



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



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

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

Informe Ejecutivo

Junio de 2015





MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

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, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (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 de Salud (MINSAL). De este proyecto se identificó que el área urbana del municipio de 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 recabó aquella 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. La persona usuaria final debe estar consciente de las limitaciones y restricciones de los análisis realizados para poder dar uso adecuado a la información.



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Índice

Introducción.....	2
Visión general.....	2
Historia sísmica de El Salvador.....	2
1 Amenaza sísmica en Santa Tecla.....	3
1.1 Evaluación de la amenaza sísmica.....	3
1.2 Modelo de amenaza sísmica nacional.....	3
1.3 Efecto de sitio.....	3
1.3.1 Efecto de las condiciones locales en el movimiento fuerte.....	3
1.3.2 Efecto de sitio en Santa Tecla.....	4
2 Cuantificación de la vulnerabilidad estructural y la exposición en la ciudad de Santa Tecla.....	8
2.1 Metodología.....	8
2.2 Resultados.....	11
3 Modelo de riesgo sísmico para Santa Tecla.....	14
Información adicional.....	17
4 Conclusiones.....	18
5 Taller de Estrategia para la Estimación del Riesgo Sísmico en El Salvador.....	19
Referencias.....	23



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Introducción

Visión general

Riesgo sísmico se define como la probabilidad de una pérdida causada por un sismo durante un tiempo definido, y puede ser medido en términos humanos, económicos o sociales. La probabilidad de una pérdida causada por un sismo depende de tres factores: la amenaza sísmica, la exposición y la vulnerabilidad de las edificaciones expuestas. De manera simplificada:

$$\text{Riesgo Sísmico} = \text{Amenaza Sísmica} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La amenaza sísmica es la probabilidad de que ocurran movimientos sísmicos de cierta intensidad en una zona y tiempo definido, y refleja características de la naturaleza que generalmente no pueden ser modificadas, como la sismicidad y la geología de la región. La exposición puede medirse en términos del número de personas albergadas en cada edificio o el valor monetario (de reposición) de ese edificio, y la vulnerabilidad representa el daño que puede esperarse en una estructura expuesta a un movimiento sísmico de cierta intensidad.

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 las ciudades ubicadas en zonas sísmicas, como es el caso de Santa Tecla, la cual forma parte de los municipios que conforman el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), donde existe una elevada amenaza sísmica y un alto nivel de exposición, el nivel de riesgo está controlado por la vulnerabilidad de la infraestructura existente, y ésta a su vez, relacionada al nivel de conocimiento de la peligrosidad de la región.

El presente informe expone brevemente el proyecto de investigación conjunta en las zonas propensas a desastres naturales en el Área Metropolitana de Santa Tecla, con el apoyo de ciertos criterios obtenidos del proyecto realizado en el año 2012, sobre la modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador.

Historia sísmica de El Salvador

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 altas tasas de sismicidad, tanto 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 pos sismo desde 1900 hasta la fecha han sumado USD\$ 3,406,500,000 y 2,549,991 afectados, 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, las 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 debido a 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 USD\$ 1,352 millones en pérdidas materiales. (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 AMSS ha tenido consecuencias devastadoras en el pasado y de continuar, el nivel de riesgo seguirá aumentando y eventos futuros podrán provocar elevadas pérdidas humanas y económicas (Kattan et al., 2012).

I Amenaza sísmica en Santa Tecla

I.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 modelo de amenaza utilizado se construye sobre la base de parámetros del movimiento fuerte, caracterizado tanto en términos de amplitud 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)

I.2 Modelo de amenaza sísmica nacional

Tomando como base el proyecto RESIS II (ver Molina et al., 2008), se realizó un estudio de amenaza a escala nacional, considerando las distintas fuentes generadoras de sismos y sus características, y estudiando en detalle modelos de predicción del movimiento (sobre la base de los parámetros de la fuente y el trayecto) que mejor se ajusten a las observaciones.

El mapa de zonificación considera la contribución de distintos escenarios asociados a una probabilidad de ocurrencia. Para cada uno de estos escenarios, se estima la aceleración máxima del terreno y las aceleraciones para distintos períodos estructurales (edificaciones de distinta altura). El modelo probabilista de riesgo sísmico para el AMSS consideró 24,996 escenarios sísmicos probables. La Figura I.1 muestra ejemplos de los casi 25,000 escenarios sísmicos considerados en el modelo de riesgo.

I.3 Efecto de sitio

I.3.1 Efecto de las condiciones locales en el movimiento fuerte

Cuando la predicción del movimiento fuerte se realiza sobre la base de los parámetros de la fuente y el trayecto, el movimiento queda caracterizado en roca o suelo duro y resulta necesario incluir la influencia de los efectos locales como factor integrante del movimiento.

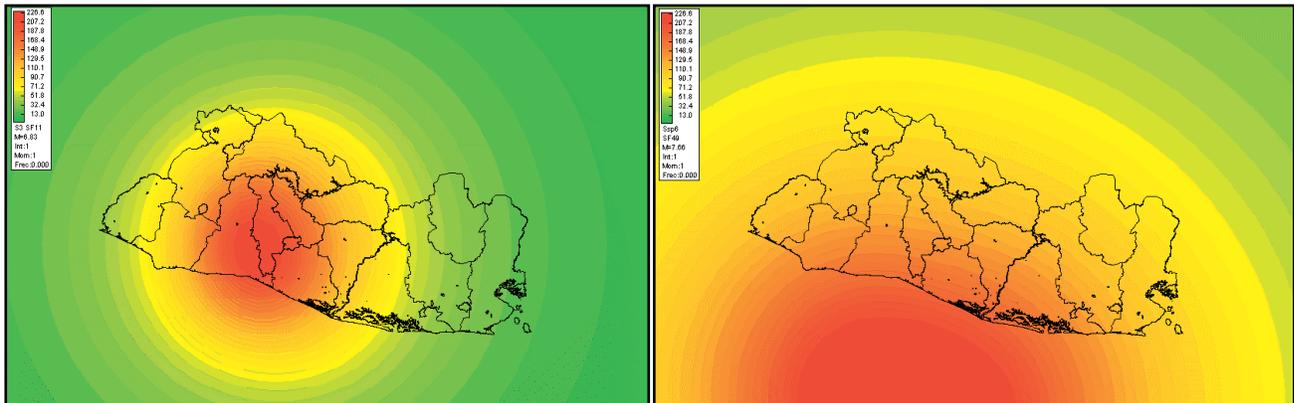


Figura 1.1. Ejemplo de escenarios sísmicos probables (cerca de 25,000 escenarios considerados en el modelo de riesgo).

El efecto de sitio en el AMSS está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o cenizas volcánicas (Tierras Blancas), sobre las cuales reside la mayor parte de la ciudad. Estas cenizas se adelgazan ladera arriba del volcán San Salvador (3 m) pero hacia el oriente de la capital (Soyapango e Ilopango), alcanzan espesores de más de 60 m (Hernández, 2007)

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. Las ondas sísmicas se amplifican, pero solo en los rangos frecuenciales propios de la respuesta libre del suelo. En otras palabras, el suelo "filtra" la onda al amplificar el movimiento en ciertas frecuencias, atenuándolo en otras (Figura 1.2). **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.

En la Figura 1.3 se muestran 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. El evento causó daños significativos principalmente en edificaciones de mediana altura (entre 3 y 8 niveles), en correspondencia al período predominante de los suelos del AMSS.

1.3.2 Efecto de sitio en Santa Tecla

Tomando como base los mapas geológicos y topográficos de la región, así como información geológica/geotécnica recopilada, se estimaron de forma preliminar **zonas de respuesta sísmica similar**, utilizando como principal criterio para su delimitación, la profundidad de los suelos no consolidados sobre la base rocosa (Figura 1.4). 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. Las funciones de amplificación relativa para cada zona, estimadas sobre la base de datos sísmicos, reflejan una función de modificación al espectro de respuesta para la condición de "Roca" (considerando suelo en rango elástico). El detalle del espesor de suelo blando superficial, función de amplificación típica, y descripción del tipo de edificación que pudiera verse más afectada por efectos de sitio, se muestra en el Cuadro 1.1.

