GOBIERNO DE EL SALVADOR

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE

INERV

INFORME NACIONAL DEL ESTADO DE LOS RIESGOS Y VULNERABILIDAD

2024

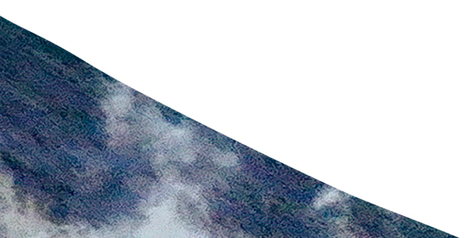
GOBIERNO DE EL SALVADOR

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE

INERV

INFORME NACIONAL DEL ESTADO DE LOS RIESGOS Y VULNERABILIDAD

2024



Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidad

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales,
El Salvador, Centroamérica.

Fernando Andrés López Larreynaga
Ministro de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales
Autores: Jacqueline Rivera,
directora general del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales
Giovanni Molina, Pablo Ayala, Miguel Alvarenga, Manuel Díaz, David Martínez, Telma Chávez, Luis Mixco, Douglas Hernández, Donald Cruz, Mario Reyes, Valeria García, Sidia Marinero, Carolina Rivas, Griselda Barrera; Griselda Marroquín, Francisco Gavidia, Haydee Beltrán, Carolina Canales, Yesenia Peñate, Flor Vides, Luis Menjívar, Roberto Cerón, Arturo Escalante, Lisandro López.

Edición y diseño
Gerencia de Comunicaciones y Educación Ambiental

San Salvador, julio del 2025
Este documento ha sido publicado con fondos provenientes del presupuesto ordinario del MARN

Derechos reservados. Prohibida su venta.
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.

Teléfono: (503) 2132-6276
Sitio web: www.ambiente.gob.sv
Facebook: Ministerio de Medio Ambiente
Instagram: @medioambientesv
X: @MedioAmbienteSV
Youtube: /medioambientesv
Correo electrónico: medioambiente@ambiente.gob.sv

Contenido

Introducción 11

1 Principios teóricos en la evaluación de riesgos 14

1.1 Amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo 14

1.2 Gestión integral del riesgo 16

1.3 Resiliencia 17

1.4 Impacto 18

2 Contexto nacional 20

2.1 Área de estudio 20

2.2 Características demográficas 20

2.3 Perfil nacional económico 22

2.4 Educación 26

2.5 Empleo 29

2.6 Pobreza 33

2.7 Uso de suelo 38

2.8 Densidad del tejido urbano en cuatro grandes áreas de El Salvador 38

3 Eventos extremos registrados en el período de 2020 a 2022 44

3.1 Huracán Amanda-Cristóbal 44

3.2 Huracán Eta 46
3.3 Huracán Iota 49
3.4 Tormenta Tropical Bonnie 52
3.5 Tormenta Tropical Julia 55
3.6 Resumen de Eventos Hidrometeorológicos Extremos 2020-2022 59
4 Amenazas naturales en El Salvador 60
4.1 Amenaza sísmica 60
4.2 Amenaza por tsunamis 74
4.3 Amenaza volcánica 85
4.4 Movimiento de masas 105
4.5 Amenaza climática y fenómenos hidrometeorológicos extremos 118
4.6 Oleaje extremo 146
4.7 Erosión y sedimentación costera 154
5 Exposición 168
5.1 Introducción a los modelos de exposición 168
5.2 Metodología y datos de entrada 168
5.3 Atributos estructurales 174
5.4 Tipologías constructivas y usos de suelo predominantes en El Salvador 183
5.5 Población expuesta 186
6 Vulnerabilidad ante el riesgo sísmico 190
6.1 Análisis de vulnerabilidad 190
6.2 Modelos de vulnerabilidad 192
6.3 Funciones de fragilidad para El Salvador 192

6.4 Modelos de consecuencia 204

6.5 Mapas de vulnerabilidad física a nivel municipal 205

6.6 Registros de daños 208

6.7 Instrumento para levantamiento de daños por sismos 212

6.8 Prácticas constructivas históricas y evolución de la normativa de diseño por sismo 217

7 Análisis del riesgo 226

7.1 Exposición al riesgo 227

7.2 Análisis de riesgo sísmico a nivel nacional 237

7.3 Riesgo en infraestructura de prioridad estratégica 266

8 Indicadores de riesgo de desastre y gestión del riesgo 273

8.1 Elementos generales 273

8.2 Estimación de los indicadores 274

Referencias bibliográficas 282



Siglas y acrónimos

BCR	Banco Central de Reserva de El Salvador
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CEPAL	Comisión Económica para la América Latina y el Caribe
CEPREDENAC	Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central
CSE	Consejo Salvadoreño de Edificaciones
DOA	Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador
DIGESTYC	Dirección General de Estadística y Censos
EHPM	Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples
FEMA	Agencia Federal para el Manejo de Emergencias en Estados Unidos
GEM	Global Earthquake Model Foundation
IHC	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
INERV	Informe Nacional del Estado de Riesgos y Vulnerabilidades de El Salvador
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MARS	Multi-Adaptive Regression Splines
NEHRP	Programa Nacional de Reducción de Riesgos Sísmicos (National Earthquake Hazards Reduction Program)
NIBS	Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos
NTHMP	Programa Nacional de Mitigación de Peligros de Tsunami de los Estados Unidos
PAGER	Terremotos globales para respuesta
PCGIRD	Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres
PCGIRD	Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres
PREPARE	Proyecto Fortaleciendo la reducción del riesgo de desastres y salvando vidas
RESESCO	Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones
RIESCA	Proyecto Regional de Formación aplicada a los escenarios de Riesgos con Vigilancia y Monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos, hidrogeológicos en Centroamérica
SG-SICA	Secretaría General del Sistema de la Integración Centroamericana
SICA	Sistema de la Integración Centroamericana
SIMIH	Sistema de Monitoreo Integrado de Recursos Hídricos
UNDRR	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (en inglés, United Nations Office for Disaster Risk Reduction)
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNESCO/COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos. U.S. Geological Survey
ZFES	Zona de Falla de El Salvador

Introducción

El primer Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades (INERV), elaborado en 2017, marcó un hito al proporcionar un análisis inicial del riesgo en El Salvador. Abordó las principales amenazas naturales que afectan al país y delineó áreas críticas en función de su susceptibilidad, constituyendo una base sólida para futuras evaluaciones. El informe destacó la alta exposición del territorio salvadoreño a amenazas como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos, inundaciones y sequías, subrayando el impacto combinado de estos fenómenos con la vulnerabilidad social y económica.

Esta edición actualizada del INERV, elaborada por el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente, presenta una evaluación integral de las amenazas naturales, la vulnerabilidad, la exposición y el riesgo que enfrenta el país actualmente. Se emplearon metodologías probabilísticas y enfoques técnicos actualizados que permiten una comprensión más precisa del riesgo y sus implicaciones.

El documento expone los resultados de esta evaluación. Aunque se abordan todas las amenazas relevantes, se profundiza especialmente en la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico, dada su relevancia histórica y su impacto potencial. Según datos del INERV 2017, aproximadamente el 60% de la pérdida anual esperada en infraestructura crítica se atribuye a sismos, responsables también del 86 % de las pérdidas económicas nacionales. Debido a ello, el INERV 2024, proporciona información detallada sobre el impacto de los sismos en términos de pérdidas humanas y económicas, así como herramientas para mejorar la toma de decisiones.

Amenazas naturales en El Salvador: avances e impactos

El Salvador, al encontrarse en la zona de convergencia de las placas de Cocos y del Caribe, se caracteriza por una alta sismicidad. Esta actividad sísmica ha dado lugar a sismos destructivos a lo largo de la historia, como los ocurridos en 1951 en Chinameca distrito del departamento de San Miguel y en 1986 en San Salvador. En respuesta a esta amenaza persistente, el Ministerio de Medio Ambiente, como parte del Sistema Nacional de Protección Civil, ha desarrollado una herramienta informática que permite evaluar daños estructurales posteriores a un sismo. Esta herramienta identifica de manera rápida y precisa edificaciones con daños severos, moderados o leves, facilitando decisiones sobre su habitabilidad y fortaleciendo la gestión post-sismo. Además, la herramienta facilita la creación de una base de datos útil para análisis estructurales futuros, vinculando los daños con registros acelerográficos.

En paralelo, se avanza en la elaboración de un nuevo Código Salvadoreño de Edificaciones, liderado por una Comisión Técnica Rectora Permanente. El actual Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO), vigente desde 1994, presenta deficiencias significativas, especialmente en la estimación de la amenaza sísmica y en la consideración de los efectos de amplificación del terreno. El nuevo CSE busca establecer lineamientos técnicos para garantizar la seguridad y resiliencia de las infraestructuras frente a las condiciones sísmicas y climáticas de la región.

Este enfoque integrado –herramientas post-sismo, bases de datos, normativa actualizada– fortalece la capacidad nacional para reducir la vulnerabilidad sísmica en El Salvador.

Aunque menos frecuentes, los tsunamis también representan una amenaza para El Salvador. Eventos registrados en 1902 y 2012 causaron daños significativos, y los estudios actuales identifican como zonas críticas a la planicie costera occidental y a la bahía de Jiquilisco.

Además, el país se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico y cuenta con una cadena volcánica compuesta por más de 240 volcanes, de los cuales 36 son considerados activos y 10 se encuentran bajo vigilancia permanente. Las erupciones volcánicas han sido recurrentes en la historia reciente, siendo el volcán de Izalco el más activo en términos de registros eruptivos. La amenaza volcánica incluye diversos fenómenos como caída de ceniza, flujos de lava, emisiones de gases y lahares. Para su gestión, se han elaborado mapas de amenaza volcánica que simulan distintos escenarios eruptivos, constituyendo herramientas clave para la planificación territorial y la protección de comunidades.

El Salvador también enfrenta una creciente amenaza climática debido a la variabilidad y el cambio climático manifestándose en eventos extremos más frecuentes e intensos. Eventos como la Baja Presión E96 (2009), las tormentas Agatha (2010), Amanda/Cristóbal (2020) y Julia (2022), han evidenciado la vulnerabilidad del país ante precipitaciones intensas. Las lluvias intensas, especialmente durante la temporada de huracanes, generan un alto riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra en varias regiones del país.

Las modelaciones más recientes estiman que cerca del 10 % del territorio nacional es susceptible a inundaciones. Entre 2010 y 2022 se reportaron aproximadamente 3,100 eventos de este tipo, con un incremento marcado a partir de 2018. Las zonas urbanas y costeras, especialmente los departamentos de San Salvador y La Libertad concentran la mayoría de estos impactos.

Los deslizamientos de tierra constituyen otra amenaza recurrente, derivada de la combinación entre la topografía montañosa del país, el régimen de lluvias intensas y la actividad sísmica. Las zonas más afectadas corresponden a la cadena montañosa del norte, la cadena volcánica central y la sierra de Jucuarán. En estos sectores se han identificado áreas críticas con alta susceptibilidad, donde se han registrado pérdidas humanas y daños a la infraestructura. Para abordar este riesgo, se han desarrollado mapas de susceptibilidad utilizando modelos heurísticos y estadísticos, y se han realizado modelaciones de flujos de escombros en puntos clave.

En cuanto al déficit hídrico, El Salvador es altamente vulnerable a la sequía debido a su ubicación geográfica y a la influencia de fenómenos climáticos como El Niño y La Niña. La sequía, agravada por la deforestación y el mal uso de la tierra, impacta severamente la agricultura, la seguridad alimentaria, los recursos hídricos y la economía. El informe destaca cómo la canícula se ha intensificado en frecuencia y duración, afectando principalmente la zona oriental del país. Asimismo, los registros hidrométricos muestran caudales por debajo del promedio en varios ríos importantes, y niveles reducidos en embalses hidroeléctricos estratégicos.

En síntesis, el territorio salvadoreño enfrenta múltiples amenazas de origen geológico, climático e hidrometeorológico, cuya interacción con condiciones de vulnerabilidad estructural y social incrementa los niveles de riesgo. Estos desafíos requieren monitoreo constante, medidas de mitigación efectivas, instrumentos normativos actualizados y una planificación territorial basada en evidencia. Las futuras ediciones del INERV buscarán ampliar y profundizar el análisis de riesgo, con el objetivo de fortalecer el conocimiento técnico, la toma de decisiones y la resiliencia del país.

Capítulo 1

1. Principios teóricos en la evaluación de riesgos

1.1 Amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo

El riesgo de desastre se define como la probabilidad de una pérdida causada por un evento durante un tiempo definido, y puede ser medido en términos humanos, económicos o sociales. Se expresa como la posibilidad de que una comunidad experimente afectaciones a la vida, la salud, los medios de vida, los bienes y servicios, en un contexto y momento específicos en un futuro.

Esta probabilidad de pérdida está determinada por la interacción entre la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. La Tabla 1 presenta la definición de cada uno de estos componentes.

De manera simplificada el riesgo es una función que depende de tres variables:

$$R = f(A, E, V)$$

Donde:
R: riesgo de desastre
A: amenaza
E: exposición
V: vulnerabilidad

Tabla 1. Relación entre amenaza, exposición y vulnerabilidad

Concepto	Definición	Ejemplos
Amenaza	Probabilidad de que ocurran eventos de cierta intensidad en una zona y tiempo definido, reflejando características naturales que generalmente no pueden ser modificadas	Sismos, huracanes, deslizamientos de tierra, inundaciones, tsunamis.
Exposición	Medición de la población, propiedades, sistemas u otros elementos presentes en zonas donde existen amenazas	Número de personas albergadas en cada edificio, valor monetario de reposición de un edificio
Vulnerabilidad	Condición determinada por procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que disminuyen la capacidad de personas, comunidades e infraestructuras para resistir y recuperarse de un peligro, incrementando su susceptibilidad al impacto de las amenazas.	Infraestructuras deterioradas, comunidades en situación de pobreza, ubicación de viviendas en zonas propensas a desastres

Fuente: Elaboración propia.

La amenaza supone la identificación de condiciones físicas de un peligro latente que puede provocar un desastre. Puede tener su origen en la dinámica natural o ser inducidos por el hombre. Se caracteriza por su localización, intensidad, frecuencia y probabilidad de ocurrencia. Las amenazas pueden ser únicas, secuenciales o combinadas en su origen y efecto.

La susceptibilidad, por su parte, mide el grado en que un sistema es propenso a sufrir daños al exponerse a un peligro natural, y está influenciada por factores inherentes al sistema, tales como su ubicación geográfica, estructura física o composición biológica. Es crucial entender que la exposición a un peligro no implica necesariamente susceptibilidad.

La vulnerabilidad, en cambio, comprende diferentes características que son intrínsecas de la sociedad, predisponiéndola a sufrir daños en múltiples niveles. "Una población expuesta a los efectos de un fenómeno físico sufrirá más o menos daño, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad que exhiba. El nivel de riesgo de una sociedad está relacionado con sus niveles de desarrollo y su capacidad de modificar sus condiciones de vulnerabilidad" (Cardona, 2017; UNDRR, 2017; CEPAL, 2020)).



Figura 1. Zona de depósito del flujo de escombros ocurrido el 29 de octubre de 2020, que inició en el flanco norte de El Picacho (volcán de San Salvador) y afectó el distrito de Nejapa.
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2020.

La fragilidad, estrechamente vinculada a la vulnerabilidad física, se define como la incapacidad de los sistemas bióticos y abióticos expuestos al impacto de una amenaza con determinada severidad para absorber los efectos que puedan producir los fenómenos naturales. Esta condición aumenta la susceptibilidad de una comunidad a sufrir daños significativos, ya que los sistemas que carecen de la capacidad para amortiguar estos impactos agravan las consecuencias de la amenaza. La fragilidad, al igual que la vulnerabilidad, juega un papel crucial en la determinación del nivel de riesgo de una sociedad, afectando su capacidad de recuperación y resiliencia frente a los desastres.

En gestión de riesgos, una amenaza es un peligro potencial de desastre; la susceptibilidad es la predisposición a daños; la fragilidad, la incapacidad de absorber impactos y la vulnerabilidad es la integración de fragilidad y susceptibilidad en un contexto amplio. La amenaza se convierte en riesgo cuando existen edificaciones o personas expuestas a una amenaza determinada y el nivel de riesgo depende, no solo de la intensidad o severidad del evento, sino también de la capacidad de los activos expuestos para resistirlo. En otras palabras, la ocurrencia de un sismo, inundación o deslizamiento puede considerarse un fenómeno natural, pero no así un desastre.

En el análisis de riesgo, las metodologías comúnmente utilizadas se enfocan en asociar las amenazas identificadas con el inventario de activos expuestos, junto con las funciones de vulnerabilidad relacionadas. Este enfoque permite evaluar el porcentaje de daños esperados en las edificaciones expuestas para cada escenario planteado. El objetivo principal es determinar el nivel de riesgo existente en una determinada ubicación, con la finalidad de reducirlo a niveles considerados "aceptables". Este nivel de riesgo aceptable se define como el mínimo de pérdidas potenciales que una sociedad o comunidad puede tolerar, tomando en cuenta sus condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales. La valoración del riesgo es fundamental para definir líneas de acción hacia una gestión integral del mismo.

1.2 Gestión integral del riesgo

La gestión integral del riesgo de desastres es un proceso social donde el análisis, caracterización y comprensión del riesgo permite evaluar, formular políticas, estrategias, planes, y acciones para fortalecer la seguridad nacional, el bienestar y la calidad de vida de las personas, y contribuir al desarrollo sostenible.

Desafortunadamente, los sistemas físicos como las amenazas geológicas o hidrometeorológicas, donde un gran número de variables condicionan el proceso de su comportamiento, son difíciles de predecir y modelar con alta precisión y por consiguiente los mecanismos generadores de dichas amenazas.

Como resultado, la evaluación de la amenaza, en muchos casos se realiza combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos ocurridos en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados. Sin embargo, para el análisis de la vulnerabilidad existe cierto grado de maniobra para poder incidir en ella desde una perspectiva amplia considerando aspectos físicos, sociales, económicos, institucionales y ambientales. Esta actuación busca garantizar que la gestión de riesgos sea un aspecto clave que contribuya a la disminución de impactos y de posibles desastres, y de igual forma, fortalecer la resiliencia de la población; es decir, su capacidad de recuperarse ante eventos intensos.

La gestión de riesgo de desastre es responsabilidad de todas las autoridades y ciudadanos a través de la implementación de los tres procesos de gestión de riesgo: conocimiento del riesgo (identificación y escenarios de riesgo, análisis, evaluación, monitoreo y seguimiento), reducción del riesgo (intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones del riesgo existente), manejo del desastre (preparación para la respuesta a emergencia, preparación para la recuperación post desastre, ejecución de la respuesta y recuperación) (Figura 2).



Figura 2. Gestión integral de riesgos
Fuente: Mauricioromerot. (2023, octubre 23).

Por consiguiente, cualquier proceso de desarrollo debe considerar el proceso de gestión de riesgo para prevenir o mitigar los efectos que producen los desastres. La formulación, implementación y ejecución de políticas públicas en gestión de riesgos son cruciales para la prevención y mitigación a mediano y largo plazo, reduciendo significativamente el riesgo y su impacto ante desastres, reconociendo el riesgo como una realidad dinámica; por lo tanto, la sociedad requiere mecanismos diferenciados para gestionar las distintas condiciones de riesgo que existen o que pueden llegar a existir. La ocurrencia de posibles desastres afecta no solo al crecimiento y desarrollo económico, sino que puede poner en riesgo la sostenibilidad de las finanzas públicas (Ministerio de Hacienda, 2018).

En ese sentido, y en el tema de gestión de riesgo, la XXXV Reunión Ordinaria de Jefes de Estado y de Gobierno de los países de la Secretaría General del Sistema de la Integración Centroamericana (SG-SICA) y el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), aprobó en el año 2010 la Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres (PCGIRD) armonizada con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.

El Gobierno de El Salvador ha realizado un aporte significativo hacia el fortalecimiento en la formulación de políticas y herramientas institucionales en el tema de la gestión del riesgo y cambio climático. Lo anterior a través del fortalecimiento al Sistema Nacional de Protección Civil con la elaboración e implementación de la Ley de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres; Ley de Creación del Fondo de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres; Política Nacional de Protección Civil, Prevención de Riesgos y Mitigación de Desastres; Plan Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres, Ley del Medio Ambiente, Decreto Ejecutivo n° 42; competencias del Ministerio de Medio Ambiente, Política de Medio Ambiente 2012; Plan Nacional de Cambio Climático de El Salvador; normativas de salud y códigos municipales, entre otros.

