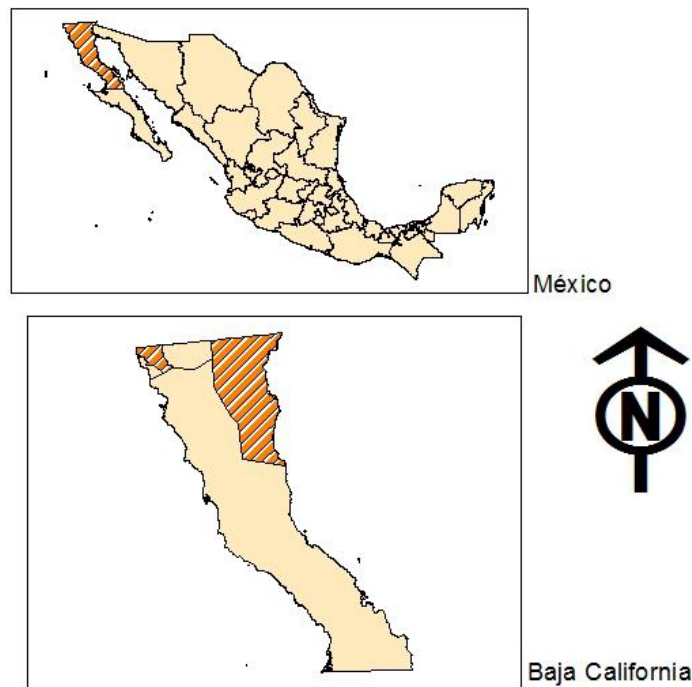


Figura 5. Tijuana y Mexicali, B.C. sitios con mayor peligro sísmico y densidad de Población en Baja California.

1.3 Justificación

En Baja California, y a nivel Nacional se requiere una herramienta que estime el daño en viviendas y afectación a la población, útil para plantear estrategias por parte de los tomadores de decisiones en acciones de prevención, planes de contingencia y reconstrucción de la infraestructura ante la manifestación de sismos; desarrollo y modificaciones de reglamentos de construcción; rehabilitación de estructuras;

disponibilidad de una herramienta que coadyuve en la Planeación Urbana, al considerar las zonas de mayor riesgo sísmico.

1.4 Hipótesis

La estimación del impacto socioeconómico, en términos del daño físico a viviendas y afectación a su población ocupante, por manifestación de sismos, es factible obtenerla mediante un análisis probabilístico del riesgo, si y solo si, se integra el peligro sísmico regional; el comportamiento estructural de las edificaciones; la densidad y características de la población expuesta.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estimar el impacto socioeconómico del daño por sismo en viviendas de uno y dos niveles, construidas a base de mampostería, distribuidas en Tijuana y Mexicali, B.C, mediante análisis probabilístico de riesgo, en términos de Perdidas Máximas Probables en Moneda Nacional y cantidad de población afectada.

1.5.2 Objetivos particulares

Objetivo particular 1. Estimar el peligro sísmico regional, considerando las fuentes sísmicas potenciales sugeridas por el Servicio Geológico de Estados Unidos; caracterización las fuentes, modelos de atenuación del movimiento del suelo, espectros de respuesta y tasas de excedencia, a través de un modelo de generación de escenarios de intensidad sísmica.

Objetivo particular 2. Construir funciones de vulnerabilidad con base a la tipología de vivienda definida para la estructura de las viviendas de uno y dos niveles, en las

zonas urbanas de Tijuana y Mexicali, considerando los parámetros que definen su comportamiento mecánico y dinámico.

Objetivo particular 3. Definir los indicadores socioeconómicos que se asocian al comportamiento estructural de las viviendas, definidos por su ubicación urbana, en términos del valor de la construcción, cantidad de población ocupante de las viviendas, nivel socioeconómico de la zona y condiciones físicas de la vivienda.

Objetivo particular 4. Integrar base de datos de exposición para el análisis probabilístico del riesgo, en donde se asocien costos de construcción, calidad de la vivienda en función de las condiciones físicas aparentes, población ocupante, comportamiento estructural de la vivienda, tamaño de la construcción, caracterización de la sismicidad.

1.6 Consideraciones metodológicas generales

Este proyecto de investigación está basado en una metodología de análisis dada por el peligro sísmico, comportamiento estructural, indicadores socioeconómicos, los cuales se logran vincular mediante un arreglo matricial, tal que, bajo la generación de escenarios por manifestación de sismos, el probable comportamiento estructural y la interacción de variables tales como: área de construcción, número de pisos, costos de construcción, cantidad de población ocupante, sitio socioeconómico, se realiza un análisis probabilístico del riesgo, con el que se estima bajo un cierto periodo de retorno el valor del daño esperado en la edificaciones expresado en tipo de moneda ingresado en los costos de construcción; asimismo, se calcula la cantidad de población ocupante, todo ello se asume como una propuesta integral de herramienta de planeación urbana, fig 6, dado que ofrece la posibilidad de identificar los sitios con mayor riesgo a ser afectados por manifestación de sismos.

Impacto socioeconómico del daño estructural por sismo, en viviendas de 1 y 2 niveles en Baja California, México.

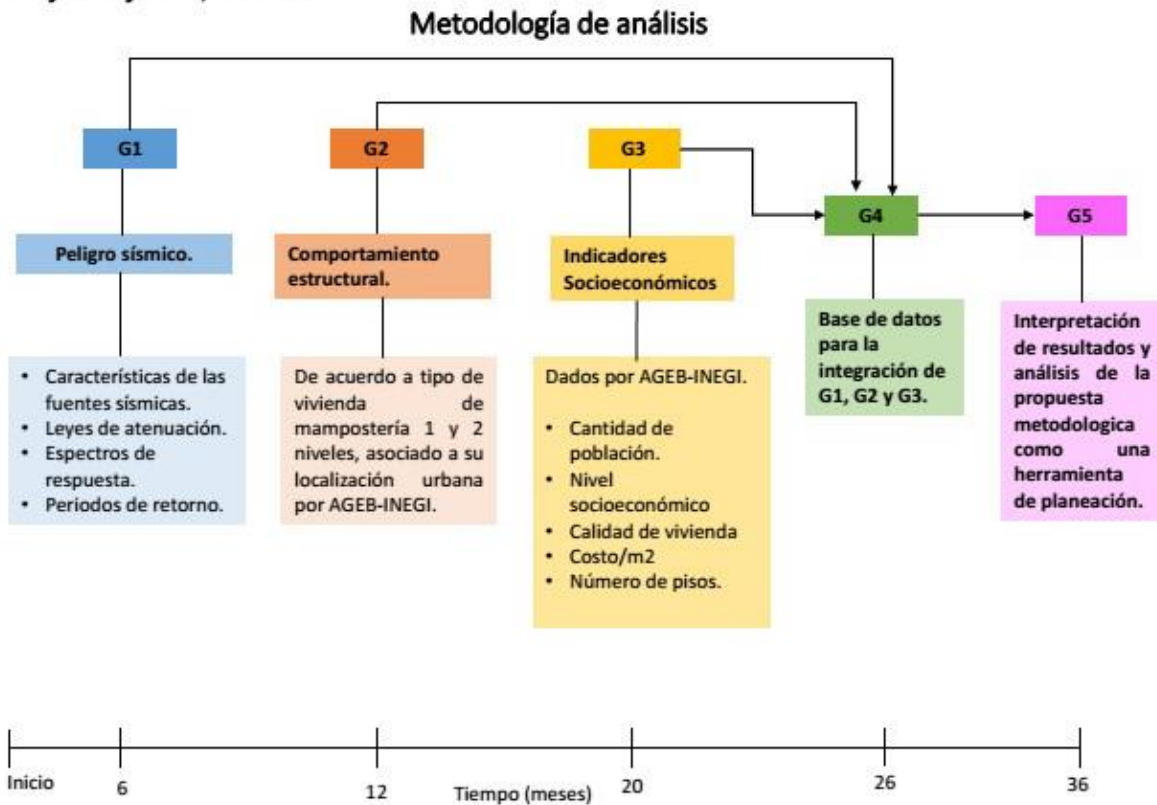


Figura 6. Metodología de análisis proyecto de tesis

1.7 Estructura de contenido

Este apartado está ligado a la metodología de análisis propuesta, fig. 6, el cual está diseñado para respaldar cada uno de los elementos comprendidos en la metodología; es decir, en ella se definen conceptos fundamentales como riesgo y sus variables; peligro sísmico regional y local; efectos de sitio; comportamiento estructural, las funciones de vulnerabilidad físicas y humanas; metodologías de la generación de escenarios por sismo; y el impacto socioeconómico dado en términos de zona socioeconómica, condición física de la vivienda, población ocupante, costo por m², tamaño de la vivienda en m² y número de niveles.

2. Marco teórico

2.1 Riesgo sísmico

El riesgo se define como la probabilidad o frecuencia de que un fenómeno ocurra asociado a las consecuencias o efectos sobre humanos, construcciones y el medio ambiente [8], la cual se describe como:

Ec. 1. Riesgo

$$\text{Riesgo} = (\text{Probabilidad ó frecuencia}) \times (\text{consecuencia})$$

En particular, el riesgo sísmico, se define como la probabilidad de la ocurrencia de sismos (fuentes, magnitudes, aceleraciones, intensidades), asociado a daños causados a las construcciones, número de personas afectadas y/o damnificadas [9]. En ese sentido si se desea conocer la probabilidad de los daños que puede ocasionar un conjunto de sismos en un periodo determinado $\text{Pr}(C|E)$, se puede expresar de la siguiente manera:

Ec. 2. Riesgo sísmico

$$\text{Pr}(C|E) = \sum_{e \in E} \sum_{n=0}^5 \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=A}^F \text{Pr}(C|D_n, V_j) \text{Pr}(D_n|I_k, V_j) \text{Pr}(I_k|e) \text{Pr}(V_j)$$

De donde

$\text{Pr}(C|D_n, V_j)$, es la probabilidad de un cierto nivel de daño, la cual está condicionado por la vulnerabilidad de la construcción V_j , dada por el estado de daño D_n .

$\text{Pr}(D_n|I_k, V_j)$, es la probabilidad de que se presente cierto estado de daño, el cual está condicionado por vulnerabilidad V_j y por una intensidad dada I_k .

$\text{Pr}(I_k|e)$, es la probabilidad de que un sismo e produzca una intensidad dada, llamada también la condicional del peligro sísmico.

$\text{Pr}(V_j)$, es la distribución de vulnerabilidad.

La ecuación 2, está dada en términos de la vulnerabilidad de las construcciones, intensidad sísmica, estados de daños, y nivel de afectación en la población.

Asimismo, el riesgo sísmico es significativo cuando aporta información de un periodo específico del tiempo en el futuro, lo cual puede estar dado con modelos basados en:

- a. Estimación de la ocurrencia de sismos, de cuando y donde pueden ocurrir, y cuál es el mayor de ellos.
- b. Aceleraciones de terreno, incluyendo efectos de sitio, para la estimación de la vibraciones o agitaciones en las edificaciones.
- c. Inventario de construcciones.
- d. Daño en las edificaciones por vibraciones en suelo y estructuras.
- e. Pérdidas materiales y humanas, en donde se incluye un modelo de distribución de personas en tiempo y espacio.

Existen algunos intentos por describir el riesgo por sismo a partir de calcular la probabilidad de que se manifieste uno de magnitud tal que rebase los comportamientos estimados de las edificaciones, en base a los reglamentos de construcción vigentes, de forma tal que la Ec. 3, expresa la probabilidad de que al menos ocurra un sismo de gran magnitud que rebase los valores de diseño de la vida económica de una estructura [1],

Ec. 3. Riesgo sísmico 02

$$Risk = 1 - \left\{ P_0 + (1 - P_0) \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right\}^N ,$$

Donde N , es la vida económica de construcciones, con especificación de acuerdo con algunos reglamentos de construcción; P_0 es la probabilidad de que se presente un sismo de magnitud igual a cero; y T es el promedio del periodo de retorno de magnitud crítica del sismo de diseño, de esta expresión T puede ser calculado con la Ec. 4,

Ec. 4. Periodo de retorno

$$T = 1 / \left\{ 1 - \left[\frac{(1 - Risk)^{\frac{1}{N}} - P_0}{1 - P_0} \right] \right\},$$

2.2 Peligro sísmico regional y fuentes sísmicas

El peligro sísmico se define como la probabilidad de que el parámetro que mide el movimiento del suelo, llámese una aceleración de terreno o intensidad, debido a la ocurrencia de un terremoto, sobrepase un nivel umbral dado durante un periodo de tiempo de interés [10].

Para la determinación del peligro sísmico, se sugiere realizar una caracterización geotécnica, mediante pruebas de campo y laboratorio, determinación de velocidades de onda de corte del suelo y sus aceleraciones pico [11].

En México existen 48 fuentes generadoras de sismos, definidas por la tectónica del país y los registros históricos, divididas por sismos de subducción; fallamiento normal y profundidad intermedia; superficiales de la corteza continental y sistemas de fallas Polochic-Motagua [12]. La región noroeste de México, específicamente en Baja California, se ubican las fuentes sísmicas 1,3, y 4, nombradas como Baja California intraplaca norte y centro, fig. 5, en donde la placa del Pacífico y de Norteamérica tienen un desplazamiento lateral de 5 centímetros por año, en la parte norte de Baja California y a lo largo del estado de California, EUA [13] [14], esto último coincide con la regionalización hecha en EUA por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), en donde la parte sur de California y la correspondiente en el norte de Baja California, México, se encuentra ubicada en una zona de sismos de corteza superficial [15], en donde la mayoría de las fallas son rumbo, sismos con magnitudes $6.0 < M < 8.0$, también con registros históricos de magnitud $5.0 < M < 7.9$ [16]. En este sentido en la tabla 1, se muestra el tiempo promedio entre la manifestación de sismos y la probabilidad de que se presenten en el sur de California, EUA,

Tabla 1 Periodo de retorno (años) Vs Probabilidad de manifestación en 30 años, en el sur de Ca, EUA [14].

Magnitud mayor a igual que:	Periodo de retorno promedio (años)	Probabilidad de manifestación en 30 años de 1 o más sismos, a partir del 2014.
5	0.24	100%
6	2.3	100%
6.7	12	93%
7	25	75%
7.5	87	36%
8	522	7%

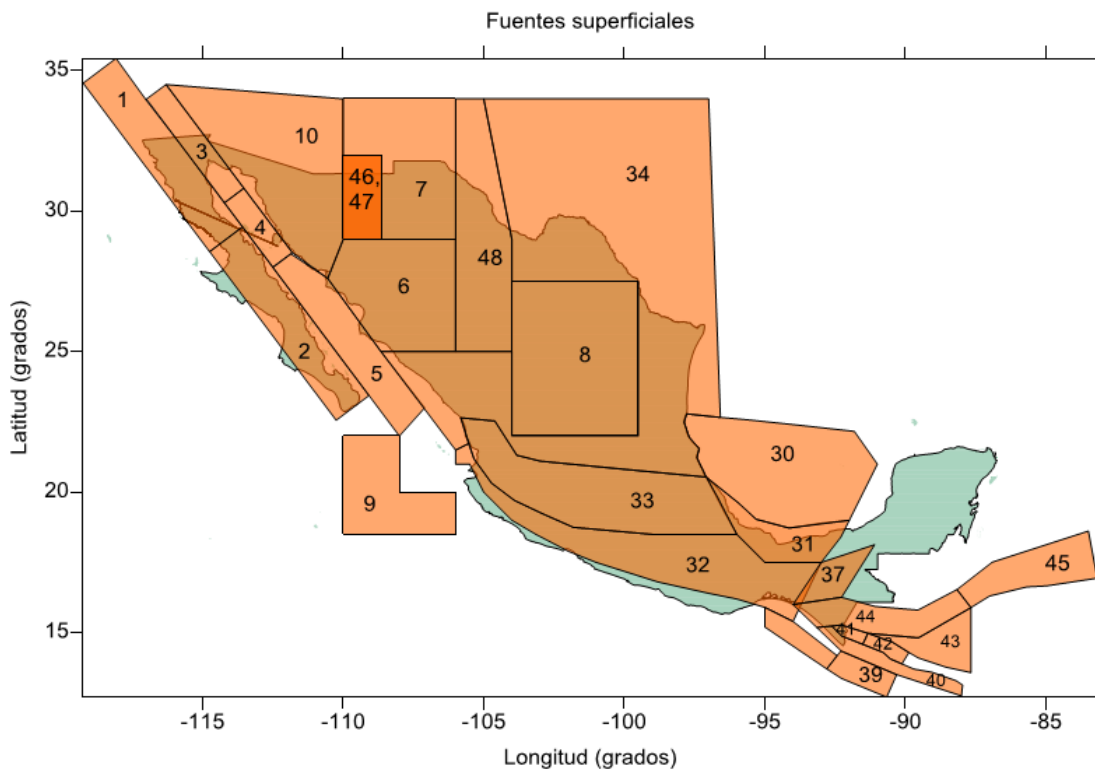


Figura 7. Fuentes sísmicas superficiales en México [12]

En la tabla 1 se enlistan los registros de sismos $M \geq 6.5$ ocurridos en California, EUA, desde 1850 y su clasificación de tipo de fuente A, B y C, en la figura 6, se describen ubicación y falla [17],

Tabla 2. Registro de sismos $M \geq 6.5$, desde 1850 de acuerdo a fuente y magnitud [17].

No.	Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Falla	Tipo de fuente
1	01 enero 1852	39.5	-119.5	7.3		B o C
2	29 noviembre 1852	32.5	-115	6.5		B
3	9 enero 1857	36.2	-120.8	7.9	San Andrés	A
4	15 marzo 1860	39.5	-119.5	6.5	Olinghouse	B o C
5	8 octubre 1865	37.2	-121.9	6.5		A
6	21 octubre 1868	37.7	-122.1	7	Hayward	A
7	26 marzo 1872	36.7	-118.1	7.6	Owens Valley	B
8	26 marzo 1872	36.9	-118.2	6.8	Owens Valley	B
9	11 abril 1872	37.5	-118.5	6.8		B
10	23 noviembre 1873	42	-124.2	6.9		Placa Gorda
11	9 mayo 1878	40.4	-125.2	7		
12	12 abril 1885	36.2	-120.8	6.5	San Andrés	A
13	3 junio 1887	39.2	-119.8	6.5		B o C
14	9 febrero 1890	33.4	-116.3	6.8		B o C
15	24 febrero 1892	32.55	-115.65	7.3	Laguna Salada	B
16	19 abril 1892	38.4	-122	6.6	Great Valley	B
17	28 mayo 1892	33.2	-116.2	6.5		A o C
18	30 septiembre 1894	40.3	-124.5	6.5		Placa Gorda
19	15 abril 1898	39.2	-123.8	6.7	San Andrés	A
20	25 diciembre 1899	33.8	-117	6.7	San Jacinto	A
21	18 abril 1906	37.7	-122.5	7.8	San Andrés	A
22	21 noviembre 1915	32	-115	6.6	Cerro Prieto	
23	21 abril 1918	33.75	-117	6.8	San Jacinto	A
24	15 julio 1918	41	-125	6.5		Placa Gorda
25	22 enero 1923	40.4	-124.9	7.2		Placa Gorda

26	29 junio 1925	34.3	-119.8	6.8		B
27	4 noviembre 1927	34.6	-120.9	7.1		
28	30 diciembre 1934	32.77	-115.604	6.5	Cerro Prieto	B
29	31 diciembre 1934	32.71	-115.533	7	Cerro Prieto	B
30	19 mayo 1940	32.85	-115.52	6.9	Imperial	B
31	10 abril 1947	34.983	-116.331	6.5	Manix	C
32	21 julio 1952	34.958	-118.998	7.5	White Wolf	B
33	21 diciembre 1954	40.78	-123.87	6.6		
34	9 febrero 1956	31.75	-115.917	6.5	San Miguel	
35	9 abril 1968	33.17	-116.087	6.6	San Jacinto-Borrego	A
36	9 febrero 1971	34.42	-118.37	6.6	Sierra Madre San Fernando	B
37	15 octubre 1979	32.61	-115.318	6.51	Imperial	B
38	8 noviembre 1980	41.08	-124.62	7.3		Placa Gorda
39	24 noviembre 1987	33.02	-115.852	6.51	San Jacinto – Superstition Hills	A
40	18 octubre 1989	37.04	-121.88	6.89	San Andrés	A
41	25 abril 1992	40.33	-124.23	7.15	Cascadia	Placa Gorda
42	26 abril 1992	40.42	-124.832	6.6		Placa Gorda
43	28 junio 1992	34.2	-116.437	7.29	Johnson Valley, Homestead Valley, Emerson, Camp Rock	B
44	17 enero 1994	34.21	-118.537	6.65	Northridge	B
45	16 octubre 1999	34.59	-116.271	7.12	Lavic Lake, Bullion	B
46	22 diciembre 2003	35.7	-121.097	6.55		
47	4 abril 2010	32.26	-115.29	7.2	Sierra El Mayor	C

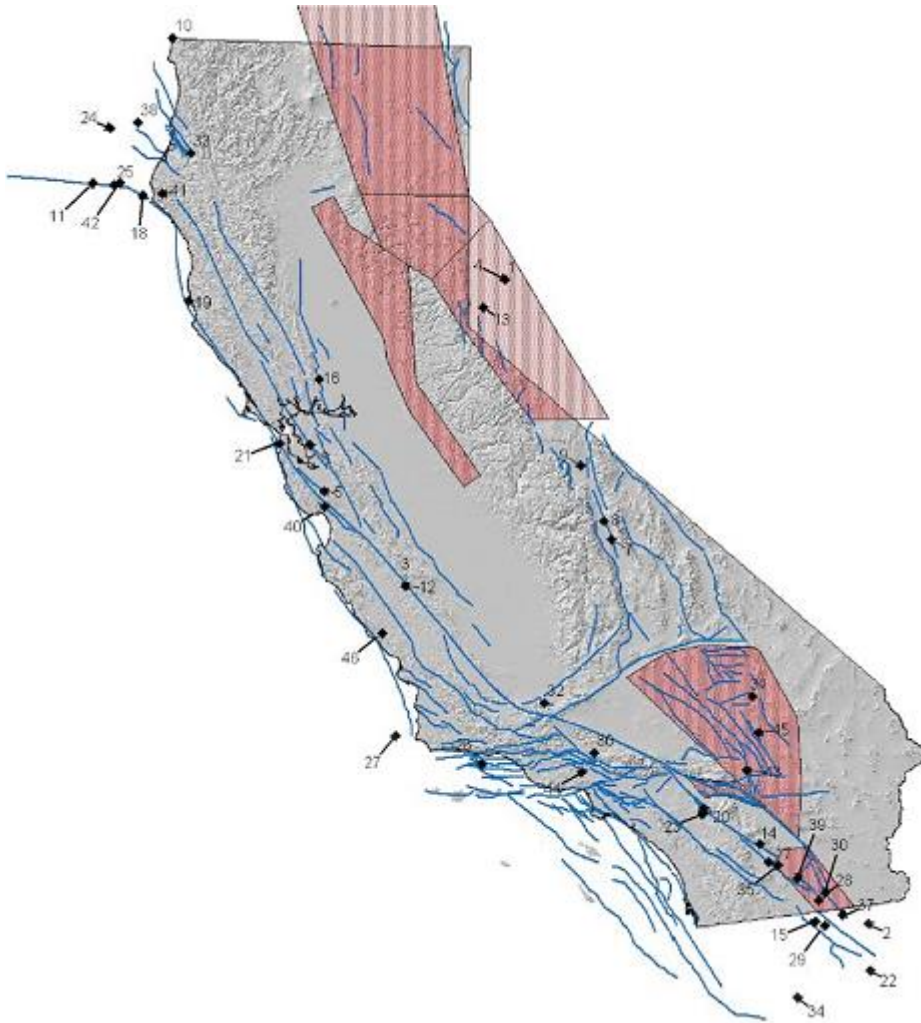


Figura 8. Mapa de registro de sismos desde 1850, considerando tipo de fuente y epicentro, líneas azules son fuentes A y B, zonas rosas con fuentes tipo C [17].

