GOBIERNO DE EL SALVADOR

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

CARACTERIZACIÓN DE CLASES DE VULNERABILIDAD FÍSICA DE EDIFICACIONES EN LA CIUDAD DE SAN SALVADOR Y ESTIMACIÓN DE COSTOS ÍNDICES PARA LOS DEPARTAMENTOS DE SAN SALVADOR, SAN MIGUEL Y SANTA ANA."

PROPUESTA METODOLÓGICA

INFORME FINAL

Propuesta metodológica para: la caracterización de clases de vulnerabilidad física de edificaciones en la ciudad de San Salvador y estimación de costos índices para los departamentos de San Salvador, San Miguel y Santa Ana

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Fernando Andrés López Larreynaga
Ministro

Luis Menjivar
Director del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales

Arturo Escalante
Gerente de innovación, desarrollo e investigación.

Elaboración
Ingeniero Alvin Lisandro López
Técnico en Vulnerabilidad Física

Revisión técnica
Telma Chávez

Noviembre, 2020

Este documento puede ser reproducido todo o en parte, reconociendo los derechos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Kilómetro 5 ½ carretera a Santa Tecla, calle y colonia Las Mercedes, Edificios MARN, instalaciones ISTA, San Salvador, El Salvador, Centroamérica.
Tel: (503) 2132-6276
Sitio web: www.marn.gob.sv
Correo electrónico: medioambiente@marn.gob.sv
Facebook: www.facebook.com/marn.gob.sv
Twitter: @MedioAmbienteSV
Youtube: youtube/marnsv
Instagram: /marn_elsalvador

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 6
OBJETIVOS 7
Objetivo general 7
Objetivos específicos 7
Definición del área de estudio 8
Alcance 8
Capítulo 1. Modelo de Exposición 10
1.1 Flujo de trabajo para creación de modelo de exposición 10
1.2 Definición De Las Tipologías Estructurales y su Distribución 17
Capítulo 3. Definición de curvas de fragilidad y funciones de consecuencia 36
3.1 Curvas de fragilidad estructural 36
3.2 Estados de daño estructural 42
3.3 Funciones De Consecuencia Estructural 43
3.4 Funciones De Consecuencia Por Fatalidades 45
Capítulo 4. Evaluación del riesgo sísmico 49
CONCLUSIONES 51
RECOMENDACIONES 52
BIBLIOGRAFIA 53
ANEXOS 55
ANEXO 1 Consulta de tipologías estructurales del sector vivienda de San Salvador a través del internet. 55
ANEXO 2 MODELO DE EXPOSICION 58
ANEXO 3 FUNCIONES DE FRAGILIDAD ESTRUCTURAL EN FORMATO NRML 58
ANEXO 4 FUNCIONES DE CONSECUCIA ESTRUCTURAL EN FORMATO NMRL 59
ANEXO 5 FUNCIONES DE CONSECUENCIA PERDIDAS POR VIDAS HUMANAS 60

CONTENIDO IMAGENES

Imagen 1: mapa de clasificación de elevaciones..... ¡Error! Marcador no definido.

Imagen 2: perspectiva en 3D de los contornos de edificaciones clasificadas a partir del DEM-LIDAR. 13
Imagen 3: mapa de densidad demográfica por zona homogénea. 14
Imagen 4: mapa de distribución total de habitantes por zona homogénea de San Salvador. 15
Imagen 5: mapa categorizado de área de infraestructura por viviendas zonas homogéneas. 16
Imagen 6: mapa de distribución de densidad de área de infraestructura. 17
Imagen 7: plano tipo del adobe del Ministerio de Vivienda. 22
Imagen 8: distribución de costo total por sector vivienda por sector homogéneo. 34
Imagen 9: Proceso de ingreso de las curvas de consecuencia en Input Toolkit Risk. 45
Imagen 10: Variabilidad de los ocupantes en el día municipio de Torino, Italia. 46

CONTENIDO TABLAS

Tabla 1: Calculo de costo por m2 para vivienda de Adobe. 21
Tabla 2: Calculo de costo por m2 para vivienda de Bareque. 24
Tabla 3: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería Reforzada de 1 nivel. 26
Tabla 4: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería Reforzada de 2 niveles. 28
Tabla 5: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería confinada de barro. 32
Tabla 6: Consolidado modelo de exposición física y humana por tipología estructural. 33
Tabla 7: Clasificación taxonómica de viviendas. 36
Tabla 8: Datos estadísticos de las curvas de fragilidad a emplear. 37
Tabla 9: funciones de consecuencia física para las viviendas sin ajustar. 43

Tabla 10: funciones de consecuencia física para las viviendas ajustadas. 44
Tabla 11: tasas de fatalidad investigadas durante terremoto en El Salvador. 47
Tabla 12: tasas de fatalidad sugeridas por PAGER ante el colapso de infraestructura.....48

CONTENIDO GRAFICAS

Gráfica 1: distribución en porcentaje del área por tipología estructural.....18
Gráfica 2: distribución de población por tipología estructural. 19
Gráfica 3: Distribución por monto estimado por tipología estructural. 35
Gráfica 4: Curva de fragilidad estructural para mampostería confinada de 1 nivel. 38
Gráfica 5: Curvas de fragilidad estructural mampostería reforzada 1 nivel 39
Gráfica 6: Curvas de fragilidad estructural mampostería reforzada 2 niveles 39
Gráfica 7: Curvas de fragilidad estructural adobe.....40
Gráfica 8: Curvas de fragilidad estructural bahareque. 40
Gráfica 9: Curvas de fragilidad estructural casa de perfiles de acero y paredes de lamina 41
Gráfica 10: Curvas de fragilidad estructural casa de madera 41
Gráfica 11: Valor por m2 del sector vivienda. 43
Gráfica 12: Porcentaje de demolición respecto al valor total 44

INTRODUCCIÓN

El Salvador se encuentra en el cinturón de Fuego del Pacífico el cual se caracteriza por una alta actividad sísmica y volcánica. En el caso de fenómenos sísmicos se debe al proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa de El Caribe, con este proceso geológico se da lugar a la formación de una cadena volcánica muy activa a nivel regional y local, el mismo fenómeno da lugar al fallamiento geológico local que generan una actividad sísmica alta en el país.

La ciudad de San Salvador capital del país, presenta un historial de actividad sísmica recurrente de eventos que han generado muchas pérdidas económicas y de vidas humanas, al menos la capital ha sido destruida 11 veces por sismos ocurridos entre 1576 y 1986. Por ejemplo, un suceso que afectó gravemente a la ciudad fue el terremoto del 10 de octubre del año 1986, dejando un saldo de 1,500 muertes, 60 mil viviendas colapsadas y US$1,352 millones en pérdidas materiales (Reyes et al., 2007). La tipología estructural de vivienda más común empleada por la clase baja en la ciudad de San Salvador para 1986 era de bahareque por lo que, para el terremoto del 10 de octubre, la mayoría de este tipo de viviendas colapsaron o resultaron severamente dañadas.; un ejemplo de ello es la pérdida de alrededor de 100,000 viviendas en el Barrio San Jacinto, Santa Marta y Santa Anita (Franz Sauter F, M. EERI[1], 1987).

La ciudad de San Salvador posee un alto grado de exposición de activos físicos y de personas debido a la ubicación de las mismas en pequeños territorios de la ciudad ocasionando una alta densidad y en los cuales la amenaza sísmica es alta. Es por ello que el desarrollo de estudios que identifiquen la tipología y zonas de mayor fragilidad estructural es clave para la reducción de pérdidas y daños ante futuros fenómenos sísmicos.

En tal sentido, el documento presenta una propuesta metodológica para desarrollar la caracterización de clases de vulnerabilidad física de edificaciones en la ciudad de San Salvador y estimación de costos índices para los departamentos de San Salvador, San Miguel y Santa Ana; desarrollándose modelos de exposición física y humana, caracterización de la vulnerabilidad física a través de curvas de fragilidad y funciones de consecuencia física y humanas debido a sismos.

[1] Earthquake Engineering Research Institute

OBJETIVOS

Objetivo general

- Caracterización de la vulnerabilidad física por clases de edificaciones en la ciudad de San Salvador.

Objetivos específicos

- Elaborar un modelo de exposición de infraestructura física de viviendas y vidas humanas para la ciudad de San Salvador.
- Identificar las tipologías estructurales de acuerdo al CENSO de vivienda.
- Definir la fragilidad estructural para las tipologías estructurales empleadas, mediante estudios de tesis de El Salvador o consultorías elaborados en la DOA.
- Describir la metodología necesaria para obtener los mapas de riesgo sísmico para la ciudad de San Salvador.
- Realizar una investigación de las tasas de mortalidad por sismo para las distintas tipologías estructurales en El Salvador.
- Definir curvas de consecuencias para las distintas tipologías estructurales y consecuencias de pérdidas de vidas humanas.
- Construir los costos índices para las tipologías estructurales empleadas en la caracterización de la vulnerabilidad física.

Definición del área de estudio

El Salvador posee una extensión territorial de 21,040.79km^2 y una población estimada de 6.227 millones de habitantes, siendo el país de la Centro América con la mayor densidad demográfica (Banco Mundial, 2011).

Actualmente el AMSS[2] está conformada por 14 Municipios, 12 del Departamento de San Salvador, Apopa, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Delgado, Ilopango, Mejicanos, Nejapa, San Marcos, San Martín, Tonacatepeque, Soyapango y la ciudad capital de San Salvador y 2 del Departamento de La Libertad, Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla, siendo Tonacatepeque el último en incorporarse en el año de 1996 (COAMSS-OPAMSS, 2017).

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

El área de estudio definida para la implementación de la metodología ha sido el municipio de San Salvador, el cual posee una extensión superficial de 72.25km2, en dicho municipio se ubica la capital de El Salvador, con una población total de 316,012 habitantes según el CENSO de población de las 2007 y 100,812 viviendas según el CENSO de vivienda 2007.

Alcance

Con la investigación exhibida se pretende determinar los insumos necesarios para calcular el riesgo sísmico en el municipio de San Salvador, excluyendo la amenaza de este documento ya que dicho producto es desarrollado por el área de geología de la DOA. Los modelos que se desarrollaran son:

a) Modelo de exposición
b) Curvas de fragilidad estructural
c) Funciones de consecuencia

En el modelo de exposición, la caracterización de la tipología estructural se inferirá a través del CENSO vivienda y la consulta mediante la búsqueda de lugares de ventas de viviendas en el internet.

[2] Área Metropolitana de San Salvador.

Los costos índices de reposición para las viviendas más representativas según CENSO viviendas 2007, para los departamentos de Santa Ana, San Salvador y San Miguel, se determinarán empleando, planos tipo del Ministerio de Vivienda y planos de creación propia e información de costos unitarios del FISDL.

La caracterización de la vulnerabilidad física de las viviendas, se realizará a través del establecimiento de las curvas de fragilidad estructural, las cuales se obtendrán de consultorías previas realizadas por la DOA, tesis universitarias e información internacional certera.

La caracterización de la vulnerabilidad física por irregularidades estructurales, que generan una vulnerabilidad intrínseca en la estructura se realizará en investigaciones posteriores, mediante un proceso de levantamiento de información de campo a través de una ficha electrónica, esta actividad no fue posible realizarse en el año 2020 por las condiciones impuestas por el COVID-19.

Las funciones de consecuencia se desarrollarán empleando información del FEMA Hazus (octubre 2020) en lo que concierne a las afectaciones físicas, esto debido a que El Salvador no posee información estadística, de las consecuencias físicas en estructuras debido a sismos de considerable magnitud, referente a las consecuencias por fatalidad se realizará una investigación bibliográfica, que permita conocer tasas de fatalidad por tipología estructural.

Capítulo 1. Modelo de Exposición

Los modelos de exposición física para análisis de riesgo sísmico, forman uno de los elementos de mayor importancia para el cálculo de escenarios de perdidas monetarias y de vidas humanas, ante el suceso de eventos sísmicos, a continuación, se presentan una serie de significados de dicha terminología:

a) Según "Natural Disasters and Vulnerability Analysis" (UNDRO 1979), esta definió a la exposición como elementos en riesgo, los cuales consisten en la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
b) El Observatorio Sismológico del Suroccidente de la Universidad del Valle de Cali en Colombia, el termino de exposición se refiere a un área o región, expuesta a un fenómeno amenazante, o a un elemento potencialmente sometido a él (vidas humanas e infraestructura).
c) Según Vitor Silva, Catalina Yepes-Estrada, Graeme Weatherill del (Global Earthquake Model Foundation), un modelo de exposición describe la distribución espacial de los elementos expuestos a una amenaza, así como su valor y tipo de vulnerabilidad.

1.1 Flujo de trabajo para creación de modelo de exposición

La creación del modelo de exposición se enfocará en el empleo del último término del párrafo anterior, a través de un diagrama de flujo que permita contener todos los requisitos necesarios expuestos, además dicho formato deberá de ser capaz de ajustarse a la herramienta TOOLKIT de GEM[3], la cual convertirá el modelo en formato NRML[4]. Los insumos necesarios para obtener un modelo de exposición son: CENSO de Vivienda y de Población para los años del 2007 y un modelo que permita discretizar las cubiertas de techo de infraestructura por rango de elevación, dicho recurso ha sido proporcionado por la DOA del MARN, el cual fue obtenido a través del producto LIDAR efectuado en el 2014 para todo El Salvador. En la imagen 1 se presenta el diagrama de flujo con el cual fue obtenido el modelo de exposición física y de vidas humanas para el municipio de San Salvador.

[3] Global Earthquake Model
[4] Natural hazards´Risk Markup Language

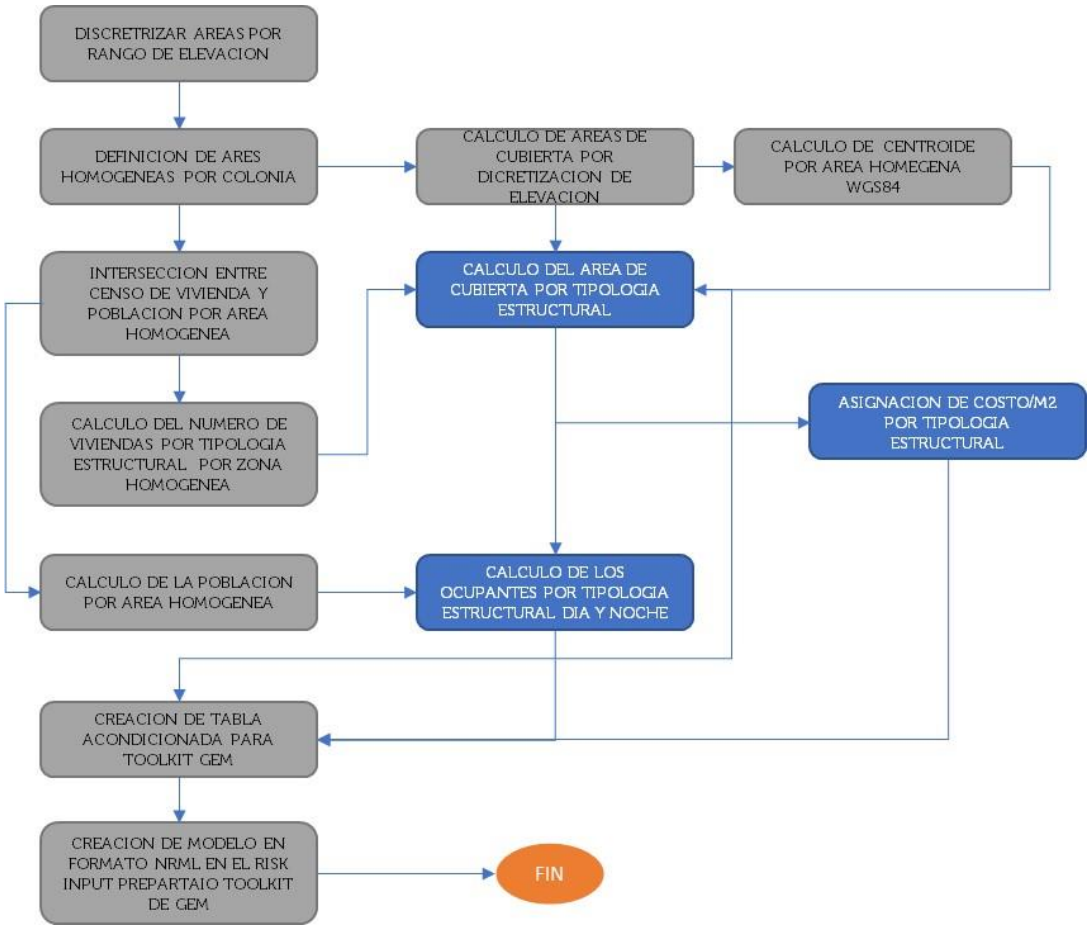


Figura 1. Diagrama de flujo de trabajo. Fuente: elaboración propia.

Dado que se trata de una propuesta metodológica con fines de ser aplicado a todo el país. Los resultados que a lo largo del informe se presentan se delimitaran al municipio de San Salvador, Departamento de San Salvador. La discretización de las áreas de vulnerabilidad física se trabajó utilizando el concepto de áreas homogéneas[5]. Un área homogénea serán entonces una colonia en el municipio de estudio, una colonia del municipio de San Salvador, esto ya que, de realizar un modelo detallado por vivienda, se requeriría una información con la que no se cuenta y más recursos de computadora

Con toda la información descrita y siguiendo el diagrama de flujo, se realizó la intersección de censo de vivienda con las zonas homogéneas y luego con el censo poblacional. Posteriormente se obtuvo el centroide de cada una de las zonas homogéneas definidas, ya intersecadas y se procedió a obtener el área de infraestructura por altura discretizada.

[5] Es la unidad de discretización territorial, que permite reunir en ella todos los insumos necesarios de un modelo de exposición física.

Luego de acuerdo al número de viviendas por área homogénea y por tipología estructural[6], se procedió a calcular las áreas de infraestructura para cada una de las tipologías estructurales a través de una tabla dinámica en Excel.

La población expuesta se estima por área homogénea y por tipología estructural. Uno de los criterios de población expuesta a definir es el de ocupación. Se definió la misma tasa de ocupación tanto para el día como para la noche, ya que a la fecha no se cuenta con insumos o investigaciones previas que permitan determinar esos coeficientes de ocupación a lo largo del día.

Finalmente, con toda la información generada en Excel se procedió a acondicionarse para ser empleada el "RISK INPUT PREPATION TOOLKIT" de GEM, en dicho toolkit la información tabulada se convirtió en formato NRML el cual será empleado para hacer las corridas en el OPEN QUAKE ENGINE.