1.3 Resiliencia

La resiliencia se define como la capacidad de un sistema social o físico para absorber el impacto de un desastre y recuperarse. Para el caso de un sistema físico amenazado por un sismo, las características de esta interpretación se centran en a) reducción de fallas probables: la reducción del daño y fallas esperadas a la infraestructura crítica, sistemas y componentes; b) consecuencias reducidas de las fallas: en términos de lesiones, pérdidas de vidas humanas, daños e impactos negativos económicos y sociales,

y c) reducción del tiempo de recuperación: el tiempo requerido para la restauración de un sistema específico o de un grupo de sistemas al nivel de funcionalidad normal o predesastre. En la Figura 3, se presentan las fases del desastre en relación al estatus comunitario.

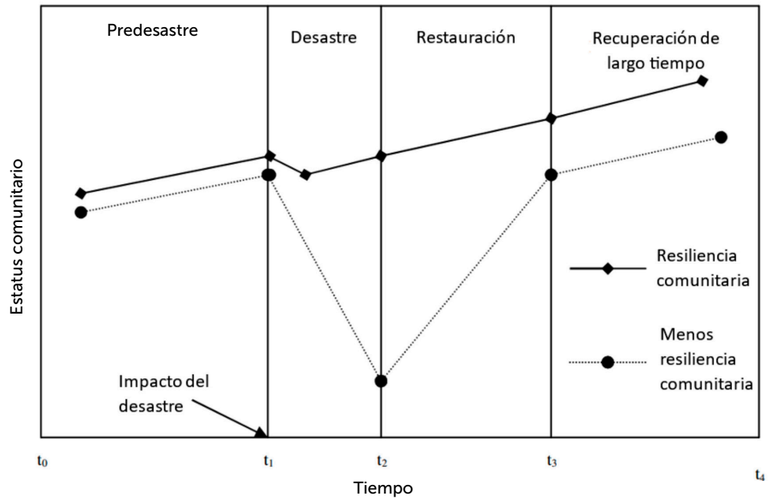


Figura 3. Trayectoria hipotética de las fases del desastre.
Fuente: (Mayunga, 2007)

La gestión integral del riesgo se sustenta en la comprensión y aplicación interrelacionada de conceptos clave: amenaza, susceptibilidad, vulnerabilidad, fragilidad, riesgo y resiliencia. La resiliencia, representa la capacidad de recuperación ante desastres. Para alcanzarla, la gestión integral del riesgo promueve el conocimiento, la prevención y la preparación, involucrando a todos los actores en la construcción de comunidades más seguras y sostenibles.

1.4 Impacto

El Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales define el impacto de los efectos que las amenazas naturales, los eventos meteorológicos y climáticos extremos producen sobre los sistemas naturales y humanos. Estos efectos se manifiestan en vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras, como resultado de la interacción entre fenómenos climáticos peligrosos y la vulnerabilidad de los sistemas expuestos. En este contexto, los términos "consecuencias" y "resultados" se utilizan como sinónimos de impacto. En los últimos cinco años, El Salvador ha experimentado cinco eventos naturales de gran envergadura con impactos significativos. Este aumento, de origen multicausal, se relaciona directamente con la creciente vulnerabilidad y exposición de personas y bienes.

A continuación, en la Tabla 2 se resumen los principios teóricos fundamentales utilizados en la evaluación del riesgo.

Tabla 2. Principales conceptos en la evaluación del riesgo

Concepto	Definición simplificada	Ejemplos
Amenaza	Probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso en un tiempo y lugar específicos.	Sismos, tormentas, erupciones volcánicas.
Exposición	Elementos presentes en zonas susceptibles de ser afectadas por una amenaza.	Población, infraestructura, medios de vida.
Vulnerabilidad	Condiciones que aumentan la susceptibilidad de sufrir daños ante una amenaza.	Pobreza, viviendas en zonas de riesgo, falta de planificación urbana.
Susceptibilidad	Grado en que un sistema puede sufrir daños por su ubicación o características.	Ubicación en pendientes, edificaciones mal diseñadas y mal construidas.
Fragilidad	Incapacidad estructural o funcional para resistir impactos de una amenaza.	Infraestructura deteriorada, sistemas frágiles sin capacidad de absorción.
Riesgo	Probabilidad de pérdidas considerando amenaza, exposición y vulnerabilidad.	Impactos económicos, sociales o ambientales ante eventos extremos.

Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 2

2. Contexto nacional

2.1 Área de estudio

El territorio de El Salvador limita al poniente con la República de Guatemala; al norte y al oriente con la República de Honduras; al oriente también colinda con la República de Nicaragua en las aguas del golfo de Fonseca; y al sur con el océano Pacífico, como se muestra en la Figura 4.

En cuanto a su organización territorial interna, El Salvador está conformado por 14 departamentos agrupados en cuatro zonas geográficas: central, paracentral, occidental y oriental. Estos departamentos se estructuran en 44 municipios, los cuales se subdividen en un total de 262 distritos, según lo establecido en la Ley Especial para la Reestructuración Municipal, publicada en el Diario Oficial el 14 de junio de 2023.

Es relevante señalar que esta nueva configuración territorial fue aprobada el 13 de junio de 2023, marcando un cambio significativo en la administración del territorio nacional. Esta reorganización tiene implicaciones directas en los mecanismos de representación política, la gestión local y el modelo de gobernanza económica y administrativa del país.



Figura 4. Mapa de división política administrativa.
Fuente: Elaboración propia con datos MARN (2024).

2.2 Características demográficas

Según las proyecciones de población del Censo de Población y Vivienda 2007 con revisión 2021, la población de El Salvador para el año 2022 se estimó en 6,330,947 habitantes, de los cuales 2,957,002 eran hombres (46.7 %) y 3,373,945 (53.3 %) mujeres (BRC,2023).

De ese total, 3,906,194 personas residían en áreas urbanas y 2,424,753 en áreas rurales, lo que representa el 61.7 % y 38.3 % de la población total respectivamente (BRC, 2023).

Por su parte, el Área Metropolitana de San Salvador, concentra 1,698,212 habitantes, equivalentes al 26.8 % de la población total del país (Figura 5). La Figura 6 muestra la distribución en el espacio de la densidad poblacional del país.

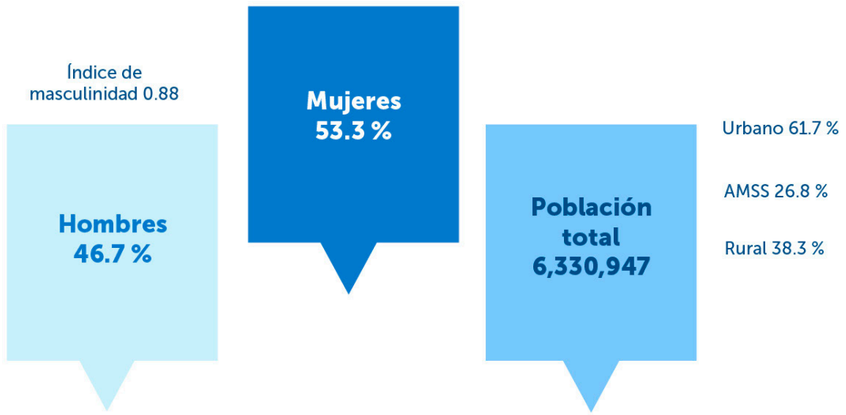


Figura 5. Desagregación por área geográfica y sexo de la población de El Salvador 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples EHPM de Banco Central de Reserva BCR (2023).

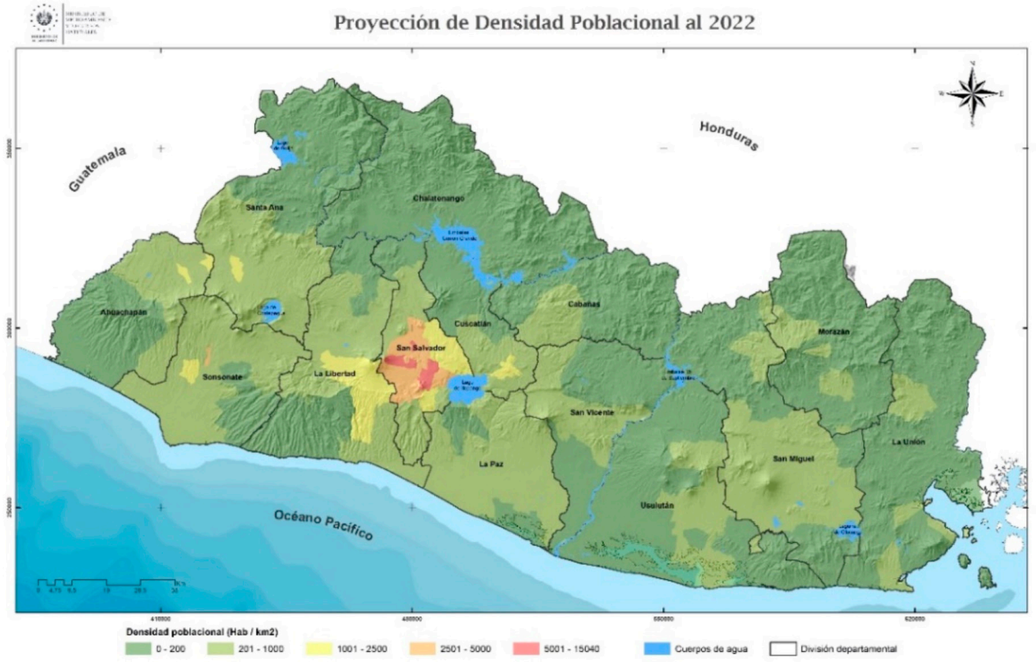


Figura 6. Mapa de densidad poblacional (hab/km^2).
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Para el año 2022, el 65.7 % de la población total se encontraba en el rango de la edad teóricamente activa, mientras que el 34.3 % de la población estaba en el rango de edad teóricamente inactiva (Figura 7). Esta distribución destaca la presencia significativa de una población en edad productiva, lo cual tiene implicaciones relevantes tanto en el ámbito económico como en el social.

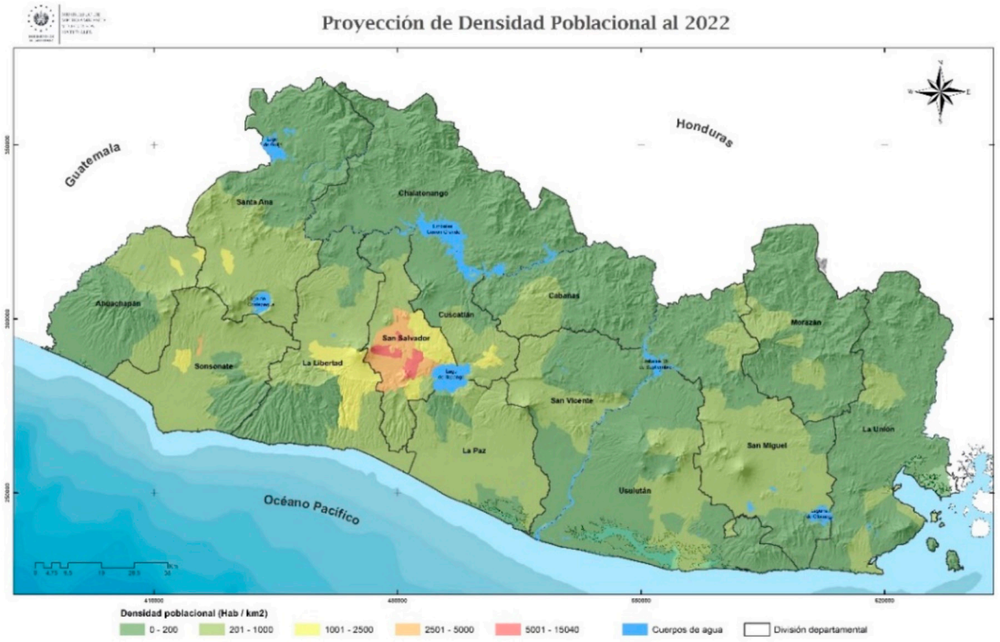


Figura 6. Mapa de densidad poblacional (hab/km^2).
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Para el año 2022, el 65.7 % de la población total se encontraba en el rango de la edad teóricamente activa, mientras que el 34.3 % de la población estaba en el rango de edad teóricamente inactiva (Figura 7). Esta distribución destaca la presencia significativa de una población en edad productiva, lo cual tiene implicaciones relevantes tanto en el ámbito económico como en el social.

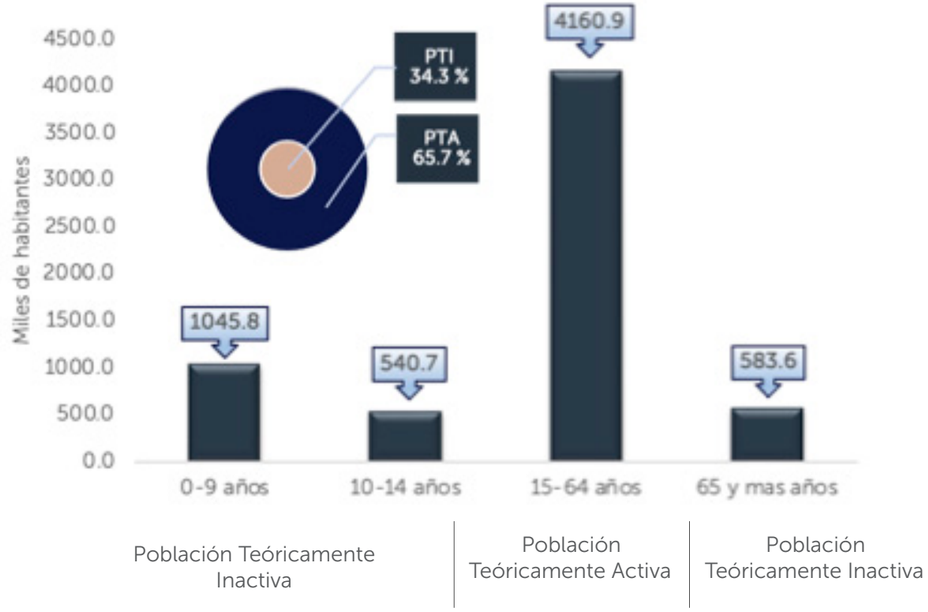


Figura 7. Distribución de la población por condición de actividad económica 2022.
Fuente: Elaboración propia con proyecciones de población. Revisión 2021. DIGESTYC (2021).

2.3 Perfil nacional económico

Durante el período comprendido entre 2018 y 2023, la economía de El Salvador experimentó una serie de desafíos y oportunidades. A lo largo de estos años, el país se vio afectado por factores relacionados con la gobernabilidad, la volatilidad económica regional y global, así como por los impactos de desastres naturales y la pandemia por COVID-19, que afectó gravemente no solo al sector salud, sino también a múltiples sectores, principalmente al económico.

A pesar de estos obstáculos, se han realizado esfuerzos significativos para impulsar el crecimiento económico y promover la estabilidad financiera a través de políticas orientadas a fortalecer sectores clave como la industria manufacturera, el turismo y la agricultura, buscando diversificar la economía y fomentar la inversión extranjera.

El Producto Interno Bruto (PIB) mostró una tendencia ascendente en los últimos años, con la excepción de una caída registrada en 2020, como consecuencia directa del impacto económico de la pandemia. En síntesis, el período 2018-2023 se caracterizó por una combinación de avances y desafíos en la economía salvadoreña, acompañados de esfuerzos continuos para promover el desarrollo sostenible y equitativo.

2.3.1 Productor Interno Bruto (PIB) total anual a precios corrientes

El PIB representa el valor monetario de la producción de bienes y servicios finales generados en un país o región durante un periodo determinado, generalmente constituyéndose como el tercer año consecutivo con un incremento tras la contracción causada por la pandemia COVID-19.

El valor nominal del PIB en el año 2023 fue de $34,015.62 millones, lo que representa un incremento de $2,026.7 millones respecto al año 2022, y de $4,972.48 millones en comparación con 2021 (Figura 8).

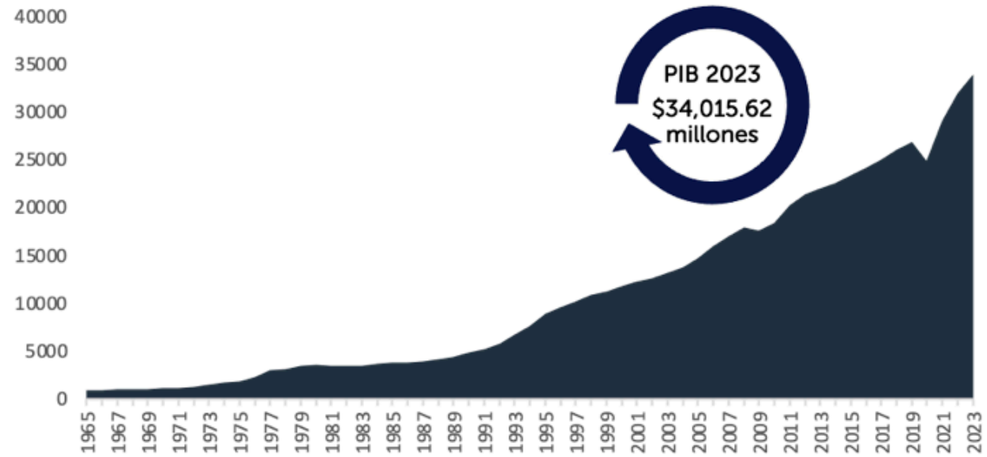


Figura 8. PIB total anual a precios corrientes en dólares 2023.
Fuente: Elaboración propia con datos de BCR (2023).

2.3.2 Tasa de crecimiento del PIB total anual a precios constantes

El PIB, además de representar el total de bienes y servicios producidos en un país, se utiliza como un indicador clave del bienestar económico. Una forma simple de entender el PIB es revisar su fórmula desde una perspectiva general:

PIB = Consumo + Inversión + Gasto Público + Exportaciones – Importaciones

Una forma de evaluar el desempeño económico es a través de la tasa de crecimiento del PIB, calculada a precios constantes para eliminar el efecto de la inflación.

$$\text{Tasa de crecimiento PIB} = \frac{\text{PIB del periodo (n)} - \text{PIB del periodo (n-1)}}{\text{PIB del periodo (n-1)}} \times 100$$

Para el año 2022, la economía salvadoreña creció un 2.8 % mientras que en 2023 el crecimiento fue de 3.51 % (Figura 9). Este crecimiento fue impulsado principalmente por el gasto de consumo final (1.81 %) y la exportación de bienes y servicios (9.14 %)[1]

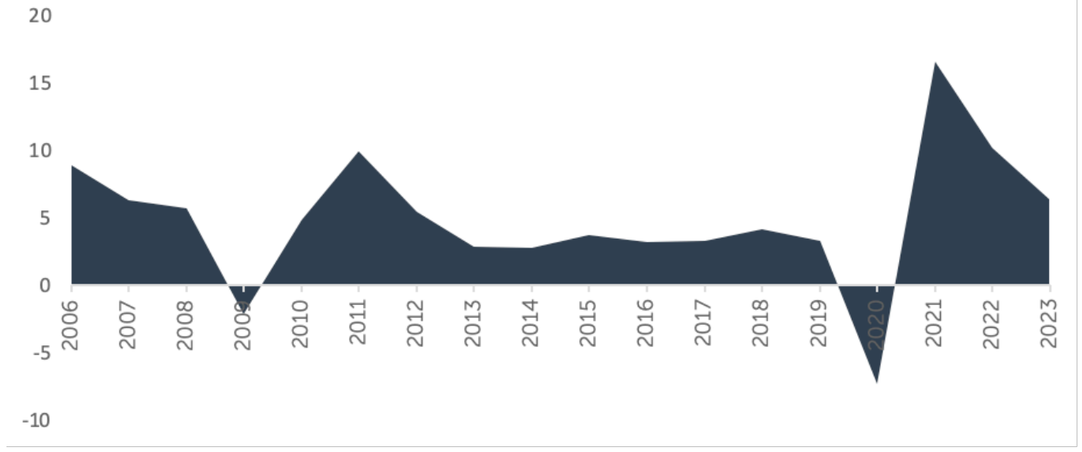


Figura 9. Tasa de crecimiento del PIB total anual a precios corrientes hasta 2023.
Fuente: Elaboración propia con datos de BCR (2023).