El cálculo del peligro sísmico se realiza en función de la tasa de excedencia de las magnitudes $\lambda_i(M)$ que se generan en el sitio [13]. Se asume que cada una de las fuentes genera temblores a una tasa constante. Para la mayoría de las fuentes sísmicas la función $\lambda_i(M)$ es una versión modificada de la relación de Gutenberg y Richter como se expresa en la Ec. 5,

Ec. 5. Tasa de excedencia

$$\lambda_i(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}; M_0 \leq M \leq M_u$$

De donde

M_0 es la mínima magnitud relevante

λ_0 , β y M_u son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas, expresados en la tabla 1,

Tabla 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas dadas por la relación Gutenberg-Richter modificada [12] en la región de Baja California.

No.	Nombre	M_0	$\lambda_0 \left(\frac{1}{\text{año}}\right)$	$E(\beta)$	$c(\beta)$	$E(M_u)$	$D(M_u)$
1	Baja California intraplaca norte	4.5	1.70E+00	1.980	0.097	6.8	0.0
2	Baja California intraplaca sur	4.5	1.21E+00	0.933	0.036	5.8	0.0
3	Baja California interplaca norte	4.5	2.51E+00	1.782	0.093	7.7	0.3
4	Baja California interplaca centro	4.5	7.26E+00	1.637	0.168	7.4	0.4
5	Baja California interplaca sur	4.5	2.09E+00	1.674	0.082	7.2	0.6

2.2.1 Leyes de atenuación

Para calcular la contribución de cada una de las fuentes sísmicas al peligro sísmico en un sitio determinado, se requiere conocer cómo se atenúa tal contribución con la distancia [10]. Es decir, si se requiere conocer el nivel de movimiento del suelo que se presentaría en un lugar determinado si en la i – *ésima* fuente ocurriera un sismo con una magnitud dada, asimismo las ecuaciones que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio (distancia focal, distancia entre el foco sísmico y el sitio) e intensidad se les conoce como Leyes de atenuación [12]. De los parámetros que definen el movimiento del suelo, el más usual es la intensidad sísmica con la distancia, la cual se puede expresar de manera general mediante la Ec. 6, 7 u 8 [10],

Ec. 6. Intensidad con la distancia

$$I = C_1 + C_2 \log R + C_3 \cdot R$$

Ec. 7. Intensidad en el epicentro I_0

$$I = I_0 - a \log \frac{R}{h} - b(R - h)$$

Ec. 8. Intensidad en el epicentro con R en términos de Δ y h

$$I = I_0 - a \log \frac{\sqrt{\Delta^2 + h^2}}{h} - b (\sqrt{\Delta^2 + h^2} - h)$$

De donde I es la intensidad en el punto de interés, I_0 es la intensidad en el epicentro, R es la distancia hipocentral, Δ es la distancia epicentral y h es la profundidad del foco. El coeficiente a está relacionado con la atenuación debida a la expresión geométrica o ensanchamiento del frente de onda, el coeficiente b está relacionado con la absorción anelástica del medio por el que se propaga la onda sísmica.

Las intensidades sísmicas relevantes son las dadas por las ordenadas del espectro de respuesta S_a (pseudoaceleraciones), las cuales se consideran como cantidades aproximadamente proporcionales a las fuerzas laterales de inercia que se generan en las estructuras durante sismos y que están en función del periodo natural de vibrar [12].

De acuerdo el reporte de la actualización nacional de mapas de peligro sísmico de Estados Unidos de América del 2014 (NSHM), del oeste de EUA, en particular del estado de California, donde las características tectónicas son similares al norte de Baja California, los modelos utilizados para definir las Leyes de atenuación de la zona están dados en la tabla 3, en la cual en resumen se les denomina modelos de aceleración del suelo GMM, y atenuación de nueva generación NGA [16].

La ecuación o Ley de atenuación definida para fallas de rumbo e inversas se expresa en la Ec. 9 [18],

Ec. 9. Ley de atenuación sur de California y norte de B. C.

$$\ln Y = F_E(M, mech) + F_{P,B}(R_{JB}, M) + F_{S,B}(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{S30})$$

De donde:

$\ln Y$ representa el algoritmo natural de la medida de intensidad IM del movimiento del suelo en término de las aceleraciones pico del suelo (PGA), las velocidades pico del suelo (PGV), pseudoaceleraciones (PSA).

$F_E, F_{P,B}, F_{S,B}$, representa la función que depende de la fuente del evento E , función de trayectoria P , función de amplificación del sitio S respectivamente, B indica el modelo del caso base.

$M, mech, R_{JB}, V_{S30}$, representan la magnitud momento, tipo de falla, distancia según *Joyner – Boore* la cual se define como la distancia más corta a la superficie de proyección de la falla y la velocidad de onda de corte por arriba de los 30 m de profundidad en el sitio.

ε_n es la desviación estándar de un solo valor estimado de $\ln Y$.

σ es la desviación estándar total del modelo.

La desviación estándar total σ se expresa en términos de ϕ y τ para la estimación de las variables de M, R_{JB} y V_{S30} , Ec. 10,

Ec. 10. Desviación estándar de atenuación.

$$\sigma(M, R_{JB}, V_{S30}) = \sqrt{\phi^2(M, R_{JB}, V_{S30}) + \tau^2(M)}$$

Entre las consideraciones hechas en el desarrollo de las ecuaciones de atenuación para esta región, destacan la tasa de excedencia del 2% en 50 años, condiciones de sitio dadas en roca firme con una velocidad de onda de corte promedio para profundidades mayores a 30 m de $V_{S30} = 760 \text{ m/s}$, entre un rango de $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ a 1500 m/s , para el pico máximo de aceleraciones (PGA) y aceleraciones en el espectro de respuesta desde 1 hertz (1 segundos) hasta 5 hertz (0.2 segundos), además de considerar un rango de periodos entre 0.01 s a 10 sec y 5% de amortiguamiento, para sismos con magnitud de momento (M) de 3.0 a 8.5, para fallas de rumbo e inversas, con distancias de 0 a 400 km, con profundidades $z_1 = 0.0 \text{ a } 3.0 \text{ km}$, con las ecuaciones se estima intensidades del movimiento del suelo en términos de pico máximo de aceleraciones (PGA), pico máximo de velocidades

(PGV), y pseudoaceleraciones con periodos de $T = 0$ a 10 *segundos* para todas las componentes horizontales, además de considerar una variabilidad de fuentes, lineamientos y sitios, con efectos de sitio y fuentes sísmicas secundarias [18].

Tabla 4. Modelos de aceleración de suelo utilizados en el oeste de EUA en el 2014.

No.	GMM 2014	Abreviación	Fuente	Consideración
1	Abrahamson	ASK13	NGA-West2	22 %
2	Boore and others	BSSA13	NGA-West2	22 %
3	Campbell and Bozornia	CB13	NGA-West2	22 %
4	Chiou and Youngs	CY13	NGA-West2	22 %
5	Idriss	I13	NGA-West2	12 %

Las fallas fuentes de sismos en el estado de California, EUA, que contribuyen a incrementar las aceleraciones de suelo se enlistan en la tabla 4 [16].

Tabla 5. Fuentes sísmicas en California, EUA, que contribuyen a incrementar las aceleraciones

No.	Falla fuente	Observaciones
1	Big Lagoon-Bald Mountain	Se extiende aproximadamente 60 km hacia el norte, con una posible liberación de energía de $M \approx 8.0$, de acuerdo con el modelo de ABM.
2	South Klamath Lake West	Falla nueva.
3	Goose Lake, Fitzhugh Creek, Jess Valley, y Davis Creek.	Fallas nuevas.
4	Likely	Con posibilidad de aumentar al doble la magnitud liberada.
5	Pittville	Falla nueva.
6	Honey Lake	Falla que se extiende al oeste.
7	Almanor, Walker Spring, Jeddie Ridge, Kinner Flat, Mohawk Valley, Dog Valley, Polaris y Incline Village.	Siete nuevas fallas.
8	West Tahoe y Antelope Valley	Nueva falla y la extensión de la falla West Tahoe al oeste.
9	Maacama	Se incrementa la energía en un 20%

10	West Napa	Se estima que en la energía a liberar aumente con un $M = 3.5$, principalmente de acuerdo con el modelo hecho por ABM.
11	Great Valley, Los Medanos-Roe Island.	Fallas nuevas.
12	Greenville South y Ortigalita	La falla Greenville South se extiende hacia el sur, cambia la geometría y liberación de energía de la falla Ortigalita.
13	Silver Creek, Monte Vista-Shannon, y Sargent.	Fallas nuevas.
14	Oceanic-West Hausna	Nueva falla con alta probabilidad de liberación de energía.
15	Los Alamos, Santa Ynez River, Santa Ynez West, y Hosgri Extension.	Nuevas fallas.
16	Lost Hills	Nueva falla.
17	Fish Slough, Independence y Owens Valley.	Cambio de geometría de la falla Fish Slough, y el incremento en la probabilidad de liberación energía en todas las fallas.
18	Sierra Nevada y White Wolf, los lineamientos sísmicos Scodie y Lake Isabella.	Nuevas fallas y asociados con trazos fuentes sísmicas.
19	Cleghorn Pass y Lake.	Más de quince fallas nuevas añadidas en el este del desierto de Mojave.
20	San Clemente, San Diego Trough, Santa Cruz Catalina Ridge, Oceanside y San Pedro Basin.	Fallas nuevas.
21	Elmore Ranch	Incremento en la probabilidad de liberación de energía.
22	Cerro Prieto	Falla nueva.

2.2.2 Efectos de sitio

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional, es decir, es una condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que hay una correlación con la atenuación normal de energía sísmica con la distancia. El efecto de sitio está en función de las características geométricas de los cuerpos geológicos, tales como: topografía del basamento, espesor y distribución de los estratos, de los parámetros mecánicos de los materiales: velocidades de ondas P y S , densidad, amortiguamientos [13].

La estimación de los efectos de sitios a través de los movimientos fuertes del suelo, se da mediante las velocidades de onda de corte locales. Las estimaciones están hechas para las aceleraciones pico del suelo en el sentido horizontal, velocidades pico y espectro de respuesta con el 5% de amortiguamiento. Las mediciones de velocidades de onda de corte se proponen mediante la técnica Down-Hole, hechas en profundidades igual o mayores a 30 m [19].

La distribución de daño causado por el movimiento de suelo por sismo, refleja los diferentes tipos de suelo localmente. El daño por sismo frecuentemente es mayor en áreas en donde los estratos de suelo son de sedimentos no consolidados ubicados son lechos rocosos. La consideración de las condiciones de sitio es un apartado esencial en las evaluaciones de los peligros por movimientos del suelo. La velocidad de onda de corte es un factor crítico en la determinación la intensidad del movimiento del suelo. Los reglamentos de diseño sísmico consideran las condiciones de sitio, por ejemplo, el Código Internacional de Construcción (IBC), en los que se expresa la clasificación de suelos en relación a la velocidad de onda de corte promedio con una profundidad de 30 m., $V_s(30)$, tabla 6 [20], y este como único valor para estimar los efectos de sitio en los cálculos de peligro sísmico. La

distribución geográfica de $V_s(30)$ y los tipos de suelo son útiles para los estudios zonación, dado que estos estudios están en función de estos parámetros [21].

Tabla 6. Definición de los tipos de suelo usando $V_s(30)$ [20].

Tipo de sitio	Suelo	Propiedades promedio en prof., arriba de 30 m.
		Velocidades de onda de corte del suelo $V_s(30)$, (m/s)
A	Roca dura	$V_s(30) > 1500$
B	Roca	$760 < V_s(30) \leq 1500$
C	Denso y roca suave	$360 < V_s(30) \leq 760$
D	Consolidado	$180 \leq V_s(30) \leq 360$
E	Suave, limos arcillas.	$V_s(30) < 180$

Las condiciones de sitio cerca de la superficie pueden significativamente amplificarse o disminuirse con los movimientos de terreno. Al incorporar las velocidades de onda de corte del suelo con una profundidad mayor a 30 metros en los Análisis probabilísticos de Riesgo Sísmico del movimiento del terreno, se mejora la estimación de pérdidas [22].

Existen muchos estudios que resaltan que los factores que influyen en el movimiento del suelo por sismo son la fuente sísmica, lineamientos, y los efectos de sitios, sin embargo, los efectos de sitios también deberían definirse en términos del comportamiento promedio de la mayoría de los sismos de la región mediante un análisis de probabilidad de peligro sísmico PSHA, es decir, promediar la respuesta de sitios con la mayoría de las fuentes sísmicas localizadas, para considera variables asociadas a incidencias de ángulos, azimuts, y tipos de onda [23].

2.3 Metodologías para la generación de escenarios de daño por sismo

Los escenarios son imágenes del futuro, no son predicciones, ni probabilidades; cada escenario es una alternativa de cómo se puede concebir o presentarse el futuro [24]. Además, los escenarios pueden ser vistos como una herramienta de enlace entre descripciones cualitativas acerca del futuro y formulaciones cuantitativas basadas en modelaciones formales. La elaboración de escenarios tiene como propósito aprender acerca del comportamiento de sistemas complejos y la elaboración de políticas, estas elaboraciones están basados en un conjunto de consideraciones y teorías respecto a las relaciones clave y fuerzas motores de cambio. Los escenarios están formulados con el apoyo de modelos formales analíticos o numéricos [24].

En particular, la estimación de escenarios de daño por sismo están expresados en modelos que asocian el conocimiento del peligro sísmico en la zona, la fragilidad de la infraestructura y el impacto económico [25]; como se establece en el esquema propuesto figura 7, elaborando un ejercicio de sobreponer la estructura de análisis, basado en parte en las metodologías de mitigación del riesgo por sismo las cuales están basadas en la capacidad sísmica de las edificaciones, peligro local y el tamaño de la población expuesta, asociada a inventario de tipo de sistemas constructivos, análisis actual de los niveles de riesgo sísmico, estimación del costo de acciones de fortalecimiento y la construcción de curvas de riesgo – tiempo [26].

En este sentido en Calvi [27] señala que cada modelo de las diferentes metodologías de las evaluaciones de vulnerabilidad apoyadas en escalas de valores discretos de daño como por ejemplo los métodos MSK, escala Modificada de Mercalli y la EMS98, son en su conjunto escalas usadas para identificar los esfuerzos que se producen a partir las estadísticas de daño después de ocurrido el sismo, en tanto que los procedimientos analíticos están asociados a propiedades mecánicas en estado límite de las edificaciones, así como la capacidad de desplazamientos.

Asimismo, para la realización de escenarios de daños se recomienda utilizar herramientas, tales como: HAZUS desarrollada por la agencia Federal de Manejo de Emergencias (FEMA), en la que se asocian aceleraciones del suelo a través de predicción apoyados en modelos de atenuación, caracterización de la fuente de ruptura, la estimación de pérdidas de vidas humanas e infraestructura [15]. Sin embargo, existen otros modelos, tales como: RADIUS, SEISMOCARE, GEM, CAPRA, SELENA y recientemente el modelo denominado Karmania Hazard Model (KHM) [28] ; los cuales en términos generales están basados en la identificación de fuentes sísmicas y fallas activas; producción de isoaceleraciones, es decir, aceleraciones de suelo y mapas de intensidad sísmica; determinación de efectos de sitio y preparación de mapas de agitación del suelo; evaluación de vulnerabilidad en las edificaciones; estimación de la vulnerabilidad de la población; estimación de los recursos requeridos en una situación de emergencia [28].

Para la generación de escenarios de daño, además de considerar el riesgo sísmico, en términos de definir la magnitud del sismo o sismos, la exposición de las construcciones, es decir, el inventario de construcciones, cálculo de las construcciones, vulnerabilidad de las construcciones, cálculo de riesgo, resultados de cálculo la evaluación de riesgo [29], es necesario, que el modelo de evaluación de riesgo por sismo comprenda la filosofía de incertidumbres existentes y cómo cuantificarlas, de acuerdo con análisis y aproximaciones de expertos, aunado a un análisis detallado de sensibilidad [30].

Al referirnos a escenarios de daño por sismo, hablamos de las alternativas donde está asociado el riesgo por sismo, el cual a su vez es una función del peligro sísmico, la vulnerabilidad y la exposición del agente afectable o población [31], Ec. 11, expresada como:

Ec. 11. Riesgo sísmico

$$\text{Riesgo por sismo} = \text{peligro sísmico} \times \text{vulnerabilidad} \times \text{agente afectable}$$

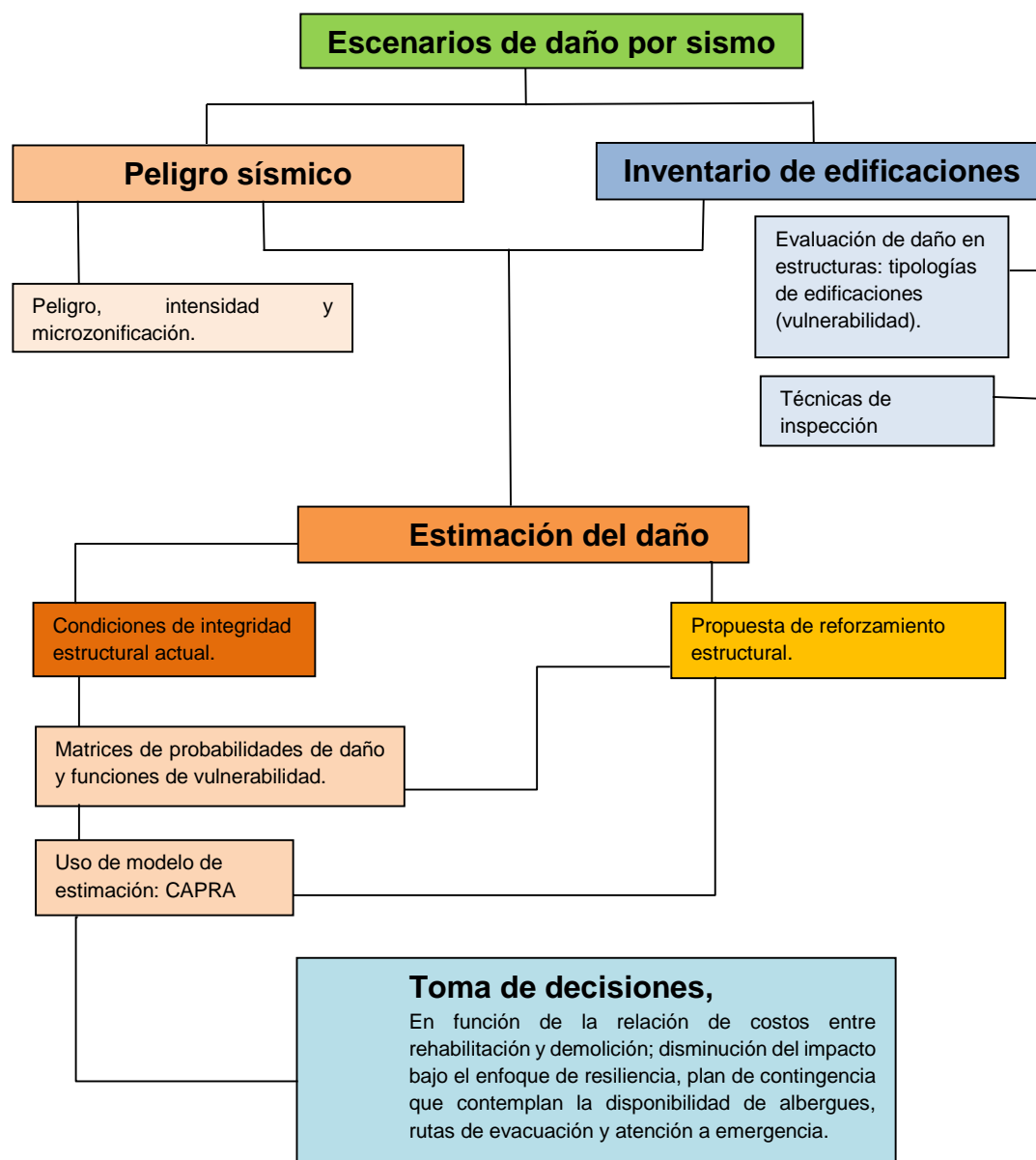


Figura 9. Modelo general en la estimación de escenarios de daño. Elaboración propia.