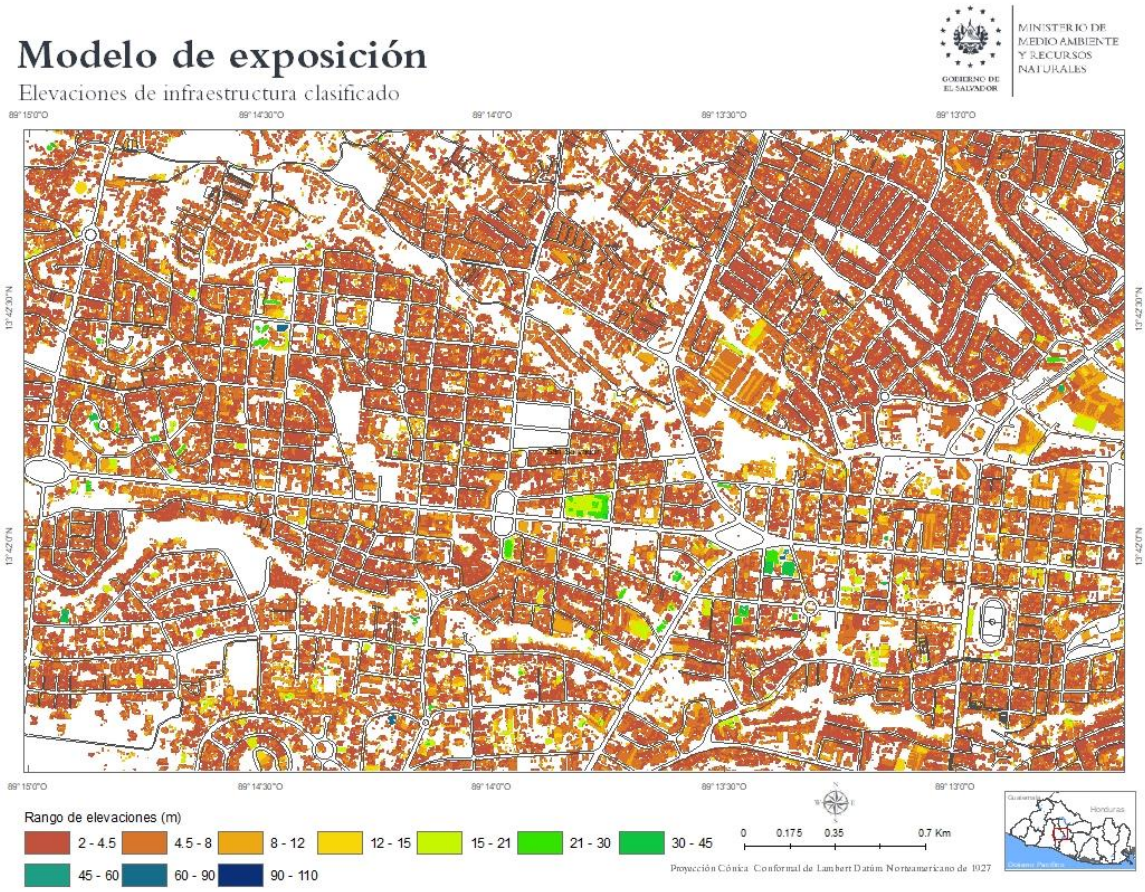


Figura 2. Mapa de alturas de construcciones clasificado. Fuente: DOA.

[6]Consiste en el sistema constructivo encargado de resistir todas las solicitaciones mecánicas impuestas por funcionamiento y por sismo.

Figura 3. Perspectiva en 3D de los contornos de edificaciones clasificadas a partir del DEM-LIDAR.

En la figura 1 se observan los clústeres de complejos habitacionales y de todos los sectores productivos del país. Los sectores productivos no son incluidos en esta metodología, ya que requieren de algunas consideraciones diferentes que serán abordadas en próximos trabajos.

La importancia del desarrollo de estas metodologías es que permitirá al observatorio realizar análisis de riesgo sísmico por evento que permita identificar potenciales zonas que podrían recibir mayores impactos negativos considerando perdidas en viviendas y vidas humanas. El procedimiento que aquí se plantea es replicable por lo que una vez ajustado para el municipio de San Salvador, se empleará para el resto del país, con el fin de determinar las consecuencias o impactos en el sector vivienda después de un sismo de considerable magnitud.

Como se puede apreciar en la figura 4, las mayores densidades demográficas se dan en aquellos lugares de mayor precariedad donde las tipologías estructurales que más predominan son las de láminas, cartón, adobe y bahareque. Además, estos sitios se encuentran en las riberas o las llanuras aluviales de causes fluviales y quebradas de la ciudad de San Salvador,

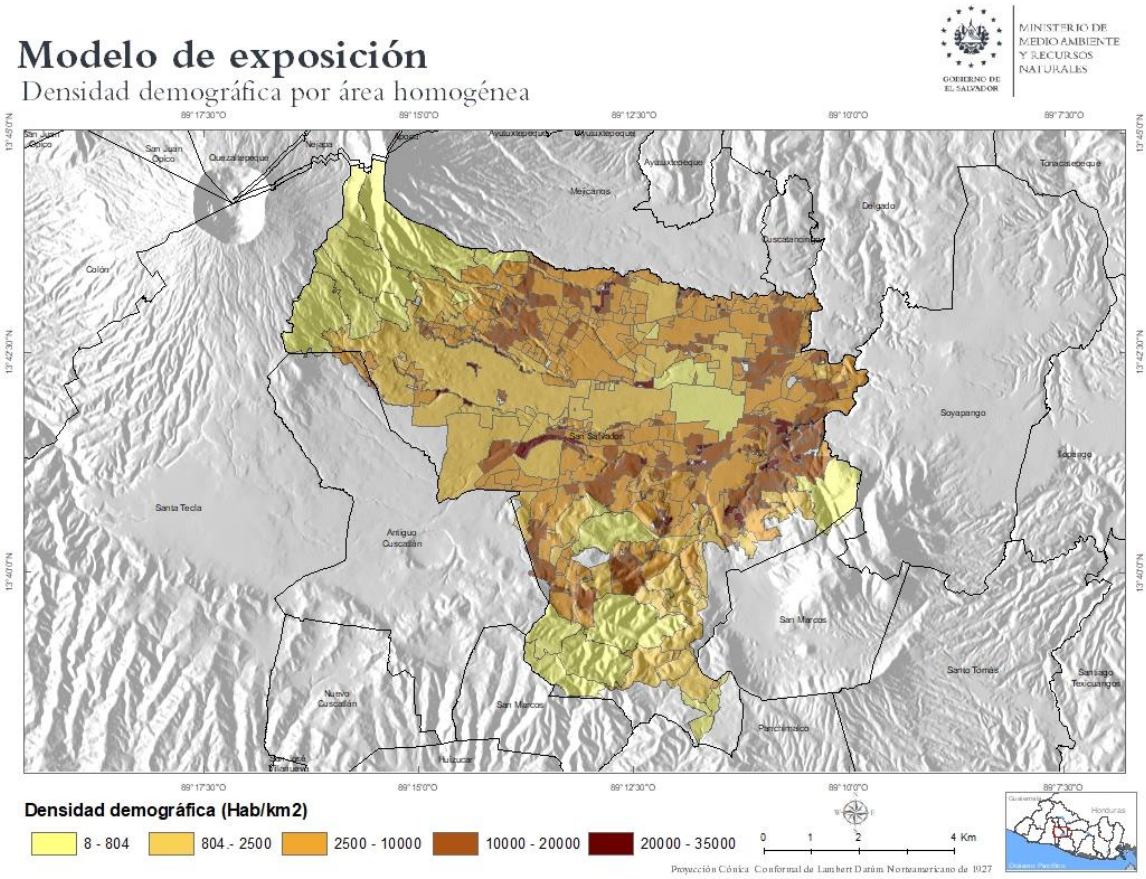


Figura 4: Mapa de densidad demográfica por zona homogénea. Fuente: elaboración propia.

La figura 5 muestra en el mapa que el mayor rango de población para el municipio de San Salvador se ubica en las partes norte y central del municipio y en zonas con un alto grado de precariedad. Estas se ubican en zonas expuestas al tránsito de avenidas repentinas por lluvias en la parte alta de las cuencas de dicho municipio. Información relevante ya que las zonas con mayores en términos de población expuesta, población afectada o incluso fallecidos, como consecuencia de un sismo con la capacidad de hacer colapsar estructuras. Consideran la información del último censo disponible, en total el municipio de San Salvador tiene un total de 316,012 habitantes.

Según lo expuesto en párrafos anteriores, se tomará igual coeficiente de ocupación para la noche y para el día. Esta consideración no representa la realidad en la dinámica del ocupacional del municipio, pero al representar este el primer ejercicio de aproximación se realiza de esa manera. Se espera que productos de futuras investigaciones se pueda determinar coeficientes específicos.

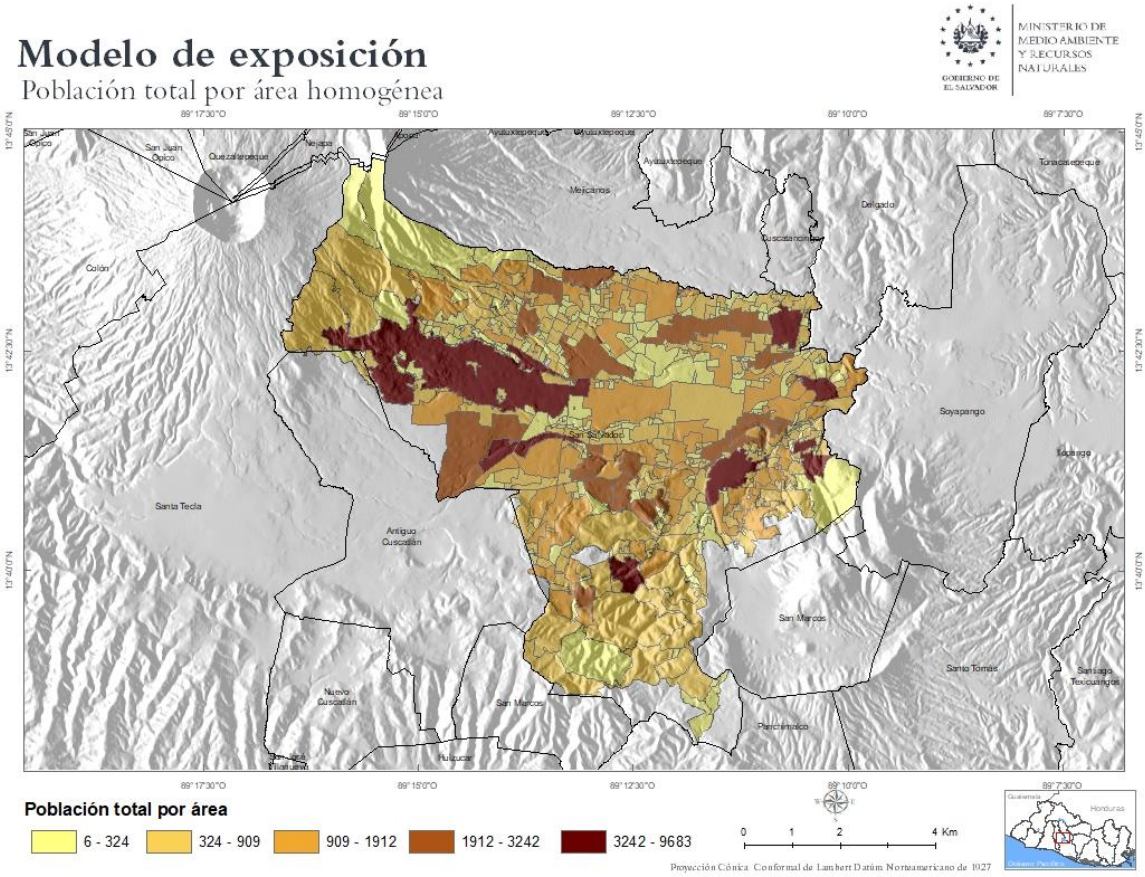


Imagen 5: mapa de distribución total de habitantes por zona homogénea de San Salvador. Fuente: elaboración propia.

La exposición física de infraestructura suma 19.17 km^2. Estimación que corresponde al rango de elevaciones de techos calculados con el producto LIDAR. En esta área de interés, el 87.88% de la construcción posee elevaciones de los 2 a los 8 metros, el restante 12.12% corresponden a edificaciones de elevaciones superiores a los 8 metros o superior a los 3 niveles. Los edificios de apartamentos no se han incluido en este modelo de exposición, ya que no se cuenta con información suficiente para ubicarlos y en el año no se pude realizar ningún tipo de levantamiento físico de infraestructura debido a las circunstancias del COVID-19. En la figura 6 se observa que los mayores acumulados de área de infraestructura del sector vivienda se encuentran ubicados en el área de la Escalón y Centro de la ciudad de San Salvador.

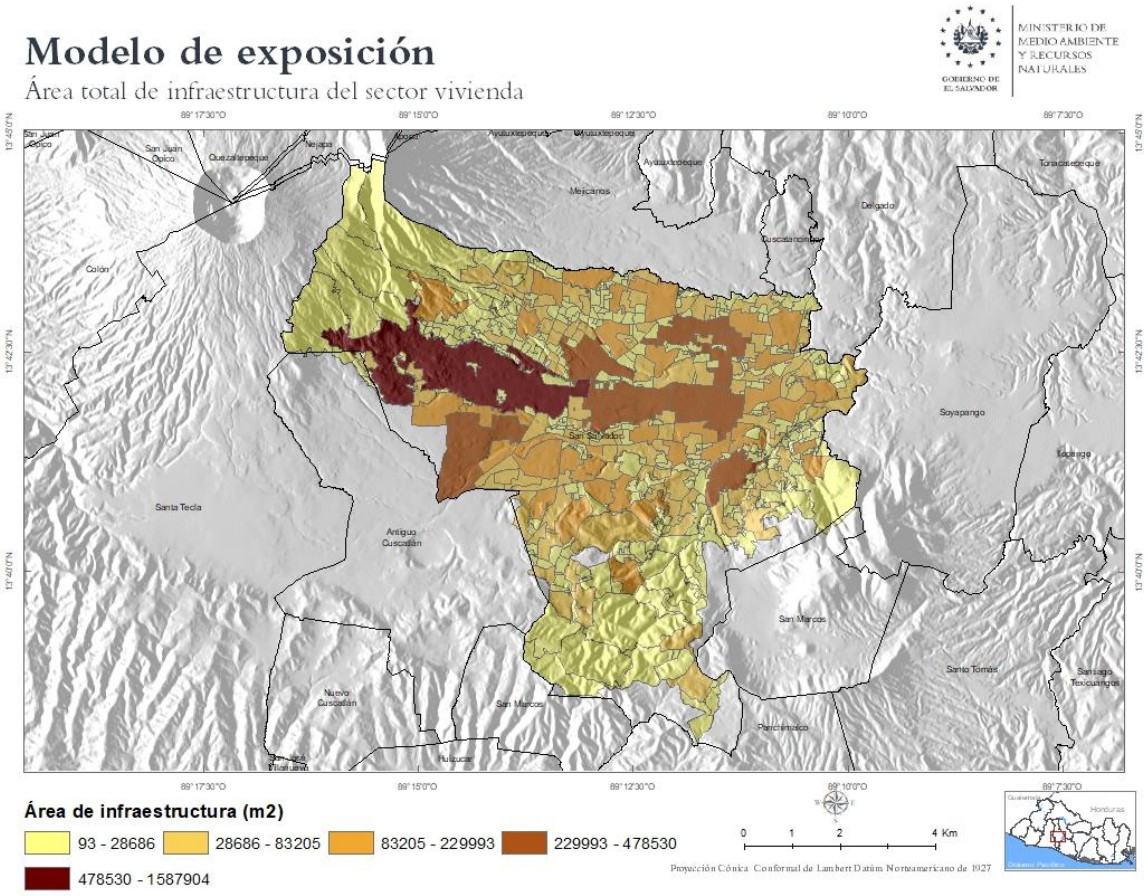


Imagen 6: Área de infraestructura por viviendas zonas homogéneas. Fuente: elaboración propia.

En la imagen 7 se puede apreciar la densidad de área construida para el sector vivienda, en ella se incluyen todas las tipologías estructurales. Como se puede observar al norte de la quebrada Tutunichapa y al sur de la quebrada La Mascota se ubican las áreas con las mayores densidades de áreas construidas, las cuales en algunos puntos concuerdan con las densidades demográficas altas. Esto permite considerar los sitios que podrían presentar consecuencias físicas y/o humanas importantes de ocurrir un sismo. Estos sitios contienen el mayor número de áreas homogéneas con zonas precarias las cuales poseen una alta densidad demográfica y de infraestructura por Km^2.

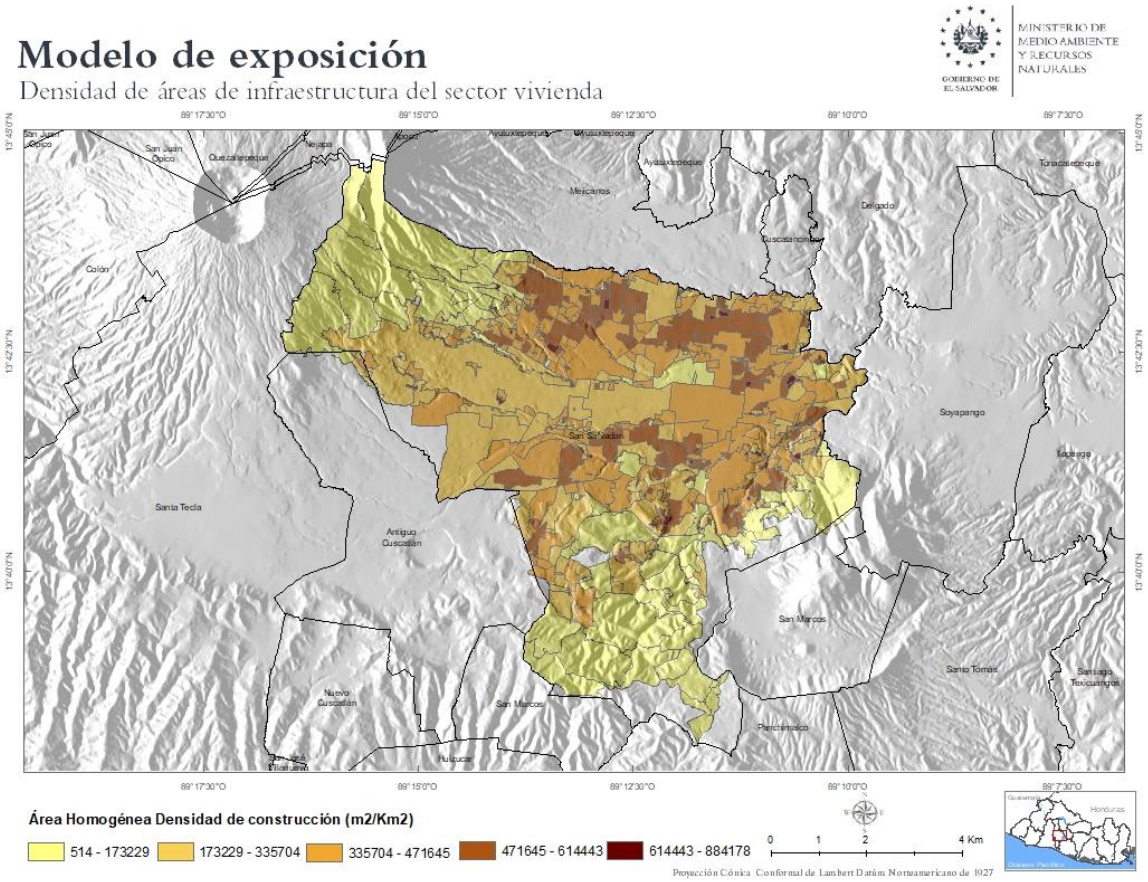


Imagen 7: Distribución de densidad de área de infraestructura. Fuente: elaboración propia.