2.3.3 PIB anual por actividad económica a precios corrientes en dólares

En la Figura 10, se presenta el aporte de las distintas actividades económicas al PIB de 2022, calculado a precios corrientes. Los sectores con mayor participación fueron: la intermediación financiera (21.90 %), las industrias manufactureras (17.60 %), el comercio (15.80 %) y servicios personales y comunales (21.0 %). En conjunto, estos sectores representaron el 76.3 % del total del PIB.

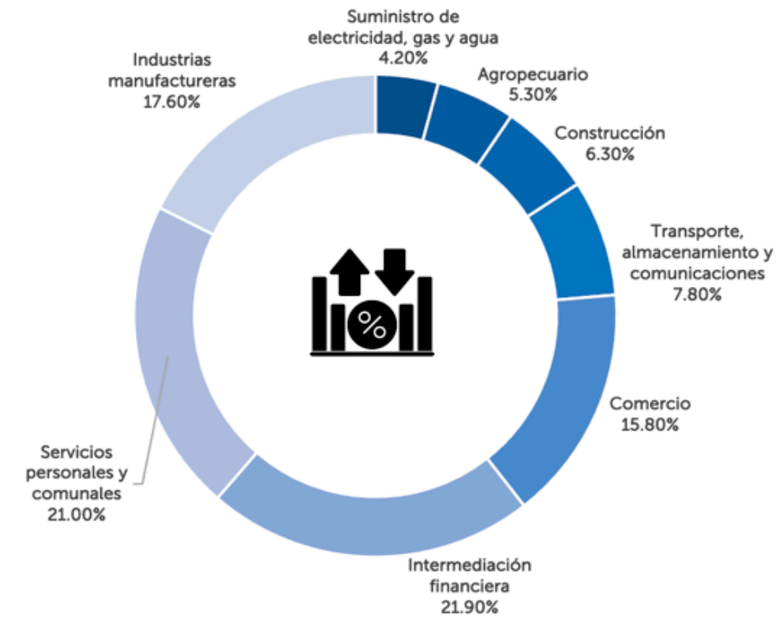


Figura 10. Valor agregado del PIB por actividad económica a precios corrientes 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL (2022).

[1]Cifras de PIB: exportación de bienes y servicios, BCR.

Según la clasificación del Banco Central de Reserva [BCR], las actividades con mayor crecimiento en 2022 fueron: suministro de electricidad, gas, vapor y agua (14.62 %), Construcción (13.10 %), actividades profesionales, científicas y técnicas (10.75 %) y actividades de servicios administrativos (9.88 %).

El potencial económico del país, vinculado a la distribución de las actividades productivas y el uso del suelo, permite identificar zonas con mayor aporte al PIB. En la Figura 11, se observa que San Salvador concentran la mayoría de las áreas con mayor potencial económico que contribuyen significativamente al PIB; seguido por San Miguel, donde también se identifican zonas de alto aporte económico. En el resto del territorio nacional estas zonas se distribuyen en menor proporción, destacando aquellas con contribuciones al PIB entre el 13 % al 20 %, y otras entre un 0 % y un 7 %.

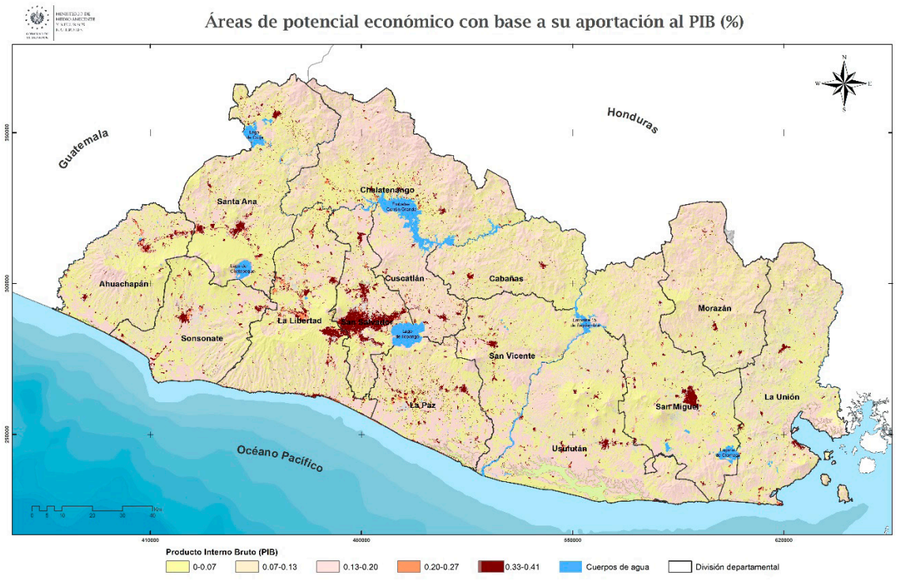


Figura 11. Mapa de áreas de potencial económico con base en su aportación al PIB (%).
Fuente: Elaboración propia con datos MARN (2024).

2.3.4 Inflación y remesas

Otros indicadores relevantes en la economía salvadoreña son la inflación y las remesas familiares. En 2022, El Salvador cerró con una inflación del 7.3 %, atribuida principalmente al incremento generalizado de precios en todos los rubros económicos, con excepción del de comunicaciones. Los principales aumentos de precios se dieron en el rubro de alimentos y bebidas no alcohólicas (12.2 %), muebles y artículos para el hogar (8.3 %), restaurantes y hoteles (8.1 %) y recreación y cultura (8.0 %). A pesar de haber sido la inflación más alta en una década, El Salvador registró la más baja de la región centroamericana en ese año.

Respecto a las remesas familiares, en 2022 se recibió un total de $7,819 millones, lo que representó un incremento de $234 millones respecto a 2021, equivalente a un crecimiento del 3.1 %. Estas remesas correspondieron al 24 % del PIB. La zona central del país fue la que más recibió ($2,861 millones), seguida por la zona oriental ($2,378 millones). Este comportamiento fue influenciado por la actividad económica de la diáspora salvadoreña, principalmente en Estados Unidos. El BCR estima que alrededor de 2.1 millones de salvadoreños se beneficiaron del envío de remesas desde el exterior.

2.3.5 Ingresos, gastos y deuda pública

Al cierre de 2022, el gobierno central registró ingresos y donaciones por un total de $7,881.3 millones, de los cuales $7,861 millones correspondieron a ingresos tributarios. Esta cifra representó un aumento de $643 millones respecto a 2021. En cuanto a los egresos, se erogaron $8,423 millones, siendo el gasto corriente el principal componente ($7,561 millones). Como resultado, el déficit fiscal fue de $860.3 millones, equivalente al 2.7 % del PIB, incluyendo el gasto en pensiones.

La deuda pública total ascendió en 2022 a $25,350.12 millones, lo que representa un incremento de $980 millones respecto al año anterior. Este monto equivale al 79.1 % del PIB, incluyendo la deuda previsional.

2.4 Educación

2.4.1 Tasa de analfabetismo

Los conceptos de analfabetismo, alfabetización y analfabeto evidencian parentesco, pero no se deben analizar de igual manera. El analfabetismo describe un análisis de interés sobre desigualdad. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), una persona analfabeta es alguien que no es capaz de leer y escribir una breve y sencilla descripción de hechos relativos a su vida cotidiana. De manera paralela, la UNESCO define el analfabetismo como el estatus de una persona que no tiene habilidades para leer, escribir y comprender una frase simple y corta.

A través de la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM) se obtienen datos de analfabetismo anualmente, refiriéndose a la condición en que las personas carecen de habilidades para leer y escribir. Siguiendo los lineamientos establecidos por la UNESCO, se calcula dicho indicador para la población de 10 años y más.

La tasa de analfabetismo en las zonas rurales continúa siendo la más alta, alcanzando un 15.2 %, lo que se mantiene constante en comparación con el año anterior. Por otro lado, en las áreas urbanas, la tasa de analfabetismo se sitúa en un 6.5 %, mostrando una ligera disminución con respecto al 6.8 % registrado en 2021. A nivel nacional, la tasa de analfabetismo se sitúa en un 9.7 %, reflejando una disminución del 0.3 % con respecto al año anterior (Figura 12).

Un dato importante es que el analfabetismo tiende a incrementarse a medida que las edades son más avanzadas. En general, existe una brecha importante entre el área rural y urbana al medir el analfabetismo (Figura 12).

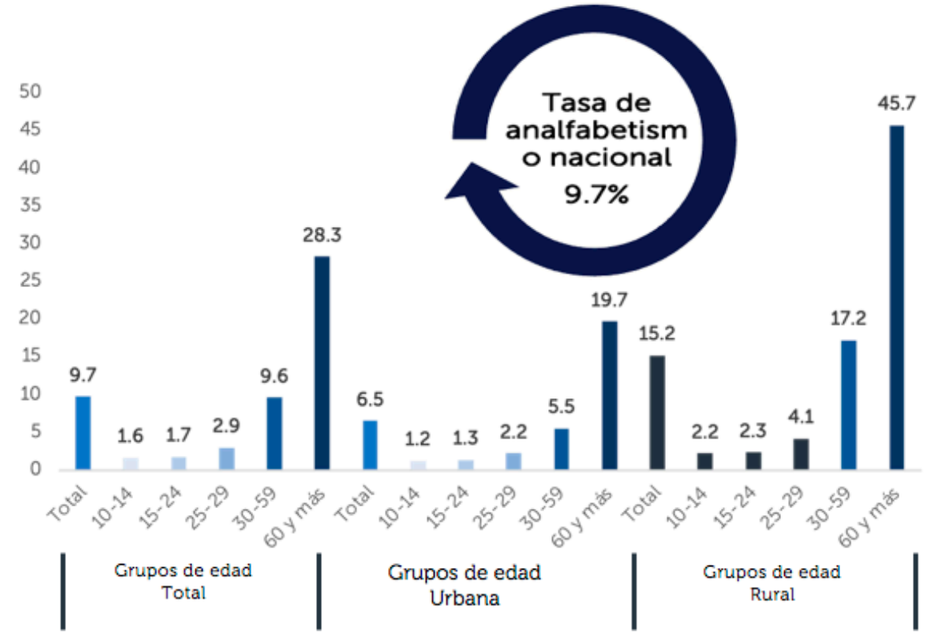


Figura 12. Tasa de analfabetismo de la población de 10 años y más por área geográfica 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

El analfabetismo también muestra una brecha de género. Esta se acentúa particularmente en los dos grupos etarios de mayor edad: de 30 a 59 años y, con mayor notoriedad, en el grupo de 60 años en adelante. En este último, las mujeres presentan una tasa de analfabetismo 11.5 puntos porcentuales más alta que la de los hombres. En los grupos etarios más jóvenes, la disparidad tiende a ser menos pronunciada, aunque persiste una leve prevalencia del analfabetismo entre los hombres (Figura 13).

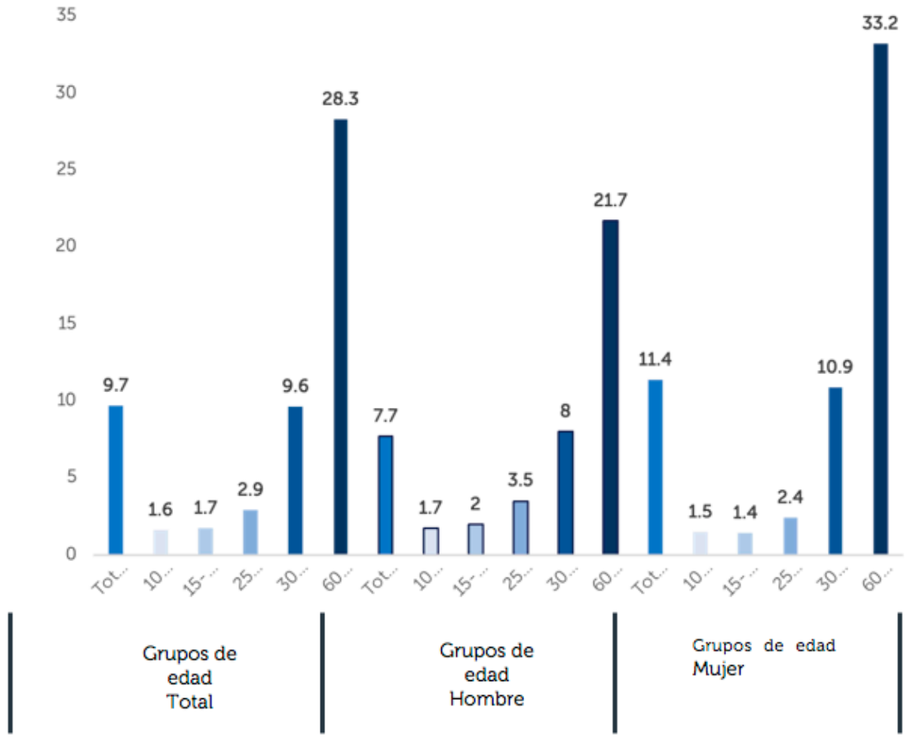


Figura 13. Tasa de analfabetismo en la población de 10 años y más, por grupos de edad y sexo, 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

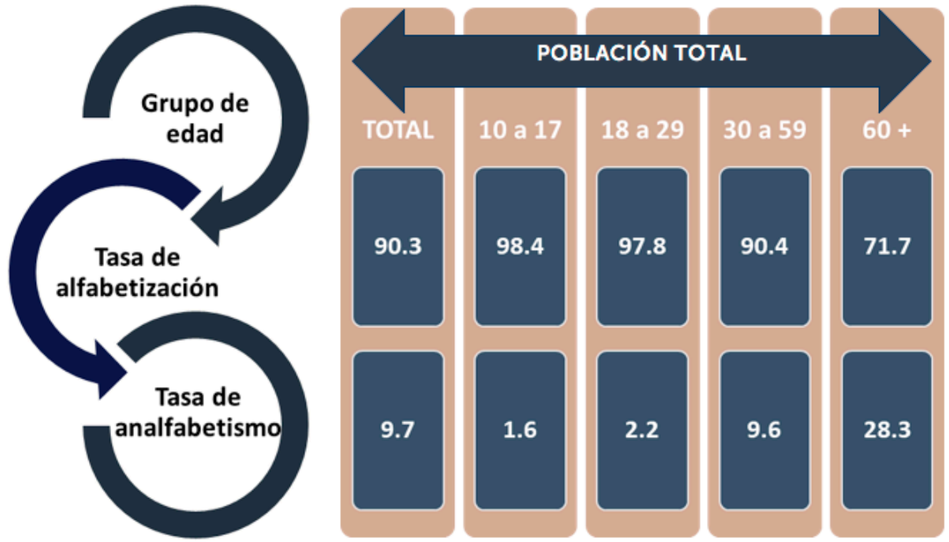


Figura 14. Porcentaje de población de 10 años y más de edad por condición de alfabetización según grupo de edad 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

A nivel departamental, se observa una brecha significativa en la tasa de analfabetismo. San Salvador registra la tasa más baja con un 5.3 %, mientras que La Unión presenta la más alta, con un 16.8 %. Desde un enfoque territorial, se evidencia que la zona oriental del país concentra los niveles más elevados de analfabetismo en comparación con el resto del territorio nacional.



Figura 15. Porcentaje de población de 10 años y más según condición de alfabetización, por departamento, 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.4.2 Cobertura escolar

Los avances de un país en materia educativa pueden evaluarse desde diversas dimensiones, siendo una de las más relevantes la asistencia escolar. Este indicador guarda una relación directa con los niveles de pobreza y el desarrollo económico de una nación. La asistencia escolar resulta fundamental para asegurar el acceso efectivo a la educación, mientras que su ausencia pone de manifiesto desigualdades estructurales persistentes.

En términos geográficos, el área rural presenta una menor tasa de asistencia escolar (47.8 %) en comparación con el área urbana (56.0 %), mientras que en el Área Metropolitana de San Salvador la asistencia alcanza el 58.1 %. Por sexo, los niveles son similares: 52.9 % para hombres y 52.3 % para mujeres. Por grupo etario, se destaca el rango de 4 a 12 años con una asistencia escolar del 87.1 %, seguido por el grupo de 13 a 17 años con un 83.8 %, y una marcada disminución en el grupo de 18 a 29 años, con un 18.0 % (Figura 16)

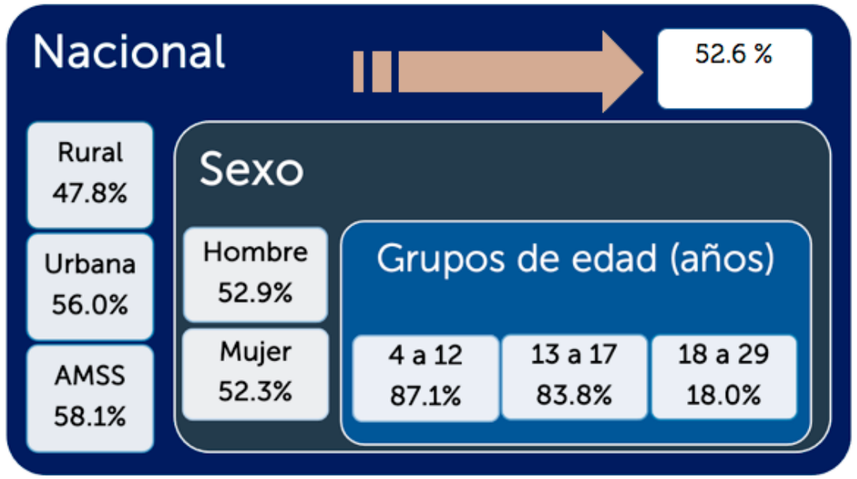


Figura 16. Tasa de asistencia escolar de la población de 4 a 29 años por área, sexo y grupos de edad 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

La inasistencia escolar permite identificar factores como pobreza, accesibilidad, condiciones de vida y niveles de ingreso. Según la EHPM 2022, un total de 1,300,224 personas entre 4 y 29 años declararon no asistir a la escuela, lo cual representa un 47.4 % de la población en ese grupo etario. Además, destaca que la mayor tasa de inasistencia corresponde al grupo de 19 a 29 años (84.8 %), mientras que el grupo de 7 a 15 años tiene la tasa más baja (4.9 %), lo que indica que la población busca cursar la educación básica, pero no continúa con estudios técnicos o universitarios



Figura 17. Tasa de inasistencia a la escuela de la población de 4 a 29 años por rangos de edad para distintos niveles de escolaridad 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.4.3 Escolaridad alcanzada

En cuanto a escolaridad alcanzada, el promedio nacional en 2022 fue de 7.2 grados. En el área urbana, el promedio fue de 8.2 grados, mientras que en el área rural fue de 5.6 grados, notablemente por debajo del promedio nacional. Al analizar por sexo, los hombres alcanzaron un promedio de 7.3 grados y las mujeres 7.1 grados. En términos etarios, el grupo de 18 a 29 años registró el promedio más alto con 10.3 grados, y el de 6 a 17 años el más bajo con 4.1 grados (Figura 18).