En relación con la figura 7, en el apartado de inventario de edificaciones, proponen que haciendo ciertas adecuaciones a la escala establecida en el European Macroseismic Scale (EMS) del Consejo Europeo, se establecen clases de vulnerabilidad según el tipo de estructura, indicadores de vulnerabilidad basada en las características propias de la construcción, asociadas a la Intensidad dada por la

escala modificada de Intensidad Mercalli(MMI), se puede establecer una correlación entre el daño y la intensidad sísmica [32]. Además que se propone que el inventario se complemente mediante características tales como numero de edificaciones, tipo de ocupación y detalle del tipo de estructura [33].

En el contexto del daño y consecuencias, de acuerdo al diagrama de la figura 7, en el artículo denominado: Importancia de la incertidumbre de los modelos contra la incertidumbre de los parámetros en la valoración de pérdidas por sismos [34], se propone que una buena aproximación a la estimación de daños por sismos, es mediante modelos que asocien sus variables a números aleatorios, con igual nivel de confianza y el número de los parámetros de entrada al modelo sea manejado mediante una técnica de Monte Carlo, distribución de probabilidades uniformes o normales, con un cierto nivel de confianza.

La elaboración de una evaluación de peligro por sismo, se propone realizarlo mediante un sistema de información geográfica, en el cual se integran los datos de características físicas de la región tales como: parámetros geofísicos, tipos de suelo, fallas activas, censos de población, inventario de construcciones, ligado a una microzonificación y a la vulnerabilidad de acuerdo al daño de las edificaciones, la población expuesta y los recursos estimados requeridos [35].

2.4 Evaluación de daño en estructuras

Los datos a considerar en la evaluación de estructuras afectadas por sismo, son la magnitud del sismo, Pico Máximo de Aceleración en función de la gravedad (g), los tipos de edificación, con una clasificación general entre estructura y no estructural, sin perder de vista que la vulnerabilidad de las construcciones depende de muchas aspectos, tales como: tipo de construcciones, materiales y forma estructural, regularidad en planta y elevación, diseño sísmico, supervisión del diseño, construcción e inspección [36]. Asimismo, una propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad y restauración de una edificación podría agruparse

en tres etapas; etapa I. Datos arquitectónicos y estructurales, características mecánicas y reglamentos de diseño sísmico; etapa II. Modelo estructural y acciones o condiciones de carga, y etapa III. Análisis de falla o indicador de daño, en este sentido existe una metodología simplificada para la evaluación de la fragilidad propuesta por Kircher e incorporada por HAZUS99, en estas metodologías se asume que las ordenadas espectrales son una distribución normal - logarítmica, presumiendo que la variabilidad está representada por una desviación estándar logarítmica [37].

El daño en las estructuras puede darse mediante una cuantificación numérica, utilizando varias técnicas [38], tales como:

1. En función de la variación del período fundamental.
2. Clasificación del grado e daño, de acuerdo con varios criterios: DDC, EMS, ATC-20, SEAOC Vision 2000.

2.5 Funciones de vulnerabilidad

2.5.1 Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad sísmica de diferentes edificaciones, puede ser determinado mediante curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño (DPMs) o vulnerabilidad, las cuales muestran la probabilidad de alcanzar o exceder daños específicos en función de la intensidad de la aceleración del suelo [36].

En el caso de las funciones de fragilidad describen la probabilidad de daño a los modelos de edificaciones, tales como: sistemas estructurales, componentes no estructurales susceptibles a separarse y los componentes no estructurales sensibles a la aceleración, con ellas se puede tener un nivel de respuesta de las edificaciones. Las curvas de fragilidad distribuyen el daño en cuatro estados físicos: leve, moderado, extensivo y completo, asociado al movimiento del suelo por sismo o espectro de respuesta, como movimiento débil, medio y fuerte [39], fig. 8.

Sin embargo, los estados de daño en las curvas de fragilidad y DPMs se definen para caracterizar un estado físico de la estructura de manera cualitativa y descriptivos del daño esperado.

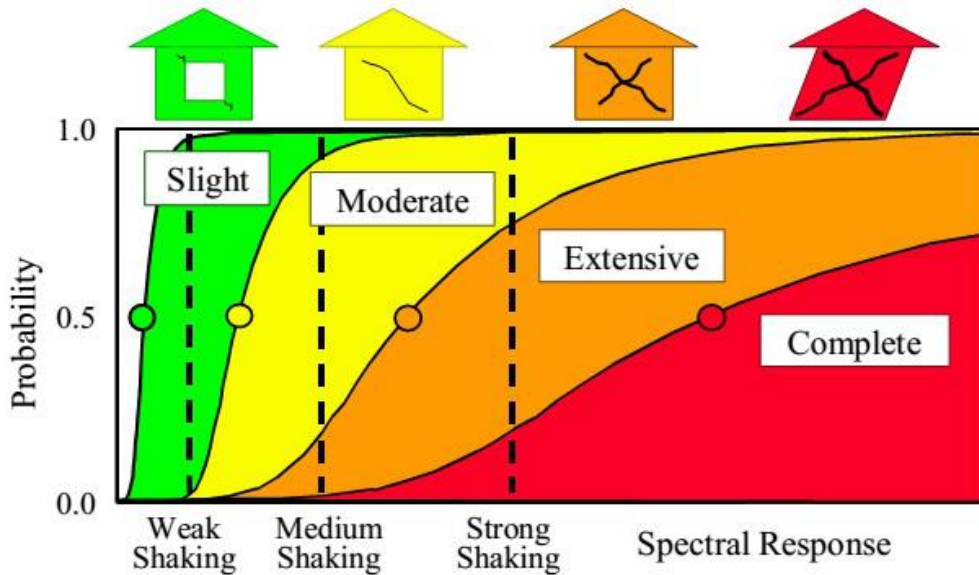


Figura 10. Curvas de fragilidad y los estados de daño en edificaciones [40]

A diferencia las curvas de fragilidad y DPMs, las funciones de vulnerabilidad (FV) aportan toda la información necesaria para calcular la probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida, dada la demanda sísmica, mediante una escala numérica, que además describen la variación de momentos estadísticos de pérdida para diferentes valores de demanda sísmica; dicha pérdida se asume usualmente que la distribución de probabilidad es una distribución Beta [41], donde los momentos estadísticos corresponden a la media (relación media del daño RMD) y desviación estándar [42]. La distribución Beta ($pL|S(L)$), se define como, (ec.12)

Ec. 12. Distribución de Probabilidad

$$P_{(L|S)}(L) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} L^{a-1}(1-L)^{b-1}$$

En donde

Γ es la función Gamma y los parámetros a y b son:

$$a = \frac{(1 - (1 + c^2(L|S))E(L|S))E(L|S)}{c^2(L|S)},$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(L|S)}{E(L|S)},$$

De donde

$E(L|S)$, es la pérdida media o el valor esperado y $c(L|S)$ es el coeficiente de variación de la pérdida dada una demanda sísmica S . Resalta que $c(L|S) = SD(L|S)/E(L|S)$ donde $SD(L|S)$ es la desviación estándar de la pérdida dada una demanda sísmica S . De aquí que la función de probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida se exprese como en la ec.13,

Ec. 13. Función de probabilidad para la representación de la vulnerabilidad.

$$\Pr(L \geq l|S) = \int_l^{\infty} P_{L|S}(L)dL,$$

De donde l es un valor de pérdida en el dominio de la variable aleatoria L , y S es la demanda sísmica.

En la evaluación probabilista del riesgo de desastres, la vulnerabilidad de los elementos expuestos se representa mediante funciones que relacionan la intensidad del fenómeno que se caracteriza con el nivel medio del daño o afectación física directa relativa. Las llamadas funciones de vulnerabilidad se deben estimar para cada uno de los tipos constructivos, de manera que puedan asignarse a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición. Cada función de vulnerabilidad está caracterizada por un valor conocido como relación media del daño (RMD), o también denominada β , y su varianza correspondiente para cada nivel de intensidad de la amenaza, la cual puede estar dada en términos de la aceleración, velocidad o desplazamientos máximos del terreno, o valores espectrales, es decir, para diferentes periodos estructurales dominantes de

vibración, estos valores espectrales están dados en general en términos de respuesta elástica de las estructuras para un amortiguamiento generalmente del 5% [43]. Con ello es posible estimar la función de probabilidad de la pérdida de cada nivel de intensidad de la amenaza considerada, la cual corresponderá a un escenario de amenaza específico de análisis [44].

Asimismo, una función de vulnerabilidad definida por la relación de RMD y cualquier Parámetro de Intensidad Sísmica (PIS), se puede calcular mediante la ec.14 [45][46][47][42],

Ec. 14. Determinación de función de vulnerabilidad [45][46][47][42]

$$E(\beta|\gamma_i) = 1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\xi \right]$$

De donde,

β , Relación Media del Daño (RMD), o perdida media.

γ_i , Intensidad sísmica, para este caso aceleración espectral, así como, γ_i y γ_0 son parámetros de vulnerabilidad estructural que depende de la tipología estructural y del año de construcción.

A la ecuación 14 se asocia que el nivel de daño para edificaciones típicas se puede estimar tomando la deriva de entrepiso como parámetro de referencia, el cual se calcula como el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos, dividido entre la altura del piso. A partir de la aceleración espectral es posible determinar la máxima distorsión de entrepiso (demanda inelástica) [43] [47], Ec. 15,

Ec. 15. Distorsión máxima de entrepiso

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 (\eta N^p)^2}{4\pi^2 N h} S_a(T);$$

De donde,

β_1 , es la relación entre el desplazamiento lateral máximo en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral.

β_2 , es la relación entre la distorsión máxima entre pisos y la distorsión global de la estructura.

β_3 , es la relación entre el desplazamiento máximo lateral inelástico y el desplazamiento máximo del modelo elástico.

β_4 , es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico.

η, ρ , son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos N , asimismo $T = \eta N^\rho$.

h , es la altura de cada piso, que depende de la tipología estructural, la localización geográfica y el año de construcción.

$S_a(T)$, es la aceleración espectral que depende del periodo de vibración fundamental de la estructura, el amortiguamiento estructural y la amenaza sísmica en el sitio.

Tabla 7. Propuestas de FV para muros de carga en mampostería simple[44].

Parámetros de la edificación											Parámetros de Miranda					
Función	Nivel de diseño sísmico	H(m)	Np	Te (seg)	α_1	α_2	γ	λ	Cs	μ	α	a	β_1	β_2	β_3	β_4
URML_H	Alto	4.57	1	0.35	0.5	0.75	1.5	2	0.080	8.0	1.0	0.1	1.0	1.3	1.7	1.27
URML_M	Medio	4.57	1	0.35	0.5	0.75	1.5	2	0.080	6.0	1.0	0.1	1.0	1.3	1.4	1.21
URML_L	Bajo	4.57	1	0.35	0.5	0.75	1.5	2	0.067	5.0	1.0	0.1	1.0	1.3	1.3	1.17
URML_P	Muy Bajo	4.57	1	0.35	0.5	0.75	1.5	2	0.054	4.0	1.0	0.1	1.0	1.3	1.2	1.14

La construcción de funciones de vulnerabilidad específicamente para las estructuras de mampostería destinadas a vivienda, se puede expresar en términos del daño físico o consecuencias que pueda causar el colapso de la misma de acuerdo con CENAPRED, Ec.16,

Ec. 16. Construcción de funciones de vulnerabilidad.

$$\delta(S_a) = 1 - e^{-au^m},$$

de donde $u = \frac{S_a(T)}{S_{amax}(T)}$, a y m son parámetros que dependen del tipo de arreglo estructural, de los materiales y de los detalles constructivos que determinan la capacidad para resistir fuerzas laterales en términos de la aceleración espectral elástica. $S_a(T)$ es la aceleración espectral elástica demandada y $S_{amax}(T)$ es la aceleración espectral elástica que causa un nivel de daño excesivo en la estructura y que puede causar el colapso de la misma [48].

De acuerdo con Calvi [27] la evaluación de la vulnerabilidad requiere hacer una caracterización particular de la aceleración del suelo, con la que se representará la exigencia sísmica sobre las edificaciones. La selección de un parámetro deberá ser capaz de correlacionar la aceleración del suelo con el daño de las estructuras, en este sentido tradicionalmente la intensidad macrosísmica y los picos de las aceleraciones del terreno se han empleado, en tanto que los recientes objetivos han vinculado la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones con el espectro de respuesta obtenido de las aceleraciones de terreno.

Una metodología de evaluación de la vulnerabilidad deberá comprender las siguientes características: a. Los desarrollos más recientes en el campo de la evaluación del peligro sísmico; b. Todas las fuentes de incertidumbre deberán representarse explícitamente; c. El modelo deberá ser fácilmente adaptable a los diferentes procedimientos de construcción alrededor del mundo, así como permitir la inclusión de nuevos tipos de construcción y la influencia del reequipamiento en la respuesta de las edificaciones existentes; d. Deberá haber un equilibrio entre el modelo computacional y los datos reunidos requeridos y por secuencia un grado de confianza en los resultados, sin embargo, esto es improbable que esto se logre con una sola metodología, es decir, la evaluación de la vulnerabilidad confiable de una región determinada que se logre con al menos dos enfoques distintos, de tal manera que uno se complemente con el otro [27].

Otra metodología propuesta para la determinación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones es mediante un análisis probabilístico de fragilidad estructural basado

precisamente de funciones de fragilidad y simulaciones basadas en la técnica de Montecarlo. En el caso de simulación, la incertidumbre generada por la aleatoriedad está dada por propiedades del material, esfuerzos a compresión del concreto, densidad del concreto, desempeño del acero, y las características geométricas, etc., además de la dirección del movimiento del suelo. La obtención de las distribuciones estadísticas de estas propiedades se propone obtenerlas en campo y en laboratorio. Por el lado de las funciones de fragilidad son obtenidas por los picos de aceleración del suelo y su velocidad, así como el desfase de los espectros elásticos obtenidos con el primer modo de vibrar de las construcciones, teniendo como referencia el manual técnico de HAZUS-MH y el inventario de construcciones en Estambul, Turquía [49], lo anterior se complementa que lo que establece Gearhart [50], la construcción de escenarios de daño se puede lograr mediante una optimización probabilística, establecida a través de simulaciones, como el uso de la técnica de Monte Carlo [50].

2.5.2 Vulnerabilidad humana

Las funciones de vulnerabilidad humana se plantean en términos del número esperado de víctimas mortales medidas en porcentaje con respecto al nivel de ocupación del componente y su desviación estándar correspondiente para diferentes niveles de intensidad del evento [43].

A partir de la estimación del número esperado de víctimas potenciales es posible estimar diferentes medidas de impacto social del evento, número de heridos, número de personas sin trabajo y número de personas afectadas.

Para la estimación de las funciones de vulnerabilidad humana en términos del número esperado de víctimas el análisis probabilístico del riesgo CAPRA propone la siguiente metodología:

Ante la ocurrencia de un evento sísmico, el número de víctimas, NVi , para el edificio i ubicado en la región afectada por un terremoto j se puede calcular como:

Ec. 17. Numero de victimas [43].

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

En donde,

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 metro cuadrado e construcción para cada región.

Atrapados, es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapados con vida debajo de los escombros de la edificación, este factor depende del tipo estructural.

Fatalidad, es la relación porcentual del número estimado de atrapados que eventualmente mueren por el colapso o los daños en la edificación.

FCj, es el factor de colapso, de 0 a 1, 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 ec. 16,

Ec. 18. Factor de colapso.

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

En donde

FC , Factor de colapso

Ec. 19. Relación de pérdidas de la edificación.

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

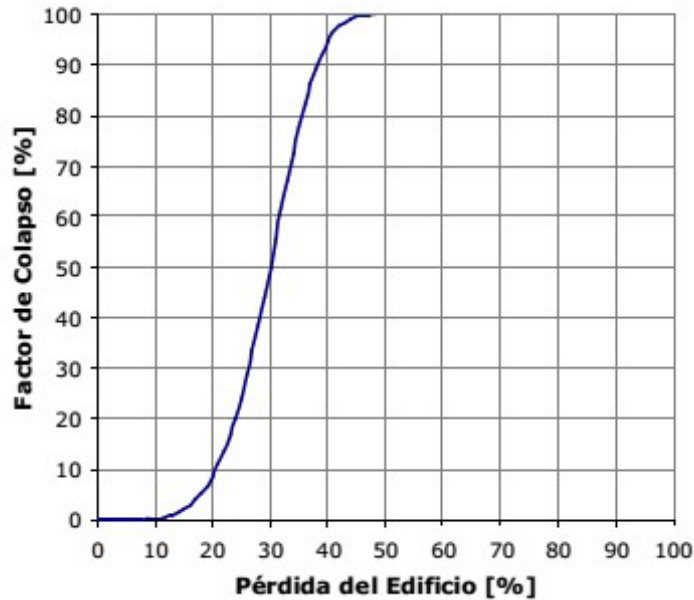


Figura 11. Factor de colapso(FC), dada la pérdida obtenida del estudio de riesgo sísmico [43].

2.6 Impacto socioeconómico asociado a daños por sismo

Alrededor de 250 a 300 sismos fuertes se registran cada año alrededor del mundo, de los cuales 100 generan daño significativo. Los habitantes de los países afectados son sujetos a privación y desastre. Recientemente sismos en China, Haití, Chile, Japón, Nueva Zelanda e Italia, han tenido un alto impacto de pérdidas socioeconómicas en los habitantes y gobiernos. Datos históricos revelan que más de 13, 000 sismos fuertes, han causado alrededor de 8.5 millones de muertes y por arriba de \$4.3 trillones de dólares [51].

Tabla 8. Los diez principales sismos desde 1900, en función del número de damnificados [51].

Fecha	Localización	Damnificados
12 enero 2010	Puerto Príncipe, Haití	1, 500, 000 – 1, 800, 000
12 mayo 2008	Sichuan, China	4, 800, 000 – 11, 000, 000
26 mayo 2006	Yogyakarta, Indonesia	1, 845, 352
8 octubre 2005	Kashmir, Pakistán	3, 500, 000
26 diciembre 2004	Tsunami en el Océano Indico	1, 690, 000
26 enero 2001	Gujarat, India	1, 790, 000

27 julio 1976	Tangshan, China	2, 000, 000
31 mayo 1970	Ancash, Perú	1, 700, 000
22 mayo 1960	Tsunami de Chile	2, 000, 000
01 septiembre 1923	Great Kanto, Japón	3, 400, 000

Tabla 9. Los diez principales sismos desde 1900, en función de las pérdidas económicas y el PIB [51].

Posición	Sismo	Total pérdidas económicas (\$ billones dólares) 2012-HNDECI	Sismo	% PIB
1	Tohoku, 2011	329.0	Armenia, 1988	358.9
2	Great Kanto, 1923	274.7	Managua, 1972	67.1 to 105
3	Sichuan, 2008	196.2	Cartago, 1910	90.0
4	Great Hanshin, 1995	190.6	Concepción, 1906	55 a 82.9
5	Fukui, 1948	113.8	Haití, 2010	70.0
6	Northridge, 1994	79.8	Wallis/Futuna, 1993	54.0
7	Tangshan, 1976	60.4	Great Kanto, 1923	52.8
8	Irpinia, 1980	58.0	Nicaragua, 1931	51.0
9	San Francisco, 1906	55.5	Guatemala, 1976	50.3
10	Niigata, 2004	36.1	Maldives, 2004	46.0
10			Jamaica, 1907	46.0

HNDECI. Hybrid Natural Disaster Economic Conversion Index

Es importante señalar que los sismos no solo destruyen las edificaciones, si no que también la infraestructura, la economía, el medio ambiente en los que habitan las personas de quienes sus construcciones han sido afectadas, en ese sentido se ha hecho un gran esfuerzo por recabar los registros históricos de sismos en bases de datos, tal como: Centro Nacional de Desastres Geofísicos (NGDC); Evaluación Global Rápida de Respuesta por Sismos (PAGER); Catalogo Utsu; Base de datos de Emergencia por Desastres y MunichRE NATCAT [51], sin embargo no habido trabajo suficiente en la corrección y validación de los errores en los registros que se han tomado, si bien es cierto que los movimientos del suelo por sismo, juegan un

papel importante, también los efectos secundarios lo tienen como por ejemplo los tsunamis, el fuego, deslizamientos, licuefacción, ruptura de falla.

De esta manera, mediante el modelo de Evaluación Global Rápida de Respuesta por Sismos (PAGER), sistema de estimación de pérdidas por sismo diseñada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), que a través del Centro Nacional de Información de Sismos (NEIC), localiza, evalúa y divulga la información mediante el Servicio de Notificaciones de Sismos (ENS), que a su vez, mediante un esquema de Escala de Impacto por Sismo (EIS), contribuye a organizar información cuantitativa en información cualitativa. De septiembre del 2010 a septiembre del 2011 el equipo de PAGER analizó 746 sismos, de los cuales en 39 se publicó una alerta amarilla o mayor, indicando una pérdida económica de al menos un millón de dólares (USD) y al menos una persona fallecida; y en los 707 restante se tuvieron alertas verdes, los cuales no generaron preocupación en los tomadores de decisiones [52]. En la tabla 10, se muestra una lista de sismos con pérdidas económicas estimadas y reportadas con los sismos más representativos en el periodo 2010-2011.

Tabla 10. Estimaciones de pérdidas económicas producida por PAGER, 2010-2011 [52].

Sismo	Pérdidas reportadas (R) (USD)	Pérdidas estimadas (E) Basadas en mapas de movimiento USD	% R / E
Haití, M=7.0, 12 enero del 2010	7.8 billones	3.0 billones	1.43
Chile, M= 8.8, 24 septiembre del 2010.	30 billones	15.0 billones	2.0
Canterbury, Nueva Zelanda, M= 7.0, 3 septiembre del 2010.	2.2 a 2.9 billones	2.0 billones	1.10 a 1.45

Christchurch, Nueva Zelanda, M=6.1, 22 febrero del 2011.	16.5 to 25 billones	37 billones	0.45 to 0.68
Tohoku, Japón, M=9.0, 11 de marzo del 2011.	Al menos 77 billones	31 billones	2.48
Christchurch, Nueva Zelanda, M=6.0, 13 de junio del 2011.	4.83 billones	4.0	1.21
Eastern Turquía, M=7.1, 23 de octubre del 2011,	500 millones a 1 billón	2.0 billones	0.25 a 0.50
Virginia, USA, M=5.8, 23 de agosto del 2011.	200 a 300 millones	236 millones	0.85 a 1.27
Bologna, al norte de Italia, M= 6.0, 20 de mayo del 2012.	Al menos 626 millones	Al menos 2 billones	0.31

2.7 Consideración de los indicadores socioeconómicos

Los criterios para realizar evaluaciones socioeconómicas del impacto por sismo en general están orientados bajo dos criterios, el primero de ellos está asociado a estimar el costo del daño de la infraestructura afectada y el segundo criterio, es la estimación del número de muertes, tal como lo establece PAGER [52], en el caso de la metodología empleada en este apartado para el presente proyecto de tesis, de manera similar como lo establece PAGER, en donde el daño de la infraestructura y la afectación a la población ocupante, particularmente en las viviendas de uno y dos niveles, está asociado al nivel socioeconómico de la zona de análisis, definidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) mediante el Modulo de Condiciones Socioeconómicas y la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2010 (MCS-ENIGH 2010) en cuanto a la dotación de servicios, conservación de la infraestructura, calidad y espacios en la vivienda [53][54]; estado

físico de la vivienda, definido como estructura nueva, seminueva y deteriorada, de acuerdo con el Inventario Nacional de Viviendas de INEGI [55], tamaño en metros cuadrados y número de niveles o pisos; costo actual promedio de la construcción por metro cuadrado; promedio de número de personas ocupantes de viviendas, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda, 2010 [56].