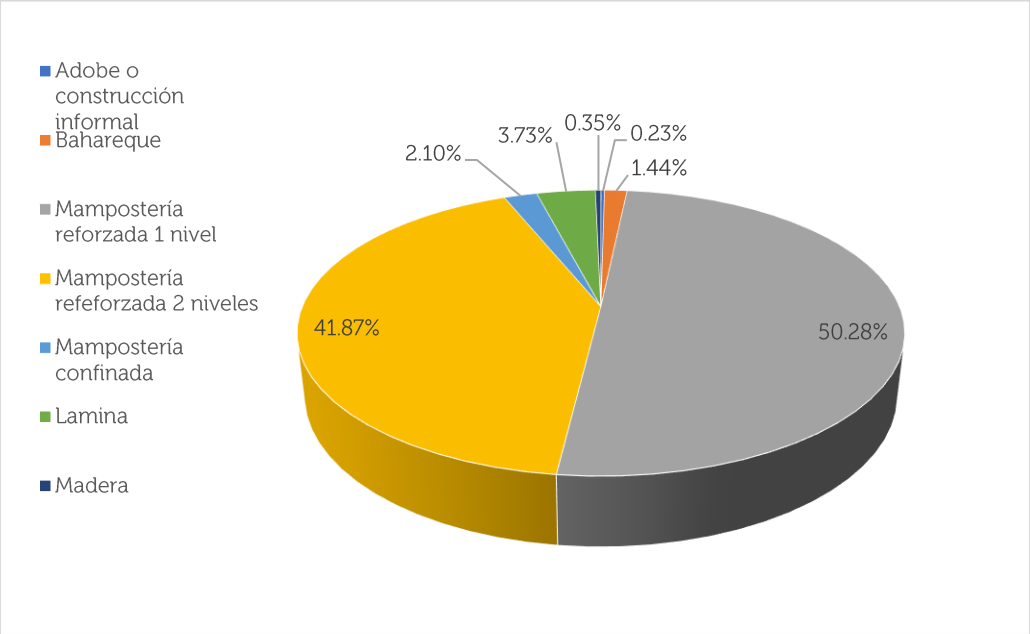
1.2 Definición De Las Tipologías Estructurales y su Distribución

Para realizar una clasificación por tipologías estructurales se parte de la información levantada en el Censo de Vivienda del 2007. A partir de esta base de datos se identifican las siguientes tipologías:

a. Viviendas construidas en ladrillo de adobe
b. Viviendas construidas en bahareque
c. Viviendas de mampostería reforzada de 1 nivel
d. Vivienda de mampostería reforzada de 2 niveles
e. Vivienda de mampostería de mampostería confinada
f. Vivienda precaria

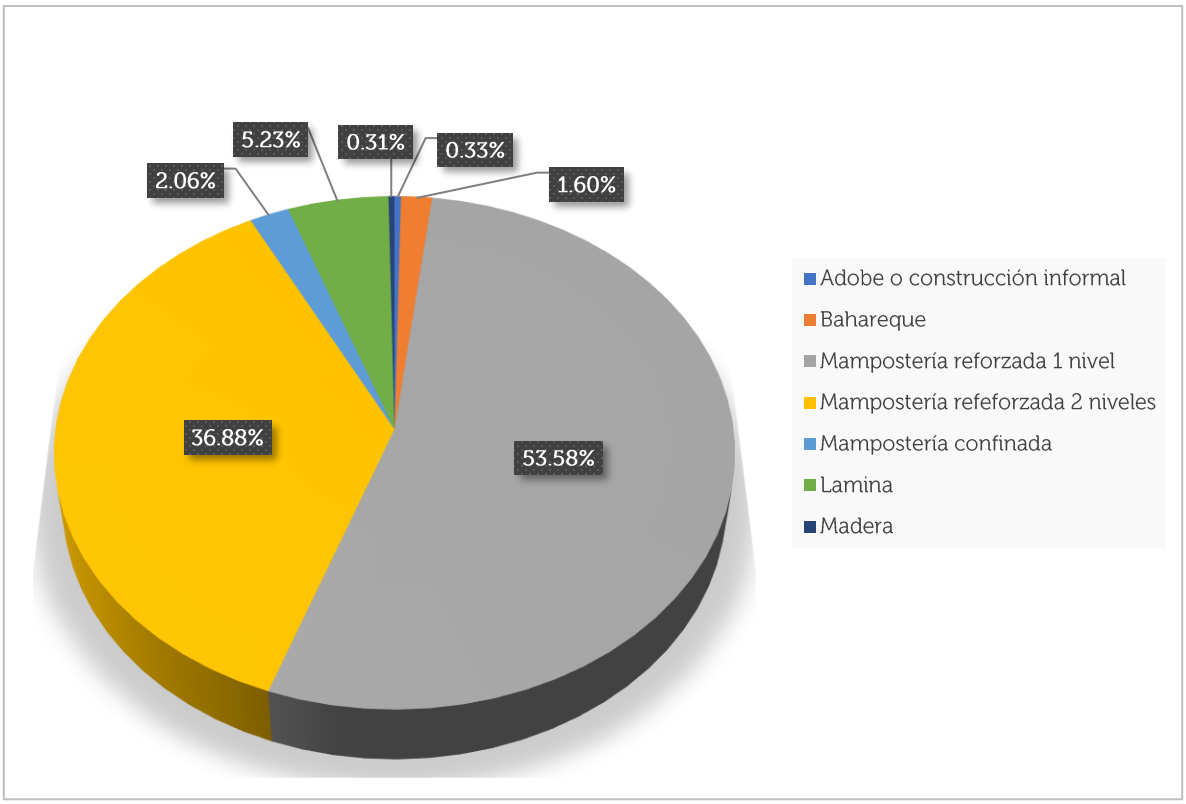
Para el área en estudio la distribución en porcentaje de área por tipología estructural, se presenta en la gráfica 1. Se observa que el mayor porcentaje es ocupado por las viviendas de mampostería reforzada de un nivel, seguido por las viviendas de mampostería reforzada de 2 niveles, en tercer lugar, las viviendas

construidas de láminas. En el caso de las viviendas de láminas se hace notar que generalmente están ubicadas en zonas precarias, con una alta densidad demográfica y alta densidad constructiva.



Gráfica 1: distribución en porcentaje del área por tipología estructural. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 2 se observa que la mayor población se ubica en la tipología estructura de mampostería reforzada de uno y dos niveles, el 5.23% de los ocupantes habitan viviendas de láminas las cuales se ubican en zonas precarias, el porcentaje de 0.35% corresponde a las viviendas de mampostería confinada, la cual fue posible solamente identificar a través de consultas a través de lugares de venta de vivienda en el internet, esta cantidad podría verse ligeramente incrementada al realizarse un recorrido de campo, con el objetivo de identificar este tipo de construcción. Las viviendas de adobe y bahareque representan el 3.54%, esta infraestructura por sus características estructurales propias es muy propensas al colapso de las mismas por la antigüedad que estas poseen, en estas últimas dos tipologías se ubican el 3.66% de la población total de 316,012 habitantes de todo el municipio de San Salvador.



Gráfica 2: Distribución de población por tipología estructural. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 2. Cálculo de costo por m^2 de edificación

Introducción

Los activos físicos expuestos ante una amenaza, poseen un valor monetario el cual debe de ser calculado de acuerdo al valor de mercado de los costos de construcción del país o región, este debe de enfocarse en calcular el costo por m^2 de reposición de la infraestructura, tomando en cuenta los costos directos de construcción y los indirectos de la misma.

2.1 Consideraciones para estimación de costos

La forma de presupuestar cada una de las tipologías más relevantes definidas para esta investigación fue a través del enfoque de "Estructura de desglose de obra" (EDO o por sus siglas en ingles WBS), conformado por capítulos propuestos de la siguiente forma:

a) Cimentación y subestructura.
b) Estructura de concreto.
c) Mampostería y acabados.
d) Estructura de techo y cubierta.
e) Puertas y ventanas.
f) Piso.
g) Sistema eléctrico.

Los costos presentados incluyen Impuesto sobre el valor agregado, costos indirectos del valor del 22% de los costos directos, en el caso de los costos indirectos se incluyen todos los costos de administración de campo, estimación de utilidades del 10% e imprevistos de obra.

Las tablas de costos que se presentan son costos por metro cuadrado de vivienda y se basan en información recopilada de planos constructivos del Ministerio de Vivienda y otros creados por el autor de este documento. Las tablas de costo están organizadas cronológicamente de forma descendente de acuerdo a los procesos constructivos, conformadas por capítulos y sub capítulos siguiendo un enfoque EDO.

Los costos directos de partidas se tomaron de la base de datos del FISDL, esta institución cuenta con costos directos de construcción, el cual lleva inmerso el costo de los MATERIALES y MANO DE OBRA, a estos costos se le suman los costos indirectos e IVA. Como parte del proceso también se calcularon los costos de

demolición en el caso del colapso total de la vivienda ya que este es un punto no solamente económico, sino que ambiental por la cantidad de materiales de desecho que se producirá en caso de viviendas colapsadas. Referente a la variación en el costo por m^2 de construcción entre los departamentos de Santa Ana, San Miguel y San Salvador, se identificó que es muy mínima, caso contrario al valor de la tierra que cambia radicalmente por la plusvalía del sitio, en la sección de anexos se exponen las distintas tipologías estructurales consultadas en internet para las zonas homogéneas definidas para la ciudad de San Salvador.
A continuación, se presenta las tablas que resumen el estimado de costos por m^2 para cada una de las tipologías estructurales definidas para el sector vivienda:

2.1 Casa de adobe

La construcción de viviendas de adobe es una actividad muy común en áreas rurales de El Salvador, en las zonas urbanas se observa que este tipo de construcción se conserva más en sus centros históricos, casas antiguas, o sitios de habitación multifamiliar comúnmente denominados "*mesones*". En general este sistema constructivo se conforma por bloques de tierra secados al sol, generalmente fabricados con el suelo del lugar, este tipo de sistema posee deficiencias estructurales considerables ante las solicitaciones mecánicas inducidas por sismo, por la falta de la aportación adecuada de mecanismo de anclaje entre paredes, falta de refuerzo en las esquinas de huecos de puertas y ventanas.

Tabla 1: Calculo de costo por m^2 para vivienda de Adobe

Casa de adobe								
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDA	C.D.	C.I. (23%)	IVA(13%)	P.U.	SUB TOTAL
1	CIMENTACION Y SUBESTRUCTURA							$1,191.51
1.1	Solera de fundación conformada en piedra cuarta ligada con mortero 1:3	6.912	m^3	$89.95	$20.69	$14.38	$125.02	$864.14
1.2	Solera de sobre cimiento conformada en piedra cuarta ligado con mortero 1:3	2.58975	m^4	$90.95	$20.92	$14.54	$126.41	$327.37
2	ESTRUCTURA DE CONCRETO							$531.70
2.1	COLUMNA DE LADRILLO VISTO 0.38X0.38 m COLUMNA DE CONCRETO 0.20X0.20 M; f'c=217 kg/cm2	7.62	ml	$42.25	$9.72	$6.76	$58.73	$447.52
2.2	Zapata de 0.60X0.60X0.30 m ref. #3@0.14 m A.S.; f'c=210kg/cm2	3	c/u	$20.19	$4.64	$3.23	$28.06	$84.18

3	MAMPOSTERIA Y ACABADOS							$4,704.70
3.1	Para de ladridrollo de adobe	80.08	m^2	$15.23	$3.50	$2.43	$21.16	$1,694.49
3.2	REPELLO EN PARED DE ADOBE	80.08	m^2	$19.03	$4.38	$3.04	$26.45	$2,118.12
3.3	Pintura	160.16	m^2	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$892.09
4	ESTRUCTURA DE TECHO Y CUBIERTA							$2,691.83
4.1	ESTRUCTURA DE MADERA PARA TECHO	58.29	m^2	$21.23	$4.88	$3.39	$29.50	$1,719.56
4.2	CUBIERTA DE TECHO C/LAMINA ZINC ALUM SIN ESTRUCTUR	58.29	m2	$12.00	$2.76	$1.92	$16.68	$972.28
5	PUERTAS Y VENTANAS							$1,712.01
5.1	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE VENTANA DE MADERA 1.60X1.20 m; CONTRAMARCO DE LAUREL 1"X4"	3	c/u	$168.05	$38.65	$26.87	$233.57	$700.71
5.2	Puerta de madera con estruc. cedro y forro de plywood 1/4" 2.0x1.0 (incl mocheta y chapa)	3	c/u	$242.54	$55.78	$38.78	$337.10	$1,011.30
6	PISO							$1,579.88
6.1	Piso formado en piedra cuarta proporción 1:3 y repellado	31.1	m2	$21.21	$4.88	$3.39	$29.48	$916.83
6.2	PISO DE LADRILLO DE CEMENTO 25X25 CMS. (COLOR ROJO)	31.1	m2	$15.34	$3.53	$2.45	$21.32	$663.05
7	SISTEMA ELECTRICO	1	S.G.	$1,500.00	$345.00	$239.85	$2,084.85	$2,084.85
TOTAL								$ 14,496.48
TOTAL								$248.70

Casa de adobe colapsada o a demoler

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDA	C.D.	C.I. (23%)	IVA (13%)	P.U.	SUB TOTAL
1	DEMOLICION Y DESALOJO							
1.1	Desmontaje de cubierta de techo	58.29	m2	1.76	$0.40	$0.28	$2.44	$142.23
1.2	Desmontaje de estructura de techo de madera	58.29	m2	2.4	$0.55	$0.38	$3.33	$194.11
1.3	Desmontaje de ventanas	3	c/u	2.51	$0.58	$0.40	$3.49	$10.47
1.4	Desmontaje de puertas	3	c/u	4.41	$1.01	$0.70	$6.12	$18.36
1.5	Demolición de paredes	80.08	m2	3.77	$0.87	$0.60	$5.24	$419.62
1.6	Desalojo de material	67.326	m3	10	$2.30	$1.60	$13.90	$935.83
TOTAL								$1,720.61
Costo por m^2 Demolición								$29.52

La imagen 7 muestra el plano para una construcción de adobe, realizado por el Ministerio de Vivienda.

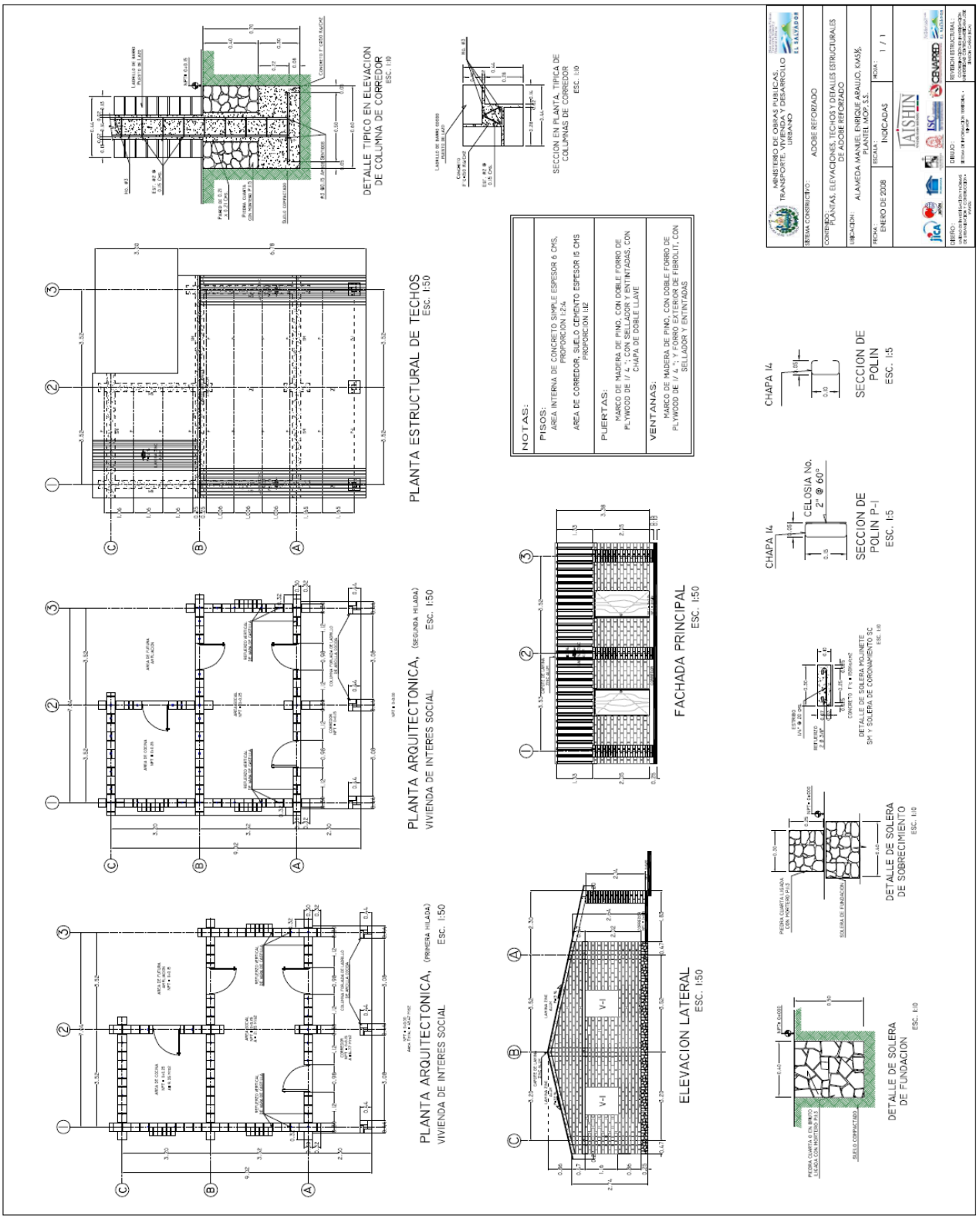


Imagen 8: plano tipo del adobe del Ministerio de Vivienda.