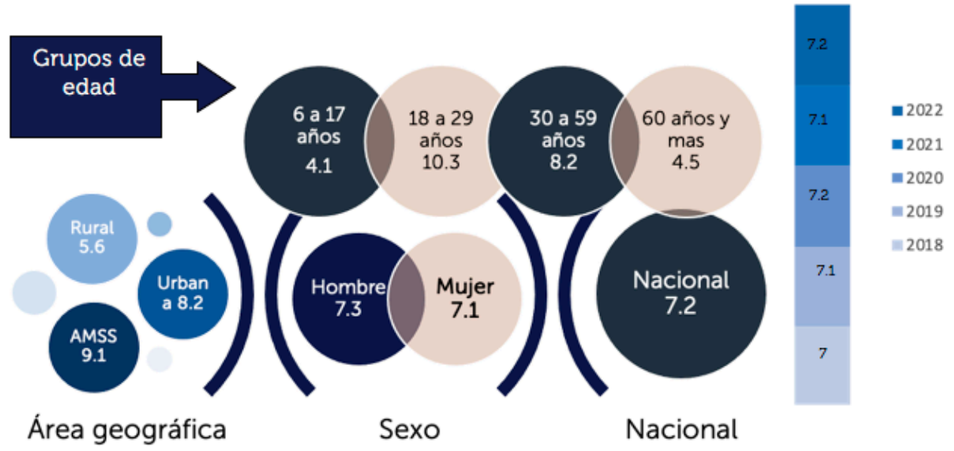


Figura 18. Años de escolaridad promedio de la población de 6 años y más según área, sexo y grupos de edad 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.5 Empleo

El empleo constituye uno de los principales motores de la economía de un país, ya que la generación de riqueza está estrechamente vinculada a la cantidad y calidad de los puestos laborales en las diferentes ramas productivas. En general, la existencia de más y mejores oportunidades de empleo impulsa el crecimiento económico y mejora el bienestar de la población. Sin embargo, es fundamental considerar que un empleo que no responde a las expectativas ni necesidades de los trabajadores puede limitar su desarrollo, afectar su motivación y disminuir su rendimiento. Aun en contextos de crecimiento económico, la falta de condiciones adecuadas en el entorno laboral puede representar un obstáculo significativo para el progreso individual y colectivo.

2.5.1 Población en Edad de Trabajar (PET)

De acuerdo con el Código de Trabajo, en El Salvador se considera como Población en Edad de Trabajar (PET) a todas las personas a partir de los 16 años. La Organización Internacional del Trabajo (OIT) no establece un límite de edad superior para esta categoría, delegando esta definición a la legislación de cada país.

El crecimiento del empleo productivo está condicionado, en primera instancia, por el dinamismo de la actividad económica, ya que este establece los márgenes dentro de los cuales pueden expandirse tanto el empleo como la productividad laboral.

Según la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM, 2022), la PET en El Salvador representa el 75.5 % de la población total, lo que implica que aproximadamente 75 de cada 100 personas tienen edad legal para integrarse a la fuerza laboral. De esta población, el 63.5 % reside en el área urbana y el 36.5 % en la zona rural. En cuanto a su distribución por sexo, el 45 % corresponde a hombres y el 55 % a mujeres (Figura 19). Al analizar la Población en Edad de Trabajar (PET) según el sexo y los grupos etarios, se observa que el 52.8 % de los hombres se encuentra en el rango de 16 a 39 años, considerado el grupo de edad más productivo. En el caso de las mujeres, este grupo representa el 49 % de su PET. Por otro lado, el 47.1 % de los hombres se ubica en el grupo de 40 años o más, mientras que en las mujeres este porcentaje asciende al 51 % (Figura 20).

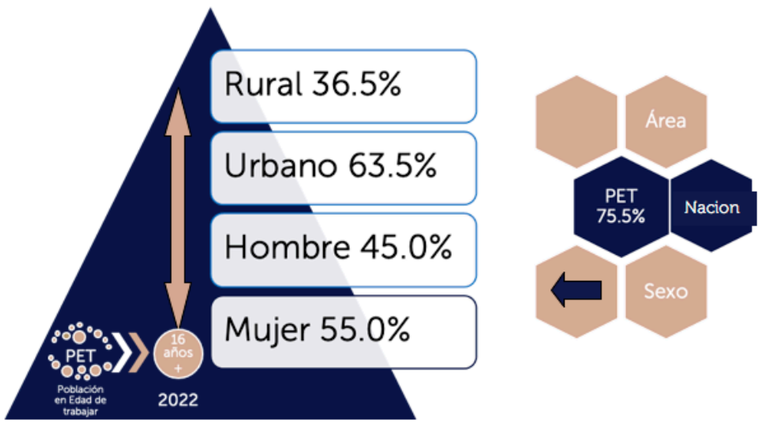


Figura 19. PET según área geográfica y sexo 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

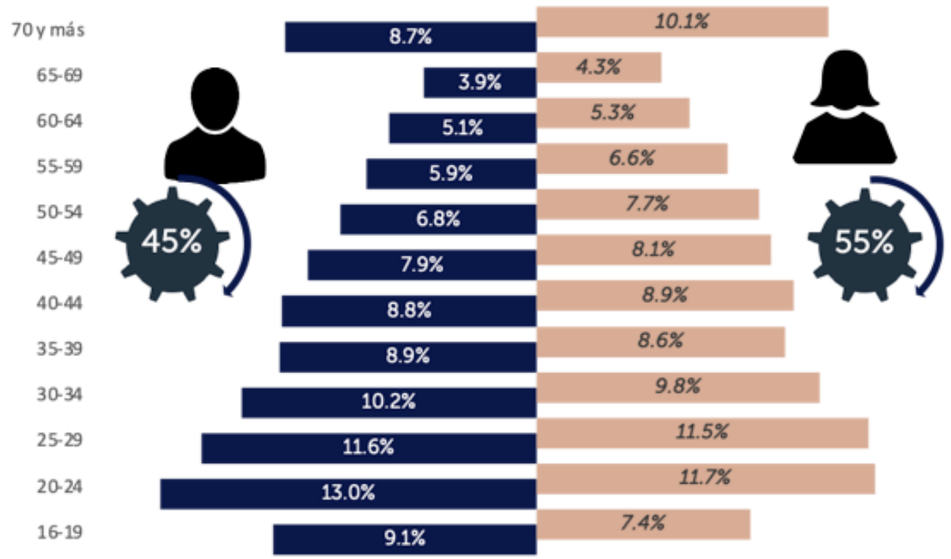


Figura 20. Pirámide de la Población en Edad de Trabajar 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.5.2 Población Económicamente Activa (PEA)

La Población Económicamente Activa (PEA) constituye un subgrupo de la Población en Edad de Trabajar (PET) que participa activamente en el mercado laboral. Está integrada por personas que tienen una ocupación remunerada, así como por aquellas que, aun estando desocupadas, se encuentran en búsqueda activa de empleo. En términos estadísticos, la PEA se compone de la población ocupada más la población desocupada.

Contar con estimaciones confiables sobre la PEA permite disponer de un inventario cuantitativo y cualitativo del recurso humano disponible en el país, distribuido por sectores económicos y por ubicación geográfica. Esta información resulta fundamental para el diseño e implementación de políticas públicas, planes económicos y programas sociales orientados a mejorar la utilización de los recursos humanos y comprender las transformaciones que el desarrollo económico puede generar.

En el año 2022, la PEA en El Salvador estuvo conformada por 2,997,102 personas, de las cuales el 57.9 % eran hombres y el 42.1 % mujeres. Por área geográfica, el 64.6 % de la PEA se encontraba en zonas urbanas, mientras que el 35.4 % residía en zonas rurales (Figura 21).

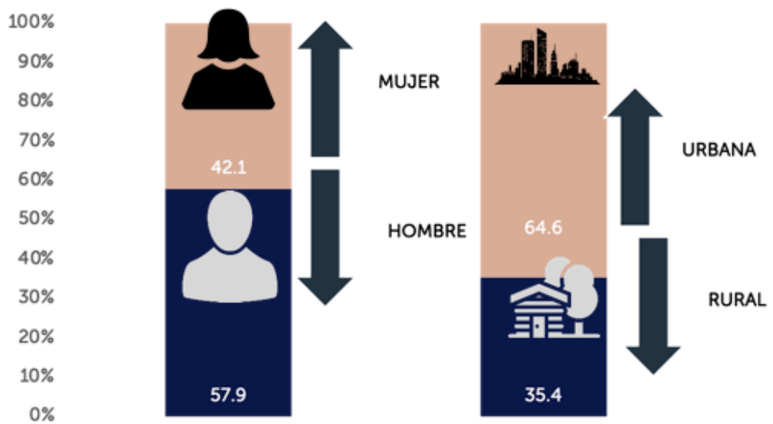


Figura 21. Distribución de la PEA por área geográfica y sexo 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.5.3 Ocupación y desempleo

Un indicador clave para evaluar el desempeño del mercado laboral es la tasa de ocupación, definida como la proporción entre la población ocupada y el total de la PEA. Este indicador refleja el grado de utilización efectiva del recurso humano disponible para el trabajo y se interpreta como una medida de la capacidad del país para generar empleos.

La tasa de ocupación se contrapone a la tasa de desempleo, proporcionando una visión complementaria sobre el comportamiento del mercado laboral. Es importante no confundirla con la tasa de actividad, la cual se calcula con base en la población en edad de trabajar, no en la PEA.

En el año 2022, la tasa de ocupación en El Salvador fue del 95 % a nivel nacional. Por área geográfica, alcanzó el 95.2 % en la zona urbana y el 94.5 % en la zona rural. En cuanto al sexo, la tasa fue levemente superior en los hombres (95 %) en comparación con las mujeres (94.8 %).

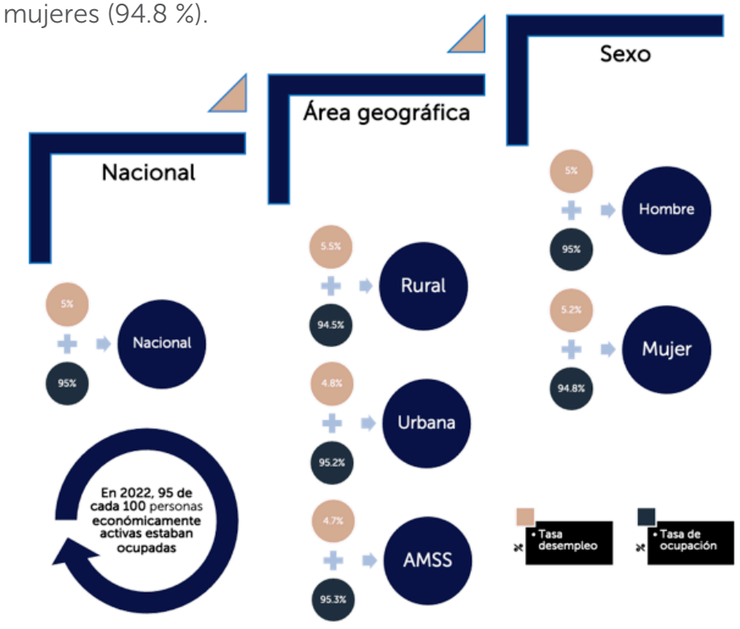


Figura 22. Tasa de ocupación y tasa de desempleo 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

La tasa de desempleo en El Salvador no es homogénea, sino que presenta variaciones significativas entre departamentos. Por ejemplo, La Paz y Cuscatlán registraron las tasas de desempleo más bajas en 2022, con valores de 4.2 % y 4.3 %, respectivamente. En contraste, el departamento de San Vicente reportó la tasa más alta a nivel nacional, con un 8.2 %, evidenciando disparidades regionales en el acceso a oportunidades laborales (Figura 23).

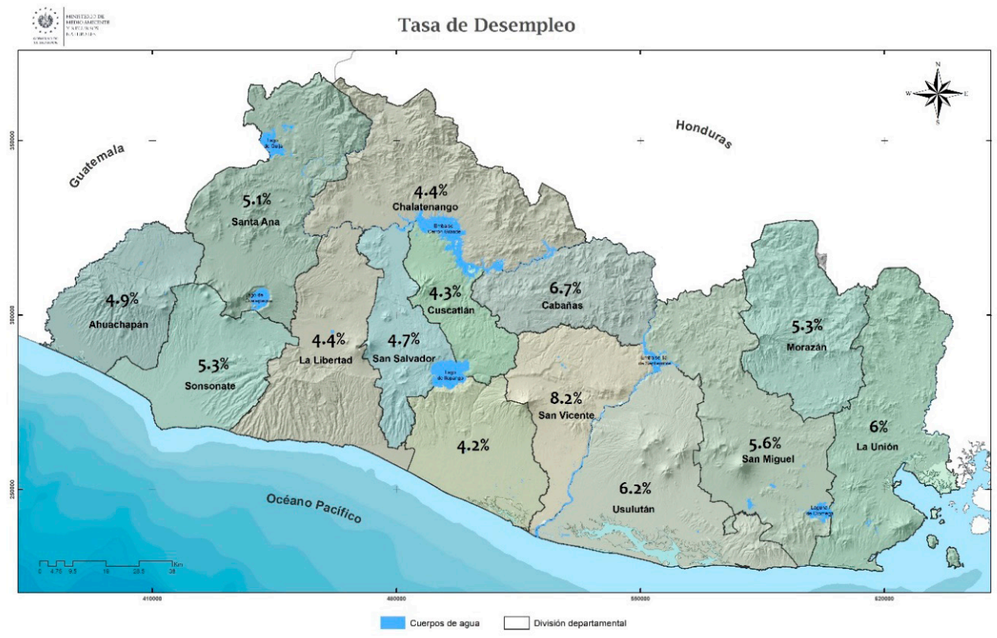


Figura 23. Tasa de desempleo departamental 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.5.4 Niveles educativos y salarios promedios de la población ocupada

El incremento en la producción nacional se traduce en un aumento de la riqueza del país, lo cual debería reflejarse en mayores ingresos tanto para la población como para el Estado. Esto representa una oportunidad para mejorar el bienestar general. No obstante, a menudo se subestima la influencia que tienen el nivel educativo y el sexo sobre los ingresos familiares, factores clave que determinan la capacidad de los hogares para satisfacer necesidades básicas como alimentación, salud, educación y acceso a servicios esenciales.

La educación es uno de los principales determinantes del ingreso. Existe una relación directamente proporcional entre el nivel de escolaridad alcanzado y el salario percibido: a mayor escolaridad, mayores ingresos mensuales, lo que posibilita un estilo de vida más sostenible desde el punto de vista económico.

De acuerdo con la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM, 2022), en El Salvador solo el 15.4% de la población ocupada reportó haber completado más de 13 años de estudio, lo cual evidencia un bajo nivel general de escolaridad. Al desagregar por sexo, el 18.1 % de las mujeres ocupadas alcanzaron este nivel educativo, frente al 13.5 % de los hombres. En cuanto a los ingresos, el salario promedio mensual nacional fue de $377.86. Para los hombres, el promedio fue de $403.99, mientras que para las mujeres fue de $344.01, lo que refleja una brecha salarial de $59.97. Esta diferencia persiste incluso entre personas con niveles educativos similares, lo que evidencia una desigualdad estructural en el mercado laboral.

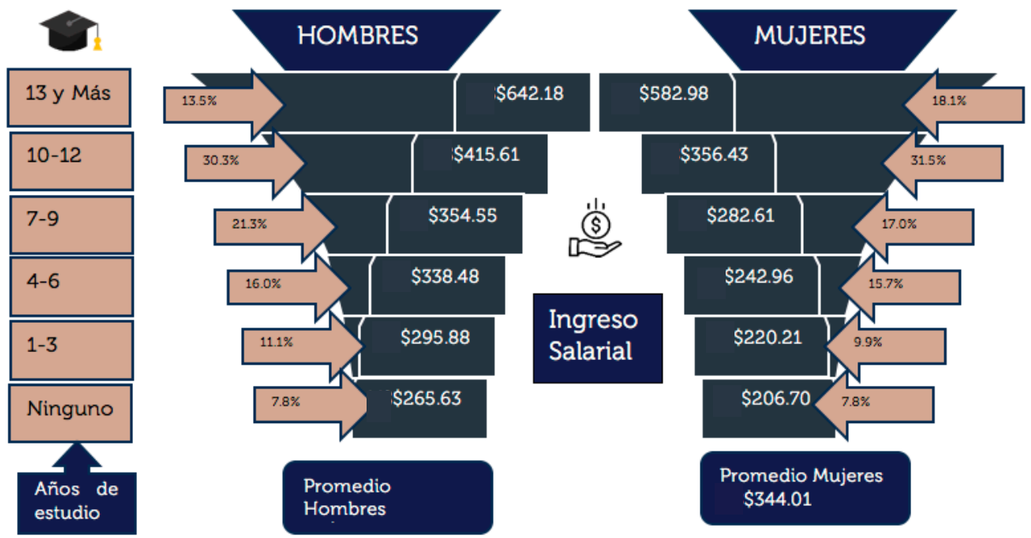


Figura 24. Población ocupada según años de estudio y salarios mensuales por sexo. Año 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.6 Pobreza

2.6.1 Ingresos

El ingreso familiar mensual es uno de los indicadores más utilizados a nivel mundial para evaluar la incidencia de la pobreza. Representa la principal fuente de recursos de un hogar y determina su capacidad para satisfacer las necesidades básicas, lo cual es fundamental para garantizar el bienestar económico, emocional y social de sus integrantes. A su vez, influye en la posibilidad de que las personas desarrollen proyectos de vida sostenibles.

Según la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM, 2022), el ingreso promedio mensual nacional en El Salvador fue de $629.38. Al desagregar por área geográfica, se observa que en la zona urbana el ingreso promedio fue de $728.64, mientras que en la zona rural fue de $462.85. Esta diferencia refleja una brecha estructural entre territorios, donde los hogares urbanos cuentan con mayores recursos económicos en comparación con los rurales (Figura 25).



Figura 25. Ingreso promedio mensual (dólares) de los hogares en El Salvador según área geográfica. Año 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

2.6.2 Pobreza

Tradicionalmente, la pobreza en El Salvador se ha medido en función del nivel de ingresos. Sin embargo, desde 2015 se adoptó un enfoque de medición de la pobreza multidimensional, alineado con las buenas prácticas internacionales y centrado en las aspiraciones y necesidades más sentidas de la población.

Analizar la pobreza resulta prioritario para los responsables del diseño e implementación de políticas públicas y programas sociales, ya que la falta de recursos para cubrir necesidades básicas limita el desarrollo humano, reduce el crecimiento económico y profundiza las desigualdades sociales. Esta situación, a su vez, amplía la brecha en la distribución del ingreso y restringe el acceso a oportunidades laborales.

La medición de la pobreza multidimensional permite una evaluación más integral de las condiciones de vida, incorporando dimensiones como la educación, condiciones de la vivienda, empleo y acceso a seguridad social, salud y calidad del entorno, entre otros factores relevantes.

La incidencia de la pobreza multidimensional hace referencia al porcentaje de hogares que, según

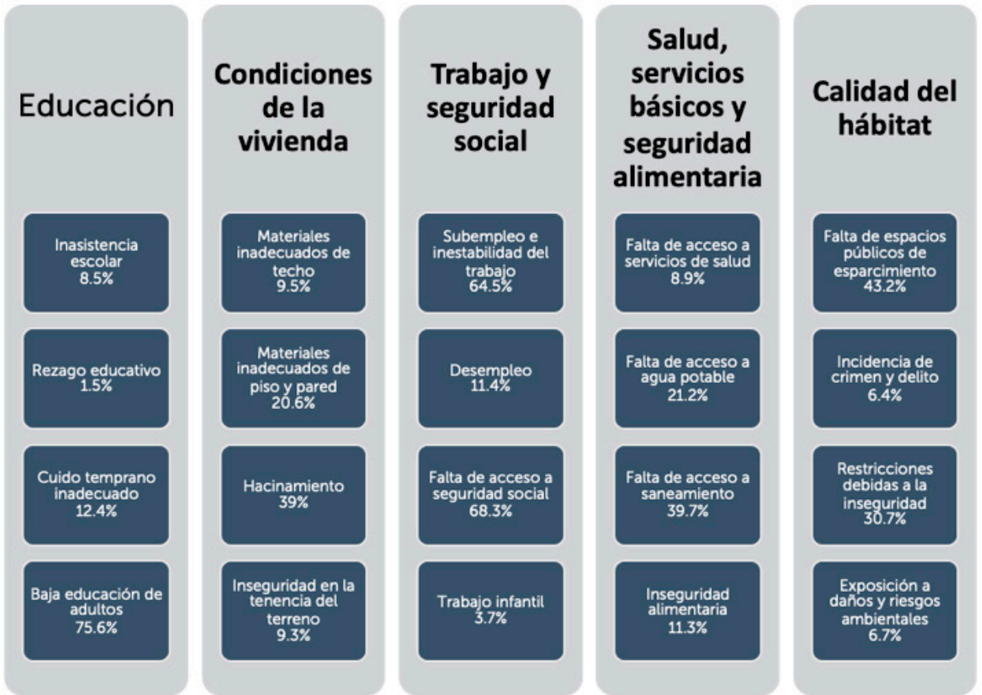


Figura 26. Indicadores de pobreza de El Salvador 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

criterios establecidos, son clasificados como pobres en múltiples dimensiones. En el año 2022, el 26 % de los hogares en El Salvador fueron catalogados como pobres desde esta perspectiva.