3. Metodología de análisis

3.1 Peligro sísmico regional y local.

Para la determinación del peligro sísmico o amenaza sísmica existen varios modelos computacionales y aplicaciones en software para la evaluación de la amenaza sísmica de una zona, tales modelos computacionales se basan en la metodología del Análisis de la Probabilidad del Peligro Sísmico (PSHA), con los que se asocian las fuentes sísmicas, sismicidad y relaciones de atenuación de movimiento fuerte [57], en la tabla 9

Tabla 11. Modelos para el cálculo del peligro sísmico a nivel mundial [57].

Programa	Descripción	Método de cálculo	Referencia
EZ-FRISK	Programa de cálculo de amenaza	- Amenaza sísmica: PSHA - Respuesta local de suelos: método lineal equivalente.	Risk Engineering Inc. http://www.ez-frisk.com
HAZUS-MH	Programa de cálculo de riesgos por diversas amenazas naturales (sismo, huracán, e inundación)	PSHA*	FEMA http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/
OpenSHA	Sistema de código Open Source para el cálculo de amenaza sísmica.	PSHA	USGS-SCEC http://www.opensha.org/

CRISIS2007	Sistema para la integración de la amenaza sísmica en una zona determinada. Permite la definición de fuentes, sismicidad, atenuación y sitios de análisis.	PSHA/DSHA	Instituto de Ingeniería. UNAM
PAGER	Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response. El Sistema PAGER provee estimativos del número de personas y poblaciones expuestas a movimientos fuertes del terreno como consecuencia de eventos sísmicos importantes.	DSHA*. El sistema emite un reporte pasados pocos minutos después de la ocurrencia del sismo, en el cual se indican las principales poblaciones expuestas, y la amenaza en cada una, en términos de una Intensidad de Mercalli Modificada.	USGS. Earthquake.usgs.gov/eqcenter/pager
SEISMOCARE	Sistema GIS para el cálculo de amenaza sísmica por escenarios a nivel de ciudades o zonas pobladas. Permite la realización de cálculos estimativos de riesgo, con facilidades en la definición de bases de infraestructura en exposición.	DSHA	

*PSHA. Análisis de probabilidades de riesgo por sismo.

*DSHA. Análisis Determinístico de riesgo por sismo.

La propuesta para el cálculo de peligro sísmico en la región Mexicali – Tijuana, B.C, fue utilizar el modelo CRISIS2007, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por Mario Ordaz, A. Aguilar y J. Arboleda, que de acuerdo a la tabla 9, es un modelo que permite estimar e integrar la amenaza probabilista de una zona determinada, la definición de fuentes, sismicidad, atenuación y sitios de análisis, mediante la determinación de escenarios estocásticos en cualquier coordenada del área de estudio [58]

Asimismo, la modelación de la amenaza se basa en la integración de frecuencias de ocurrencia de cualquier parámetro de intensidad sísmica, para la que exista una ley de atenuación en función de la distancia y magnitud sísmica. Requiriéndose para ello una caracterización regional en la zona de estudio de las fuentes sísmicas principales en términos de magnitud mínima de análisis, magnitud última, frecuencia de ocurrencia de eventos con la magnitud mínima y pendiente de la curva de recurrencia [58].

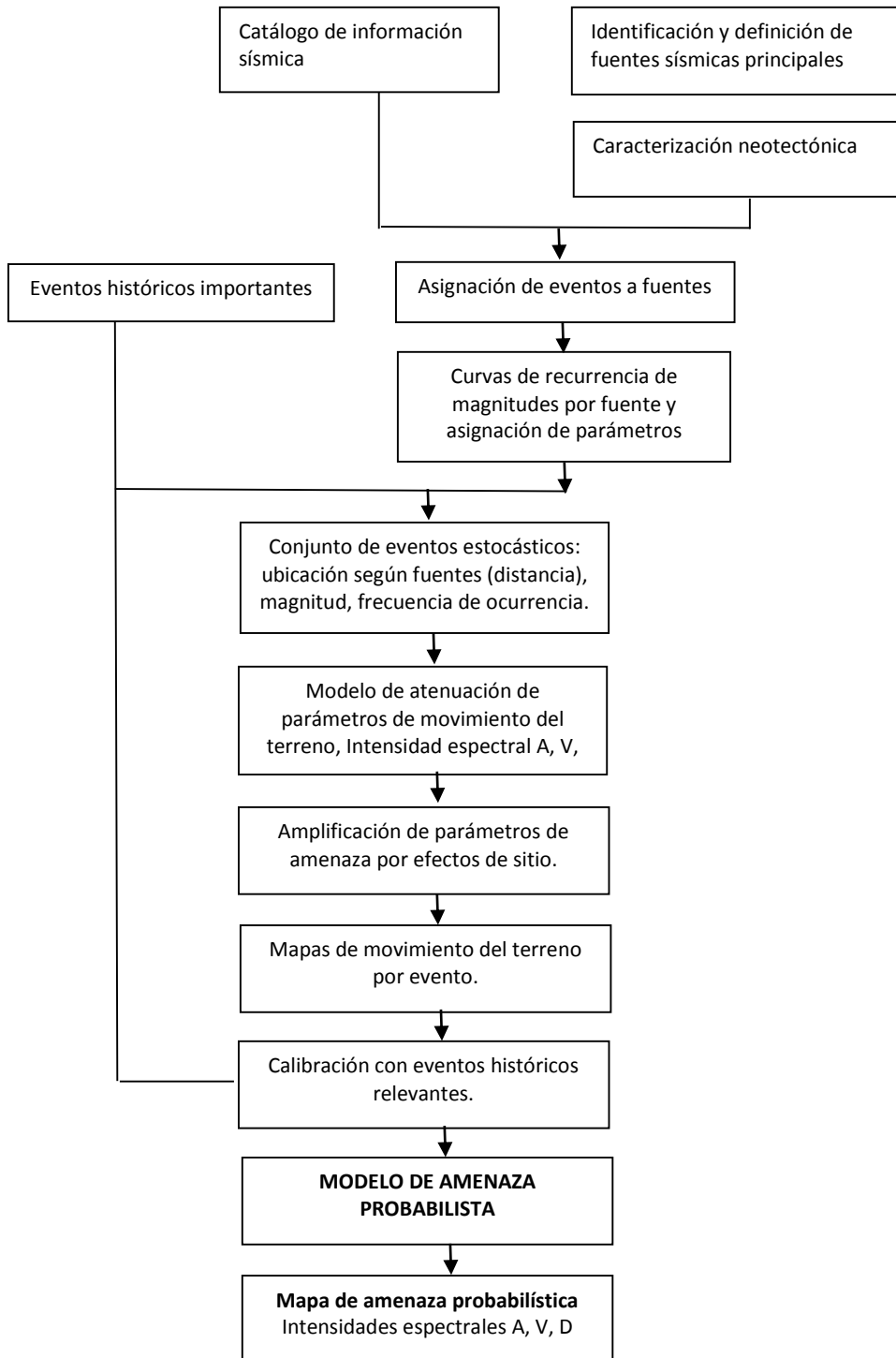


Figura 12. Diagrama de flujo del CRISIS2007 [58].

Con base en los escenarios por sismos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) con los que describe el movimiento de suelos esperados y efectos de

ciertos sismos grandes hipotéticos, mediante mapas generados por método determinístico de probabilidad de riesgo sísmico (DSHA). Los cuales han sido generados para planear y coordinar la respuesta de emergencia por parte de los administradores de los servicios públicos y emergencia, otras instituciones, en la realización de simulacros basados en situaciones realistas de sismos [59], se identificaron las principales fuentes sísmicas con probabilidad de sismos grandes cercanas a la Ciudad de Tijuana, Tecate, Mexicali, y Ensenada B.C, las cuales se señalan en la tabla 10, y fig. 9,

Tabla 12. Fuentes sísmicas consideradas en modelo CRISIS2007 [59].

No.	Falla	Magnitud	Profundidad (km)	Localización		Fecha de escenario
				Latitud	Longitud	
1	Coronado Bank	7.4	7.2	33.28 N	117.92 W	10 octubre 2012
2	Rose Canyon	6.9	6.4	32.59 N	117.15 W	10 octubre 2012
3	Laguna Salada	7.3	10.4	32.19 N	115.18 W	10 octubre 2012
4	Imperial	7.0	11.0	32.74 N	115.40 W	10 octubre 2012
5	San Jacinto: Coyote Creek + Borrego +Superstition Mountain: San Jacintocc+b+sm	7.3	11.4	33.47 N	116.54 W	10 octubre 2012
6	San Jacinto: San Bernardino + SJ Valley + Anza + Clark: San Jacintos bv+sjv+a+c	7.7	13.6	34.25 N	117.50 W	10 octubre 2012

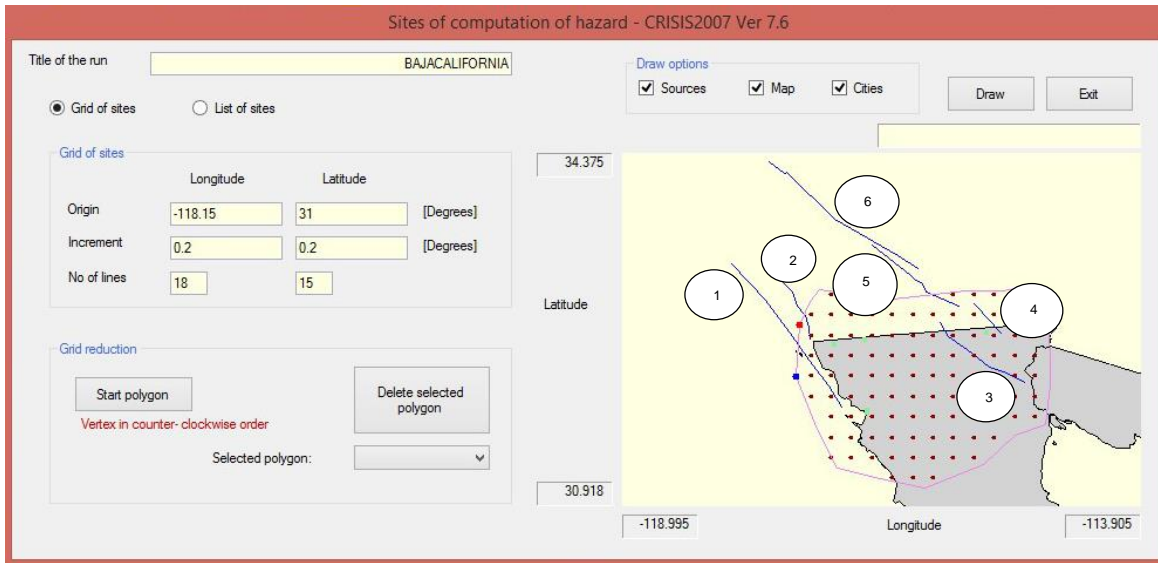


Figura 13 Fuentes sísmicas consideradas de acuerdo a tabla 10 en Modelo CRISIS2007

De acuerdo con la tabla 3, los parámetros definidos para el apartado de sismicidad dentro de CRISIS2007, se consideraron los siguientes parámetros por tipo de fuente sísmica, tabla 11, fig. 10,

Tabla 13. Parámetros de sismicidad para CRISIS2007

Fuentes sísmica	$\lambda_0(\frac{1}{\text{año}})$	$E(\beta)$	$C(\beta)$	$E(M_u)$	$\sigma(M_u)$	M_0
1, 2	1.14	0.97	0.10	5.81	0.01	4.5
3, 4, 5	2.51	1.78	0.09	7.74	0.21	4.5

La ley de atenuación utilizada para el modelo está basada en la propuesta por Abrahamson-Silva 1997 [15], dada por la ec 18.

Ec. 20. Ley de atenuación utilizada en CRISIS2007 [15].

$$\ln S_a(g) = f_1(M, r_{rup}) + F f_3(M) + HW f_4(M, r_{rup}) + S f_5(pga_{rock})$$

De donde:

$S_a(g)$ es la aceleración espectral en g .

M es la magnitud momento.

r_{rup} es la distancia cercana al plano de ruptura en km.

F es el tipo de falla, 1 para falla inversa, 0.5 para la falla inversa-oblicua, 0 para otro tipo de falla.

HW es la variable en el caso de que la falla se tenga un bloque que se levanta en el caso de liberación de energía, 1 para sitios donde el bloque se levanta, 0 en otro caso.

S es la variable para el tipo de sitio, 0 para sitios con roca o suelo superficial, 1 para suelos de espesores grandes.

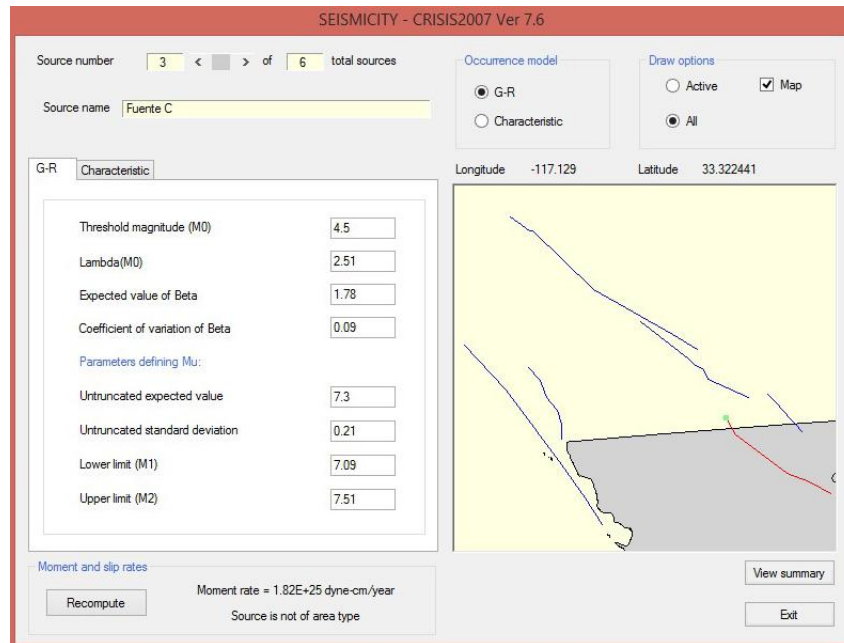


Figura 14. Parámetros de sismicidad para las fuentes 3, 4 y 5 en CRISIS2007

Para el caso del espectro de respuesta, se consideró 10 ordenadas espectrales, con periodos de vibración desde 0 segundos, hasta 4 segundos, con un rango de intensidades de 1 hasta 2000 gals (cm/s^2), asimismo, los valores para los parámetros de integración con un rango de 3 a 500 km, y periodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años, y con una distancia de desprendimiento de la energía de tipo focal.

3.2 Comportamiento estructural de viviendas y sus funciones de vulnerabilidad.

Los sistemas constructivos considerados en este proyecto de tesis, corresponden a viviendas de uno y dos niveles, a base de mampostería, principalmente block de concreto, no confinados, con losa de azotea y entrepiso a base de 10 cms, de espesor, aligerada de 20 cms., a base de vigueta y poliestireno y en otros casos cubierta de madera, para las zonas urbanas de Tijuana y Mexicali. Las cuales fueron categorizados conforme al modelo de generación de funciones de vulnerabilidad ERN.Vulnerabilidad v2.0 [43] y al modelo probabilista de riesgos naturales a nivel global [44], tabla 12, en la cual se observa que se consideraron 6 tipos de vivienda, clasificados como Sistema Constructiva de tipo alto, medio y muy bajo, en relación a la integridad estructural.

Tabla 14. Parámetros utilizados para la generación de funciones de vulnerabilidad [43][44][60][61]

Parámetro	Tipo de vivienda					
	Viv. 01	Viv. 02	Viv. 03	Viv. 04	Viv. 05	Viv. 06
Cond. Sociecon.	Baja	Baja	Media	Media	Alta	Alta
F. Vuln.	S_MS- FLSB- 2_1L	S_MS- FLSB- 2_2L	S_MS- FLSB- 2_1M	S_MS- FLSB- 2_2M	S_MS- FLSB- 2_1H	S_MS- FLSB- 2_2H
H (m)	3.0	6.0	3.0	6.0	3.0	6.0
Te	0.3	0.45	0.2	0.27	0.11	0.15
Cs	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
g (γ)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
l (λ)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
m (μ)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
a1 (α_1)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
a2 (α_2)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Da_p	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
g_p	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Da_u	1	1	1	1	1	1
g_u	5	5	5	5	5	5

Ah	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Np	1	2	1	2	1	2
Alpha_m (α)	1.899	1.899	1.899	1.899	1.899	1.899
A_m (a)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Do	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Vmax	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063

Por otro lado, considerando que el parámetro de peligro sísmico que se utilizara es la aceleración espectral elástica con amortiguamiento con respecto al crítico del 5%, para diferentes periodos estructurales, asimismo las funciones de vulnerabilidad ante sismo deben establecer la relación entre la aceleración espectral elástica y la relación media del daño (RMD) para cada tipo constructivo [44].

De donde,

H (m), Altura total de la edificación (m).

Te, Periodo para el modo fundamental de la estructura (segundos).

Cs, Coeficiente de diseño sísmico (porcentaje de la masa del edificio).

g (γ), Factor de sobre esfuerzo de fluencia sobre el esfuerzo de diseño.

I (λ), Factor de sobre esfuerzo último sobre el de fluencia.

m (μ), Ductilidad, factor de comportamiento sísmico.

a1 (α_1), Relación de participación de la masa para el modo no lineal.

a2 (α_2), Porcentaje de participación de la altura total de la edificación para el desplazamiento modal.

Da_p, Daño en la fluencia.

g_p, Curvatura entre daño mínimo y el punto de fluencia.

Da_u, Daño último.

g_u, Curvatura entre daño mínimo y el punto de daño último.

Ah, Altura de entrepiso(m).

Np, Numero de pisos.

Alpha_m (α), Parámetro adimensional que representa el comportamiento de la estructura (flexión pura o cortante puro).

$A_m(a)$, Parámetro adimensional que determina la forma de la carga horizontal.

D_o , Daño para la máxima desviación.

V_{max} , Desviación máxima.

la propuesta de los valores T_e , está hecha en función de la instrumentación realizada en un fraccionamiento al noreste de la Ciudad de Mexicali, donde los valores para distintas condiciones de integridad de daño en viviendas de 2 niveles, construidas a base de mampostería [62], tabla 14,

Tabla 15. Periodos fundamentales de vibrar, del suelo y vivienda [62]

Edificación o medio	T_0, T_E	T_0, T_E
	Sept. 2013 (segundos)	Nov. 2015 (segundos)
1. Suelo	$T_0 = 0.44$	
2. Vivienda rehabilitada	0.14	0.63
3. Vivienda no dañada aparentemente	0.27	0.33
4. Vivienda dañada 01, conf. I	0.19	0.54
5. Vivienda dañada 02, conf. II	0.30	0.49
6. Vivienda dañada 03, conf. III	0.30	0.49

El modelo empleado para la elaboración de funciones de vulnerabilidad tanto físicas y humanas, denominado ERN-Vulnerabilidad, fig. 12., es un sistema que permite establecer la relación de RMD y PIS para diferentes tipos constructivos, y ante el efecto de diferentes amenazas naturales en el caso de las funciones de vulnerabilidad físicas, para el caso de las funciones de vulnerabilidad humana, como se señala en el apartado 2.5.2 está en función de los ocupantes, atrapados, factor de colapso, fig. 14. El modelo permite generar funciones de vulnerabilidad sísmica a partir de curvas de capacidad de cualquier tipo constructivo [43].