Amplificación ≈ 3.5 para Edificaciones de 2 – 3 Niveles (todos los eventos - rango elástico)

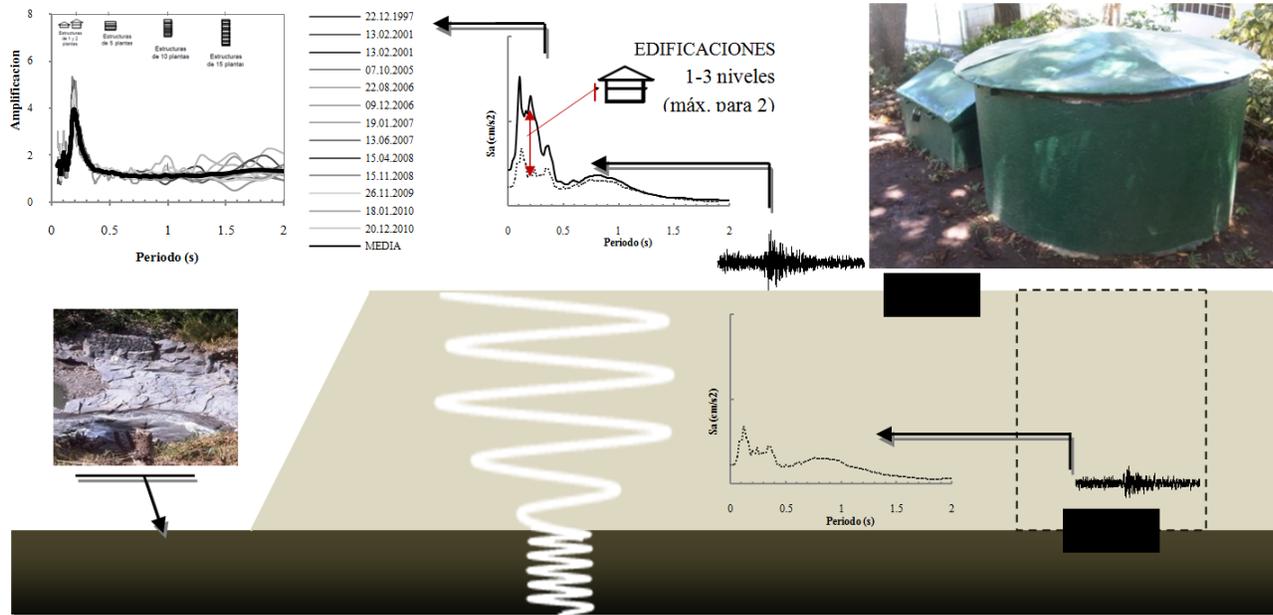


Figura 1.2. Amplificación de ondas sísmicas en depósitos de suelo blando para el caso del pozo instrumentado en Casa Presidencial (CPRS/CPRF).

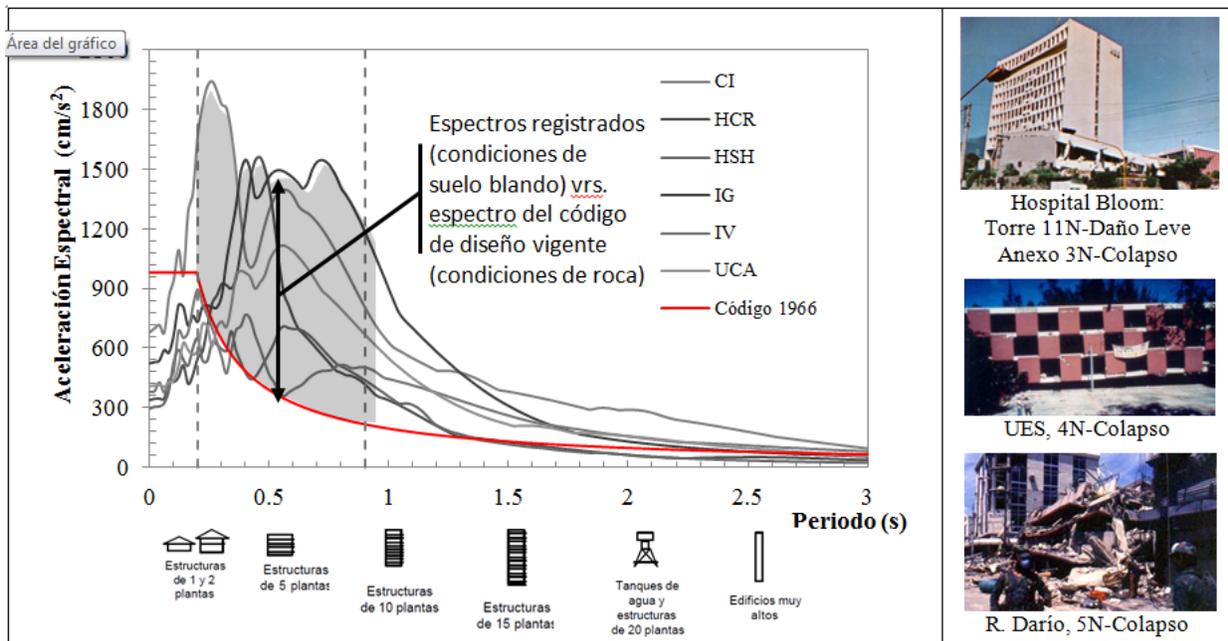


Figura 1.3. Espectros de respuesta elásticos para el sismo del 10.10.1986 y el código de 1966 - condiciones de roca ($\zeta=5\%$) junto con el tipo de edificación que podría verse más afectada (Izq). Ejemplos de daños ocurridos durante el evento (Der.) (Modificado de Kattan-Jokisch, 2010).



