

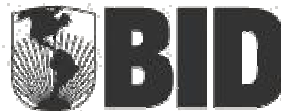
CAPRA

CENTRAL AMERICA PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT
EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS EN CENTRO AMÉRICA

EL SALVADOR

TAREA IV
MAPAS DE AMENAZAS Y DE RIESGOS, APLICACIONES
EN LA GESTIÓN DEL RIESGO

INFORME TÉCNICO SUBTAREA 4.2A
EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE
EN SAN SALVADOR





Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres

Consortio conformado por:

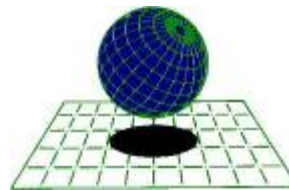
Colombia

Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



C I M N E

México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



[ERN Ingenieros Consultores, S. C.](#)

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Julián Tristancho
Especialista ERN (COL)

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Especialista ERN (COL)

Sergio Enrique Forero A.
Especialista ERN (COL)

Mario Andrés Salgado G.
Asistente Técnico ERN (COL)

Juan Pablo Forero A.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Juan Miguel Galindo P.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcárcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Juan Camilo Olaya
Asistente Técnico ERN (COL)

Steven White
Asistente Técnico ERN (COL)

Asesores Nacionales

SNET Francisco Ernesto Durán
& **Giovanni Molina** El Salvador

Osmar E. Velasco
Guatemala

Oscar Elvir Honduras
Romaldo Isaac Lewis Belice

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Tsuneki Hori
Consultor Interno

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Oscar Anil Ishizawa
Consultor Interno

Sergio Lacambra
Especialista Sectorial

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Edward C. Anderson
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

LIMITACIONES Y RESTRICCIONES

Esta aplicación es de carácter ilustrativo y presenta limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis realizado, el tipo y calidad de datos empleados, el nivel de resolución y precisión utilizado y la interpretación realizada. En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos.
- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado de actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas, lo que se explica en el documento descriptivo del ejemplo.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan este ejemplo como lo que puede ser factible de hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.
- Ni los desarrolladores del software, ni los promotores o financiadores del proyecto, ni los contratistas o subcontratistas que participaron en las aplicaciones o ejemplos de uso de los modelos asumen ninguna responsabilidad por la utilización que el usuario le dé a los resultados que aquí se presentan, por lo tanto están libres de responsabilidad por las pérdidas, daños, perjuicios o efectos que pueda derivarse por la utilización o interpretación de estos ejemplos demostrativos.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1-1
2	Metodología de evaluación del riesgo.....	2-1
3	Amenaza sísmica	3-1
3.1	Eventos históricos.....	3-1
3.2	Evaluación de la amenaza.....	3-2
4	Amenaza por huracán	4-1
4.1	Eventos Históricos.....	4-1
4.2	Evaluación de la amenaza.....	4-2
5	Amenaza volcánica.....	5-1
5.1	Estimación determinista de la amenaza.....	5-2
6	Inventario de elementos expuestos.....	6-1
6.1	Levantamiento de la información básica.....	6-1
6.2	Información de exposición de predios.....	6-2
6.3	Información de vulnerabilidad.....	6-5
7	Resultados de la evaluación	7-1
7.1	Evaluación probabilista del riesgo de desastre	7-1
7.1.1	Resultados para sismo.....	7-1
7.1.2	Resultados para viento huracanado.....	7-6
7.1.3	Resultados agrupados.....	7-9
7.1.4	Mapas de riesgo.....	7-10
7.2	Análisis determinista del riesgo volcánico.....	7-13
8	Conclusiones y Recomendaciones	8-1
9	Referencias.....	9-1

Índice de figuras

FIGURA 1-1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE SAN SALVADOR	1-1
FIGURA 3-1 MAPAS DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO [CM/S ²] PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO	3-3
FIGURA 3-2 EVENTOS ESTOCÁSTICOS REPRESENTATIVOS A NIVEL NACIONAL. ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO EN CM/S ²	3-4
FIGURA 3-3 CURVA DE AMENAZA SÍSMICA EN SAN SALVADOR	3-4
FIGURA 4-1 MAPAS DE VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO	4-3
FIGURA 4-2 CURVA DE AMENAZA POR VIENTO HURACANADO PARA SAN SALVADOR	4-3
FIGURA 5-1 VOLCÁN SAN SALVADOR	5-1
FIGURA 5-2 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN SAN SALVADOR. FRECUENCIA DE PASO DEL FLUJO (50000 SIMULACIONES)	5-3
FIGURA 5-3 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN SAN SALVADOR. PRESIÓN DINÁMICA DEL FLUJO [PA]	5-3
FIGURA 5-4 MAPA DE AMENAZA DETERMINISTA POR CAÍDA DE CENIZAS EN EL VOLCÁN SAN SALVADOR. ESPESOR DEPOSITADO DE CENIZA [M]	5-4
FIGURA 6-1 MAPA DE MANZANAS HOMOGÉNEAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR	6-2
FIGURA 6-2 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS Y ÁREA CONSTRUIDA POR SISTEMAS ESTRUCTURALES	6-3
FIGURA 6-3 DISTRIBUCIÓN DE OCUPACIÓN Y ÁREA CONSTRUIDA POR SISTEMAS ESTRUCTURALES	6-4
FIGURA 6-4 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS Y ÁREA CONSTRUIDA POR NÚMERO DE PISOS	6-4
FIGURA 6-5 DISTRIBUCIÓN DE OCUPACIÓN Y ÁREA CONSTRUIDA POR NÚMERO DE PISOS	6-5
FIGURA 6-6 NÚMERO DE EDIFICACIONES SEGÚN DE CURVA DE VULNERABILIDAD PARA SISMO	6-6
FIGURA 6-7 NÚMERO DE EDIFICACIONES SEGÚN DE CURVA DE VULNERABILIDAD PARA VIENTO HURACANADO	6-6
FIGURA 6-8 NÚMERO DE EDIFICACIONES SEGÚN DE CURVA DE VULNERABILIDAD PARA VIENTO HURACANADO	6-7
FIGURA 6-9 CURVAS DE VULNERABILIDAD POR SISMO EMPLEADAS	6-7
FIGURA 6-10 CURVAS DE VULNERABILIDAD POR VIENTO EMPLEADAS	6-8
FIGURA 6-11 CURVAS DE VULNERABILIDAD POR CAÍDA DE CENIZAS EMPLEADAS	6-8
FIGURA 7-1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA SISMO	7-2
FIGURA 7-2 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR SISTEMA ESTRUCTURAL	7-3
FIGURA 7-3 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR NÚMERO DE PISOS	7-4
FIGURA 7-4 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR USO	7-4
FIGURA 7-5 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR CATEGORÍA SOCIOECONÓMICA	7-5
FIGURA 7-6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PARA VIENTO HURACANADO	7-6
FIGURA 7-7 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR SISTEMA ESTRUCTURAL	7-7
FIGURA 7-8 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR NÚMERO DE PISOS	7-8
FIGURA 7-9 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR USO	7-8
FIGURA 7-10 VALOR FÍSICO Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (AL MILLAR DEL VALOR EXPUESTO) POR CATEGORÍA SOCIOECONÓMICA	7-9
FIGURA 7-11 RESULTADOS ANÁLISIS	7-10
FIGURA 7-12 PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR MANZANA PARA SISMO	7-11

FIGURA 7-13 PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR MANZANA PARA VIENTO HURACANADO..... 7-12
FIGURA 7-14 PÉRDIDA ESPERADA (EN VALOR Y COMO PORCENTAJE DEL VALOR EXPUESTO) POR SISTEMA
ESTRUCTURAL..... 7-14
FIGURA 7-15 PÉRDIDA ESPERADA POR MANZANA PARA EL ESCENARIO SELECCIONADO 7-15

Índice de tablas

TABLA 3-1 PRINCIPALES SISMOS QUE HAN AFECTADO EL TERRITORIO DE SAN SALVADOR.....	3-1
TABLA 4-1 PRINCIPALES HURACANES QUE HAN AFECTADO EL TERRITORIO DE EL SALVADOR.....	4-1
TABLA 5-1 PARÁMETROS DEL MODELO DEL VOLCÁN SAN SALVADOR	5-2
TABLA 6-1 INDICADORES GENERALES DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	6-2
TABLA 6-2 VALORES EXPUESTOS Y OCUPACIÓN POR SISTEMAS ESTRUCTURALES	6-3
TABLA 6-3 VALORES EXPUESTOS Y OCUPACIÓN POR NÚMERO DE PISOS	6-4
TABLA 6-4 CURVAS DE VULNERABILIDAD EMPLEADAS	6-5
TABLA 6-5 EXPOSICIÓN POR CURVA DE VULNERABILIDAD.....	6-6
TABLA 7-1 TEMPORALIDADES EMPLEADAS EN EL CÁLCULO	7-1
TABLA 7-2 RESULTADOS GENERALES	7-2
TABLA 7-3 RESULTADOS POR SISTEMA ESTRUCTURAL (VALORES EXPUESTOS Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA)	7-3
TABLA 7-4 RESULTADOS GENERALES	7-6
TABLA 7-5 RESULTADOS POR SISTEMA ESTRUCTURAL (VALORES EXPUESTOS Y PÉRDIDA ANUAL ESPERADA)	7-7
TABLA 7-6 RESULTADOS GENERALES	7-9
TABLA 7-7 VALOR EXPUESTO Y PÉRDIDA ECONÓMICA	7-13
TABLA 7-8 RESULTADOS POR SISTEMA ESTRUCTURAL (VALORES EXPUESTOS Y PÉRDIDA ESPERADA).....	7-13

1 Introducción

San Salvador, capital de El Salvador, es una ciudad con aproximadamente 1,497,422 habitantes (proyección a 2008, aproximadamente el 26 % de la población total del país que es de 5,837,168 millones) y está ubicada en la región central, a 25 kilómetros de la costa pacífica. Su área metropolitana alberga cerca de 460,000 predios, que en su mayoría corresponden a edificaciones de 1 y 2 pisos, construidas principalmente en mampostería estructural.

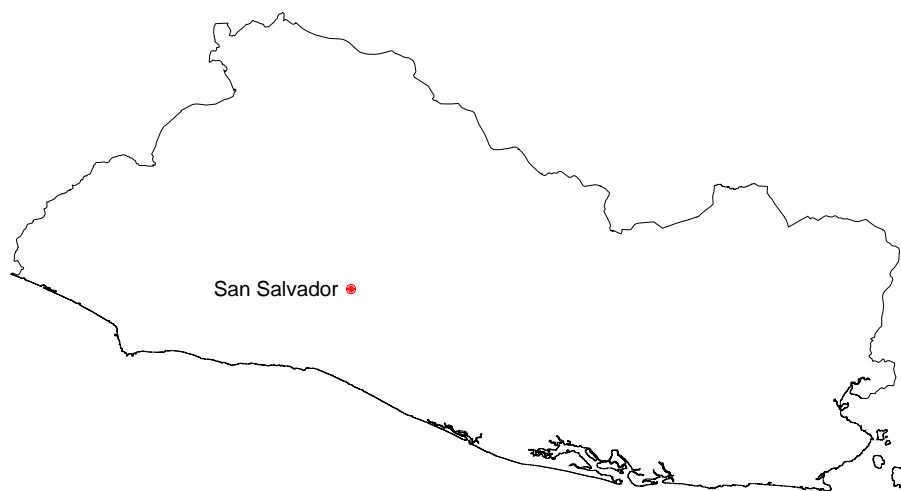


Figura 1-1
Localización geográfica de San Salvador

Las condiciones particulares del territorio salvadoreño, así como su ubicación a nivel global, implican la posibilidad de ocurrencia de una serie de fenómenos peligrosos, relacionados principalmente con procesos climáticos y tectónicos propios de la región centroamericana. Históricamente el país, y particularmente la ciudad de San Salvador, se han visto enfrentados a una serie de desastres naturales, generando grandes pérdidas en términos económicos y de vidas humanas, y acentuando las características de vulnerabilidad física y social existentes en el país.

El 10 de Octubre de 1986, a las 5:50 pm se presentó un terremoto de magnitud 7.5 (MI) con epicentro a 8 Km de la ciudad en la zona de Los Planes de Renderos, y profundidad de 10 Km. El desastre causó la muerte a cerca de 1,500 personas, y dejó un saldo de alrededor de 10,000 heridos, 100 desaparecidos y 15,000 damnificados. Sus efectos más graves se localizaron en los barrios de Santa Anita, San Jacinto, La Vega, San Esteban, El Carmen y La Candelaria. A raíz del sismo se presentaron deslizamientos que sepultaron alrededor de 200 casas, dejando como saldo 100 personas fallecidas en la colonia Santa Marta, al sur de la capital.

Entre el 23 de Octubre y el 3 de Noviembre de 1998 el huracán Mitch transitó por los territorios de Nicaragua, Honduras, El Salvador y Guatemala, causando pérdidas

económicas estimadas en 5,000 millones de dólares (1998 US\$). El paso del huracán de categoría máxima 5 en la escala Saffir-Simpson, generó en El Salvador inundaciones y deslizamientos en todo el país. Los ríos Grande de San Miguel y Lempa se desbordaron. El saldo total estimado fue de cerca de 10,000 viviendas afectadas, dejando 240 personas fallecidas y 59,000 sin hogar.

En el proceso de conocimiento y evaluación del riesgo que se deriva de la ocurrencia de eventos extremos, se deben identificar condiciones de la ciudad relativas a la exposición del capital físico y humano y su distribución geográfica, la vulnerabilidad física y de la población y del potencial de daños y pérdidas que podrían presentarse. A través de un procedimiento de este tipo es posible contar con información útil para la toma de decisiones por parte de los funcionarios encargados de la planeación y desarrollo al poderse estimar la magnitud del impacto económico y social para la ciudad y el país. Así mismo, se pueden establecer parámetros para la formulación de planes dentro de la gestión ex ante y ex post del riesgo de desastres.

El objetivo de la simulación que se presenta más adelante consiste en evaluar el riesgo potencial de la ciudad de San Salvador ante eventos sísmicos, paso de huracanes y erupciones volcánicas, y expresar el riesgo en términos de pérdidas económicas anuales esperadas (PAE), pérdidas máximas probables (PML) y afectación directa sobre la población. El análisis se realiza en términos probabilistas para las amenazas de sismo y huracán, y en términos deterministas para una erupción volcánica, correspondiente a un escenario histórico.

Los resultados de la simulación se presentan de manera que puedan ser usados para análisis detallados posteriores y como insumos para la preparación del plan de contingencia o de atención de emergencias, la formulación de planes de reducción de la vulnerabilidad física, y para plantear posibles estrategias de protección financiera.

2 Metodología de evaluación del riesgo

Para la evaluación del riesgo por sismo, huracán y volcán de San Salvador se siguió la metodología propuesta en el marco de la iniciativa CAPRA, la cual se describe en detalle en el informe ERN-CAPRA-T3.2 (Metodología de Análisis Probabilista de Riesgos, ERN 2010), y en el sitio web www.ecapra.org.