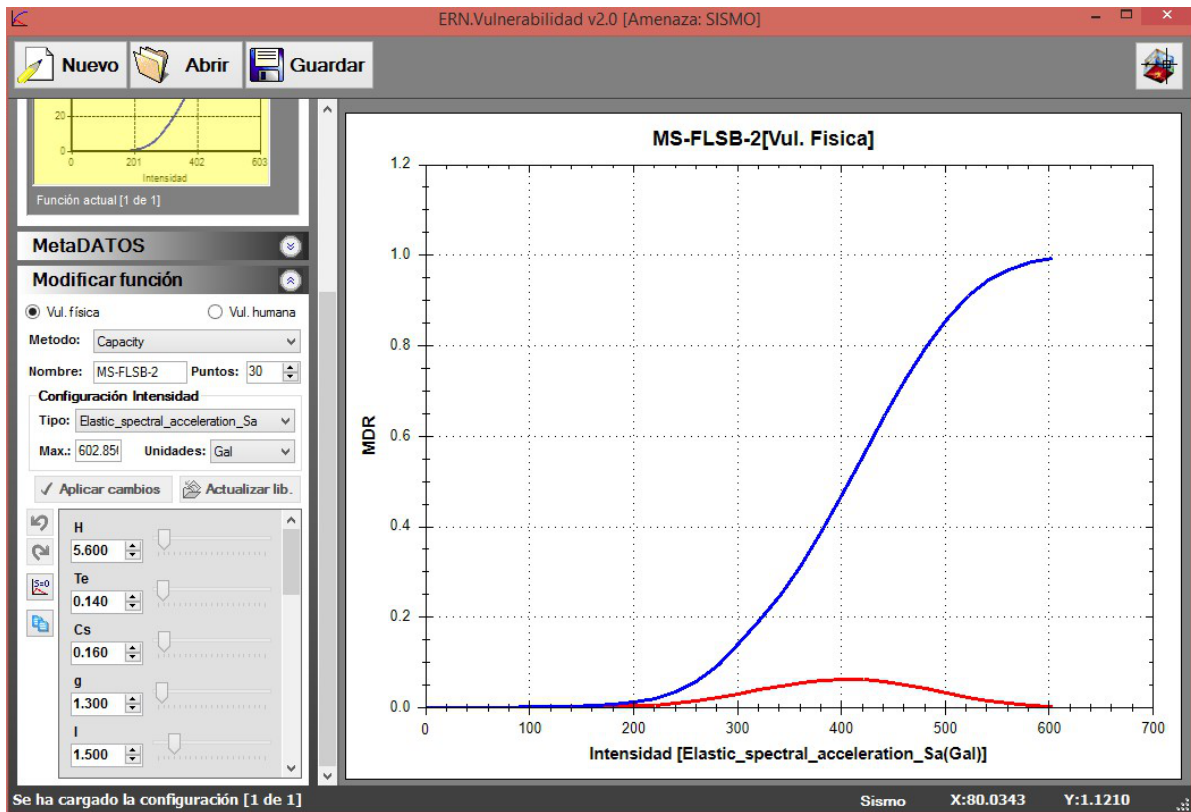


Figura 15. Función de vulnerabilidad para un sistema constructivo de mampostería, en ERN-Vulnerabilidad v2.0

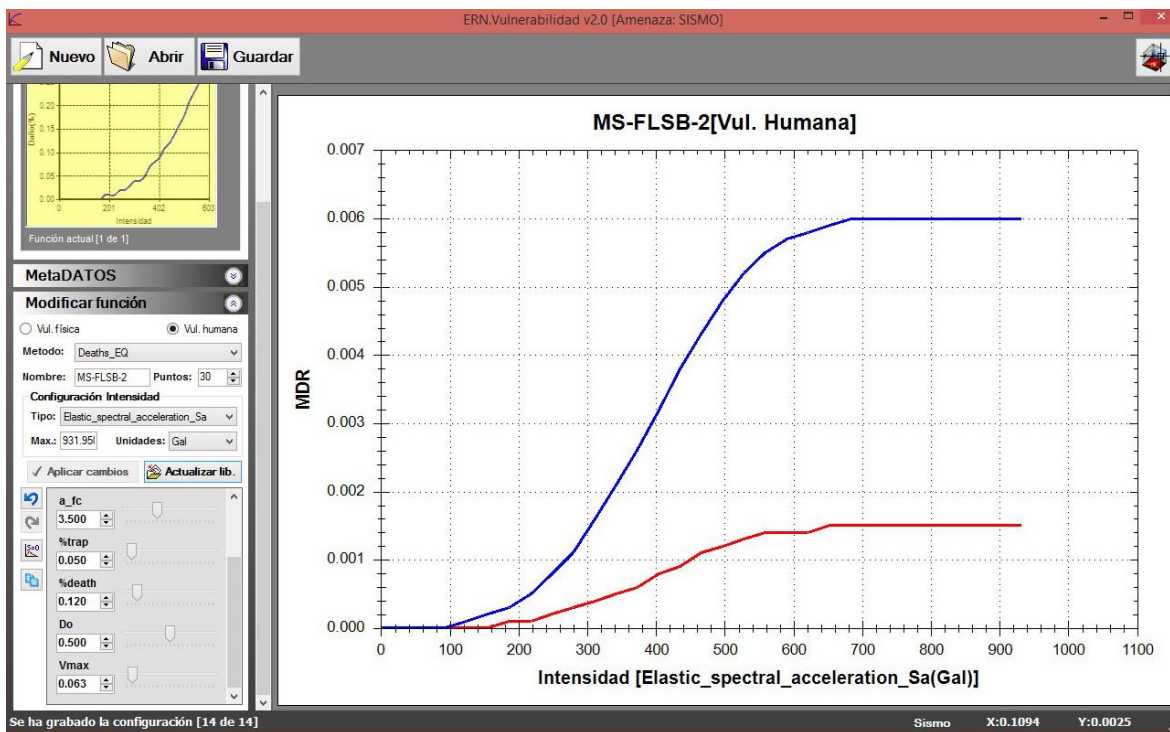


Figura 16. Función de vulnerabilidad humana, asociada a un sistema constructivo de mampostería, generada en modelo ERN-Vulnerabilidad v2.0.

3.3 Indicadores socioeconómicos

Los parámetros involucrados en el análisis de impacto socioeconómico por manifestación de sismos, se establecen en términos de las variables involucradas en cuantificar el daño a la infraestructura y a la afectación de la población ocupante, estos constituyen lo que se conoce como valores de exposición. Estos valores se obtienen de fuentes secundarias de datos disponibles como bases de datos existentes o como el resultado de aplicar procedimientos simplificados basados en información macroeconómica y social general, tales como, densidad de la población, estadísticas de construcción o información más específica [46]. Con la información disponible se construye una base de datos basada en un Sistema de Información Geográfica, y se completa con la información específica requerida. La exposición también se puede construir usando imágenes de teledetección remota y digitalización de polígonos, líneas, puntos. Adicionalmente, la base de datos de exposición se puede crear usando la información catastral [42].

Los valores de exposición para la zona urbana de Tijuana y Mexicali, se obtuvieron con base en definir la categoría socioeconómica por cada zona de estudio, tamaño de las construcciones, condición física, en función de sus edad, el uso de la edificación, costo por metro cuadrado, el número de personas ocupantes de cada vivienda, de acuerdo con la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), particularmente del Inventario Nacional de Viviendas, y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), a través del Módulo de Condiciones Socioeconómicas(MCS-ENIGH), para este estudio, el análisis se propuso realizarlo a nivel de Unidad Geoestadística Básica (AGEB) en el caso de Mexicali, así como a nivel lote en el caso de Tijuana, con información proporcionada por la Dirección de Catastro del Municipio de Tijuana, esta información se organizó conforme se indica en la tabla 16,

Tabla 16. Parámetros requeridos y arreglo para archivos de exposición

FID	Shape	Admapkey	ID	área	ID_POL	N	E	Cat Soec.	Uso	Val Físico	Val Hum	Se_Sismo	Área de planta
-----	-------	----------	----	------	--------	---	---	--------------	-----	---------------	------------	----------	-------------------

Para la definición de la categoría socioeconómica en cada uno de los AGEBS o manzanas, en recorridos de campo y apoyo de plataforma satelital, de acuerdo con CONEVAL e Inventario Nacional de Viviendas, se definieron tres categorías: zona alta, media o baja, principalmente en función del Índice de Marginación Urbano (IMU); el tamaño de las construcciones se determinó en base a levantamientos topográficos en campo y gabinete, al igual que las áreas de planta, numero de niveles; en función del aspecto físico y estructural se definió cualitativamente la vivienda en nueva, seminueva y deteriorada o vieja. Para la determinación del costo de la vivienda actual, se utilizó el costo paramétrico proporcionado por NEODATA, para una vivienda de interés social [63]; finalmente la determinación del número de personas ocupantes de cada vivienda está basada en el Inventario Nacional de Viviendas.

3.4 Integración del peligro sísmico, comportamiento estructural y aspectos socioeconómicos.

Una vez que en el apartado de peligro sísmico se han desarrollado los escenarios con base a las fuentes sísmicas de mayor potencial de liberación de energía, de acuerdo con los Centros de Monitoreo de Sismicidad. En el caso de este proyecto de investigación la sismicidad se integró en base a la propuesta del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) [64], quienes han realizado escenarios propios por cada fuente sísmica considerada en este estudio. Asimismo, de acuerdo con la tipología de la vivienda de uno y dos niveles hecha para Tijuana y Mexicali, la revisión de su comportamiento estructural y la elaboración de las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, a partir de definir parámetros de propiedades mecánicas, dinámicas, tales como, módulos de elasticidad, rigideces, periodos de vibrar, desplazamientos, efectos de sitio dados por las aceleraciones del suelo, aunado una estructura predefinida de funciones de vulnerabilidad que contempla daño en edificaciones y afectación en la población, se generó un código de identificación para cada tipo de vivienda, requerido para asociar la vulnerabilidad con los indicadores socioeconómicos, y estos a su vez integrados al peligro sísmico bajo el esquema de los escenarios posibles, a esta integración de valores se les ha denominado como archivo de exposición.

3.5 Modelación probabilística del riesgo por sismo.

La modelación de los riesgos por sismo en el presente proyecto de tesis fue desarrollada en la plataforma de Evaluación Probabilista del Riesgo de Desastres (CAPRA), la cual es una iniciativa del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (Cepredenac), la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR) de las Naciones Unidas, Iniciativa Global para la Reducción de Desastres y Recuperación (GFDRR), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Grupo de Gestión del Riesgo de Desastres del Banco Mundial para América Latina y el Caribe [65]. CAPRA cuantifica las pérdidas potenciales causadas por sismos, está construido mediante

el peligro sísmico, vulnerabilidad de las construcciones y archivos de exposición [42], los resultados de riesgo son presentados en términos de pérdidas probables, que corresponden al punto de partida básico para el desarrollo de estudios de protección financiera de entidades territoriales y administrativas, estudios de relación beneficio costo para validación financiera de medidas de mitigación, planes de ordenamiento territorial de ciudades o zonas, sistemas de alerta temprana, en general aplicaciones propias de la gestión del riesgo [58]. La colección de escenarios posibles de ocurrencia de un evento natural, se considera que son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.

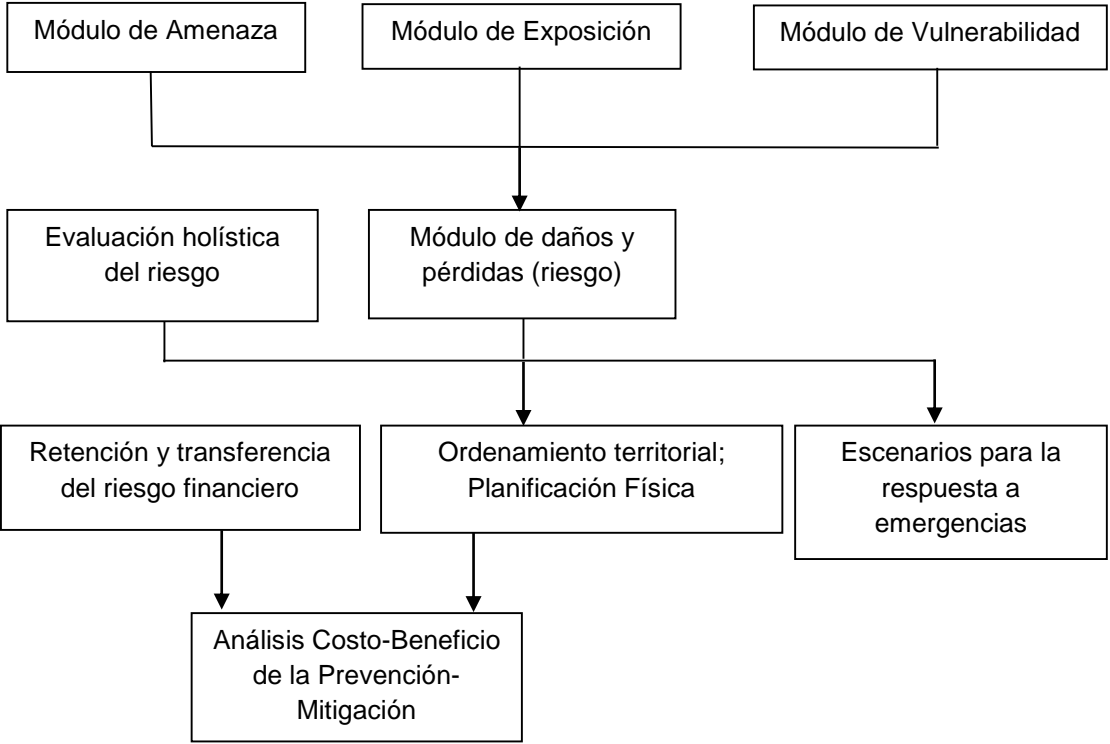


Figura 17. Modelo Probabilista de Riesgo (CAPRA) y aplicaciones para la gestión del riesgo de desastre [42].

La característica de mutuamente **excluyentes** se refiere a que un evento natural puede ocurrir como lo indica el escenario 1 de la colección, o como lo indica del escenario 2, pero no como lo indican ambos al mismo tiempo, es decir, dos escenarios que formen parte de la colección no pueden ocurrir al mismo tiempo. En

el caso de mutuamente **exhaustivos**, se refiere a que la colección de escenarios es completa en el sentido que el evento natural no puede ocurrir de ninguna manera diferente a las descritas en los escenarios de la colección [58].

Con base en el modelo CAPRA, fig. 17, el archivo de peligro sísmico utilizado para la región corresponde a la sismicidad dada por seis fuentes propuestas por USGS como potenciales a liberar energía en un periodo menor a 30 años [14], considerando cuatro ciudades: Tijuana, Tecate, Mexicali y Ensenada, B.C., con un rango de periodos 0.0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 segundos en los espectros de respuesta, periodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años, fig. 18.

En el apartado de vulnerabilidad 3.2.1 se consideraron seis tipos de viviendas de uno y dos niveles, con características de vivienda nueva, seminueva y vieja o deteriorada, zona socioeconómica donde se localizan, fig. 19; con lo que respecta al archivo de exposición, de las consideraciones hechas en las edificaciones para el apartado de vulnerabilidad, en el archivo de exposición se asocian en cada vivienda con una función de estimación del daño físico y humano, fig. 20.

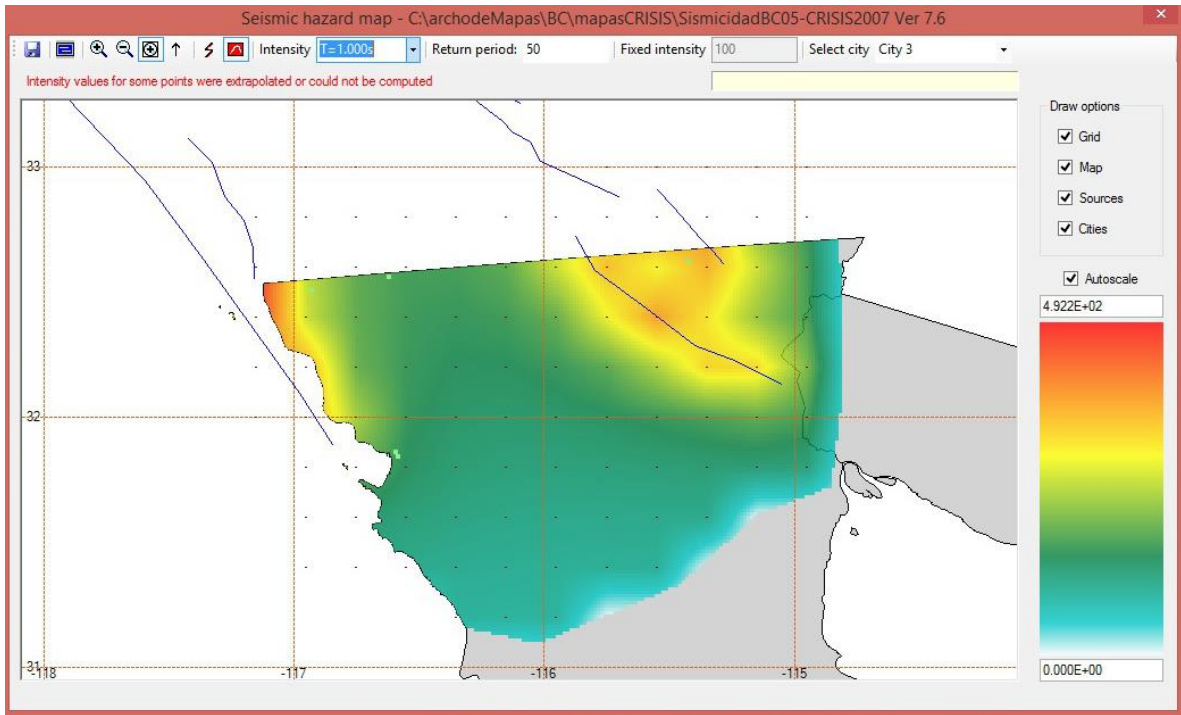


Figura 18. Peligro sísmico en la región Tijuana-Mexicali. $T = 1$ seg., Período de retorno = 50 años, elaborado en CRISIS2007. Elaboración propia.

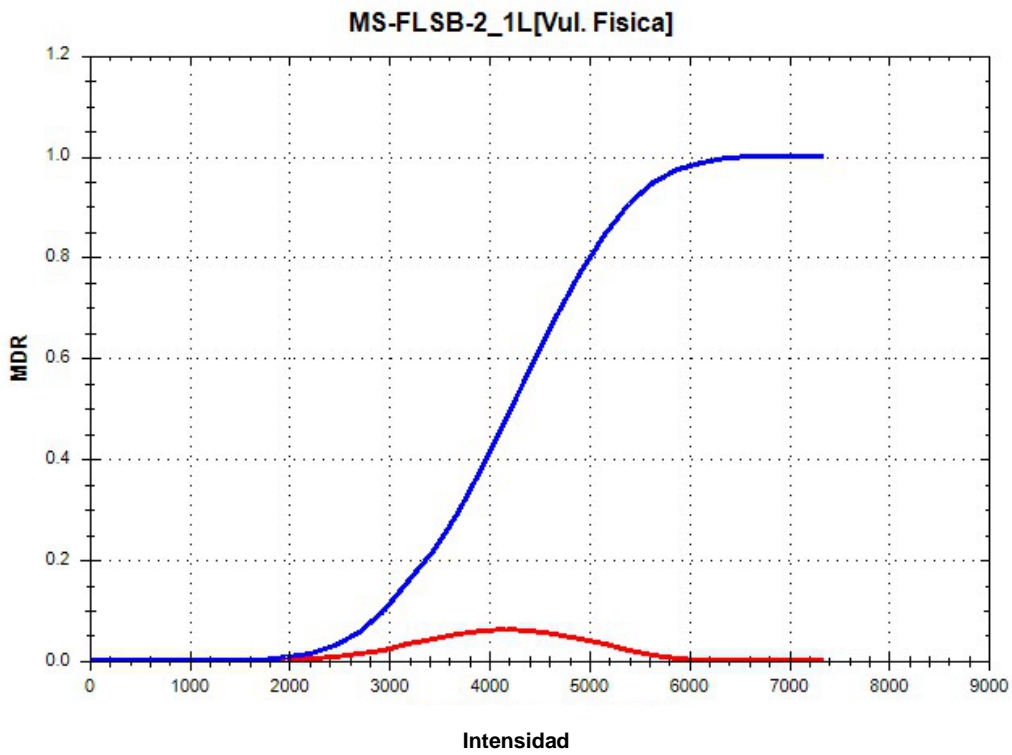


Figura 19. Función de vulnerabilidad dado para una vivienda de 1 nivel y deteriorada obtenida mediante ERN Vulnerabilidad. Elaboración propia.

FID	Shape *	CLAVE	FID_1	ADMAPKEY	ID	AREA	ID_POL	NUM_PISOS	EDAD	CAT_SOEC	USO	VALFIS	VALHUM	SE_SISMO	AREA_PLANT
2638	Polygon	OE071003	263885	263886	263	204.38	OE071003	1	vieja	media	residencial	86722.65	2	S_MS-FLSB-2_1M	133
2638	Polygon	OE071002	263886	263887	263	194.19	OE071002	1	vieja	media	residencial	200831.4	4	S_MS-FLSB-2_1M	77
2638	Polygon	OE070028	263887	263888	263	196.79	OE070028	1	vieja	media	residencial	336457.8	4	S_MS-FLSB-2_1M	129
2638	Polygon	OE070027	263888	263889	263	201.66	OE070027	1	vieja	media	residencial	320808.6	4	S_MS-FLSB-2_1M	123
2638	Polygon	OE070026	263889	263890	263	204.82	OE070026	1	vieja	media	residencial	224305.2	4	S_MS-FLSB-2_1M	86
2638	Polygon	OE070025	263890	263891	263	199.25	OE070025	1	vieja	media	residencial	255603.6	4	S_MS-FLSB-2_1M	98
2638	Polygon	OE070024	263891	263892	263	200.03	OE070024	1	vieja	media	residencial	74985.75	2	S_MS-FLSB-2_1M	115
2638	Polygon	OE070023	263892	263893	263	205.31	OE070023	1	vieja	media	residencial	78898.05	2	S_MS-FLSB-2_1M	121
2638	Polygon	OE070022	263893	263894	263	196.7	OE070022	1	vieja	media	residencial	133018.2	4	S_MS-FLSB-2_1M	51
2638	Polygon	OE070021	263894	263895	263	201.74	OE070021	1	vieja	media	residencial	323416.8	4	S_MS-FLSB-2_1M	124
2638	Polygon	OE070019	263895	263896	263	200.06	OE070019	1	vieja	media	residencial	63900.9	2	S_MS-FLSB-2_1M	98
2638	Polygon	OE070018	263896	263897	263	197.05	OE070018	1	vieja	media	residencial	75637.8	2	S_MS-FLSB-2_1M	116
2638	Polygon	OE070017	263897	263898	263	196.07	OE070017	1	vieja	media	residencial	88026.75	2	S_MS-FLSB-2_1M	135
2638	Polygon	OE070016	263898	263899	263	206.8	OE070016	1	vieja	media	residencial	367756.2	4	S_MS-FLSB-2_1M	141
2638	Polygon	OE069030	263899	263900	263	194.65	OE069030	1	vieja	media	residencial	245170.8	4	S_MS-FLSB-2_1M	94
2639	Polygon	OE070014	263900	263901	263	232.71	OE070014	1	nueva	alta	residencial	138749.63	2	S_MS-FLSB-2_1H	175
2639	Polygon	OE070013	263901	263902	263	223.82	OE070013	1	vieja	media	residencial	316572	4	S_MS-FLSB-2_1M	80
2639	Polygon	OE070012	263902	263903	263	183.4	OE070012	2	vieja	media	residencial	743337	4	S_MS-FLSB-2_2M	285
2639	Polygon	OE070009	263903	263904	263	197.57	OE070009	1	nueva	alta	residencial	329827.68	4	S_MS-FLSB-2_1H	104
2639	Polygon	OE068028	263904	263905	263	202.91	OE068028	1	vieja	media	residencial	35862.75	2	S_MS-FLSB-2_1M	55
2639	Polygon	OE070008	263905	263906	263	202.68	OE070008	2	nueva	alta	residencial	577196.44	4	S_MS-FLSB-2_2H	182
2639	Polygon	OE070007	263906	263907	263	205.28	OE070007	1	nueva	alta	residencial	294942.06	4	S_MS-FLSB-2_1H	93
2639	Polygon	OE070006	263907	263908	263	200.63	OE070006	1	nueva	alta	residencial	202970.88	4	S_MS-FLSB-2_1H	64
2639	Polygon	OE070005	263908	263909	263	195.93	OE070005	1	nueva	alta	residencial	221999.4	4	S_MS-FLSB-2_1H	70
2639	Polygon	OE070001	263909	263910	263	788.36	OE070001	2	nueva	alta	residencial	218035.13	2	S_MS-FLSB-2_2H	275
2639	Polygon	OE069034	263910	263911	263	293.04	OE069034	1	vieja	media	residencial	156492	4	S_MS-FLSB-2_1M	60
2639	Polygon	OE069033	263911	263912	263	201.86	OE069033	1	vieja	media	residencial	93895.2	4	S_MS-FLSB-2_1M	36
2639	Polygon	OE069032	263912	263913	263	204.85	OE069032	1	vieja	media	residencial	88678.8	4	S_MS-FLSB-2_1M	34
2639	Polygon	OE069031	263913	263914	263	208.22	OE069031	1	vieja	media	residencial	148667.4	4	S_MS-FLSB-2_1M	57

Figura 20. Archivo de exposición de la Ciudad de Tijuana requerida por CAPRA. Elaboración propia.