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

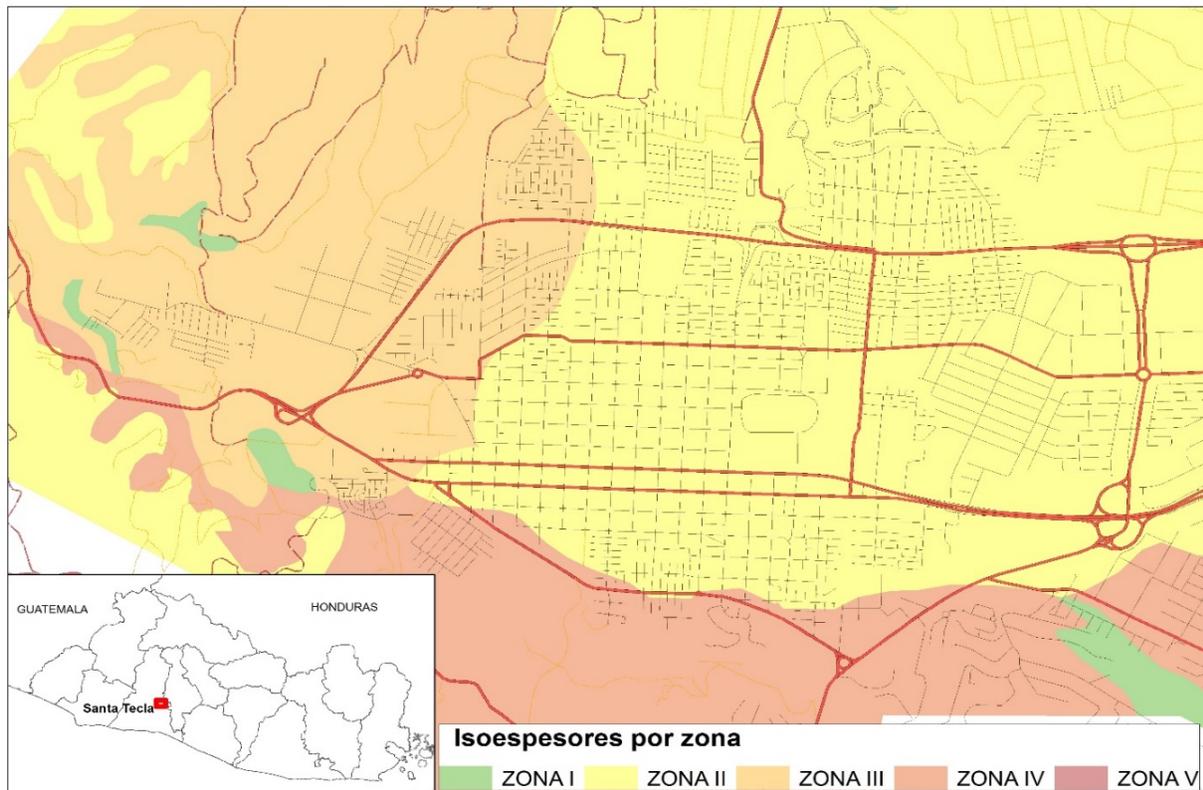
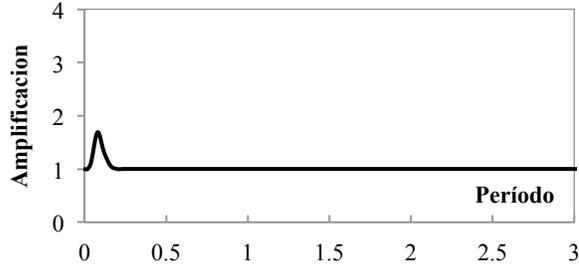
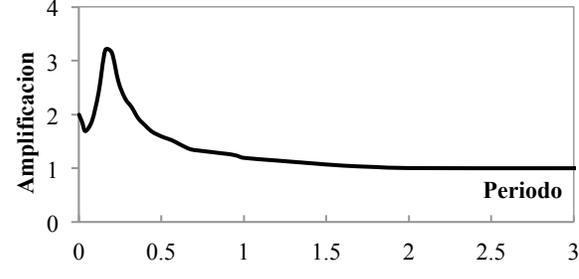
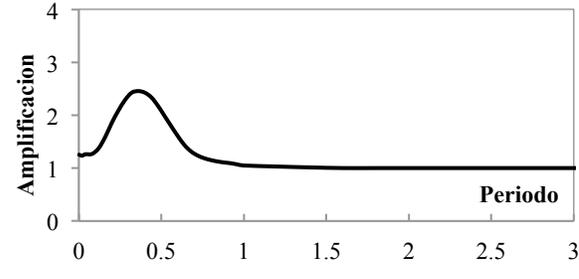
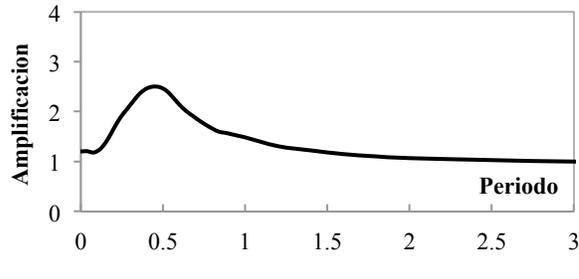
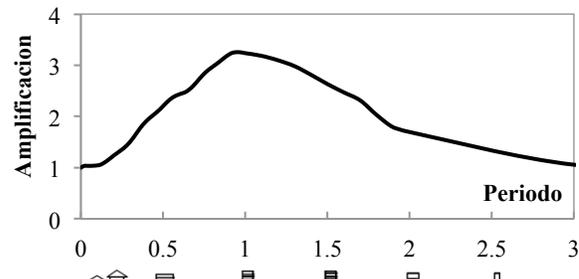
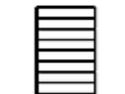


Figura I.4. Mapa preliminar de zonas de respuesta sísmica similar para zona urbana de Santa Tecla

Las funciones de amplificación se han obtenido con base a la información existente y no se descarta que otros períodos dominantes y/o amplificaciones pudieran obtenerse de tener más información. **Se trata de una primera aproximación para la estimación de respuesta de sitio, y debe ser considerada como tal; no pretende reemplazar ni descartar estudios de detalle.**

Cuadro I.1: Condiciones típicas de suelo 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	 <i>Colonia Escalón (2011)</i>		 Estructuras 1 Nivel
ZONA II Suelo blando 5-15m	 <i>Zona de Multiplaza (2007*)</i>		 Estructuras 1-3 Niveles (Típico 2)
ZONA III Suelo blando 15-25m	 <i>Centro de Gobierno (2010)</i>		 Estructuras 2-5 Niveles (Típico 3)
ZONA IV Suelo blando 25-50m	 <i>Altos del Boulevard (2008*)</i>		 Estructuras 4-9 Niveles (Típico 5)
ZONA V Suelo blando >50m	 <i>Rio Las Cañas (2010)</i>		 Estructuras >8 Niveles (Típico 10)

*Fotografías cortesía de Walter Hernández



2 Cuantificación de la vulnerabilidad estructural y la exposición en la ciudad de Santa Tecla

2.1 Metodología

El tamaño total del territorio considerado es de 5,123,371 M² y comprende todo el Centro Histórico así como las colonias ubicadas al sur y norte del mismo, Figura 2.1. 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.



Figura 2.1. 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.

El Salvador no posee un banco de datos georreferenciado donde se registre información importante tal como las características físicas y estructurales de los edificios; por lo tanto, se tuvo que hacer un levantamiento detallado en el lugar de interés. Durante la campaña de recolección de datos físicos de los activos, las siguientes características de éstos fueron registradas:

- Información general: ubicación, por GPS; identificación catastral; área en m²; portafolio; año de construcción y uso.
- Información técnica: sistema estructural; forma de la planta; dimensiones; número de pisos; altura de entrepiso; tipo y material del techo; tipo y material del piso.
- Errores estructurales: columna corta; irregularidad en planta o elevación; piso débil; viga fuerte-columna débil; grandes aberturas en paredes estructurales; baja calidad de materiales.
- Daños por sismos: daño por sismos de 1986 o 2001; nivel de daños, daños sin reparación.

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 fueron censados uno a uno, mientras que para los activos de las otras cuatro regiones restantes se hizo uso de la metodología de manzanas homogéneas. Un total de siete grupos de evaluadores, uno asignado para cada región, se utilizaron.

En cuanto a la vulnerabilidad, estudios anteriores (Kattan Jokisch et al., 2012; Castellanos Araujo, 2011), clasificaron edificios pertenecientes a los portafolios de educación, salud y gobierno en tipologías estructurales, Cuadro 2.1, y curvas de vulnerabilidad fueron desarrolladas para cada tipología usando diversos métodos. En el presente proyecto, tales curvas fueron evaluadas y modificadas si era necesario. Además, nuevas curvas de vulnerabilidad fueron calculadas para las tipologías estructurales que no habían sido consideradas anteriormente. Para ejecutar estas tareas, una extensa revisión de la literatura fue llevada a cabo, especialmente para el caso de la mampostería.

Cuadro 2.1. Tipologías básicas (Castellanos Araujo, 2011)

Tipología	Código básico
Marcos de concreto con junta de dilatación incluye el caso de marcos de concreto sin arriostramiento	MCCJ
Marcos de concreto sin junta de dilatación 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 mampostería 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.

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 (FEMA, 2013), 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. Los pasos para desarrollar el proceso de

cálculo de las funciones de vulnerabilidad se muestran en la Figura 2.2, y pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Una configuración tipo se selecciona para cada tipología estructural y se crea un modelo matemático del mismo.
- Para el cálculo de las curvas de capacidad se emplea un programa de análisis no lineal; para el caso de las estructuras de mampostería TREMURI (Lagomarsino et al., 2013) se utiliza.
- El modelo se somete a varios análisis de Pushover, cambiando tanto la dirección de aplicación de carga como su perfil; el análisis que produce el valor más bajo de resistencia se emplea para desarrollar la curva de vulnerabilidad.