La metodología para la evaluación del riesgo ante amenaza sísmica, por huracán y volcánica incluyó los siguientes aspectos:

- (a) Evaluación de la amenaza sísmica: ésta se evalúa mediante un análisis probabilista (PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Analysis) el cual permite obtener resultados relacionados con pérdidas anuales esperadas para cada uno de los bienes y para el portafolio en general.
- (b) Evaluación de la amenaza por viento huracanado: ésta se evalúa mediante un análisis probabilista el cual permite obtener resultados relacionados con pérdidas anuales esperadas para cada uno de los bienes y para el portafolio en general.
- (c) Evaluación de la amenaza volcánica: corresponde a una erupción determinista en el volcán San Salvador. El evento se selecciona como el peor posible, con base en la historia eruptiva del volcán. En este caso se considera únicamente el efecto de la caída de cenizas volcánicas en el análisis de riesgo.
- (d) Inventario de bienes expuestos: se cuenta con información catastral por manzanas en la ciudad. Dicha información fue verificada y complementada mediante un levantamiento basado en observación de imágenes aéreas y satelitales de la ciudad. Información oficial e índices publicados permitieron establecer los valores de reposición aproximados y los índices de ocupación.
- (e) Funciones de vulnerabilidad: los diferentes tipos constructivos identificados en la zona se caracterizan mediante una función de vulnerabilidad que da cuenta de la capacidad de la edificación para resistir la acción de los diferentes eventos considerados. Estas funciones de vulnerabilidad representan el comportamiento esperado (probable) de las edificaciones de cada tipo estructural particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos. El análisis utiliza las funciones de vulnerabilidad determinadas siguiendo las metodologías y herramientas propuestas en el sistema ERN-Vulnerabilidad (ERN, 2010).
- (f) Evaluación del riesgo: la evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante el asocio de las amenazas consideradas sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad relacionadas. Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS (ERN 2010). Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones expuestas para cada uno de los

escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo se presenta en términos de estimaciones de:

- Porcentaje de afectación física de las construcciones.
- Pérdidas económicas directas aproximadas por predio.
- Pérdidas económicas máximas probables.
- Pérdidas anuales esperadas.

3 Amenaza sísmica

La modelación de la amenaza se presenta en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN 2010). Las bases teóricas del modelo de amenaza se presentan en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas, ERN2010). Toda la información anterior se encuentra también descrita en detalle en el sitio web www.ecapra.org.

El territorio salvadoreño se encuentra ubicado en su totalidad sobre la placa Caribe, la cual presenta un movimiento relativo convergente con relación a la placa Cocos, que la subduce. La interacción dinámica de estas placas constituye el principal rasgo tectónico de la región centroamericana (zona de subducción o Fosa Mesoamericana), y es la principal fuente de las deformaciones asociadas a la orogénesis, vulcanismo y actividad sísmica en El Salvador. La zona de subducción del Pacífico es capaz de generar eventos sísmicos de magnitud importante (8+), a profundidades que son variables a medida que se adentra en el continente, siendo más probable la generación de un sismo relativamente superficial en cercanías a la costa Pacífica. Así mismo la actividad tectónica ha generado una serie de sistemas de falla, principalmente orientados en sentido NW-SE, que delimitan el graben o depresión centroamericana, en donde se desarrollan los procesos vulcanológicos de El Salvador, y donde se han detonado varios de los sismos más destructivos ocurridos en el país.

3.1 Eventos históricos

En 1986 se presentó un terremoto de magnitud 7.5, que dejó 1,500 personas fallecidas y más de 200,000 damnificadas. La mayoría de las construcciones colapsadas habían sido afectadas previamente en el terremoto ocurrido en 1965, y se encontraban sin ningún tipo de reparación. En enero y febrero de 2001 dos sismos afectaron el territorio salvadoreño, generando en conjunto alrededor de 1,259 víctimas y más de 1,600 millones de dólares en pérdidas. En la Tabla 3-1 se presentan los principales terremotos que han afectado el territorio de San Salvador.

Tabla 3-1
Principales sismos que han afectado el territorio de San Salvador
(Fuente: SNET-<http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas/>)

Fecha	Magnitud	Prof (km)	Intensidad Máxima (MM)	Epicentro	Comentarios
23/05/1576	---	---	---	San Salvador	Total destrucción de San Salvador
1593	---	---	---	San Salvador	Terremoto daña severamente San Salvador
1625	---	---	---	San Salvador	Violento terremoto causa graves daños en San Salvador
1650					
30/09/1659	---	---	---	---	Gran erupción del volcán Boqueron.

Fecha	Magnitud	Prof (km)	Intensidad Máxima	Epicentro	Comentarios
					Completa destrucción de San Salvador
1707	---	---	---	San Salvador	Ruina completa en San Salvador
29/07/1773	7.5	---	---	El Salvador	Violento terremoto ocasiona serios daños en San Salvador
07/02/1831	7.1	---	---	El Salvador	Gran terremoto causa estragos en San Salvador y daños en poblaciones del Sur
16/04/1854	6.5	---	---	San Jacinto, San Salvador	Ruina en San Salvador, la capital se trasladó a Santa Tecla.
8/12/1859	7.3	---	---	San Salvador	Fuerte temblor de produce daño en San Salvador, se generó un Tsunami que afectó el puerto de Acajutla
30/06/1867	7.1	---	---	El Salvador	Violento temblor dañó San Salvador, La Libertad, San Vicente, Suchitoto, Santa Tecla
19/03/1873	7.1	---	---	San Salvador	Violento temblor se produjo en San Salvador
18/04/1902	Ms=7.9 (Alfaro et al, 1990)	25	---	---	Maremoto en Ahuachapán destruyendo Barra de Santiago, Cara Sucia y Garita Palmera. Daños en el occidente del país y en San Salvador.
08/06/1917	Ms=6.5 (White y Harlow, 1993) (USGS)	---	---	---	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.
03/05/1965	Ms=6.0 (White)	15	VII en San Salvador	San Salvador	125 muertos, 400 heridos y 4000 casas destruidas
19/06/1982	7.0 PAS 6.0 ISC (USGS)	82	VII en San Salvador	Océano Pacífico	Según informe de Cruz Roja Salvadoreña, 8 personas murieron y 96 resultaron heridas. Hubo un promedio de 5000 personas damnificadas
10/10/1986	MI=7.5	10	VIII-IX en San Salvador	San Salvador	1,500 muertos, 10,000 heridos, unas 60,000 viviendas destruidas o seriamente dañadas.
13/01/2001	Mw=7.6	39	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 (Fuente: COEN)
13/02/ 2001	Mw=6.6	13	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 (Fuente: COEN)

3.2 Evaluación de la amenaza

La amenaza sísmica para El Salvador se calculó empleando los avances presentados en el proyecto regional RESIS II (NORSAR et. al. 2008), el cual constituye el estudio más avanzado a la fecha con relación a evaluación de amenaza sísmica en América Central. A partir de la sismotectónica de la región, y la sismicidad registrada e histórica, se definieron una serie de fuentes sismogénicas, las cuales cubren la totalidad del territorio centroamericano, y conservan las condiciones de sismicidad generales y su variación regional.

Con base en dicha información y empleando la metodología que se explica en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN2010)

y en el sitio web www.ecapra.org, se construyó un catálogo de eventos estocásticos que representan en conjunto la amenaza sísmica de la región.

Se determinaron en total 14,796 escenarios, según la metodología presentada en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas, ERN 2010), cada uno de ellos asociado a una frecuencia de ocurrencia determinada, y con magnitud correspondiente a las características de las fuentes sismogénicas. La Figura 3-1 presenta los mapas de amenaza sísmica, en términos de la aceleración máxima del terreno, para diferentes períodos de retorno.

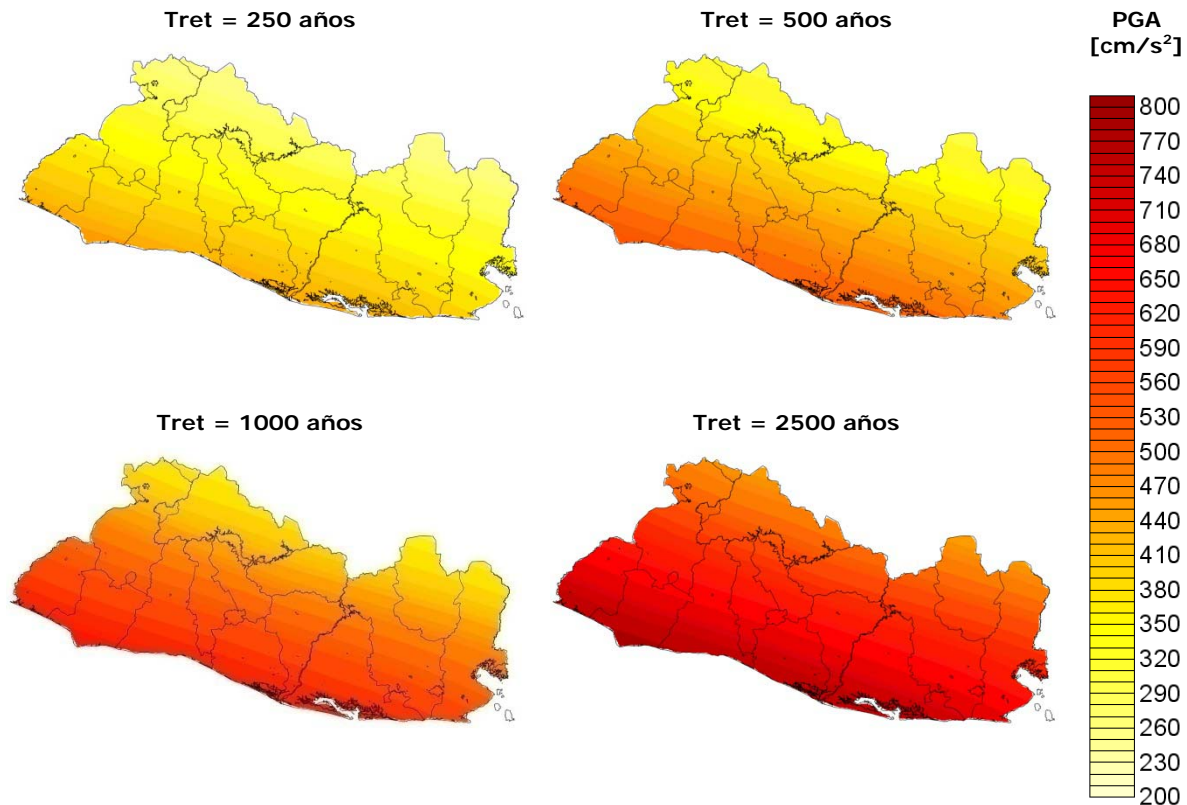


Figura 3-1

Mapas de aceleración máxima del terreno [cm/s²] para diferentes periodos de retorno

La Figura 3-2 presenta dos eventos estocásticos pertenecientes al catálogo de eventos simulados calculado para El Salvador. El primero (izquierda) corresponde a un evento detonado por el movimiento de fuentes intraplaca en el país. El segundo (derecha) corresponde a un terremoto generado en la zona de subducción del pacífico salvadoreño.

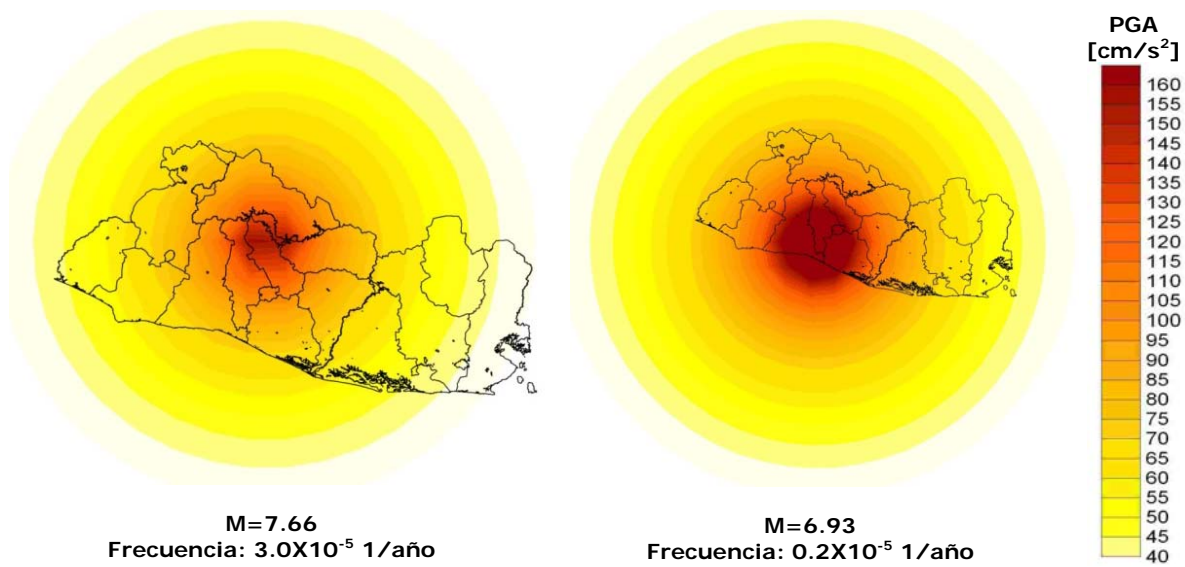


Figura 3-2

Eventos estocásticos representativos a nivel nacional. Aceleración máxima del terreno en cm/s²

Por otro lado la Figura 3-3 presenta la curva de amenaza para un punto representativo de la ciudad.

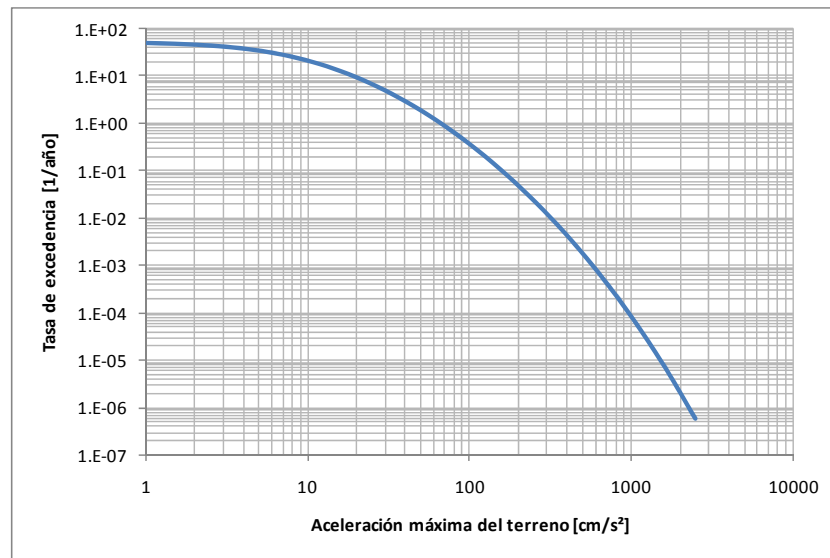


Figura 3-3

Curva de amenaza sísmica en San Salvador

4 Amenaza por huracán

La modelación de la amenaza por huracán se presenta en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN 2010). Las bases teóricas del modelo de amenaza se presentan en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas, ERN2010). Toda la información anterior se encuentra también descrita en detalle en el sitio www.ecapra.org.

4.1 Eventos Históricos

La Tabla 4-1, presenta un resumen de los huracanes que han afectado con mayor fuerza el territorio de El Salvador. Dicha información se presenta con mayor detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.1B (Revisión de Eventos Históricos, ERN2010).

Tabla 4-1
Principales huracanes que han afectado el territorio de El Salvador
(Fuente: <http://www.conacyt.gob.sv/revista-6-7-7-01.htm>)

Nombre	Fecha	Vientos (knots)	Presión (mb)	Categoría	Descripción y Efectos
FIFI	14/09/1974	95	971	2	Cruzó el Atlántico siendo el huracán Fifi y llegó al océano Pacífico siendo bautizado el huracán Orlene. En El Salvador se generaron grandes inundaciones en la cuenca baja de los ríos medianos y grandes: Río Lempa, Río Paz y Río Jiboa. El huracán Fifi causó daños en Centroamérica de 900 millones de dólares de la época, es decir 4,000 millones de dólares en valor presente. El evento de amenaza fue catalogado como el cuarto huracán que más vidas ha cobrado en la historia, con 8,000 – 10,000 fatalidades.
MITCH	22/10/1998	155	905	5	La Agencia Interamericana para el Desarrollo informó de 239 muertos en El Salvador, también sufrió avenidas repentinas que destruyeron miles de casas y causaron extensivos daños a puentes y carreteras.
STAN	01/10/2005	70	977	1	En El Salvador se vieron afectadas 300 comunidades, con más de 54,000 personas desplazadas. Se presentaron numerosos derrumbes e inundaciones en gran parte del país. Además se registró daño a la infraestructura del país. Las lluvias dejaron un saldo de 355.7 millones de dólares en pérdidas por daños materiales.

