Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura

SANTA TECLA
Tu Alcaldía, Trabaja.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTE, VIVENDA Y DESARROLLO URBANO
GOBIERNO DE
EL SALVADOR
UNÁMONOS PARA CRECER

MARN
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Modelación Probabilista
de Escenarios de Riesgo Sísmico en el Área Metropolitana de San Salvador, ciudad de Santa Tecla

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Consideraciones

El proyecto fue ejecutado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Universidad de El Salvador (UES), con el apoyo del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y la Alcaldía Municipal de Santa Tecla.

El estudio se realizó partiendo principalmente de los resultados obtenidos en el proyecto "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el AMSS, Portafolios de Educación, Salud y Gobierno" (Kattan et al. 2012), elaborado por el MARN junto al apoyo de los Ministerios de Educación (MINED) y Salud (MINSAL). De este proyecto se identificó que el área urbana del municipio Santa Tecla es una de las zonas más críticas en términos de riesgo sísmico, aunándole el hecho que posee una alta densidad poblacional.

Asimismo, se recopiló información existente y se recabo aquella información considerada indispensable para el análisis. Cada una de las capas de información utilizadas está sujeta a ser mejorada con la incorporación de más y/o mejor calidad de datos, lo que pudiera variar los resultados presentados; se trata de una estimación inicial que debe ser complementada y revisada a medida nuevo conocimiento sea adquirido. El usuario final debe estar consciente de las limitaciones y restricciones de los análisis realizados para poder dar uso adecuado a la información.

Indice

1 Introducción 1
1.1 Definición del Área de Estudio 3
2 Amenaza sísmica en Santa Tecla 5
2.1 Evaluación de la Amenaza Sísmica 5
2.2 Selección de Modelo de Atenuación 5
2.3 Metodología de análisis de amenaza sísmica 6
2.3.1 Distribución Geográfica de la Amenaza 11
2.4 Estudio de Respuesta de Sitio en Santa Tecla 13
2.4.1 Efecto de las Condiciones Locales en el Movimiento Fuerte 13
2.4.2 Geología del Sitio (Hernández, 2007) 15
2.4.3 Metodología para la evaluación de la Respuesta de Sitio 16
2.4.4 Resultados: Zonas de Respuesta Sísmica Similar en Santa Tecla 17
3 Recopilación de información de exposición 19
3.1 Información base 19
3.2 Ficha técnica para la recolección de la información de exposición 20
3.3 Información de exposición para el sector definitivo. 21
3.4 Discusión de resultados 24
4 Generación de curvas de vulnerabilidad sísmica 27
4.1 Vulnerabilidad Sísmica 27
4.2 Información base 27
4.3 Evaluación y desarrollo de las curvas de Vulnerabilidad 28
5 Modelo de riesgo sísmico para Santa Tecla 36
6 Conclusiones 41
7 Recomendaciones 43
Lineamientos para la Reducción del Riesgo Sísmico 43
Referencias 46
ANEXO 1 53

Lista de figuras

Figura 1.1. Área Metropolitana de San Salvador 4
Figura 1.2. Municipio de Santa Tecla y su área urbana (Alcaldía de Santa Tecla, 2011)... 4
Figura 4.1. Viviendas de mampostería de un nivel en Santa Tecla 29
Figura 4.2 Dimensiones típicas de una vivienda de mampostería en Santa Tecla..... 29
Figura 4.3. Definición de los estados límites, basados en Park (1988). (a) Daño leve, (b) Daño moderado, (c) Daño extenso y (d) Daño completo. Tomado de Frankie, T.M., Gencturk, B., Elnashai, A.S., 2013. 30
Figura 4.4. Modelo analítico de una vivienda tipo localizada en el centro histórico de Santa Tecla 30
Figura 4.5. Resultado de un análisis de pushover. 31
Figura 4.6. Estado de daño a fluencia 31
Figura 4.7. Ubicación de daños en fluencia. 32
Figura 4.8. Curva de vulnerabilidad revisada para la tipología de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel y código bajo (PMR-1CB) en formato Sd - MDR. 32
Figura 4.9. Curva de vulnerabilidad revisada para la tipología de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel y código bajo (PMR-1CB) en formato Sa - MDR. 33
Figura 4.10. Curvas de vulnerabilidad revisadas para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel, con diferentes códigos, en formato Sa - PMR. 33
Figura 4.11. Comparación de las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en el TAP anterior y las curvas de vulnerabilidad revisadas para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel, con diferentes códigos, en formato Sa - PMR. 34
Figura 4.12. Comparación de las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en el proyecto CAPRA 1 (MR-RLSB-2), TAP anterior (PMR-2PC, PMR-2CB, PMR-2CM) y el presente proyecto (PMR-2PC_R, PMR-2CB_R, PMR-2CM_R) para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de dos a cinco niveles, con diferentes códigos, en formato Sa - MDR. 35
Figura 5.1. Valor de los activos expuestos en la ciudad de Santa Tecla..... 37
Figura 5.2. (a) Pérdida máxima probable, (b) Tasa de excedencia de pérdidas..... 38
Figura 5.3. (a) Variación del PML con el período de retorno, (b) Tasa de excedencia de pérdidas..... 39
Figura 5.4. Pérdidas anuales esperadas en la ciudad de Santa Tecla 39
Figura 5.5. Áreas con edificaciones que presentan columna corta 41
Figura 5.6. Áreas con edificaciones que han sido afectadas por sismos 41

Lista de cuadros

Cuadro 1.1. Sismos destructores en El Salvador en el último Siglo (http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas). 2
Cuadro 1.2. Características generales del área de estudio (DIGESTYC 2007) 3
Cuadro 2.1. Modelos de atenuación utilizados en el análisis y resumen de sus características (modificado de Marroquín y Benito, 2009 y Schmidt, 2010). 6
Cuadro 2.2. Modelos de atenuación utilizados en el análisis y resumen de sus características (modificado de Marroquín y Benito, 2009 y Schmidt, 2010). 11
Cuadro 2.3. Condiciones típicas de suelo, funciones de amplificación y estructuras más afectadas por efectos de sitio. 18
Cuadro 4.1 Tipologías básicas (Castellanos Araujo, 2011) 28
Cuadro 4.2. Propiedades mecánicas de mampostería confinada de baja calidad. Cortez y Umaña (2011) 30
Cuadro 4.3. Tipologías estructurales encontradas en el área de interés. 36
Cuadro 5.1. Pérdida anual esperada y pérdida máxima probable. 37
Cuadro 5.2. Pérdida anual esperada y pérdida máxima probable. 38
Cuadro 5.3. Porcentaje de activos que presentan alguna deficiencia estructural o han estado en un terremoto 40

1 Introducción

El Salvador se encuentra en una región de alta actividad sísmica, generada principalmente por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe. Como resultado de la interacción de las placas, se tiene una cadena de volcanes activos y actividad sísmica local. Por lo tanto, El Salvador enfrenta altos niveles de sismicidad, en la zona de subducción como al interior de la placa del Caribe, en las denominadas fallas geológicas locales. La ciudad de San Salvador es probablemente la ciudad en América más frecuentemente dañada por sismos (López et al., 2004). En El Salvador las pérdidas post sismo desde 1900 hasta la fecha han sumado US$3,406,500,000 y 2,549,991 afectados, que equivale a más del 50% del total de pérdidas causadas por desastres de origen natural (EM-DAT 2012).

La república de El Salvador sufre un terremoto destructivo aproximadamente cada diez años, por lo que principales ciudades con mayor crecimiento urbano, como la ciudad de San Salvador y Santa Tecla, han sido seriamente dañadas numerosas veces. La ciudad capital fue destruida o severamente dañada por lo menos 11 veces por terremotos ocurridos entre 1576 y 1965; además, eventos más recientes como el terremoto del 10 de octubre de 1986, dejó un saldo de 1,500 muertes, 60,000 viviendas colapsadas y US$1,352 millones en pérdidas materiales. (Reyes et al., 2007).

Los terremotos del 13 de enero (Mw 7.7, frente a las Costas de El Salvador) y 13 de febrero de 2001 (Mw 6.6, San Vicente), provocaron serios daños a lo largo del país. El primero provocó deslizamientos en todo el territorio, siendo el más grave el ocurrido en la ciudad de Santa Tecla, específicamente en la Residencial Las Colinas, que dejó 687 viviendas soterradas, y el segundo, afectó principalmente los departamentos de la Paz, Cuscatlán y San Vicente. Ambos eventos dejaron un saldo de 944 muertes, 252,600 personas afectadas y pérdidas materiales de $1,600 millones. (Reyes et al., 2007).

Estos eventos han puesto en evidencia la alta vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes en la ciudad. El acelerado y desordenado proceso de urbanización que se ha dado en el Área Metropolitana de San Salvador, nombrado AMSS de aquí en adelante, ha tenido consecuencias devastadoras en el pasado y de continuar, el nivel de riesgo seguirá aumentando y eventos futuros podrán provocar elevadas pérdidas humanes y económicas (Kattan et al., 2012). En el Cuadro **1.1** se presenta un resumen de los sismos más destructores que han afectado al país en el último siglo. Puede observarse que la mayoría de los sismos por falla local que han generado pérdidas humanas, tuvieron su ubicación en zonas cercanas al AMSS, en donde se encuentran las más altas densidades de población.

La amenaza se convierte en riesgo cuando hay edificaciones/obras expuestas al movimiento del terreno, y el nivel de riesgo depende no solo del nivel de movimiento sino también de la capacidad de las estructuras expuestas para resistirlo. En ciudades ubicadas en zonas sísmicas, como es el

caso del AMSS, donde existe una elevada amenaza sísmica y un alto nivel de exposición, el nivel de riesgo sísmico está controlado por la vulnerabilidad de la infraestructura existente, relacionado a su vez al nivel de conocimiento de la peligrosidad de la región.

Cuadro 1.1. Sismos destructores en El Salvador en el último Siglo (http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas).

Fecha	Ubicación	Magnitud	MMI máx.	Epicentro	Comentarios
19/07/1912	13.87° N 89.57° O	Ms=5.9	---	---	Violento temblor causa daños en Armenia, Izalco y Santa Ana.
07/06/1917	13.70° N 89.50° O	Ms=6.5	---	---	Erupción del Boquerón. Sismo causa destrucción en Armenia y graves daños en Ateos, Sacacoyo y San Julián. Un segundo sismo causa daños en San Salvador, Apopa, Nejapa, Quezaltepeque, Opico y Santa Tecla.
07/06/1917	13.75° N 89.27° O	Ms=6.4	---	---	
20/12/1936	13.72° N 88.93° O	Ms=6.1	---	San Vicente	Destrucción de San Vicente. Entre 100 a 200 muertos.
06/05/1951	13.52° N 88.40° O	Ms=6.2	---	Jucuapa y Chinameca	Murieron más de 400 personas
07/05/1951	13.48° N 88.45° O	5.8	---	Jucuapa y Chinameca	---
12/04/1961	13.20° N 88.90° O	5.95	VI en San Salvador	Océano Pacífico	Daños menores en San Salvador y el sur de El Salvador
03/05/1965	13.70° N 89.17° O	Ms=6.0	VII en San Salvador	San Salvador	125 muertos, 400 heridos y 4000 casas destruidas
19/06/1982	13.30° N 89.30° O	7.0 6.0	VII en San Salvador	Océano Pacífico	8 personas murieron, 96 resultaron heridas y un promedio de 5000 damnificadas
10/10/1986	13.67° N 89.19° O	mb=5.4	VIII-IX en San Salvador	San Salvador	1,500 muertos, 10,000 heridos, unas 60,000 viviendas destruidas o dañadas.
13/01/2001	12.83° N 88.79° O	Mw=7.6	VII en San Salvador	Zona de Subducción	Se reportan 944 fallecidos, 1155 edificios públicos dañados, 108,261 viviendas destruidas, 19 hospitales dañados, 405 iglesias dañadas, 445 derrumbes
13/02/2001	13.64° N 88.94° O	Mw=6.6	VI en San Salvador	Zona de San Vicente	Se reportan 315 fallecidos, 82 edificios públicos dañados, 41302 viviendas destruidas, 5 hospitales dañados, 73 iglesias dañadas, 71 derrumbes

1.1 Definición del Área de Estudio

El Salvador es el país más pequeño y densamente poblado de Centroamérica. Con una extensión de 21,040.79 km^2 y una población aproximada de 6.227 Millones de habitantes (Banco Mundial, 2011), alcanza una densidad promedio de 296 habitantes/km^2.

El AMSS está compuesta por 14 municipios pertenecientes a los departamentos de San Salvador y La Libertad. Estos municipios son: (1) Apopa, (2) Ayutuxtepeque, (3) Cuscatancingo, (4) Ciudad Delgado, (5) Ilopango, (6) Mejicanos, (7) Nejapa, (8) San Marcos, (9) San Martín, (10) Tonacatepeque, (11) San Salvador y (12) Soyapango, del departamento de San Salvador, y (13) Antiguo Cuscatlán y (14) Santa Tecla del departamento de La Libertad (Figura 1.1).

El AMSS se establece como el centro direccional del país en materia política, financiera, económica y cultural, concentrando el 27% de la población y el 70% de la inversión pública y privada, todo esto en un 3% del territorio nacional (IPGARAMSS, 2011).

La ciudad y municipio de Santa Tecla (conocida también como Nueva San Salvador), es la cabecera del departamento de La Libertad. Fue fundada en 1854 con el objetivo inicial de reedificar ahí la ciudad capital, que había sido afectada por un devastador sismo. Santa Tecla fue gravemente afectada por los pasados sismos de enero y febrero de 2001 (destrucción física de aproximadamente el 80% del centro histórico), lo cual ha sido atribuido en gran parte a las condiciones locales de suelo en la ciudad. El estudio realizado por el MARN "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el AMSS, Portafolios de Educación, Salud y Gobierno" (Kattan et al. 2012) identificó la ciudad de Santa Tecla como una de las zonas más críticas en términos de riesgo sísmico.

Por lo anterior, y considerando su alta densidad poblacional, el área urbana del municipio de Santa Tecla, presentada en la Figura 1.2, ha sido elegida como zona piloto para una evaluación más amplia de riesgo sísmico. El Cuadro 1.2 presenta las características generales del área de estudio.

Cuadro 1.2. Características generales del área de estudio (DIGESTYC, 2007)

Indicador	Valor	Unidad
Superficie	112,20	km^2
Población	121,908	Habitantes
Densidad de población	1,087	Hab/km^2
Población urbana	108,840 (89.3%)	Habitantes
Población rural	13,068 (10.7%)	Habitantes
Viviendas particulares ocupadas	35,982	--

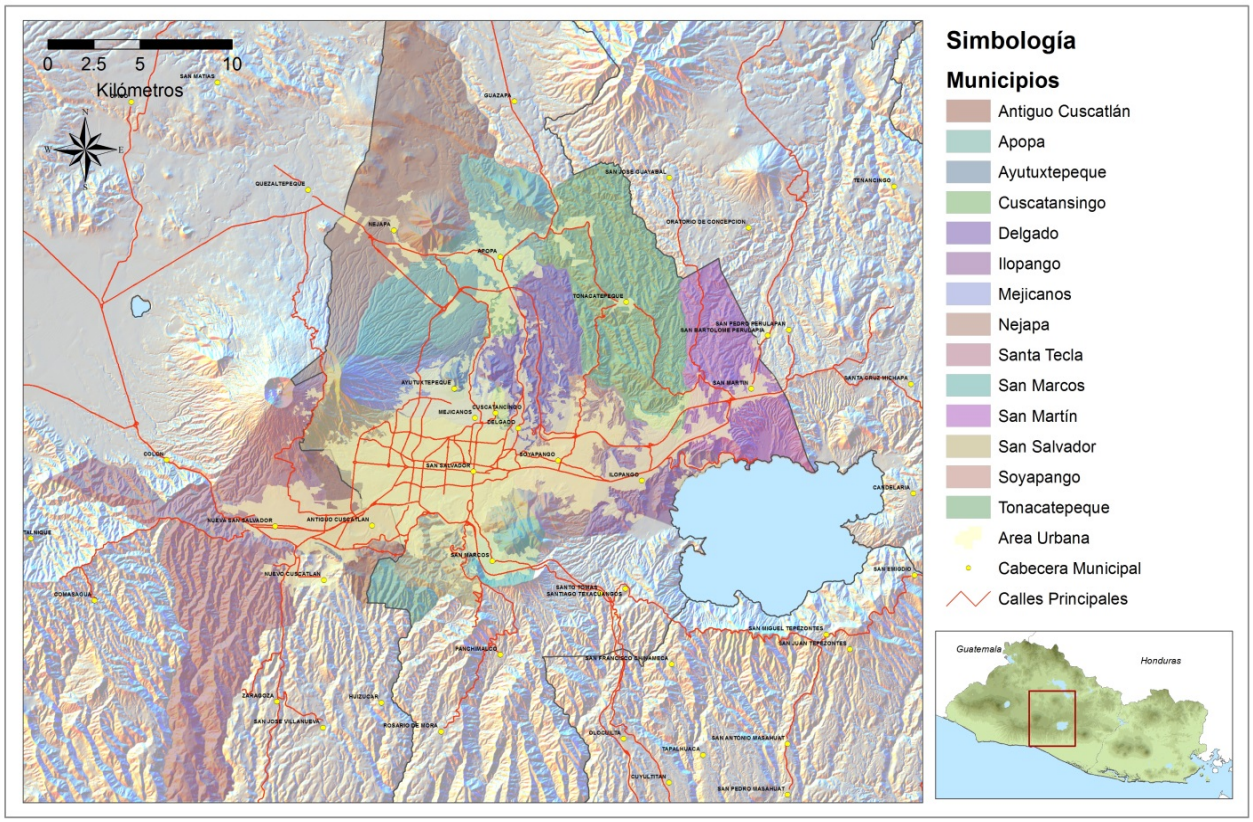


Figura 1.1. Área Metropolitana de San Salvador

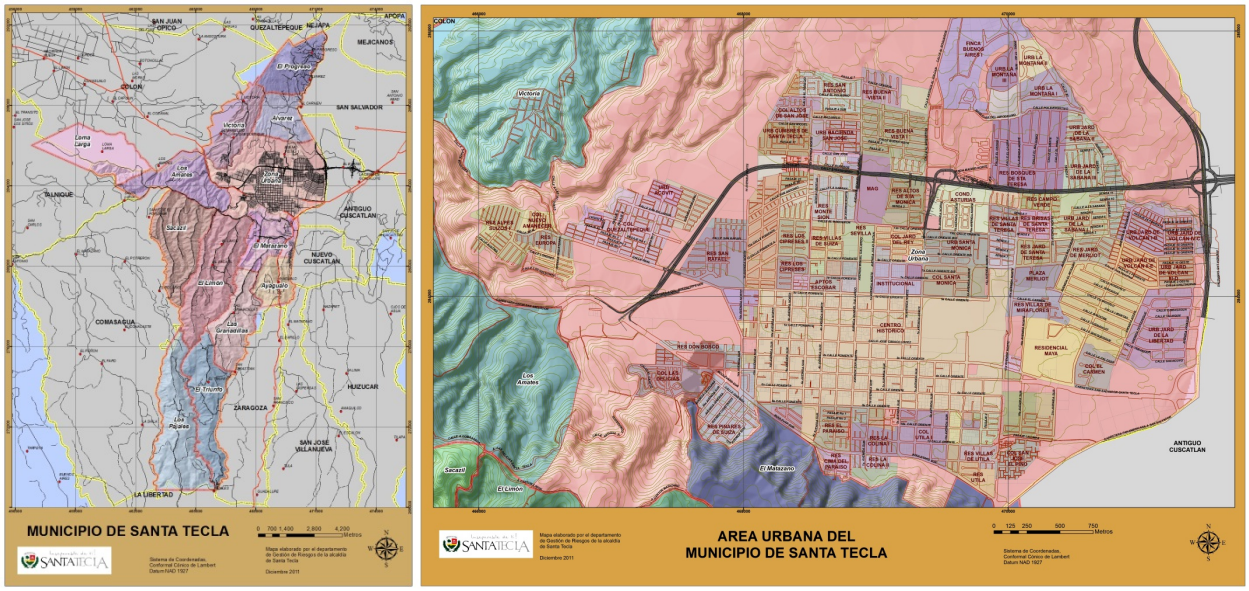


Figura 1.2. Municipio de Santa Tecla y su área urbana (Alcaldía de Santa Tecla, 2011)

2 AMENAZA SÍSMICA EN SANTA TECLA

2.1 Evaluación de la Amenaza Sísmica

La correcta evaluación de la amenaza depende del nivel de conocimiento de las características de la región de análisis: la sismicidad del área de influencia, la atenuación sísmica regional y el efecto local del suelo en el emplazamiento. El efecto de sitio en la ciudad de Santa Tecla está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o piroclastos no consolidados y tiene gran influencia en las características de amplitud y frecuencia del movimiento, y por tanto, en sus efectos sobre las estructuras. (Kattan et al. 2012)

El modelo de amenaza utilizado se construye sobre la base de parámetros del movimiento fuerte, caracterizado tanto en términos de intensidad como frecuencia. La intensidad y duración del movimiento en un sitio determinado depende tanto del tamaño y localización del sismo (caracterizado mediante modelos de atenuación), como de las características geológicas y topográficas particulares del lugar (efecto de sitio). (Kattan et al. 2012)

En el presente estudio se pretende, por una parte, mostrar de forma breve la estimación de la amenaza sísmica a nivel nacional elaborada en el marco del proyecto de "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), portafolios de Educación, Salud y Gobierno", (Kattan et al. 2012) . Dicha estimación fue incorporada al modelo de riesgo y fue definida tanto sobre la base del estudio RESIS II: "Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica" (Molina et al. 2008) como en el análisis específico de modelos de atenuación que mejor se ajustaran a las características de la región.