2.2 Casa de bahareque

La casa de bahareque en El Salvador, al igual que la casa de adobe, se refiere a una tipología estructural que es más comúnmente usada en zonas rurales, centros históricos de las ciudades principales de nuestro país o en zonas de asentamiento precarios. Este tipo de edificación se encuentra constituida por paredes con elementos de relleno conformado por suelo del lugar, empleando como elementos de refuerzo bambú o madera. La construcción de bahareque es muy susceptible a ser dañada por sismos, debido a que no poseen características mecánicas para resistir sismos de mediana a considerable magnitud.

Generalmente en el país el techo de esta edificación es de madera, la cual se vuelve un detonante crucial si se encuentra en mal estado para que se presente el colapso de la estructura. A continuación, se muestra el cálculo del costo por m^2 para este tipo de edificación para el cual se emplearon los mismos planos de vivienda de adobe, cambiándole exclusivamente el sistema de construcción de las paredes.

Tabla 2: Calculo de costo por m^2 para vivienda de Bahareque

CASA DE BAHAREQUE DE 1 NIVEL								
It.	Descripción	Cantidad	Unida	C.D.	C.I. (23%)	IVA (13%)	P.U.	Sub Total
1	CIMENTACION Y SUBESTRUCTURA							$1,191.51
1.1	Solera de fundación conformada en piedra cuarta ligada con mortero 1:3	6.912	m^3	$89.95	$20.69	$14.38	$125.02	$864.14
1.2	Solera de sobre cimiento conformada en piedra cuarta ligado con mortero 1:3	2.58975	ml	$90.95	$20.92	$14.54	$126.41	$327.37
2	ESTRUCTURA DE CONCRETO							$531.70
2.1	COLUMNA DE LADRILLO VISTO 0.38X0.38 m COLUMNA DE CONCRETO 0.20X0.20 M; f'c=217 kg/cm2	7.62	ml	$42.25	$9.72	$6.76	$58.73	$447.52
2.2	Zapata de 0.60X0.60X0.30 m ref. #3@0.14 m A.S.; f'c=210kg/cm2	3	C/U	$20.19	$4.64	$3.23	$28.06	$84.18
3	MAMPOSTERIA Y ACABADOS							$4,369.16
3.1	Pared de bahareque	80.08	m^2	$12.21	$2.81	$1.95	$16.97	$1,358.96
3.2	REPELLO EN PARED DE ADOBE	80.08	m^2	$19.03	$4.38	$3.04	$26.45	$2,118.12

3.3	Pintura	160.16	m^2	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$892.09
4	ESTRUCTURA DE TECHO Y CUBIERTA							$2,691.83
4.1	ESTRUCTURA DE MADERA PARA TECHO	58.29	m^2	$21.23	$4.88	$3.39	$29.50	$1,719.56
4.2	CUBIERTA DE TECHO C/LAMINA ZINC ALUM SIN ESTRUCTUR	58.29	m^2	$12.00	$2.76	$1.92	$16.68	$972.28
5	PUERTAS Y VENTANAS							$1,712.01
5.1	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE VENTANA DE MADERA 1.60X1.20 m; CONTRAMARCO DE LAUREL 1"X4"	3	c/u	$168.05	$38.65	$26.87	$233.57	$700.71
5.2	Puerta de madera con estruc. cedro y forro de plywood 1/4" 2.0x1.0 (incl mocheta y chapa)	3	c/u	$242.54	$55.78	$38.78	$337.10	$1,011.30
6	PISO							$1,579.88
6.1	Piso formado en piedra cuarta proporción 1:3 y repellado	31.1	m^2	$21.21	$4.88	$3.39	$29.48	$916.83
6.2	PISO DE LADRILLO DE CEMENTO 25X25 CMS. (COLOR ROJO)	31.1	m^2	$ 15.34	$3.53	$2.45	$21.32	$663.05
7	SISTEMA ELECTRICO	1	S.G.	$1,500.00	$345.00	$239.85	$2,084.85	$2,084.85
TOTAL								$ 14,160.95
COSTO POR M^2								$ 242.94

CASA DE BAHAREQUE COLAPSADA O A DEMOLER								
It.	Descripción	Cantidad	Unidad	C.D.	C.I. (23%)	Iva (13%)	P.U.	Sub Total
1	DEMOLICION Y DESALOJO							
1.1	Desmontaje de cubierta de techo	58.29	m^2	1.76	$0.40	$0.28	$2.44	$142.23
1.2	Desmontaje de estructura de techo de madera	58.29	m^2	2.4	$0.55	$0.38	$3.33	$194.11
1.3	Desmontaje de ventanas	3	c/u	2.51	$0.58	$0.40	$3.49	$ 10.47
1.4	Desmontaje de puertas	3	c/u	4.41	$1.01	$0.70	$6.12	$ 18.36
1.5	Demolición de paredes	80.08	m^2	3.77	$0.87	$0.60	$5.24	$419.62
1.6	Desalojo de material	67.326	m^3	10	$2.30	$1.60	$ 13.90	$935.83
TOTAL								$ 1,720.61
COSTO POR M^2 DEMOLICION								$ 29.52

2.3 Casa de mampostería reforzada de 1 nivel

La vivienda de mampostería reforzada, consiste en estructuras que emplean como material principal para la conformación de paredes block de concreto. En el caso presentado las paredes de las estructuras fueron construidas con block de 15 de espesor, las paredes fueron desplantadas en zapatas corridas. Esta

estructura fue diseñada considerando la normativa IBC, ACI318-14, junto con la normativa por sismo de El Salvador NTDS. La cubierta de techo está conformada por vigas macomber como elementos primarios y elementos secundarios constituidos por polín C.

En el país el sistema constructivo en mampostería reforzada de block, es bastante común en el sector vivienda, para un nivel como para 2 niveles. Un problema que se presenta con este sistema constructivo es la producción de unidades de mampostería por empresas sin ningún tipo de control de calidad.
En la tabla 3 se presente el cálculo del costo por m^2 para la tipología estructural escrita:

Tabla 3: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería Reforzada de 1 nivel.

Casa De Mampostería Reforzada De Block Para 1 Nivel								
Item	Descripción	Cantidad	Unida	C.D.	C.I. (23%)	IVA (13%)	P.U.	Sub Total
1	CIMENTACION Y SUBESTRUCTURA							$8,749.19
1.1	Zapata corrida 0.60X0.25 m ref. #3@0.10 m A.S. 1L; f'c=210 kg/cm2	17.324125	m^3	$351.23	$ 80.78	$ 56.16	$488.17	$8,457.12
1.2	Zapata e=0.35 m; ref. #5@0.15 A.S. 1L; f'c=210Kg/cm2	0.896	m^3	$234.53	$ 53.94	$ 37.50	$325.97	$ 292.07
	TENSOR 30X30CMS F´C=280 4#4 ESTRIBO #3 Q 12 CMS	1.05	m^3	$366.00	$ 84.18	$ 58.52	$508.70	$ 534.14
2	ESTRUCTURA DE CONCRETO							$ 7,926.87
2.1	COLUMNA CIRCULAR D=50CMS 4#7+4#6 Y EST. #3@10CMS	0.52	m^3	$623.27	$143.35	$ 99.66	$866.28	$ 450.47
2.2	Encofrado de columna circular de diámetro hasta 0.40 m; Incluye castillo	4.16	ml	$ 24.26	$5.58	$3.88	$ 33.72	$ 140.28
2.3	NERVIO 1 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	26.5	ml	$ 60.70	$ 13.96	$9.71	$ 84.37	$ 2,235.81
2.4	NERVIO 2 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM3	5.3	ml	$ 78.23	$ 17.99	$ 12.51	$108.73	$ 576.27
2.5	NERVIO 3(55X15) 8#4EST+2GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 74.13	$ 17.05	$ 11.85	$103.03	$ 273.03
2.6	NERVIO 4 (55X15) 8#4EST+2GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 81.54	$ 18.75	$ 13.04	$113.33	$ 300.32
2.7	Nervio 5 en L de 40x15+25x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	2.65	ml	$ 73.27	$ 16.85	$ 11.72	$101.84	$ 269.88

2.8	Nervio 6 en L de 40x15+35x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	5.3	ml	$ 87.92	$ 20.22	$ 14.06	$122.20	$ 647.66
2.9	Nervio 7 en L de 55x15+30x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	5.3	ml	$102.87	$ 23.66	$ 16.45	$142.98	$ 757.79
2.10	NERVIO 8 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 91.05	$ 20.94	$ 14.56	$126.55	$ 335.36
2.11	Enconfrado de nervio	114.32	ml	$ 12.21	$2.81	$1.95	$ 16.97	$1,940.01
3	MAMPOSTERIA Y ACABADOS							$44,533.66
3.1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40 con RV#4@0.40+RH#2@0.20 grout de 140Kg/cm y acero grado 40	373.135	m^2	$ 39.80	$9.15	$6.36	$ 55.31	$ 20,638.10
3.2	REPELLO EN PARED DE ADOBE	746.27	m^2	$ 19.03	$4.38	$3.04	$ 26.45	$ 19,738.84
3.3	Pintura	746.27	m^2	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$4,156.72
4	ESTRUCTURA DE TECHO Y CUBIERTA		m^2					$12,876.23
4.1	CUBIERTA DE TECHO C/LAMINA ZINC ALUM SIN ESTRUCTUR	476.23	m^2	$ 12.00	$2.76	$1.92	$ 16.68	$7,943.52
4.2	POLIN C 6 PULG. ENCAJUELADO	210.98	ml	$ 16.82	$3.87	$2.69	$ 23.38	$4,932.71
4.3	Viga macomber VM-4 h=0.50m 4L2.5"x2.5"x1/4" + 2CEL L1.5"x1.5x3/16"@60° inc conexiones	22.25	ml	$ 93.93	$ 21.60	$ 15.02	$130.55	$2,904.74
4.4	Viga macomber VM-3 H=0.40m 2tubos de 3x3x3/16" + 1CEL de tubo de 2x2x3/16" A 60° (Inc conexiones)	5.55	ml	$ 79.73	$ 18.34	$ 12.75	$110.82	$ 615.05
4.5	V.M."]"H=28 CMS 2 ANG.1¼"X3/16"+1[3/8" A 60°	19.77	ml	$ 10.31	$2.37	$1.65	$ 14.33	$ 283.30
	CIELO FALSO FIBROCEMENTO 4`X2`X6MM SUSP.ALUM	299.82	m^2	$ 12.00	$2.76	$1.92	$ 16.68	$ 5,001.00
5	PUERTAS Y VENTANAS							$ 4,447.75
5.1	Ventanas tipo boirier	11	m^2	$250.00	$ 57.50	$ 39.98	$347.48	$ 3,822.28
5.2	Puerta de madera con estruc. cedro y forro de plywood 1/4" 2.0x1.0 (incl mocheta y chapa)	3	c/u	$150.00	$ 34.50	$ 23.99	$208.49	$ 625.47
6	PISO							$ 15,180.37
6.1	Piso de concreto 210 Kg/cm2. c/electromalla 6/6 e=7 cms (Incluye trazo y encofrado)	20.9874	m^3	$210.00	$ 48.30	$ 33.58	$291.88	$ 6,125.80
6.2	PISO DE CERAMICA (41*41)	299.82	m^2	$ 21.73	$5.00	$3.47	$ 30.20	$9,054.56

7	SISTEMA ELECTRICO	1	S.G.	$ 2,500.00	$575.00	$399.75	$ 3,474.75	$3,474.75
TOTAL								$97,188.81
COSTO POR M^2								$ 324.16

CASA DE MAMPOSTERIA REFORZADA DE BLOCK COLAPSADA O A DEMOLER								
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDA	C.D.	C.I. (23%)	IVA(13%)	P.U.	SUB TOTAL
1	DEMOLICION Y DESALOJO							
1.1	Desmontaje de cubierta de techo	476.23	m^2	1.76	$0.40	$0.28	$2.44	$1,162.00
1.2	Desmontaje de estructura de techo de madera	476.23	m^2	2.4	$0.55	$0.38	$3.33	$1,585.85
1.3	Desmontaje de ventanas	11	m^2	2.51	$0.58	$0.40	$3.49	$ 38.39
1.4	Desmontaje de puertas	3	c/u	4.41	$1.01	$0.70	$6.12	$ 18.36
1.5	Demolición de paredes	373.135	m^2	3.77	$0.87	$0.60	$5.24	$1,955.23
1.6	Desalojo de material	183.963675	m^3	10	$2.30	$1.60	$ 13.90	$2,557.10
TOTAL								$7,316.92
COSTO POR M^2 DEMOLICION								$ 24.40

2.4 Casa de mampostería reforzada de 2 niveles

Esta tipología estructural es muy común en la construcción de viviendas unifamiliares construidas en serie en la ciudad de San Salvador, las paredes son conformadas como de carga, y en ellas de desplanta el sistema estructural de entrepiso y la cubierta de techo. Los planos empleados para la estimación del costo de reposición contienen las siguientes características: paredes de mampostería reforzada de block de 15 cms de espesor, todas las celdas llenas con bastón #4 @40 cms, sistema de fundación constituido por zapata corrida, entrepiso construido con losa aligerada del tipo nervada formado por vigueta y bovedilla, en el caso de la cubierta de techo fue planificada construirla con polín C, y vigas macomber, con una cubierta de láminas de fibrocemento. La normativa que se empleó para el diseño de dicho sistema fue: IBC, ACI318-14, junto con la normativa por sismo de El Salvador NTDS.

A continuación, se presenta el cálculo del costo por m2 de este tipo de infraestructura:

Tabla 4: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería Reforzada de 2 niveles.

Casa De Mampostería Reforzada De Block De 2 Niveles								
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDA	C.D.	C.I. (23%)	IVA (13%)	P.U.	SUB TOTAL
1	CIMENTACION Y SUBESTRUCTURA							$9,548.02
1.1	Zapata corrida 0.60X0.25 m ref. #3@0.10 m A.S. 1L; f'c=210 kg/cm2	18.9605	m^3	$351.23	$ 80.78	$ 56.16	$488.17	$9,255.95

1.2	Zapata e=0.35 m; ref. #5@0.15 A.S. 1L; f'c=210Kg/cm2	0.896	m^3	$234.53	$ 53.94	$ 37.50	$325.97	$ 292.07
	TENSOR 30X30CMS F´C=280 4#4 ESTRIBO #3 Q 12 CMS	1.05	m^3	$366.00	$ 84.18	$ 58.52	$508.70	$ 534.14
2	ESTRUCTURA DE CONCRETO							$27,235.37
2.1	COLUMNA CIRCULAR D=50CMS 4#7+4#6 Y EST. #3@10CMS	0.52	m^3	$623.27	$143.35	$ 99.66	$866.28	$ 450.47
2.2	Encofrado de columna circular de diámetro hasta 0.40 m; Incluye castillo	4.16	ml	$ 24.26	$5.58	$3.88	$ 33.72	$ 140.28
2.3	NERVIO 1 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	26.5	ml	$ 60.70	$ 13.96	$9.71	$ 84.37	$2,235.81
2.4	NERVIO 2 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM3	5.3	ml	$ 78.23	$ 17.99	$ 12.51	$108.73	$ 576.27
2.5	NERVIO 3(55X15) 8#4EST+2GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 74.13	$ 17.05	$ 11.85	$103.03	$ 273.03
2.6	NERVIO 4 (55X15) 8#4EST+2GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 81.54	$ 18.75	$ 13.04	$113.33	$ 300.32
2.7	Nervio 5 en L de 40x15+25x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	2.65	ml	$ 73.27	$ 16.85	$ 11.72	$101.84	$ 269.88
2.8	Nervio 6 en L de 40x15+35x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	5.3	ml	$ 87.92	$ 20.22	$ 14.06	$122.20	$ 647.66
2.9	Nervio 7 en L de 55x15+30x15 Ref. 8#4+2E#3@0.15 concreto 210 y fy=2800 Kg/cm2 Incluye encofrado	5.3	ml	$102.87	$ 23.66	$ 16.45	$142.98	$ 757.79
2.10	NERVIO 8 (40X15) 6#4+EST+GAN#3@15. F´C=210KG/CM2	2.65	ml	$ 91.05	$ 20.94	$ 14.56	$126.55	$ 335.36
2.11	Enconfrado de nervio	114.32	ml	$ 12.21	$2.81	$1.95	$ 16.97	$1,940.01
2.12	Losa de concreto de espesor mínimo e=0.12m; ref. long #4@0.15m en 2L+ref transv#3@0.125m en 2L; incluye forjado de gradas de concreto y encofrado	1.68	m^3	$528.91	$121.65	$ 84.57	$735.13	$1,235.02

2.13	LOSA COPRESA VT1-20 REC 5CM F´C=210+REF #2@25+REFUERZO #4 PARA BASTONES	156.66	m^2	$ 59.10	$ 13.59	$9.45	$ 82.14	$ 12,868.05
2.14	VIGA 40X20 4#5+2#3+EST#3@15 F´C=210	1.26	m^3	$696.63	$160.22	$111.39	$968.24	$1,219.98
2.15	VIGA 40X15 4#5+2#3+EST#3@15 F´C=210	4.9932	m^3	$522.47	$120.17	$ 83.54	$726.18	$3,625.96
2.16	Viga de concreto de 25x20 cms. 4 # 5. Est. # 3 @ 8 cms	4.65	ml	55.63	$ 12.79	$8.89	$ 77.31	$ 359.49
3	MAMPOSTERIA Y ACABADOS							$89,260.19
3.1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40 con RV#4@0.40+RH#2@0.20 grout de 140Kg/cm y acero grado 40	747.886	m^2	$ 39.80	$9.15	$6.36	$ 55.31	$ 41,365.57
3.2	REPELLO EN PARED DE ADOBE	1495.772	m^2	$ 19.03	$4.38	$3.04	$ 26.45	$ 39,563.17
3.3	Pintura	1495.772	m^2	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$8,331.45
4	ESTRUCTURA DE TECHO Y CUBIERTA							$4,131.72
4.1	CUBIERTA DE TECHO C/LAMINA ZINC ALUM SIN ESTRUCTUR	156.66	m^2	$ 12.00	$2.76	$1.92	$ 16.68	$2,613.09
4.2	POLÍN "C" DE 6" X 1/16"	199.82	ml	$5.47	$1.26	$0.87	$7.60	$1,518.63
4.3	POLÍN "C" DE 4" X 1/16"	35.65	ml	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$ 198.57
4.4	Viga macomber VM-4 h=0.50m 4L2.5"x2.5"x1/4" + 2CEL L1.5"x1.5x3/16"@60° inc conexiones	18.9	ml	$ 93.93	$ 21.60	$ 15.02	$130.55	$2,467.40
4.5	Viga macomber VM-3 H=0.40m 2tubos de 3x3x3/16" + 1CEL de tubo de 2x2x3/16" A 60° (Inc conexiones)	5.1	ml	$ 79.73	$ 18.34	$ 12.75	$110.82	$ 565.18
4.6	V.M.¯]"H=28 CMS 2 ANG.1¼"X3/16"+1Í3/8" A 60°	5.2	ml	$ 10.31	$2.37	$1.65	$ 14.33	$ 74.52
4.7	CIELO FALSO FIBROCEMENTO 4`X2`X6MM SUSP.ALUM	156.66	m^2	$ 12.00	$2.76	$1.92	$ 16.68	$2,613.09
5	PUERTAS Y VENTANAS							$18,138.48
5.1	Ventanas tipo boirier	45	m^2	$250.00	$ 57.50	$ 39.98	$347.48	$ 15,636.60
5.2	Puerta de madera con estruc. cedro y forro de plywood 1/4" 2.0x1.0 (incl mocheta y chapa)	12	c/u	$150.00	$ 34.50	$ 23.99	$208.49	$2,501.88
6	PISO							$ 17,870.54