4.2 Evaluación de la amenaza

Para el presente caso la amenaza por huracán se evalúa exclusivamente en términos de velocidad del viento huracanado. El análisis se realiza con base en las trayectorias y características de los registros históricos disponibles. Los eventos estocásticos se generan mediante simulación utilizando una técnica “*random-walk*” que involucra un muestreo de las distribuciones históricas en la localización de generación de la tormenta, para calcular una velocidad de avance que permita ir moviendo la tormenta hacia adelante, y haciendo muestreo en la distribución en la nueva ubicación para el siguiente intervalo de tiempo y así sucesivamente. Cada trayectoria simulada es diferente de cada otra trayectoria simulada o histórica pero el conjunto de eventos simulado mantiene las mismas propiedades estadísticas del conjunto de eventos históricos. Esta metodología se explica en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN2010) y sitio web www.ecapra.org.

Para la modelación de la amenaza, se empleó información topográfica con resolución de 30 m, obtenida del STRM de la NASA. Empleando la metodología que se explica en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN2010) y en el sitio web www.ecapra.org, se construyó un catálogo huracanes estocásticos e históricos, que representan de manera integral la amenaza del país.

Para el análisis probabilista se calcularon un total de 6 escenarios de viento huracanado, según la metodología presentada expuesta en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN2010), cada uno de ellos asociado a una frecuencia de ocurrencia determinada, y que corresponden a simulaciones a partir de eventos históricos. La Figura 4-1 presenta los mapas de amenaza por huracán, en términos de velocidad máxima de vientos huracanados, para diferentes períodos de retorno.

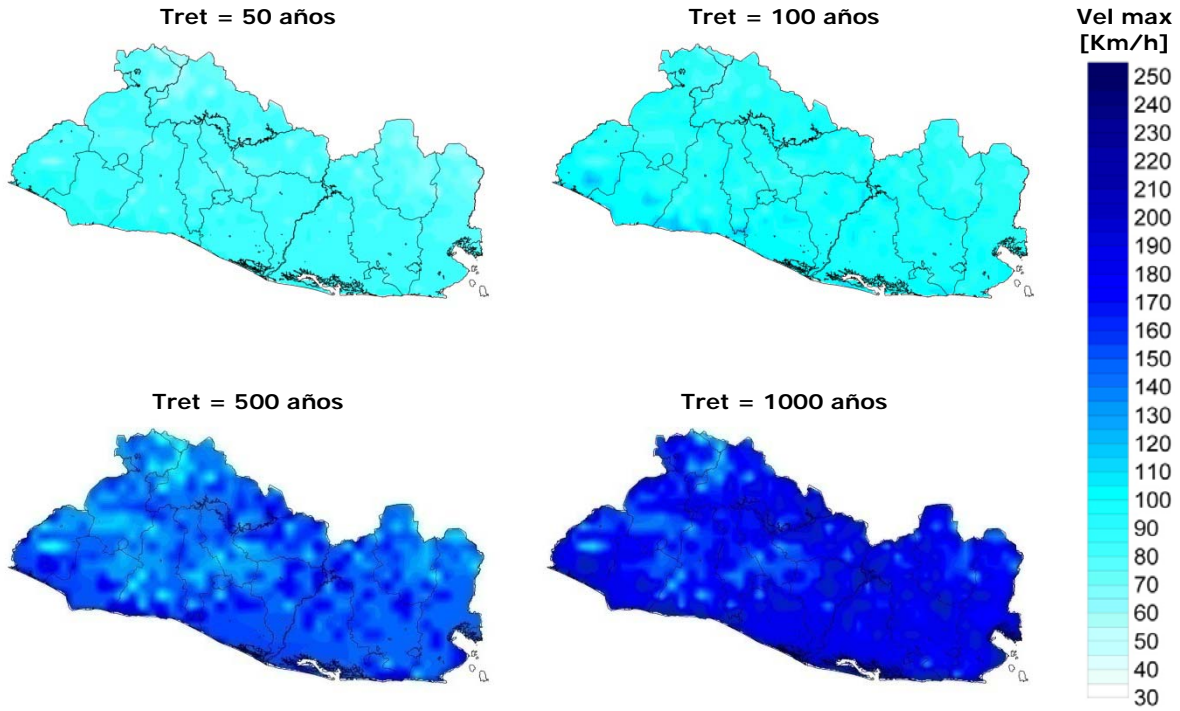


Figura 4-1
Mapas de velocidad máxima del viento [km/h] para diferentes periodos de retorno

Por otro lado la Figura 4-2 presenta la curva de amenaza para un punto representativo de la ciudad.

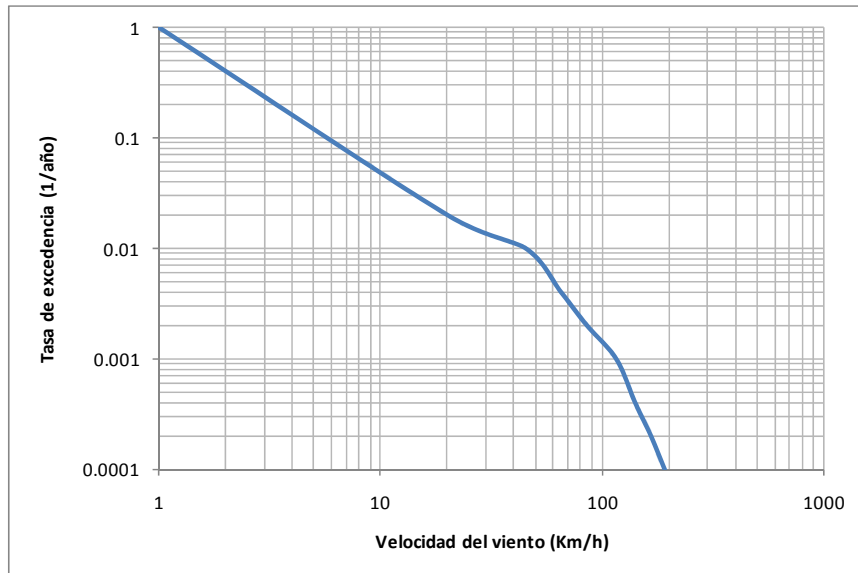
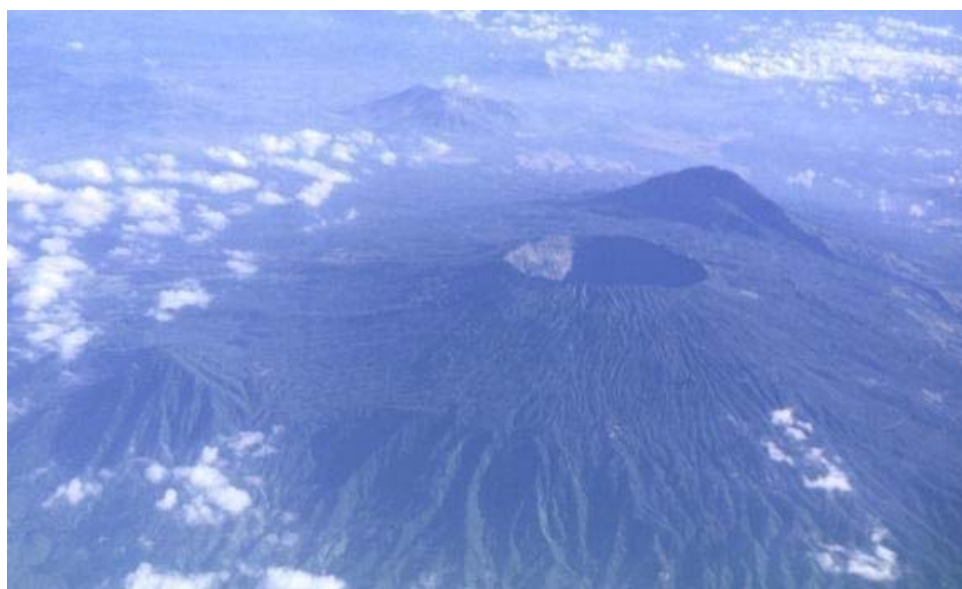


Figura 4-2
Curva de amenaza por viento huracanado para San Salvador

5 Amenaza volcánica

La amenaza volcánica para la ciudad de San Salvador se determina por efecto del volcán San Salvador, localizado a 5 Km al Noroeste de la ciudad. El modelo de amenaza del volcán San Salvador se presenta en detalle en el informe ERN-CAPRA-T1.3 (Modelación Probabilista de Amenazas Naturales, ERN 2010). Las bases teóricas del modelo de amenaza se presentan en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN2010). Toda la información anterior se encuentra también descrita en detalle en el sitio www.ecapra.org.

El volcán San Salvador es en realidad un complejo volcánico que domina el paisaje al oeste de la capital del país. Está conformado por el estratovolcán Boquerón, el cual ha crecido dentro de una caldera de 6 km. y por los picos Picacho y Jabalí, los cuales se formaron por colapso del antiguo Volcán San Salvador hace aproximadamente 40,000 años. La cumbre del Boquerón es truncada por la empinada pared del cráter, de 1.5 km. de ancho y cerca de 500 m. de profundidad, la cual se formó durante una gran erupción hace 800 años.



*Figura 5-1
Volcán San Salvador*

Los flujos de lava recientes del volcán indican una composición predominantemente basáltica que contrasta con los remanentes del edificio antiguo los cuales son de mayor afinidad dacítica.

El edificio del San Salvador se formó hace más de 70,000 años, su base alcanza 14 Km de diámetro y se eleva hasta 1960 msnm (Cerro Picacho). Un gran evento eruptivo que ha sido llamado “G-1” hace aproximadamente 40.000 años formó un cráter de 4.5 Km x 6 Km de ancho, dicho evento expulsó pómez dacítica en una erupción tipo Pliniana.

5.1 Estimación determinista de la amenaza

La amenaza volcánica se evaluó para un evento determinista considerado como de características catastróficas, correspondiente a una erupción con índice de explosividad (VEI) de 4. Se considera que este evento generaría un escenario representativo de la peor situación que podría presentarse en la ciudad, por lo cual se considera que es adecuado como insumo para el desarrollo de un plan de contingencia, para formular procedimientos de emergencia por entidades y con fines de proponer programas de mitigación y reducción de la vulnerabilidad.

La modelación de la amenaza se llevó a cabo empleando el programa ERN-Volcán (ERN, 2009). Los valores de las diferentes variables involucradas en la modelación de la amenaza del volcán San Salvador se presentan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1
Parámetros del modelo del Volcán San Salvador

Modelo de ERN-Volcán				
<i>Tipo de análisis:</i>	Determinista			
<i>Definición de ventosas:</i>	Única Ventosa	<i>Coordenadas:</i>	Este	-89.28°
			Norte	13.73°
Flujos de lava				
<i>Distancia máxima:</i>	12000 m	<i>Espesor:</i>	2 m	
Flujos piroclásticos				
<i>Altura columna eruptiva:</i>	20 Km	<i>Ángulo cono:</i>	75°	
Caída de cenizas				
<i>Altura columna eruptiva:</i>	20 Km	<i>Campo de viento</i>		
<i>Volumen expulsado:</i>	2.0E+08 m ³	<i>Altura (Km)</i>	<i>Vel (m/s)</i>	<i>Dir (°)</i>
<i>Factor de forma:</i>	0.2	0	3	15
<i>N° divisiones altura:</i>	35	5	3	15
<i>μ Tamaño partículas:</i>	-1.5	10	3	15
<i>σ Tamaño partículas:</i>	3	15	3	15
<i>Paso discretización X:</i>	10	20	3	15
<i>Paso discretización Y:</i>	10			
<i>Coeficiente difusividad:</i>	750 m ² /s			

A continuación se presentan los mapas de amenaza para los diferentes tipos de productos volcánicos considerados.

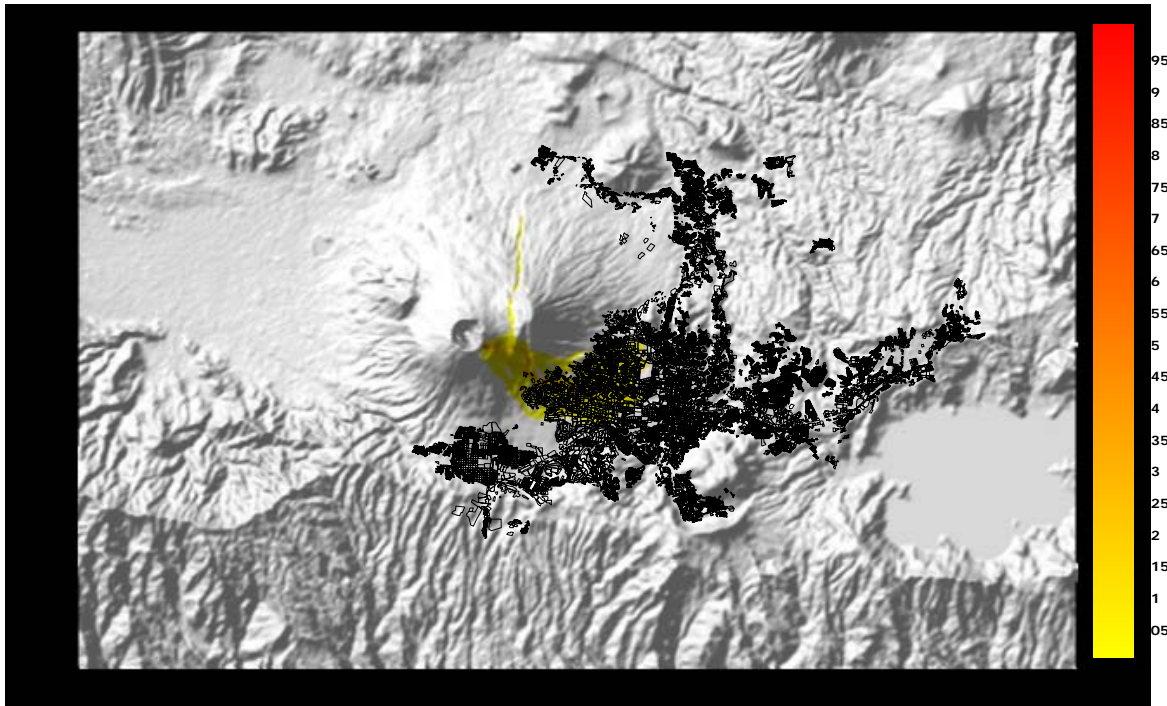


Figura 5-2

Mapa de amenaza determinista por flujos de lava en el volcán San Salvador. Frecuencia de paso del flujo (50000 simulaciones)