Por otra parte, se muestra de manera general, los resultados obtenidos en la estimación preliminar de la respuesta sísmica de los suelos del AMSS, siempre en el marco del proyecto mencionado anteriormente; donde se definieron zonas de respuesta sísmica similar y funciones de amplificaciones asociadas. Lo anterior, con el objetivo de describir la zona y luego focalizarse específicamente en las características de los suelos de la ciudad de Santa Tecla.

2.2 Selección de Modelo de Atenuación

En total se evaluaron 9 modelos de atenuación para la estimación de la amenaza sísmica a nivel nacional. De estos, 8 fueron seleccionados de acuerdo a los lineamientos presentados en el estudio RESIS II (ver Molina et al., 2008) y con la utilización de la base de datos acelerográficos de la DGOA/MARN de El Salvador. Por otro lado, se incluyó un modelo más reciente, propuesto por Victor Schmidt en 2010, el cual fue derivado para eventos corticales y de subducción a partir de una base de datos acelerográficos de la región de Centroamérica y Sur de México (Schmidt, 2010). Los modelos y sus principales características se presentan en el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.3. Modelos de atenuación utilizados en el análisis y resumen de sus características (modificado de Marroquín y Benito, 2009 y Schmidt, 2010).

Ecuación	Base de datos	Componente (PGA, SA)	Tipo Fuentes	Distancia (km)	Magnitud Momento, Mw
Schmidt 2010 (SCH10)	CA y México	Media geométrica	Interplaca Intraplaca Cortical	6-200	4.0-8.0
Zhao et al. 2006 (ZH06)	Japón	Media geométrica	Interplaca Intraplaca Cortical	10-300	5.0-8.2
García et al. 2005	México	Media cuadrática	Intraplaca	4-400	5.2-7.4
Cepeda et al. 2004	El Salvador	Aleatoria Media geométrica	Intraplaca Cortical	10-400 0-100	5.0-8.3 5.1-7.2
Atkinson y Boore 2003	Mundial	Componentes horizontales (aleatoria)	Interplaca Intraplaca	10-400	5.0-8.3
Spudich et al. 1999	Mundial	Media geométrica	Cortical	0-100	5.1-7.2
Youngs et al. 1997 (YOUN97)	Mundial	Media geométrica	Interplaca Intraplaca	10-500	5.0-8.2
Schmidt et al. 1997 (SCH97)	Costa Rica	Componente horizontal máxima	Cortical	6-200	3.7-7.6
Climent et al. 1994	América Central y México	Componente horizontal máxima	Interplaca Cortical	5-400	4.0-8.0

2.3 Metodología de análisis de amenaza sísmica

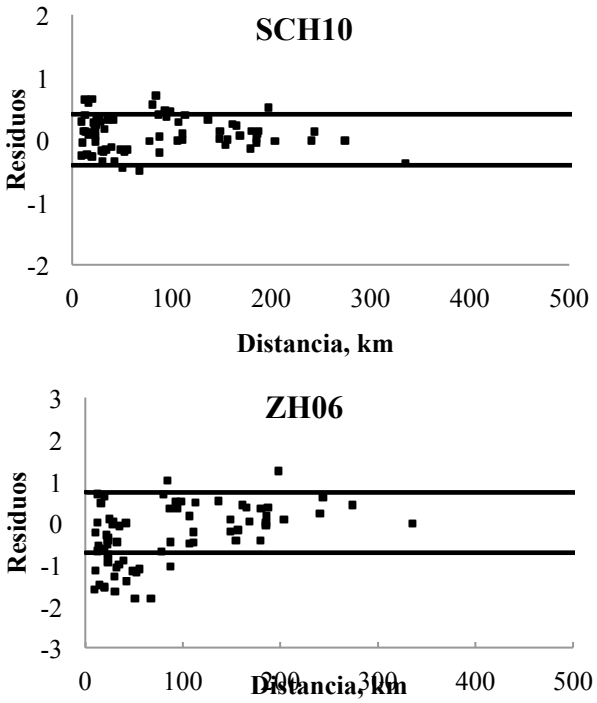
Tal como se explicó en el proyecto de "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el AMSS, portafolios de Educación, Salud y Gobierno" (Kattan et al. 2012), la metodología de análisis para la estimación de la amenaza símica se basó en dos procedimientos.

El primero se fundamentó en la comparación directa de los valores de la aceleración pico horizontal (PGA) y amplitud espectral (SA) para ciertos períodos estructurales, con los valores estimados por los diferentes modelos seleccionados, para condiciones de magnitud, distancia y suelo similares a las de los datos (Marroquín y Benito, 2009). La clasificación de los eventos y su pertenencia a cada una de las fuentes sísmicas se realizó con base en los reportes sismológicos o considerando la profundidad focal: eventos con profundidades menores a 25 km se consideraron pertenecientes al fallamiento cortical superficial, entre 25 y 45 km a la fuente de subducción interplaca y mayores a esa pertenecientes a la de subducción intraplaca (ver Molina et al., 2008).

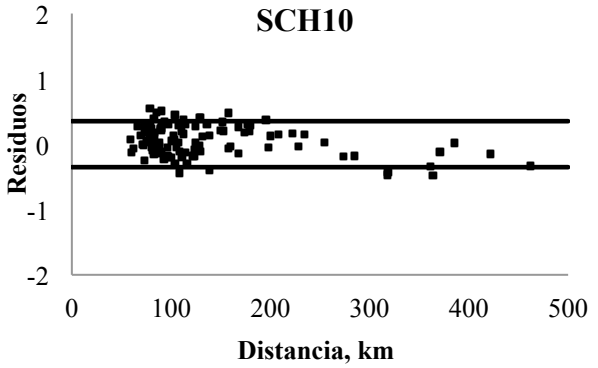
Todos los modelos fueron comparados para condición de roca y separados de acuerdo al tipo de fuente para la cual fueron desarrollados conforme a la zonificación utilizada en el proyecto (Marroquín y Benito, 2009).

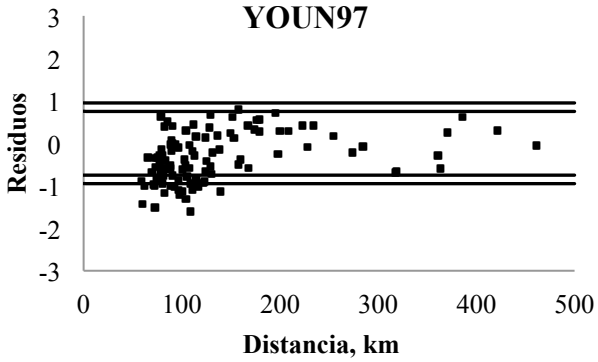
De acuerdo a este primer procedimiento, se llevó a cabo un análisis de residuos entre los valores de aceleraciones pico (PGA) y las ordenadas espectrales de 0.3 y 1.0 segundos, provenientes de los observados instrumentalmente y predichos con cada modelo; resultando los mejores ajustes con los modelos SCH10 y ZH06 (

Figura 1.3) para las fuentes superficiales, con SCH10 y YOUN97 para las fuentes de subducción interface, y con SCH10 y YOUN97 para las fuentes de subducción intraplaca.

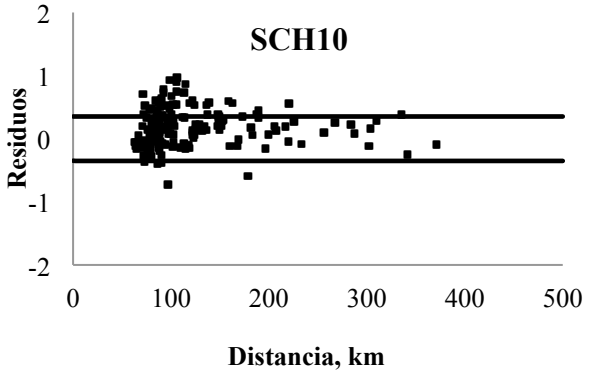


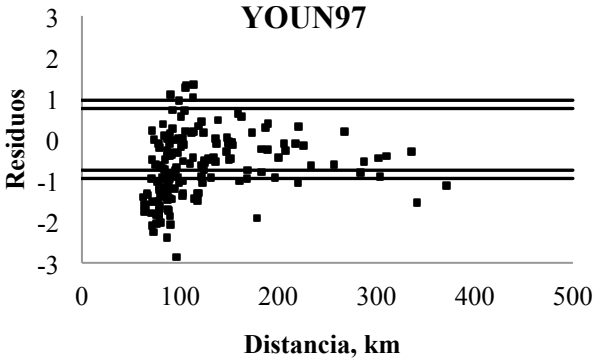
a) Fuentes corticales





b) Subducción interfase





c) Subducción intraplaca

Figura 1.3: Distribución de residuos con la distancia correspondientes a los datos de PGA respecto a las predicciones. Los puntos representan los residuos y las líneas continuas representan la desviación estándar de cada modelo (± 1σ). Para SCH10 se utiliza log10.

Cuadro 2.1: Distribución del porcentaje de residuos que se encuentran dentro del intervalo μ±σ propio de cada modelo (modelos que presentan el mejor ajuste).

Modelo	Cortical			Subducción Interfase			Subducción Intraplaca		
	PGA	PSA (0.3 s)	PSA (1.0 s)	PGA	PSA (0.3 s)	PSA (1.0 s)	PGA	PSA (0.3 s)	PSA (1.0 s)
SCH10	85	92	77	86	76	71	70	72	67
ZH06	70	58	54	75	65	59	55	51	48
YOUN97	--	--	--	86	77	49	58	63	37
CLI94	35		53	29		31			

Cuadro 2.2: Distribución del número de residuos (%) que se encuentran dentro y fuera del intervalo μ ± 1σ propio de cada modelo

Superficial	SCH10					ZH06				
	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0
PGA	84.5	12.7	2.8	60.6	39.4	70.4	2.8	26.8	38.0	62.0
SA (0.3)	91.8	8.2	0.0	65.6	34.4	58.1	6.5	35.5	32.3	67.7
SA (1.0)	77.0	23.0	0.0	72.1	27.9	54.1	4.9	41.0	42.6	57.4
Interfase	**SCH10**					**YOUN97**				
	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0
PGA	85.7	9.5	4.8	59.0	41.0	85.7	0.0	14.3	28.6	71.4
SA (0.3)	76.2	17.1	6.7	61.9	38.1	77.1	5.7	17.1	38.1	61.9
SA (1.0)	71.4	23.8	4.8	70.5	29.5	48.6	12.4	39.0	25.7	74.3
Intraplaca	**SCH10**					**YOUN97**				
	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0	± 1σ	> 1σ	< -1σ	> 0	< 0
PGA	69.6	27.2	3.2	70.3	29.7	58.2	3.2	38.6	22.2	77.8
SA (0.3)	71.7	26.3	2.0	76.3	23.7	63.2	4.6	32.2	29.6	70.4
SA (1.0)	66.7	7.1	3.2	12.8	9.0	37.3	4.6	58.2	15.0	87.9

Cabe mencionar, que si bien el modelo SCH10 presenta un porcentaje de residuos dentro del intervalo μ±σ (considerado un buen ajuste), éste subvalora el 60.6% de las observaciones de PGA para fuentes de fallamiento superficial, el 59% para fuentes de subducción interfase y el 70.3% para fuentes de subducción intraplaca, con un total de 12.7, 9.5 y 27.2% de los residuos presentando un sesgo positivo fuera del intervalo de validez respectivamente.

El segundo procedimiento, se basó en un método gráfico de comparaciones directas de los valores espectrales observados (para magnitudes y distancia definidas), para eventos sísmicos (13 de enero y 13 de Febrero de 2001), con características similares a los sismos de control resultantes de la desagregación de la amenaza sísmica del proyecto RESIS II. Lo anterior, fue considerado debido a la sensibilidad en la estimación de la amenaza ante los modelos de atenuación, planteado en el primer procedimiento.

Cuadro 2.3: Parámetros de los sismos de control resultantes de la desagregación en ciudad de San **Salvador (Marroquín y Benito, 2009)**

Aceleración (gal)	Período Retorno (años)	Sismo de Control 1		Sismo de Control 2	
		Mw	Rhip (km)	Mw	Rhip (km)
PGA	500	6.5	15	-	-
SA(0.2s)	500	6.5	15	7.25	[150-180]
SA(1.0s)	500	6.5	15	7.25	180

Cuadro 2.4: Parámetros de los sismos y las estaciones utilizados para el análisis (modificado de Marroquín y Benito, 2009).

Evento	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
2001.02.13	13.671	-88.938	10	6.6
2001.01.13	13.049	-88.66	60	7.7

Evento	Latitud	Longitud	Distancia Hipocentral / Rrupt	
			2001.02.13	2001.01.13
PA	13.614	-89.179	29.33	
QC	13.616	-88.550		88.2 / 87.12
SE	13.867	-88.663		109.6 / 108.7
CU	13.333	-87.817		113.0 / 113.6

Los resultados obtenidos demostraron que el modelo ZH06 para fuentes corticales se ajusta muy bien, no solo a los valores de PGA, sino también a la forma espectral (sismo del 13 de febrero de 2001). Para el evento de subducción intraplaca seleccionado para el análisis (13.01.2001, Mw 7.7), la forma espectral no presenta tan buen ajuste para ninguno de los modelos seleccionados, aunque se logran observar las ventajas del modelo YOUN97. Para fuentes Intraplaca, el modelo de ZH06 es más conservador para distancias inferiores a los 90 km (Mw7.0), mientras que el modelo YOUN97 arroja mayores valores para distancias superiores (Sismo de Control 2: Mw 7.25, R 150-180).

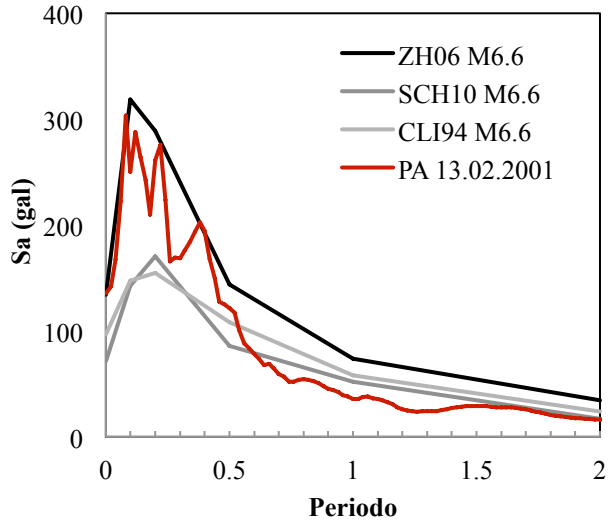


Figura 1.4: Comparación directa de los valores espectrales observados y predichos para el sismo del 13 de febrero de 2001 (cortical).

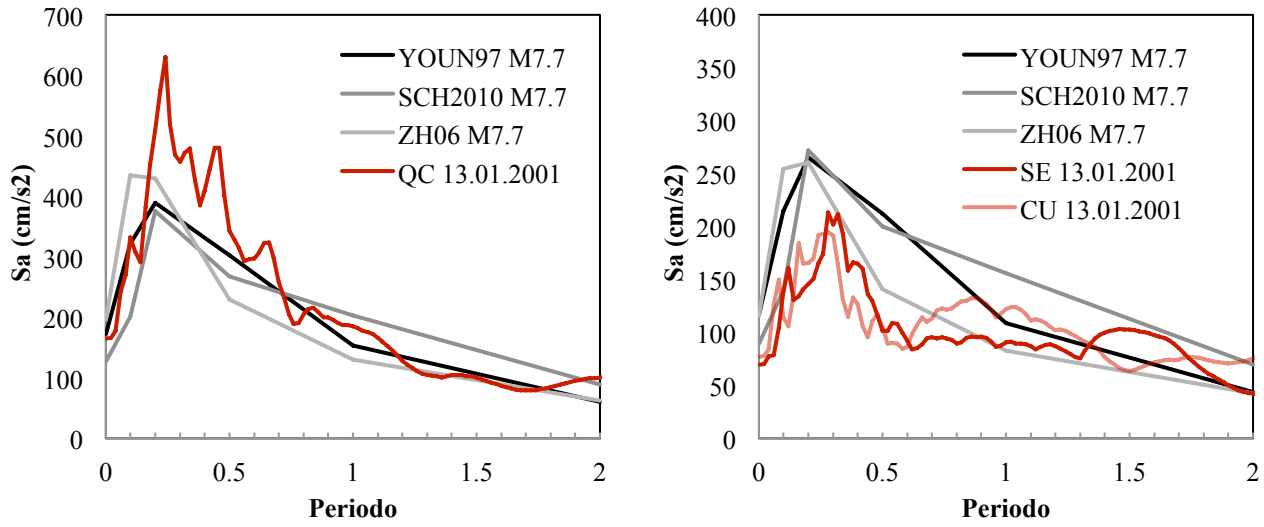


Figura 1.5: Comparaciones directas de los valores espectrales observados y predichos para el sismo del 13 de enero de 2001 (intraplaca).

2.3.1 Distribución Geográfica de la Amenaza

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, se seleccionaron las dos combinaciones consideradas más idóneas y se realizaron los cálculos con el programa CRISIS2007, versión 5.1, (Ordaz et al., 2007), utilizando la zonificación y parámetros sísmicos de las zonas utilizados en el proyecto RESIS II (ver Molina et al., 2008). Las combinaciones seleccionadas se detallan en el Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5. Modelos de atenuación utilizados en el análisis y resumen de sus características (modificado de Marroquín y Benito, 2009 y Schmidt, 2010).

Combinación 1 (SYY)	Combinación 2 (ZYY)
Zonas corticales con modelo de atenuación Schmidt, 2010.	Zonas corticales con modelo de atenuación de Zhao et al., 2006.
Zonas de subducción interfase con atenuación de Youngs et al., 1997.	Zonas de subducción interfase con atenuación de Youngs et al., 1997.
Zonas de subducción intraplaca con atenuación de Youngs et al., 1997.	Zonas de subducción intraplaca con atenuación de Youngs et al., 1997.

La combinación 1, presenta las mayores aceleraciones en la franja costera. En cambio, la combinación 2 muestra que los mayores valores se predicen en la zona de la cadena volcánica, donde se suma la influencia de la actividad de fallamiento local junto con la zona de subducción. La Figura 1.6a y Figura 2.4b muestra los mapas de amenaza obtenidos para cada una de las combinaciones, respectivamente. La Figura 1.7 muestra el mapa de máximas intensidades sísmicas observadas hasta la fecha.

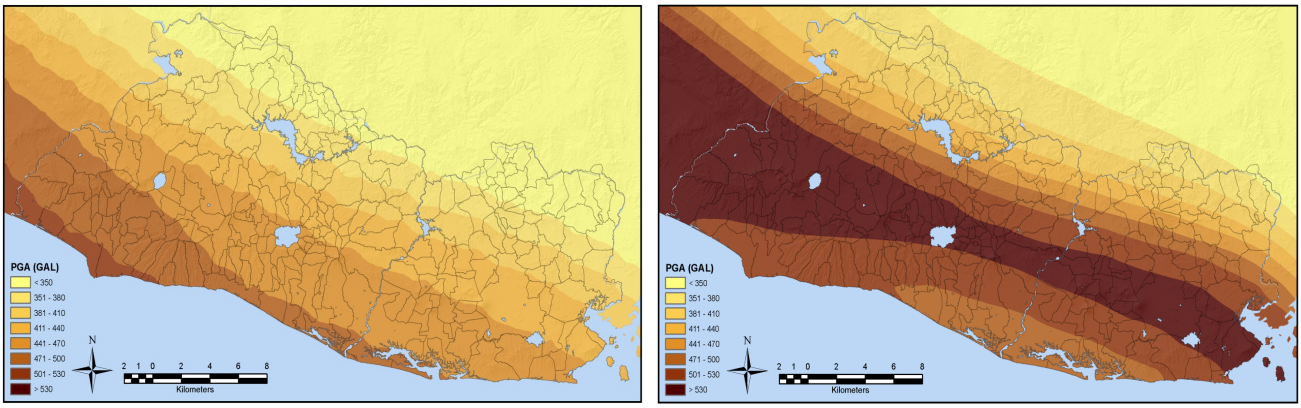


Figura 1.6. Mapas de amenaza sísmica - PGA para TR=500años, a) Izquierda: Combinación 1 (SYY) (izquierda) y b) Derecha: Combinación 2 (ZYY) (derecha)

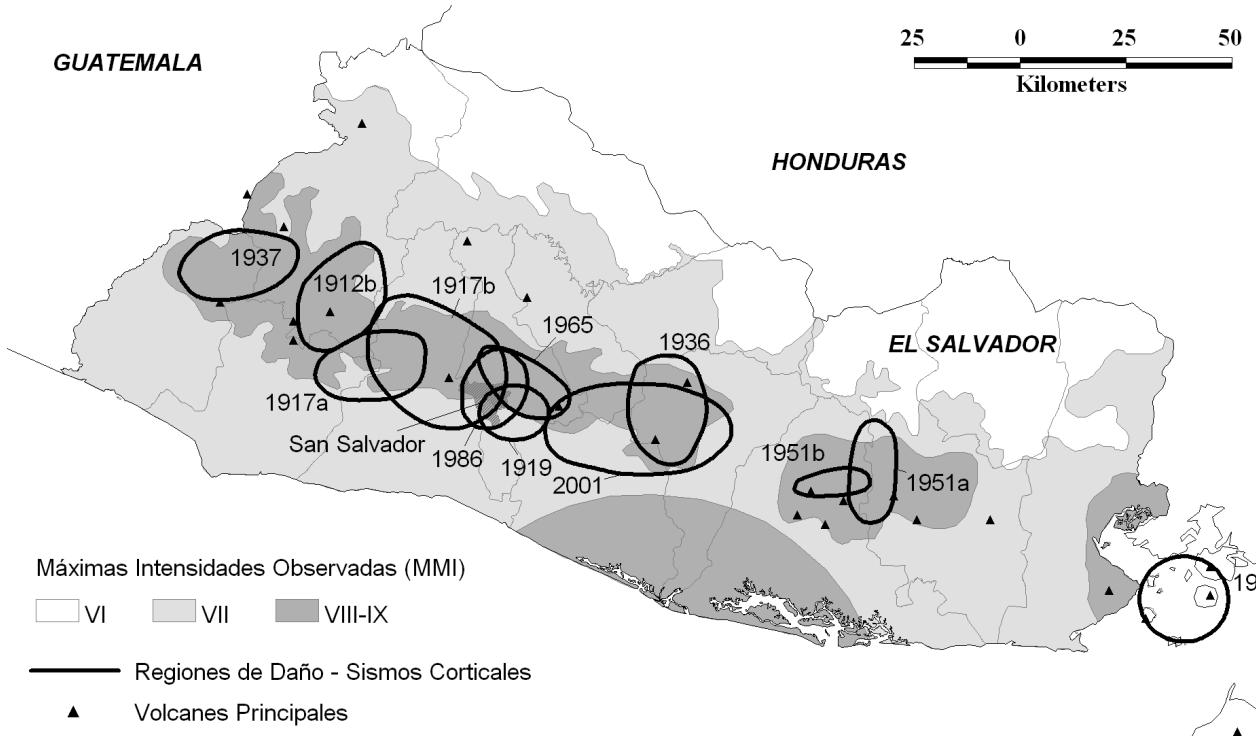


Figura 1.7. Máximas intensidades sísmicas observadas y curvas de Isosistas mayor o igual a VII MMI para eventos corticales (modificada de Kattan Jokisch, 2010 y Bommer et al., 1998).