Con la información anteriormente mencionada incluyendo además el periodo, la altura y masa equivalentes del sistema de un solo grado de libertad equivalentes, el coeficiente de diseño con el cual la estructura fue originalmente diseñada, así como los estados de daños asociados al análisis, la curva de vulnerabilidad puede ser desarrollada.

Para definir la densidad de la probabilidad de pérdida se utilizó lo estipulado en Castellanos Araujo, 2011 y 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.

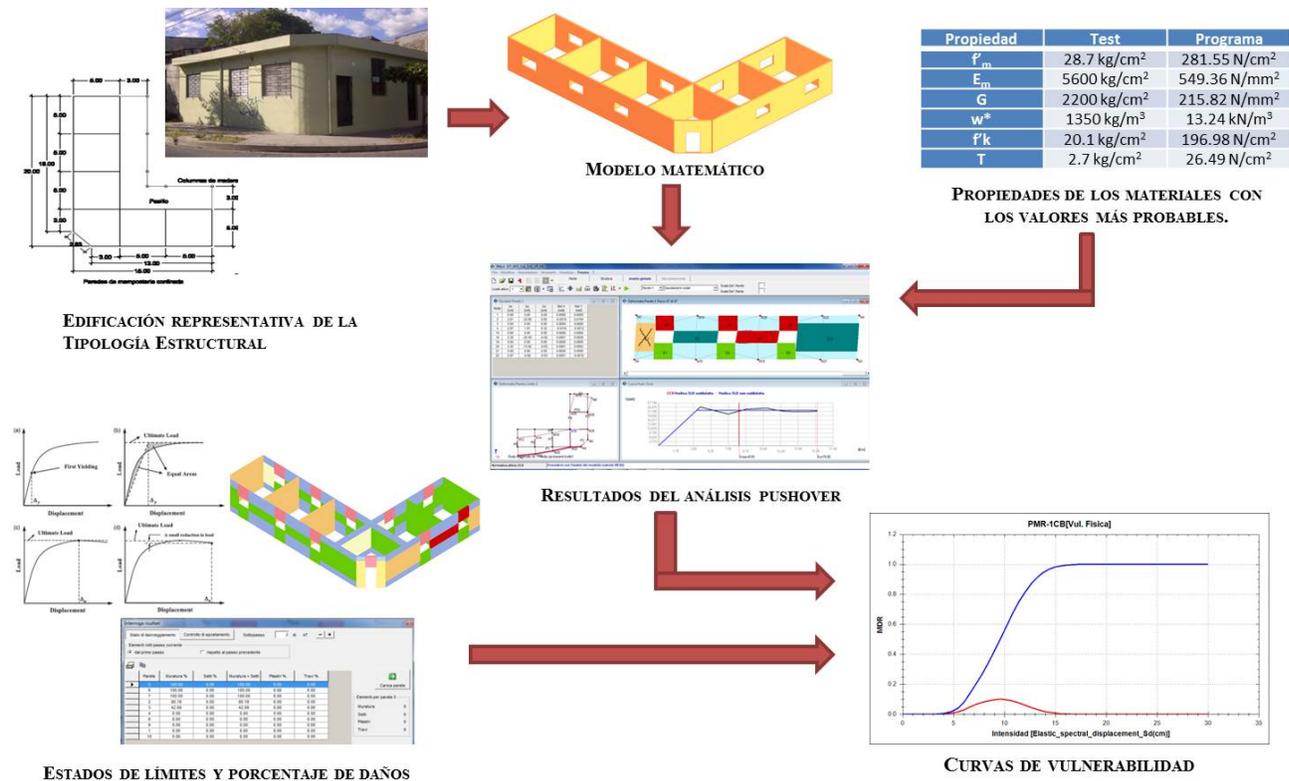


Figura 2.2. Esquema metodológico para el desarrollo de las curvas de vulnerabilidad.

2.2 Resultados

En el Centro Histórico, un total de 1,928 estructuras fueron censadas, de las cuales dos tercios pertenecen al portafolio “Vivienda”, aun cuando hay un importante porcentaje de activos que se clasifican como “Comercio”, hecho que se puede explicar debido a que en esta área se concentra la actividad económica de la ciudad, figura 2.3 a. De los suburbios de Santa Tecla, 664 activos fueron seleccionados para ser censados, como se aprecia en la figura 2.3b, en este caso la mayoría pertenece al portafolio “Vivienda”. Sumando todas las estructuras para todos los segmentos se obtienen 2,592 activos expuestos. Una importante característica para ejecutar cualquier análisis de vulnerabilidad es conocer la altura de las edificaciones, las cuales, para el presente caso, se ubican entre uno y dos niveles (Figura 2.4), otro factor de importancia es el sistema estructural (Figura 2.5)

Al finalizar las dos fases de trabajo, se procedió a distribuir y multiplicar los activos base, principalmente aquellos de las manzanas homogénea en los segmentos catastrales similares por lo que, al final del proceso, se obtuvieron 16,444 estructuras que se utilizaron para ejecutar la evaluación de análisis de riesgo sísmico para toda el área de interés, Figura 2.6.

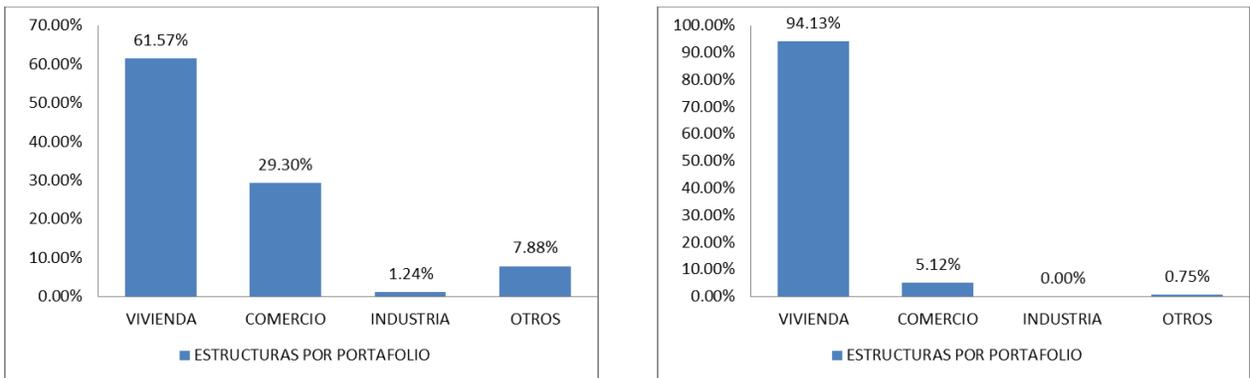


Figura 2.3 Activos clasificados por portafolio: a) izquierda: Centro Histórico y b) derecha: periferia.

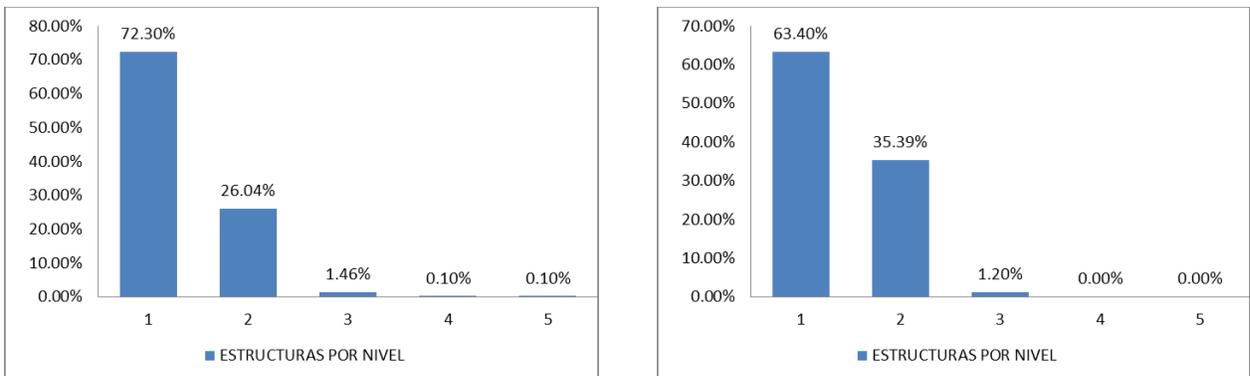


Figura 2.4 Activos clasificados por altura: a) izquierda: Centro histórico y b) derecha: periferia.