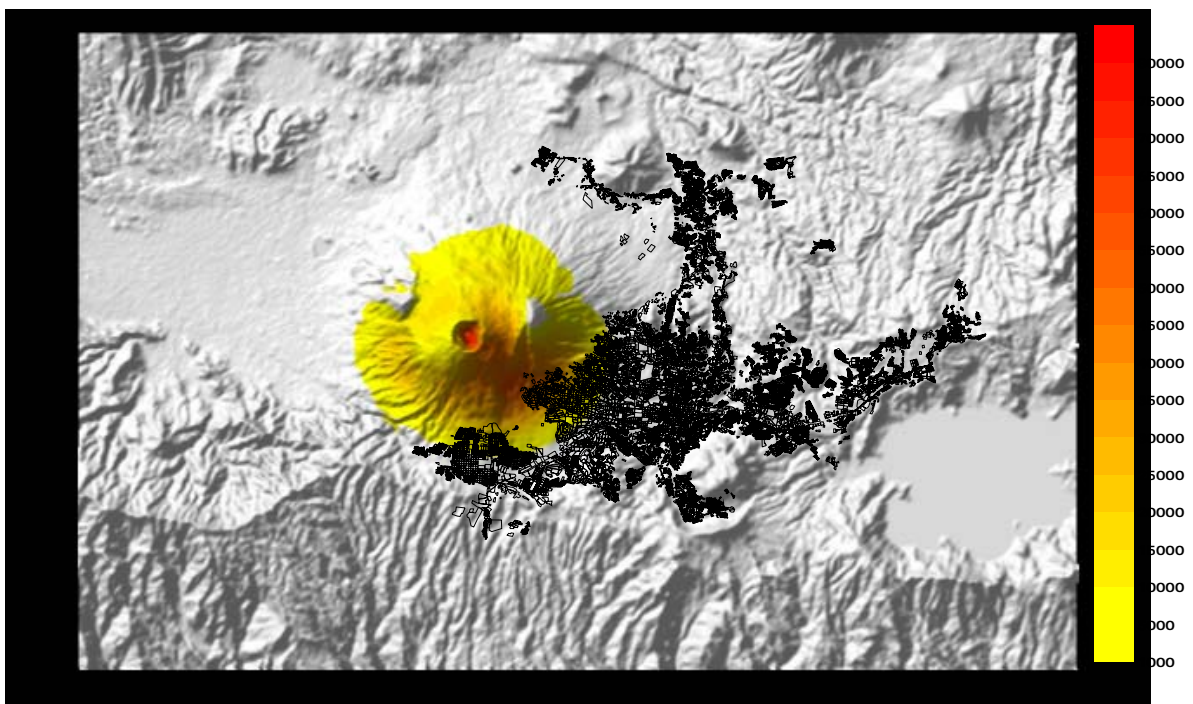


Figura 5-3

Mapa de amenaza determinista por flujos piroclásticos en el volcán San Salvador. Presión dinámica del flujo [Pa]

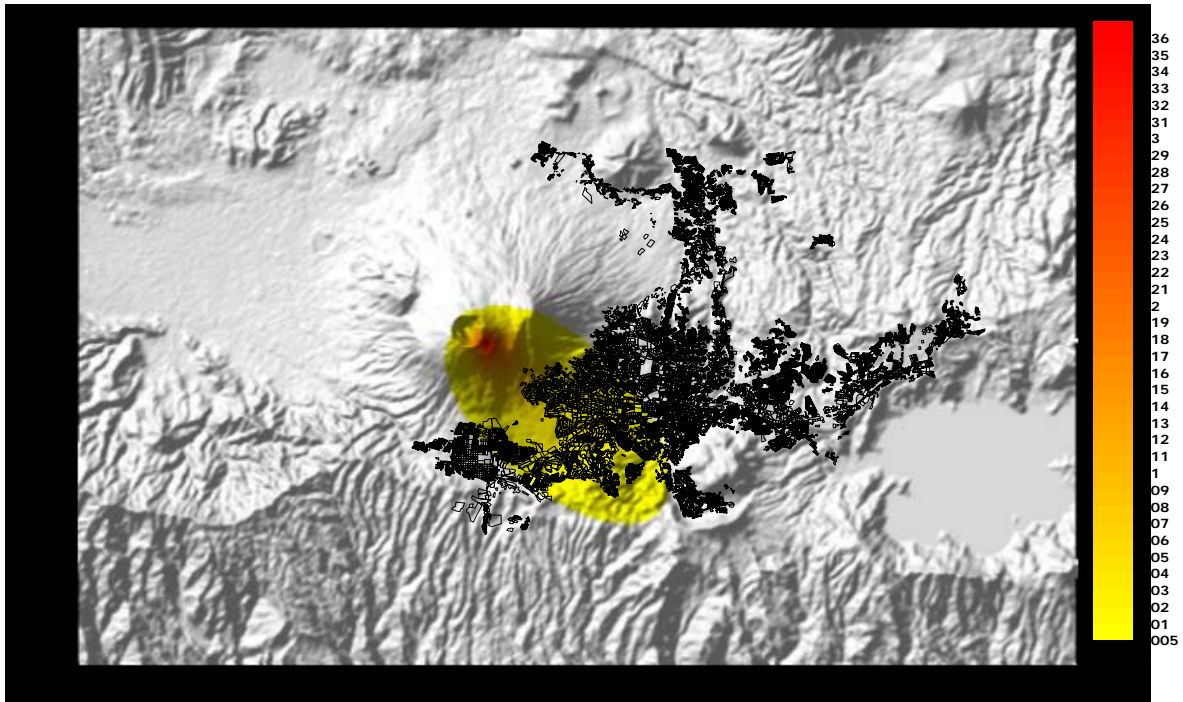


Figura 5-4
Mapa de amenaza determinista por caída de cenizas en el volcán San Salvador. Espesor depositado de ceniza [m]

6 Inventario de elementos expuestos

6.1 Levantamiento de la información básica

Para el Área Metropolitana de San Salvador se cuenta con un censo poblacional que relacione el número actual de personas pero no su distribución o actividad económica. Tampoco se cuenta con una base de datos catastral, ni de información relacionada con sistemas constructivos, áreas de construcción, valores expuestos, fecha de construcción y otros datos que resultan de utilidad en la determinación de la exposición económica, humana y de la vulnerabilidad.

Se pudo contar con una base de datos que, para cada manzana, conteniente su geometría, número de predios, y distribución de materiales de techo, paredes y piso (Fuente: VI Censo de población y V de vivienda 2007, El Salvador). Con esta información como base, se procedió a conformar la base de datos de exposición de edificaciones, utilizando un levantamiento digital a partir de imágenes de satélite, complementado con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales. Esta información, al igual que cualquier otro modelo de información aproximada, es susceptible de ser mejorada, actualizada y depurada mediante trabajo intenso de campo o mediante la disponibilidad de la información catastral detallada. La calidad y resolución de la información de exposición levantada define la confiabilidad y resolución de los resultados del análisis de riesgo.

La Figura 6-1 presenta una imagen de las manzanas del área metropolitana, digitalizadas utilizando la herramienta web de zonificación urbana, por manzanas homogéneas, de CAPRA (disponible en www.ecapra.org/zonhu.php para San Salvador). Dicha herramienta permite identificar, sobre imágenes satelitales de Google Maps, manzanas de exposición homogénea, es decir, manzanas en donde pueden identificarse condiciones de uso, niveles de ocupación, costo y densidades de construcción similares. Cada manzana es luego calificada en términos de porcentajes identificados de tipos constructivos, con relación a lo observado durante el levantamiento.

Estas manzanas homogéneas fueron luego discretizadas, para simular los predios del área metropolitana. El proceso de discretización consiste en ubicar aleatoriamente puntos dentro de cada manzana homogénea, asignando a cada punto un costo y ocupación consistente con los valores identificados en la manzana, y un tipo constructivo en función de los porcentajes previamente definidos. El número total de predios ubicados por manzana es consistente con la densidad de construcciones identificada en el levantamiento.

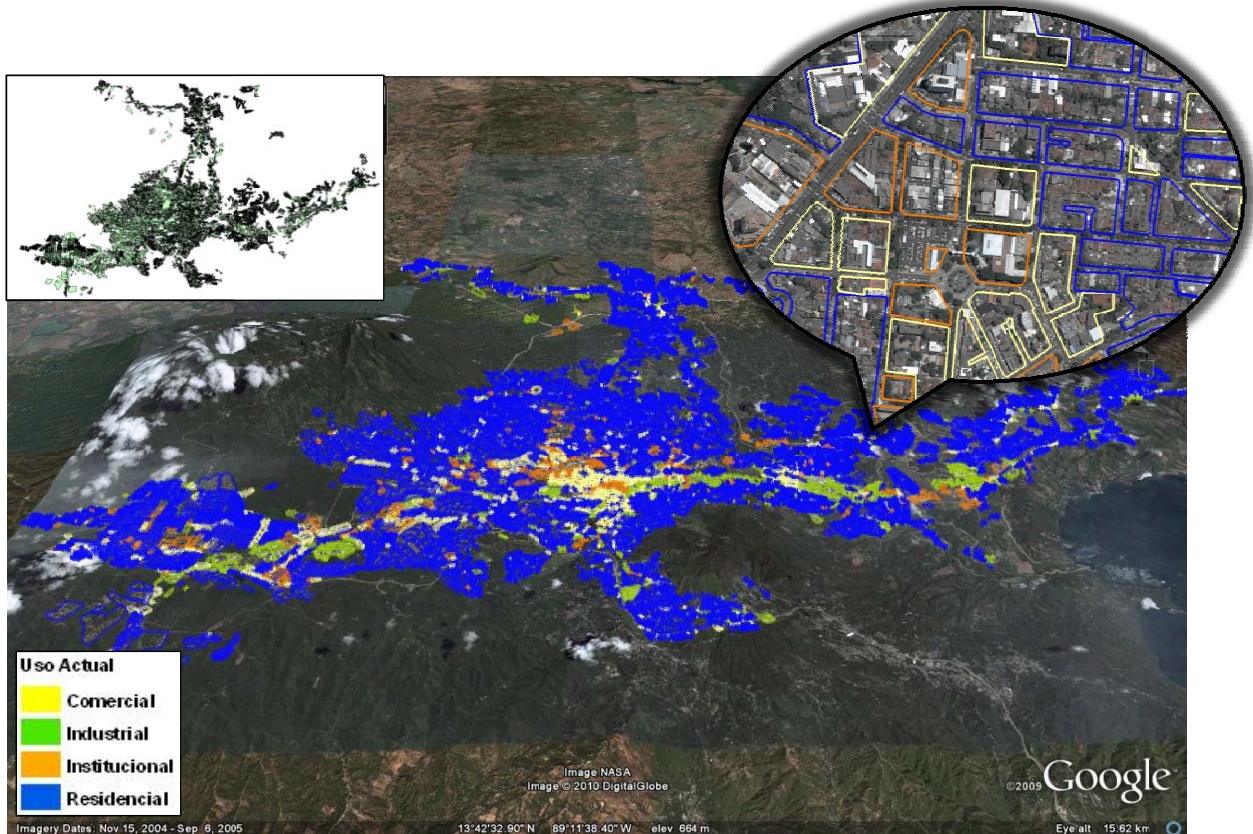


Figura 6-1

*Mapa de manzanas homogéneas del Área Metropolitana de San Salvador
(Imagen generada con Google Earth. Recuadro: proyección plana)*

6.2 Información de exposición de predios

Las condiciones de exposición del Área Metropolitana de San Salvador, medidas en términos de valor de reposición y número de ocupantes de las edificaciones, se asignan mediante los métodos aproximados mencionados.

La Tabla 6-1 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

*Tabla 6-1
Indicadores generales de exposición de edificaciones*

Indicador	Unidad	Valor
Población total estimada	Hab	1,497,420
Área total de terreno urbano	km ²	137
Densidad de población	Hab/km ²	10,930
Área de construcción	m ²	69,130 x10 ³
Densidad construcción urbana	m ² /m ² terreno urbano	0.50
Valoración total de construcciones	US\$ millones	34,830
Valor promedio/m ² construido	US\$/m ²	500

A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 6-2 y la Figura 6-2 y Figura 6-3 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales y su distribución en la ciudad se encuentra en el informe ERN-CAPRA-T2.2 (Propuesta de Funciones e Indicadores de Vulnerabilidad, ERN 2010).

Tabla 6-2
Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales

Sistema	Código Sistema	Área construida [m ²]	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Adobe	A-SPSB-1	889,926	517.05	15,481
Bahareque	B-SLFB-1	725,591	357.10	14,662
Madera	W-SLFB-1	2,878,300	1,402.38	64,408
Mampostería simple	MS-SLSB-1	6,012,250	2,911.15	146,994
Mampostería confinada	MC-SLSB-1	23,259,947	10,577.98	580,791
Mampostería reforzada	MR-SLSB-1	23,881,840	12,515.03	480,232
Pórticos en concreto	PCR-SLSB-1	6,685,261	3,283.26	130,669
Pórticos en concreto para bodegas	PCR-SLSB-B	3,521,090	2,396.50	46,655
Pórticos en acero para bodegas	PAA-SLSB-B	1,279,877	873.19	17,530
Total		69,134,082	34,833.65	1,497,422

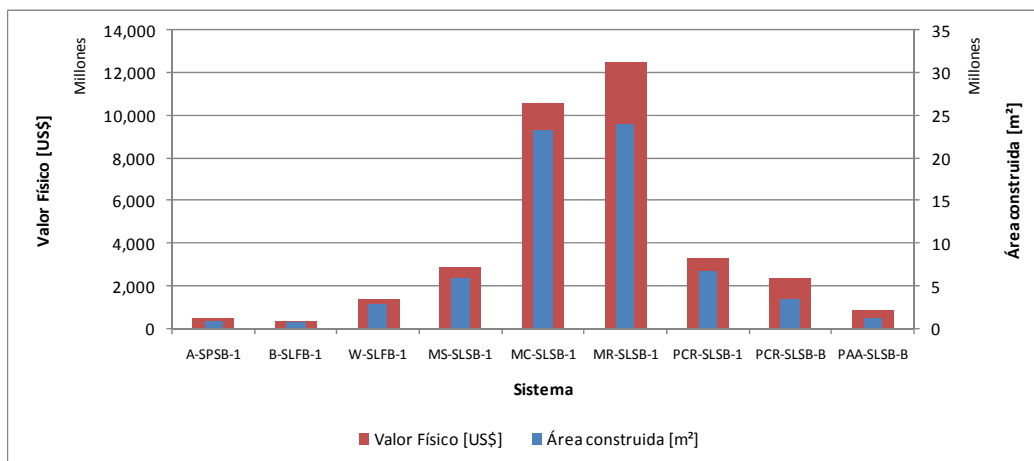


Figura 6-2
Distribución de valores expuestos y área construida por sistemas estructurales

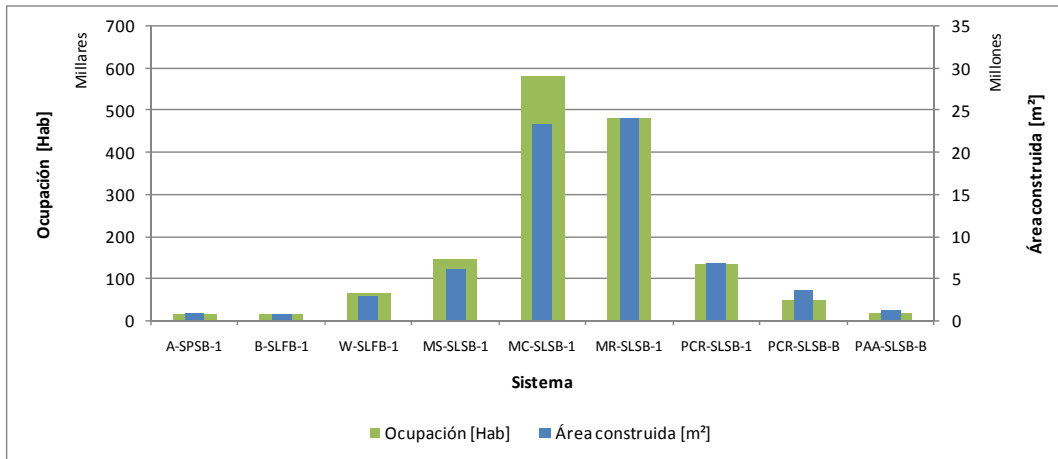


Figura 6-3

Distribución de ocupación y área construida por sistemas estructurales

Por otra parte, la Tabla 6-3 y la Figura 6-4 y Figura 6-5 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