4. Resultados

4.1 Peligro sísmico

De acuerdo con los resultados obtenidos de CRISIS2013, se obtuvieron un total de 252 escenarios, con un análisis para cuatro ciudades, Tijuana, Mexicali, Tecate y Ensenada. Se muestran los resultados de las Ciudades de Tijuana y Mexicali, dado que son las Ciudades donde se realizó el análisis probabilístico del riesgo.

En el caso de la Ciudad de Tijuana, de acuerdo con el análisis realizado con el modelo del Centro de Investigaciones de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) [66] y del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) [13], el rango de aceleraciones históricas del terreno en la región oscilan en un rango de 200 a

500 gales, con base en ello de acuerdo con las tasas de excedencia obtenidas con el análisis del peligro sísmico, los periodos de retorno en los que se pueden esperar esas aceleraciones en el caso de Tijuana es de entre 100 a 1000 años, en el caso de Mexicali los periodos de retorno están del orden de 10 a 1000 años; en cuanto a los espectros de respuesta, en el caso de Tijuana, se estiman aceleraciones de hasta 650 gales, en periodos menores a 1 segundo, con periodo de retorno de 50 años, en el caso de Mexicali se esperan más de 1000 gales para periodos menores a 1 segundo, un periodo de retorno de 50 años, fig. 21 y 22.

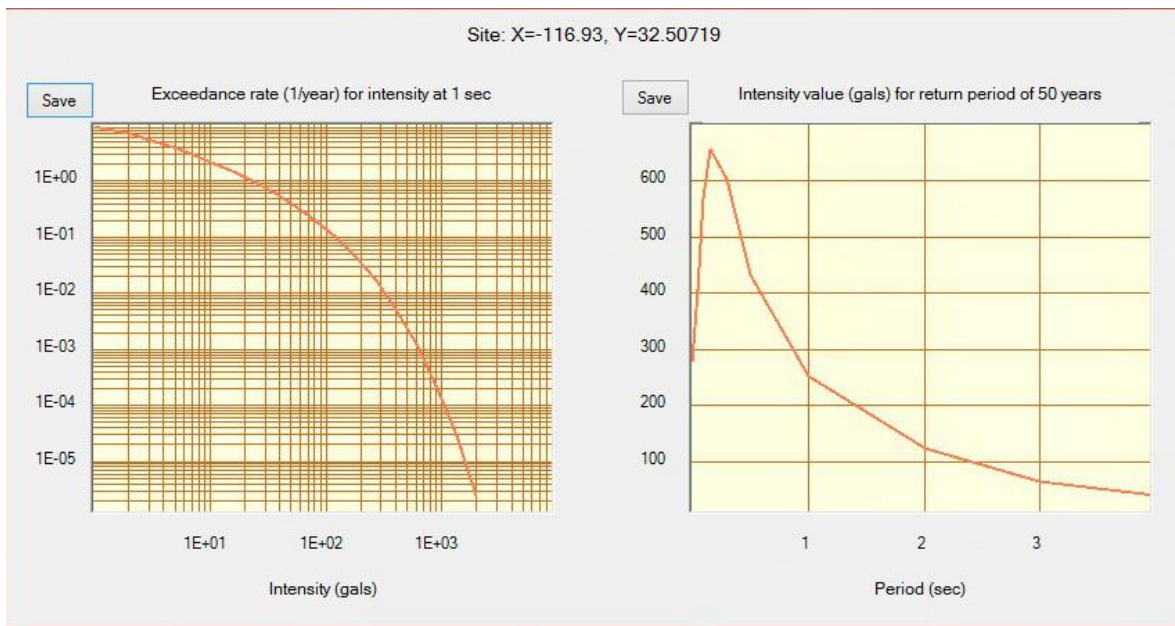


Figura 21. Tasas de excedencia y espectro de respuesta para la ciudad de Tijuana, B.C.

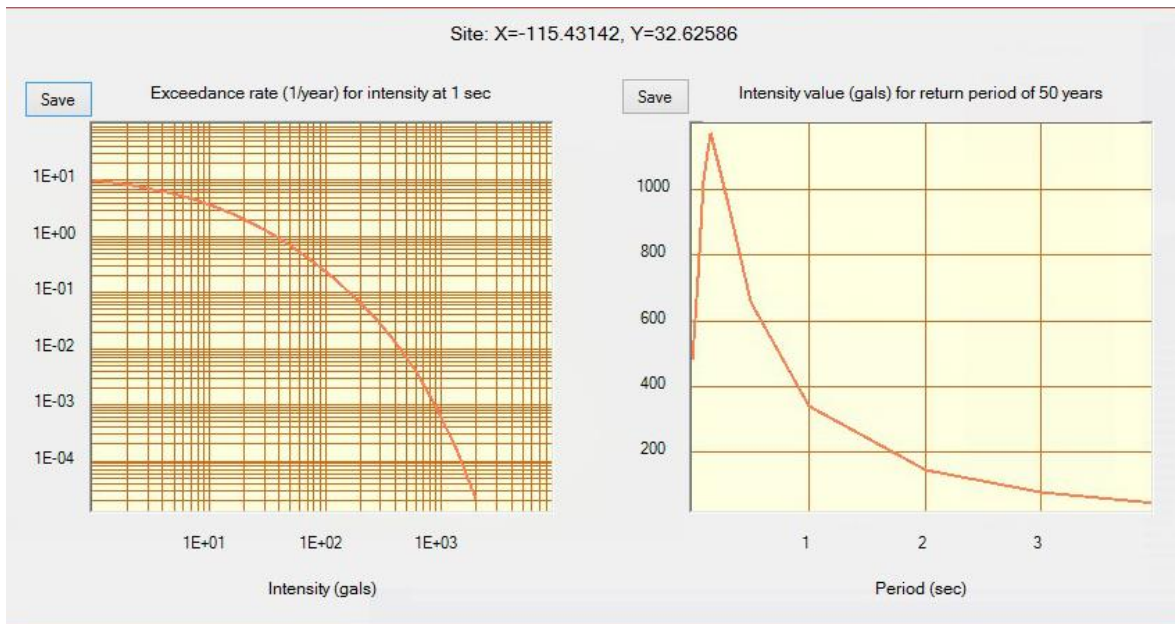


Figura 22. Tasa de excedencia y espectro de respuesta para la ciudad de Mexicali, B.C.

La mayor intensidad de aceleraciones de acuerdo con el mapa de peligro sísmico obtenido esta dado hacia el lado oeste de la ciudad de Tijuana, con aceleraciones de más de 492 gales, hasta 225 gales hacia lado este de la ciudad, fig. 23, para el caso de la ciudad de Mexicali, las mayores intensidades se dan en el este y oeste de la ciudad, con valores de al menos 400 gales, fig. 24.

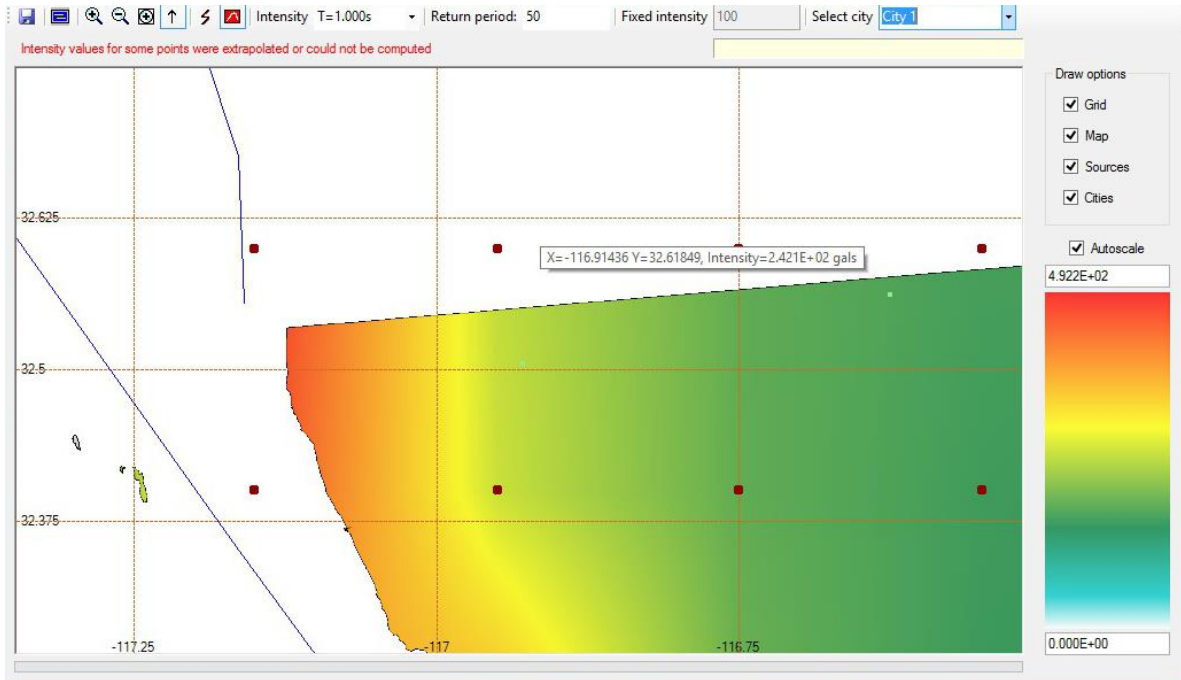


Ilustración 23. Peligro sísmico para la Ciudad de Tijuana, para un periodo(T) de 1 segundo y periodo de Retorno de 50 años.

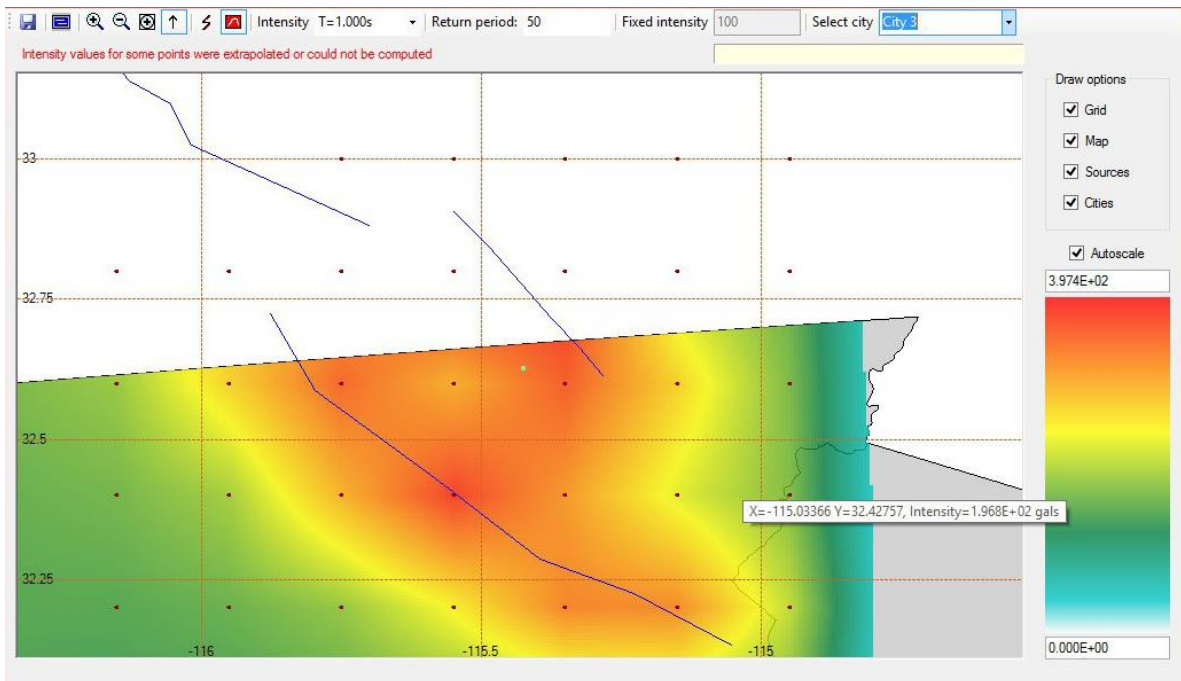


Figura 24. Peligro sísmico para la Ciudad de Mexicali, para un periodo(T) de 1 segundo y un periodo de retorno de 50 años.

4.2 Comportamiento estructural de viviendas

De acuerdo a la tipología de la vivienda hecha para la vivienda en Tijuana y Mexicali, tabla 14, los parámetros que mayor incidencia tienen en el comportamiento de la vivienda son: el periodo de vibrar, el coeficiente sísmico y las aceleraciones del terreno. De acuerdo con las aceleraciones históricas dadas, en referencia a los sismos del 4 abril del 2010 [5], y 15 de octubre de 1979[4], con fuentes sísmicas en la Falla Laguna Salada e Imperial, respectivamente, se esperan aceleraciones promedio de 200 a 500 gales, con daños mayores en viviendas de 1 nivel, de hasta un 30% de daño mayor, fig. 25 y 26.

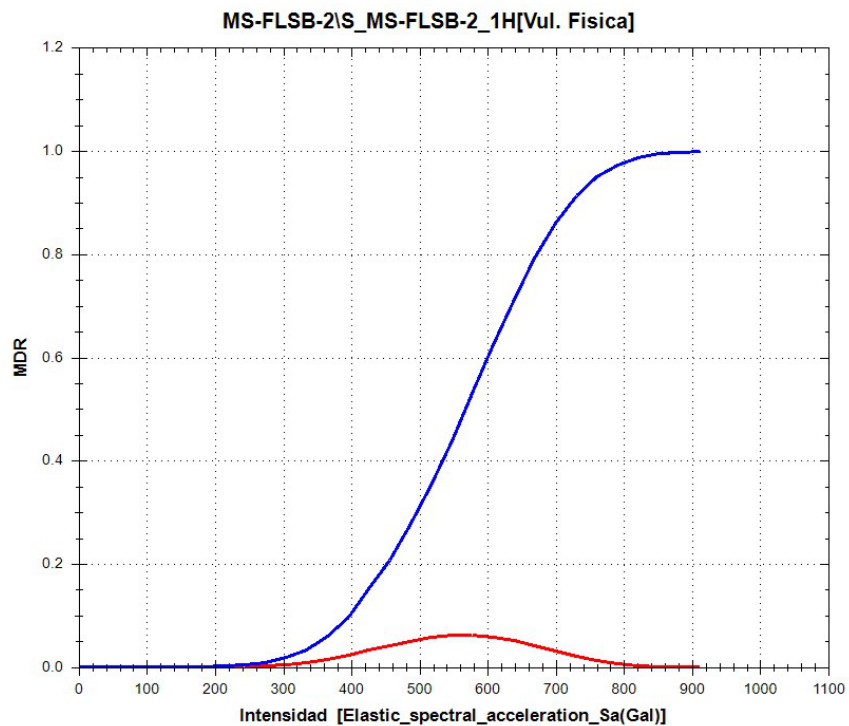


Figura 25. Función de vulnerabilidad, en una vivienda de 1 nivel, estado físico nuevo.

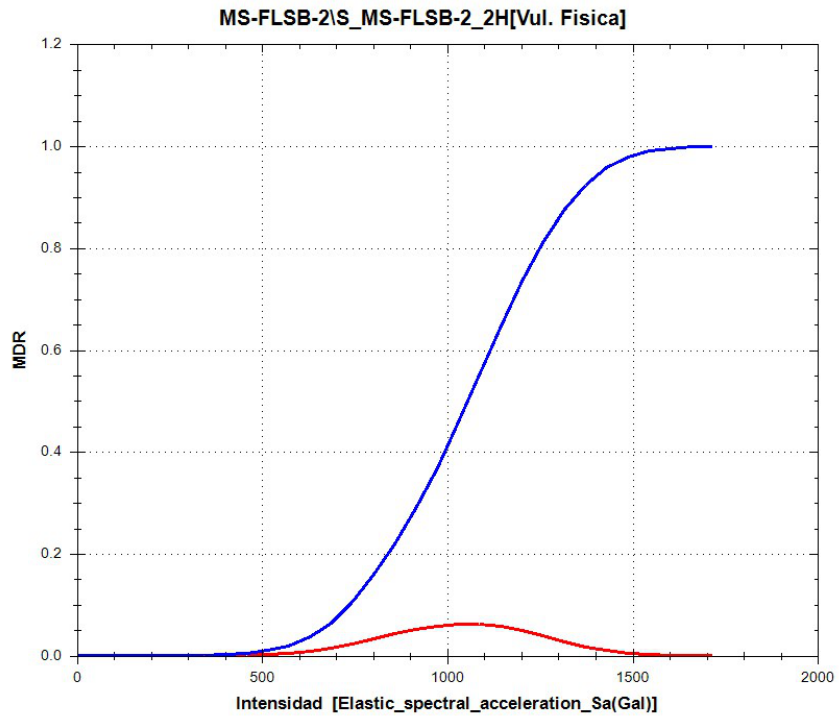


Figura 26. Função de vulnerabilidade, em uma vivienda de 2 niveles, estado físico nuevo.

4.3 Indicadores socioeconómicos

Para la Ciudad de Tijuana se logró conformar una base de datos de más de 280, 000 lotes, recabando en cada uno de ellos, área total construida, y por planta, número de pisos, zona socioeconómica, condición de la vivienda, número de población ocupante, comportamiento estructural para cada vivienda, y costo paramétrico para cada vivienda, para la ciudad de Mexicali se integró un archivo de exposición de más de 9000 manzanas, con un promedio de 23 viviendas por manzana.

4.4 Análisis probabilísticos de riesgo sísmico

En base a la evaluación obtenida del Modelo Probabilístico de Riesgo Sísmico (CAPRA) desarrollado para la ciudad de Tijuana, con un archivo de exposición de 263, 914 construcciones, con un promedio de 4 personas por vivienda, una población de 1, 055, 656, con una consideración de seis categorías por el tipo de vivienda de acuerdo con el apartado 3.2.1, con el peligro sísmico de la sesión 3.1, para 252 escenarios, se obtuvo que los cinco escenarios críticos están dados en una magnitud momento de 6.43 a 7.20, tabla 17,

Tabla 17. Escenarios críticos de acuerdo con Evaluación Probabilística de Riesgo, en Tijuana, B.C.

Fuente	Magnitud (Mw)
Rose Canyon	6.74
Rose Canyon	6.43
Rose Canyon	6.74
Coronado Bank	7.2
Coronado Bank	7.2

El modelo de evaluación probabilística del riesgo en la ciudad de Tijuana, B.C, en el caso de daño a viviendas, aporta que los rangos representativos en pérdidas económicas dadas en moneda nacional(MN), con un máximo de \$10, 158 pesos por edificación, fig. 19. En el rubro de afectación a la población que habita las viviendas

en estudio se tiene que ante la manifestación de los escenarios críticos de la tabla 16, se esperaría un daño de hasta 0.35% a la población, fig. 20.

Con base en la Perdida Máxima Probable (PMP) por daños a viviendas con un periodo de retorno de hasta 100 años se estima se tendría una perdida aproximada de \$2, 750 millones de pesos, fig. 21. En el rubro de PMP en afectación a la población que habita las viviendas consideradas en el estudio para un periodo de retorno de 100 años, se estima sea de 1, 450 personas, fig. 22.



Figura 27. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de pérdidas físicas, en Tijuana, B.C.
 Elaboración propia.