Al desagregar por área geográfica, se evidencia una marcada diferencia territorial: el 15.8 % de los hogares urbanos se encuentran en situación de pobreza multidimensional, mientras que en el área rural esta condición afecta al 42.9 % de los hogares, lo cual refleja una mayor concentración de privaciones estructurales fuera del entorno urbano. (Figura 27)

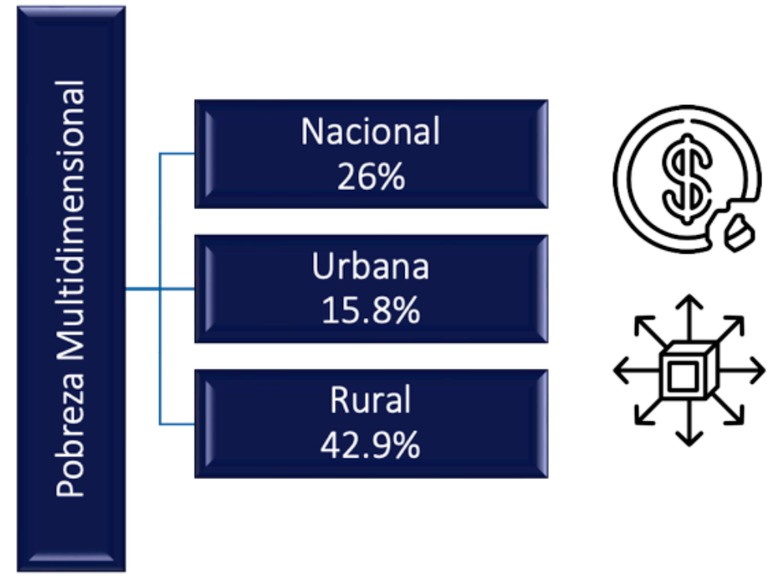


Figura 27. Pobreza multidimensional por área geográfica 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de EHPM. BCR (2023).

Para el año 2022, las tasas de hogares en situación de pobreza relativa y extrema revelaron importantes disparidades territoriales. En el caso de la pobreza relativa, los departamentos de Morazán y Ahuachapán presentaron las tasas más altas a nivel nacional, con un 23.85 % y 23.43 %, respectivamente. En contraste, el departamento de San Salvador registró la tasa más baja, con un 15.04 % (Figura 28).

Respecto a la pobreza extrema, Morazán fue el departamento con la mayor proporción de hogares en esta condición, alcanzando un 14.35 %. Nuevamente, San Salvador presentó la menor tasa de pobreza extrema, con un 5.77 %, lo que confirma su posición como la zona con menor incidencia de pobreza severa en el país (Figura 29).

Departamentos	Hogares en situación de pobreza extrema (%)	Hogares en situación de pobreza relativa (%)
Ahuachapán	11.78	23.43
Santa Ana	11.89	19.62
Sonsonate	8.5	20.42
Chalatenango	9.86	21.23
La Libertad	6.55	15.84
San Salvador	5.77	15.04
Cuscatlán	8.18	17.45
La Paz	9.02	21.23
Cabañas	13.9	18.28
San Vicente	12.95	18.93
Usulután	8.93	19.49
San Miguel	9.26	17.07
Morazán	14.35	23.85
La Unión	9.61	18.91



Figura 28. Tasas departamentales de hogares en situación de pobreza extrema y pobreza relativa (%) 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de BCR (2023).

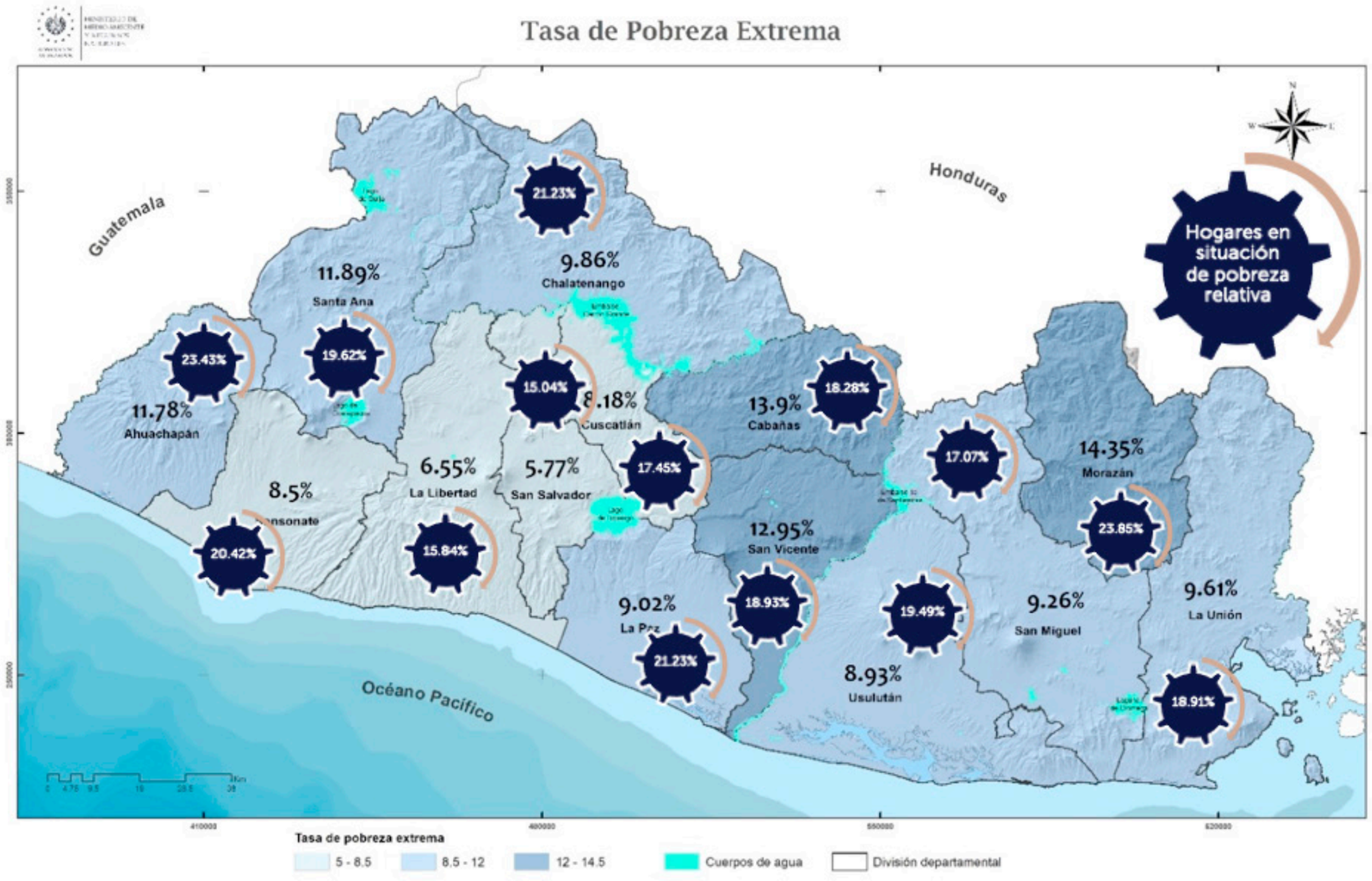


Figura 29. Tasas departamentales de hogares en situación de pobreza extrema y pobreza relativa (%) por rango. Año 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de BCR (2023).

2.6.3 Índice Global de Pobreza Multidimensional

El Índice Global de Pobreza Multidimensional (IPM) es una medida que evalúa la pobreza a partir de múltiples dimensiones y factores, más allá del ingreso monetario. Esta medición se fundamenta en la metodología desarrollada por Alkire y Foster, la cual considera privaciones en tres dimensiones clave: salud, educación y nivel de vida. Cada dimensión se evalúa mediante indicadores específicos, a los que se asignan pesos equivalentes.

Una persona es clasificada como pobre multidimensional si experimenta privaciones en al menos un tercio de los indicadores ponderados. En términos técnicos, la puntuación de privación ponderada de una persona se compara con un umbral de pobreza establecido en el 33.33 %. Si dicha puntuación es igual o superior a ese valor, la persona se considera pobre según el IPM.

El índice se calcula mediante la fórmula IPM = H × A, donde H representa la incidencia de la pobreza (proporción de la población considerada pobre) y A la intensidad de la pobreza (proporción promedio de dimensiones en las que las personas pobres experimentan privación). Esta combinación permite capturar tanto la extensión como la severidad de la pobreza multidimensional.

Área	IPM	H	A	Vulnerable	Pobreza severa
Nacional	0.032	7.90%	41.30%	9.90%	1.70%
Urbano	0.012	2.90%	41.20%	5.70%	0.70%
Rural	0.065	15.70%	41.30%	16.40%	3.20%

Fuente: Elaboración propia con datos de Global MPI Country Briefing 2021: El Salvador (Latin America and the Caribbean), Oxford Poverty and Human Development Initiative (OPHI), Universidad de Oxford.

Tabla 4. Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) global en El Salvador por departamento

Departamento	IPM	H	A	Vulnerable	Pobreza severa	Proporción de la población
Ahuachapán	0.035	8.60%	40.20%	14.50%	1.30%	5.30%
Cabañas	0.06	15.50%	38.40%	13.00%	2.20%	4.20%
Chalatenango	0.043	10.50%	40.60%	13.20%	2.30%	3.60%
Cuscatlán	0.033	7.60%	43.10%	10.10%	1.80%	4.80%
La Libertad	0.021	5.10%	42.40%	6.60%	1.30%	11.40%
La Paz	0.038	9.00%	42.00%	12.20%	2.20%	5.60%
La Unión	0.067	15.70%	42.50%	15.70%	4.40%	4.10%
Morazán	0.038	10.00%	38.50%	13.90%	1.20%	3.70%
San Miguel	0.041	9.80%	41.90%	11.90%	2.60%	7.30%
San Salvador	0.013	3.30%	40.10%	5.30%	0.60%	25.40%
San Vicente	0.026	6.80%	38.80%	10.20%	0.60%	3.10%
Santa Ana	0.03	7.00%	43.20%	9.20%	1.60%	8.20%
Sonsonate	0.059	13.60%	43.70%	11.80%	3.60%	7.80%
Usulután	0.036	9.40%	38.60%	14.60%	1.20%	5.50%

Fuente: Elaboración propia con datos de Global MPI Country Briefing 2021: El Salvador (Latin America and the Caribbean), Oxford Poverty and Human Development Initiative (OPHI), Universidad de Oxford.

2.7 Uso de suelo

La cobertura del suelo en El Salvador refleja la diversidad de ecosistemas, usos agrícolas y zonas urbanas del territorio. En la Tabla 5, se presenta la distribución porcentual y en área (km^2) de las principales categorías de cobertura según datos del año 2016.

La distribución del uso del suelo en el país muestra que las principales coberturas corresponden a bosque latifoliado (31.13 %), pastos (21.11 %) y granos básicos (16.55 %), reflejando un predominio de áreas naturales y agrícolas. Otros usos relevantes incluyen café bajo sombra (8.69 %), zonas urbanas o suelo desnudo (4.70 %), y caña de azúcar (4.66 %). Coberturas como manglares, cuerpos de agua, humedales y cultivos especializados presentan una extensión menor, pero son clave desde el punto de vista ambiental y productivo.

Tabla 5. Cobertura y uso de suelo en El Salvador 2016

Bosque latifoliado	6569.64	31.13
Bosque de coníferas	286.45	1.36
Bosque salado (mangle)	412.68	1.96
Café bajo sombra	1834.39	8.69
Matorral	1092.78	5.18
Urbano/suelo desnudo	991.28	4.70
Cuerpo de agua	535.06	2.54
Granos básicos	3492.06	16.55
Arroz, agricultura bajo riego	136.70	0.65
Cultivos frutales	70.41	0.33
Pastos	4454.19	21.11
Caña de azúcar	983.63	4.66
Hortalizas	17.28	0.08
Vegetación costera	10.67	0.05
Arenales y dunas	32.53	0.15
Cultivo de coco	39.81	0.19
Café sin sombra	15.71	0.07
Estanque, camaronera y salinera	31.41	0.15
Colada de lava	38.52	0.18
Humedales	59.32	0.28
TOTAL	21104.49	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2016).

2.8 Densidad del tejido urbano en cuatro grandes áreas de El Salvador

La economía urbana se articula a través de sectores que concentran funciones clave como servicios, infraestructura, construcción y gestión de residuos, entre otros. Estos sectores interactúan y condicionan el desarrollo de las ciudades, generando un tejido urbano con características propias según el territorio. El crecimiento físico de las zonas urbanas no solo responde al aumento poblacional, sino también al dinamismo económico que demanda nuevas infraestructuras, viviendas, equipamientos y servicios, intensificando la relación entre expansión urbana y actividad económica.

La estimación de la densidad del área construida en cuatro distritos seleccionados del país se realizó mediante la comparación de imágenes aéreas con datos de elevación de edificios obtenidos del modelo de alturas de El Salvador (2014). Para las construcciones posteriores a dicho año, se aplicaron técnicas de aprendizaje automático para estimar sus alturas.

Los resultados indican que las edificaciones ocupan más del 30 % del territorio analizado en cada una de las áreas. San Miguel reporta un 31.24 %, Sonsonate un 32.57 %, Santa Ana un 30.05 % y el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) un 38 %.

El AMSS concentra la mayor proporción de edificaciones con alturas entre 4 y 12 metros, cubriendo un 21.52 % de su extensión y representando el 56.65 % del total de edificaciones. (Tabla 6 y Figura 30)

Densidad del tejido urbano del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

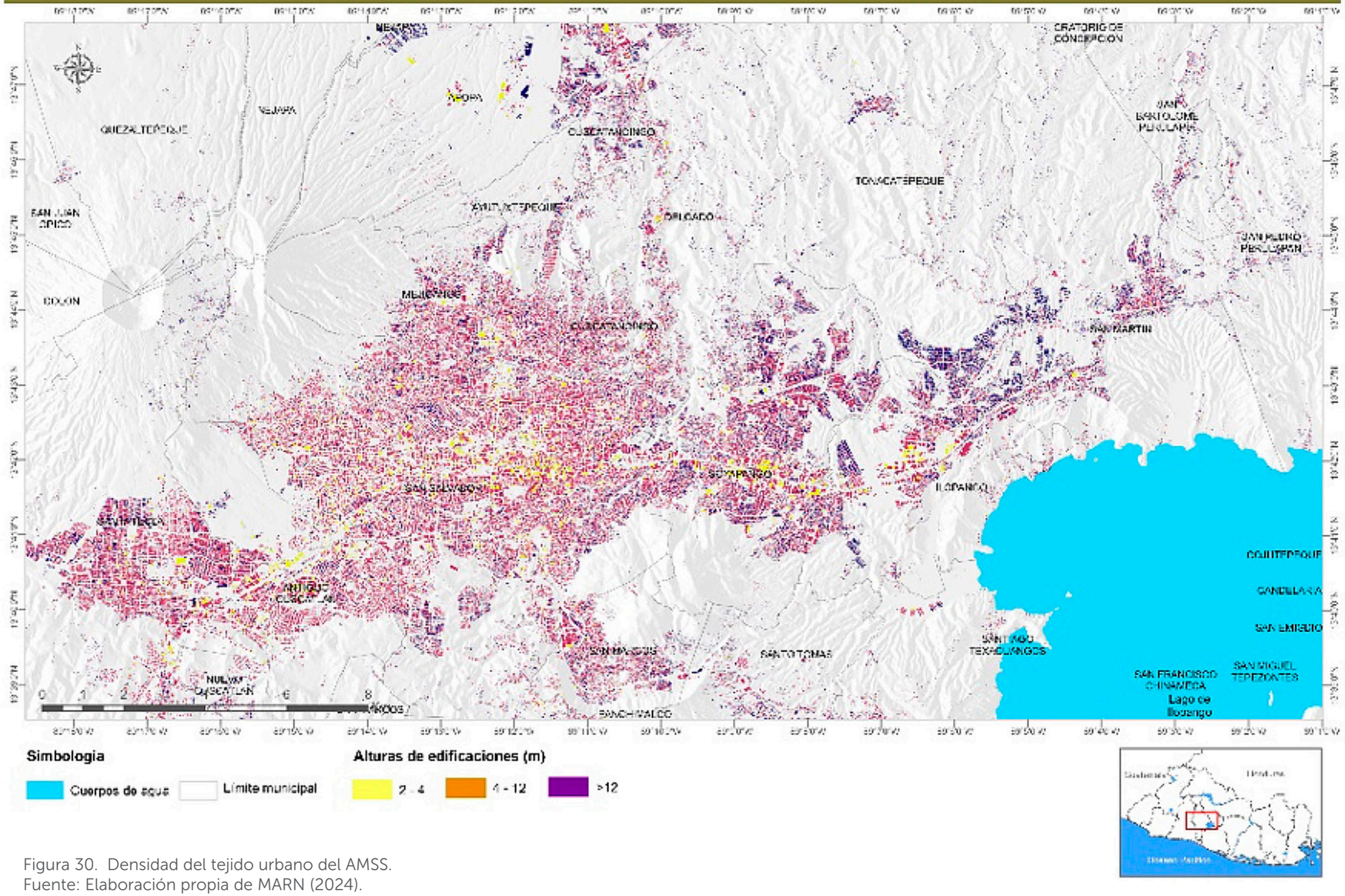


Figura 30. Densidad del tejido urbano del AMSS.
Fuente: Elaboración propia de MARN (2024).

Tabla 6. Distribución de la densidad del tejido urbano del AMSS

Rango de altura de las edificaciones	Área (km^2)	Porcentaje con respecto al 100% de las edificaciones	Porcentaje con respecto al área total en estudio
0-4	1.23	49.37%	17.07%
4-12	1.19	47.88%	16.55%
12+	0.07	2.75%	0.95%
Total	2.49	100.00%	34.57%

Fuente: MARN, 2024. Elaboración propia.

En Santa Ana, la mayor concentración se encuentra en edificaciones de entre 0 y 4 metros, que cubren el 14.83% del área de estudio y constituyen el 49.36 % del total de edificaciones. Las construcciones de 12 metros o más solo representan el 0.80 % del área (Figura 31 y Tabla 7).