Considerando la distribución geográfica de la amenaza, el ajuste de la forma espectral predicha vs. observada (especialmente para eventos corticales) y el alto sesgo positivo obtenido del análisis de residuos para el modelo SCH10, se optó por utilizar el modelo ZH06 para fuentes corticales y el modelo YOUN97 para fuentes de subducción interfase e intraplaca, para la generación del catálogo sintético de escenarios sísmicos a utilizar en la modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico en el AMSS. En la Figura 1.8, se muestra la disgregación de la amenaza en escenarios

sísmicos probables, donde aproximadamente 25,000 escenarios fueron considerados en el modelo de riesgo.

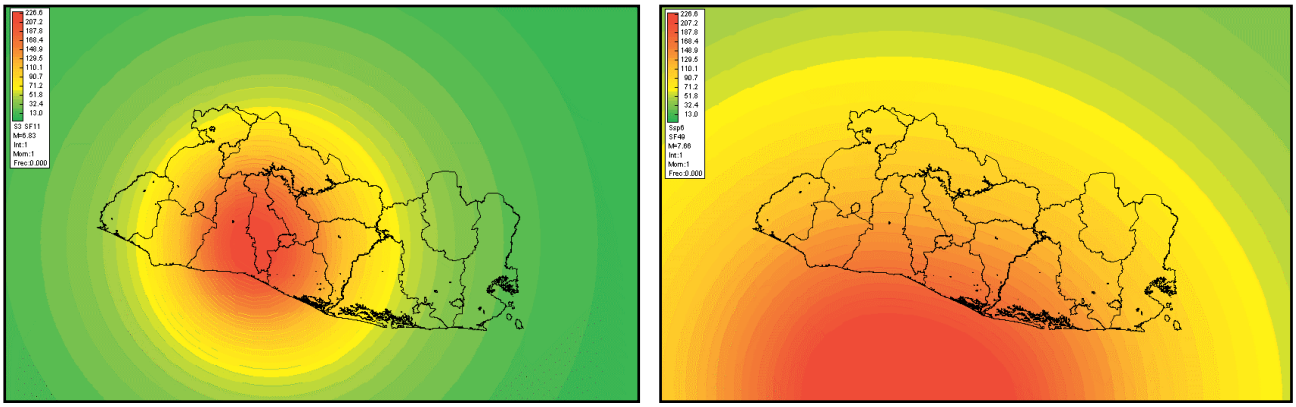


Figura 1.8. Ejemplo de escenarios sísmicos probables (cerca de 25,000 escenarios considerados en el modelo de riego).

2.4 Estudio de Respuesta de Sitio en Santa Tecla

2.4.1 Efecto de las Condiciones Locales en el Movimiento Fuerte

El factor sitio generalmente se define en función de la geología superficial del lugar y puede llegar a dominar la amenaza sísmica debido a los efectos de amplificación de la radiación sobre la base rocosa. El efecto de sitio en el país está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o piroclastos no consolidados.

Cuando las ondas sísmicas pasan de la roca al suelo, que tiene una velocidad de propagación menor, el tren de ondas desacelera, pero para mantener el flujo de energía, se incrementa su amplitud, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. El suelo, sin embargo, absorbe más energía que la roca y tiende a amortiguar el movimiento. (Bommer et al., 1998).

El efecto es máximo cuando el período de las ondas coincide con el período de vibración de la capa de suelo, en tanto que el período natural del suelo llega a ser dominante en el movimiento (de forma simplificada T= 4H/Vs (Ingvarsson y Johansson, 1996)). El análisis de respuesta de sitio es, por tanto, crucial para obtener estimaciones confiables de los efectos del sismo sobre la infraestructura existente en la ciudad. El nivel de daño máximo probable ocurrirá cuando el período natural de vibración de una edificación coincida con el período natural del suelo que la sostiene. (Kattan et al. 2012)

En la ciudad de Santa Tecla, así como en toda el Área Metropolitana de San Salvador, los espesores de piroclastos son muy variables y amplificaciones importantes ocurren en un amplio rango de períodos de interés ingenieril. En la Figura 1.10 se presentan las aceleraciones registradas durante el sismo del 10 de Octubre de 1986 en contraste con las aceleraciones de diseño del código vigente al momento del sismo (código de 1966), el cual no consideraba las condiciones de suelo.

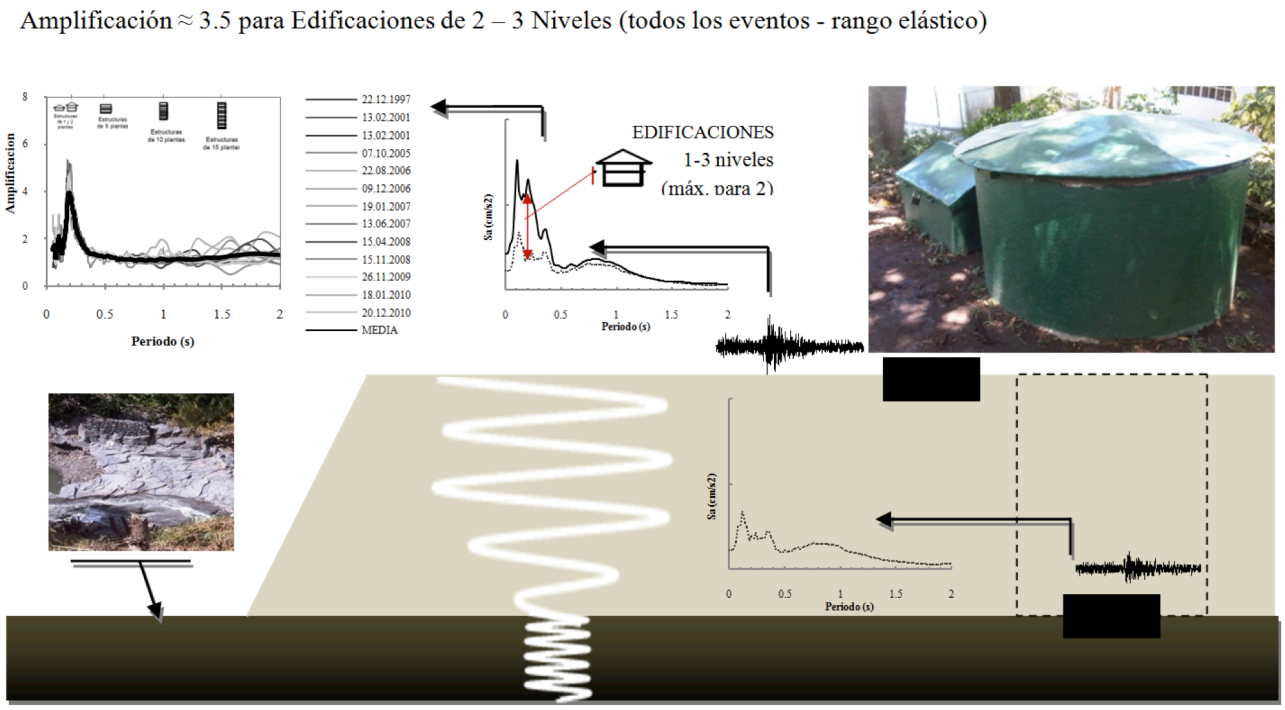


Figura 1.9. Amplificación de ondas sísmicas en depósitos de suelo blando para el caso del pozo instrumentado en Casa Presidencial (CPRS/CPRF).

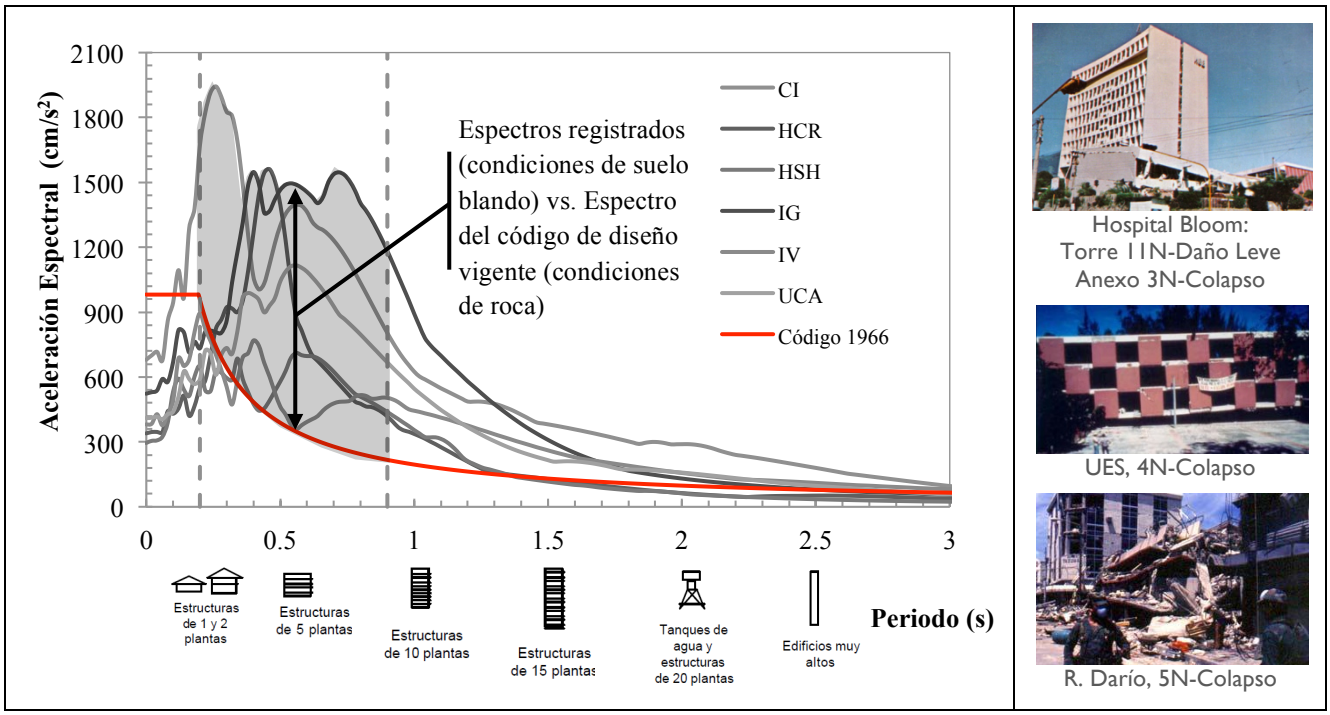


Figura 1.10. Espectros de respuesta elásticos para el sismo del 10.10.1986 y el código de 1966 - condiciones de roca (ζ=5%) junto con el tipo de edificación que podría verse más afectada (Izq). Ejemplos de daños ocurridos durante el evento (Der.) (modificado de Kattan-Jokisch, 2010).

2.4.2 Geología del Sitio (Hernández, 2007)

Santa Tecla está situada entre las estructuras volcánicas del Volcán de San Salvador (VSS) al norte, al oeste y al sur por el bloque estructural de la Cordillera del Bálsamo y al este por el cráter freatomagmático del Plan de la Laguna y el domo volcánico Cerro San Jacinto.

De manera general, la estructura del graben Central (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a) juega un papel muy importante en la geología del AMSS, puesto que esa depresión se ha formado concomitantemente con el surgimiento de la cadena volcánica y ha sido rellenada por los productos de esos volcanes. A raíz de la presencia del graben, de las estructuras volcánicas establecidas dentro de él y del colapso calderico del VSS, se pueden distinguir tres zonas geológicas: Picacho, Boquerón y Bálsamo, Figura 1.11.b.

El área de la ciudad de Santa Tecla, se ubica principalmente sobre de la zona geológica el Boquerón, aunque a su vez, se encuentra influenciada al sur, por la zona de El Bálsamo. La zona el Boquerón corresponde al bloque central, topográficamente más deprimido, entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo. Las coladas lávicas y flujos piroclásticos tanto del Boquerón como del antiguo edificio volcánico San Salvador, han sido canalizadas en esta zona. El perfil geológico está formado por diferentes capas de Tierra Blanca (TBJ y TB2) y capas de piroclastos G2 del VSS, Andesitas y Brecha.

Por otro lado, la zona geológica Bálsamo comprende la cordillera del mismo nombre. Las coladas lávicas presentes en esta zona pertenecen a eventos mucho más antiguos que a la misma formación del complejo volcánico San Salvador. Este sector presenta un perfil formado por diferentes capas de Tierra Blanca (TBJ, TB2, TB3 y TB4), capas de piroclastos G1 y G2 (ambas producidas por erupciones del VSS) y una capa de Suelos Meteorizados Poligenéticos.

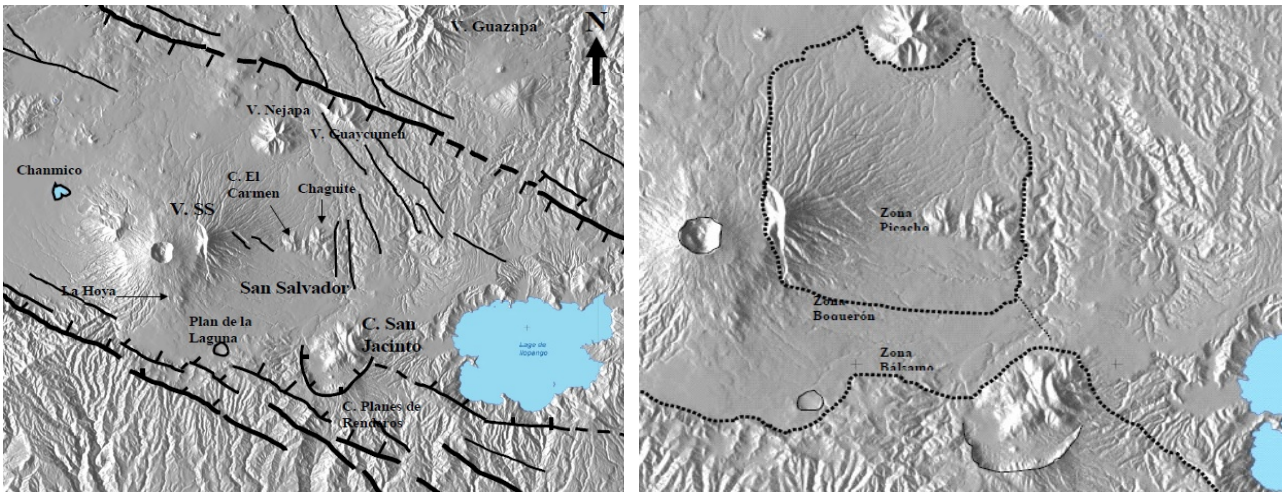


Figura 1.11. a) Estructura principal del graben central (izquierda) y b) límites de zonas geológicas (derecha) (Hernández, 2007)

2.4.3 Metodología para la evaluación de la Respuesta de Sitio

La evaluación de la respuesta de sitio en la ciudad de Santa Tecla, se ha realizado de acuerdo a la metodología planteada en el proyecto de "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), portafolios de Educación, Salud y Gobierno" (Kattan et al. 2012), donde se especifica que debido a que se tiene muy poco conocimiento e información sobre las características físicas y propiedades dinámicas de los suelos de la zona, se utilizaron principalmente métodos empíricos, extrapolando la respuesta obtenida a sitios de supuesta geología superficial similar.

Estos métodos empíricos se basan en registros de datos sísmicos en el sitio de interés, de tal manera que se puedan determinar amplificaciones relativas y períodos dominantes de vibración. Por lo que para el análisis de respuesta de sitio se utilizaron las bases de registros acelerográficos de las redes de movimiento fuerte de la DGOA/MARN (1966-2011) y de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (1997-2005).

La distribución geográfica de las estaciones acelerográficas utilizadas se muestra en la Figura 1.12.a. Se utilizaron además registros de los pozos a cielo abierto instrumentados (acelerógrafos en fondo y superficie), de las estaciones de Casa Presidencial (CPRS/CPRF), Seminario San José de la Montaña (SEMS/SEMF), Viveros de DUA (VS/VF) y Centro de Recursos Naturales (CS/CF).

Por otra parte, es importante mencionar, que también se incluyó en el análisis de la respuesta de sitio, cierta información geológica y geotécnica recopilada de perforaciones profundas para pozos de agua, sondeos geotécnicos para estudios del subsuelo, pruebas dinámicas in-situ y estudios de afloramientos; todas ellas a lo largo del AMSS, según se muestra en la Figura 1.12.b.

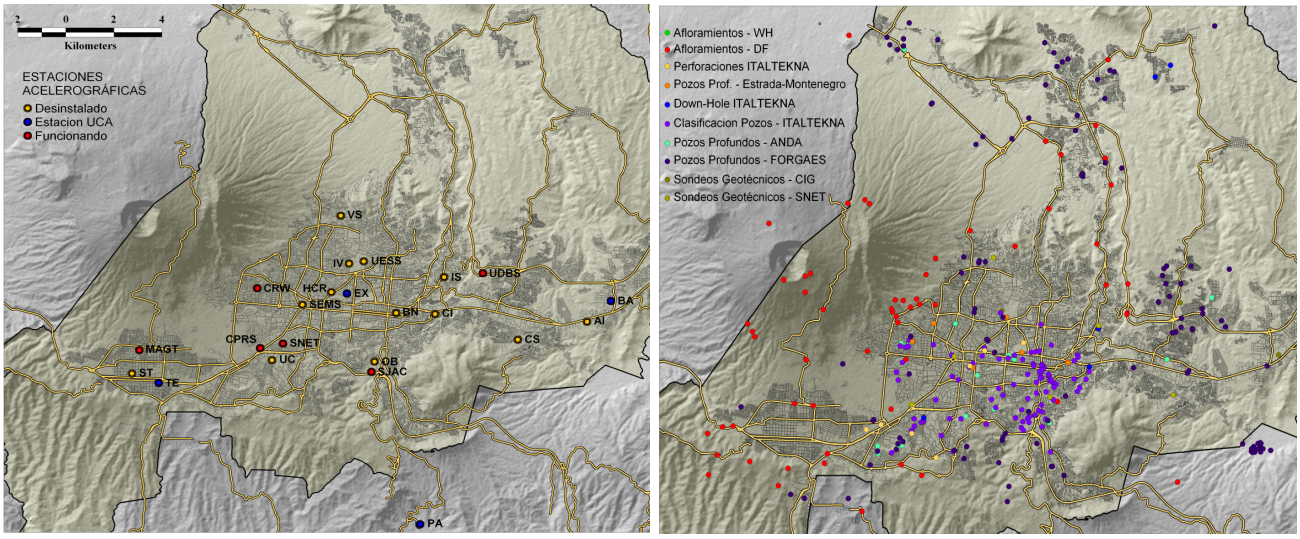


Figura 1.12 a) Estaciones acelerográficas en el AMSS y b) Puntos con información geológica y geotécnica en el AMSS.

2.4.4 Resultados: Zonas de Respuesta Sísmica Similar en Santa Tecla

Tomando como base los mapas geológicos y topográficos de la región, así como la información geológica/geotécnica recopilada, se estimaron de forma preliminar Zonas de Respuesta Sísmica Similar o Zonas de Isoperíodo, utilizando como principal criterio para su delimitación, la profundidad y características dinámicas generalizadas de los piroclastos no consolidados sobre la base rocosa (de forma simplificada T=4H/Vs) y los períodos predominantes obtenidos a partir de datos de movimiento fuerte y registros de microtemblores (Reyes y Sorto, 2007; NORSAR 2008).