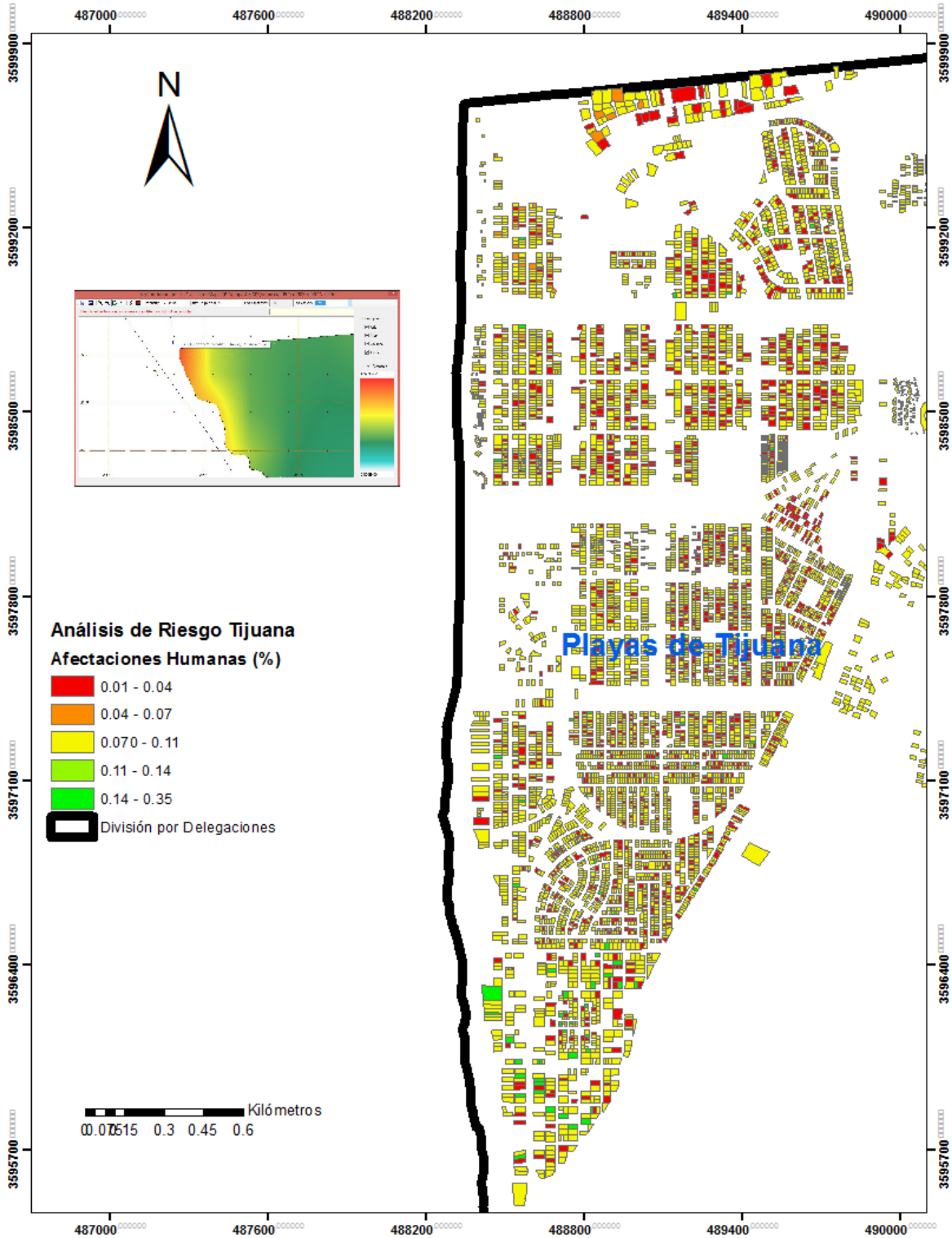


Figura 28. Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico, afectaciones humanas, Tijuana, B.C.

Elaboración propia.

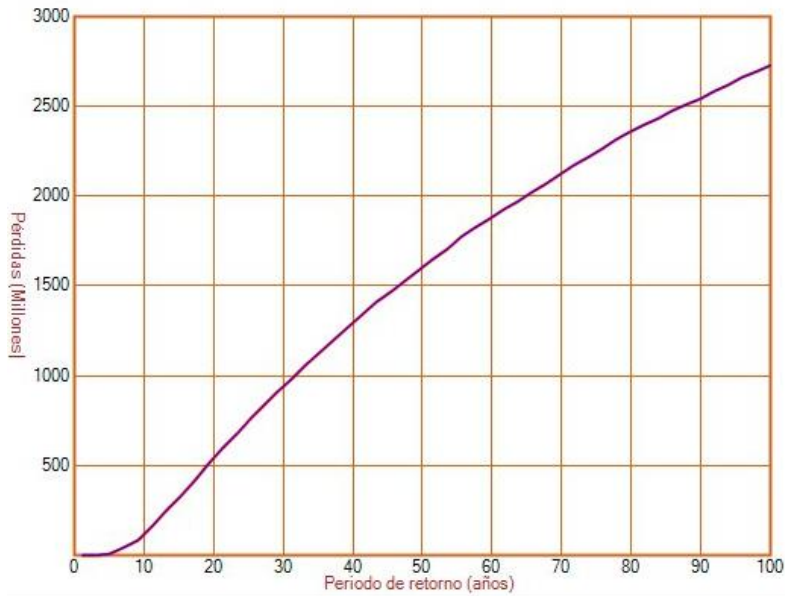


Figura 29. Perdida Máxima Probable(PMP) en daños a viviendas, Tijuana, B.C. Elaboración propia.

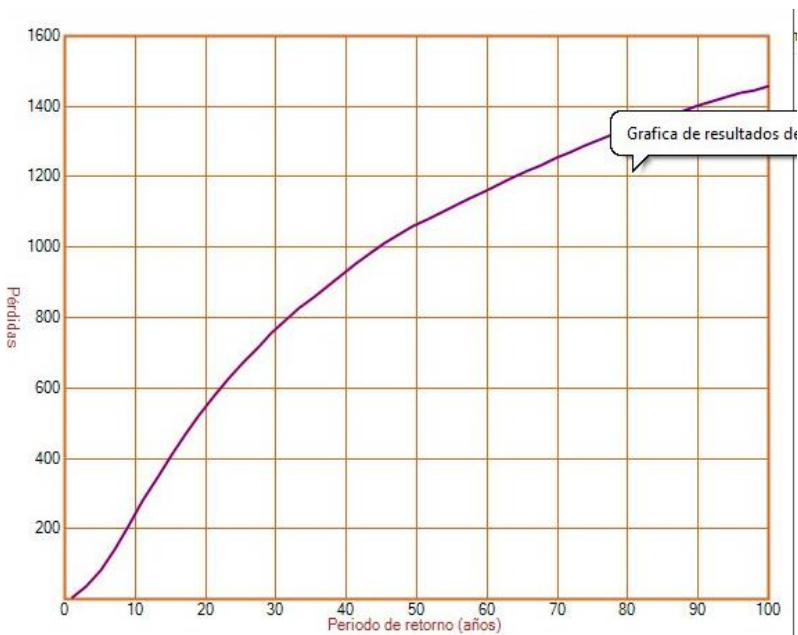


Figura 30. Perdida Máxima Probable(PMP) en afectaciones humanas, Tijuana, B.C. Elaboración propia.

En el caso de la ciudad de Mexicali, B.C., con una consideración de 9, 777 AGEB's de acuerdo con la sectorización de INEGI, con un promedio de 26 viviendas promedio, se considera un total de 254, 202 viviendas, una población de 685, 926 ocupantes; con una clasificación de seis tipos de viviendas, el modelo de

probabilístico del riesgo estima de acuerdo con los cinco escenarios principales, que la fuente principal con la generación de mayor daño es la falla Imperial, con magnitudes $M_w = 6.83, 6.50, 6.83, 6.83$ y 6.50 . Además de indica que existen zonas donde se estiman pérdidas de hasta \$152, 386.39 MN., fig. 23, y afectaciones a la población en un 39.13%, fig. 24.

En relación a la Perdida Máxima Probable (PMP) por daño a las viviendas se estima un monto de \$125 millones de pesos MN., con periodo de retorno de hasta 100 años, fig. 25, y con este periodo de retorno, afectaciones estimadas de 1, 400 personas, fig. 26.

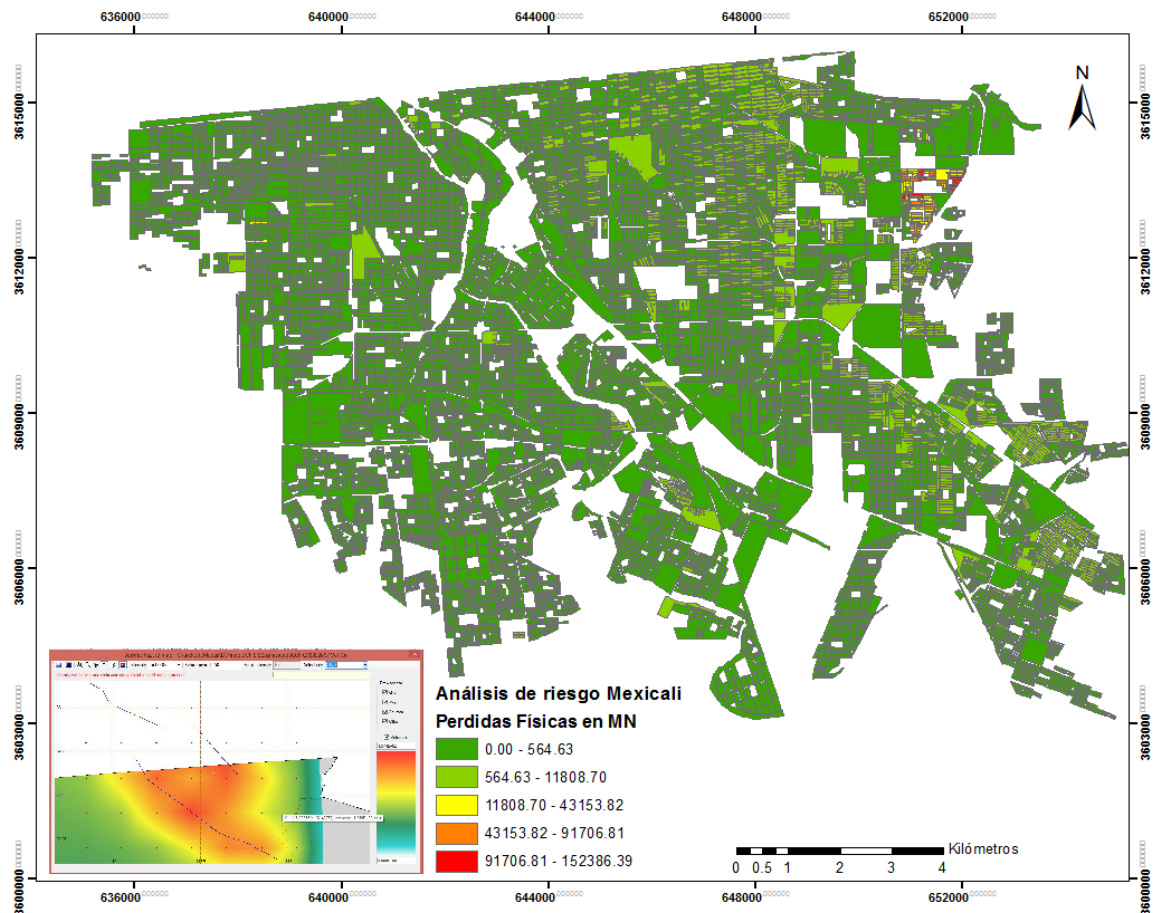


Figura 31. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de pérdidas físicas, Mexicali, B.C.

Elaboración propia.

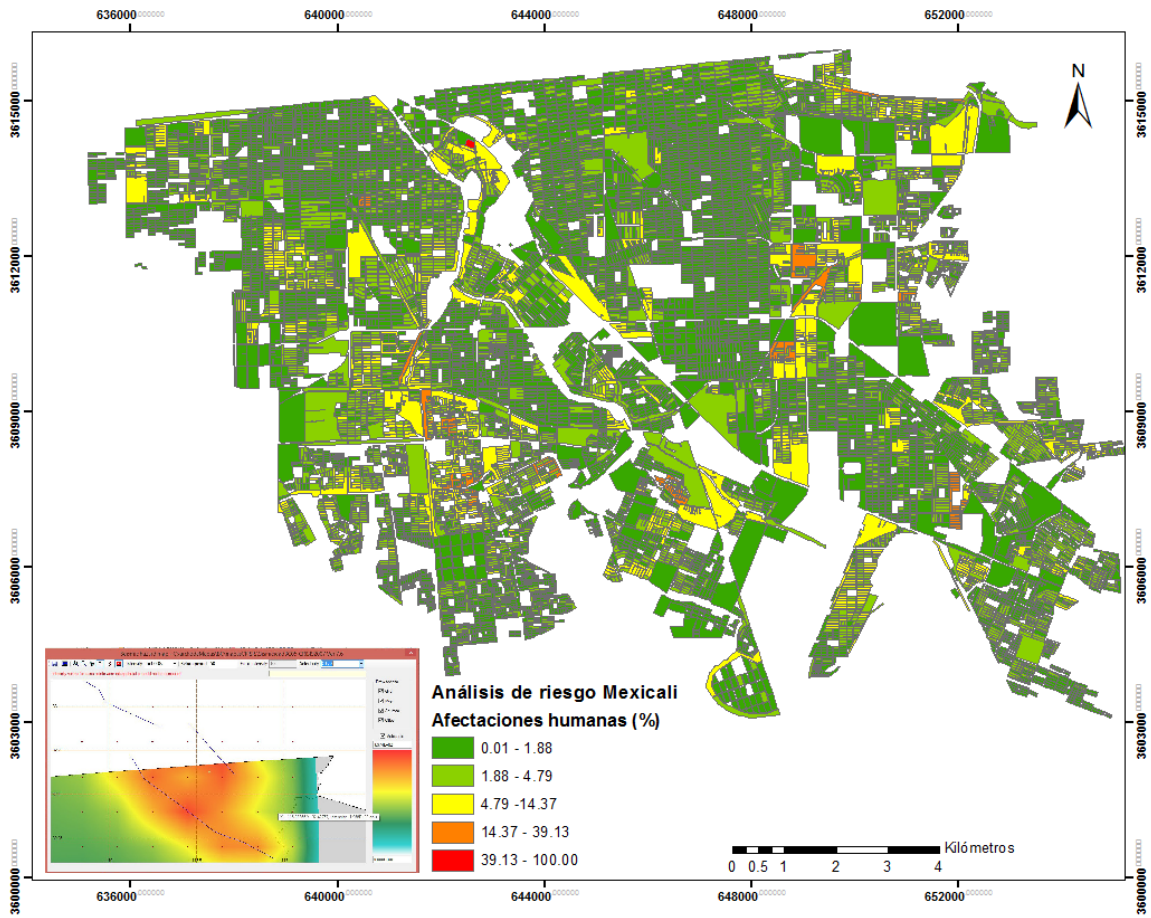


Figura 32. Evaluación probabilística del riesgo sísmico de afectaciones a la población, en Mexicali, B.C. Elaboración propia.

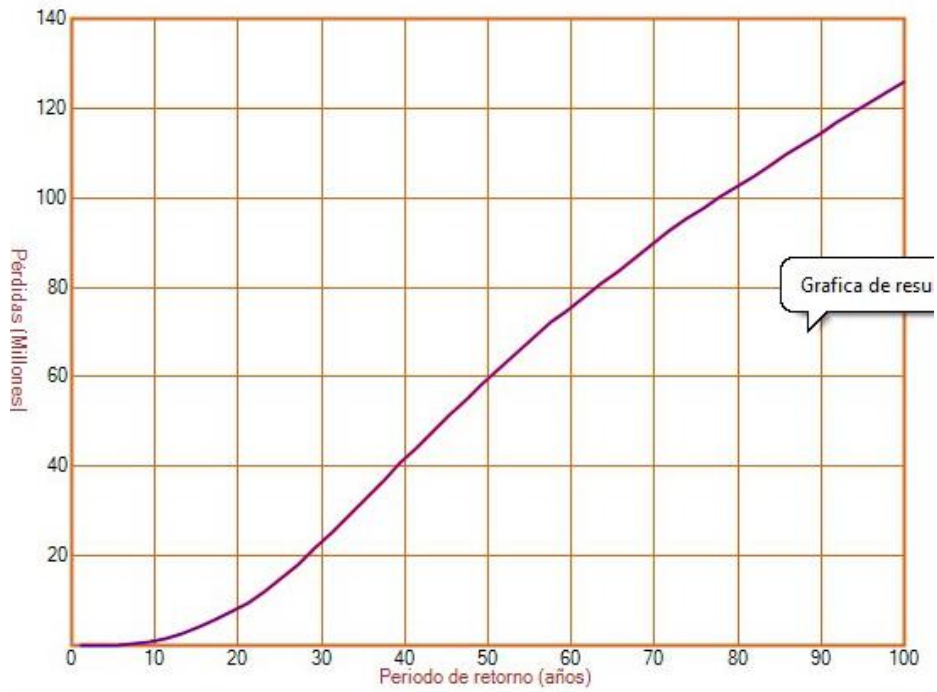


Figura 33. Perdida Máxima Probable(PMP) en daños a viviendas, Mexicali, B.C. Elaboración propia.

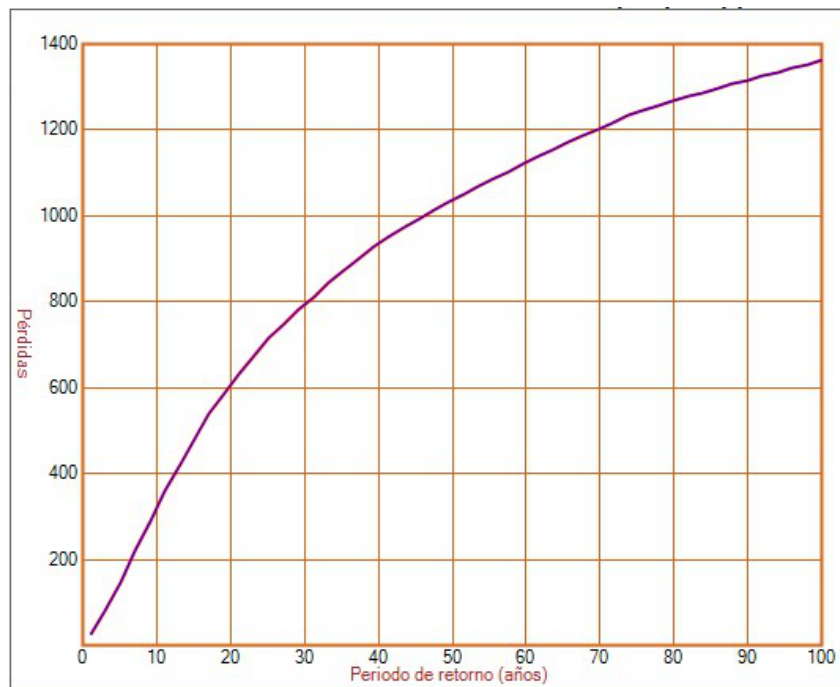


Figura 34. Perdida Máxima Probable (PMP) en afectaciones a la población, Mexicali, B.C. Elaboración propia.

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones teóricas

El análisis probabilístico del riesgo por sismo, dado a partir del cálculo de escenarios planteados con el peligro sísmico local y regional, donde el nivel de aproximación está en función de la caracterización de las fuentes sísmicas, y esta su vez del nivel de instrumentación. De los datos obtenidos de la instrumentación es factible determinar los efectos de sitio, tal como, las Leyes de Atenuación o ecuaciones de estimación del movimiento del suelo; desplazamientos, velocidades y aceleraciones del suelo; de esta manera es posible determinar los espectros de respuesta del suelo, establecer los periodos de retorno en función de los registros históricos, así como, la tasa de excedencia, en la que se asocian las magnitudes de sismos y las veces en que se rebasa una magnitud de sismo estimada dada en términos precisamente del periodo de retorno; en este apartado cuando en el sitio o zona de interés desea realizarse un análisis de peligro sísmico, se sugiere buscar una aproximación de los modelos existentes de acuerdo a condición tectónica existente llámese de subducción; fallamiento normal y profundidad intermedia; superficiales de la corteza continental y sistemas de fallas Polochic-Motagua [12].

En la vulnerabilidad de los sistemas estructurales, expresada en términos de funciones de vulnerabilidad, en las que se aporta toda la información necesaria para calcular la probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida, dada una demanda sísmica (aceleración espectral elástica con un amortiguamiento del 5% para diferentes periodos estructurales), es necesario comprender que esta relación está dada por las curvas de fragilidad y por las matrices de probabilidad de daño (DPMs). Para ello es necesario definir los tipos constructivos característicos; la geometría, la rigidez y las propiedades dinámicas de los tipos constructivos; el nivel de diseño sísmico asignado a cada tipo constructivo, estos parámetros a su vez definen el nivel de demanda sísmica y la capacidad de deformación horizontal para la cual fue diseñada la estructura; de esta manera se estima una curva de capacidad

de la estructura que relaciona el cortante máximo en la base de la edificación y la deriva máxima en la cubierta; se definen puntos específicos de comportamiento o estados de daño de la estructura en términos de la deriva de cubierta como ligero, medio, intenso y colapso, los cuales se asocian con la relación media del daño (RMD: ligero (MRD= 0-5%), medio (MRD= 5-20%), intenso (20-60%) y colapso (MRD> 60%); se elaboran funciones de distribución de probabilidad del daño lognormal que corresponden a funciones de fragilidad de donde se derivan las funciones de vulnerabilidad.

En el apartado de la evaluación del Impacto socioeconómico del daño por sismos, actualmente a nivel mundial, se trabaja en la integración de base de datos, en donde cada registro se incluye la información sismológica (magnitud, hipocentro, localización, intensidad y valores del espectro de respuesta), información de construcciones dañadas (niveles de daño, infraestructura importante), rangos de afectación a la población (muertes, heridos, sin vivienda y afectados en general), pérdidas económicas (directa, indirecta, necesitados de ayuda, y asegurados), en las que se tienen registros de más de 13, 000 sismos que han producido daño, los cuales han causado alrededor de 8.5 millones de muertos y más de \$4.3 trillones de dólares en pérdidas económicas [51]. Los sismos pueden ser vistos como agentes que súbitamente destruyen las economías de los países afectados, sin embargo, los sismos también permiten renovar o fortalecer el capital humano que colabore en las mejores prácticas y se promueva el crecimiento de la población en ciertos lugares, construcciones sismo-resistentes, fortalecimiento de los reglamentos de construcción con el propósito de garantizar un mejor resguardo de la vida antes y después de los sismos.

5.2 Conclusiones metodológicas

La implementación de una metodología para el análisis probabilístico del riesgo sísmico implica reunir los elementos requeridos para cada uno de los modelos propuestos, entre ellas las que destacan HAZUS de FEMA, GEM, y CAPRA; al

revisar la filosofía de operación de uno de estos modelos, consideramos que la plataforma apropiada de análisis para los sitios propuestos destacaba el Modelo Probabilístico del Riesgo CAPRA, dado que fue desarrollado para los entornos de Países Latinoamericanos, es decir, uso de los materiales, procedimientos constructivos, costos de construcción, población ocupante promedio, consideraciones en el análisis del peligro sísmico y concepciones del comportamiento dinámico de las edificaciones. En el caso del HAZUS está diseñado para países como Estados Unidos de América, Canadá e Israel, así como el modelo GEM esta propuesto para países regidos por el código europeo; en general son países de primer orden económico, esto hace que los procedimientos constructivos se conciban de una forma distinta, a como se lleva a cabo particularmente en México, ello conlleva a que se tengan limitaciones mayores al intentar representar el comportamiento dinámico de las estructuras.