6.1	Piso de concreto 210 Kg/cm2. c/electromalla 6/6 e=7 cms (Incluye trazo y encofrado)	18.1657	m^3	$210.00	$ 48.30	$ 33.58	$291.88	$5,302.20
6.2	PISO DE CERAMICA (41*41)	416.17	m^2	$ 21.73	$5.00	$3.47	$ 30.20	$ 12,568.33
7	SISTEMA ELECTRICO	1	S.G.	$ 4,500.00	$ 1,035.00	$719.55	$ 6,254.55	$6,254.55
TOTAL								$172,438.87
COSTO POR M^2								$ 625.10

Casa De Mampostería Reforzada De Block De 2 Niveles Colapsada O A Demoler								
Item	Descripción	Cantidad	Unida	C.D.	C.I. (23%)	Iva (13%)	P.U.	Sub Total
1	DEMOLICION Y DESALOJO							
1.1	Desmontaje de cubierta de techo	156.66	m^2	1.76	$0.40	$0.28	$2.44	$ 382.25
1.2	Desmontaje de estructura de techo de madera	156.66	m^2	2.4	$0.55	$0.38	$3.33	$ 521.68
1.3	Desmontaje de ventanas	45	m^2	2.51	$0.58	$0.40	$3.49	$ 157.05
1.4	Desmontaje de puertas	12	c/u	4.41	$1.01	$0.70	$6.12	$ 73.44
1.5	Demolición de paredes	747.886	m^2	3.77	$0.87	$0.60	$5.24	$3,918.92
1.6	Desalojo de material	201.17295	m^3	10	$2.30	$1.60	$ 13.90	$2,796.30
TOTAL								$7,849.64
COSTO POR M^2 DEMOLICION								$ 28.46

2.5 Casa de mampostería confinada de 1 nivel

En el caso de las viviendas de mampostería confinada de barro, estas se ubican en lugar con bastante antigüedad ya que es un sistema constructivo que es menos común emplear en las zonas urbanas del país, este tipo de construcción se constituye por columnas tipo nervio, vigas intermedias y vigas de coronamiento de concreto, con elementos de pared constituido por ladrillos de barro, las cuales quedan confinadas por los elementos de concreto. La técnica de construcción y disposición de los elementos de mampostería en el medio es de: lazo, en raras ocasiones se ve de canto o de trinchera, en la investigación de precios de mercado que se realizó para esta investigación, se ubicaron una pequeña cantidad de esta tipología estructural por área homogénea. Con recorridos de campo y levantamiento de fichas esta cantidad de casas podría aumentar en el modelo de exposición ligeramente para la ciudad de San Salvador.

Tabla 5: Calculo de costo por m2 para vivienda de Mampostería confinada de barro.

CASA DE MAMPOSTERIA DE BARRO CONFINADO								
Item	Descripción	Cantidad	Unida	C.D.	C.I. (23%)	Iva (13%)	P.U.	Sub Total
1	CIMENTACION Y SUBESTRUCTURA							$8,620.10
1.1	Solera de fundación 0.30x0.20m; Ref. 3#3+G#2@0.15m; f`c=210Kgf/cm2; inc encofrado	17.324125	m^3	$351.23	$ 80.78	$ 56.16	$488.17	$8,457.12
1.2	Zapata de 0.60X0.60X0.30 m ref. #3@0.14 m A.S.; f'c=210kg/cm2	0.5	m^3	$234.53	$ 53.94	$ 37.50	$325.97	$ 162.99
2	ESTRUCTURA DE CONCRETO							$7,452.06
2.1	COLUMNA DE LADRILLO VISTO 0.38X0.38 m COLUMNA DE CONCRETO 0.20X0.20 M; f'c=217 kg/cm2	28.5	ml	$ 42.25	$9.72	$6.76	$ 58.73	$1,673.81
2.2	SOLERA INTERMDIA 15X15CM 4#3 Y EST. #2 @ 15CMS	70.5	ml	$ 12.36	$2.84	$1.98	$ 17.18	$1,211.19
2.3	Nervio de 0.15x0.15 m; ref. 4#3+Est#2@0.15 m; f'c=210Kg/cm2; inc encofrado	66.9	ml	$ 11.64	$2.68	$1.86	$ 16.18	$1,082.44
2.4	Alacrán de 0.10x0.15 m; ref. 2#3+G#2@0.15 m; f'c=210Kg/cm2; inc encofrado	14.8	ml	$9.12	$2.10	$1.46	$ 12.68	$ 187.66
2.5	Cargadero de 0.10x0.15 m; ref. 2#3+G#2@0.15 m; f'c=210Kg/cm2; inc encofrado	32	ml	$ 74.13	$ 17.05	$ 11.85	$103.03	$3,296.96
3	MAMPOSTERIA Y ACABADOS							$9,184.90
3.1	Pared ladrillo de barro p/lazo 1er BLOCK M= 1:4	184.14	m^2	$ 19.25	$4.43	$3.08	$ 26.76	$4,927.59
3.2	Repello de superficies verticales e=0.02 M= 1:4	368.28		$4.31	$0.99	$0.69	$5.99	$2,206.00
3.3	Pintura	368.28	m^2	$4.01	$0.92	$0.64	$5.57	$2,051.32
4	ESTRUCTURA DE TECHO Y CUBIERTA							$5,793.26
4.1	CUBIERTA DE TECHO C/LAMINA ZINC ALUM SIN ESTRUCTUR	130.31	m^2	$ 12.00	$2.76	$1.92	$ 16.68	$2,173.57
4.2	Polín C 4"x2" CH16 (Incluye 2manos anticorrosivo y 1 mano de aceite+pin de 3/8" para rigidizar)	154.82	ml	$ 16.82	$3.87	$2.69	$ 23.38	$3,619.69
5	PUERTAS Y VENTANAS							$1,224.61
5.1	VENTANA CELOSÍA VIDRIO NEVADOALUM.LIVIANO S/AN	11.12	m^2	$ 25.28	$5.81	$4.04	$ 35.13	$ 390.65

5.2	Puerta de madera con estruc. cedro y forro de plywood 1/4" 2.0x1.0 (incl mocheta y chapa)	4	c/u	$150.00	$ 34.50	$ 23.99	$208.49	$ 833.96
6	PISO							$4,787.66
6.1	Piso de concreto 210 Kg/cm2. c/electromalla 6/6 e=7 cms (Incluye trazo y encofrado)	8.0269	m^3	$210.00	$ 48.30	$ 33.58	$291.88	$2,342.89
6.2	PISO DE LADRILLO DE CEMENTO 25X25 CMS. (COLOR ROJO)	114.67	m^2	$ 15.34	$3.53	$2.45	$ 21.32	$2,444.76
7	SISTEMA ELECTRICO	1	S.G.	$ 1,500.00	$345.00	$239.85	$ 2,084.85	$2,084.85
TOTAL								$39,147.44
COSTO POR M^2								$ 341.39

CASA DE MAMPOSTERIA DE BARRO CONFINADA COLAPSADA O A DEMOLER								
Item	Descripción	Cantidad	Unida	C.D.	C.I. (23%)	Iva (13%)	P.U.	Sub Total
1	DEMOLICION Y DESALOJO							
1.1	Desmontaje de cubierta de techo	130.31	m^2	1.76	$0.40	$0.28	$2.44	$ 317.96
1.2	Desmontaje de estructura de techo de madera	130.31	m^2	2.4	$0.55	$0.38	$3.33	$ 433.93
1.3	Desmontaje de ventanas	11.12	m^2	2.51	$0.58	$0.40	$3.49	$ 38.81
1.4	Desmontaje de puertas	4	c/u	4.41	$1.01	$0.70	$6.12	$ 24.48
1.5	Demolición de paredes	184.14	m^2	3.77	$0.87	$0.60	$5.24	$ 964.89
1.6	Desalojo de material	68.7966	m^3	10	$2.30	$1.60	$ 13.90	$ 956.27
TOTAL								$2,736.34
COSTO POR M^2 DEMOLICION								$ 23.86

La tabla 6 presenta el consolidado de la estimación del costo de reposición y el número total de habitantes por tipología estructural para la ciudad de San Salvador. Esta estimación tal y como se ha podido observar en las tablas, considera una construcción estándar según norma, con acabados básicos. El costo total estimado de toda la infraestructura del sector vivienda expuesta asciende a la cantidad de $7.5 billones de dólares.

Tabla 6: Consolidado modelo de exposición física y humana por tipología estructural.

Tipología	Descripción	Área	Costo	Ocupantes
1	Adobe o construcción informal	38,272.6718	$ 9,518,413.48	1051
2	Bahareque	242,226.808	$58,846,580.78	5034
3	Mampostería reforzada 1 nivel	8,470,616.2	$ 2,745,834,947.24	168325
4	Mampostería reforzada 2 niveles	7,054,965	$ 4,410,058,621.50	115843
5	Mampostería confinada	353,664.866	$114,644,003.06	6465
6	Lamina	628,983.737	$152,805,309.05	16442
7	Madera	59,149.7172	$14,369,832.30	976

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 3 las casas de mampostería reforzada de dos niveles ocupan el 58.75% del valor total de los 7.5 billones de dólares, seguido por las viviendas de mampostería reforzada de un nivel con un porcentaje de 36.58%. Los mayores costos por área homogénea se obtuvieron para los sitios centrales del municipio de San Salvador en los cuales podemos destacar las zonas homogéneas: La Escalón, San Benito, Flor Blanca, Centro de San Salvador, Barrio San Miguelito y La Miramonte.

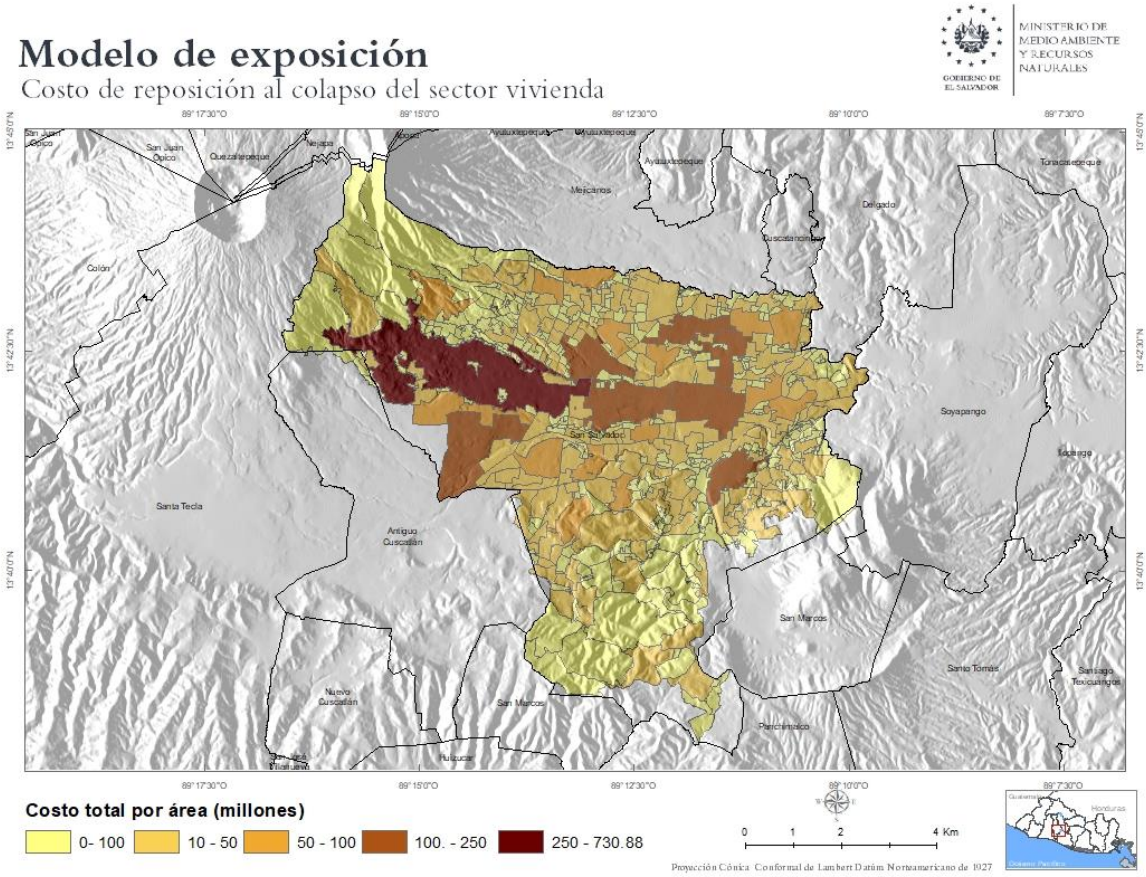
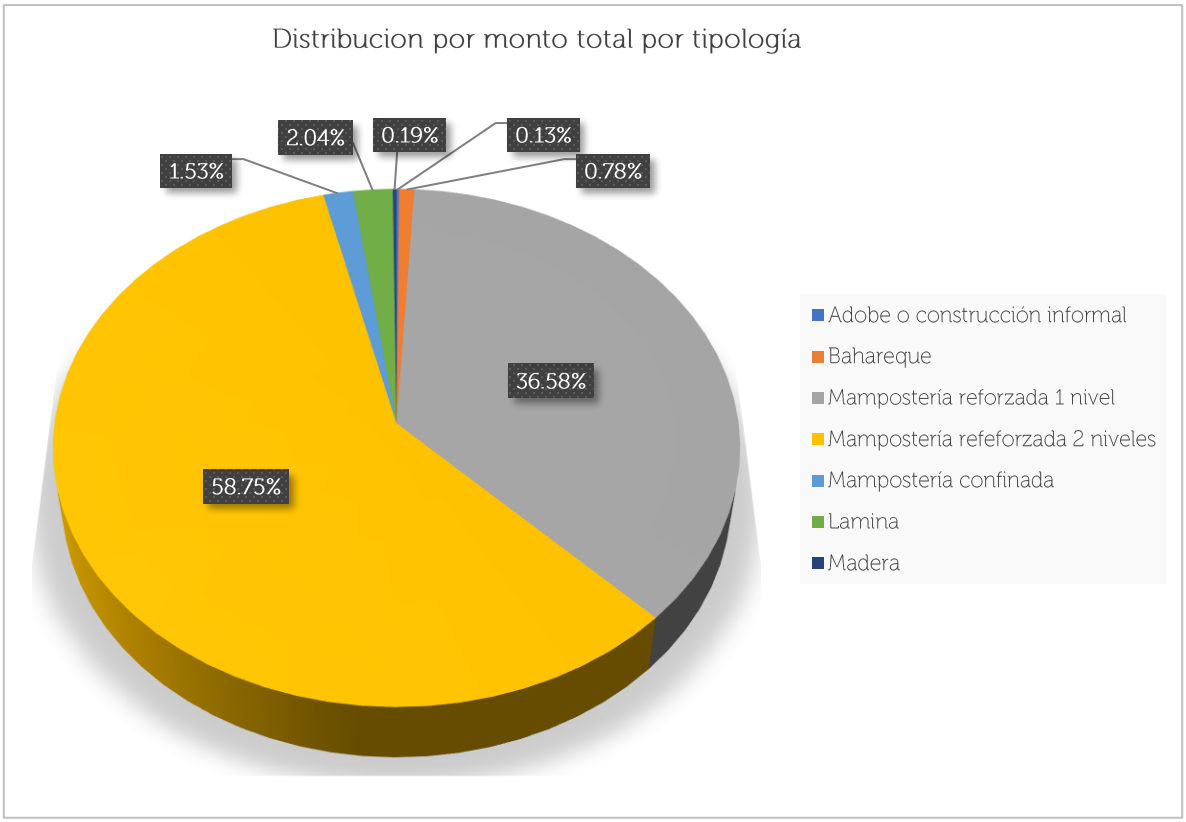


Imagen 9: Distribución de costo total por sector vivienda por sector homogéneo.
Fuente: elaboración propia.

Es de recalcar que los montos expuestos del sector vivienda corresponde exclusivamente para este sector, en total para el municipio de San Salvador se cuenca con un total de 100,812 viviendas, los demás sectores como: comercio, industria, salud, educación entre otros no se han incluido.

Gráfica 3: Distribución por monto estimado por tipología estructural.



Capítulo 3. Definición de curvas de fragilidad y funciones de consecuencia

3.1 Curvas de fragilidad estructural

Las curvas de fragilidad estructural[7] a utilizar serán curvas obtenidas en estudios de tesis de pregrado empleando la amenaza sísmica de El Salvador y consultorías contratadas por el MARN. Para el caso de las tipologías estructurales de adobe y bahareque se emplearán las curvas de FEMA[8] Hazus, que serán ajustadas para El Salvador, en investigaciones posteriores. Las curvas de fragilidad estructural se representarán mediante la siguiente ecuación:

$$P\left[{ds}/{S_d}\right] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}}\ ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right] \ (Ecuación\ 1)$$

Donde:

$\bar{S}_{d,ds}$: es el desplazamiento o aceleración medio para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%.

β_{ds}: es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para le estado limite de daño, en otras palabras, es la variabilidad asociada al estado de daño.

Φ: es la función de distribución normal estándar acumulada

S_d: es el desplazamiento espectral o aceleración.

La tabla 7 presenta las taxonomías empleadas para el sector vivienda analizado para el Municipio de San Salvador.