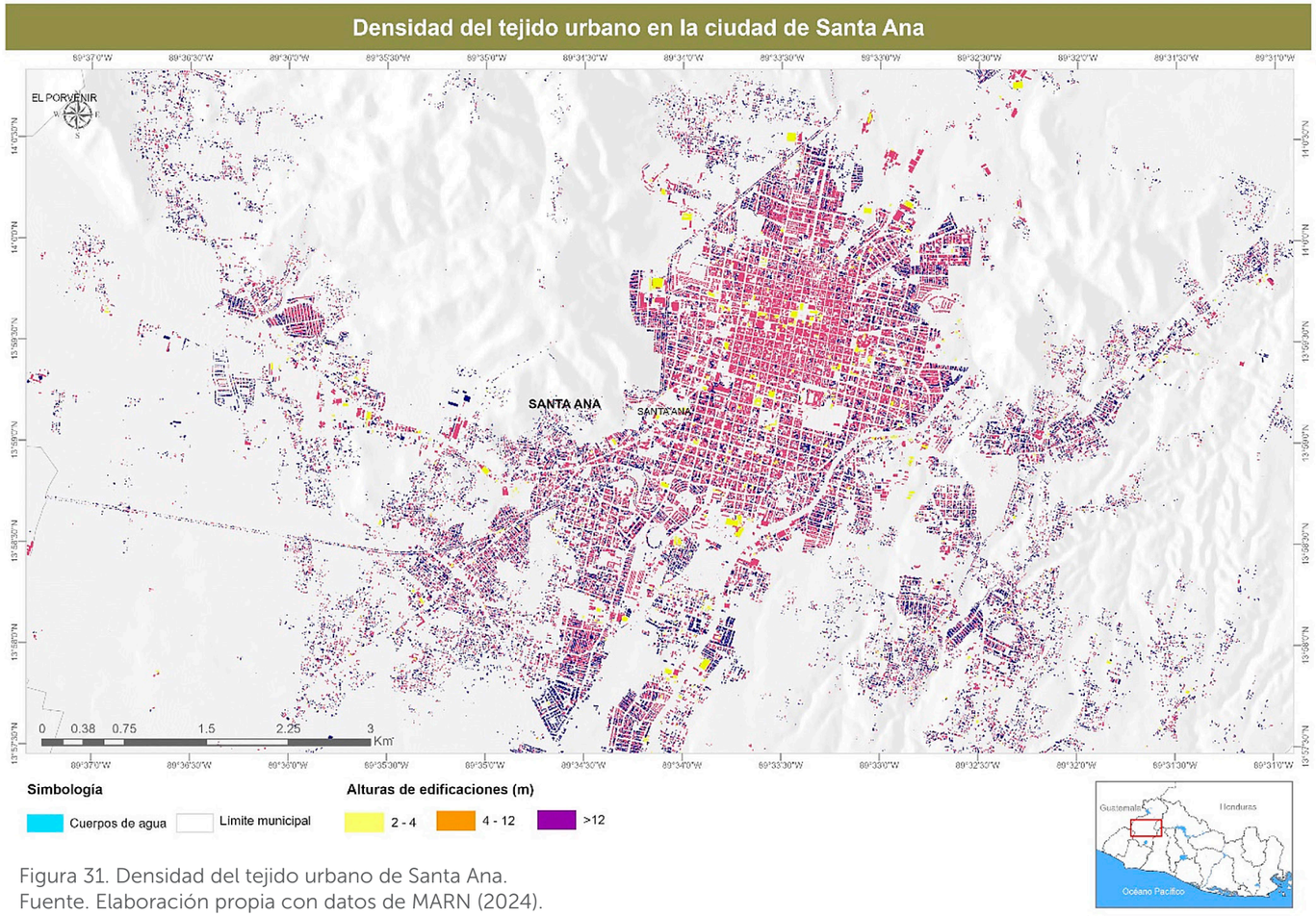


Figura 31. Densidad del tejido urbano de Santa Ana.
Fuente. Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Tabla 7. Distribución de la densidad del tejido urbano en Santa Ana

Rango de altura de las edificaciones	Área (km2)	Porcentaje con respecto al 100% de las edificaciones	Porcentaje con respecto al área total en estudio
0-4	4.19	42.97%	13.42%
4-12	5.15	52.77%	16.49%
12+	0.42	4.26%	1.33%
Total	9.75	100.00%	31.24%

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Por su parte, en Sonsonate (Figura 32 y Tabla 8) las edificaciones con una altura menor a 12 metros cubren el 33.62 % del distrito. En San Miguel (Figura 33 y Tabla 9), las edificaciones predominantes son aquellas que cuentan con una altura entre 4 y 12 metros, cubriendo el 16.55 % del distrito. En ambos distritos, las edificaciones de mayor altura (más de 12 metros) presentan la menor proporción.

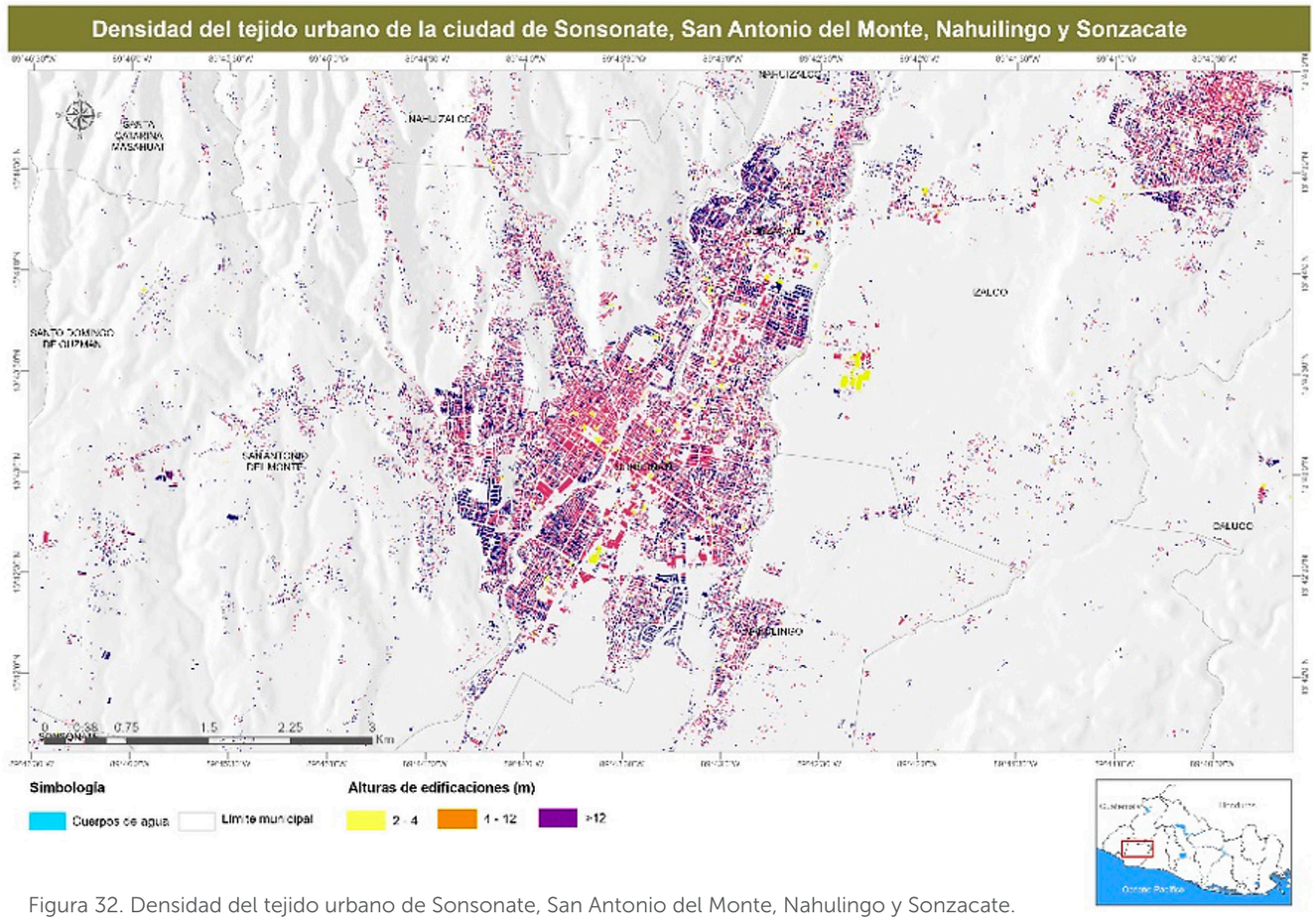


Figura 32. Densidad del tejido urbano de Sonsonate, San Antonio del Monte, Nahulingo y Sonzacate.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Tabla 8. Distribución de la densidad del tejido urbano en Sonsonate, San Antonio del Monte, Nahulingo y Sonzacate

Rango de altura de las edificaciones	Área (km^2)	Porcentaje con respecto al 100% de las edificaciones	Porcentaje con respecto al área total en estudio
0-4	1.23	49.37%	17.07%
4-12	1.19	47.88%	16.55%
12+	0.07	2.75%	0.95%
Total	2.49	100.00%	34.57%

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

Tabla 9. Distribución de la densidad del tejido urbano en la ciudad de San Miguel

Rango de altura de las edificaciones	Área (km2)	Porcentaje con respecto al 100% de las edificaciones	Porcentaje con respecto al área total en estudio
0-4	4.19	42.97%	13.42%
4-12	5.15	52.77%	16.49%
12+	0.42	4.26%	1.33%
Total	9.75	100.00%	31.24%

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).

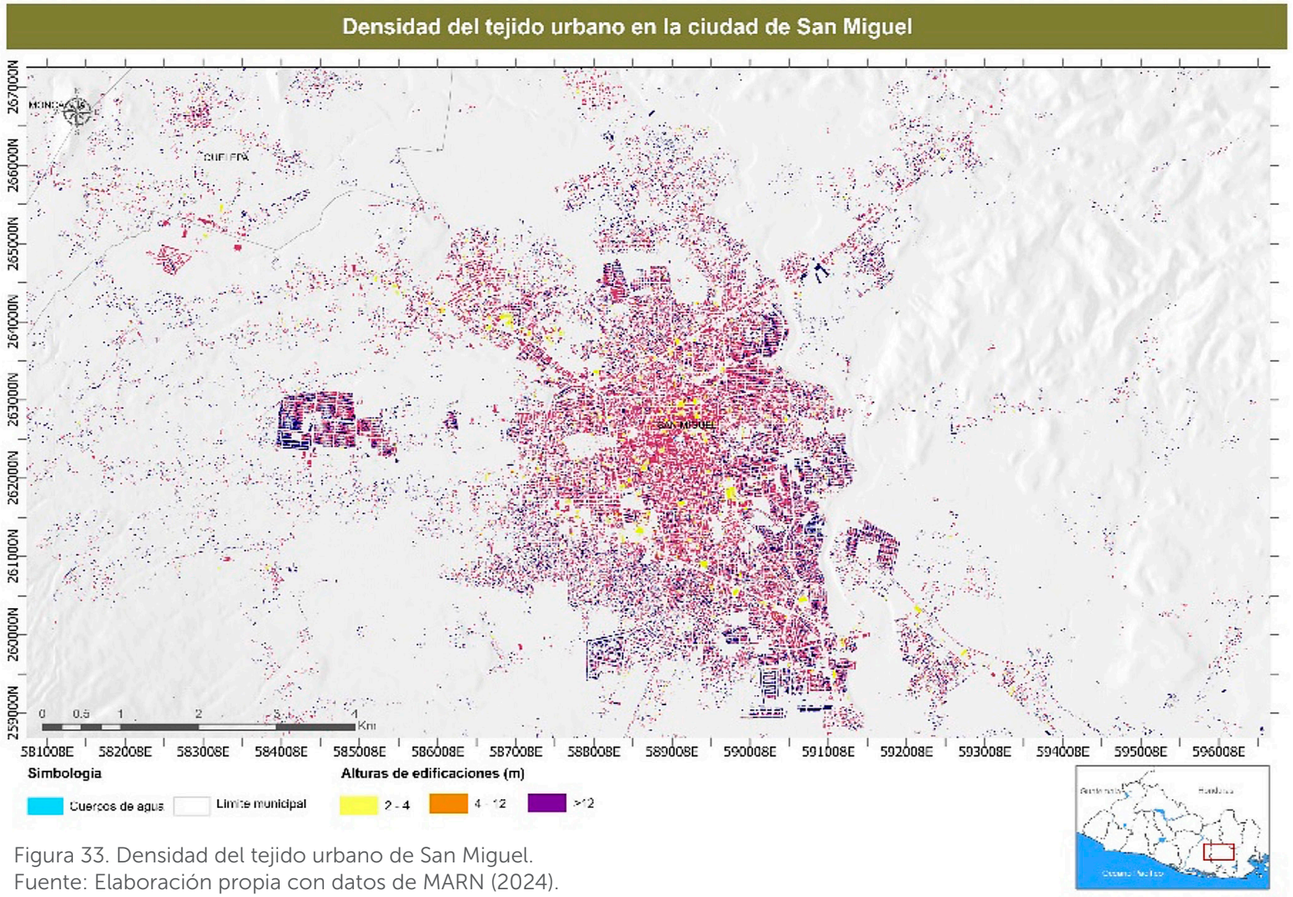


Figura 33. Densidad del tejido urbano de San Miguel.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN (2024).



Capítulo 3

3. Eventos extremos registrados en el período de 2020 a 2022

Entre 2020 y 2022, El Salvador enfrentó cinco eventos hidrometeorológicos de gran magnitud que ocasionaron impactos significativos a nivel nacional. Estos eventos fueron los huracanes Amanda-Cristóbal (2020), Eta (2020) e Iota (2020), así como las tormentas tropicales Bonnie (2022) y Julia (2022).

Se presenta información detallada sobre las precipitaciones acumuladas, las intensidades máximas registradas y los daños ocasionados por inundaciones y deslizamientos de tierra. Además, se comparan los datos registrados durante estos eventos con los promedios históricos y las normas mensuales, a fin de dimensionar su severidad y comprender su impacto en el territorio salvadoreño.

3.1 Huracán Amanda-Cristóbal

Entre el 29 de mayo y el 7 de junio de 2020, El Salvador fue afectado por un sistema de baja presión ubicado al sur de las costas salvadoreñas y guatemaltecas, el cual generó lluvias tipo temporal en todo el territorio nacional.

Este sistema evolucionó a depresión tropical DT2-E y, posteriormente, alrededor de las 3:00 a. m. del 31 de mayo, alcanzó la categoría de tormenta tropical Amanda. Amanda; tocó tierra en la costa del departamento de Santa Rosa, Guatemala, cerca de la frontera con El Salvador, provocando intensas lluvias y fuertes vientos, especialmente durante la madrugada y la mañana de ese mismo día.

Posteriormente, entre el 4 y el 6 de junio, el sistema se desplazó por Guatemala y México hasta alcanzar el golfo de México, donde se transformó en la Tormenta Tropical Cristóbal (Figura 34). Este desplazamiento mantuvo activa la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), generando abundante humedad e intensificando las precipitaciones sobre el territorio salvadoreño.

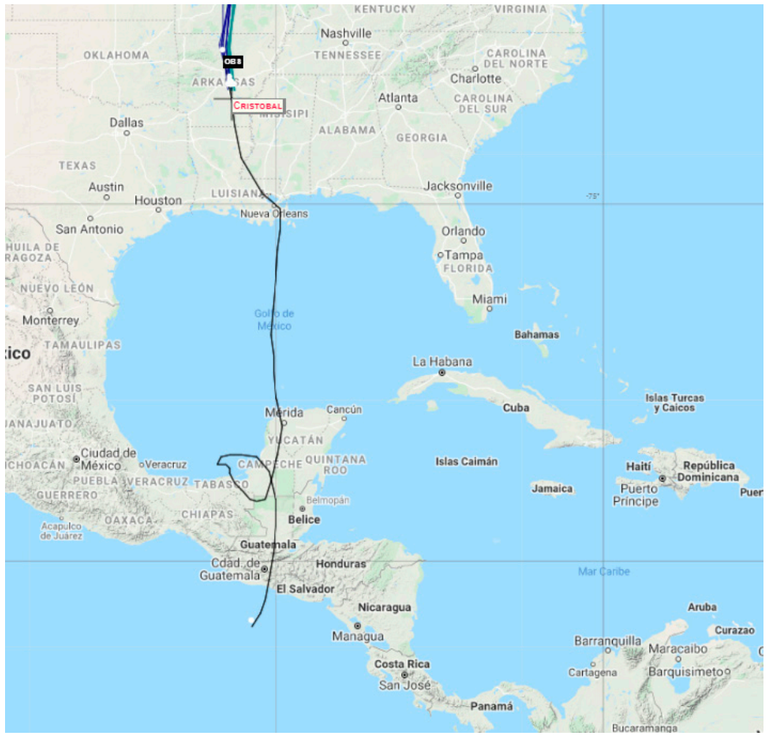


Figura 34. Trayectoria observada por Amanda-Cristóbal entre el 30 de mayo y el 9 de junio de 2020, donde Cristóbal es depresión tropical en su desplazamiento sobre Estados Unidos.
Fuente: NHC-NOAA. https://ruc.noaa.gov/tracks/

Las lluvias asociadas al evento se contabilizaron a partir de las 7:00 a. m. del 29 de mayo 2020 hasta las 7:00 a. m. del 7 de junio 2020. Durante este período (9 días), se registró lluvia a nivel nacional, con acumulados importantes en la franja costera, la zona central y oriental del país, mientras que los menores acumulados se registraron en la franja norte-central. Los principales hallazgos fueron:

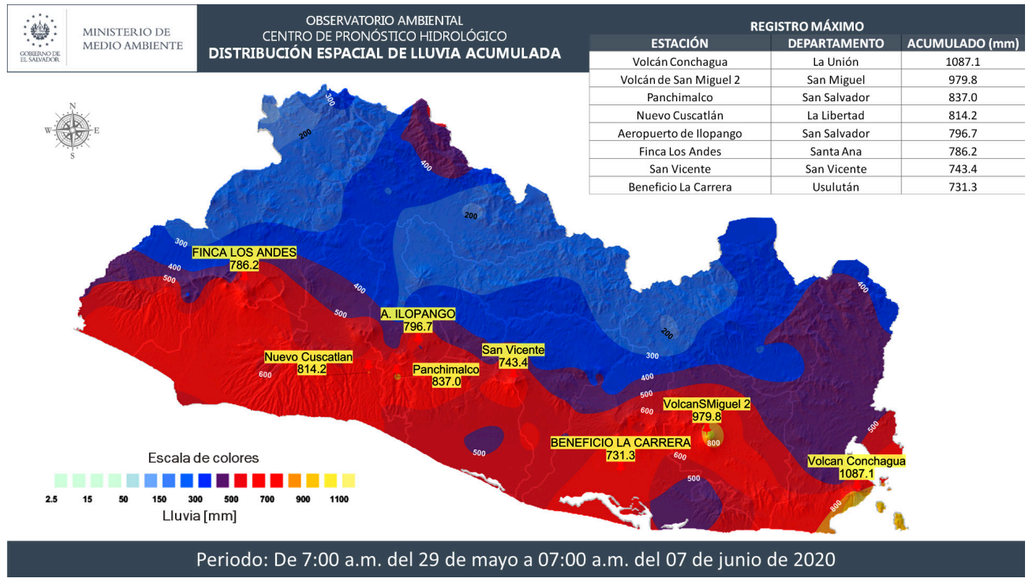


Figura 35. Lluvia acumulada entre las 7:00 a. m. del 29 de mayo y las 7:00 a. m del 7 de junio de 2020 por influencia de las Tormentas Tropicales Amanda y Cristóbal.
Fuente: Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, MARN, junio 2020.

- Promedio nacional de lluvia de 490.6 mm en 9 días, equivalente al 27 % de la lluvia anual (norma 1981-2010).
- Algunas estaciones superaron el 40 % de su lluvia anual: Ilopango (58 %), Acajutla (54 %), Puente Cuscatlán (51 %), Las Pilas (48 %), Santiago de María (45 %); San Miguel (44 %), La Unión (43 %), Nueva Concepción (43 %), Los Naranjos (42 %), San Francisco Gotera (42 %) y Finca Los Andes (42 %).
- En los primeros 6 días de junio, se acumuló el 93 % de la lluvia mensual esperada (302 mm frente a los 322 mm de la norma mensual de junio).

Las intensidades máximas se registraron entre el 30 y 31 de mayo, con lluvias de fuertes a torrenciales, especialmente en la zona centro-occidente. El 1 y 2 de junio, las lluvias intensas en el volcán Conchagua causaron desbordamientos en diversas quebradas que afectaron el casco urbano de la ciudad. (Figura 36).

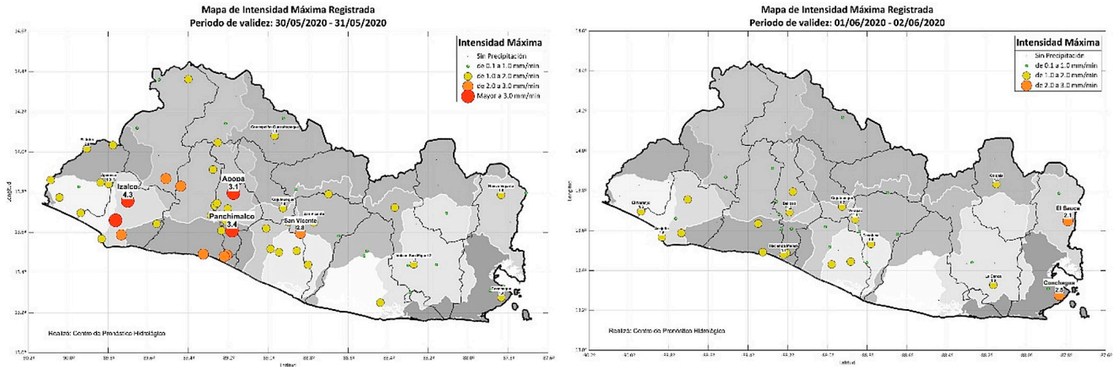


Figura 36. Mapas de intensidades máximas registradas en la red telemétrica correspondientes a los días con mayor cantidad de registros de afectaciones causadas por la influencia de las Tormentas Tropicales Amanda y Cristóbal.
Fuente: Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, MARN, junio 2020.