5.3 Conclusiones de los resultados de los casos de estudio

Con base en los resultados del análisis de riesgo por sismo en vivienda para las zonas urbanas de Tijuana y Mexicali; para un periodo de retorno de hasta 100 años, se espera que, en la Ciudad de Tijuana, se tengan pérdidas probables de alrededor 2750 millones de pesos, asociados a un rango de magnitudes de 6.43 a 7.2, con una posible afectación a 1, 500 personas, asimismo, resalta que las zonas mayormente expuestas se localizan en los sitios cercanos a la canalización del río Tijuana, este y suroeste de la zona urbana. En el caso de la Ciudad de Mexicali, en periodo de retorno de 100 años se esperan daños sólo en viviendas del orden de los \$120, 000, 000.00 MN, y afectación a un total de 1400 personas como población ocupante. Los sitios mayormente afectados son los ubicados al noreste y sureste de la zona urbana. Es oportuno señalar que, en este último caso, con los inventarios desarrollados por CENAPRED, de acuerdo con lo publicado en Vivienda frágil ante sismos: La acción habitacional en la ciudad de Mexicali [67], las viviendas dañadas con el sismo del 4 de abril del 2010 se localizan en zonas similares a las consideradas en los resultados del análisis probabilístico desarrollado en este

estudio, así como también, las afectaciones señaladas la publicación: Comportamiento dinámico de estructuras, determinado mediante instrumentación [68], en ese sentido en la publicación: Comportamiento de la vivienda en México durante el sismo El Mayor-Cucapah del 4 de abril del 2010 [69] se señala que con el sismo del 04 de abril del 2010 entre Fondo Nacional de Desastres Naturales y el Gobierno del Estado de Baja California se hizo una aportación de alrededor de \$195, 000, 000.00 MN, para rehabilitar 2, 818 viviendas, entre las que se consideró viviendas hasta de cinco niveles en zona urbana y la vivienda de los ejidos.

5.4 Conclusiones sobre limitantes del proyecto

La estimación del impacto socioeconómico de acuerdo como se establece en la hipótesis, está limitada por la generación del peligro sísmico, con base al modelo dado en CRISIS2007, en relación al número de parámetros utilizados por el modelo de atenuación sugerido por Boore, et al (2013) [18], desarrollado específicamente para las condiciones tectónicas de la región, falla de rumbo.

Con base en la definición de la tipología de la vivienda por el actual análisis probabilístico del riesgo, para estimar el impacto socioeconómico para la gama de vivienda en las zonas urbanas, se requiere incluir una clasificación más amplia, que permita incrementar la precisión de los resultados, es posible en la medida que se logre realizar una clasificación adecuada de la vivienda autoconstruida, así como, la actualización del registro de las diversas formas arquitectónicas de la vivienda construida por desarrolladores ante el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda (INFONAVIT), asimismo, establecer con base en pruebas de laboratorio y observación, parámetros locales de comportamiento estructurales, tanto mecánicos como dinámicos, tales como, resistencia a la compresión, tensión, módulos de elasticidad y corte, rigidez, desplazamientos, periodos de vibración, conocimiento antes, durante y después de los puntos de inflexión en las curvas de esfuerzos-deformación asociados a los rangos de aceleración del suelo dado por los sismos históricos en la región.

5.5 Conclusiones generales

El análisis probabilístico del riesgo por sismo, consideramos que considerada como una herramienta esencial en la elaboración de los Planes de Desarrollo que establece cada Gobierno a nivel Federal, Estatal o Municipal, dado que la manifestación de sismos con una magnitud histórica donde se hayan registrados daños, tiene una afectación de manera inmediata, no tan solo en las viviendas, en la población ocupante, si no que también en la infraestructura de su entorno, tales como: albergues, vías de comunicación, salud y alimentación, durante la atención a la emergencia y posterior a ella; esto conlleva a generar un impacto negativo en la economía de cada municipio o ciudad de manera súbita. Asimismo, consideramos que la manifestación de sismos debe ser vista como experiencia que permite a los tomadores de decisiones en la administración de la ciudad, municipio, estado y nación, fortalecer los elementos involucrados en crear estructuras con nivel mayor de sismo-resistencia, al proponer la mejora en los parámetros de diseño y construcción mediante los reglamentos y normas de construcción; la participación ciudadana en la divulgación de las acciones de prevención y reparación del daño, que conlleve a crear comunidades sísmicamente seguras y responsables.

6. Líneas futuras de investigación

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, se propone desprender algunas líneas futuras de investigación que fortalecerían el análisis de riesgo por sismo de manera regional y nacional:

1. Elaborar una interface propia que permita vincular las funciones de vulnerabilidad de acuerdo con una característica específica de la vivienda en Baja California, al menos en la zona señalada con mayor riesgo sísmico por este estudio.
2. Que la interface que se proponga está ligada en red con las actualizaciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, en el inventario

nacional de viviendas en cuanto al número de edificaciones, población ocupante de las viviendas.

3. De acuerdo con la caracterización dominante de la estructuración de la vivienda en Baja California, realizar pruebas en laboratorio y analíticamente el comportamiento mecánico y dinámico, que permita construir las funciones de vulnerabilidad locales.

4. Construcción del modelo de peligro sísmico con mayor detalle que incluya la caracterización de las fuentes sísmicas locales.

7. Bibliografía

- [1] T. Haktanir, H. Elcuman, and M. Cobaner, "Frequency analysis of annual maximum earthquakes within a geographical region," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 43, pp. 323–328, Dec. 2012.
- [2] U. . Geological Survey, "Earthquakes with 1,000 or More Deaths 1900-2014," *Earthquake Hazard Program*, 2015. [Online]. Available: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world_deaths.php. [Accessed: 28-May-2015].
- [3] L. G. Alvarez, F. Suárez-vidal, R. Mendoza-borunda, and M. González-escobar, "Bathymetry and active geological structures in the Upper Gulf of California," 2009.
- [4] U. S. G. S. USGS, "Shakemap Imperial_Valley October 15, 1979," *Earthquake Hazards Program*, 2009. [Online]. Available: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/sc/shake/Imperial_Valley/. [Accessed: 08-Jun-2015].
- [5] U. S. G. S. USGS, "ShakeMap for Sierra El Mayor Earthquake," *Earthquakes; Earthquake Hazards Program*, 2010. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/sc/shake/14607652/>. [Accessed: 24-May-2016].
- [6] L. B. Grant and T. . Rockwell, "Map of Major faults in southern California (USA) and Northern Baja California (Mexico) including the offshore strands," *Broadband Siesmic Data Collection Center(ANZA)*, 2002. [Online]. Available: http://eqinfo.ucsd.edu/faq/faults_scali.php. [Accessed: 07-Jun-2015].
- [7] I. N. de E. y G. INEGI, *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015. Baja California*. Aguascalientes, Aguascalientes, 2015.

- [8] D. P. Coppola, "Risk and Vulnerability," in *Introduction to International Disaster Management*, 1st editio., no. Elsevier Inc, D. P. Coppola, Ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2007, pp. 139–207.
- [9] J. D. Zechar, M. Herrmann, S. T. Van, and S. Wiemer, "Forecasting seismic risk as an earthquake sequence happens," in *Earthquake hazard, risk and disasters*, 1st ed., J. F. Shroder and M. Wyss, Eds. Oxford, UK: Book Aid International, 2014, pp. 167–182.
- [10] D. Muñoz, "Conceptos básicos en riesgo sísmico," *Física de la tierra*, no. 1, Madrid, España, pp. 199–215, Jan-1989.
- [11] S. Grasso and M. Maugeri, "Seismic microzonation studies for the city of Ragusa (Italy)," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 56, pp. 86–97, Jan. 2014.
- [12] U. Mena-Hernandez and L. E. Pérez-Rocha, "Diseño por sismo," in *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Versión 20., C. F. de E. CFE and I. de I. E. IIE, Eds. México, Distrito Federal: CFE, Comisión Federal de Electricidad, 2015, pp. 15–64.
- [13] G. Ayala, L. Esteva, C. Gutierrez, R. Meli, M. J. Mendoza, M. Ordaz, and C. Reyes, "GUIA METODOLOGICA PARA EL ANALISIS DEL PELIGRO VULNERABILIDAD RIESGOS Y PERDIDAS CENAPRED," México, Distrito Federal, 2003.
- [14] E. H. Field and WGCEP Members of the 2014, "UCERF3: A New Earthquake Forecast for California's Complex Fault System," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 104, no. June, pp. 1122–1180, 2014.
- [15] N. . Abrahamson and W. J. Silva, "Empirical Response Spectral Attenuation Relations for shallow crustal earthquakes," *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, McLean, Va, pp. 94–127, 1997.
- [16] M. D. Petersen, M. P. Moschetti, P. M. Powers, C. S. Mueller, K. M. Haller, A. D. Frankel, Y. Zeng, S. C. Rezaeian, Sanaz Harmsen, O. S. Boyd, N. Field, R. Chen, K. S. Rukstales, N. Luco, R. L. Wheeler, R. a. Williams, and A. H. Olsen, "Documentation for the 2014 update of the United States national seismic hazard maps," Reston, Virginia, 2014.
- [17] E. H. Field, T. E. Dawson, K. R. Felzer, a. D. Frankel, V. Gupta, T. H. Jordan, T. Parsons, M. D. Petersen, R. S. Stein, R. J. Weldon, and C. J. Wills, "Uniform California earthquake rupture forecast, version 2 (UCERF 2)," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 99, no. 4, pp. 2053–2107, 2009.
- [18] D. M. Boore, J. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson, "NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes," Berkeley, California, 2013.
- [19] W. B. Joyner and T. E. Fumal, "Use of Measured Shear Wave Velocity for Predicting Geologic Site Effects on Strong Ground Motion," 1984.
- [20] I. C. Council, *International Building Code*. U.S.A, 2006, p. 303.

- [21] Koçkar M. K., H. Akgün, and E. M. Rathje, "Evaluation of site conditions for the Ankara Basin of Turkey based on seismic site characterization of near-surface geologic materials," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 30, no. 1–2, pp. 8–20, 2010.
- [22] R. Chen, D. M. Branum, and C. J. Wills, "Annualized and Scenario Earthquake Loss Estimations for California," *Earthq. Spectra*, vol. 29, no. 4, pp. 1183–1207, Nov. 2013.
- [23] E. Field and G. Scec Phase Iii Working, "Accounting for Site Effects in Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Overview of the Scec Phase Iii Report," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 90, no. 6B, pp. 1–31, 2000.
- [24] N. Nakicenovic, J. Alcamo, G. Davis, J. De Vries, Bert, Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, and T. Yong Jung, "Emissions scenarios," Cambridge, UK, 2000.
- [25] L. I. Burden, G. Rix, and S. Werner, "Development of a risk framework for forecasting earthquake losses in port systems," *Earthq. Spectra*, 2015.
- [26] A. Masi, G. Santarsiero, and L. Chiauzzi, "Development of a seismic risk mitigation methodology for public buildings applied to the hospitals of Basilicata region (Southern Italy)," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 65, pp. 30–42, Oct. 2014.
- [27] G. M. Calvi, R. Pinho, G. Magenes, J. J. Bommer, L. . Restrepo-Vélez, and H. Crowley, "Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over the Past 30 Years," *ISIJ. Earthq. Technol.*, vol. 43, no. 472, pp. 75–104, 2006.
- [28] R. Hassanzadeh, Z. Nedović- Budić, A. Alavi Razavi, M. Norouzzadeh, and H. Hodhodkian, "Interactive approach for GIS-based earthquake scenario development and resource estimation (Karmania hazard model)," *Comput. Geosci.*, vol. 51, pp. 324–338, Feb. 2013.
- [29] M. N. Alam, S. Tesfamariam, and M. S. Alam, "GIS-Based Seismic Damage Estimation : Case Study for the City of Kelowna , BC," *Nat. Hazards Rev.*, no. February, pp. 66–78, 2013.
- [30] J. Bommer, H. Crowley, and R. Pinho, "Seismic Risk Study : Earthquake Scenario -Based Risk Assessment," pp. 1–12, 2013.
- [31] E. Guevara-Ortiz, R. Quaas-Weppen, G. Fernández-Villagómez, O. Zepeda-Ramos, C. A. Gutiérrez Martínez, A. Martínez-Bringas, A. Gómez-Vázquez, S. De la Cruz-Reyna, M. J. Mendoza-López, L. Domínguez-Morales, H. Eslava-Morales, M. Jiménez-Espinosa, M. Salas-Salinas, F. García-Jiménez, M. T. Vázquez-Conde, R. D. Rivera-Balboa, M. E. Arcos-Serrena, C. Izcapa-Treviño, E. Bravo-Medina, C. Reyes-Salinas, L. Flores-Corona, M. A. Pacheco-Martínez, O. López-Batíz, L. A. Valerio-Zárate, O. Zepeda-Ramos, N. García-Arróliga, R. Marín-Cambranis, and K. Méndez-Estrada, "Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos," in *Serie: Atlas Nacional de Riesgos*, CENAPRED, 2004, Primera ed., vol. 1, p. 386.

- [32] A. Preciado and A. Orduña, "A correlation between damage and intensity on old masonry churches in Colima, Mexico by the 2003 M7.5 earthquake," *Case Stud. Struct. Eng.*, vol. 2, pp. 1–8, Dec. 2014.
- [33] C. Huyck, M. Eguchi, and J. Bevington, "User guide: Tool for spatial inventory data development," 2014.
- [34] J. Rohmer, J. Douglas, D. Bertil, D. Monfort, and O. Sedan, "Weighing the importance of model uncertainty against parameter uncertainty in earthquake loss assessments," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 58, pp. 1–9, Mar. 2014.
- [35] S. Karimzadeh, M. Miyajima, R. Hassanzadeh, R. Amiraslanzadeh, and B. Kamel, "A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 66, pp. 263–280, Nov. 2014.
- [36] B. Besson, J. Ö. Bjarnason, A. Guðmundsson, J. Sólnes, and S. Steedman, "Analysis of damage data of low-rise buildings subjected to a shallow Mw6.3 earthquake," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 66, pp. 89–101, Nov. 2014.
- [37] P. G. Asteris, M. P. Chronopoulos, C. Z. Chrysostomou, H. Varum, V. Plevris, N. Kyriakides, and V. Silva, "Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems," *Eng. Struct.*, vol. 62–63, pp. 118–134, Mar. 2014.
- [38] M. Mihaita, "A THEORETICAL REVIEW OF THE DAMAGE INDICES USED TO MODEL THE DYNAMIC NONLINEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES," vol. II, no. Lxiii, pp. 110–119, 2013.
- [39] C. a. Kircher, R. V. Whitman, and W. T. Holmes, "HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods," *Nat. Hazards Rev.*, vol. 7, no. 2, pp. 45–59, May 2006.
- [40] W. H. Chairman, R. Borchardt, D. Brookshire, R. Eisner, R. Olson, and M. Rourke, "Earthquake loss estimation methodology," 2001.
- [41] F. E. M. A. FEMA and A. T. C. ATC, "Earthquake Damage Evaluation Data For California, ATC-13," Redwood City, California, 1985.
- [42] O. D. Cardona, M. G. Ordaz, E. Reinoso, and A. Barbat, "Enfoque Integral Para La Evaluación Probabilista Del Riesgo (Capra): Iniciativa Para Mejorar La Efectividad De La Gestión Del Riesgo De Desastre," in *4CNIS Granada 18-20 mayo 2011*, 2011, no. January 2016, pp. 2–13.
- [43] O. D. Cardona, L. E. Yamín, G. A. Bernal, M. G. Ordaz, E. Reinoso, A. H. Barbat, and M.-L. Carreño, "Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura ERN-CAPRA-T1-5," Colombia, México, España, 2005.
- [44] G. A. Bernal, M. A. Salgado, M. G. Mora, C. A. Velásquez, J. C. Olaya, D. Franco, M.-L. Carreño, M.-C. Marulanda, D. Zuloaga, D. M. González, C. P. Villegas, and A. I. Hurtado,

“Modelación probabilista de riesgos naturales en el nivel global: el modelo global de riesgo,” Barcelona, España; Bogotá, Colombia; Panamá, Panamá, 2013.

- [45] L. E. Yamin, A. I. Hurtado, A. Barbat, G. Bernal, and O. Cardona, “Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings for Catastrophic Risk Analysis in Urban Areas,” in *15 WCEE, Lisboa 2012*, 2012, pp. 1–10.
- [46] O. D. Cardona, M. G. Ordaz, S. Arámbula, L. E. Yamin, O. Mahul, F. Ghesquiere, and M. C. Marulanda, “Modelación de pérdidas por terremoto con fines de protección financiera,” 2012.
- [47] E. Miranda, “Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings,” *J. Struct. Eng.*, vol. 125, no. 4, pp. 417–425, 1999.
- [48] L. Flores, L. Oscar, M. A. Pacheco, and G. Norlang, *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos.*, 1ra Edició. México, Distrito Federal, 2006.
- [49] U. Hancilar, E. Çaktı, M. Erdik, G. E. Franco, and G. Deodatis, “Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 67, pp. 169–178, Dec. 2014.
- [50] J. Gearhart, N. Brown, D. Jones, L. Nozick, N. Romero, and N. Xu, “Optimization-Based Probabilistic Consequence Scenario Construction for Lifeline Systems,” *Earthq. Spectra*, vol. 30, no. 4, pp. 1531–1551, Nov. 2014.
- [51] J. E. Daniell, “The socioeconomic Impact of Earthquake Disasters,” in *Earthquake Hazard, Risk and Disasters*, 1st Editio., M. Wyss, Ed. Cederstraat, Mechelen, Belgium, 2014, pp. 203–236.
- [52] K. S. Jaiswal and D. J. Wald, “Strategies for rapid global earthquake impact estimation: the Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) system.,” in *Handbook of seismic risk analysis and management of civil infrastructure systems*, First., S. Tesfamariam and K. Goda, Eds. Cambridge, UK: Woodhead, 2013, pp. 839–866.
- [53] I. N. de E. y G. INEGI, “Módulo de Condiciones Socioeconómicas (MCS) 2010,” *Estadísticas-Encuesta en Hogares*, 2010. [Online]. Available: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/modulos/mcs/mcs2010/default.aspx>. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [54] CONEVAL and MCS_ENIGH, “Medición de la pobreza, Baja California.,” *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los hogares 2010*, 2010. [Online]. Available: http://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Mapa_interactivo_2014/Baja_California.pdf. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [55] I. N. de E. y G. INEGI, “Inventario Nacional de Viviendas 2015.,” *Servicios*, 2010. [Online]. Available: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/inv/default.aspx>. [Accessed: 20-Jul-2016].

- [56] I. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por AGEB y manzana urbana.,” *Censos y Conteos de Población y Vivienda*, 2010. [Online]. Available: http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/ageb_urb2010.aspx?c=28111. [Accessed: 26-Jun-2016].
- [57] E. de R. N. A. L. ERN, “Modelo de evaluación de amenaza sísmica,” Bogotá, Colombia; Barcelona, España; México, D.F, 2008.
- [58] O. D. Cardona, Y. L. Eduardo, G. A. Bernal, M. G. Ordaz, E. Reinoso, A. Barbat, and M. L. Carreño, “Metodología de Modelación Probabilista de riesgos naturales. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-7,” Bogotá, Colombia, México, D.F, 2005.
- [59] U. . G. S. USGS, “Deterministic and Scenario Ground-Motion Maps,” *Earthquake Scenarios*, 2016. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/hazards/products/scenario/>. [Accessed: 09-Jun-2016].
- [60] W. T. Holmes, R. Borchardt, D. Brookshire, R. Eisner, R. Olson, M. O’Rourke, H. Lagorio, R. Reitherman, and R. Whitman, “Multihazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model, HAZUS-FEMA,” Washington, D.C, 2003.
- [61] S. de I. y D. U. del E. de B. C. SIDUE, *Diseño Sísmico, NTC, Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, Seguridad Estructural*. Baja California, México, 2015, p. 62.
- [62] M. González-Durán, A. Mungaray-Moctezuma, U. Mena-Hernández, M. Hallack-Alegría, L. Rodríguez-Valenzuela, and I. Arzola-Nuño, “Variación del comportamiento dinámico en estructuras de mampostería,” in *Ingeniería y Tecnología, La labor investigadora e innovadora en México*, 1ra edició., G. Quiroga, J. Orozco, and L. J. González, Eds. Cgeyenne, Wy: Science Associated Editors L.L.C, 2015, pp. 101–118.
- [63] NEODATA, “Costo por m2 para una vivienda interés social.,” *Costos paramétricos*, 2016. [Online]. Available: <http://neodata.mx/page/costos-parametricos>.
- [64] U. S. G. S. USGS, “ShakeMaps Scenarios,” *Earthquake Hazards Program*, 2013. [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/sc/shake>. [Accessed: 21-Jul-2016].
- [65] L. E. Yamin, F. Ghesquiere, O. D. Cardona, and M. G. Ordaz, “Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia.,” Washington, D.C, 2013.
- [66] P. E. E. R. C. PEER, “PEER Ground Motion Database,” *Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes, NGA-West2*, 2013. [Online]. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>. [Accessed: 16-Jun-2016].
- [67] J. L. García, “Vivienda frágil ante sismos : La acción habitacional en la ciudad de Mexicali,” pp. 109–136, 2012.

- [68] M. González-Durán, A. Mungaray-Moctezuma, U. Mena-Hernandez, and M. Hallack-Alegría, "Comportamiento dinámico de estructuras, determinado mediante instrumentación," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. Vol. 1 No., no. ISSN 2334–2501, p. 177, Sep. 2014.
- [69] A. Tena-Colunga, J. Martínez-Martínez, and A. Gómez-Bernal, "SEISMIC BEHAVIOR OF HOUSING IN MEXICO DURING THE APRIL 4 , 2010 EL MAYOR-CUCUPAH EARTHQUAKE," *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, vol. 14, México, D.F; Mexicali, Baja California., pp. 127–148, Dec-2014.