En esta etapa se consideró únicamente el comportamiento elástico de los suelos (registros de amplitud moderada). El mapa preliminar de Zonas de Respuesta Sísmica Similar para la zona urbana de Santa Tecla se muestra en la Figura 1.13. Cabe mencionar, que este mapa se desarrolló para todo el AMSS, por lo que se ha realizado la extracción de información únicamente para la ciudad de Santa Tecla. Para mayor detalle, se puede confrontar el proyecto "Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), portafolios de Educación, Salud y Gobierno" (Kattan et al. 2012).

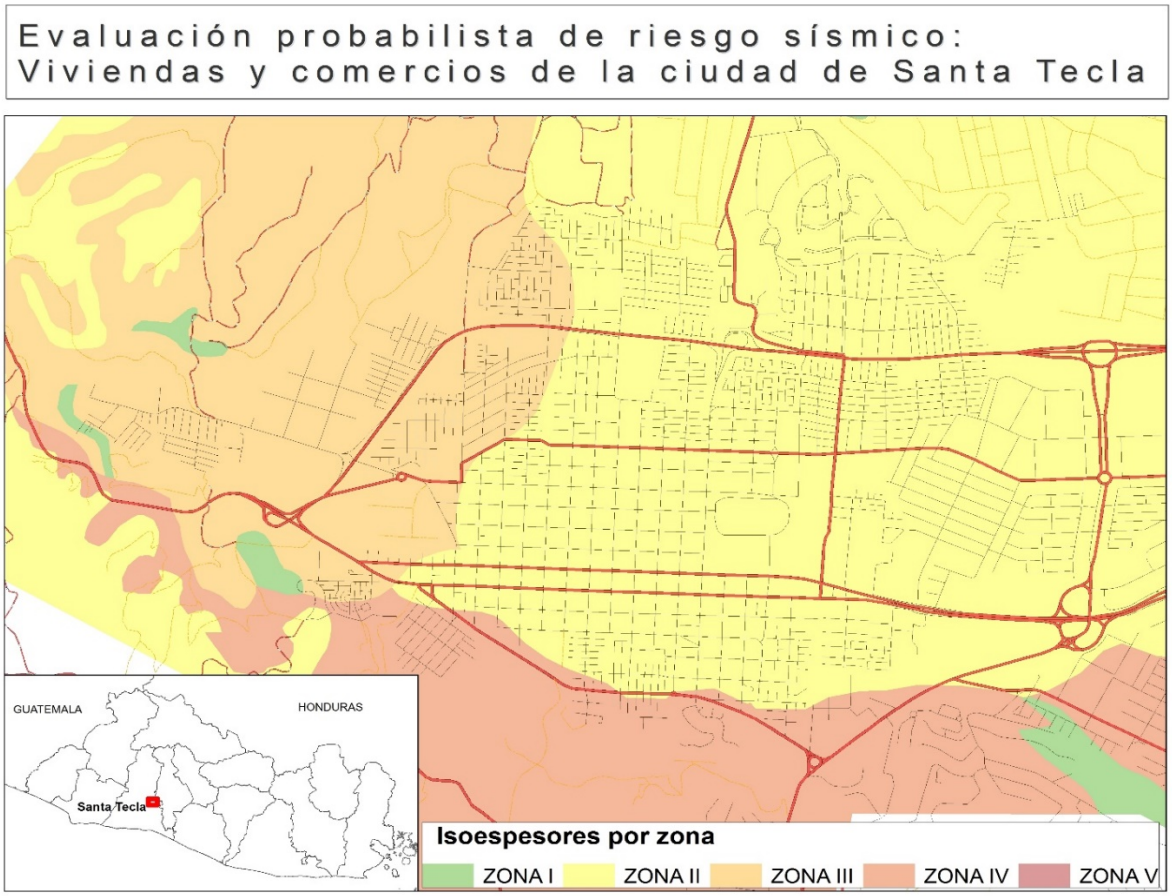
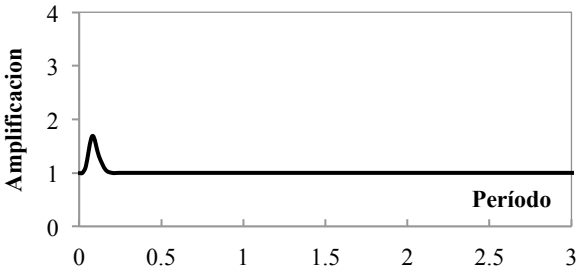
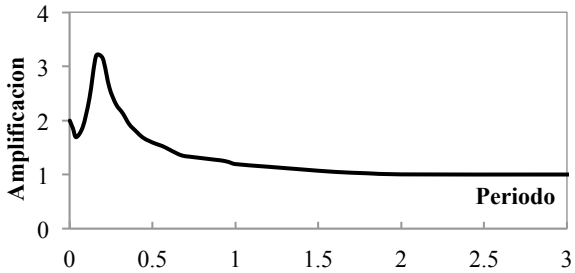
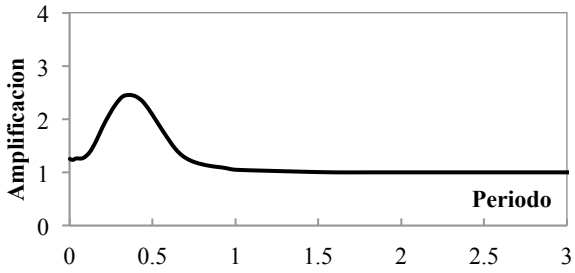
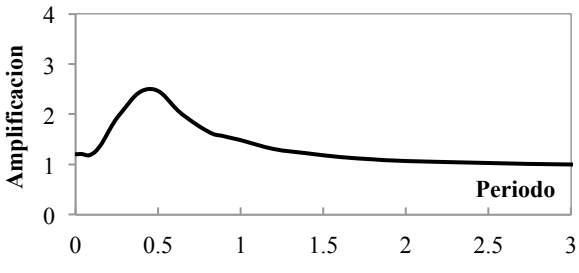


Figura 1.13. Mapa preliminar de zonas de respuesta sísmica similar para zona urbana de Santa Tecla, en función del período predominante del suelo (suelo en rango elástico). Límites obedecen a la disponibilidad de información.

Los períodos característicos no corresponden necesariamente al período medio del rango; estos se han obtenido con base en la información existente y no se descarta que otros períodos y/o amplificaciones pudieran obtenerse al contar con más información. El detalle del espesor de piroclastos superficial, función de amplificación típica, y la descripción del tipo de edificación que pudiera verse más afectada por efectos de sitio, específicamente para la ciudad de Santa Tecla, se muestra a continuación en el Cuadro 1.6. Las funciones mostradas guardan cierta relación con los tipos de suelo contemplados en el código de diseño actual, sin embargo, este último no considera el espesor de suelo, el cual es un factor determinante.

Cuadro 1.6. Condiciones típicas de suelo, funciones de amplificación y estructuras más afectadas por efectos de sitio.

Zona	Condiciones típicas de suelo	Funciones de amplificación (rango elástico) y estructuras más afectada por efectos de sitio	
ZONA I Suelo blando< 5m	 Colonia Escalón (2011)		 Estructuras **1 Nivel**
ZONA II Suelo blando 5-15m	 Zona de Multiplaza (2007*)		 Estructuras **1-3 Niveles** (Típico 2)
ZONA III Suelo blando 15-25m	 Centro de Gobierno (2010)		 Estructuras **2-5 Niveles** (Típico 3)
ZONA IV Suelo blando 25-50m	 Altos del Boulevard (2008*)		 Estructuras **4-9 Niveles** (Típico 5)

3 Recopilación de información de exposición

3.1 Información base

Dentro de las actividades iniciales del presente proyecto se examinaron diferentes fuentes de información como preámbulo de su ejecución, entre informes de proyectos anteriores, planos digitales georeferenciados y resultados de análisis previos entre otros. Algunos de los documentos más importantes compilados fueron:

- Modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico para el área metropolitana de San Salvador, incluye análisis de portafolios de educación, salud y gobierno (Kattan Jokisch et. Al., 2012).
- Contratación de Servicios de Consultoría para el Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico (Departamento mecánica estructural, 2011).
- Informe final generación de curvas de vulneralidad sísmica, (Castellanos Araujo, 2011).
- Metodología de modelación probabilista de Riesgos naturales- Informe técnico ERN-CAPRA-T1-3, Propuesta de indicadores y Funciones de vulnerabilidad El Salvador", (CAPRA, 2011).
- Mapas digitales georeferenciados procedentes del Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU), Universidad de El Salvador (UES) y Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).

Además, se reunió información digital referenciada geodésicamente, la cual se estudió y clasificó detalladamente y el resultado fue compilado en un sistema de información geográfica constituido de diversas capas, entre las que destacan:

- Calidad de la construcción de viviendas en el Área Metropolitana de San Salvador.
- Usos de Suelo y Crecimientos Informales.
- Edificaciones del Área Metropolitana de San Salvador dañadas por sismo.
- Parcelarios del casco urbano y de varias áreas residenciales.
- Zonificación de riesgo geológico.
- Mapa catastral a nivel de parcelas, en formato kml (Figura 1.14).

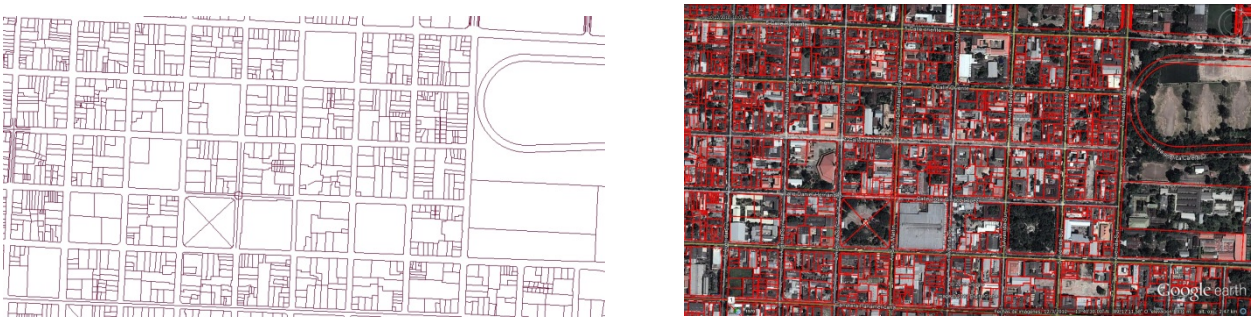


Figura 1.14. Vista de algunos segmentos parcelarios del Centro Histórico de Santa Tecla.

3.2 Ficha técnica para la recolección de la información de exposición

La ficha base para la recolección de información fue obtenida del documento "Contratación de Servicios de Consultoría para el Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico", la cual fue modificada incluyéndose ítems que se consideraron importantes, tales como definir con mejor detalle la ubicación del inmueble, forma y material del techo, nivel de daños por sismos pasados y detalle de la topografía del emplazamiento, entre otros; estas variaciones tuvieron que ser consideradas debido a las particularidades de los activos levantados, por lo que, también, la interfaz para la captura, revisión y ordenamiento de datos debió ser modificada. Los cambios relevantes que se hicieron para ajustarse a las condiciones encontradas en campo fueron los siguientes:

SECCIÓN: FORMATO DE CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS.

- Tipología estructural: Se seleccionaron en base a las tipologías definidas en el TAP anterior, Kattan Jokisch et. al., 2012. Si había una nueva tipología, ésta se agregó.

SECCIÓN: INFORMACIÓN GENERAL

- Parcela catastral: Se seleccionó en base a la información de catastro proporcionada por la alcaldía.
- Manzana: Definida por cada grupo de trabajo en base a su distribución de áreas de levantamiento.
- Área: De la parcela catastral, definida por la información de catastro en caso de tenerla.
- Número de edificios (módulos) representativos en la parcela catastral inspeccionada: En caso de que existieran más de una estructura por parcela catastral.
- Portafolio: Se incluyeron más categorías que pudiesen estar presentes en un área urbana.

SECCIÓN: INFORMACIÓN TÉCNICA INDISPENSABLE.

- Forma de la planta: Se indicó la forma predominante de la estructura levantada
- Dimensiones: Se colocaron las dimensiones de la estructura levantada así como su área.
- Material de piso: Se indicó el material del piso, en caso de ser una estructura de más de un nivel.
- Tipo de piso: Se identificó el tipo de piso, en caso de ser una estructura de más de un nivel.
- Topografía del sitio: Se indicó la topografía dominante del sitio de análisis.
- Sistema estructural: Se incluyeron las opciones de prefabricado y moldeado, muy comunes en algunos desarrollos urbanos.

SECCIÓN: INFORMACIÓN TÉCNICA COMPLEMENTARIA

- Se ha incluido el material del techo y la forma del mismo.

SECCIÓN: DEFECTOS ESTRUCTURALES OBSERVADOS

- Se ha incluido la opción de Vanos grandes en paredes.

SECCIÓN: INFORMACIÓN DE DAÑOS EVIDENTES

- Se ha incluido la severidad del daño por sismo y si fue reparado en su momento; así como las opciones de "necesita reparación" y "recientemente renovado".

Se parte del supuesto que cada ficha corresponde a una sola estructura, lo anterior es cierto principalmente en zonas como el Centro Histórico donde existe más de una estructura por parcela catastral. El modelo del instrumento de recolección se presenta en el Anexo 1.

3.3 Información de exposición para el sector definitivo.

El tamaño total del territorio en estudio es de 5,123,371 M^2 que comprende todo el Centro Histórico así como las colonias ubicadas al sur y norte del mismo, Figura 1.15. A partir de la información obtenida y descrita en las secciones precedentes, la delimitación del área de trabajo se hizo en conjunto con las instituciones involucradas en el estudio. El área se dividió en siete regiones para una mejor cobertura en la obtención de los datos de exposición. Tomando en cuenta la importancia de los activos expuestos, ubicación y densidad poblacional, se decidió que el levantamiento de los activos ubicados en el Centro Histórico se ejecutaría uno a uno, en tanto que para el resto, donde se ubican complejos habitacionales compuestos de estructuras en serie, se haría un muestreo aleatorio de los activos representativos cuyas características serían después copiadas entre las construcciones similares considerando este método como el de manzanas homogéneas. En resumen, los activos expuestos en las tres regiones correspondientes al Centro Histórico se censaron uno a uno, mientras que para los activos de las otras cuatro regiones restantes se hizo uso de la metodología de manzanas homogéneas.

Figura 1.15. Subdivisión del área de estudio en la ciudad de Santa Tecla en siete regiones para la recolección de información. Activos en el Centro Histórico se levantaron de manera individual, mientras que el uso de manzanas homogéneas se empleó para el resto.

Para levantamiento de los activos de las manzanas homogéneas fueron ejecutados por cuatro grupos de evaluadores. En la Figura 1.16 se puede observar los puntos que representan las estructuras que fueron censadas y que por sus características sirvieron como patrón que luego se replicó en los segmentos catastrales adyacentes. Aun cuando la categorización de activos expuestos se presenta en las secciones siguientes, claramente se puede observar la predominancia de estructuras que pertenecen al portafolio Vivienda y en mucho menor grado aquellas del portafolio Comercio.

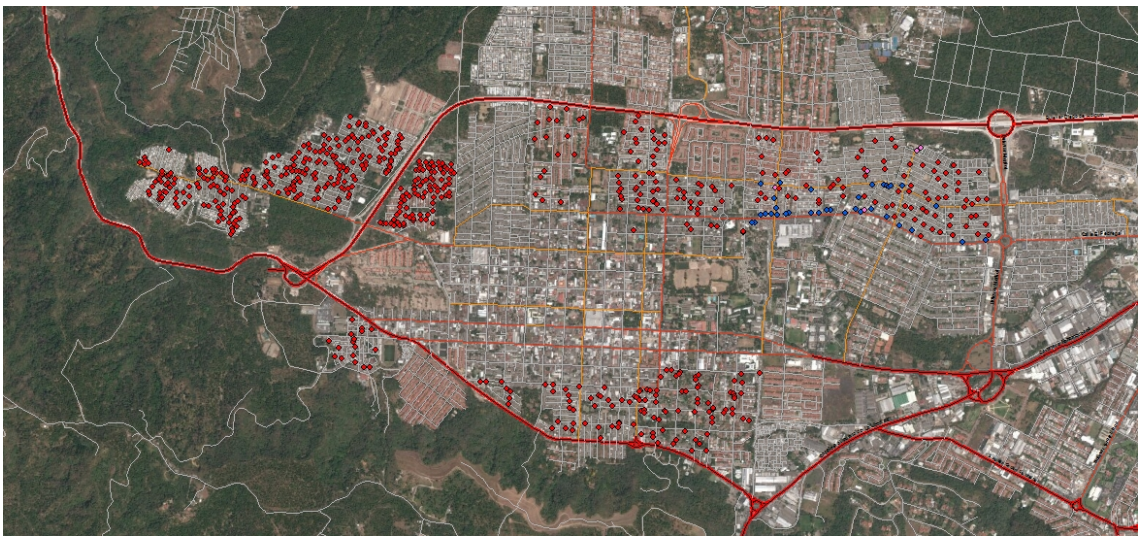


Figura 1.16. Edificaciones censadas en los segmentos de manzanas homogéneas. Colores de los puntos, Rojo: Vivienda, Azul: Comercio, Amarillo: Industria y Violeta: Otros.

Por otra parte, la recopilación de la información de los activos individuales estuvo a cargo de tres grupos de evaluadores. En este proceso se identificó que gran cantidad de edificaciones pertenecen al portafolio Vivienda, sin embargo, debido a la ubicación de esta zona de estudio, hay también un porcentaje importante dentro del portafolio Comercio, Figura 1.17.

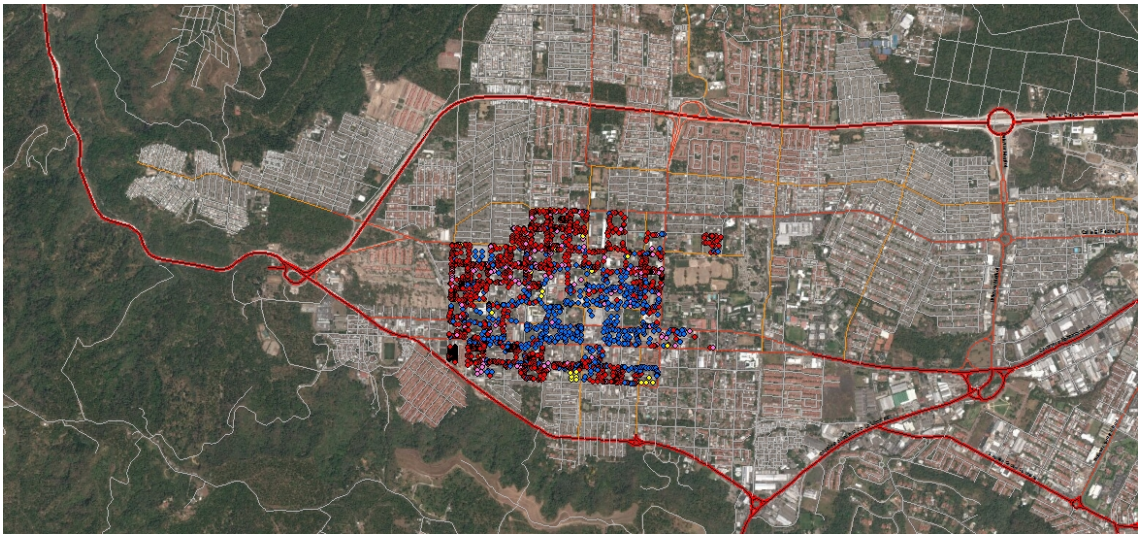


Figura 1.17. Edificaciones levantadas en los segmentos del Centro Histórico. Colores de los puntos, Rojo: Vivienda, Azul: Comercio, Amarillo: Industria y Violeta: Otros.

Al finalizar las dos fases de trabajo, se procedió a distribuir y multiplicar los activos base, principalmente aquellos de las manzanas homogéneas, en los segmentos catastrales similares por lo que, al final del proceso, se obtuvieron 16,444 activos que se utilizaron para ejecutar la evaluación de análisis de riesgo sísmico para toda el área de interés previamente establecida, Figura 1.18.

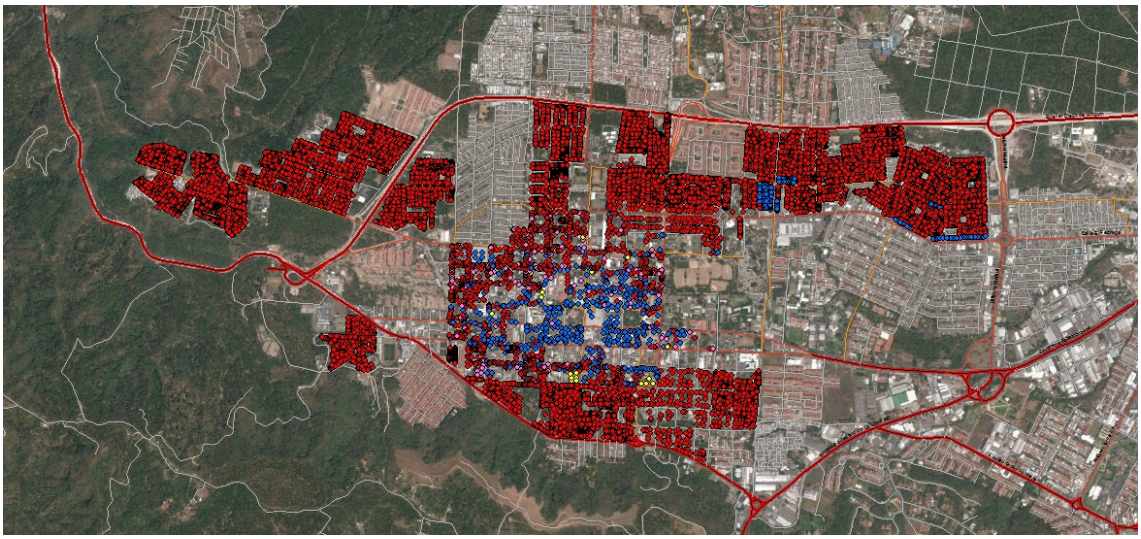


Figura 1.18. 16,444 activos utilizados en el análisis de riesgo sísmico. Colores de los puntos, Rojo: Vivienda, Azul: Comercio, Amarillo: Industria y Violeta: Otros.