Las Tormentas Amanda y Cristóbal causaron daños significativos. La Tabla 10 muestra que los daños totales ascendieron a $106.71 millones, siendo el sector social el más afectado, con énfasis en el área de vivienda ($58.6 millones). En cuanto a pérdidas, se estimaron $254.66 millones, concentradas principalmente en el sector productivo, especialmente en turismo y agropecuario.

Del total de daños, el 65 % correspondió al sector privado, mientras que en pérdidas el 91 % también afectó al ámbito privado, reflejando una mayor vulnerabilidad de este sector frente a los eventos extremos.

Tabla 10. Daños y pérdidas causados por las Tormentas Tropicales Amanda-Cristóbal en todos los sectores

Sector	Daños	Público (Daños)	Privado (Daños)	Pérdidas	Público (Pérdidas)	Privado (Pérdidas)
Social	72.17	13.56	58.6	254.66	21.34	22.92
Salud	5.97	5.97		12.52	12.52	
Educación	5.63	5.63		3.1	3.05	0.05
Vivienda	58.6		58.6	4.49	0.05	0.44
Cultura	1.96	1.96		24.15	1.72	22.43
Productivo	13.01	2.52	10.48	202.66		202.66
Agropecuario	8.43	0.16	8.27	44.5		44.5
Turismo	4.57	2.36	2.21	158.17		158.17
Infraestructura	21.53	21.15	0.39	7.74	1.69	6.05
Transporte	19.27	19.27	0.0	3.94	1.25	2.69
Energía	0.39	0.0	0.39	3.8	0.44	3.36
Agua y saneamiento	1.87	1.87				
Total	106.71	37.23	69.47	254.66	23.03	231.63

Fuente: Informe de Evaluación de las necesidades de recuperación causadas por las Tormentas Tropicales Amanda y Cristóbal en el contexto de la respuesta al COVID-19. GOES (2020)

3.2 Huracán Eta

Entre el 3 y el 11 de noviembre de 2020 (8 días), El Salvador fue afectado por lluvias con características de temporal, provocadas por la influencia del huracán Eta, que impactó directamente a Centroamérica. Eta, un huracán de categoría 3, ingresó a territorio nicaragüense el 3 de noviembre por la mañana, desplazándose luego sobre el norte de Nicaragua y Honduras. El 5 de noviembre, en horas de la tarde, alcanzó el Mar Caribe, continuando su trayectoria como se muestra en la Figura 37.

Durante su recorrido, Eta favoreció el ingreso de nubosidad y humedad desde el océano Pacífico hacia El Salvador, generando lluvias con características de temporal. Además, se experimentó un aumento en la velocidad del viento debido a la intensidad y cercanía del sistema, así como un descenso en las temperaturas del territorio.

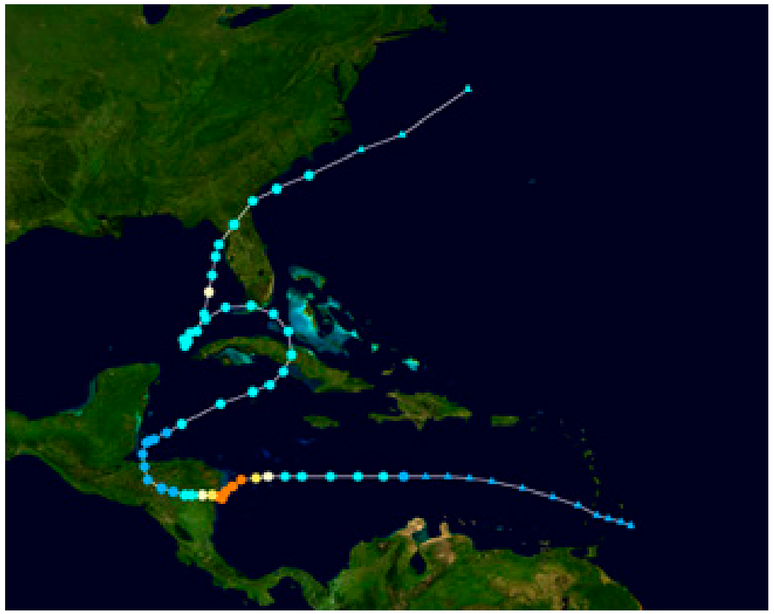


Figura 37. Mapa de trayectoria observada del huracán Eta.
Fuente: NHC-NOAA.

La Figura 38 muestra la lluvia acumulada registrada en el territorio salvadoreño, durante la influencia del huracán Eta. Los acumulados más significativos se localizaron en la franja costera de los departamentos de Ahuachapán, Sonsonate y La Libertad, así como en la franja norte del país (Santa Ana, Chalatenango, Morazán y La Unión) y en los alrededores del golfo de Fonseca.

El valor máximo de precipitación acumulada se registró en la estación Planes de Montecristo, departamento de Santa Ana, con 275.4 mm; seguido por la estación Concepción de Oriente con 244 mm y la estación volcán Conchagua con 194.3 mm, ambas ubicadas en el departamento de La Unión.

Durante los ocho días del evento asociado al huracán Eta, se identificaron los siguientes hallazgos sobre el comportamiento de la lluvia en el país:

• El promedio nacional de lluvia acumulada durante el evento fue de 105 mm, según los datos de la red climatológica. Este valor representa un 102% por encima de la norma mensual nacional correspondiente al mes de noviembre.

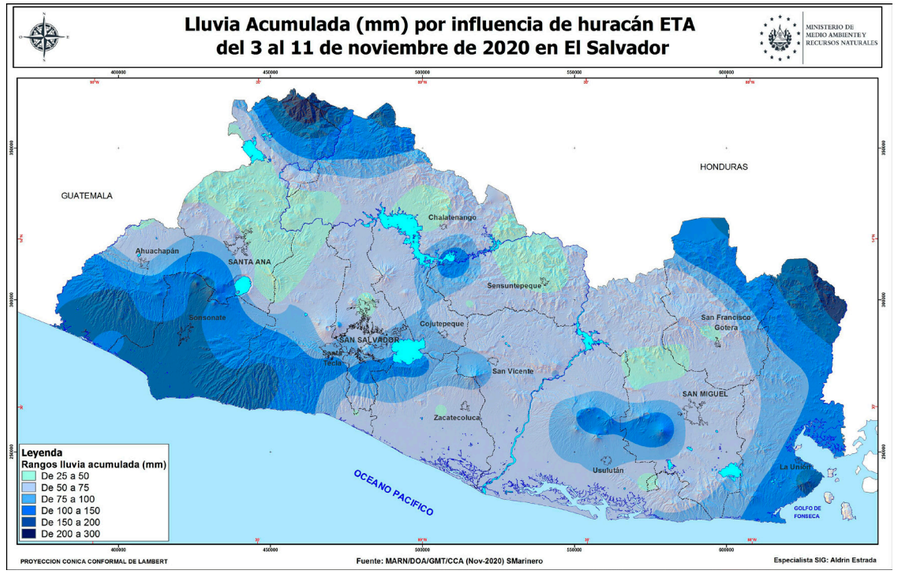


Figura 38. Mapa de lluvia acumulada por influencia del Huracán Eta.
Fuente: DOA/MARN, noviembre 2020.

• En 21 de las 25 estaciones climatológicas principales se superó el valor de la norma mensual de noviembre. Las estaciones con registros más relevantes fueron:

- Las Pilas: 535 % más de la lluvia mensual
- Planes de Montecristo: 420 % más de la lluvia mensual
- Cerrón Grande: 193 % más de la lluvia mensual
- Los Naranjos: 165 % más de la lluvia mensual
- La Hachadura: 154 % más de la lluvia mensual
- La Unión: 152 % más de la lluvia mensual

• En función de la lluvia registrada por estación y agrupada por zonas climáticas (según elevación), se observa los siguientes patrones:

• La distribución promedio de la precipitación fue más homogénea en las estaciones ubicadas entre los 1,200 y 2,700 m de altitud. En cambio, en las demás zonas de elevación, una o dos estaciones mostraron acumulados significativamente superiores al resto.

• Los días más lluviosos para el grupo de estaciones ubicadas entre 1,200 y 2,700 m se registraron al inicio del evento, entre el 4 y el 7 de noviembre, como se aprecia en las barras celestes de la Figura 39.

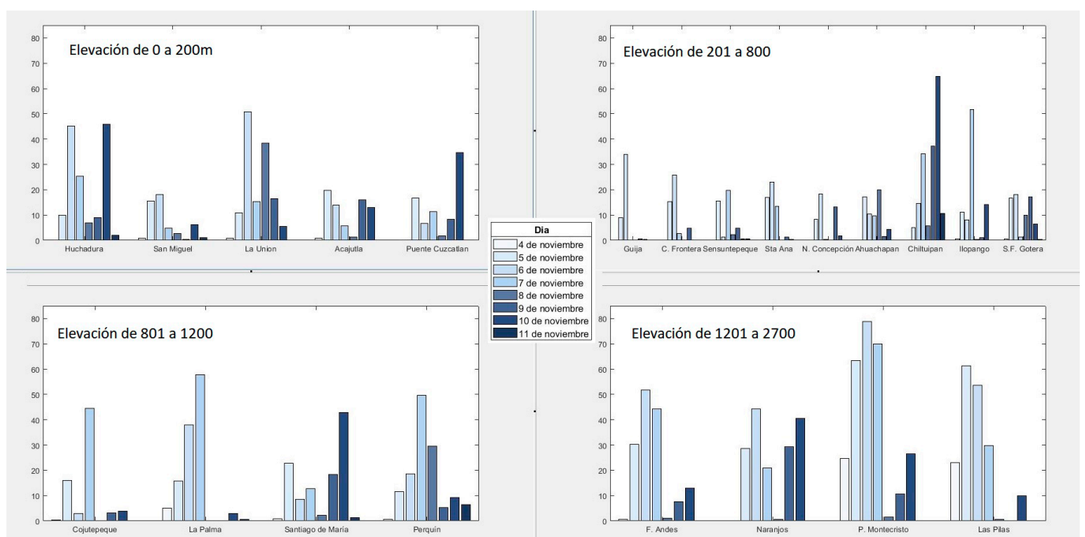


Figura 39. Lluvia diaria por estación agrupada por zonas climáticas (por elevación) en El Salvador durante la influencia del huracán Eta.
Fuente: DOA/MARN, noviembre 2020.

Las intensidades de las precipitaciones fueron, en su mayoría, débiles, con breves períodos de lluvias de intensidad moderada a fuerte en puntos aislados (coincidiendo con los acumulados máximos). Los valores más altos de intensidad se registraron los días 7 y 9 de noviembre:

- El 7 de noviembre se presentaron las intensidades más altas de todo el evento para intervalos de 5 a 10 minutos. Las estaciones Comasagua y Citalá registraron máximos de 2.4 y 2.2 mm/min, respectivamente.

- El 9 de noviembre, aunque se observaron lluvias dispersas a generalizadas en todo el país, solo tres estaciones reportaron intensidades entre 1.0 y 2.0 mm/min.

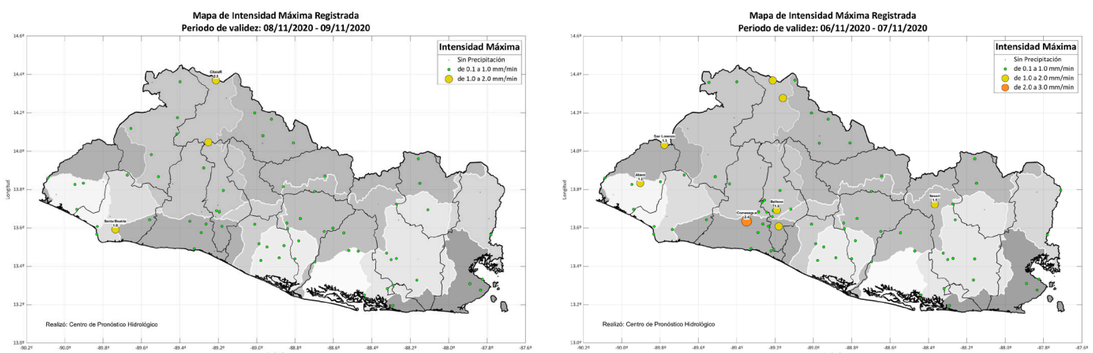


Figura 40. Mapas de las intensidades más altas registradas en la red telemétrica por la influencia del huracán Eta.
Fuente: DOA/MARN, noviembre 2020.

Los registros de inundaciones y desbordamientos documentados por el área de Hidrología ocurrieron en diversos puntos de la cuenca alta del río Lempa y en la cuenca del río Goascorán. Asimismo, se presentaron crecidas repentinas y anegamientos localizados en la franja costera occidental, en zonas urbanas del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), y en la franja costera oriental.

Durante el período de influencia del huracán Eta en el país, los días 5 y 7 de noviembre concentraron el mayor número de reportes de impactos. Cabe señalar que, debido a la naturaleza generalmente débil de las precipitaciones y a los bajos acumulados al inicio y al final del evento, no se registraron afectaciones durante esos días. En total, se documentaron 23 impactos durante los 8 días de influencia del sistema, de los cuales:

- 9 fueron clasificados como de severidad baja,
- 11 como de severidad media, y
- 3 como de severidad significativa.



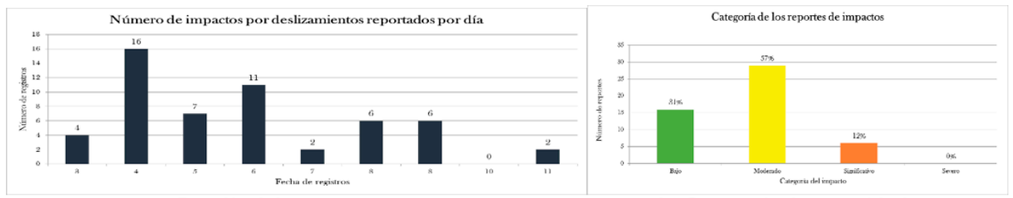
a) Por día del evento b) Categoría de severidad

Figura 41. Gráfica de frecuencia de impactos por inundaciones y desbordamientos por la influencia del huracán Eta.
Fuente: DOA/MARN, noviembre 2020.

Los deslizamientos registrados en la base de datos del área de Geología se distribuyeron principalmente a lo largo de la cadena montañosa del norte y la cadena volcánica central del país. En particular, los alrededores de Montecristo–Citalá y Perquín, en la zona norte, concentraron los deslizamientos de mayor impacto.

Los días con mayor número de eventos fueron el 4 y el 6 de noviembre. La distribución de los deslizamientos por día se presenta en la Figura 42.

Según los reportes de impacto, el 57 % de los deslizamientos fue clasificado con severidad moderada, el 31 % con severidad baja, y el 12 % con severidad significativa. Entre los eventos de mayor severidad se destaca el reporte de un flujo de escombros ocurrido en el distrito de Polorós, departamento de La Unión.



a) Por día del evento b) Categoría de severidad

Figura 42. Registros de impacto por deslizamiento por la influencia del Huracán Eta.
Fuente: DOA/MARN, noviembre 2020.

3.3 Huracán Iota

Después del paso del huracán Eta durante la primera década de noviembre, las condiciones océano-atmosféricas en el mar Caribe propiciaron la formación de un nuevo sistema ciclónico de gran magnitud. Así, durante la segunda década del mes, Centroamérica enfrentó el impacto directo del huracán Iota. Su influencia en El Salvador se hizo sentir entre el15 al 19 de noviembre de 2020 (4 días), generando lluvias con características de temporal y ráfagas de viento fuertes.

Iota alcanzó la categoría 4 en la escala Saffir-Simpson, con vientos sostenidos entre 209 y 250 km/h. El sistema ingresó a Centroamérica por el norte de Nicaragua el 16 de noviembre por la tarde y se desplazó hacia el sur de Honduras. Para el 17 de noviembre, se había debilitado a depresión tropical e ingresó a territorio salvadoreño por el norte del departamento de La Unión.

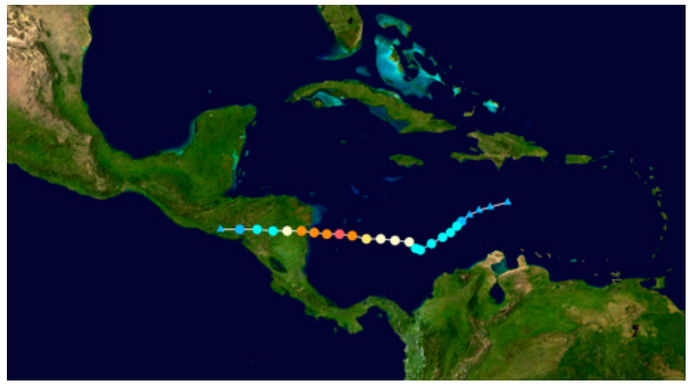


Figura 43. Mapa de trayectoria observada del Huracán Iota.
Fuente: NHC-NOAA.

Una vez dentro de El Salvador, el sistema se debilitó rápidamente hasta disiparse. Para el 18 de noviembre, sus campos nubosos remanentes persistieron sobre el país y el océano Pacífico (Figura 43 y Figura 44). Durante su recorrido por Nicaragua, Honduras y El Salvador, Iota favoreció el ingreso de nubosidad desde el Pacífico, ocasionando lluvias con características de temporal. Asimismo, se registraron vientos acelerados y un descenso en la temperatura debido al ambiente nublado y la escasa radiación solar.

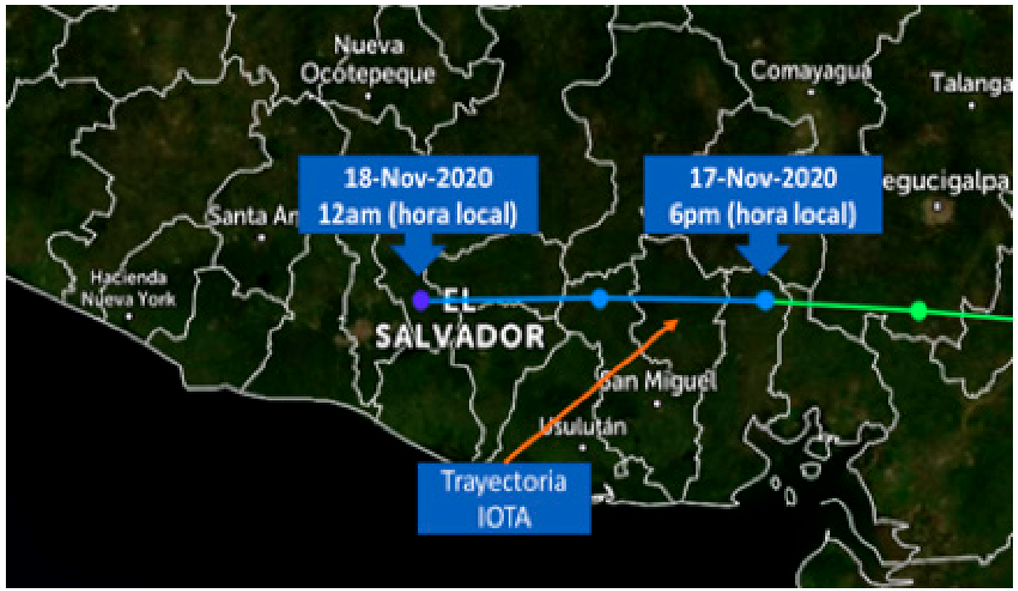


Figura 44. Trayectoria de Iota sobre El Salvador.
Fuente: NHC-NOAA.