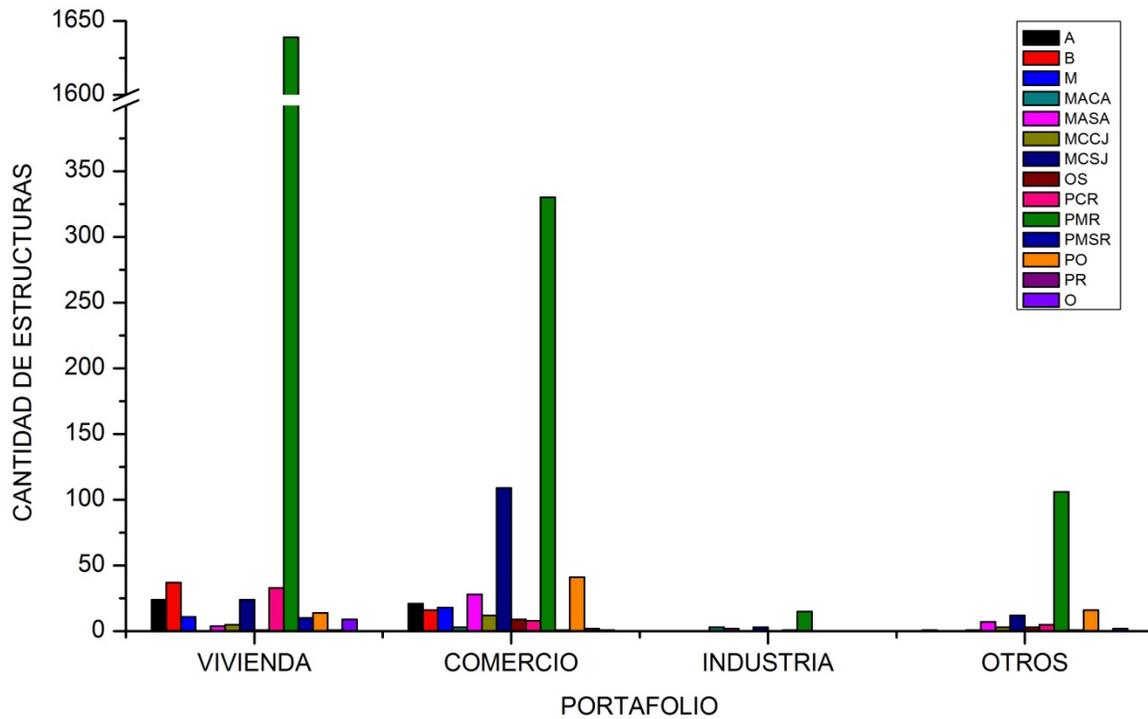


Figura 2.5. Total de activos clasificados por tipología estructural y portafolio

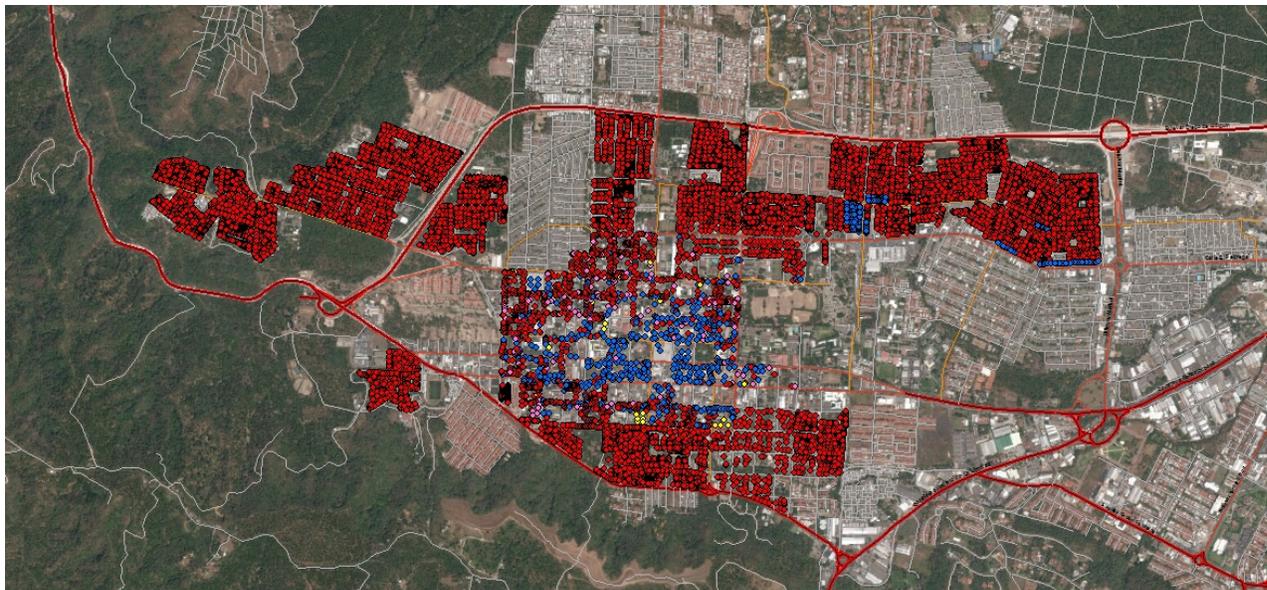


Figura 2.6. 16,444 activos utilizados en el análisis de riesgo sísmico. Colores de los puntos, Rojo: Vivienda, Azul: Comercio, Amarillo: Industria y Violeta: Otros.

Toda esta información fue almacenada en una base de datos geográfica, la cual se encuentra en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Humanos (MARN). No se omite manifestar que en ciertas áreas de la zona de estudio no fue posible 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 las personas encuestadoras y, principalmente, la falta de seguridad personal de los equipos de encuestadores.

En cuanto a los resultados de la vulnerabilidad, el procedimiento que permitiría desarrollar las curvas de vulnerabilidad previamente establecido se ejecutó a fin de completar el set de curvas para la tipología de paredes de mampostería reforzada de un nivel (PMR-I) que incluye las configuraciones de precódigo (PMR-IPC), código bajo (PMR-ICB) y código medio (PMR-ICM). La Figura 2.7 ilustra la comparación entre el set de curvas obtenido en el proyecto previo, desarrolladas con base al criterio de experto, y las desarrolladas en el presente trabajo.

Siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito se revisaron varias tipologías. Cabe mencionar que en ocasiones no se han podido coleccionar suficientes datos de las características físicas de los materiales que componen una determinada tipología. Lo anterior 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.

41 tipologías fueron identificadas en Santa Tecla; a 29 de éstas se les desarrollaron nuevas curvas debido su importancia y el gran número de estructuras asociadas a éstas. Se contabilizó el 98 % de los activos expuestos; mientras que las funciones de vulnerabilidad de 12 tipologías se usaron sin ninguna modificación, Cuadro 2.2.