Cuando la información de campo fue recolectada en las encuestas, y una vez modificada y ajustada la base de datos en poder del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Humanos (MARN), se procedió al vaciado de información. Esta información fue revisada a medida fue introducida en la base de datos. La mayoría de problemas encontrados fue la incorrecta asignación de coordenadas de los activos así como las dimensiones de las parcelas, errores que fueron apropiadamente corregidos.

No se omite manifestar que en ciertas áreas de la zona de estudio no se pudo compilar toda la información requerida, principalmente en lo relacionado al número de habitantes y el costo de los activos, debido a varios factores tales como falta de acceso a algunas viviendas, desconfianza de los usuarios de las viviendas hacia los encuestadores y, principalmente, la falta de seguridad personal de los equipos de encuestadores.

3.4 Discusión de resultados

En esta sección se analiza la información obtenida durante el levantamiento tanto en tipologías estructurales, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, como en los diferentes tipos de portafolios en los cuales se categorizan las estructuras inventariadas durante el levantamiento de datos. Las estructuras censadas fueron clasificadas en los portafolios "Vivienda", "Comercio", "Industria" y "Otros", en este último se incluyen estructuras tales como Iglesias y estaciones de policía. Vale aclarar que debido a que en el TAP anterior, Kattan Jokisch et. al., 2012, las estructuras pertenecientes a los portafolios "Educación", "Salud" y "Edificios gubernamentales" ya fueron estudiados, tales portafolios no fueron tomados en cuenta en la presente investigación.

La observación más relevante obtenida de la Figura 1.19 es que para todos los portafolios la tipología estructural mayormente encontrada es Paredes de Mampostería Reforzada (PMR), porque abarca casi el 80% de las estructuras. Tal dato era de esperar debido a que el área levantada corresponde a un área urbana donde la mayoría de edificaciones corresponden al portafolio "Vivienda" o en algún tiempo pasado pertenecieron a esa categoría pero han cambiado su uso manteniendo su sistema constructivo. En un muy distante segundo lugar se encuentran los Marcos de Concreto con Arriostramientos, que corresponden predominantemente al portafolio "Comercio". Es de notar que tipologías con alta vulnerabilidad tales como Adobe, Polines, Bahareque y Madera todavía se encuentran presentes en la zona de estudio.

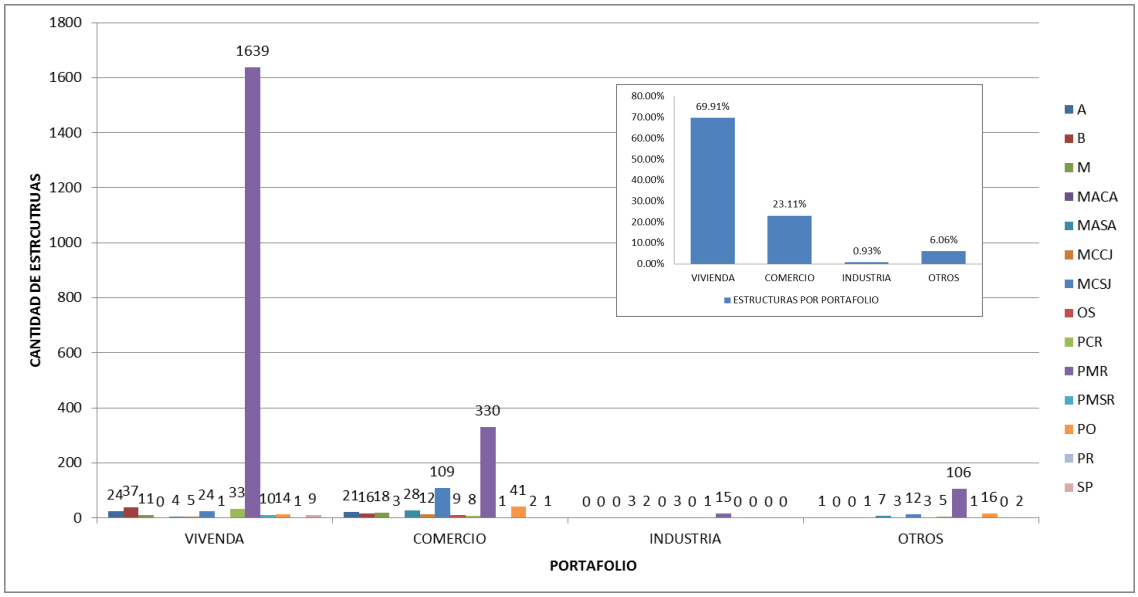


Figura 1.19. Clasificación de los activos inventariados por sistema estructural y portafolio.

Haciendo un consolidado del porcentaje de las estructuras que pertenecen a cada portafolio, dos de cada tres edificaciones pertenecen a "Vivienda" y una de cada cuatro corresponde a "Comercio", el resto se reparte en "Otros" e "Industria".

Analizando las estadísticas para cada uno de los portafolios y comenzando por el portafolio que tiene la mayor representatividad del universo considerado, que en este caso es "Vivienda", **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se desprende que la tipología predominante es la de Paredes de Mampostería Reforzada, con casi el 90 % de casos; en un lejano segundo y tercer lugar se encuentra el Bahareque y las Paredes de Concreto Reforzado. El resto de tipologías están presentes de manera residual.

Para el segundo portafolio según el número de estructuras, "Comercio", se observa que al menos una de dos edificaciones pertenece a la tipología Paredes de Mampostería Reforzada, en segundo lugar se encuentran los Marcos de Concreto con Arriostramiento y en tercer lugar las Estructuras de Polines. Se observa un considerable número de inmuebles que pertenecen a tipologías más vulnerables, tales como Adobe, Bahareque y Madera, que forman casi el 10% del total.

El portafolio "Industria", **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, sigue la misma tendencia de los anteriores, en donde la tipología formada por las Paredes de Mampostería Reforzada está presente en al menos dos tercios del total de casos; sin embargo, este portafolio es el más pequeños de todos.

Al igual que en el portafolio "Industria", dos terceras partes del universo del portafolio "Otros" está formado por las Paredes de Mampostería Reforzada, en segundo lugar, con un 10% están las

Estructuras de Polines y en tercer lugar están los Marcos de Concreto con Arriostramiento con un 8%.

Finalmente, haciendo un desglose de cada tipología dependiendo de la altura de las estructuras y código empleado. Se observa que las edificaciones de Paredes de Mampostería Reforzada de un nivel de código bajo y medio son las estructuras predominantes, lo cual se puede relacionar al gran número de viviendas unifamiliares de un nivel que están presentes en la zona de estudio, Figura 1.20, y que en gran medida controlarán las pérdidas del área de interés.

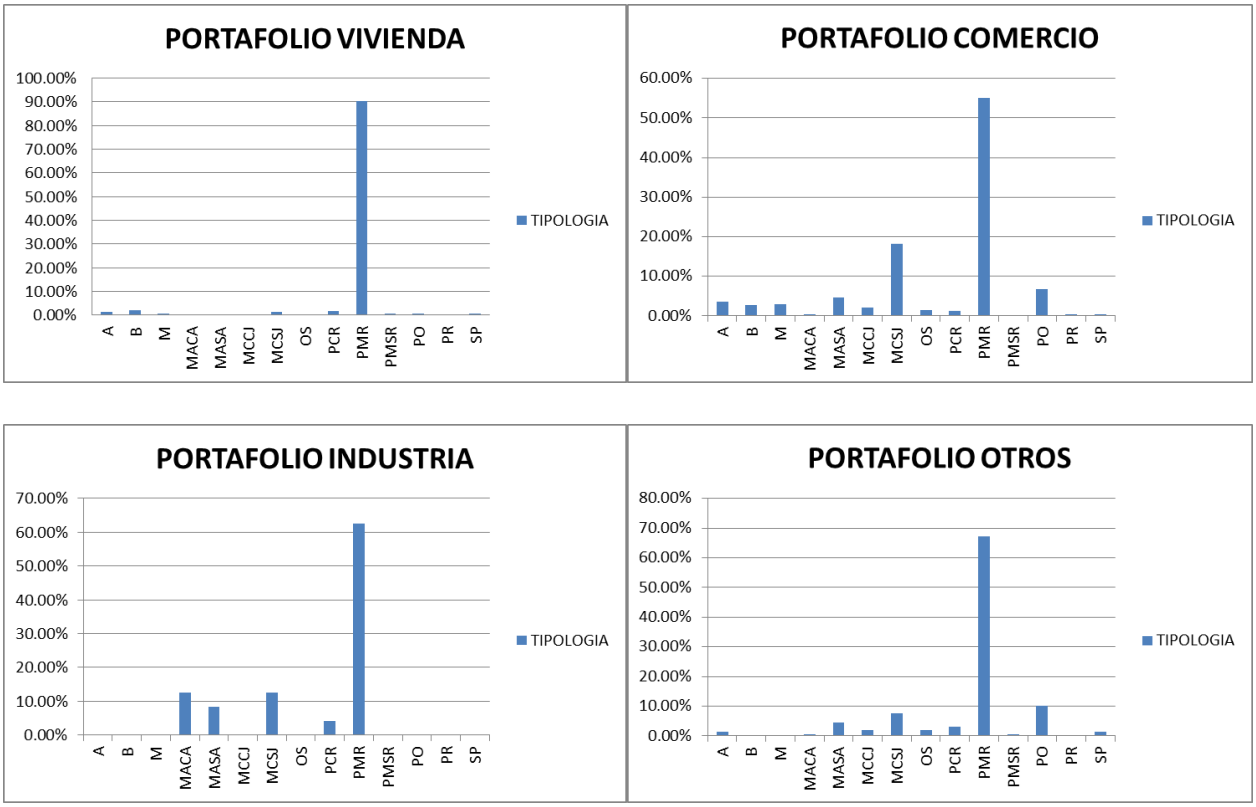


Figura 1.20. Clasificación de los activos inventariados por sistema estructural para los diferentes portafolios encontrados

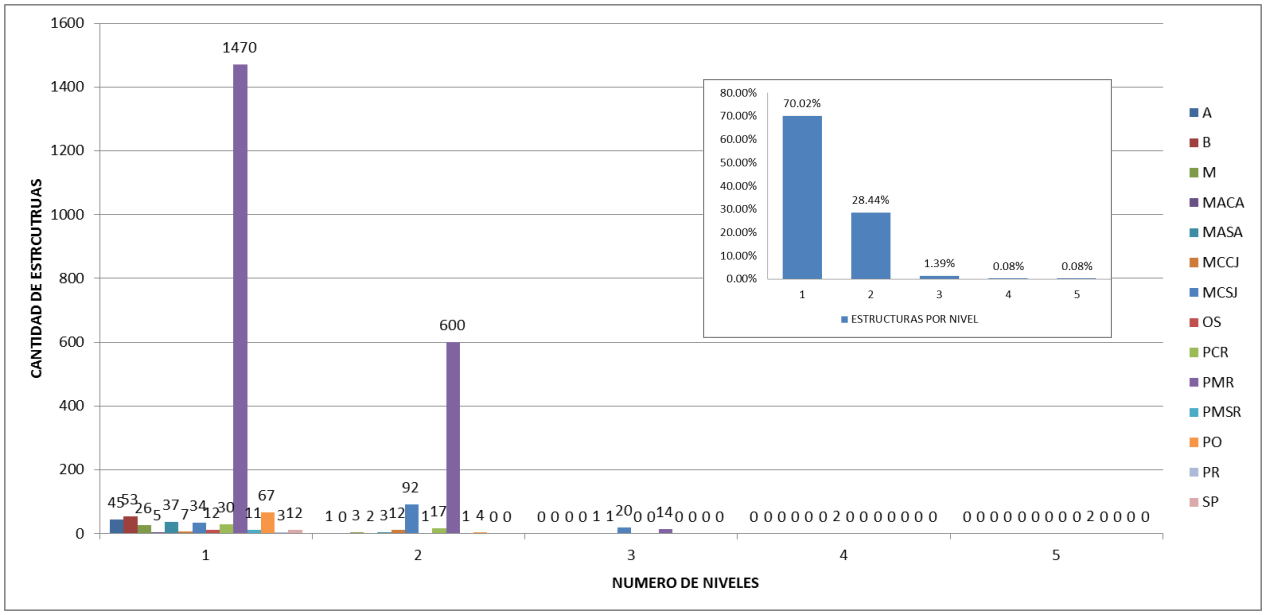


Figura 1.9. Clasificación de los activos inventariados por número de niveles.

4 Generación de curvas de vulnerabilidad sísmica

4.1 Vulnerabilidad Sísmica

Parte fundamental del análisis de riesgo es definir la susceptibilidad al daño o vulnerabilidad de un activo cualquiera sometido a una amenaza determinada, en este caso la amenaza sísmica. Sin embargo, es de primordial importancia, en el contexto del presente proyecto, definir la perdida asociada a un nivel dado de daño. Según Ordaz (2008), y dentro del contexto de CAPRA, se le considera pérdida al costo monetario de restituir la estructura a sus condiciones originales después que alcanzó cierto estado de daño y se le llama función de vulnerabilidad a las expresiones que describen la variación de momentos estadísticos de la pérdida (media y desviación estándar por ejemplo) como función de la demanda sísmica. Las funciones de vulnerabilidad contienen toda la información necesaria para hacer estimaciones de pérdidas económicas, si ese es el propósito del estudio.

En el presente apartado se describen las metodologías y los parámetros utilizados para generar las curvas de vulnerabilidad, los resultados obtenidos de las mismas y su respectiva asignación a las tipologías constructivas.

4.2 Información base

En el proyecto previo, Kattan Jokisch et. al., 2012, se realizó un análisis de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones típicas de los portafolios de Educación, Salud y Gobierno. El estudio consistió

en reconocer y caracterizar las tipologías constructivas a partir de la información de campo, identificar estructuraciones típicas y generar funciones de vulnerabilidad para las tipologías identificadas, Cuadro 1.4. La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las tipologías identificadas se realizó a partir de curvas de vulnerabilidad existentes en la bibliografía, criterio de expertos, procedimientos aproximados, resultados experimentales y métodos analíticos, para finalmente calibrar los resultados a partir de registros sísmicos e información de daños de eventos sísmicos históricos.

Cuadro 1.4. Tipologías básicas (Castellanos Araujo, 2011)

Tipología	Código básico
MARCOS DE CONCRETO CON JUNTA DE DILATACION , incluye el caso de MARCOS DE CONCRETO SIN ARRIOSTRAMIENTO	MCCJ
MARCOS DE CONCRETO SIN JUNTA DE DILATACION incluye el caso de MARCOS DE CONCRETO CON ARRIOSTRAMIENTO	MCSJ
MARCOS DE ACERO CON ARRIOSTRAMIENTO	MACA
MARCOS DE ACERO SIN ARRIOSTRAMIENTO	MASA
PAREDES ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO	PCR
PAREDES ESTRUCTURALES DE MAMPOSTERIA REFORZADA incluye el caso de PAREDES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA	PMR
SISTEMA ESTRUCTURAL PRECARIO	SP
MADERA	M
POLINES	PO
PREFABRICADO	PR
OTROS	OS

Nota: A cada tipología se le asignaron tres categorías de altura y tres niveles de rigurosidad de código sísmico; 48 diferentes tipologías fueron desarrolladas en total.

También, existe una propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y curvas definidas para las tipologías constructivas típicas encontradas, además de información de daños de sismos históricos, la cual ha resultado ser muy valiosa para la calibración de resultados, Castellanos Araujo, 2011 y Departamento de mecánica estructural-UCA, 2011.

Es de enfatizar que para los sistemas o tipologías constructivas que se ajustaron a las curvas de vulnerabilidad generadas en la fase previa, ésas se adoptaron realizando una revisión de las mismas; mientras que para aquellos sistemas que no se ajustaron a los previamente identificados, nuevas funciones de vulnerabilidad fueron generadas.

4.3 Evaluación y desarrollo de las curvas de Vulnerabilidad

De la sección 3.4 se desprende que la tipología estructural predominante es “Paredes de Mampostería Reforzada” para uno y dos niveles. Por lo tanto, se usará este sistema estructural, correspondiente a un nivel, para explicar el procedimiento seguido para la evaluación y desarrollo de las funciones.

La Figura 1.21 muestra ejemplos típicos de las viviendas encontradas en el centro histórico y alrededores de la Ciudad de Santa Tecla, mientras que las dimensiones más comunes se presentan en la Figura 1.22. Las características más básicas de este tipo de construcción son: presentan una gran área construida, un solo nivel, de mampostería confinada o mampostería con refuerzo integral y, en algunos casos, principalmente en aquellos que se requiere preservar el estilo histórico, la fachada es de algún material más débil tal como el adobe o el bahareque.

Figura 1.21 Viviendas de mampostería de un nivel en Santa Tecla

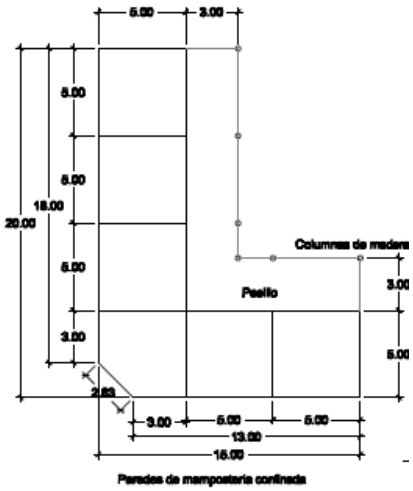


Figura 1.22. Dimensiones típicas de una vivienda de mampostería en Santa Tecla

La metodología usada para desarrollar las curvas de vulnerabilidad fue la propuesta por Miranda (1997, 1999) y Ordaz (2000) donde, en resumen, el sistema de múltiples grados de libertad, que representa a la estructura real, se reduce a un sistema de un solo grado de libertad y, diferente a la metodología HAZUS, el comportamiento del sistema se caracteriza, principalmente, usando la deriva de entrepiso. La curva de capacidad del sistema necesita ser calculada y, como una característica particular para ejecutar el desarrollo de la curva de vulnerabilidad, los porcentajes de daños se necesitan conocer para los estados de fluencia y daño último. En general, el porcentaje de daños es entre el 90% y 100% para el daño último; sin embargo, un procedimiento más meticuloso se debe emplear para encontrar tal porcentaje a fluencia, aun cuando en CAPRA (2011) se dan algunos valores empíricos.

La Figura 1.23 muestra esquemáticamente los estados más importantes de la curva de capacidad que fueron ocupados para calcular tal curva.

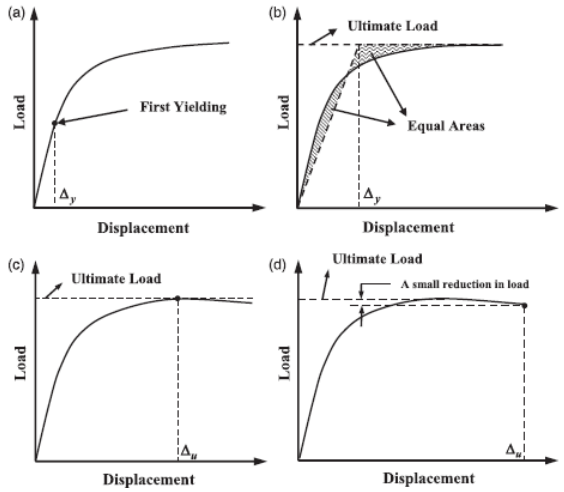


Figura 1.23. Definición de los estados límites, basados en Park (1988). (a) Daño leve, (b) Daño moderado, (c) Daño extenso y (d) Daño completo. Tomado de Frankie, T.M., Gencturk, B., Elnashai, A.S., 2013.

Para obtener las curvas de pushover y las de capacidad algún tipo de ayuda informática debe ser usada; en el presente caso un programa de análisis no lineal, TREMURI (Lagomarsino et.al, 2013), fue empleado para modelar matemáticamente las estructuras de mampostería usando macroelementos. Por ejemplo, la idealización de las estructuras tipos mostradas anteriormente se presenta en la Figura 1.24. Las propiedades mecánicas de la mampostería confinada de baja calidad se presentan en el Cuadro 4.2.

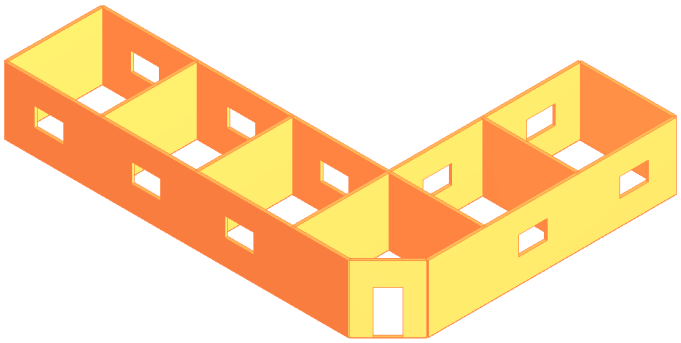


Figura 1.24. Modelo analítico de una vivienda tipo localizada en el centro histórico de Santa Tecla

Cuadro 1.5. Propiedades mecánicas de mampostería confinada de baja calidad. Cortez y Umaña (2011)

Propiedad	Test	Programa
f'_m	28.7 kg/cm^2	281.55 N/cm^2
E_m	5600 kg/cm^2	549.36 N/mm^2
G	2200 kg/cm^2	215.82 N/mm^2
w*	1350 kg/m^3	13.24 kN/m^3
f'k	20.1 kg/cm^2	196.98 N/cm^2
T	2.7 kg/cm^2	26.49 N/cm^2

Con esa información y usando el modelo mostrado anteriormente, éste se somete a una serie de análisis de pushover cambiando el perfil del vector de carga (modal y 1° modo) así como su dirección de aplicación, la cual cambia, como una característica del programa, cada 30°, hasta identificar la combinación más vulnerable. En total, 24 análisis son ejecutados para un solo modelo, una imagen de los resultados de un análisis se muestra en la Figura 1.25.