Tabla 7: Clasificación taxonómica de viviendas

TIPO	LFRS	Altura	Taxonomía	Código
1	Adobe	baja	URML	Pre-código
2	Bahareque o construcción informal	baja	URML/S3/W1	Pre-código
3	Mampostería reforzada 1 nivel	baja	RM1M	Código-bajo/moderado
4	Mampostería reforzada 2 niveles	baja	RM2M	Código-bajo/moderado
5	Mampostería confinada	baja	RM1ML	Código-bajo/moderado
6	Lamina	baja	S3	Código-bajo
7	Madera	baja	W1	Código-bajo

[7] Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada, de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño limite especifico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (FEMA, 1999).

[8] Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en ingles).

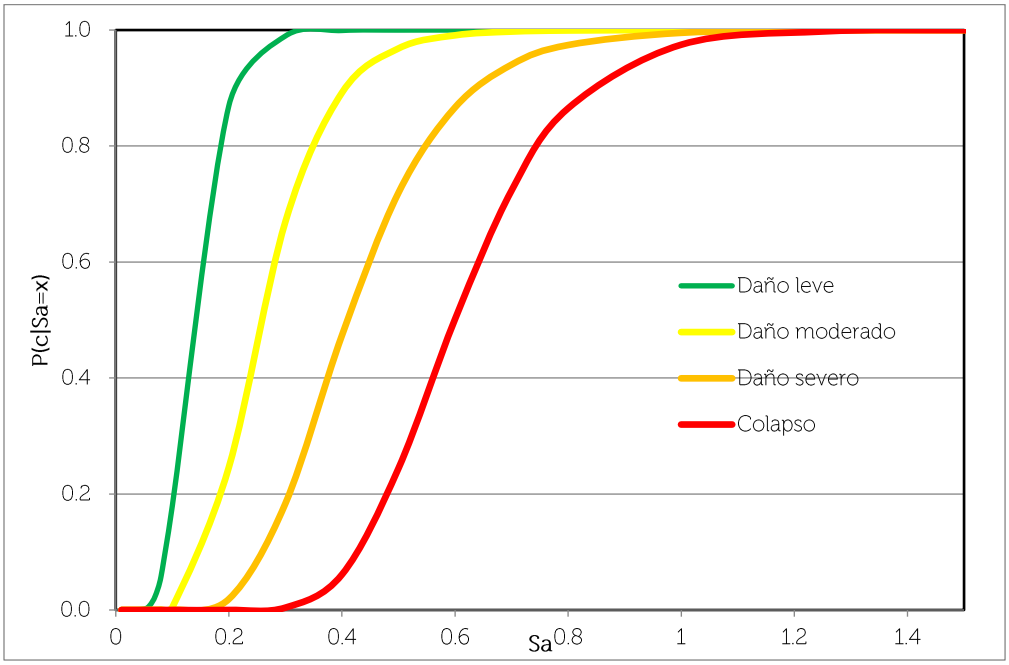
Los valores característicos de la mediana y la desviación estándar de acuerdo a una distribución log normal, se consolidan en la tabla 8. A excepción de la tipología estructural de bahareque y adobe, las curvas de fragilidad estructural fueron calculadas con la amenaza sísmica propia de El Salvador, a través de análisis dinámicos no lineales incrementales.

Para las tipologías de adobe y bahareque se emplean los datos característicos de FEMA 2020, las cuales han sido calculadas para el territorio norteamericano utilizando criterio de experto de acuerdo a las fallas estructurales observadas o a través de análisis analíticos, tal y como se mencionó anteriormente, esta requerirá ser ajustadas a las condiciones de El Salvador, en investigaciones posteriores.

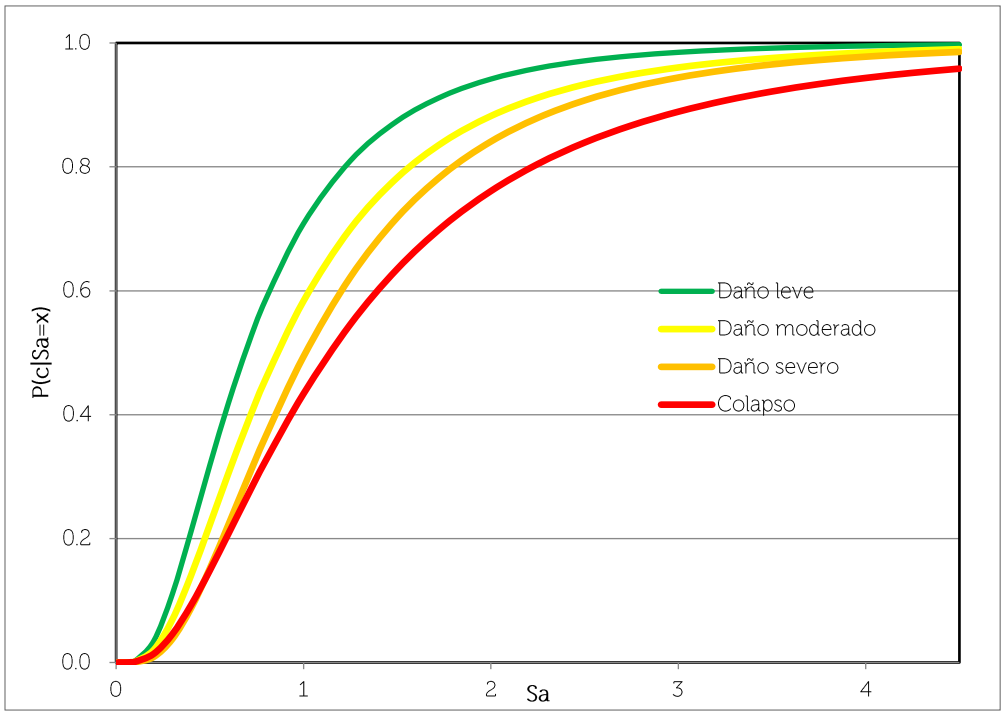
Tabla 8: Datos estadísticos de las curvas de fragilidad a emplear.

MAMPOSTERIA CONFINADA DE UN NIVEL				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.1365	0.2561	0.4092	0.5993
β	0.3396	0.3603	0.3445	0.2617
ACELERACION ESPECTRAL				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.334	0.9053	1.5589	2.7302
β	0.4881	0.2407	0.2253	0.2231
MAMPOSTERIA REFORZADA DE UN NIVEL				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.6889	0.8607	1.0105	1.141
β	0.679	0.7112	0.6839	0.7913
ACELERACION ESPECTRAL				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	1.662	2.0907	2.4546	3.024
β	0.7255	0.752	0.6977	0.7914
MAMPOSTERIA REFORZADA DE DOS NIVEL				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.0355	0.2907	0.4711	0.6184
β	0.3151	0.2519	0.248	0.2413
ACELERACION ESPECTRAL				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.0694	0.5975	0.9685	1.2319
β	0.5103	0.4769	0.521	0.5926
CASA DE ADOBE DE UN NIVEL				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso

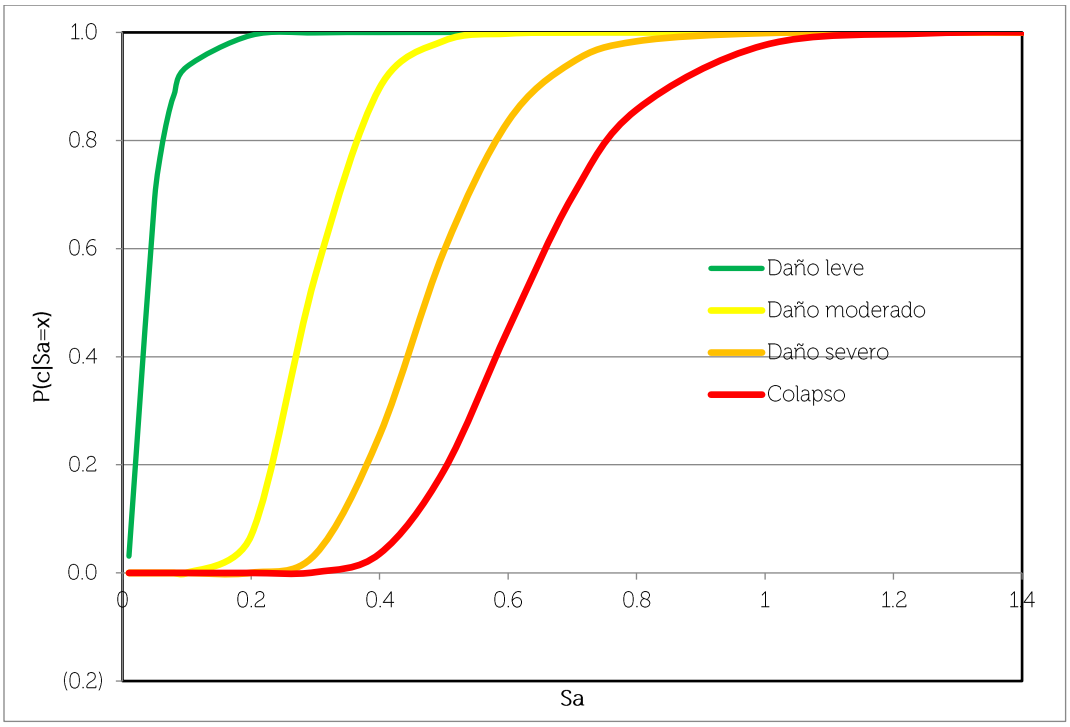
α	0.113	0.148	0.226	0.321
β	0.669	0.669	0.669	0.669
CASA DE BAJAREQUE DE UN NIVEL				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.113	0.162	0.269	0.421
β	0.669	0.669	0.669	0.669
CASA DE PERFILES Y PAREDES DE LAMINA				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.105	0.147	0.243	0.449
β	0.654	0.654	0.654	0.654
CASA DE MADERA				
PGA				
PARAMETROS	Daño leve	Daño moderado	Daño Extremo	Colapso
α	0.165	0.266	0.467	0.705
β	0.654	0.654	0.654	0.654



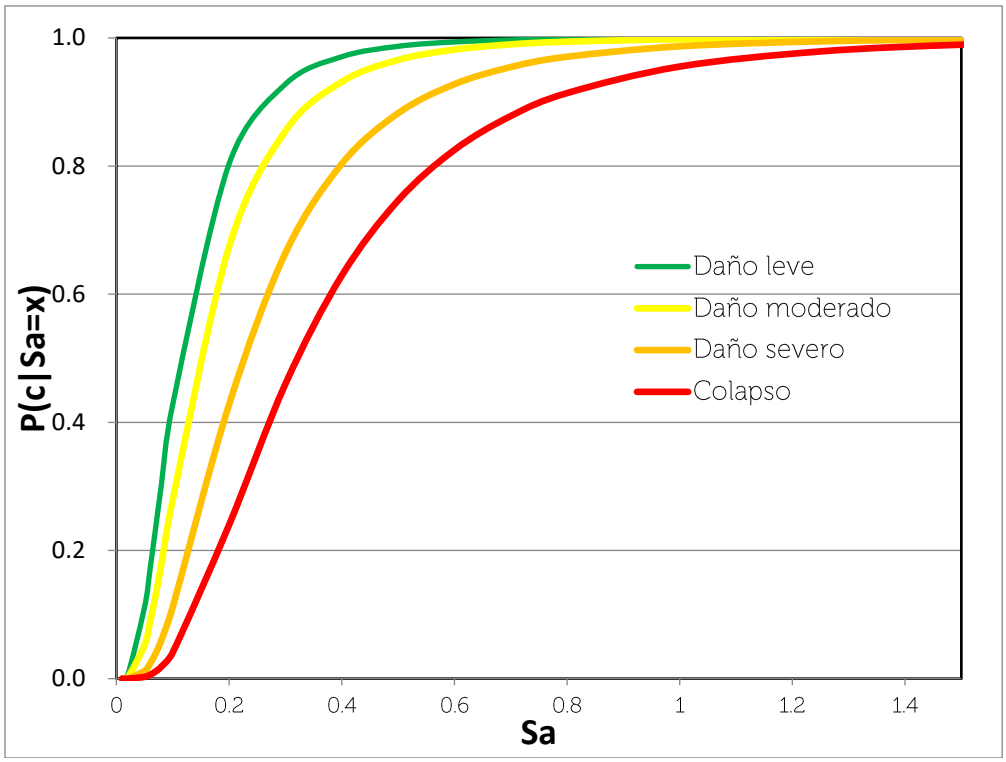
Gráfica 4: Curva de fragilidad estructural para mampostería confinada de 1 nivel.



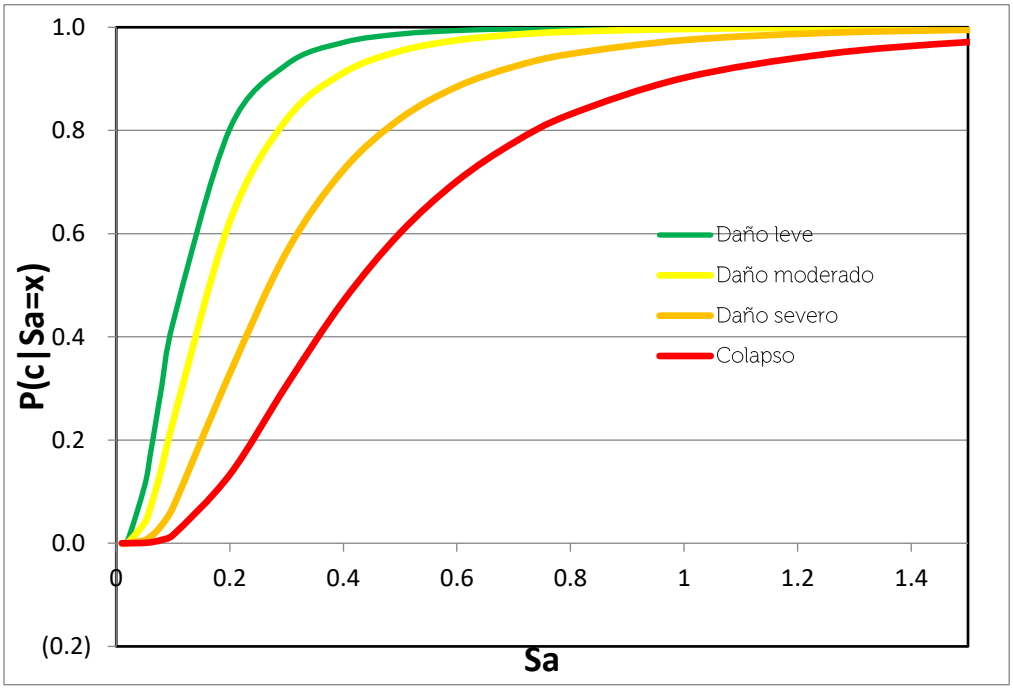
Gráfica 5: Curvas de fragilidad estructural mampostería reforzada 1 nivel



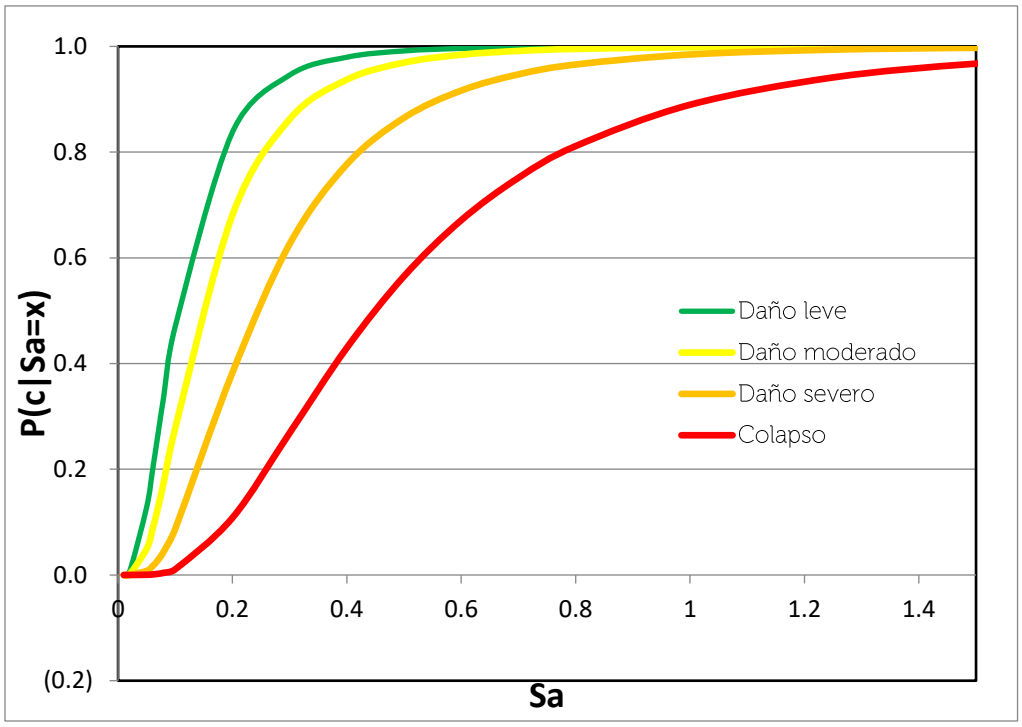
Gráfica 6: Curvas de fragilidad estructural mampostería reforzada 2 niveles



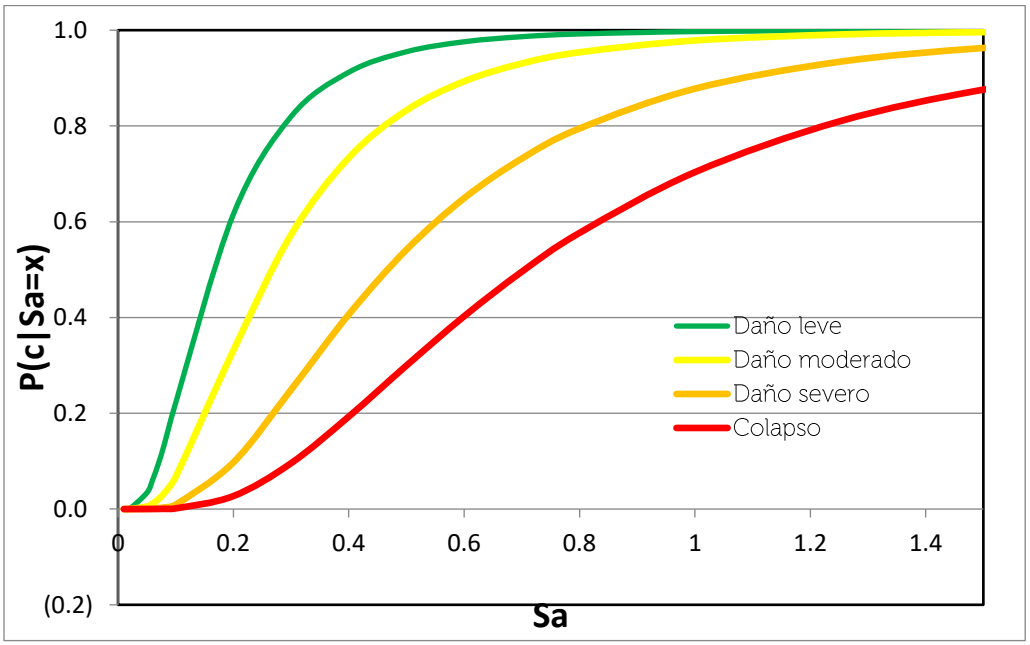
Gráfica 7: Curvas de fragilidad estructural adobe.