Tabla 6-3

Valores expuestos y ocupación por número de pisos

No Pisos	Área construida [m ²]	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	34,565,414	17,121.80	802,386
2	27,797,035	14,190.65	580,319
3	4,011,200	2,147.21	63,710
4	1,075,645	515.49	21,899
5	938,605	471.20	17,107
6	520,677	269.67	8,416
8	225,506	117.63	3,585
Total	69,134,082	34,833.65	1,497,422

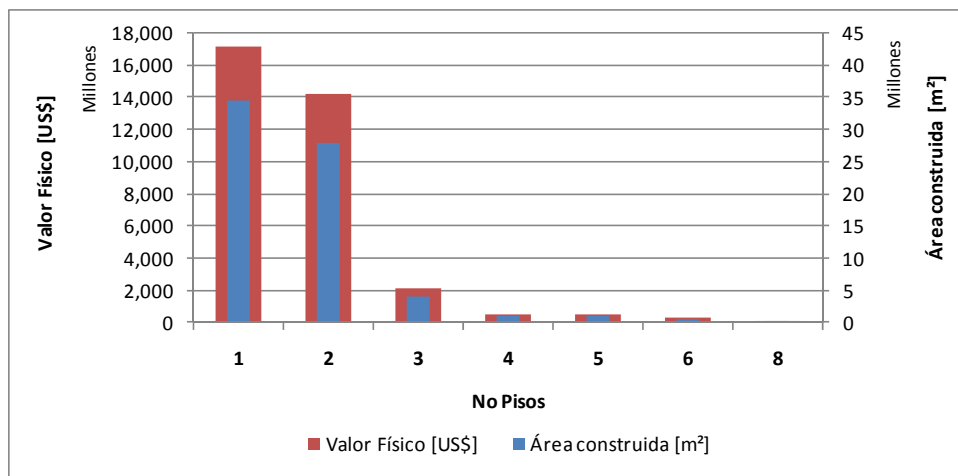


Figura 6-4

Distribución de valores expuestos y área construida por número de pisos

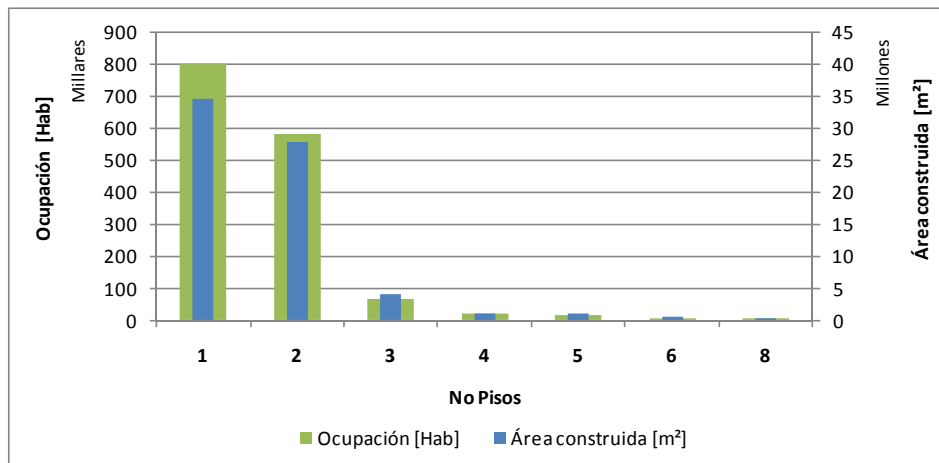


Figura 6-5

Distribución de ocupación y área construida por número de pisos

6.3 Información de vulnerabilidad

Los tipos estructurales contenidos en la base de datos corresponden a los presentados en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4
Curvas de vulnerabilidad empleadas

Material	Curva sismo	Curva viento	Curva Ceniza	No Registros	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Bahareque						
B-SLFB-1	S_B-SLFB-1	V_LF1	L_50	1,338	357.10	14,662
Adobe						
A-SPSB-1	S_A-SPSB-1	V_PS1	L_180	811	517.05	15,481
Madera						
W-SLFB-1	S_W-SLFB-1	V_LF1	L_50	9,971	1,402.38	64,408
Mampostería simple						
MS-SLSB-1	S_MS-SLSB-1	V_LS1	L_180	4,112	2,911.15	146,994
Mampostería confinada						
MC-SLSB-1	S_MC-SLSB-1	V_LS1	L_180	12,830	10,577.98	580,791
Mampostería reforzada						
MR-SLSB-1	S_MR-SLSB-1	V_LS1	L_180	13,585	12,515.03	480,232
Pórticos en concreto						
PCR-SLSB-1	S_PCR-SLSB-1	V_LS1	L_180	1,575	3,283.26	130,669
PCR-SLSB-B	S_PCR-SLSB-B	V_LS1	L_180	472	2,396.50	46,655
Pórticos en acero						
PAA-SLSB-B	S_PAA-SLSB-B	V_LS1	L_180	155	873.19	17,530
Total				44,849	34,833.65	1,497,422

La Tabla 6-5, la Figura 6-6 a Figura 6-9 muestran el número de registros que representan la distribución de los tipos estructurales empleados y las respectivas curvas de vulnerabilidad asociadas.

Tabla 6-5
Exposición por curva de vulnerabilidad

Sistema	Valor Físico [US\$ millones]	Número de registros
A-SPSB-1	517.05	811
B-SLFB-1	357.1	1,338
W-SLFB-1	1,402.38	9,971
MS-SLSB-1	2,911.15	4,112
MC-SLSB-1	10,577.98	12,830
MR-SLSB-1	12,515.03	13,585
PCR-SLSB-1	3,283.26	1,575
PCR-SLSB-B	2,396.50	472
PAA-SLSB-B	873.19	155
Total	34,833.65	44,849

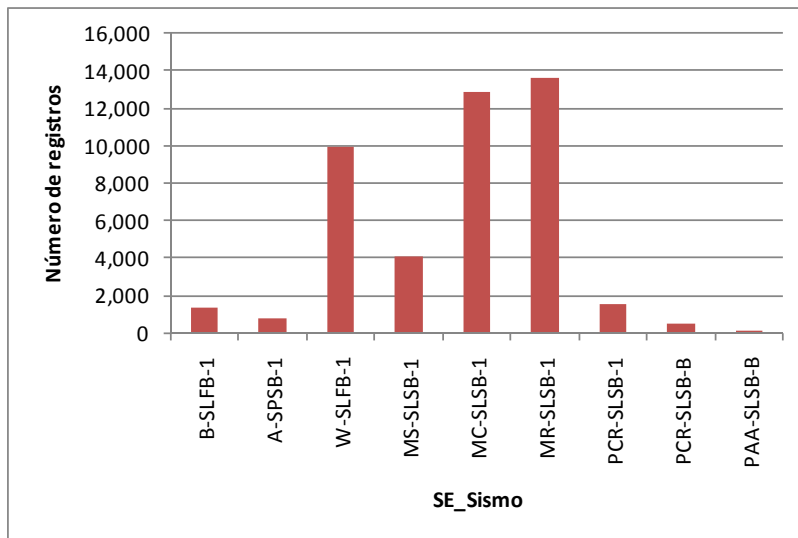


Figura 6-6
Número de edificaciones según de curva de vulnerabilidad para sismo

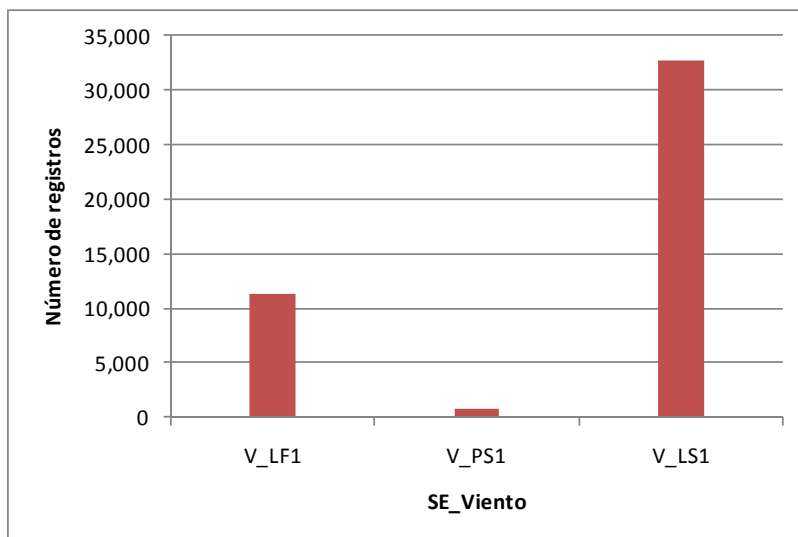


Figura 6-7
Número de edificaciones según de curva de vulnerabilidad para viento huracanado

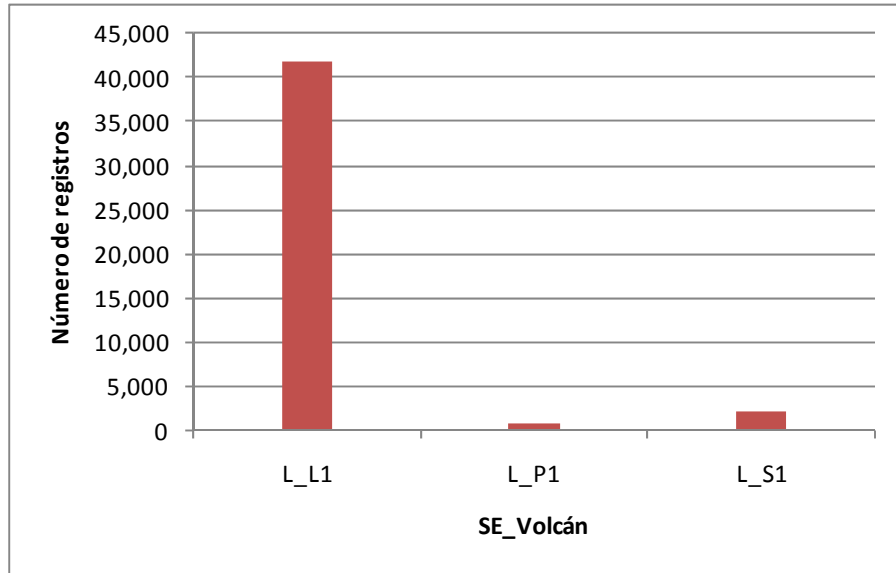


Figura 6-8

Número de edificaciones según de curva de vulnerabilidad para viento huracanado

Estos tipos estructurales se caracterizaron mediante las funciones de vulnerabilidad de pérdida física presentadas en la Figura 6-9 a Figura 6-11.

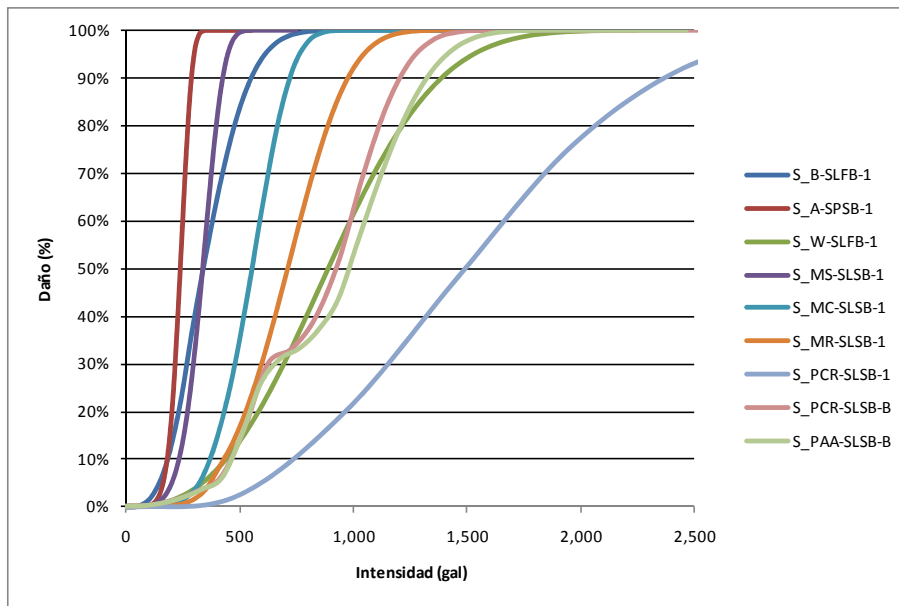


Figura 6-9

Curvas de vulnerabilidad por sismo empleadas

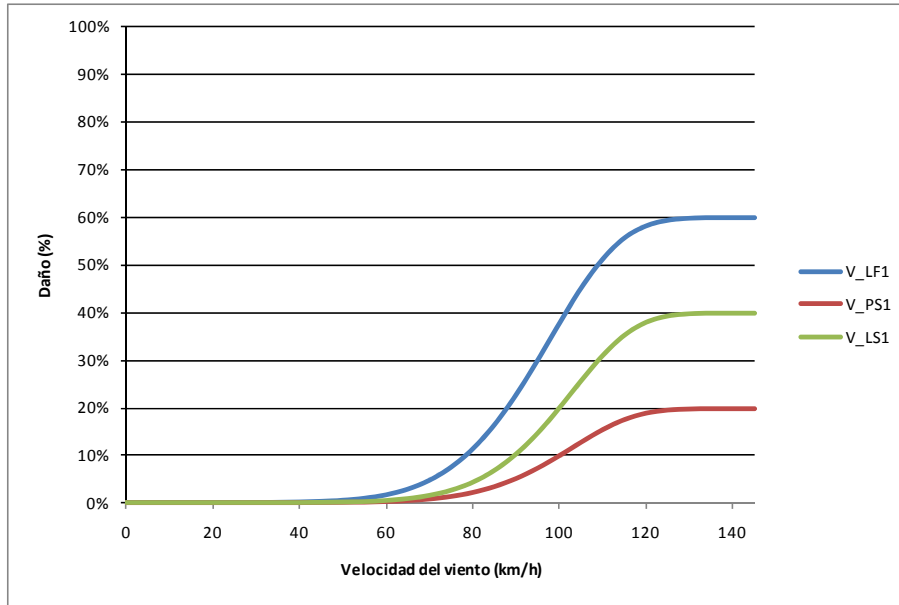


Figura 6-10
Curvas de vulnerabilidad por viento empleadas

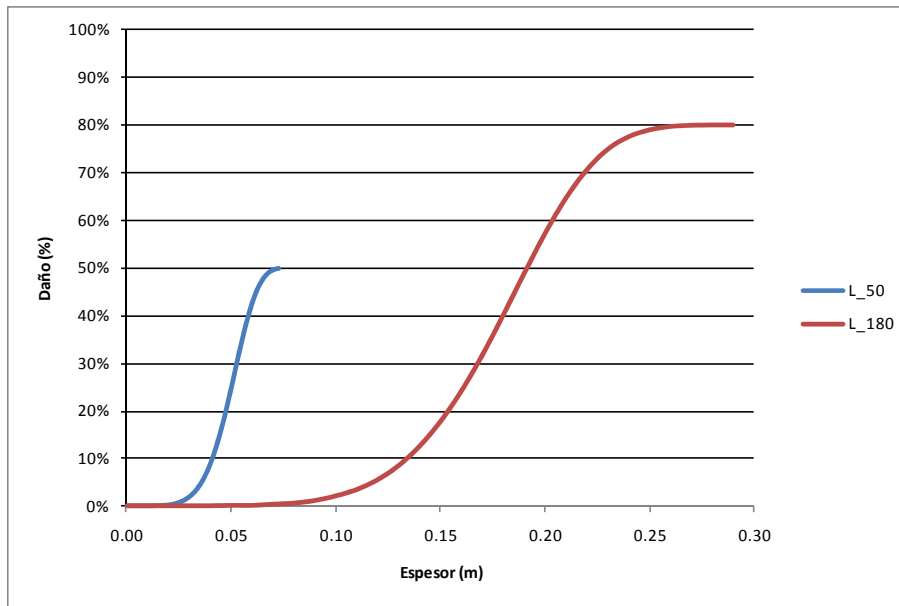


Figura 6-11
Curvas de vulnerabilidad por caída de cenizas empleadas

7 Resultados de la evaluación

El análisis del riesgo se realiza siguiendo la metodología que se explica en detalle en el informe ERN-CAPRA-T3.2 (Modelo de Evaluación Probabilista del Riesgo, ERN 2010) y en el sitio www.ecapra.org se puede consultar en detalle la metodología de evaluación de pérdidas empleada en este estudio.