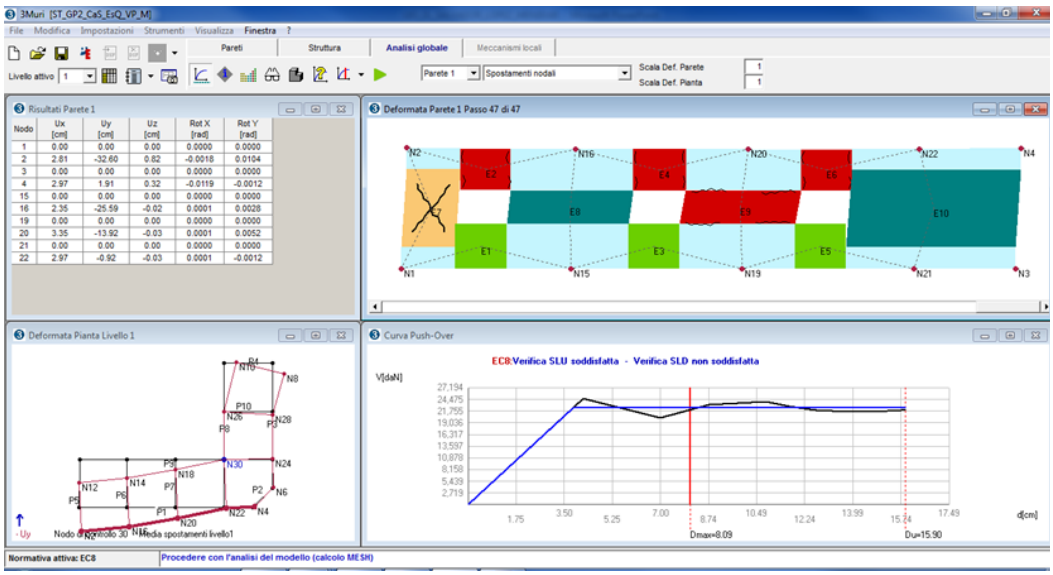


Figura 1.25. Resultado de un análisis de pushover.

En términos generales la mayoría de información que necesita el programa ERN Vulnerabilidad V2.0 se puede obtener del output del TREMURI. Sin embargo, es de hacer notar lo siguiente, como se mencionó anteriormente, en la metodología CAPRA, el estado de daños (en porcentaje) para los puntos de fluencia y último se deben conocer para desarrollar completamente la curva de vulnerabilidad de una tipología estructural. Se puede considerar el 100%, para el estado último; mientras que ese valor para fluencia puede obtenerse haciendo uso, también, del TREMURI, como se muestra en la Figura 1.26.

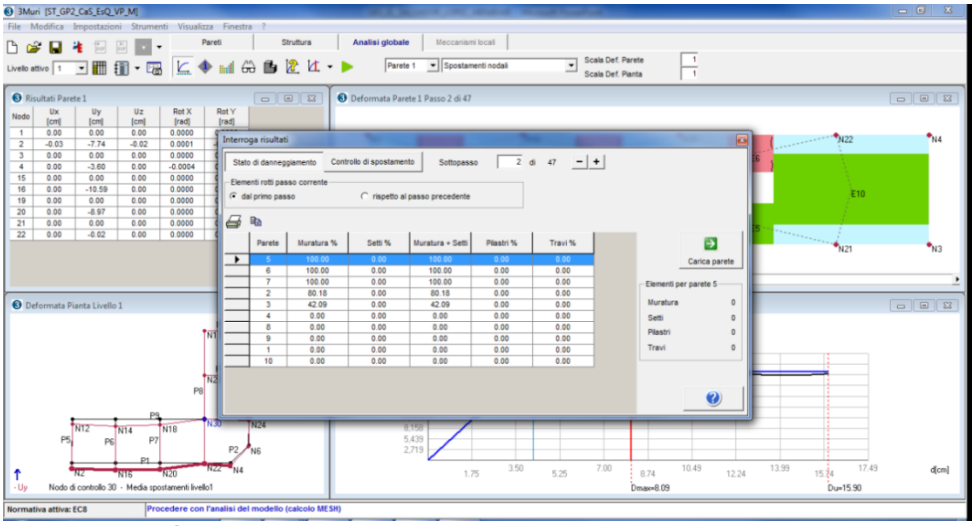


Figura 1.26. Estado de daño a fluencia

Además, se tiene la ventaja que se pueden identificar las zonas más propensas a daños en el modelo 3D como se observa en la Figura 1.27.

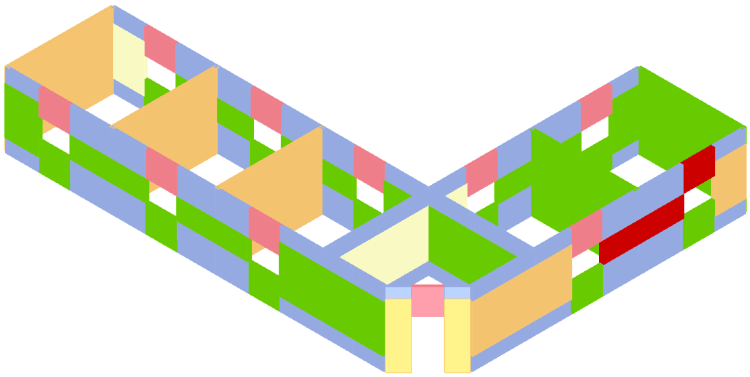


Figura 1.27. Ubicación de daños en fluencia.

Empleando la información antes mencionada, es decir, las curvas de capacidad, el periodo, la altura y masa equivalentes del sistema de un solo grado de libertad equivalentes, el coeficiente de diseño con el cual la estructural fue originalmente diseñada así como los estados de daños asociados al análisis, la curva de vulnerabilidad puede ser desarrollada. En la Figura 1.28 se presenta la curva, en formato Sd vs MDR para el sistema de Paredes de Mampostería Reforzada de Código Bajo (PMR1-CB).

Para definir la densidad de la probabilidad de pérdida se utilizó lo estipulado en Castellanos Araujo, 2011, Ordaz, 2008, así como la información presentada en el taller de Managua de marzo de 2014 en donde se establece que los valores de la media y desviación estándar estarán afectados por algunas variables, principalmente el rango de intensidades en las cuales se producen la mayor cantidad de pérdidas, lo que se puede relacionar, de manera gruesa, con el grado de intervención ingenieril que ha tenido una tipología definida.

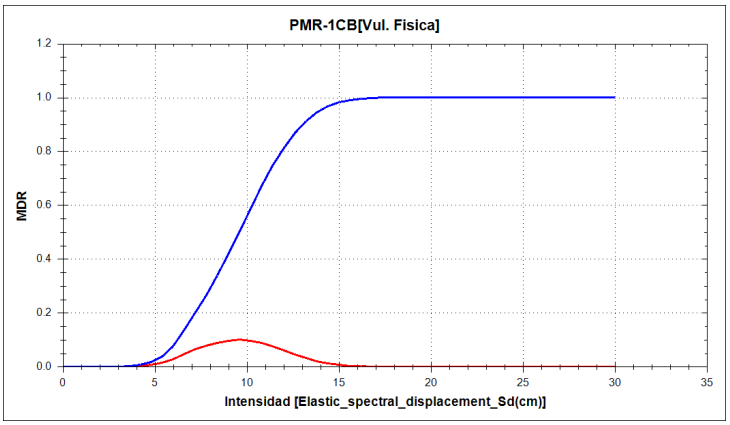


Figura 1.28. Curva de vulnerabilidad revisada para la tipología de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel y código bajo (PMR-1CB) en formato Sd - MDR.

Debido a que las funciones de vulnerabilidad deben estar expresadas en los mismos términos en que se generan las capas de amenaza y como en el caso de este proyecto, la intensidad se expresó en términos de Sa, entonces se tuvo que usar tal parámetro en las funciones de vulnerabilidad, por lo que se hace la correspondiente conversión definida en Castellanos Araujo (2011), el resultado se muestra en la Figura 1.29.

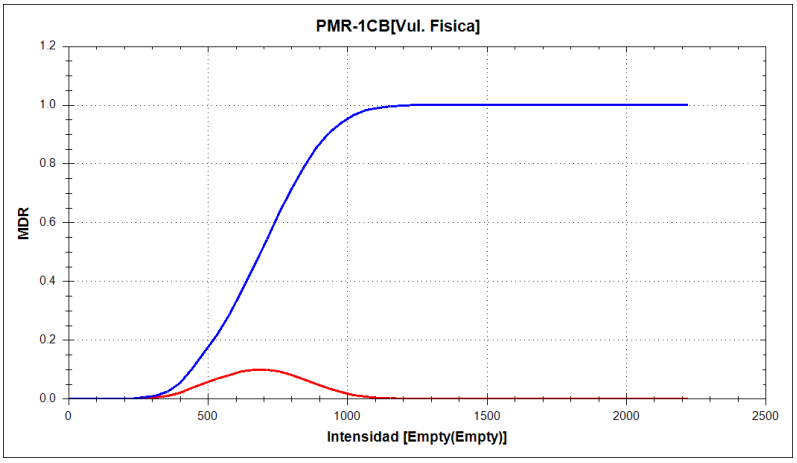


Figura 1.29. Curva de vulnerabilidad revisada para la tipología de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel y código bajo (PMR-1CB) en formato Sa - MDR.

Haciendo el mismo proceso para el sistema de Paredes de Mampostería Reforzados de un nivel con diferente código (PC, Pre-código; CB, Código Bajo y CM, Código Medio) se obtienen las curvas mostradas en la Figura 1.30.

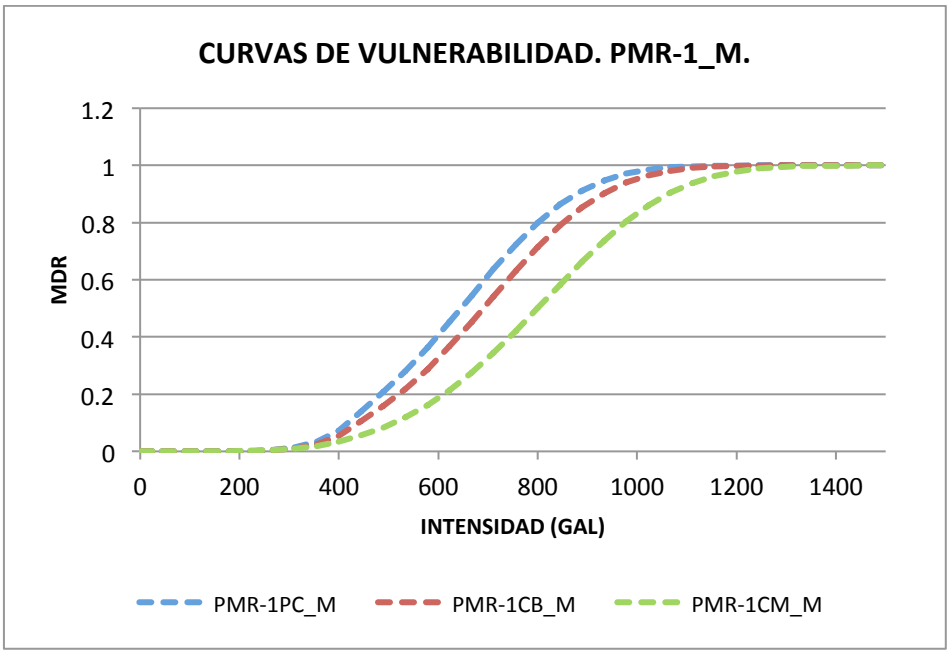


Figura 1.30. Curvas de vulnerabilidad revisadas para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel, con diferentes códigos, en formato Sa - PMR.

Después, estas curvas se comparan con las obtenidas en el primer TAP, lo que se presenta en la Figura 1.31.

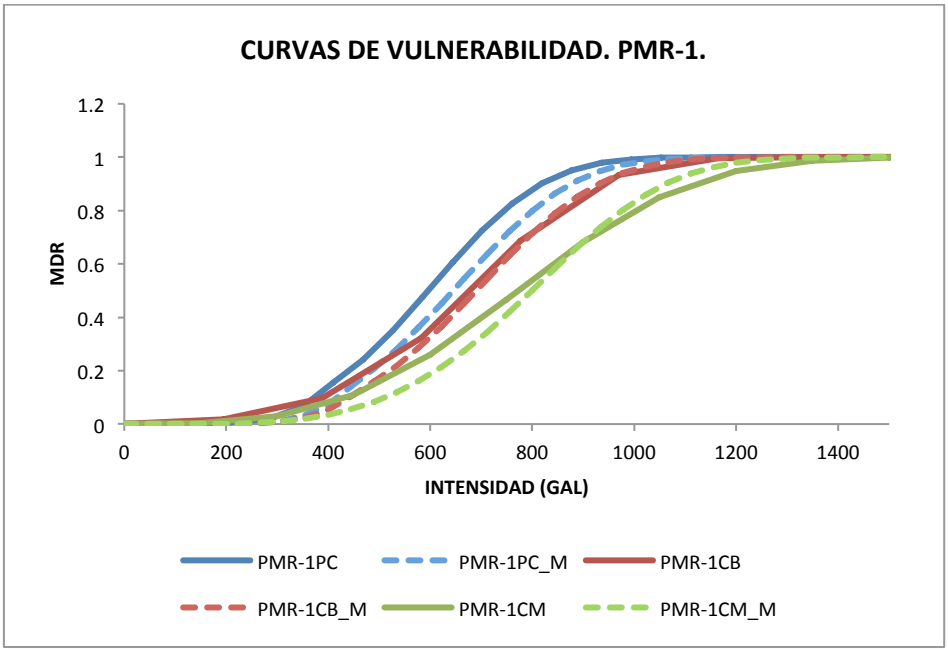


Figura 1.31. Comparación de las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en el TAP anterior y las curvas de vulnerabilidad revisadas para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de un nivel, con diferentes códigos, en formato Sa - PMR.

Se puede observar que para caso mencionado, las curvas desarrolladas en ambos proyectos son similares, lo cual no será siempre así; por ejemplo, cuando se comparan las curvas de vulnerabilidad para las tipologías estructurales correspondientes a Paredes de Mampostería Reforzada de 2 a 5 niveles, en donde para ambos TAP's, se observan notables diferencias, Figura 1.32, lo que podría indicar que las curvas desarrolladas en el presente TAP sugieren que estas tipologías estructurales son menos vulnerables de lo que inicialmente se había evaluado; a modo de comparación se ha incluido la curva desarrollada por la proyecto CAPRA I en El Salvador.

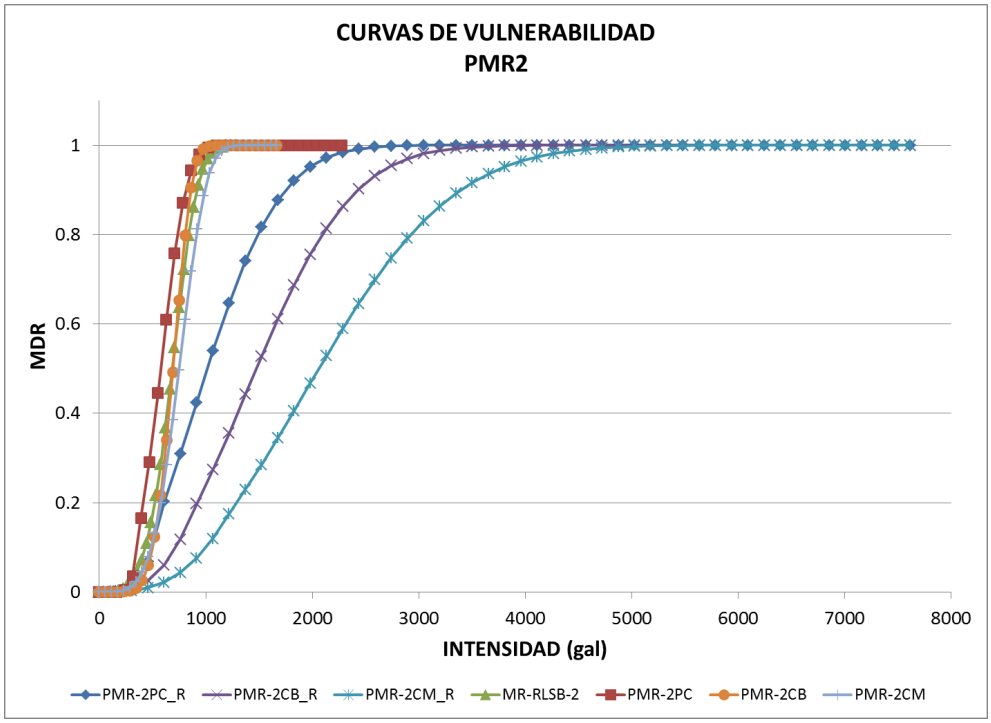


Figura 1.32. Comparación de las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en el proyecto CAPRA I (MR-RLSB-2), TAP anterior (PMR-2PC, PMR-2CB, PMR-2CM) y el presente proyecto (PMR-2PC_R, PMR-2CB_R, PMR-2CM_R) para las tipologías de Paredes de Mampostería Reforzada para construcciones de dos a cinco niveles, con diferentes códigos, en formato Sa - MDR.

Siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito se han revisado varias tipologías; cabe mencionar que en ocasiones no se han podido colectar suficientes datos de las características físicas de los materiales que componen una determinada tipología, esto debido a lo limitado, en el mejor de los casos, o inexistente disponibilidad de información a partir de pruebas estandarizadas relativo a sus características mecánicas o de comportamiento estructural. En esos casos se ha utilizado el procedimiento propuesto en Castellanos-Araujo (2011) para evaluar las curvas de vulnerabilidad. Las tipologías que corresponden a este apartado son las clasificadas como Polines y Galeras Metálicas (GM), Bahareque (BAH) y Madera (MAD) entre otros.

En total se han encontrado 41 tipologías estructurales,

Cuadro 1.6, a las cuales se les han asociado sus respectivas curvas de vulnerabilidad; de éstas 29 curvas han sido creadas o modificadas debido a la importancia de tales tipologías así como el gran número de estructuras a las cuales se asocian, correspondiendo al 98% de los activos levantados, y 12 curvas se han usado tal cual fueron formuladas en el TAP anterior.

Cuadro 1.6. Tipologías estructurales encontradas en el área de interés.

TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES A LAS CUALES SE LES CREÓ O MODIFICÓ SUS CURVAS DE VULNERABILIDAD			TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES CUYAS CURVAS DE VULNERABILIDAD NO FUERON MODIFICADAS		
Tipología principal	Código	Niveles	Tipología principal	Código	Niveles
Adobe (A)	Bajo y Medio	1	Marcos de acero con arriostramiento (MACA)	Medio	2-5
Bahareque (B)	Bajo	1	Marcos de concreto con junta (MCCJ)	Precódigo, Bajo y Medio	1, 2-5
Marcos de acero con arriostramiento (MACA)	Precódigo, Bajo	1	Paredes de mampostería sin refuerzo (PMSR)	Precódigo, Bajo y Medio	1, 2-5
Marcos de acero sin arriostramiento (MASA)	Bajo y Medio	1, 2-5	Estructuras prefabricadas (PR)	Bajo	1
Marcos de concreto sin junta (MCSJ)	Precódigo, Bajo y Medio	1, 2-5	Sistema precario (SP)	Bajo	1
Paredes de concreto reforzado (PCR)	Precódigo, Bajo y Medio	1, 2-5			
Paredes de mampostería reforzada (PMR)	Precódigo, Bajo y Medio	1, 2-5			
Estructuras de polines (PO)	Bajo y Medio	1			
Madera (M)	Bajo y Medio	1			

5 Modelo de riesgo sísmico para santa tecla

El análisis probabilista de riesgo sísmico consideró 24,996 posibles escenarios sísmicos y 16,444 edificaciones de los Portafolios de Vivienda, Comercio, Industria y Otros. El valor expuesto de los activos ha sido calculado en 963,414 millones de dólares. Debido a la falta de información, los costos de mobiliario y equipo no fueron considerados en el análisis, por lo que las pérdidas físicas están relacionadas únicamente al valor de reposición de la infraestructura. En la Figura 1.33 se presenta en forma gráfica la distribución espacial del valor de los activos expuestos.