Gráfica 8: Curvas de fragilidad estructural bahareque.



Gráfica 9: Curvas de fragilidad estructural casa de perfiles de acero y paredes de lamina



Gráfica 10: Curvas de fragilidad estructural casa de madera

3.2 Estados de daño estructural

Para el caso de las tipologías estructurales definidas se establecieron un total de 4 estados de daño estructural, leve, moderado, extensivo y completo. Dichos estados se caracterizan por tener particularidades de fallas estructurales en los principales elementos estructurales de las edificaciones.

Viviendas de adobe y bahareque (URM)

a) Daño leve: en las paredes se manifiestan grietas en diagonal, grietas alrededor de aberturas en paredes con una cantidad considerable de huecos, desplazamiento de cargaderos, grietas en las bases de parapetos.
b) Daño moderado: la mayor parte de las paredes manifiestan grietas en diagonal, algunas de las paredes exhiben grietas superiores a 2mm de espesor, grietas significativas en parapetos con separación superior a 2mm.
c) Daño severo: en el caso de viviendas con cantidad considerable de aberturas se manifestarán grietas superiores a 2mm, en el caso de parapetos algunos sufren colapso, en el caso de la estructura de techo que en este tipo de vivienda de madera se manifiestan desplazamientos.
d) Colapso: en este caso la vivienda ha colapsado o se encuentra en eminente peligro de colapso con grietas por cortante superiores a 2mm en todas las paredes, colapsos de paredes en el plano y fuera del plano.

Viviendas de mampostería reforzada (RM2)

a) Daño leve: en las paredes se manifiestan grietas en diagonal, grietas alrededor de aberturas en paredes con una cantidad considerable de huecos.
b) Daño moderado: la mayoría de las superficies exhiben grietas en diagonal, en algunos casos las paredes de carga alcanzan su estado de fluencia.
c) Daño severo: en el caso de viviendas con cantidad considerable de aberturas la mayoría de las paredes alcanzaran su punto de fluencia o algunas paredes sobrepasaran su máxima capacidad de desempeño, manifestado a través de grietas en diagonal superior a 2mm o horizontal con la presencia de pandeo, en el caso de los diafragmas solo exhibirán grietas en diagonal.
d) Colapso: en este caso la vivienda ha colapsado o se encuentra en eminente peligro de colapso con grietas por cortantes superiores a 2mm en todas las paredes, colapsos fuera y dentro del plano.

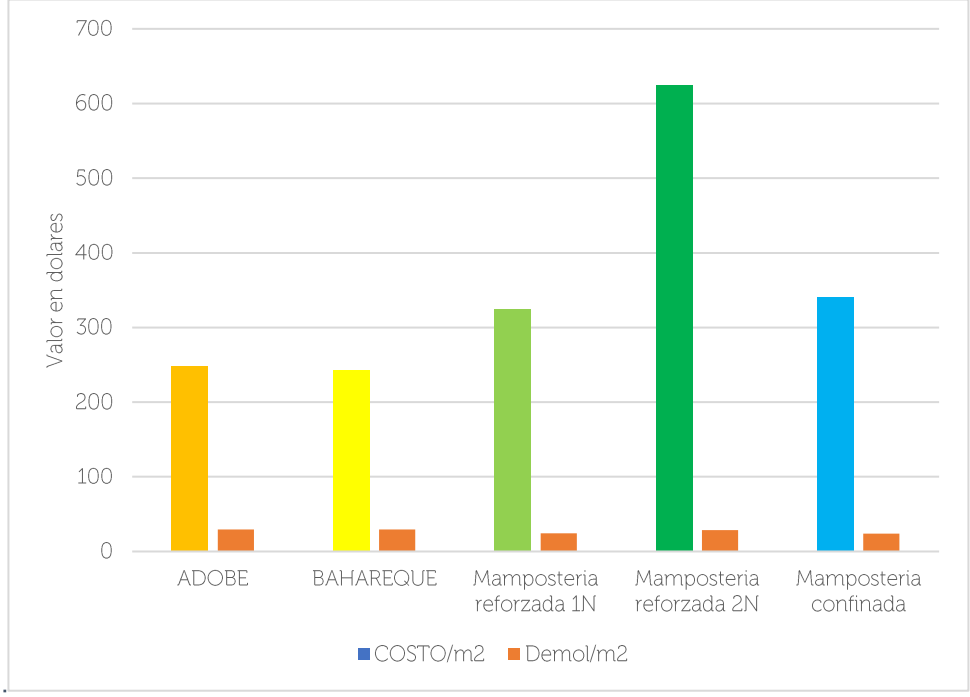
3.3 Funciones De Consecuencia Estructural

Las funciones de consecuencia[9] para los distintos estados de daño de cada una de las tipologías estructurales han sido tomadas del Manual Técnico de Hazus 4.2 (octubre 2020). La tabla 9 presentan los valores de estos coeficientes de consecuencia.

Referente al estado de colapso se demarca un coeficiente igual a 1 el cual es superior, ya que una casa totalmente colapsada su costo de reposición es superior debido a que es necesario incluir la demolición y desalojo de todo el material producto de dicha actividad.

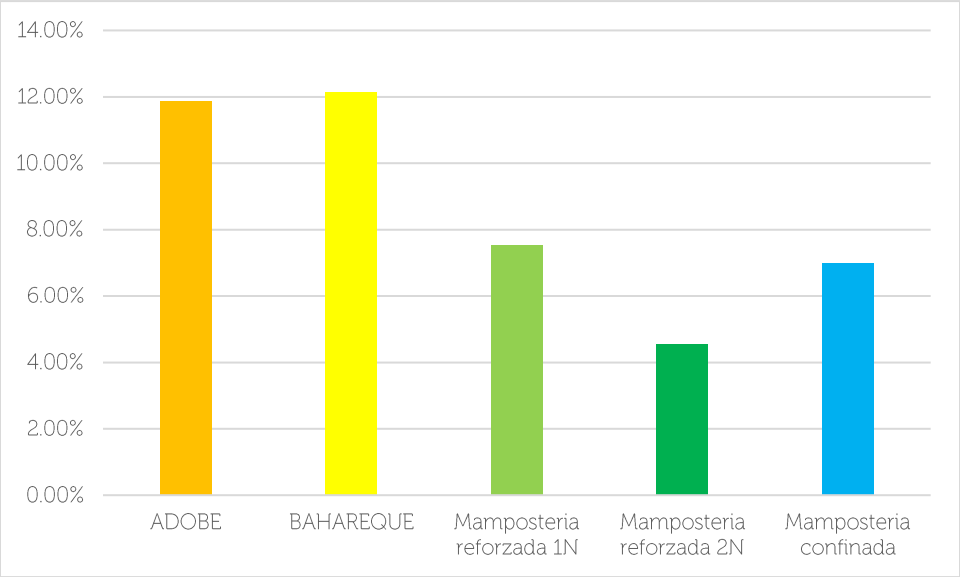
Tabla 9: Funciones de consecuencia física para las viviendas sin ajustar.

Tipología	Daño leve	Daño moderado	Daño severo	Colapso
1	0.02	0.1	0.4	1
2	0.02	0.1	0.4	1
3	0.02	0.1	0.4	1
4	0.02	0.1	0.4	1
5	0.02	0.1	0.4	1
6	0.02	0.1	0.4	1
7	0.02	0.1	0.4	1



Gráfica 11: Valor por m2 del sector vivienda

[9] Las funciones de consecuencia estructural explican los coeficientes de reparación respecto al valor de reemplazo de la estructura para cada uno de los estados de daño, dicha tabla ha sido calculada a partir de análisis estadísticos, contenidos en el estudio ATC-13 Earthquake Damage Evaluation Data for California.



Gráfica 12: Porcentaje de demolición respecto al valor total

Como se puede apreciar en la tabla 10 los coeficientes de consecuencia para el estado de colapso son mayores a 1 ya que, según lo calculado de forma presupuestarias, el colapso total de una estructura implica aspectos tales como demolición y desalojo, además de actividades indirectas de administración de campo que incrementan el costo de reemplazo total de la infraestructura. Es importante hacer mencionar que en este cálculo no se incluye menaje de cada una de las viviendas.

Tabla 10: funciones de consecuencia física para las viviendas ajustadas.

Tipología	Daño leve	Daño moderado	Daño severo	Colapso
1	0.02	0.1	0.4	1.12
2	0.02	0.1	0.4	1.12
3	0.02	0.1	0.4	1.08
4	0.02	0.1	0.4	1.05
5	0.02	0.1	0.4	1.07
6	0.02	0.1	0.4	1.12
7	0.02	0.1	0.4	1.12

Las funciones de consecuencia estructural, se introducen el Input Toolkit Risk de GEM para poder convertir las distintas curvas de consecuencia estructural en formato NMRL, formato que permitirá en futuras investigaciones determinar los impactos por sismo a través de corridas de riesgo sísmico. En la imagen 10 se puede apreciar el proceso realizado, en la sección de anexos se encontrarán las funciones de consecuencia estructural en formato NMRL.

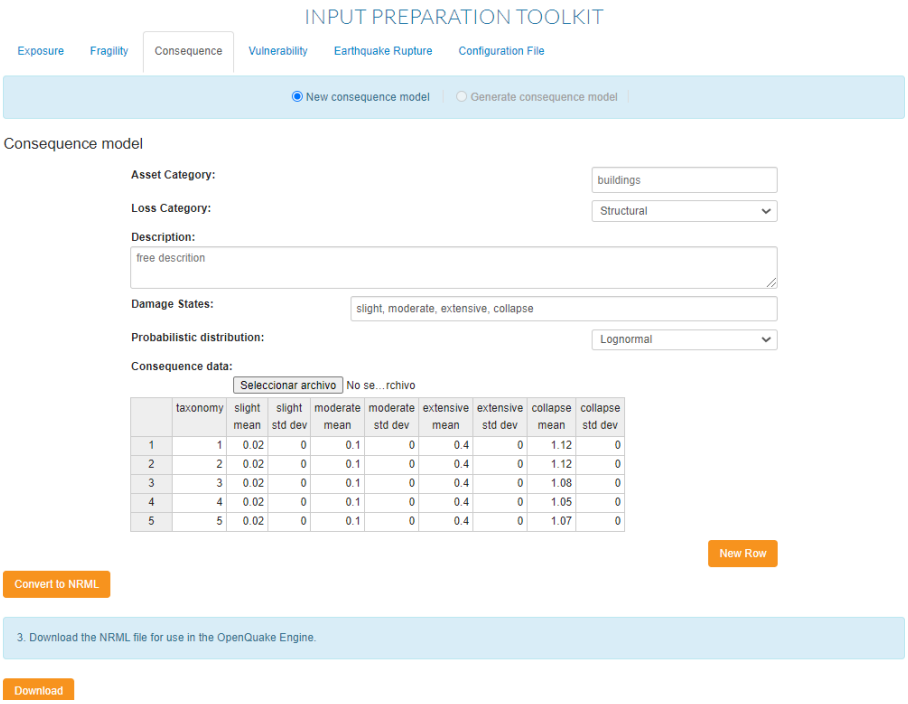


Imagen 10: Proceso de ingreso de las curvas de consecuencia en Input Toolkit Risk.

3.4 Funciones De Consecuencia Por Fatalidades

Las funciones de consecuencias de pérdidas de vidas humanas, evidencian que el 75% de los decesos al ocurrir un sismo se debe al colapso total de la estructura, el 25% de los decesos restantes son ocasionados por deslizamientos, colapsos de infraestructura vial o factores de pánico. Para esta etapa de análisis se emplearán valores típicos sugeridos por estudios a nivel internacional de tasa de fatalidad por tipología estructural.

La generación de modelos que permitan determinar las fatalidades por el suceso de sismos se vuelve complejo, ya que los ocupantes en las edificaciones no se encuentran el 100% del tiempo en sus habitaciones. Por ejemplo, para la jornada laboral gran parte de la población se moviliza desde sus lugares de habitación hacia sus lugares de trabajo, los estudiantes se movilizan hacia los centros educativos, por motivos de turismo los ocupantes también se pueden movilizar a otra ciudad. Los días festivos o de fin de semana el número de ocupantes por viviendas también se ve afectado, dando como resultado que la exposición se altera significativamente.

Aunque se considera de especial interés el generar modelos que representen la exposición en tiempo real para poder realizar un mejor conocimiento del riesgo,

en este caso ante la ocurrencia de un evento sísmico, en esta primera modelación no se incluirán esas dinámicas por completo, en parte porque aún no se incorpora toda la infraestructura de servicios, industria entre otras.

Modelos interesantes del comportamiento de los ocupantes a lo largo de la semana, días festivos y fines de semana han sido realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas de Italia (ISIAT 2007), otro ejemplo de aplicación es del municipio de Torino de Italia, en el 2003.

La figura 11 muestra para el municipio de Torino en una semana, la variación en el porcentaje de ocupantes de las viviendas.

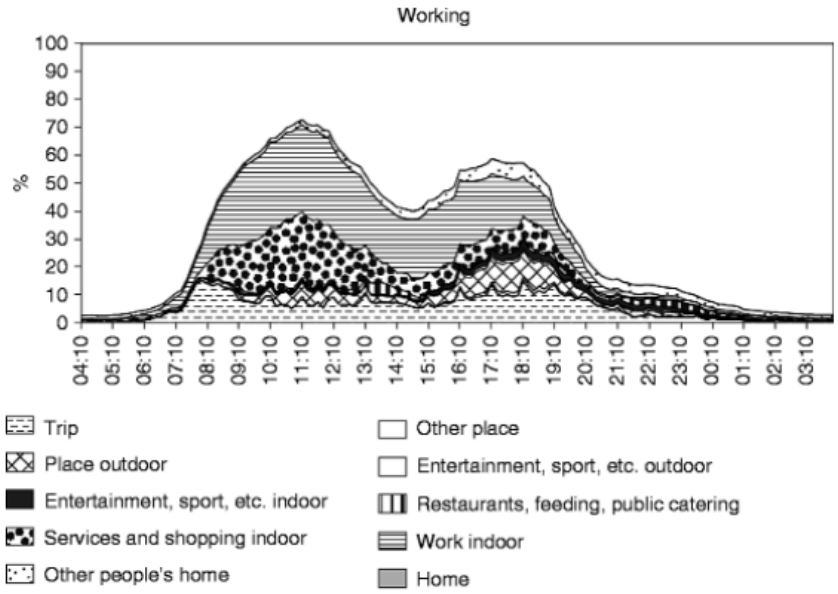


Figura 11: Variabilidad de los ocupantes en el día municipio de Torino, Italia.

Esta propuesta metodológica considerará el porcentaje de ocupantes igual en el día como en la noche, ya que no se cuenta a la fecha con algún estudio que permita realizar un mejor ajuste de la variación del número de ocupantes por hora y día en las zonas residenciales.

Como parte del proceso para la investigación de las tasas de fatalidad por sismos, se realizó una investigación de distintas investigaciones acerca de las consecuencias para El Salvador y enfocados prioritariamente en tipologías estructurales de adobe y bahareque. Para el cálculo de las tasas de fatalidad se empleó la metodología planteada por G. Zuccaro (2011), quienes asumen que el porcentaje de las fatalidades es directamente a la densidad demográfica de la zona impactada, por lo que plantean las siguientes ecuaciones:

$$K_d = \frac{N_d}{N_T} \ (Ecuación\ 2)$$

Donde:
K_d=porcentaje de muertos
N_d=número de muertos
N_T=número total de personas en el área afectada

Como parte del proceso de investigación se realizaron consultas bibliográficas con el fin de determinar tasas de fatalidad por suceso de sismos en El Salvador. Los documentos consultados corresponden a los sismos del: 20 de diciembre de 1936[10], 6 de mayo de 1951 [11]y el 3 de mayo de 1965[12]. En estos documentos las tipologías estructurales más comunes descritas por los autores son las de bahareque y adobe, obteniendo así el número de fallecidos por tipología estructural. Con el fin de determinar la tasa de fatalidad se consultaron los CENSOS de población más cercanos al suceso de los eventos. En la tabla 11 se presentan los datos extraído de los documentos, como proceso final se calculó la tasa de fatalidad empleando la metodología propuesta por G. Zuccaro (2011).

Tabla 11*: Tasas de fatalidad investigadas durante terremoto en El Salvador.*

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	POBLACION	FALLECIDOS	TASA FATALIDAD	FECHA	CASA
SAN VICENTE	SAN VICENTE	10797	200	1.85%	20 DE DICIEMBRE DE 1936	ADOBE Y BAHAREQUE
USULUTAN	JUCUAPA	4617	350	7.58%	6 DE MAYO DE 1951	ADOBE Y BAHAREQUE
SAN MIGUEL	CHINAMECA	5778	50	0.87%	6 DE MAYO DE 1951	ADOBE Y BAHAREQUE
SAN SALVADOR	SAN SALVADOR	255744	125	0.05%	3 DE MAYO DE 1965	ADOBE Y BAHAREQUE

Al analizar los resultados de las tasas de fatalidad calculados en la tabla 11 se evidencia la complejidad del cálculo de modelos de consecuencias de fatalidad por sismos, el caso notorio corresponde al del terremoto del 1951 en cual dos municipios cercanos obtuvieron tasas de fatalidad con una diferencia abismal entre ambas, asociado probablemente a la capacidad de reacción de los pobladores o al buen estado de las viviendas.

[10] S. Benedict Levin (1936). The Salvador Earthquakes of December.
[11] N.N. Ambraseys, J.J. Bommer1, E. Buforn2 &A (1998). Udías. The earthquake sequence of May 1951 at Jucuapa, El Salvador. 1998.
[12] Rosenblueth, E., Prince, J. (1965). El temblor de San Salvador, 3 de mayo 1965.

Como se puede observar en el cuadro 11 existe una gran variabilidad en las tasas de fatalidad por las tipologías estructurales. Razón por la cual en la tabla 12, se presenta tasa de fatalidad por tipología estructural propuestas por Emily So (2016), del departamento de Arquitectura de la Universidad de Cambridge.

Tabla 12: tasas de fatalidad sugeridas por PAGER ante el colapso de infraestructura.