7.1 Evaluación probabilista del riesgo de desastre

La evaluación probabilista del riesgo se realizó para las temporalidades presentadas en la Tabla 7-1. Cada temporalidad se define como un conjunto de amenazas que ocurren de manera simultánea. En el presente caso, por tratarse de eventos independientes, las temporalidades definidas contienen una sola de las amenazas consideradas.

*Tabla 7-1
Temporalidades empleadas en el cálculo*

AMENAZA	TEMPORALIDAD	
	1	2
Sismo		
Huracán - Viento		

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación probabilista de pérdidas para el Área Metropolitana de San Salvador. En el sitio www.ecapra.org se puede consultar en detalle la metodología de evaluación de pérdidas empleada en este estudio.

7.1.1 Resultados para sismo

La Tabla 7-2 y la Figura 7-1 resumen los resultados de riesgo para la amenaza sísmica en el Área Metropolitana de San Salvador.

Tabla 7-2
Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 ⁶	34,833.65
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 ⁶	203.94
	‰	5.85‰
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
250	3,261.43	9.36%
500	4,476.00	12.85%
1,000	5,860.73	16.82%
1,500	6,877.01	19.74%

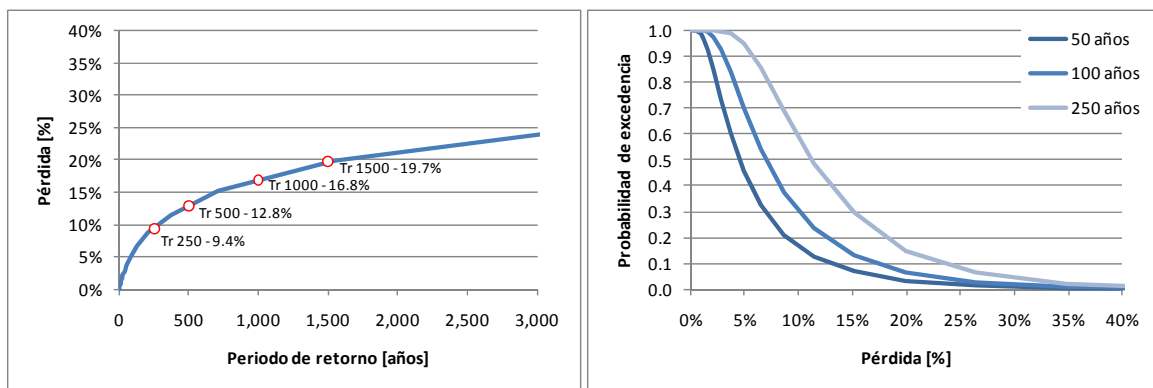


Figura 7-1

Resultados del análisis para sismo

(Izquierda: Curva de pérdida máxima probable, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición)

La Tabla 7-3 y la Figura 7-2 a Figura 7-5 presentan los resultados del riesgo sísmico agrupados según sistema estructural, número de pisos, grupo de uso y categoría socioeconómica.

Tabla 7-3
Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$ millones]	[%]	[US\$ millones]	[%o]
A-SPSB-1	517.05	1.48%	17.97	34.76%o
B-SLFB-1	357.10	1.03%	11.63	32.58%o
MC-SLSB-1	10,577.98	30.37%	24.61	2.33%o
MR-SLSB-1	12,515.03	35.93%	14.01	1.12%o
MS-SLSB-1	2,911.15	8.36%	38.69	13.29%o
PAA-SLSB-B	873.19	2.51%	5.95	6.82%o
PCR-SLSB-1	3,283.26	9.43%	50.49	15.38%o
PCR-SLSB-B	2,396.50	6.88%	23.20	9.68%o
W-SLFB-1	1,402.38	4.03%	17.39	12.40%o
TOTAL	34,833.65	100.00%	203.94	5.85%o

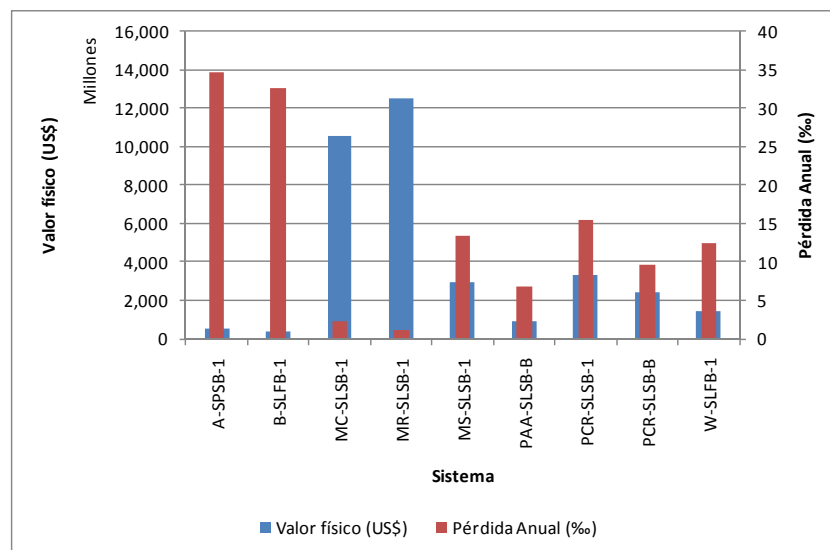


Figura 7-2
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural

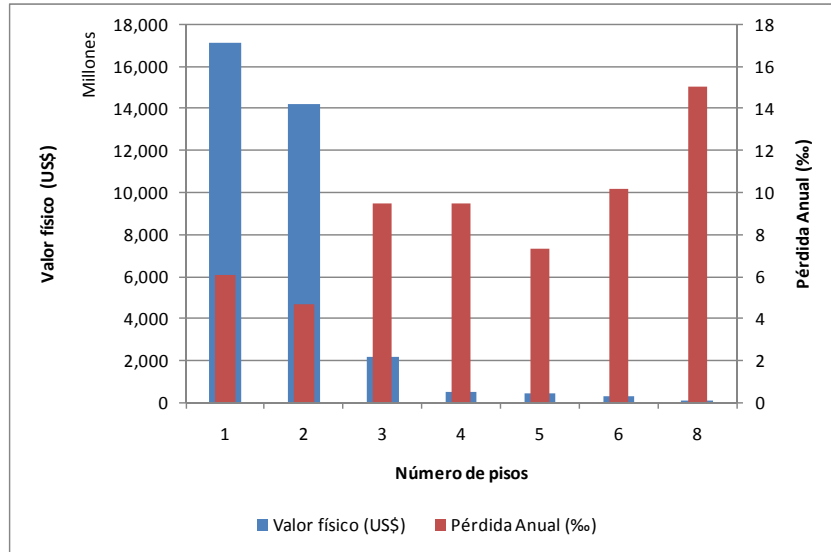


Figura 7-3

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos

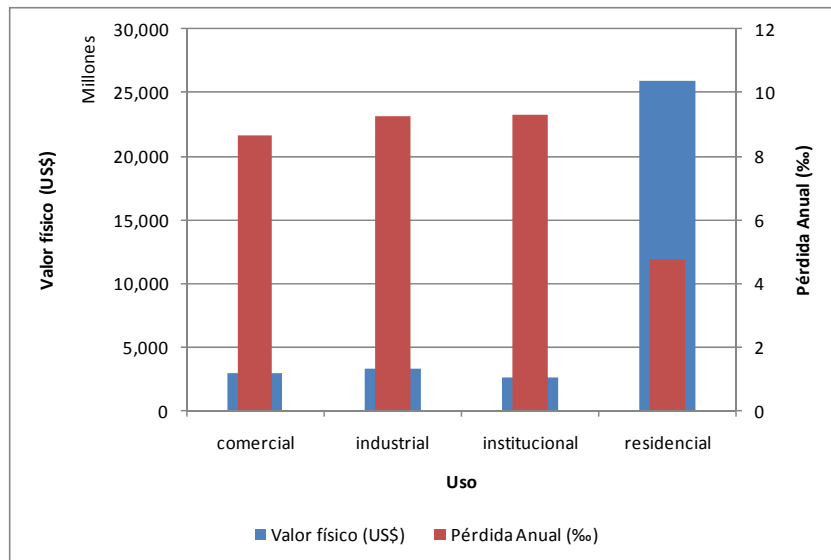


Figura 7-4

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso

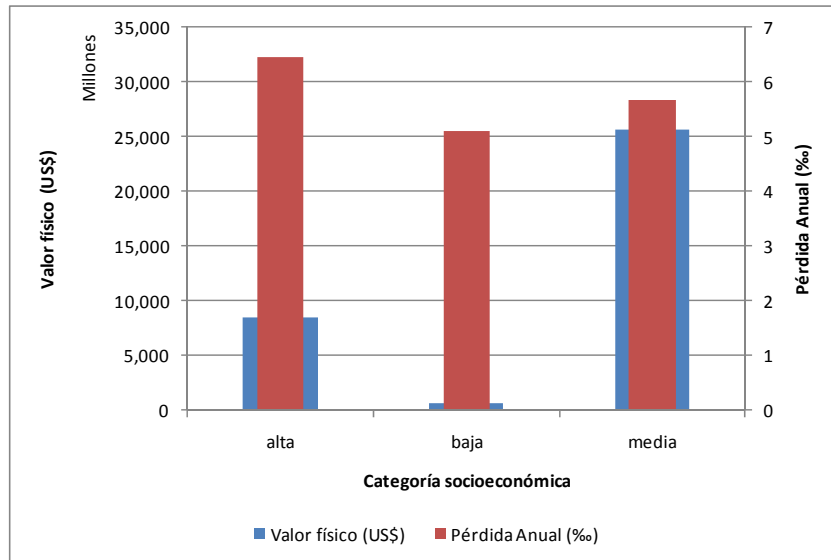


Figura 7-5
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

7.1.2 Resultados para viento huracanado

La Tabla 7-4 y la Figura 7-6 resumen los resultados de riesgo por viento huracanado.

Tabla 7-4
Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 ⁶	34,833.65
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 ⁶	25.53
	‰	0.73‰
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
50	415.29	1.19%
100	728.00	2.09%
250	1,221.56	3.51%
500	1,596.65	4.58%
1,000	1,943.53	5.58%
1,500	2,204.30	6.33%

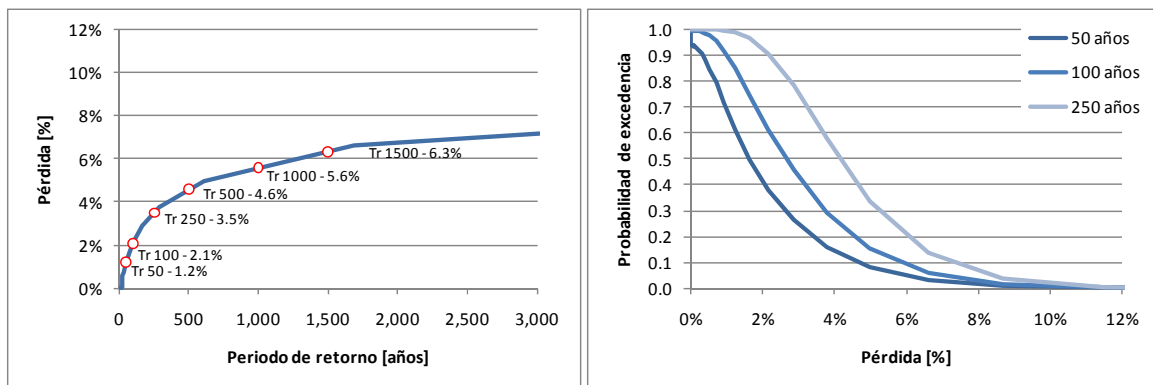


Figura 7-6

Resultados del análisis para viento huracanado

(Izquierda: Curva de pérdida máxima probable, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición)

Por otro lado la Tabla 7-5 y la Figura 7-7 a Figura 7-10 presentan los resultados de riesgo por viento huracanado agrupados según sistema estructural, número de pisos, grupo de uso y categoría socioeconómica.

Tabla 7-5
Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$ millones]	[%]	[US\$ millones]	[%o]
A-SPSB-1	517.05	1.48%	0.19	0.36‰
B-SLFB-1	357.10	1.03%	0.60	1.68‰
MC-SLSB-1	0,577.98	30.37%	6.84	0.65‰
MR-SLSB-1	12,515.03	35.93%	9.20	0.74‰
MS-SLSB-1	,911.15	8.36%	2.20	0.76‰
PAA-SLSB-B	873.19	2.51%	0.68	0.78‰
PCR-SLSB-1	3,283.26	9.43%	2.02	0.62‰
PCR-SLSB-B	2,396.50	6.88%	1.29	0.54‰
W-SLFB-1	1,402.38	4.03%	2.50	1.78‰
TOTAL	34,833.65	100.00%	25.53	0.73‰