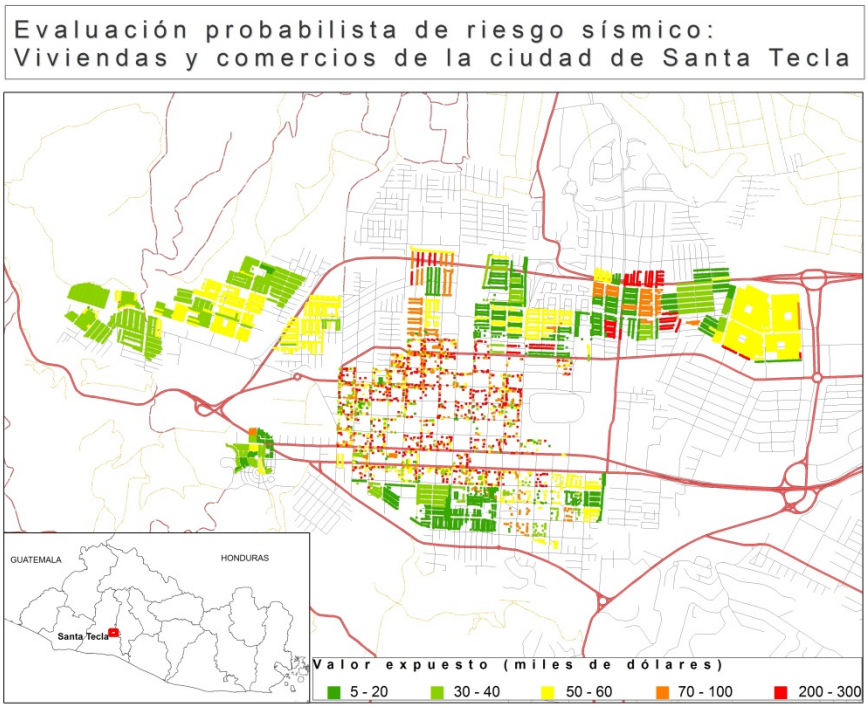


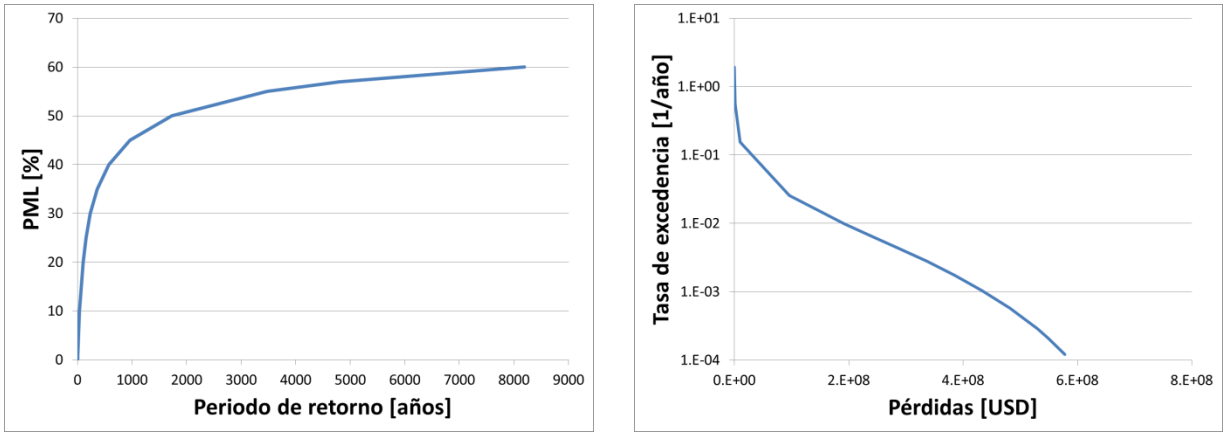
Figura 1.33. Valor de los activos expuestos en la ciudad de Santa Tecla

El Análisis Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico se ejecutó para dos condiciones generales, la primera, sin considerar el efecto de sitio, aún sabiendo que es una condición irreal para la zona de estudio (por lo ya expresado en los capítulos anteriores) se calculó a manera de verificación. De tal procedimiento se obtuvo que la Pérdida Anual Esperada es de 10,876 millones de dólares lo que representa el 1.13% del valor total de los activos, Cuadro 1.7. Adicionalmente se incluye la variación de la Pérdida máxima probable respecto al período de retorno, Figura 1.34a, así como la variación de la tasa de excedencia de pérdidas, Figura 1.34b.

Cuadro 1.7. Pérdida anual esperada y pérdida máxima probable.
Sin considerar el efecto de sitio

Valor expuesto	[USD millones]	963,414
Pérdida anual esperada	[USD millones]	10,876
	[%]	1.13

PML		Tr
[%]	[USD millones]	[años]
10	96,341	39
20	192,683	102
30	289,024	234
40	385,366	575
50	481,707	1731
60	578,048	8191



(a) (b)

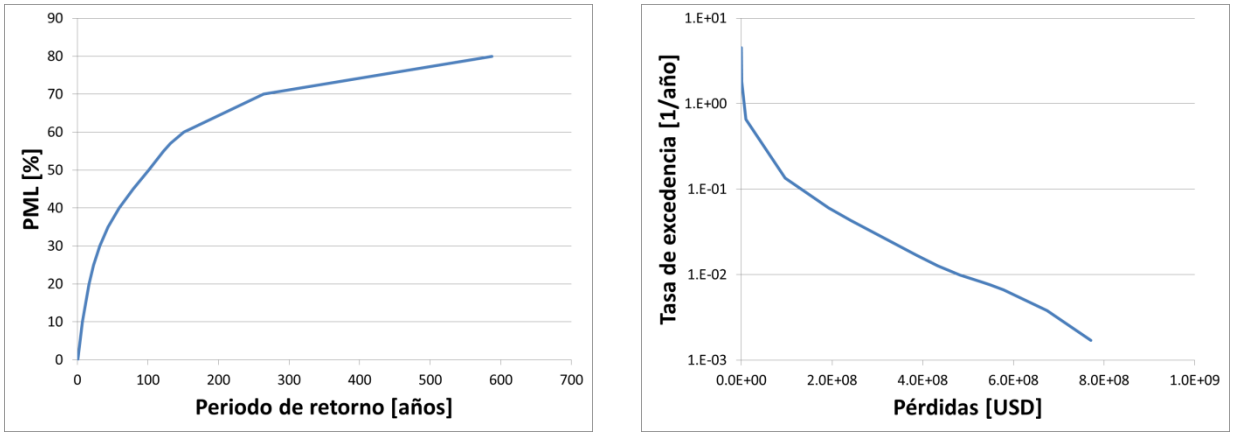
Figura 1.34. (a) Pérdida máxima probable, (b) Tasa de excedencia de pérdidas

Como segundo procedimiento se ejecutó el análisis de riesgo de Santa Tecla considerando el efecto de sitio. La pérdida anual esperada en este caso fue de 52,573 millones de dólares que representa un 5.46% del valor total de los activos, Cuadro 1.8. Se incluye, además, la variación de la Pérdida máxima probable respecto al periodo de retorno, Figura 1.35a, así como la variación de la tasa de excedencia de pérdidas, Figura 1.35b. Este resultado confirma lo establecido en la sección 2.4 respecto a las consecuencias significativas que tiene el comportamiento del suelo sobre el resultado del análisis de riesgo sísmico. De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y el Cuadro 1. se observa que el rango de períodos para los cuales se produce amplificación por efecto el efecto de sitio es entre 1 a 3 niveles, rango en el cual se encuentran la mayoría de edificaciones, Figura 1.9, y que es considera que es el fenómeno causante de las pérdidas obtenidas.

Cuadro 1.8. Pérdida anual esperada y pérdida máxima probable.
Considerando el efecto de sitio

Valor expuesto	[USD millones]	963,414
Pérdida anual esperada	[USD millones]	52,573
	[%]	5.46

PML		Tr
[%]	[USD millones]	[años]
10	96,341	7
20	192,683	17
30	289,024	32
40	385,366	59
50	481,707	101
60	578,048	151



(a) (b)

Figura 1.35. (a) Variación del PML con el período de retorno, (b) Tasa de excedencia de pérdidas

Así mismo, en la Figura 1.36 se observan las pérdidas económicas anuales esperadas, estructura por estructura, en la ciudad de Santa Tecla. De ello se recoge que las mayores pérdidas se localizan en el centro histórico, debido principalmente a las tipologías estructurales constituidas de materiales endebles tales como el adobe y bahareque; así como en activos construidos principalmente con materiales precarios ubicados en zonas de escasos recursos. Mientras que los activos con menos pérdidas se ubican al occidente de la Ciudad, coincidiendo con la variación del tipo de suelo subyacente el cual produce menores efectos de amplificación a las estructuras allí ubicadas.

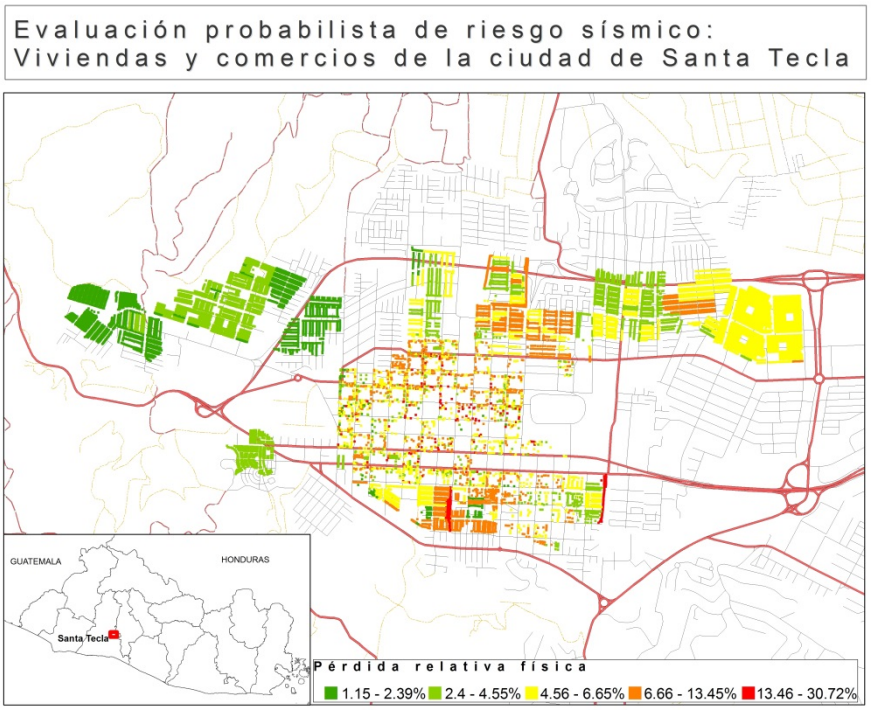


Figura 1.36. Pérdidas anuales esperadas en la ciudad de Santa Tecla

Estos resultados representan el monto por infraestructura expuesta que debería ser reservado anualmente para cubrir el costo de las pérdidas futuras (por ej., una pérdida anual esperada del 2% del valor de la edificación, representa que anualmente se debe reservar el 2% del costo de la edificación para cubrir pérdidas futuras por sismo) y permiten priorizar las edificaciones que deben ser estudiadas en detalle y posiblemente intervenidas: aquellas en las que es más rentable invertir en reforzamiento estructural que afrontar las pérdidas futuras. Los resultados muestran que las mayores pérdidas están concentradas en un pequeño porcentaje de las edificaciones expuestas.

Las pérdidas físicas máximas pueden estar concentradas en edificios en los que los niveles de daño no sean los más altos, pero que tengan un alto costo de reposición. Las pérdidas relativas físicas nos indican los sistemas que pueden resultar más dañados, sin que esto necesariamente represente pérdidas económicas o humanas significativas, ya que puede tratarse de sistemas de muy bajo costo (ej. sistemas precarios) o de edificaciones con bajos niveles de ocupación.

Información adicional

La ficha empleada para levantar los datos en el área de trabajo, además de facilitar el registro de las características básicas y técnicas de los activos, permite compilar información relativa a defectos estructurales importantes, en donde se han considerado hasta 12 tipos de defectos comúnmente encontrados en el medio; así como si los activos han sufrido daños por sismos históricos y si tales problemas han sido subsanados o no. Para la clasificación de cada uno de los defectos estructurales se siguió lo definido en Castellanos Araujo, 2011. Esta información fue recopilada para toda el área de estudio. El Cuadro 1.9 presenta un resumen del porcentaje de activos que presentan al menos un defecto estructural o han estado sometidos a un evento sísmico relevante; por otra parte, para ejemplificar lo anterior, la Figura 1.37, muestra las áreas donde mayormente se encuentran estructuras que presentan el defecto de columna corta, mientras que en la Figura 1.38 se muestra aquellas zonas cuyos activos han sido afectados por sismos históricos. Esta información es de utilidad a las autoridades para diseñar planes de prevención y adecuación sísmica de las edificaciones con el fin de reducir la vulnerabilidad estructural de Santa Tecla. Un primer paso, por parte de las autoridades, es el de abocarse a los sectores donde se han encontrado estas deficiencias para hacer una verificación de tal información especialmente en el caso de aquellas estructuras que corresponden al caso de las manzanas homogéneas, en donde posiblemente no todos los activos indicados efectivamente presenten algún defecto, y ejecutar una evaluación más detallada en los casos que lo ameriten.

Cuadro 1.9. Porcentaje de activos que presentan alguna deficiencia estructural o han estado en un terremoto

DEFICIENCIAS			
DEFECTO	%	DEFECTO	%
Columna corta	1.62	Irregularidad en elevación	4.4
Irregularidad en planta	6.52	Sobrepeso en edificio	1.5
Irregularidad torsional	37.27	Golpeteo	71.3
Piso flexible o débil	1.62	Columna débil, viga fuerte	0.35

Entrepiso sin vigas	0.35	Baja calidad de materiales	13.81
Paredes esbeltas y sin amarre	0.93	Daño por sismo	13.81

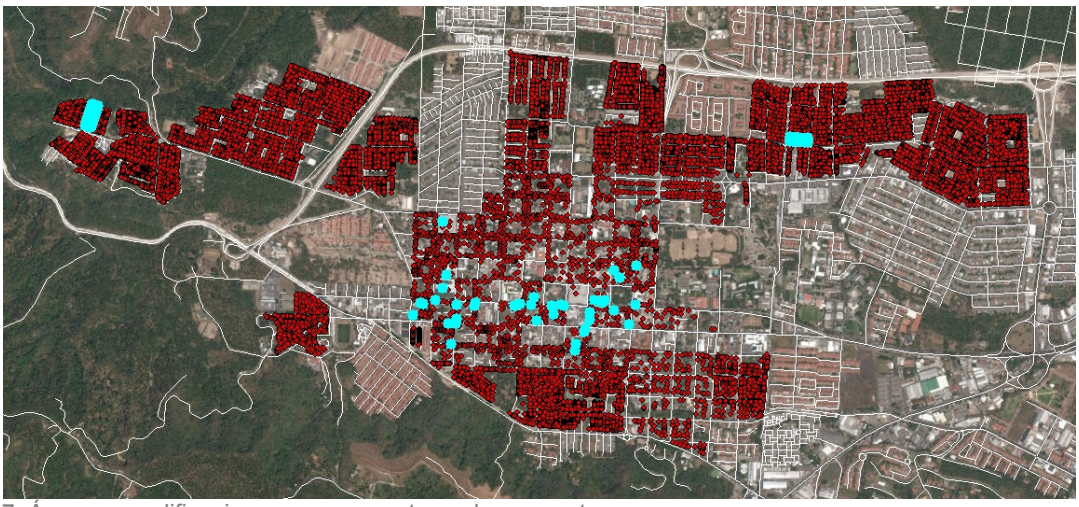


Figura 1.37. Áreas con edificaciones que presentan columna corta

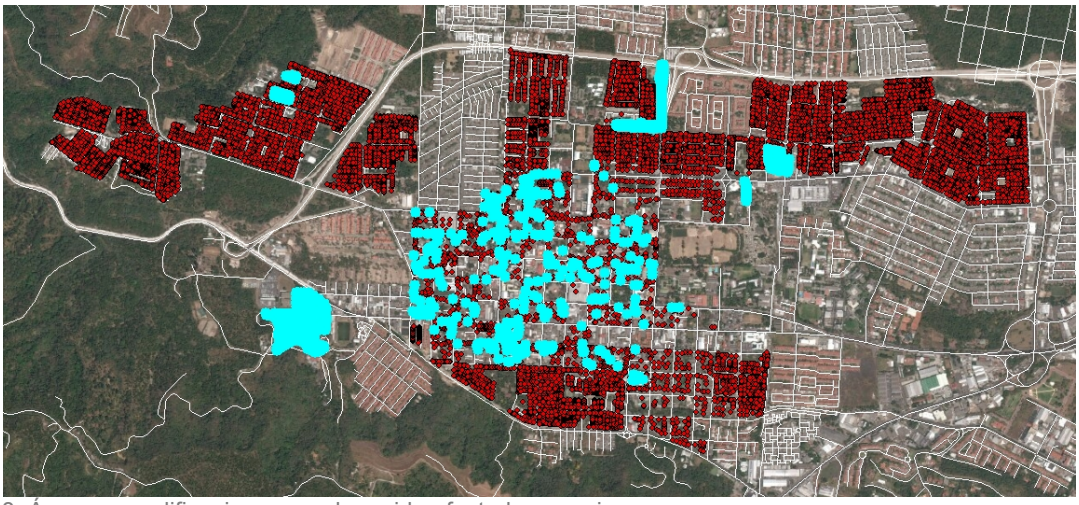


Figura 1.38. Áreas con edificaciones que han sido afectadas por sismos

6 Conclusiones

El método de evaluación probabilista de riesgo sísmico que se ha empleado en este proyecto incorpora las metodologías más recientes para cuantificación de la amenaza, efecto de sitio y vulnerabilidad; aunado a un detallado levantamiento de estructuras en la ciudad de Santa Tecla, lo que garantiza que el proceso sea lo suficientemente robusto como para producir resultados confiables. Los productos del análisis de riesgo permiten priorizar áreas de intervención prioritarias, a las cuales se les deberán realizar estudios de detalle para determinar posteriormente medidas de mitigación factibles.

Los escenarios de pérdidas han sido desarrollados basados en un análisis estructura por estructura y constituyen una excelente fuente de información para el manejo del riesgo y el desarrollo de planes de emergencia, los que, manejados de manera inteligente, serán de gran utilidad para la preparación, prevención y la protección de la sociedad civil.

Debe tenerse en mente que el objetivo final de la presente evaluación de riesgo sísmico no es determinar el daño en las estructuras, o áreas habitadas, sino es determinar las pérdidas, en este caso económicas, que puedan ser producidas por una serie de escenarios en la zona de interés. Dicho esto, se ha calculado que las pérdidas anuales esperadas son iguales a 52,573 millones de dólares que representa el 5.46% del valor total de los activos. Las razones que producen este resultado son variadas, entre las que se tienen la alta sismicidad que afecta a Santa Tecla, las condiciones particulares de los tipos de suelo (razón principal que motivó al desarrollo del presente trabajo) y las condiciones de vulnerabilidad de las estructuras que componen el parque de activos de la ciudad. Por lo anterior, claramente se demuestra que la condición de riesgo es considerable y se deben tomar medidas para reducirlo. Idealmente, tales medidas deberán ser tomadas por una simbiosis entre propietario-municipalidad-Protección Civil-Gobierno Central que concurran a afrontar de una manera objetiva y práctica las pérdidas calculadas.

Por otra parte, la influencia de los defectos estructurales en el comportamiento sísmico de las estructuras es un factor muy importante a considerar, especialmente en tipologías que suponen una considerable cantidad de defectos y que han evidenciado un mal comportamiento durante eventos sísmicos pasados. Se debe poner especial atención a los sistemas identificados como precarios o con defectos críticos, realizar comprobaciones de campo, estudios de detalle e intervenciones en caso necesario. Estos defectos, pueden tener una fuerte influencia no solo en el porcentaje de daño esperado, sino también en el tipo de colapso, lo cual debe ser estudiado en detalle para mejorar análisis futuros.

Como se ha mencionado en repetidas ocaciones, la influencia de las condiciones locales de suelo en el daño potencial sísmico para diferentes tipos de edificaciones, debe ser considerada tanto en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial como en las normativas de diseño sismorresistente.

El análisis de riesgo sísmico presentado para la Ciudad de Santa Tecla debe considerarse como una estimación inicial según la información existente, y debe ser complementada y revisada a medida que nuevo conocimiento sea adquirido. Aún con las limitantes del caso, los resultados obtenidos son ya valiosos para efectos de toma de decisiones.

Lecciones aprendidas

Durante la ejecución de un nuevo proceso siempre se está expuesto a retos los cuales deben ser enfrentados y salvados para lograr un resultado exitoso; a continuación se describen los desafíos encontrados en el proceso de ejecución:

- En ciertas áreas de la zona de estudio no se pudo compilar toda la información que se necesitaba, principalmente en lo relacionado al número de habitantes y el costo de los activos, debido a varios factores tales como falta de acceso a algunas viviendas, desconfianza de los usuarios de las viviendas hacia los encuestadores y, principalmente, la falta de seguridad personal de los equipos de encuestadores.

- Como producto de esa falta de información, los costos de mobiliario y equipo no fueron considerados en el análisis, por lo que las pérdidas físicas están relacionadas únicamente al valor de reposición de la infraestructura.

- Debido a que la ejecución de pruebas para definir el comportamiento mecánico y sísmico de sistemas estructurales, además de que la recopilación y análisis de los pocos ensayos que se han ejecutado no se tienen compilados de manera sistemática, el definir parámetros estándares de comportamiento estructural, que servirán para calcular las curvas de vulnerabilidad, para tipologías vernáculas ha probado ser un ejercicio que ha demandado mucho empeño.

- Por otra parte, existe un gran bagaje de información práctica referente a cómo definir curvas de capacidad y fragilidad de tipologías estructurales orientadas a definir daños y pérdidas; sin embargo, hay mucha menos información relativa al tema de la obtención de las curvas de vulnerabilidad de una manera práctica y aún menos para detallar la curva que representa a la densidad de la probabilidad de pérdidas, por lo cual, en no pocos casos, se tiene que recurrir al criterio ingenieril para obtener tales parámetros.