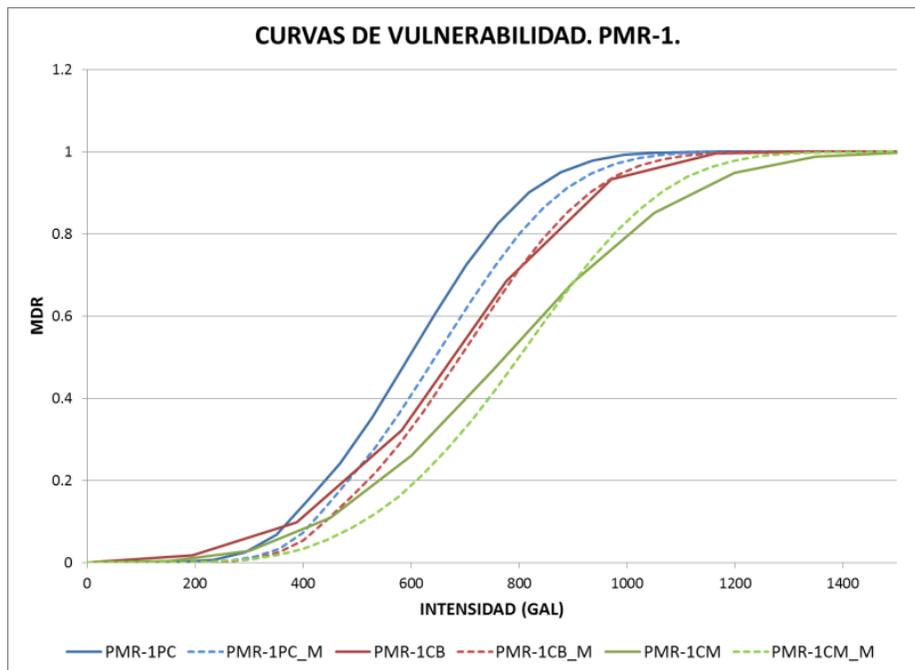


Figura 2.7. Comparación de las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en el presente trabajo, líneas punteadas, y las construidas en proyectos previos, líneas continuas, para la tipología de paredes de mampostería reforzada de un nivel.



Cuadro 2.2. 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	I	Marcos de acero con arriostramiento (MACA)	Medio	2-5
Bahareque (B)	Bajo	I	Marcos de concreto con junta (MCCJ)	Precódigo, Bajo y Medio	I, 2-5
Marcos de acero con arriostramiento (MACA)	Precódigo, Bajo	I	Paredes de mampostería sin refuerzo (PMSR)	Precódigo, Bajo y Medio	I, 2-5
Marcos de acero sin arriostramiento (MASA)	Bajo y Medio	I, 2-5	Estructuras prefabricadas (PR)	Bajo	I
Marcos de concreto sin junta (MCSJ)	Precódigo, Bajo y Medio	I, 2-5	Sistema precario (SP)	Bajo	I
Paredes de concreto reforzado (PCR)	Precódigo, Bajo y Medio	I, 2-5			
Paredes de mampostería reforzada (PMR)	Precódigo, Bajo y Medio	I, 2-5			
Estructuras de polines (PO)	Bajo y Medio	I			
Madera (M)	Bajo y Medio	I			

3 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 USD\$ 963,414 millones. 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 3.1 se presenta en forma gráfica la distribución espacial del valor de los activos expuestos.

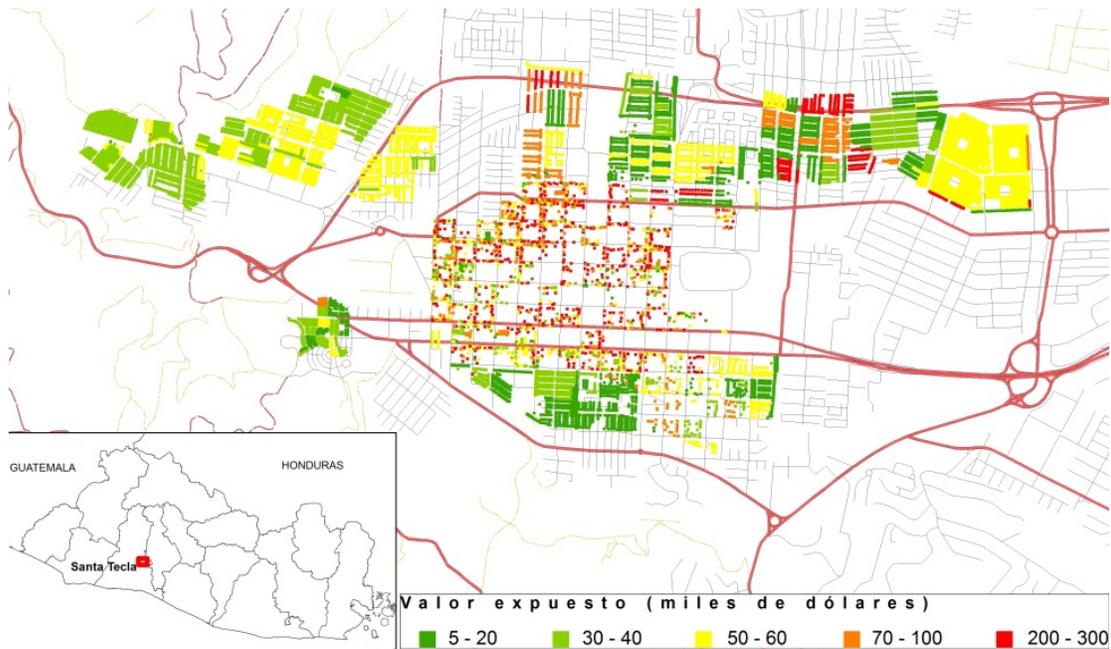


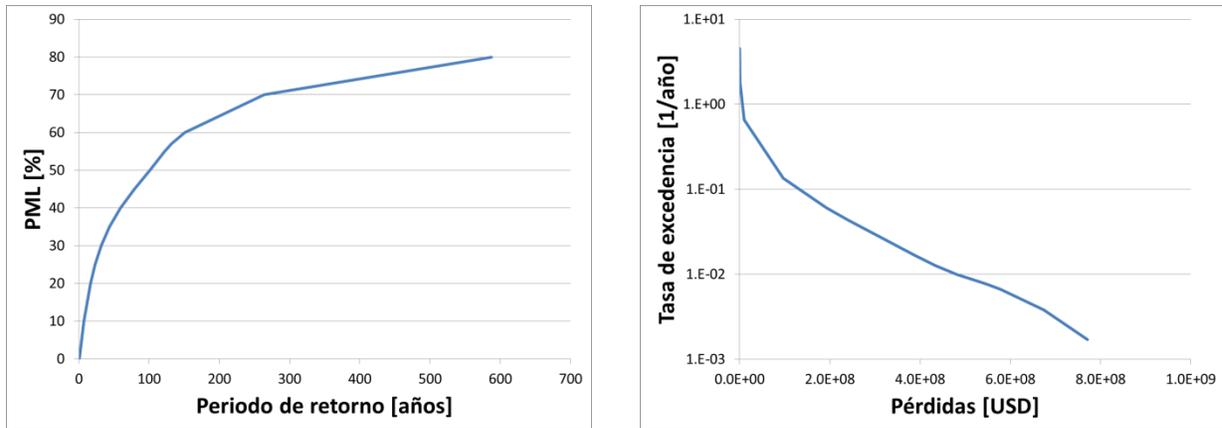
Figura 3.1. Valor de los activos expuestos en la ciudad de Santa Tecla

Del análisis de riesgo, se obtiene una pérdida anual esperada de USD\$ 52,573 millones que representa un 5.46 % del valor total de los activos, Cuadro 3.1. Se incluye, además, la variación de la pérdida máxima probable respecto al periodo de retorno, Figura 3.3a, así como la variación de la tasa de excedencia de pérdidas, Figura 3.3b. 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. En el apartado 2 se evidencia 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 3.4 y que es considera que es el fenómeno causante de las pérdidas obtenidas.

 Cuadro 3.1. 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 3.2. (a) Variación del PML con el período de retorno, (b) Tasa de excedencia de pérdidas

Así mismo, en la Figura 3.3 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. De igual forma 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.

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.