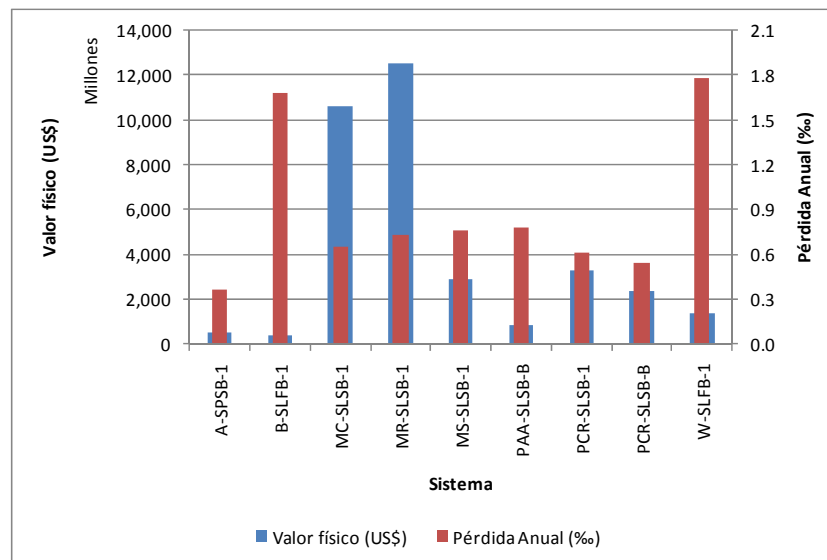


Figura 7-7
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural

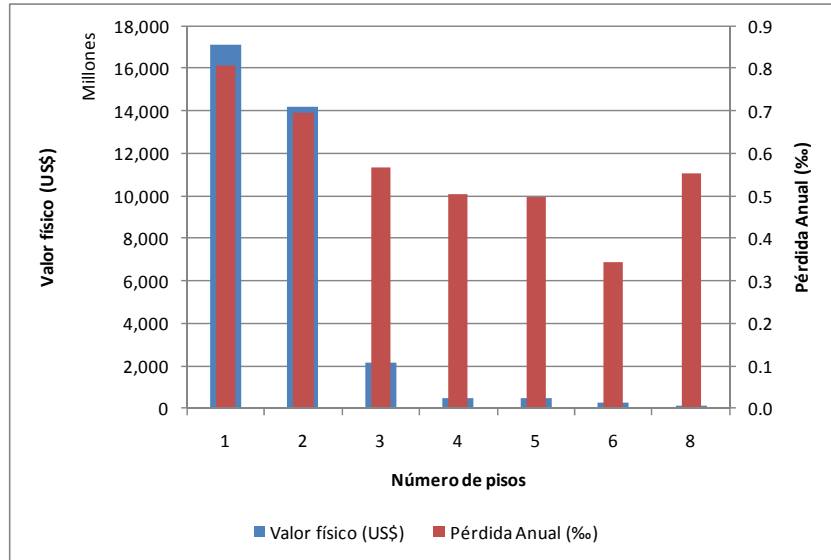


Figura 7-8

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos

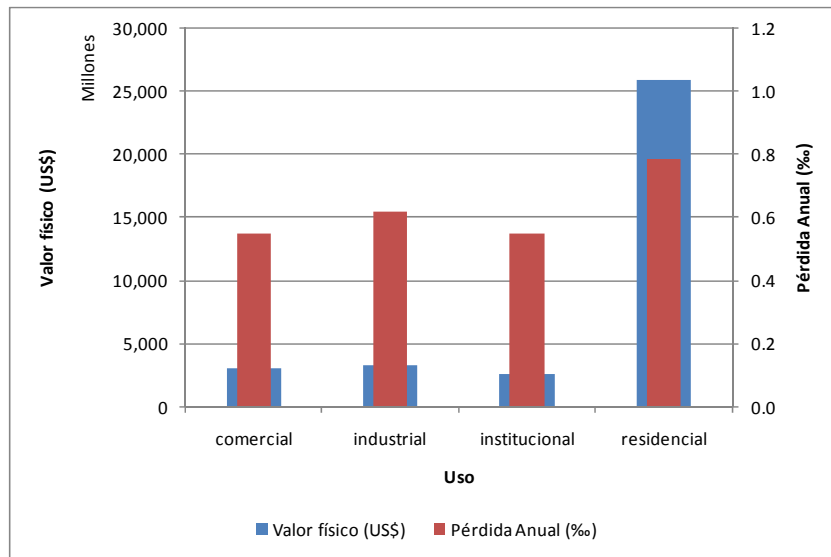


Figura 7-9

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso

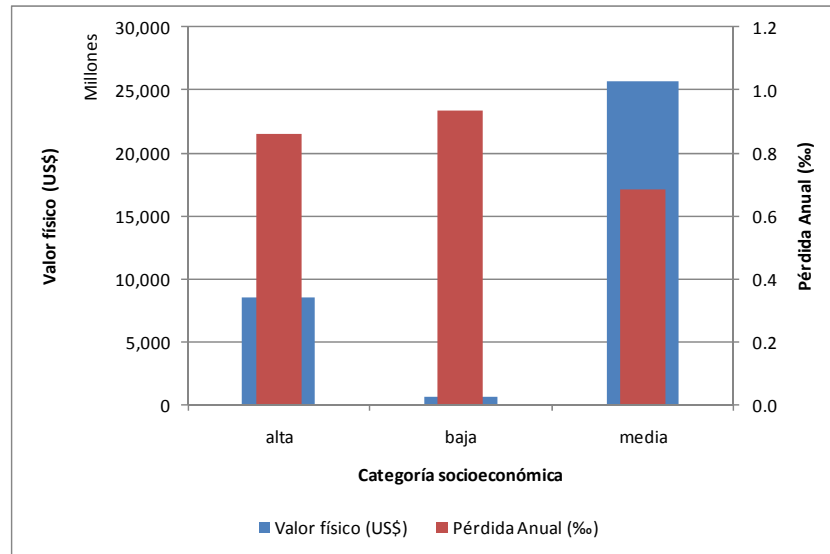


Figura 7-10

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

7.1.3 Resultados agrupados

La Tabla 7-6 y la Figura 7-11 presentan los resultados para todas las temporalidades analizadas, en forma conjunta. El resultado corresponde a la suma de las tasas de excedencia de pérdida, de las curvas de excedencia obtenidas para cada temporalidad de cálculo.

Tabla 7-6
Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 ⁶	34,833.65
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 ⁶	229.47
	‰	6.59‰
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
250	3,296.50	9.46%
500	4,485.62	12.88%
1,000	5,860.73	16.82%
1,500	6,877.01	19.74%

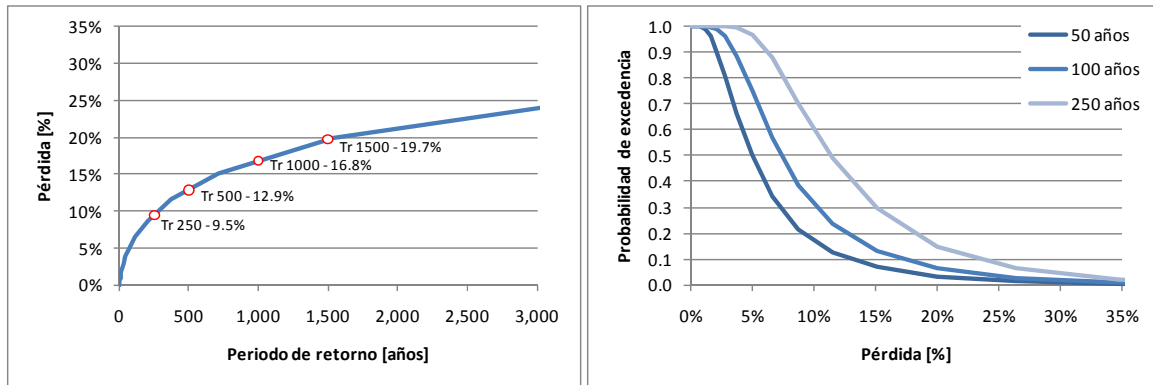


Figura 7-11
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de pérdida máxima probable, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición)

7.1.4 Mapas de riesgo

La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 7-12 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por manzana para terremoto. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor económico. La Figura 7-13 presenta los resultados equivalentes para vientos huracanados.

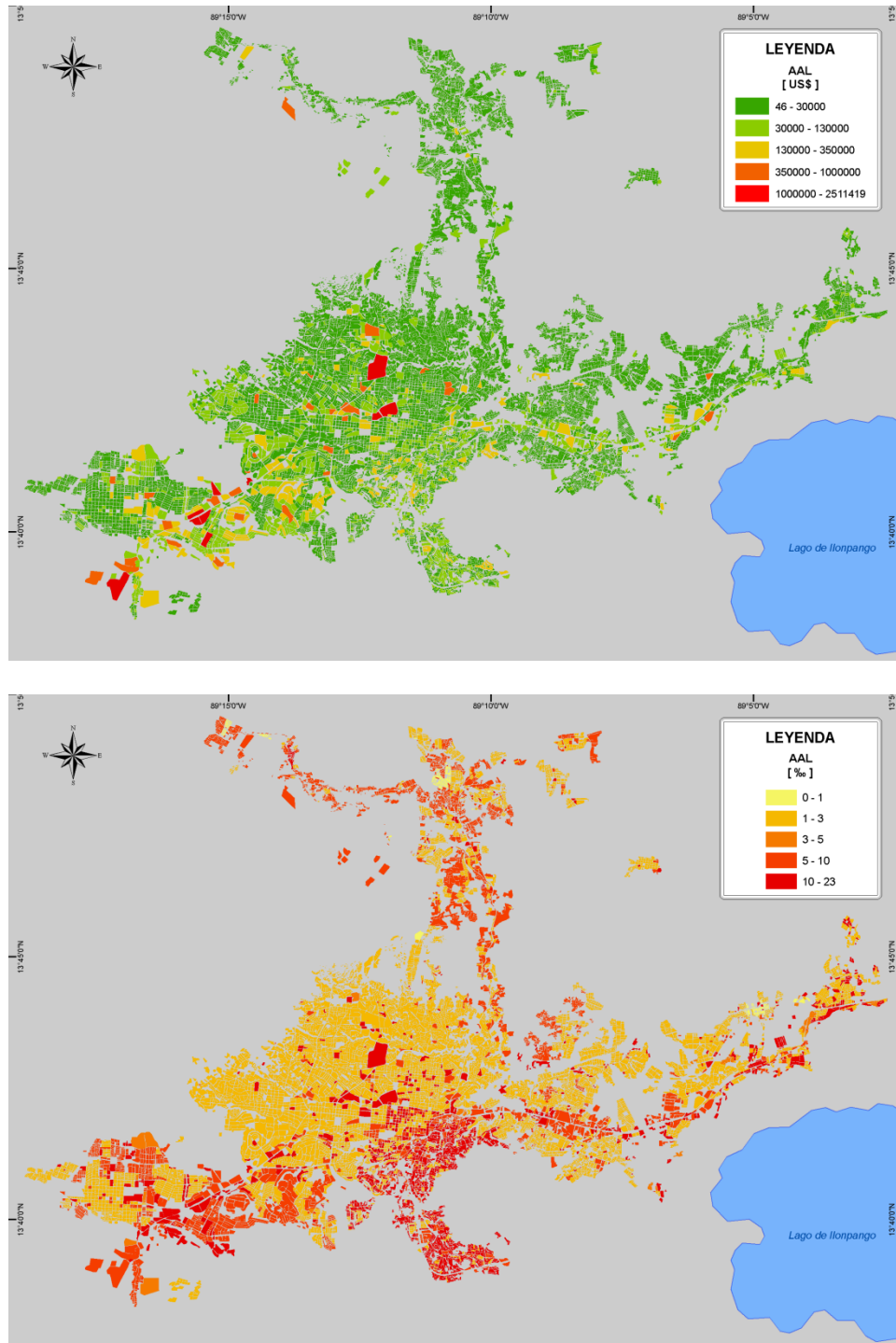


Figura 7-12
Pérdida anual esperada por manzana para sismo
 (Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

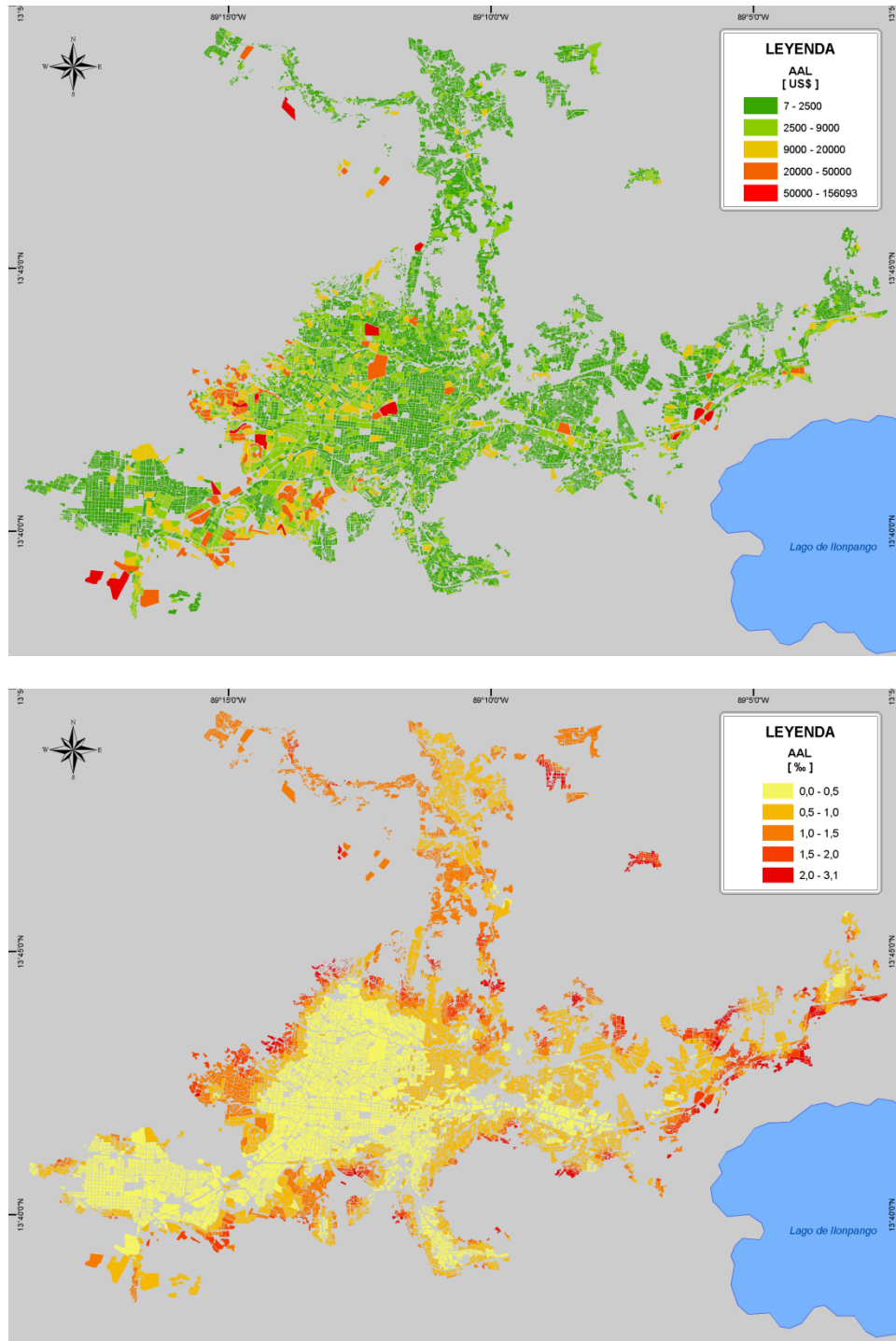


Figura 7-13
Pérdida anual esperada por manzana para viento huracanado
 (Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

7.2 Análisis determinista del riesgo volcánico

La estimación del escenario de amenaza determinista y la simulación de las pérdidas esperadas que se derivan del evento seleccionado se llevaron a cabo utilizando las herramientas de evaluación de amenaza y riesgo de CAPRA GIS (ver www.ecapra.org). Esta plataforma permite realizar evaluaciones de amenaza, la asignación de las curvas de vulnerabilidad y el cálculo de riesgo para una base de exposición determinada. Los resultados se condensan en una serie de tablas y figuras que dan cuenta de la distribución general y espacial de las pérdidas económicas.

La Tabla 7-7 resume los resultados encontrados para el escenario seleccionado en términos de pérdidas económicas con respecto a los valores expuestos correspondientes. Por otra parte, la Tabla 7-8 resume los resultados encontrados para cada sistema estructural identificado.