7 Recomendaciones

Lineamientos para la Reducción del Riesgo Sísmico

El objetivo del análisis de riesgo sísmico es determinar el nivel de riesgo existente en un determinado lugar, con el fin último de reducirlo a niveles “aceptables” dentro de las limitaciones económicas del país. La valoración del riesgo sísmico es, entonces, el punto de partida para la definición de líneas de acción que permitan avanzar hacia una gestión integral del mismo.

En El Salvador, como es el caso de muchos países en vías de desarrollo, la gestión de riesgos ha estado enfocada principalmente en una gestión reactiva. Eventos pasados han evidenciado las consecuencias del desordenado proceso de urbanización, la falta de planificación y de definición de políticas para la prevención y reducción del riesgo, y eventos futuros podrían causar enormes pérdidas tanto económicas como en términos de vidas humanas.

Los desastres "naturales" se encuentran íntimamente relacionados con los procesos de desarrollo humano, y este a su vez, puede generar nuevos riesgos al no considerar debidamente los peligros naturales. En ciudades ubicadas en zonas sísmicas, como es el caso del AMSS, donde existe una elevada amenaza sísmica y un alto nivel de exposición, el nivel de riesgo está controlado por la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura existente, relacionada a su vez al nivel de conocimiento de la peligrosidad de la región.

La gestión integral del riesgo sísmico debe incorporar desde la identificación de la amenaza y las características de la infraestructura existente, hasta la implementación de medidas correctivas para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, el desarrollo y actualización de normativas de ordenamiento territorial por riesgo sísmico y códigos de diseño sismorresistente, así como la definición de planes de respuesta ante emergencia. La adecuada gestión debe utilizar la valoración del riesgo como insumo para definición de lineamientos para su reducción y mitigación, incluyendo tanto medidas de prevención (gestión correctiva y prospectiva) como de preparación (gestión reactiva y protección financiera).

Los resultados del análisis de riesgo sísmico permiten, por una parte, identificar la infraestructura crítica de acuerdo a las condiciones de riesgo, permitiendo priorizar aquellas edificaciones que deben ser estudiadas en detalle y posiblemente intervenidas (gestión correctiva). Asimismo, los resultados de cada uno de los componentes (amenaza sísmica nacional, efecto de sitio, características de los sistemas constructivos y vulnerabilidad) pueden servir de insumo para la definición o actualización de normativas de ordenamiento territorial y códigos de diseño sismorresistente, que permitan reducir la vulnerabilidad de construcciones futuras ante sismos (gestión prospectiva). Escenarios específicos de riesgo sísmico pueden ser utilizados para la definición de planes de respuesta ante emergencias, y el conocimiento sobre la atenuación sísmica regional y los efectos de sitio, pueden ser incorporados para la generación de mapas de intensidades al momento de un sismo y de conocer las características de la infraestructura existente en la ciudad, para la generación de mapas de daños esperados en tiempo real, que permitan dirigir ayuda a donde sea más necesario (gestión reactiva).

Lo anterior implica una serie de estudios de detalle, los cuales suponen tiempo y dinero. Los estudios realizados han permitido identificar los principales vacios y reconocer aspectos críticos que deben ser investigados (ej. respuesta sísmica de los suelos del AMSS). La condición de riesgo en el AMSS es considerable y es necesario tomar acciones para reducirlo. Se deben realizar investigaciones, pero más importante, se deben tomar los resultados de estas investigaciones para

la implementación de medidas de reducción del riesgo, siendo la principal medida de mitigación a largo plazo la normativa de diseño por sismo, la cual no ha sido actualizada desde 1994.

Es necesario fortalecer vínculos, articular y concertar esfuerzos entre las distintas entidades involucradas en la temática, incluyendo instituciones gubernamentales, universidades, gremiales, instituciones privadas, organismos internacionales y la sociedad civil en general.

La aplicación de medidas de mitigación y reducción del riesgo sísmico permitirán reducir las pérdidas de vidas humanas durante futuros terremotos, promoviendo el desarrollo sostenible de la ciudad.

8 Referencias

Alfaro, A., Ayala, A., Ventura, E., Hércules, D (2007) Informe de resultados,Evaluación experimental del sistema constructivo Bloque Panel, Proyecto de Cooperación Técnica "Mejoramiento de la Tecnología para la Construcción y Sistema de Difusión de la Vivienda Social Sismo-Resistente" (TAISHIN), San Salvador, El Salvador

Alvarado, D., Demets, C., Tikof, B., Hernández, D., Wawrzyneic, T.F., Pullinger, C., Mattioli, G., Tuner, H.L., Rodriguez, M. & Correa-Mora, F. (2011) Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observation. Lithosphere, 3(1): 3-21.

Applied Technology Council ATC (1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, volumes 1 and 2, Report No. ATC-40, Redwood City, CA.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS y Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia (2010) Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Bogotá D.C, Colombia.

Bal IE, Crowley H, Pinho R, Gülay G. (2008) Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 914–932.

Bal IE, Bommer JJ, Stafford PJ, Crowley H, Pinho R. (2010) The influence of geographical resolution of urban exposure data in an earthquake loss model for Istanbul, Earthquake Spectra , Vol 26, No 3, 619–634.

Benito B., Hasbun, P., Cepeda, J., Hernández, D., Pullinger, C., Marroquin, G., Martínez, J., (2005) Caracterización del Movimiento del Suelo y sus Efectos en la Infraestructura durante los Terremotos del 2001, El Salvador, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y Servicio Nacional de Estudios Territoriales, San Salvador, El Salvador

Benito, B., Cabañas, L (2000) Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica. Universidad Politécnica de Madrid, Física de la Tierra, Vol. 11, pp. 47-77.

Bommer, J. (1996) Sismología para Ingenieros. Papeles Técnicos UCA. San Salvador. El Salvador. Centro América.

Bommer J., D. A. Hernandez, J. Navarrete y W. Salazar (1996b) Seismic hazard assessments for El Salvador, Geofísica Internacional, 35, 227-244.

Bommer, J., W. Salazar, R. Samayoa. (1998) Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA).

CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment) (2011) Metodología de modelación probabilista de Riesgos naturales- Informe técnico ERN-CAPRA-T1-3, Propuesta de indicadores y funciones de vulnerabilidad El Salvador, San Salvador, El Salvador.

Castellanos Araujo, R.A. (2011) Informe final generación de curvas de vulneralidad sísmica, San Salvador, 259 pp.

CEPREDENAC (2013) Términos de referencia para la Asistencia técnica nacional para la implementación de análisis de riesgo en El Salvador. (2.1.6), 14 p.

Consorzio Salvador E. ITALTEKNA-ITALCONSULT (1988): Valutazione della Pericolosità Sismica Nelle Aree del Distretto Sanitario A3 (San Salvador) e del Distretto 7 (Apopa), Parte 4ª: Studi di Rispota Sismica Locale ed Elabarazione delle Carte di Microzonazione Sísmica, Repubblica Italiana, Ministerio Degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo, Programm di Reconstruzione, San Salvador, El Salvador.

Cortez Alvarenga, D. I., Umaña Arriaza, E.J. (2011) Caracterización de la mampostería de ladrillo de barro confinada e investigación de su uso actual Tesis de grado, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 236 p.

Crowley, H., Colombi, M., Crempien, J., Erduran, E., Lopez, M, Liu, H., Mayfield, M., Milanesi, M. (2010) GEM1 Seismic Risk Report, Part 1., GEM Foundation, p 152. www.globalquakemodel.org.

Departamento de mecánica estructural-UCA (2011) Contratación de Servicios de Consultoría para el Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" UCA, San Salvador, 152 pp.

Decreto Ministeriale 14-01-2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni e Norme tecniche per le Costruzioni - D.M. 14 gennaio 2008.

Dymiotis C, Kappos AJ, Chryssanthopoulos MC (1999) Seismic reliability of R/C frames with uncertain drift and member capacity., Journal of Structural Engineering, ASCE, 125, 9, 1038–1047.

EM-DAT (2012): The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium.

EN 1998-1 (2004) Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1-1: General rules – seismic actions and general requirements for structures. CEN, Brussels, Belgium.

Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina, Consultores en Riesgos y Desastres (ERN-AL) (2010a) Informe Técnico Subtarea 4.2: Evaluación de Riesgo de Desastre en San Salvador, Tarea IV: Mapas de Amenazas y Riesgos, Aplicaciones en la Gestión del Riesgo

Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina, Consultores en Riesgos y Desastres (ERN-AL) (2010b) Software ERN-Vulnerabilidad versión 1.0

Federal Emergency Management Agency FEMA (1997) NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273, Washington, DC

Federal Emergency Management Agency FEMA (2003) Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model: HAZUS-MH MRI, technical and user's manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Frankie, T. M. (2010) Simulation-based fragility relationships for unreinforced masonry buildings. M.S. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Frankie, T.M., Gencturk, B., Elnashai, A.S. (2013) Simulation-Based Fragility Relationships for Unreinforced Masonry Buildings, Journal of Structural Engineering, Vol.139, No. 3.

Guevara, N, Ayala, N, Ventura, E. (2012) Bloque de concreto con refuerzo integral, Mejoramiento de la Tecnología para la Construcción y Sistema de Difusión de la Vivienda Social Sismo-Resistente (TAISHIN – FASE II), 101p.

Gutierrez, M. (2011) Sistema constructivo de Adobe (TAISHIN-FASE II), presentación.

Guzmán, W. y Menguar M. (2008) Análisis dinámicos no lineales de sistemas de un grado de libertad e ilustración de la aplicación de los métodos de análisis sísmico estáticos no lineales, Trabajo de Graduación para optar , Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (UCA)

Hernández, W. (2007) Aspectos Geológicos que Influyen en las Aguas Subterráneas y en la Respuesta Sísmica del Área Metropolitana de San Salvador, Revista de la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), San Salvador, El Salvador.

Hernández-Moreno, C. (2011) Análisis Morfotectónico De Las Deformaciones Cuaternarias De La Cordillera De Jucuarán – Intipuca (El Salvador, Tesis para optar al grado de Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos, Especialidad en Procesos y Dinámica de la Litosfera, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid

Ingvarsson M. y Johansson J. (1996), Amplification of Earthquake Induced Ground Motions, San Salvador, El Salvador. Instituto Real de Tecnología, KTH, Estocolmo, Suecia.

International Conference of Building Officials ICBO (1997), Uniform Building Code, Whittier, CA.

Jeong, S-H, Mwafy, A. M., Elnashai, A. S. (2012) Probabilistic seismic performance assessment of code-compliant multi-story RC buildings. Engineering Structures, 34, 527–537.

Kappos, A. J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos , C., Penelis, G. (2006) A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings., Bull Earthquake Engineering, 4, 391–413.

Kappos, A.J., Panagopoulos, G. (2010) Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece, Structure and Infrastructure Engineering, vol 6, Nos .1–2, p 39–53.

Kattan Jokisch, C. (2010). Re-Interpretation of Seismic Damage Scenarios: Risk Mapping for the case Study of San Salvador (El Salvador, 1986), Master Thesis, Bauhaus Universität Weimar & Earthquake Damage Analysis Center, Weimar, Alemania.

Kattan Jokisch, C.; Menjivar Recinos, L. E.; Castellanos Araujo, R. A.; Ramos Huezo, J. A.; Ayala Leiva, N. E.; Méndez de Hasbun, P. (2012) Modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico para el área metropolitana de San Salvador, incluye análisis de portafolios de educación, salud y gobierno, Ministerio de medio ambiente y recursos naturales (MARN), San Salvador, 82 pp, (No publicado).

Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S., (2013) TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, Engineering Structures, 56, 1787-1799.

Lang, H.D., Molina-Palacios, S., Lindholm, C., Balan, S. (2012) Deterministic earthquake damage and loss assessment for the city of Bucharest, Romania. Journal of Seismology, 16, 67-88.

Lang H. D. (2013) Earthquake Damage and Loss Assessment – Predicting the Unpredictable, Dissertation for the degree of Dr. Philosophy, University of Bergen, Bergen, Norway, p 334.

López M, Bommer, J.J., y Pinho, R. (2004) Seismic Hazard Assessments, Seismic Design Codes and Earthquake Engineering in El Salvador, in Rose, W.I, et al., eds., Natural Hazards in El Salvador, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 375, p.p. 301

Marroquín G. y Benito, B (2009), Evaluación de la Amenaza Sísmica en El Salvador. Informe nacional derivado del estudio RESIS II

Merlos, R., Ventura, E., Hasbun P., Gutierrez, M., Escobar, C., Ortiz, A., Guevara, N. (2008) Informe de resultados de la Investigación del sistema constructivo Bloque de Concreto con

refuerzo Integral, Proyecto de Cooperación Técnica "Mejoramiento de la Tecnología para la Construcción y Sistema de Difusión de la Vivienda Social Sismo-Resistente" (TAISHIN), San Salvador, El Salvador.

Milutinovic, Z. V., Trendafiloski, G. S. (2003) RISK-UE, An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, WP4: Vulnerability of current buildings, 111 p.

Ministerio de Obras Públicas MOP (1966), Regulaciones para el Diseño Sísmico de la República de El Salvador, San Salvador, Diario Oficial, 21 de Enero de 1966, v. 210, no. 12.

Ministerio de Obras Públicas MOP (1989), Reglamento de Emergencia de Diseño Sísmico de la República de El Salvador, San Salvador, Diario Oficial, 14 de Agosto de 1989, v. 304, no. 14.

Ministerio de Obras Públicas MOP (1994), Norma Técnica para Diseño por Sismo (NTDS), Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO), San Salvador.

Miranda, E. (1997) Estimation of the maximum interstory drift demands in displacement-based design, in Seismic Design Methologies for the Next Generation of Codes, Fajfar and Krawinkler (eds), Rotterdam.

Miranda, E. (1999) Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Enginnering ASCE.

Molina, E., Marroquín, G., Escobar J., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A., Camacho, E., Benito, B., Lindholm, C. (2008), Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica, NORSAR Informe de Proyecto RESIS II.

Molina, S., Lang, D.H., Lindholm, C.D. (2010) SELENA—an open source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. Computer and Geosciences, 36, 257–269.

National Institute of Building Sciences/FEMA, (2003) Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model, HAZUS®MH MR4, Technical Manual.

NORSAR y OPMASS (2008), Earthquake Risk Reduction in Guatemala, El Salvador, and Nicaragua with regional cooperation to Honduras, Costa Rica, and Panama, Task 6: Microzonation in San Salvador, Norway.

Ordaz, M., Aguilar Aa., Arboleda J. (2007) CRISIS2007, Program for Computing Seismic Hazard Ver 5.1. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México.

Ordaz, M. (2008), Relaciones entre curvas de fragilidad, matrices de probabilidad y funciones de vulnerabilidad, 8 p.

Peña, E., López, R.E., Guevara, N. (2008) Informe de resultado de la investigación del sistema constructivo Adobe sismorresistente, Construcción y Sistema de Difusión de la Vivienda Social Sismo-Resistente(TAISHIN – FASE I), 127p.

Ramamoorthy, S. K. (2006) Seismic fragility estimates for reinforced concrete framed buildings Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Texas A&M University, TX.

Reyes, J.C, Sorto, M.J. (2007) Evaluación de Microsismos en la Ciudad de Santa Tecla. Tesis para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador, El Salvador.

Riahi, Z; Elwood, K. J.; Alcocer, S. M. (2009) Backbone Model for Confined Masonry Walls for Performance-Based Seismic Design, Journal of Structural Engineering, Vol. 135, No. 6.

Rossetto, T., Elnashai, A. S. (2003) A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures., Engineering Structures, 27, 397–409.

Rota, M., Penna, A., and Magenes, G. (2010) A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses., Engineering Structures, 32, 5, 1312–1323.

Ruiz-García, J., Negrete, M. (2009) Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones, Engineering Structures, 31, 170-181.

Rodriguez-Marek, A., Bray, J., Abrahamson, N (2000), A Geotechnical Seismic Site Response Evaluation Procedure, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Twelfth World Conference on Earthquake Engineering (12th WCEE), Aukland, New Zealand

Schmidt, V., (2010): Avances para Estudios del Riesgo Sísmico a Escala local y Regional: Aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.

Seismosoft (2013) SeismoStruct v6.5 - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, available from http://www.seismosoft

Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET, ahora DGOA (2004), Sismos En El Salvador 1900-2001: Contexto http://www.snet.gob.sv/Riesgo/analisis/SISMOSELSALVADORyCA.pdf

Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET, ahora DGOA, Cronología de sismos destructivos en El Salvador http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas

Seneviratna, G.D.P.K., Krawlinker, H. (1997) Evaluation of inelastic MDOF effects for seismic design, Report No 120, Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University, 191p

Zhao et al., (2006): Attenuations Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 96, pp. 898-913.

9 ANEXO I

Ficha para la recolección de información de la exposición

MODELACIÓN PROBABILISTA DE ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, CIUDAD DE SANTA TECLA

FORMATO DE CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS

Código de inmueble		Fecha de inspección: / /	
Tipología estructural			
Responsable de la inspección		Responsable de la revisión	

INFORMACION GENERAL

- Latitud:_____ Longitud : _____
- Parcela catastral: _____ Manzana: _____ Área: _____
- Número de edificios (módulos) representativos en la parcela catastral inspeccionada: _____
- Portafolio:

  Educación □ Salud □ Gobierno □ Comercio □ Industria □ Residencia □ Otros □, Especifique: _____
- Dirección y especificaciones: _____
- Año de construcción: Mod __ :_____ Uso del módulo: Mod __ :_____

INFORMACION TÉCNICA INDISPENSABLE

- Forma de la planta: Rectangular. ☐ Circular. ☐ Ángulo. ☐ U. ☐ Otro. ☐, Especifique: _____
- Dimensión: Paralela a la fachada: _____m Perpendicular a la fachada: _____ m

  Otras: _____ Área: _____ m^2
- Número de pisos: _____ Altura característica de entrepisos: _____
- Material de piso: Concreto □ Madera □ Metálico □ Otros □, Especifique: _____
- Tipo de piso: Losa densa □ Unidireccional □ Otros □, Especifique: _____
- Topografía del sitio: Cresta □ Pie □ Pendiente □ Plano □ Otros □, Especifique: _____

Sistema estructural

	DIRECCIÓN PARALELA A FACHADA (X)	DIRECCIÓN PERPENDICULAR A FACHADA (Y)
Marcos de concreto	Con arriostramiento diagonal ☐ Sin arriostramiento diagonal ☐ Con paredes de relleno con junta ☐ Con paredes de relleno sin junta ☐	Con arriostramiento diagonal ☐ Sin arriostramiento diagonal ☐ Con paredes de relleno con junta ☐ Con paredes de relleno sin junta ☐
Marcos de acero	Con arriostramiento ☐ Sin arriostramiento ☐	Con arriostramiento ☐ Sin arriostramiento ☐
Paredes estructurales	Concreto ☐ Mampostería: Confinada ☐ Refuerzo integral ☐ No reforzada ☐	Concreto ☐ Mampostería: Confinada ☐ Refuerzo integral ☐ No reforzada ☐
Otros sistemas	Madera ☐ Adobe ☐ Bahareque ☐ Panel y columna de concreto ☐ Sistema a base de polines ☐ Prefabricado ☐ Moldeado ☐	Madera ☐ Adobe ☐ Bahareque ☐ Panel y columna de concreto ☐ Sistema a base de polines ☐ Prefabricado ☐ Moldeado ☐

INFORMACIÓN TÉCNICA COMPLEMENTARIA

Techo:

- Estructura rígida ☐ Flexible con viga de amarre ☐ Flexible sin viga de amarre ☐

Material:

- Lámina de Fibro Cemento ☐ Lámina metálica ☐ Teja y madera ☐ Otros ☐, Especifique: _____
- Forma: Dos aguas ☐ Una agua ☐ Plano ☐ Otros ☐, Especifique: _____

DEFECTOS ESTRUCTURALES OBSERVADOS

- Tiene columnas cortas Si ☐ No ☐
- Irregularidad en planta Si ☐ No ☐
- Existe irregularidad torsional Si ☐ No ☐
- Piso flexible o débil Si ☐ No ☐
- Entrepiso sin vigas Si ☐ No ☐
- Paredes esbeltas y sin amarre Si ☐ No ☐
- Irregularidad en elevación Si ☐ No ☐
- Existe sobrepeso en el edificio Si ☐ No ☐
- Se puede golpear con otro edificio Si ☐ No ☐
- Columna débil, viga fuerte Si ☐ No ☐
- Baja calidad de materiales evidente Si ☐ No ☐
- Vanos grandes en paredes Si ☐ No ☐

INFORMACIÓN DE DAÑOS EVIDENTES

- Ha sufrido daños estructurales debido a sismos anteriormente Si ☐ No ☐

Fecha del sismo: 10/10/1986 ☐ Ligero ☐ Severo ☐ Reparado ☐

Enero y febrero 2001 ☐ Ligero ☐ Severo ☐ Reparado ☐

Necesita reparación ☐ Recientemente renovado ☐

INFORMACIÓN ADMINISTRATIVA INDISPENSABLE

- Número de ocupantes en el inmueble (alumnos, pacientes, empleados, etc.):

No.					
Mañana					
Tarde					
Noche					

- Metros cuadrados (m2) de construcción de edificación representativa: _____
- Valor por m2 de construcción en las instalaciones inspeccionadas (USD): _____
- Valor de mobiliario y equipo dentro de las edificaciones (USD): _____

Mod__ :_____ Mod __: _____ Mod __: _____Mod __: _____Mod __: _____

CONTROL FOTOGRAFICO

Descripción	Número de foto
Fachada	