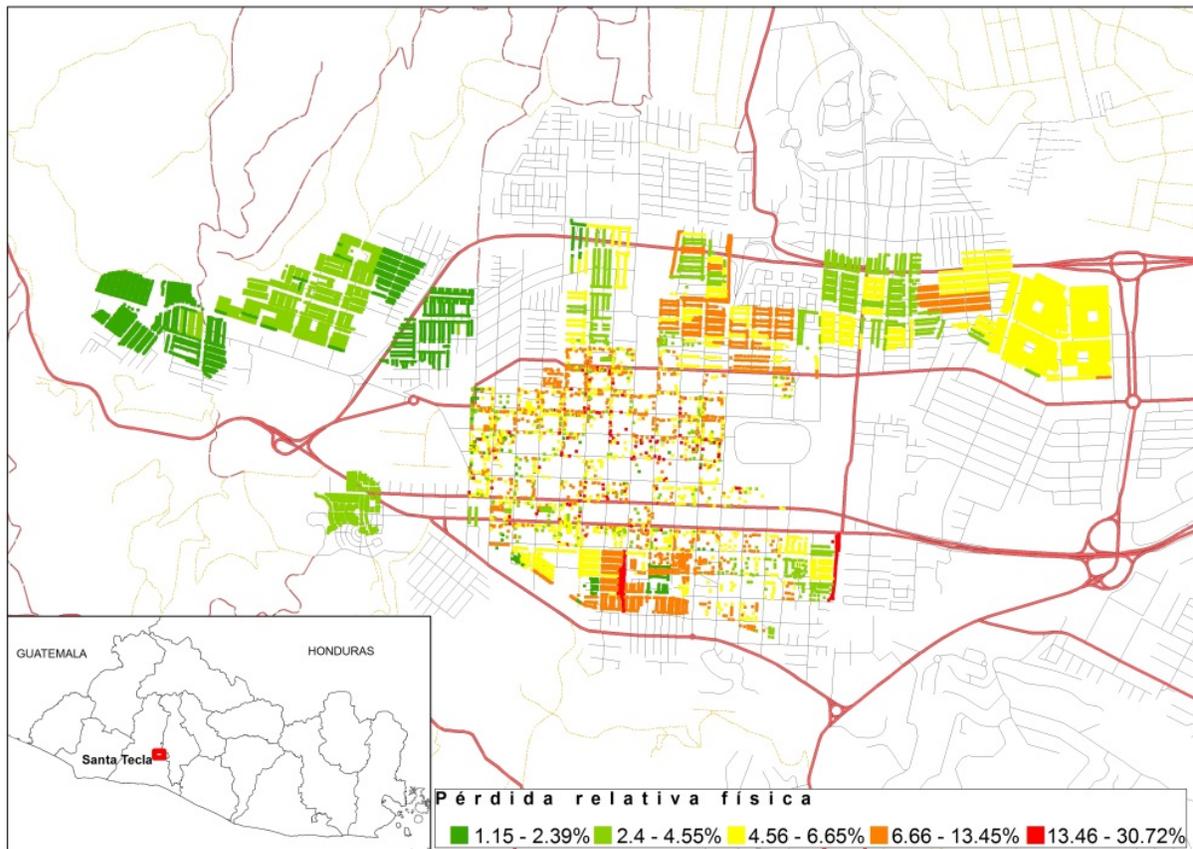


Figura 3.3. Pérdidas anuales esperadas en la ciudad de Santa Tecla

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 3.2, presenta un resumen del porcentaje de activos que presentan al menos un defecto estructural o han estado sometidos a un evento sísmico relevante. Para ejemplificar lo anterior, la Figura 3.4, muestra las áreas donde en su mayoría se encuentran estructuras que presentan el defecto de columna corta, mientras que en la Figura 3.5 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 3.2. Porcentaje de activos que presentan alguna deficiencia estructural o han sufrido un sismo

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

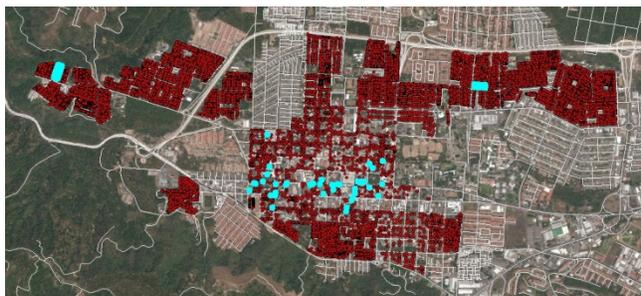


Figura 3.4. Áreas con edificaciones que presentan columna corta

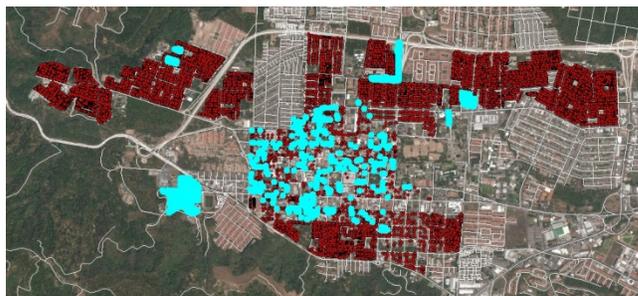


Figura 3.5. Áreas con edificaciones que han sido afectadas por sismos

4 Conclusiones

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

Los escenarios de pérdidas han sido desarrollados con base 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 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 determinar las pérdidas probables, en este caso económicas, que puedan ser producidas por una serie de escenarios en la zona de interés. Enfatizado esto, se ha calculado que las pérdidas anuales equivalen al 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 debe tomar medidas para reducirlo. Idealmente, tales medidas deberán ser asumidas por una simbiosis entre propietario-municipalidad-Protección Civil-Gobierno Central, que concurran a afrontar de una manera objetiva y práctica las pérdidas calculadas, con especial atención en las estructuras críticas que concentran las pérdidas máximas esperadas.

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.

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 sismo resistente, que constituyen las herramientas más efectivas para la reducción del riesgo.

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 complementado y revisado 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.

5 Taller de Estrategia para la Estimación del Riesgo Sísmico en El Salvador

Al final de la conducción del presente estudio, se desarrolló un taller de trabajo sobre la Estrategia de Estimación de Riesgo en El Salvador. Es decir, además de divulgar los resultados de la implementación CAPRA en Santa Tecla, como una herramienta aplicada para reducir riesgos, se buscó conocer la opinión, obtener retroalimentación y sugerencias de diferentes actores y sectores.

Los objetivos específicos del taller fueron:

- Compartir la metodología, procesos y resultados de la evaluación probabilista de riesgo sísmico en la ciudad de Santa Tecla.



- Facilitar la conversación y generar discusión y análisis sobre los resultados, procedimientos, metodologías e insumos utilizados para la evaluación del riesgo sísmico en Santa Tecla.
- Recabar ideas y recomendaciones provenientes de los participantes, que permitan establecer futuros pasos o mejoras en la evaluación del riesgo sísmico.
- Identificar oportunidades para mejorar los procesos, insumos y el trabajo interinstitucional para futuras implementaciones.

Las instituciones representadas en el taller fueron las siguientes: Universidad de El Salvador, UES (Facultad de Ingeniería y Arquitectura), Ministerio de Obras Públicas (Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Dirección General del Observatorio Ambiental), Ministerio de Hacienda, Alcaldía Municipal de Santa Tecla, Instituto Geográfico Nacional y Catastro Nacional, Dirección General de Protección Civil (DGPC), Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos(ASIA), y la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador(OPAMS).

El taller inició con una presentación general del proceso CAPRA en la Región Centroamericana, donde un representante del Banco Mundial explicó cómo ha venido evolucionando la iniciativa en los diferentes países, cómo se espera que esta metodología continúe desarrollándose de forma sostenible y autónoma en cada país.

Por el equipo TAP de El Salvador, se presentó la metodología, procesos y resultados del estudio en Santa Tecla, haciéndose énfasis en los resultados y usos de cada capa de información considerada en la evaluación del riesgo.