Tabla 7-7
Valor expuesto y pérdida económica

Resultados		
Exposición	Física	
Valor Expuesto	US\$ x10 ⁶	\$ 34,833.65
Pérdida Económica	US\$ x10 ⁶	\$ 130.41
	%	0.37

Tabla 7-8
Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida esperada)

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida esperada		
	[US\$ millones]	[%]	[US\$ millones]	[% de la pérdida]	[% del valor expuesto]
A-SPSB-1	517.05	1.48	2.69	2.06	0.52
MS-SLSB-1	2,911.15	8.36	0.78	0.60	0.03
MR-SLSB-1	12,515.03	35.93	0.00	0.00	0.00
B-SLFB-1	357.10	1.03	0.00	0.00	0.00
PCR-SLSB-1	3,283.26	9.43	0.00	0.00	0.00
MC-SLSB-1	10,577.98	30.37	87.54	67.12	0.83
W-SLFB-1	1,402.38	4.03	37.96	29.11	2.71
PCR-SLSB-B	2,396.50	6.88	1.44	1.11	0.06
PAA-SLSB-B	873.19	2.51	0.00	0.00	0.00
TOTAL	34,833.65	100.00	130.41	100.00	0.37

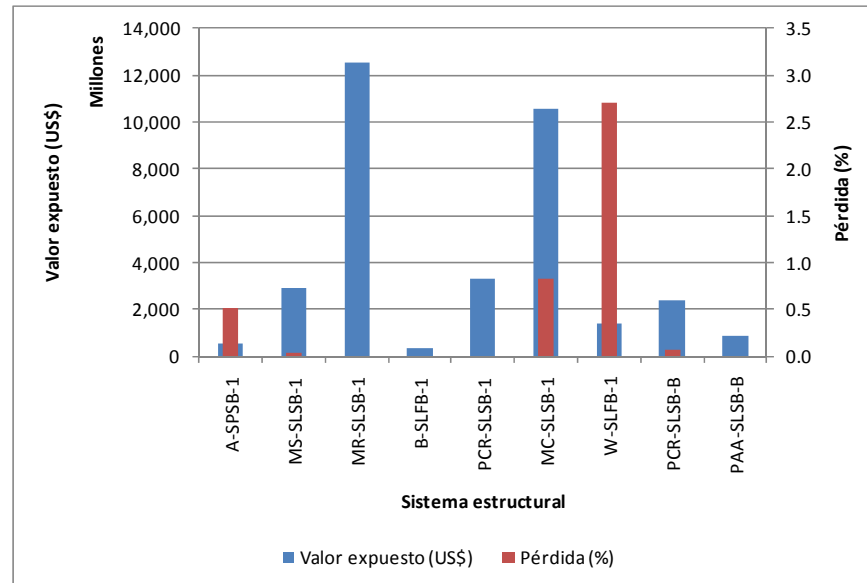


Figura 7-14

Pérdida esperada (en valor y como porcentaje del valor expuesto) por sistema estructural

Los anteriores resultados se pueden visualizar mediante mapas que ilustran la distribución geográfica de pérdidas. La Figura 7-15 presenta la distribución geográfica de pérdidas esperadas en porcentaje y en valor monetario para la erupción seleccionada en el análisis.

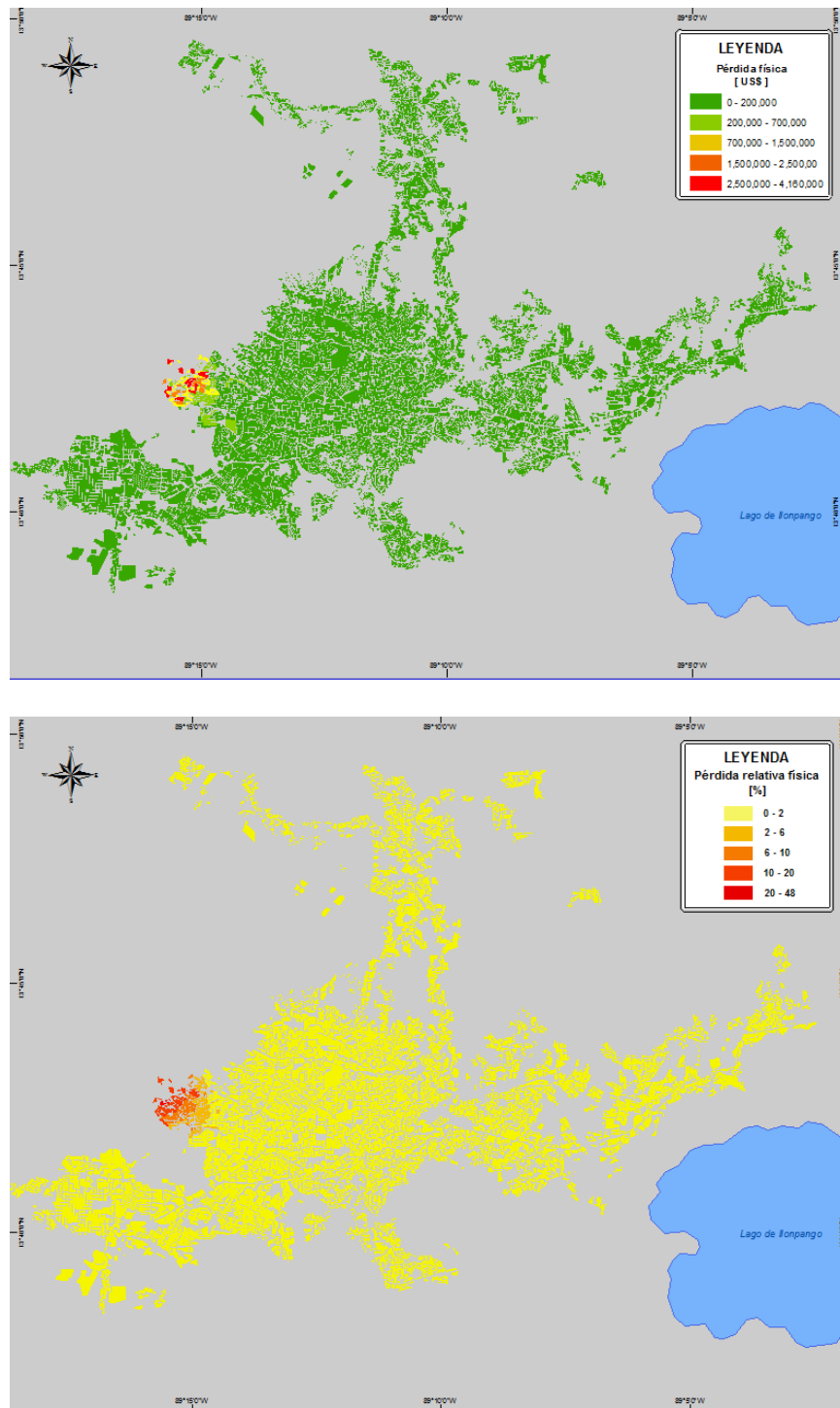


Figura 7-15
Pérdida esperada por manzana para el escenario seleccionado
(Arriba: en valor, US\$; abajo: porcentaje del valor expuesto)

8 Conclusiones y Recomendaciones

El análisis de riesgo por sismo, viento huracanado y volcán presentado para la ciudad de San Salvador – El Salvador debe verse como una plataforma inicial que permite la cuantificación y calificación del riesgo en la ciudad en cualquier instante de tiempo (según la mejor información disponible) y que debe servir de base para que mediante la complementación paulatina de la información se convierta en el corto plazo en una evaluación integral de riesgo para efectos de toma de decisiones.

El análisis de riesgo probabilista para San Salvador permite identificar mayores niveles de pérdida esperada por riesgo sísmico. Para dicha amenaza la pérdida máxima probable para un período de retorno de 500 años es igual a US\$ 4,476 millones, lo que equivale al 10.75% del PIB del país y al 12.85% del total del valor expuesto. Las pérdidas esperadas a causa del paso de huracanes por el territorio (PML para 500 años de US\$ 1,596 millones, equivalente al 3.8% del PIB del país y al 4.58% del total del valor expuesto), son considerablemente menores en comparación con el riesgo sísmico. En parte esta situación se presenta dada la alta amenaza sísmica existente en el país, y su localización relativamente lejana del corredor de tránsito de huracanes por el océano Atlántico.

La prima pura de riesgo global calculada para la ciudad (6.59‰) se considera intermedia, presentando un gran aporte en pérdida, casi en su totalidad, por efecto de los terremotos (prima pura de 5.85‰), debido principalmente a las condiciones de amenaza de la ciudad y la vulnerabilidad de las construcciones, con el agravante de su ubicación en una zona sísmicamente activa. En cuanto al riesgo por vientos huracanados, la prima pura calculada (0.73‰) indica que no constituye una amenaza de gran importancia, en términos de generación de pérdidas futuras, comparativamente con los terremotos.

La pérdida asociada al escenario volcánico se puede considerar baja (0.37% del valor expuesto de la ciudad), en términos relativos con otras amenazas. Es importante tener en cuenta que este resultado corresponde a una evaluación determinista de una erupción seleccionada como la más crítica para la población. A medida que la información lo permita, el análisis puede ampliarse al campo probabilista, de manera que los resultados sean comparables con los obtenidos por efecto de las demás amenazas consideradas. Así mismo, deben considerarse otros productos volcánicos en el análisis de riesgo.

A continuación se dejan explícitas las limitaciones en la información utilizada para los análisis, lo cual debe servir de base para los planes de trabajos y estudios futuros por parte de la ciudad con miras a mejorar la calidad y confiabilidad de estos resultados preliminares.

- (a) Información de amenaza sísmica: es susceptible de mejorar, al considerar fallas locales y efectos de sitio, los cuales no se han incluido en el presente análisis por falta de información. También es muy importante mantener actualizado el catálogo

de eventos pasados con la mayor cantidad de información relacionada con efectos, daños e impactos producidos.

- (b) Información de amenaza por vientos huracanados: se puede considerar de buena calidad y completa para efectos del presente análisis. El costo y tiempo requerido para mejorar este tipo de información es muy alto y requiere sobre todo de la disponibilidad de más y mejor información. Resulta de la mayor importancia mantener el catálogo de eventos actualizado y con mejor información para efectos de calibración y ajuste de los modelos.
- (c) Información de exposición: debe recurrirse a la base catastral de la población. El modelo utilizado en el presente análisis solo sirve con propósitos ilustrativos e indicativos de valores globales a esperar. Para efectos de resultados para toma de decisiones debe contarse con la base catastral de la ciudad y con índices oficiales de ocupación y costos. Alternativamente deben plantearse programas de levantamiento de información con base en visitas de campo intensivas.
- (d) Las funciones de vulnerabilidad deben revisarse y evaluarse en un plan en el mediano plazo, mediante la vinculación de universidades y centros de investigación. Estos trabajos deben basarse en modelaciones analíticas y experimentales de los tipos constructivos típicos de la ciudad y en observaciones del comportamiento de tipos constructivos característicos ante eventos determinados.
- (e) Los resultados de los análisis de riesgo y su interpretación para la toma de decisiones debe realizarse de manera conjunta con las entidades y especialistas a cargo de cada uno de los aplicativos que pueden derivarse de estos resultados.

Los resultados presentados anteriormente dependen directamente de la calidad y tipo de información suministrada al modelo. Entre más detallada y confiable sea la información, menor será la incertidumbre asociada a los resultados y por lo tanto el proceso de toma de decisiones podrá realizarse con mayor nivel de confianza.

En particular se hace especial énfasis en actualizar la información referente a:

- Inventario de construcciones expuestas incluyendo sus características principales.
- Valoración de activos, sus contenidos y posibles pérdidas consecuenciales.
- Identificación de tipos estructurales dominantes y distribución dentro de la ciudad.
- Categorización de tipos de contenidos, calificación y valoración.
- Calificación de la vulnerabilidad estructural y humana ante las diferentes fuentes de amenaza.
- Inventario, valoración y calificación de toda la infraestructura complementaria expuesta incluyendo vías, puentes, infraestructura de servicios públicos, instalaciones industriales importantes, plantas de generación de energía, aeropuertos y en general toda la infraestructura expuesta relevante del país.

Mediante una información más detallada especialmente de infraestructura expuesta el sistema CAPRA permitiría realizar las siguientes evaluaciones complementarias:

- (a) Identificación de infraestructura crítica para la ciudad en términos de peligrosidad, valor expuesto, ocupación humana y otros criterios. Esto con el fin de priorizar inversión pública en recuperación o modernización de elementos claves para el desarrollo.
- (b) Evaluación del riesgo por sectores incluyendo residencial, industrial, comercial, salud, educación, públicos y otros.
- (c) Requerimientos de reforzamiento de activos públicos, especialmente edificaciones indispensables y de atención a la comunidad.
- (d) Estimación del riesgo de activos privados para estratos bajos, medios y altos con fines de protección financiera y concientización del riesgo.
- (e) Análisis de vulnerabilidad y requerimiento de reforzamiento para mitigación de impactos de los sistemas de servicios públicos que puedan verse afectados por los fenómenos que se analizan.
- (f) Requerimientos especiales para los planes de ordenamiento territorial, definición de zonas de alto riesgo, restricciones susceptibles de inundación o deslizamiento, reubicación de viviendas o edificaciones indispensables y otras.

Finalmente, un análisis más detallado de la información que se presenta en este documento sirve de base para realizar una serie de análisis complementarios para efectos de los planes y preparativos de emergencia de la ciudad, incluyendo los siguientes:

- (a) Sector salud: requerimientos de atención médica para heridos, centros de atención de emergencia, ubicación, requerimientos de servicios públicos, personal médico, ambulancias, organización del tema de víctimas mortales.
- (b) Seguridad: requerimientos de seguridad en los instantes y días posteriores al evento en cuanto a organización policial y del ejército. Posibilidad de problemas sociales por falta de alimentos o de servicios.
- (c) Atención de la emergencia: planeación de las diferentes acciones posteriores a la ocurrencia del desastre tales como reconocimiento, identificación y clausura de edificaciones afectadas, demoliciones, avisos a la población, cuadrillas de rescate, manejo de donaciones, suministros de alimentación, viviendas temporales, manejo de residuos, disponibilidad de maquinaria, etc.

- (d) Requerimientos de viviendas temporales, campamentos, comida, víveres, suministros, atención médica post-emergencia, etc. Problemática de la vivienda de interés social.
- (e) Problemática de personas sin empleo o lugar de trabajo según zonas, requerimientos inmediatos, afectación de la producción, efectos a largo plazo, medidas de mitigación de impactos.
- (f) Planes de contingencia para los diferentes sectores de servicios públicos y sociales incluyendo suministro de agua, energía, gas, transporte público, generación de energía, telecomunicaciones y otras.
- (g) Pérdidas económicas esperadas, efectos en el mediano y largo plazo en las finanzas públicas, necesidades de mecanismos de transferencia del riesgo, planes de aseguramiento, proyección hacia el futuro.

El análisis de riesgo con las herramientas indicadas se convierte por lo tanto en un elemento fundamental en la gestión integral del riesgo, factor clave para el desarrollo económico y social. El proceso exige la participación activa de entidades públicas, universidades, sector privado y de la comunidad en general relacionada con esta temática.

9 Referencias

- Ministerio de Economía, Dirección General de Estadística y Censos. Censos VI de Población y V de Vivienda 2007. <http://www.censos.gob.sv/sitepoblacion/index.html>
- El Salvador, Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/El_Salvador
- San Salvador, Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/San_Salvador
- Terremoto San Salvador 1986, Wikipedia.
http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_San_Salvador_de_1986
- Terremotos de El Salvador de 2001, Wikipedia.
http://es.wikipedia.org/wiki/Terremotos_de_El_Salvador_de_2001
- Huracán Mitch, Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Mitch
- Sismos en El Salvador 1900-2001, SNET.
<http://www.xeologosdelmundu.org/files/Sismos%20en%20El%20Salvador%201900-2001.pdf>
- Terremotos en El Salvador, Organización Panamericana de la Salud (OMS).
http://www.paho.org/spanish/sha/be_v22n1-terremotos.htm
- Revista 6 - Julio de 2001, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología El Salvador.
<http://www.conacyt.gob.sv/revista-6-7-7-01.htm>
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Modelos de Evaluación de Amenazas. Informe ERN-CAPRA-T1.2. <http://www.ecapra.org>. 2010.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Modelación Probabilista de Amenazas Naturales. Informe ERN-CAPRA-T1.3. <http://www.ecapra.org>. 2010.
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Plataforma para la Evaluación Probabilista de Riesgo CAPRA-GIS. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- HAZUS MH MR3. Multi-hazard loss estimation methodology. FEMA.
<http://www.fema.gov>
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.
<http://www.fao.org/>