	Tipología estructural	PAGERSTR	Volumen de escombros típicos	Rango de fatalidades típicos de literatura (%)	Tasa de fatalidad sugerida por PAGER
	Estructura liviana de madera	W1			
1	Con techo liviano		<10	0.25-1	0.5
2	Con techo pesado		>50	0.75-3	1
	Madera pesada	W3			
3	Con techo liviano		<10	0.5-1	0.5
4	Con techo pesado		>50	2-3	2
	Mampostería poco resistente				
5	Adobe con techo liviano	A5	<50	5-15	5
6	Adobe con techo pesado	A4	>75	20-90	65
7	Bloques irregulares con techo de madera (altura baja)	RS2	40-60	5-20	10
8	Bloques irregulares con techo de concreto (altura baja)	RS5	>70	10-40	30
	Mampostería apoyada				
9	Europea	DS2	>30	3-12	5
10	Asia	SD4	>50	10-25	15
	Mampostería reforzada				
11		RM2L	>10	2-8	4
12		RM2M	>20	15-40	25
13	Mampostería confinada		<10	2-6	3
14		Colapso extremo (pancake)	>60	10-40	
15	Mixta		>30	15-20	

Al comparar ambos resultados se opta por utilizar los valores propuestos por Emily So para las funciones de consecuencias por pérdidas de vidas humanas.

Capítulo 4. Evaluación del riesgo sísmico

En este apartado se presenta el siguiente paso a realizar, una vez se cuente con el modelo de exposición, curvas de fragilidad y de consecuencia. La evaluación del riesgo sísmico [13] se propone que se realice a partir de un evento probabilístico basado en un evento estocástico a través de una simulación de Monte Carlo, con el fin de estimar la distribución individual de los activos y la distribución agregada de las pérdidas para cada uno de los activos de los portafolios, para este caso específico será el sector vivienda, para un periodo de tiempo específico. El cálculo del riesgo sísmico se explicará mediante la ecuación 3.

$$R_{ie} = (A_i^t, V_e, C_e) \ (Ecuación\ 3)$$

Donde:

A_i^t: representa la amenaza o peligro sísmico, entendida como la probabilidad que se presente un evento sísmico con intensidad mayor o igual que *i*, durante un período de exposición *t*.

V_e: representa la vulnerabilidad sísmica, entendido como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto *e*, a ser afectado por la ocurrencia de un evento con una intensidad *i*.

C_e: representa el valor o coste del elemento expuesto *e*.

R_{ie}: representa el riesgo sísmico, entendido como la probabilidad que se presente un daño sobre elementos expuestos *e*, como consecuencia de la ocurrencia de un evento con intensidad mayor o igual que *i*.

El cálculo del riesgo sísmico se realizará con OPEN QUAKE ENGINE. Esta herramienta requiere como datos de entrada un modelo de exposición y un modelo de vulnerabilidad física. Para determinar las pérdidas económicas y las de vidas humanas en el caso de nuestra metodología proponemos funciones de consecuencia de cada una de las tipologías estructurales presentes en el modelo de exposición. Además, necesita un set de un evento estocástico, el cual deberá de representar la actividad sísmica de la región para un periodo de tiempo específico.

Como resultado se obtendrán estadísticos por zona homogénea, por tipología estructural, de pérdidas económicas y de vidas humanas. El proceso que se ha descrito se esquematiza en la figura 12.

[13] Según la Oficina de las Naciones Unidas para Casos de Desastres (UNDRO por sus siglas en ingles), él Riesgo sísmico es el grado de perdida, destrucción o daño esperado debido a la ocurrencia de un determinado sismo.

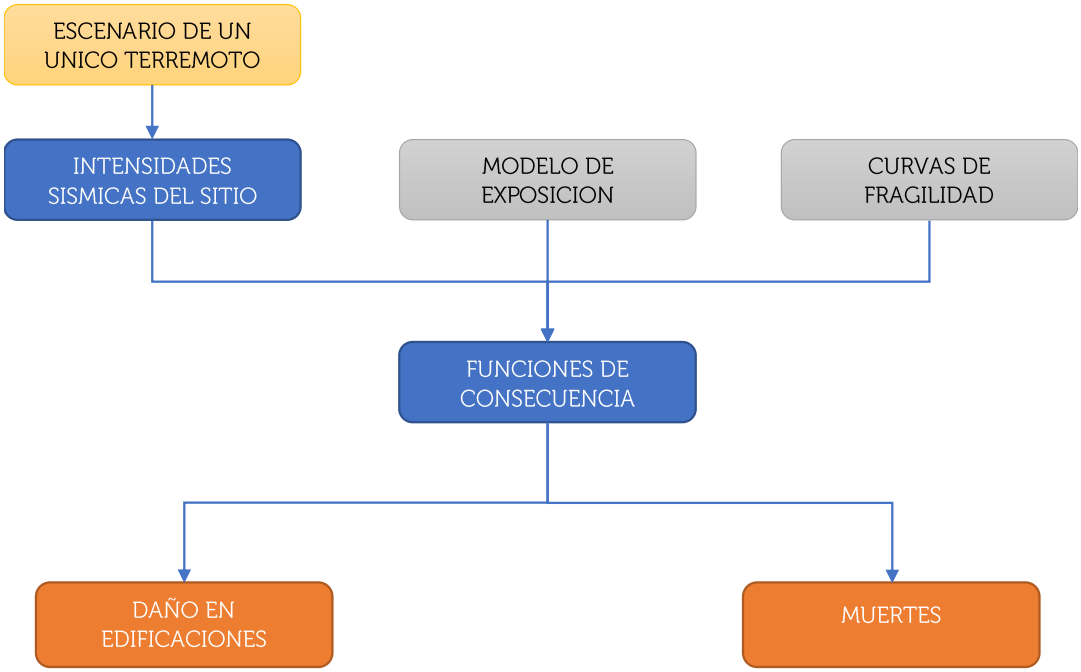


Figura 12: Evaluación de riesgo sísmico.

Como resultado de la calculadora de riesgo sísmico se obtendrán resultados de perdidas con una probabilidad de ser excedida en un tiempo específico y los mapas de pérdidas para la región, además se pueden obtener las curvas de excedencia, la cual describe la probabilidad de excedencia de los distintos niveles de pérdidas para cada uno de activos de los portafolios, este caso vivienda Finalmente se puede obtener una tabla de perdidas, la cual describe las pérdidas de cada portafolio para cada uno de los sets de eventos estocásticos (SES).

Esta etapa constituye el siguiente paso a realizar y que esta fuera del alcance de este trabajo.

CONCLUSIONES

- La ciudad de San Salvador, posee un total de 100,812 viviendas equivalentes a una extensión superficial de 16.84km^2, en el total del número de viviendas se encuentran expuestos 316,012 habitantes. El área expuesta representa el 87.88% del área total de la infraestructura de edificación de San Salvador.

- Con la realización del modelo de exposición se logró determinar que el valor del sector vivienda para el municipio de San Salvador alcanza los $7.5 billones de dólares, considerando un total de 7 tipologías estructurales , de los cuales las viviendas de mampostería reforzada de block de 2 niveles ocupa el 58.75%, seguido de las viviendas de la mismo tipología de 1 nivel con el 36.58%, estas dos tipologías cubren el 90.46% de los ocupantes, pero es preocupante que se tenga el 9.54% de la población en viviendas con una fragilidad estructural comprometida por la tipología estructural, este porcentaje representa 30,147 habitantes los cuales como ya se evidencio a través del estudio de investigaciones de las consecuencias de terremotos en viviendas logran alcanzar tasas de fatalidad del 7.58% o dentro del rango del 5-15% de fatalidad, la peculiaridad es que esas tipologías estructurales se ubican en lugares precarios con una alta densidad demográfica la cual está asociada a un mayor número de muertos.

- La metodología aquí propuesta constituirá una mejor herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la medida que los CENSO de viviendas y población se actualicen. Es evidente que la información de censo del 2007 a 13 años ya no representa la realidad en el territorio salvadoreño. La ventaja que ofrece esta herramienta es que al tener un nuevo dato de censo esta será actualizada en un corto tiempo.

- Con la implementación de la generación del modelo de exposición de infraestructura para el sector vivienda y de vidas humanas aplicado al municipio de San Salvador, se concluye que, considerando capacidades técnicas y disponibilidad mínima requerida de datos (censo de vivienda, de población, áreas de cubiertas por altura de elementos) esta puede ser replicada a todo El Salvador.

RECOMENDACIONES

- Con los insumos generados se pueden estimar pérdidas económicas por daños y de vida humanas para el sector viviendas para el municipio de San Salvador, a través de corridas de riesgo sísmico por evento o por análisis estocástico probabilísticos.

- En investigaciones posteriores se tratará de darle seguimiento a las tasas de mortalidad por evento sísmico, con el objetivo de volver el modelo de riesgo sísmico más consistente en el futuro.

- Realizar un levantamiento de información a través de una IDCT[14], empleando la aplicación que GEM a puesto a disposición y que puede ser utilizada en Tablet o teléfono móvil Smart, para caracterizar la vulnerabilidad física intrínseca en las estructuras expuestas. Los productos que se obtengan podrán ser incorporados a la base de datos generada en esta investigación.

- Desarrollar nuevas curvas de fragilidad estructural a través de análisis estructurales no lineales expresos o con análisis estructurales no lineales más rigurosos.

- El mapa de exposición realizado puede servir de insumo básico para hacer corridas de riesgo por inundabilidad, debido a que esta categorizado por tipología estructural, número de habitantes por tipología, área de dicha infraestructura y número de viviendas.

[14] Herramienta de captura de datos de inventario (IDCT por sus siglas en ingles).

BIBLIOGRAFIA

Miyamoto, (2020). Cirywide Assessment of Earthquake Risks in San Salvador, El Salvador. USAID. San Salvador, El Salvador. 190pp.

GEM, (2019). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for Engine version 3.6.0. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.6.0, 189 pages.

D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Silva, V., (2015) Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Vulnerability Global Component Project. DOI 10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12.

Lopez, M, (2018). Modelación Probabilística de Escenario de Riesgo Sísmico en el área Metropolitana de San Salvado, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ciudad de Santa Tecla. San Salvador, El Salvador. 63pp.

Lopez, M, (2018). DESARROLLO DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD Y VULNERABILIDAD Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador, El Salvador. 77pp.

Rafael Alberto, Mauricio Ernesto, (2018). EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA DE UNO Y DOS NIVELES A TRAVÉS DE CURVAS DE CAPACIDAD Y FRAGILIDAD, San Salvador, El Salvador. 127pp.

Jaiswal, K.S., Wald, D.J., and Hearne, M., 2009, Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach: U.S. Geological Survey Open-File Report OF 2009–1136. 78 p.

Benedict Levin, S., (1937). The Salvador Earthquakes of December (1936). Seismological Society of America. United States. 18pp.

Ambraseys, N.N., J.J., Bommer, Buforn E., A Udías, (1998). The earthquake sequence of May 1951 at Jucuapa, El Salvador. Journal of Sesimology, Netherlands. 18pp.

Rosenblueth, E., Prince, J., (1965). El temblor de San Salvador, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, México. 63 pp.

So, E., (2016). Estimating Fatality Rates for Earthquake Loss Model. Cambridge, UK. Springer. 62 pp.

Spence, R., So, E., Scawthorn, C., (2011). Human Casualties, Progress in Modelling and Mitigation, UK. Springer. 329 pp.

Varela Alonso, L., (2017). Costos por metro cuadrado de Construcción, Volumen III, D.F., México. Varela. 399pp.

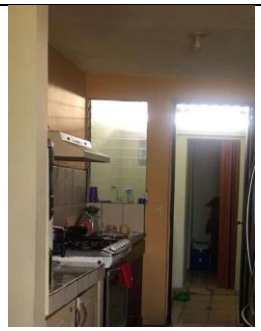
ANEXOS

ANEXO 1 Consulta de tipologías estructurales del sector vivienda de San Salvador a través del internet.

Tabla 13: Consulta de tipologías estructurales del sector vivienda de San Salvador a través del internet.

CASA	FID_COLONIA	COLONIA	AREA	VALOR	TIPOLOGIA	NIVELES	
1	4436	10 DE SEMPTIEMBRE	160	$75,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
2	4013	BRISAS DE LA ESCALON	241	$165,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
3	433	ESCALON NORTE	240	$170,000	MARCO DE CONCRETO Y MAMPOSTERIA CONFINADA	2	
4	433	ESCALON NORTE	190	$165,000	MAMPOSTERIA REFORZADA DE BLOCK	2	
5	433	ESCALON NORTE	250	$180,000	MAMPOSTERIA REFORZADA DE BLOCK	2	
6	440	ARCADIA	88	$85,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	

CASA	FID_COLONIA	COLONIA	AREA	VALOR	TIPOLOGIA	NIVELES	
7	445	SANTA EUGENIA	511	$178,000	MAMPOSTERIA CONFINADA	2 (COMERCIO)	
8	453	TOLUCA	150	$150,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
9	458	CAPISTRANO	250	$209,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
10	1502	VILLAS DE LA ESCALON NORTE	161	$93,000	MAMPOSTERIA REFORZADA, MARCO DE CONCRETO Y ELEMENTOS INFILL	2	
11	1507	MONACO	187	$195,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
12	1519	MIRAFLORES	130	$125,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
13	1523	SAN LUIS 2	241	$165,000	MAMPOSTERIA CONFINADA	2	

CASA	FID_COLONIA	COLONIA	AREA	VALOR	TIPOLOGIA	NIVELES	
14	4017	LUZ	150	$120,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
15	4022	JARDINES DE LA CIMA	144	$135,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
16	4024	VILLAS DE SAN PATRICIO	128	$115,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	
17	4025	LA CIMA 3	125	$109,900	MAMPOSTERIA CONFINADA	1	
18	4034	LA CIMA 4	125	$56,000	MAMPOSTERIA REFORZADA (BARRO)	1	
19	4035	LA CONSTANCIA	115.5	$98,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	1	

CASA	FID_COLONIA	COLONIA	AREA	VALOR	TIPOLOGIA	NIVELES	
20	4036	LOMAS DE SAN FRANCISCO 3	200	$130,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	1	
21	4042	MIRAMONTE	370	$185,000	MAMPOSTERIA CONFINADA	1	
22	4048	PALOMO	356	$156,000	Mampostería confinada	2	
23	4431	MIRALVALLE	174	$140,000	MAMPOSTERIA REFORZADA	2	

ANEXO 2 MODELO DE EXPOSICION

El modelo de exposición para la ciudad de San Salvador, se presenta en hipervínculo debido al tamaño excesivo que este posee.

EXPOSURE MODEL.txt

ANEXO 3 FUNCIONES DE FRAGILIDAD ESTRUCTURAL EN FORMATO NRML

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.5">
        <fragilityModel id="1" assetCategory="" lossCategory="structural">
                <description>CURVAS DE FRAGILIDAD ESTRUCTURA PARA EL SECTOR VIVIENDA DE SAN SALVADOR</description>
                <limitStates>slight moderate extensive complete</limitStates>
                <fragilityFunction id="1" format="continuous" shape="logncdf">
                        <imls imt="" noDamageLimit="0.1" minIML="0.05" maxIML="2.5"/>
                        <params ls="slight" mean="0.113" stddev="0.669"/>
                        <params ls="moderate" mean="0.148" stddev="0.669"/>
                        <params ls="extensive" mean="0.226" stddev="0.669"/>
                        <params ls="complete" mean="0.321" stddev="0.669"/>
                </fragilityFunction>
```

```
            <fragilityFunction id="2" format="continuous" shape="logncdf">
                <imls imt="" noDamageLimit="0.1" minIML="0.05" maxIML="2.5"/>
                <params ls="slight" mean="0.113" stddev="0.669"/>
                <params ls="moderate" mean="0.162" stddev="0.669"/>
                <params ls="extensive" mean="0.269" stddev="0.669"/>
                <params ls="complete" mean="0.421" stddev="0.669"/>
            </fragilityFunction>
            <fragilityFunction id="3" format="continuous" shape="logncdf">
                <imls imt="" noDamageLimit="0.1" minIML="0.05" maxIML="2.5"/>
                <params ls="slight" mean="0.1365" stddev="0.3396"/>
                <params ls="moderate" mean="0.2561" stddev="0.3603"/>
                <params ls="extensive" mean="0.4092" stddev="0.3445"/>
                <params ls="complete" mean="0.5993" stddev="0.2617"/>
            </fragilityFunction>
            <fragilityFunction id="4" format="continuous" shape="logncdf">
                <imls imt="" noDamageLimit="0.1" minIML="0.05" maxIML="4.5"/>
                <params ls="slight" mean="0.6889" stddev="0.679"/>
                <params ls="moderate" mean="0.8607" stddev="0.7112"/>
                <params ls="extensive" mean="1.0105" stddev="0.6839"/>
                <params ls="complete" mean="1.141" stddev="0.7913"/>
            </fragilityFunction>
            <fragilityFunction id="5" format="continuous" shape="logncdf">
                <imls imt="" noDamageLimit="0.05" minIML="0.025"
maxIML="1.2"/>
                <params ls="slight" mean="0.0355" stddev="0.3151"/>
                <params ls="moderate" mean="0.2907" stddev="0.2519"/>
                <params ls="extensive" mean="0.4711" stddev="0.248"/>
                <params ls="complete" mean="0.6184" stddev="0.2413"/>
            </fragilityFunction>
        </fragilityModel>
</nrml>
```

ANEXO 4 FUNCIONES DE CONSECUCIA ESTRUCTURAL EN FORMATO NMRL

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.5">
<consequenceModel id="consequence-from-IPT" assetCategory=""
lossCategory="structural">
<description></description>
<limitStates>slight moderate extensive collapse</limitStates>
<consequenceFunction id="1" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0.02" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0.1" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0.4" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="1.12" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="2" dist="LN">
```

```
<params ls="slight" mean="0.02" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0.1" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0.4" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="1.12" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="3" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0.02" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0.1" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0.4" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="1.08" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="4" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0.02" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0.1" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0.4" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="1.05" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="5" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0.02" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0.1" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0.4" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="1.07" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
</consequenceModel>
</nrml>
```

ANEXO 5 FUNCIONES DE CONSECUENCIA PERDIDAS POR VIDAS HUMANAS

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<nrml xmlns="http://openquake.org/xmlns/nrml/0.5">
<consequenceModel id="consequence-from-IPT" assetCategory=""
lossCategory="occupants">
<description>Funciones de consecuencia, perida de vidas
humanas</description>
<limitStates>slight moderate extensive collapse</limitStates>
<consequenceFunction id="1" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="7.5" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="2" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="7.5" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
```

```
<consequenceFunction id="3" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="5" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="4" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="5" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="5" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="3" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="6" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="0.625" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
<consequenceFunction id="7" dist="LN">
<params ls="slight" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="moderate" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="extensive" mean="0" stddev="0"/>
<params ls="collapse" mean="0.625" stddev="0"/>
</consequenceFunction>
</consequenceModel>
</nrml>
```