Fueron organizadas cuatro mesas de trabajo:

1. **Gestión prospectiva**, donde se pretendía identificar cómo puede incorporarse la evaluación probabilística del riesgo en la planificación del desarrollo desde el gobierno, sector privado y sociedad civil.
2. **Gestión correctiva**, con el objetivo de identificar cómo reducir los niveles de riesgo existentes identificados con esta metodología.
3. **Gestión reactiva**, desde donde se señalara qué insumos y mecanismos pueden requerirse para aportar a los procesos y subprocesos de la Preparación, Respuesta y Rehabilitación.
4. **Protección financiera**, para poder identificar cómo aportar al establecimiento de las estrategias efectivas para la atención de riesgos, señalando quizás los primeros pasos.

En las cuatro mesas se desarrollaron instrumentos elaborados para: 1) Conocer qué instituciones identifican dentro de sus competencias la evaluación del riesgo, qué hacen alrededor de ese eje y si cuenta con insumos para su análisis; 2) Recibir retroalimentación acerca del proceso, metodología, insumos y resultados de la evaluación del riesgo presentada; 3) Generar un listado de propuestas, lineamientos y acciones específicas para poder realizar la gestión integral del riesgo; y 4) Conocer los diferentes proyectos que pudieran aportar al análisis del riesgo en El Salvador.



A partir del trabajo de las cuatro mesas se llegó a las siguientes conclusiones:

1. **Gestión prospectiva:**

- a. Es necesaria la actualización de normativas y reglamentos relativos a diseño y construcción que consideren, entre otros puntos, las condiciones reales de suelo.
- b. Se debe contar con un banco de datos de estudios de suelos (estratigrafía y geología), actualizado constantemente por a partir de estudios presentados a las oficinas encargadas de autorizar proyectos e instituciones nacionales ejecutoras.
- c. Instrumentar edificios importantes y manejar una red de acelerógrafos fue consideradas acciones que aportarían a la investigación.
- d. Se debe realizar un inventario de estructuras críticas y sectores vulnerables.
- e. Debe establecerse los mecanismos para garantizar un adecuado acompañamiento en la ejecución de proyectos de construcción por parte de las oficinas de planificación y reguladoras.
- f. Cada municipio debería contar con un plan de gestión de riesgos.
- g. Considerar la incorporación de información relacionada con otro tipo de vulnerabilidades, como la económica y social.

2. **Gestión correctiva:**

- a. Debe complementarse la información del estudio de riesgo en Santa Tecla, considerando las zonas más pobladas, edificaciones importantes críticas y del patrimonio nacional, entre otros.
- b. Debe realizarse una verificación en campo de la condición de aquellas edificaciones identificadas como críticas en el estudio, es decir aquellas que suponen estudios de detalle, que podrían incluso decretarse posteriormente inhabitables.
- c. Se identifica la necesidad de conformar un equipo técnico interinstitucional, con capacidad de identificar defectos estructurales de viviendas y edificaciones.
- d. Es necesaria la elaboración de un catálogo o manual de los defectos estructurales recabados y sus recomendaciones para adecuada corrección o intervención.
- e. La conformación de un programa y la conformación su respectivo equipo técnico, para la evaluación y generación de propuestas de estabilización de taludes que pudieran ser activados por sismos.
- f. Identificación de sitios con potencial para reubicación de viviendas o soluciones habitacionales que consideren las condiciones de suelo y la amenaza existente.

3. **Gestión reactiva:**

- a. Se identifica la necesidad de actualizar el Plan Nacional de Contingencias para atender terremotos.
- b. Debe establecerse los mecanismos para que la Dirección General de Protección Civil conozca los proyectos urbanísticos y de ordenamiento territorial a fin de dar una aprobación conforme a análisis y evaluación del riesgo, que todo proyecto debe incluir.
- c. Instruir adecuadamente a las comisiones municipales de protección civil para que puedan elaborar evaluaciones de riesgo, base para la elaboración de sus planes de respuesta.
- d. Para la sensibilización y divulgación de los planes de respuesta, es necesario incorporar a todo el Sistema de Protección Civil.



4. **Protección financiera:**

- a. Que las municipalidades creen un fondo dentro de su presupuesto municipal para responder adecuadamente durante una emergencia, y velar que este presupuesto sea utilizado y reservado específicamente para estas acciones.
- b. Sugerir al Ministerio de Hacienda que continúe con la elaboración de los presupuestos por programa, y crear un programa especial en cada institución de asistencia ante desastres, catalogados como emergencia nacional, y que este presupuesto se mantenga congelado hasta que sea autorizado por la máxima autoridad representada.
- c. La creación de convenios a través de los cuales pueda compartirse la información en situaciones de emergencia, como CNR, que puede poner a disposición mapas, ortofotos y catastro a precios preferenciales.
- d. Establecimiento de una infraestructura nacional de datos espaciales, donde se comparta y concentre la información necesaria para la evaluación y análisis del riesgo.
- e. Fomentar la inversión pública en el tema de gestión de riesgos
- f. Establecer los mecanismos para que la planificación de la inversión pública y privada se realice con criterios de gestión del riesgo.

Del análisis en las mesas de trabajo, se obtuvo buenas opiniones sobre la metodología, procesos e insumos utilizados para la evaluación probabilista de riesgo sísmico en Santa Tecla. Así mismo, indicaron que los resultados pueden ser útiles para la toma de decisión de los diferentes sectores. Se señala que debe considerarse información complementaria al estudio como datos censales, zonas comerciales, viviendas de interés social, patrimonio cultural; así como mejorar la capa de efecto de sitio o respuesta del suelo.

Además, se logró identificar proyectos y acciones ejecutados desde las instituciones participantes que pueden aportar a la gestión del riesgo en El Salvador detallados a continuación:

- Fortalecimiento de las capacidades de las comisiones municipales, para la construcción de mapas de riesgo, a ejecutarse por la DGPC en un período de un año; acompañado por la elaboración de un marco normativo en un período de 6 meses.
- Elaboración de la herramienta EDAN (Evaluación de Daños y Análisis de Necesidades) estandarizada para todas las instituciones a escala nacional, a ejecutarse durante seis meses.
- Formulación de propuesta para la recaudación de fondos de emergencia a través de ordenanzas municipales, con el seguimiento de la Corporación de Municipalidades de la República de El Salvador, a ejecutarse durante un año.
- Actualización de códigos de diseño, impulsado por el Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU), con una duración de dos años, utilizando recursos del Gobierno Central y la cooperación internacional.
- Investigación y estudio del comportamiento de tipologías constructivas, que debería desarrollarse en un mínimo de dos años, por parte de la academia y el VMVDU.
- Unificación de planes de desarrollo, a desarrollarse en conjunto con las alcaldías, OPAMSS y el VMVDU, durante dos años con recursos propios.
- Revisión del marco legal regulatorio relativo a la construcción, que puede desarrollarse de inmediato por el VMVDU y OPAMS con recursos propios.

Es de mencionar que para el desarrollo de los primeros tres proyectos no se cuenta actualmente con fondos suficientes.



Referencias

- Castellanos Araujo, R.A. (2011) *Informe final generación de curvas de vulnerabilidad sísmica*, San Salvador, 259 pp.
- EM-DAT (2012): The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium.
- 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., Gencturk, B., Elnashai, A.S. (2013) *Simulation-Based Fragility Relationships for Unreinforced Masonry Buildings*, Journal of Structural Engineering, Vol.139, No. 3.
- 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.
- 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 Huevo, 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.
- 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
- 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 Methodologies 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 Engineering 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.
- 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.



Kilómetro 5^{1/2} carretera a Santa Tecla,
calle y colonia Las Mercedes
edificio MARN, instalaciones ISTA,
San Salvador, El Salvador, Centroamérica

Teléfono 2132 6276

 www.marn.gob.sv

 [/marn.gob.sv](https://www.facebook.com/marn.gob.sv)

 medioambiente@marn.gob.sv

 [@MARN_Oficial_SV](https://twitter.com/MARN_Oficial_SV)