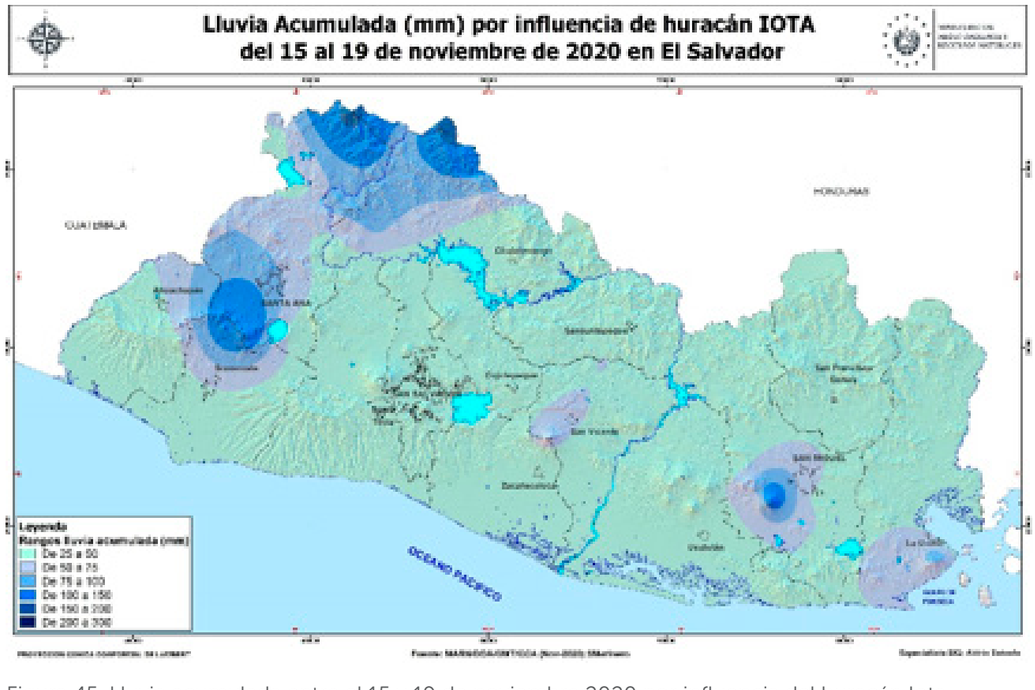


Figura 45. Lluvia acumulada entre el 15 y 19 de noviembre 2020 por influencia del huracán Iota.
Fuente: MARN-DOA-CCA.

Las precipitaciones asociadas al evento se contabilizaron desde las 7:00 a. m. del 15 hasta las 7:00 a. m. del 19 de noviembre (4 días). El mapa de la Figura 45 muestra que la mayor acumulación de lluvia se registró en la zona occidental y suroriental del país, especialmente en los alrededores del golfo de Fonseca. Las zonas central y costera del occidente y centro del país reportaron acumulados menores. El máximo acumulado fue de 183.3 mm en la estación Las Pilas (Chalatenango), seguido por Planes de Montecristo (Santa Ana) con 165 mm, y Finca Los Andes con 140 mm.

Durante los cuatro días del evento se identificaron los siguientes hallazgos:

- El promedio nacional de lluvia acumulada fue de 105 mm, lo que representa un 102 % por encima de la norma mensual nacional de noviembre.
- En 21 de las 25 estaciones climatológicas principales se superó el valor de la norma mensual. Las más destacadas fueron:
  - Las Pilas 55 % más de la lluvia mensual
  - Planes de Montecristo 211% más de la lluvia mensual
  - Los Naranjos 123 % más de la lluvia mensual
  - Nueva Concepción 92 % más de la lluvia mensual
  - Güija 47 % más de la lluvia mensual
- Considerando la influencia de los huracanes Eta e Iota, noviembre de 2020 fue el segundo

más lluvioso desde 1971, superado únicamente por noviembre de 1998, cuando se registró el impacto del huracán Mitch. El total mensual de lluvia fue 247 % mayor que la norma climatológica (1981-2010).

En la Figura 46, que muestra la lluvia diaria agrupada por zonas de elevación, se observa que:

- La distribución promedio de lluvia fue más homogénea y con mayores acumulados en estaciones entre 1200 y 2700 m de altitud.
- Los días 18 y 19 de noviembre presentaron los niveles más altos de precipitación, especialmente en los cuatro grupos clasificados por elevación.

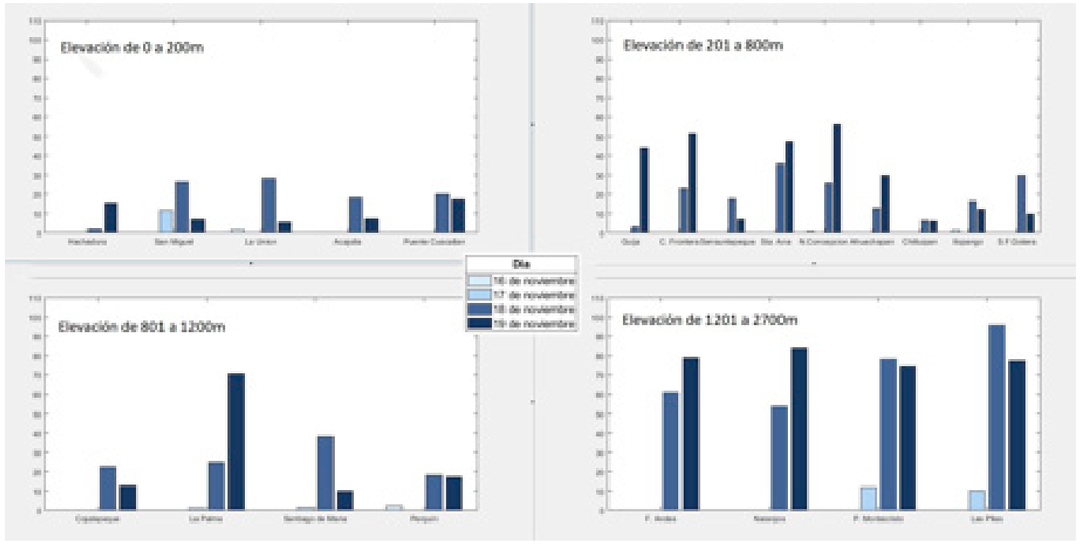


Figura 46. Lluvia diaria por estación, agrupada por zonas climáticas (por elevación) durante el evento Iota.
Fuente: MARN-DOA-CCA.

Las intensidades de las precipitaciones fueron, en su mayoría, débiles, con algunos períodos breves de lluvias moderadas en puntos específicos. Las intensidades más altas se registraron entre el 18 y 19 de noviembre, con máximos de 1.3 mm/min en la estación Jalponga y 1.2 mm/min en Citalá. El resto de las estaciones reportaron intensidades menores a 1 mm/min.

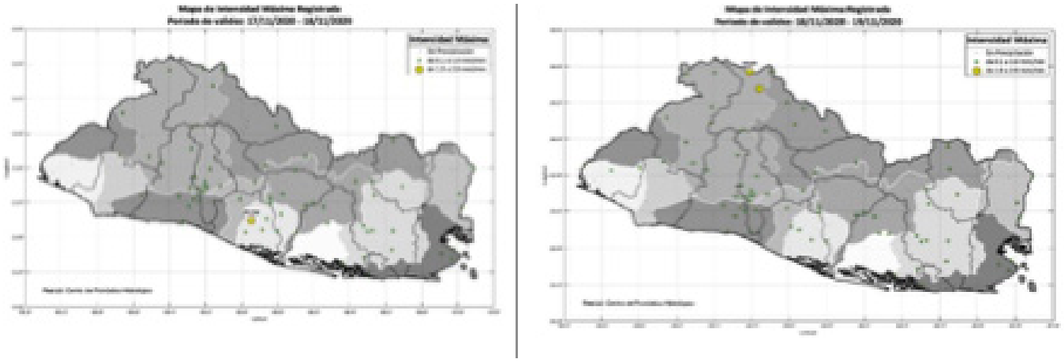


Figura 47. Mapas de intensidades máximas registradas del 17 al 19 de noviembre durante el Huracán Iota.
Fuente: DOA/MARN.

Las inundaciones y desbordamientos registrados por el área de Hidrología ocurrieron principalmente en la cuenca alta del río Lempa entre el 18 y 19 de noviembre. Durante los primeros días del evento no se reportaron impactos significativos. En total, se documentaron 9 eventos, de los cuales 3 fueron clasificados como de severidad baja, 5 de severidad media, y 1 de severidad significativa.

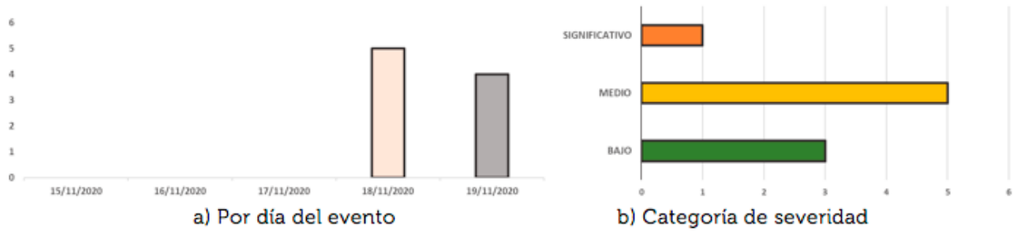


Figura 48. Frecuencia de impactos por inundaciones y desbordamientos durante el huracán Iota.
Fuente: DOA/MARN.

En cuanto a deslizamientos, los reportes se concentraron en sectores específicos de la cadena montañosa norte y la cadena volcánica central. Los eventos de mayor severidad ocurrieron en las cordilleras volcánicas del occidente y oriente del país. El 17 de noviembre fue el día con mayor número de reportes. De los impactos registrados: 47 % fueron clasificados como bajos, 9 % como significativos, y 24 % como moderados.

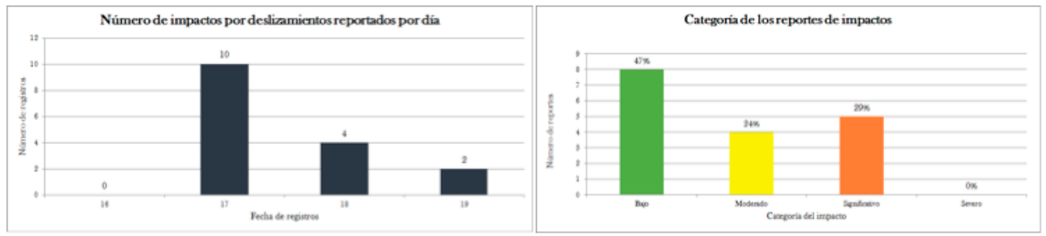


Figura 49. Frecuencia de impactos por deslizamiento durante el huracán Iota.
Fuente: DOA/MARN.

3.4 Tormenta Tropical Bonnie

El 27 de junio de 2022 se formó el ciclón potencial Tropical 2 sobre el occidente del océano Atlántico, a 4,130 km al sureste de las costas de Quintana Roo (México), con vientos máximos sostenidos de 65 km/h, rachas de 75 km/h y desplazamiento hacia el oeste-noroeste a 30 km/h. Desde esa fecha y hasta el 1 de julio, el sistema se desplazó sobre el sur del mar Caribe, ganando gradualmente fuerza y organización, hasta desarrollarse como tormenta tropical Bonnie a las 8:00 a. m. del 1 de julio, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 85 km/h, a menos de 400 km de las costas de Nicaragua.

Durante su paso por El Salvador, el sistema dejó un acumulado máximo de lluvia de 120.6 mm, registrado en la estación La Cima, y un máximo de lluvia en 24 horas de 101.6 mm en la misma estación, el 3 de julio. Es importante destacar que en la estación meteorológica del Aeropuerto de Ilopango se acumuló, en tres días, el 28% del promedio mensual de lluvia.

El mapa de la Figura 50 muestra la trayectoria del sistema, el cual —como pocos casos— se formó en el océano Atlántico y cruzó al océano Pacífico sin perder sus características de ciclón tropical, por lo que conservó su nombre al cambiar de cuenca.



Figura 50. Trayectoria del sistema ciclónico Bonnie.
Fuente: DOA/MARN, julio 2022.

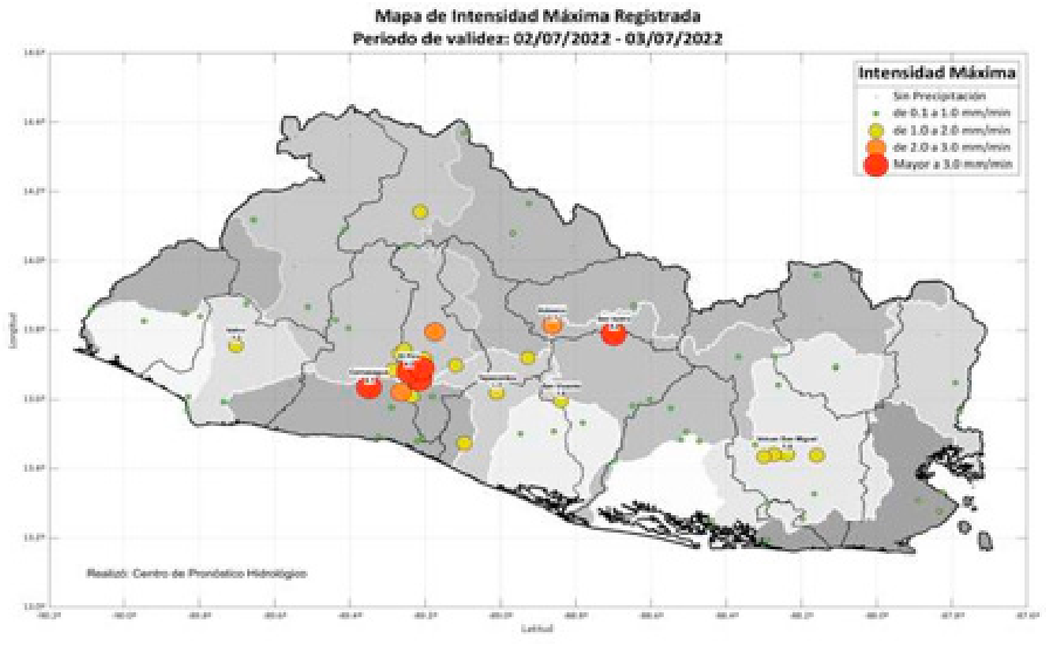


Figura 51. Mapa de intensidades máximas registradas en la red telemétrica del bajo la influencia de la tormenta tropical Bonnie.
Fuente: DOA/MARN, julio 2022.

Las intensidades más significativas de precipitación se registraron entre el 2 y 3 de julio, principalmente en zonas del centro y norte de la región paracentral. El valor máximo de intensidad fue de 4.2 mm/min, registrado en las estaciones El Piro (distrito del departamento de San Salvador) y San Isidro (distrito del departamento de Cabañas); seguido por 4.1 mm/min en la estación Comasagua (distrito del departamento de San La Libertad). En el resto del país, las intensidades fueron predominantemente débiles.

Durante el evento se reportaron inundaciones urbanas en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), así como desbordamientos de ríos en la zona costera central, particularmente del río Majahual, (distrito de La Libertad), y desbordamiento de un río en el distrito de Dolores, del departamento de Cabañas. También se registraron crecidas repentinas, aunque sin generar afectaciones graves.

Los impactos hidrológicos registrados pueden clasificarse como severos, medios y significativos, específicamente en los registros de la zona costera central, departamentos de La Libertad y en el AMSS. Mientras que, para el resto del país, se registraron impactos bajos a medios.

El período de influencia del evento Bonnie en el territorio salvadoreño se extendió desde las 7:00 a. m. del 30 de junio hasta las 7:00 a. m. del 4 de julio, siendo el 2 de julio el día con mayor número de impactos. Se registraron 24 eventos hidrológicos ese día, clasificados de la siguiente manera: 3 bajos, 3 medios y 12 significativos.

En cuanto a la clasificación de los tipos de evento 3 fueron desbordamientos, 20 inundaciones urbanas, 1 crecida repentina y 6 severos.

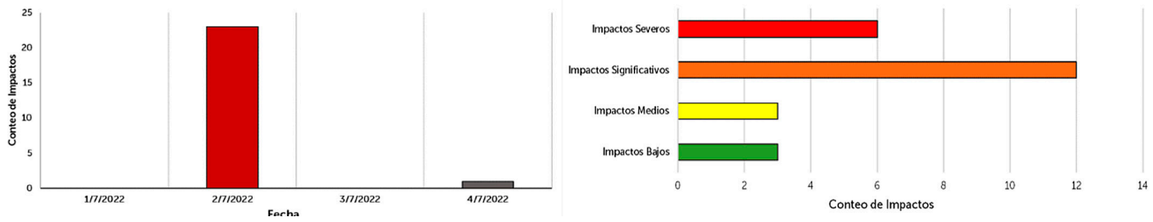


Figura 52. Frecuencia de impactos por inundaciones y desbordamientos ocurridos bajo la influencia de la tormenta tropical Bonnie.
Fuente: DOA/MARN, julio de 2020.

Los deslizamientos registrados por el área de Geología se concentraron principalmente en la cadena volcánica del país. Los impactos de mayor magnitud ocurrieron en la zona central, mientras que en otras regiones fueron en su mayoría de intensidad baja o moderada, afectando ejes carreteros principales y vías secundarias.

Los días con más registros fueron el 3 y 4 de julio, al final del evento, cuando los suelos ya presentaban saturación por las lluvias. Se reportaron 7 deslizamientos durante esas fechas. En total, los impactos se clasificaron así: 57 % bajos, 29 % moderados y 14 % significativos.

Entre los eventos significativos destaca un deslizamiento en la carretera Panorámica, kilómetro 24, que interrumpió completamente la conectividad vial en el distrito de San Francisco Chinameca del departamento de La Paz.

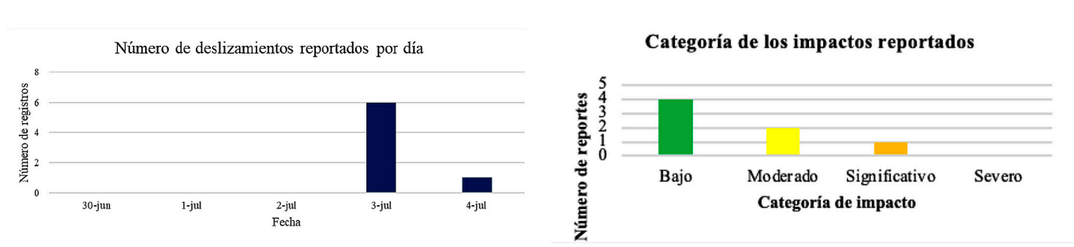


Figura 53. Frecuencia de impactos por deslizamientos ocurridos entre el 30 de junio de 2022 y el 4 de julio de 2022.
Fuente: DOA/MARN, julio de 2020.

3.5 Tormenta Tropical Julia

Durante los primeros diez días de octubre de 2022, se formó un disturbio tropical sobre el Atlántico, asociado al desplazamiento de una onda tropical. Este disturbio evolucionó gradualmente hasta alcanzar la categoría de depresión tropical 13 de la cuenca del Atlántico Tropical Norte el 6 de octubre. Cerca de las costas venezolanas, el sistema ganó fuerza y organización, convirtiéndose en la tormenta tropical Julia.

La Figura 54, muestra como Julia continuó su desplazamiento hacia el oeste y tocó tierra en Nicaragua como huracán categoría 1 el 9 de octubre. Posteriormente, se debilitó al atravesar el territorio nicaragüense, saliendo al océano Pacífico, al sur del golfo de Fonseca, como tormenta tropical el 10 de octubre. Ese mismo día, se desplazó frente a las costas salvadoreñas, tocando tierra en el departamento de La Libertad, antes de disiparse sobre Guatemala.



Figura 54. Trayectoria completa de Julia, octubre 2022.
Fuente: DOA/MARN, octubre 2022.

Julia inició su influencia en El Salvador desde la noche del viernes 7 de octubre con vientos acelerados, predominando los de dirección norte y noreste, los cuales se intensificaron durante el sábado 8 y domingo 9. La lluvia asociada al sistema dio inicio en el transcurso de la tarde del sábado de manera aislada en territorio salvadoreño, mientras que el domingo 9 y lunes 10 las lluvias fueron persistentes y de intensidad variable, desde lloviznas hasta lluvias muy fuertes y de manera generalizada en el territorio.



Figura 55. Trayectoria completa de Julia frente a El Salvador, octubre 2022.
Fuente: DOA/MARN, octubre 2022.

Las lluvias del evento se contabilizaron desde las 7:00 a. m. del 8 hasta las 7:00 a. m. del 11 de octubre (3 días pluviométricos). En el mapa de la Figura 56, se observa que los acumulados más significativos se concentraron en el oriente del país, el departamento de Cabañas, el eje volcánico, la cordillera del Bálsamo y en zonas montañosas de mayor altitud de la cordillera Alotepeque-Metapán, con acumulados entre 200 y 300 mm.

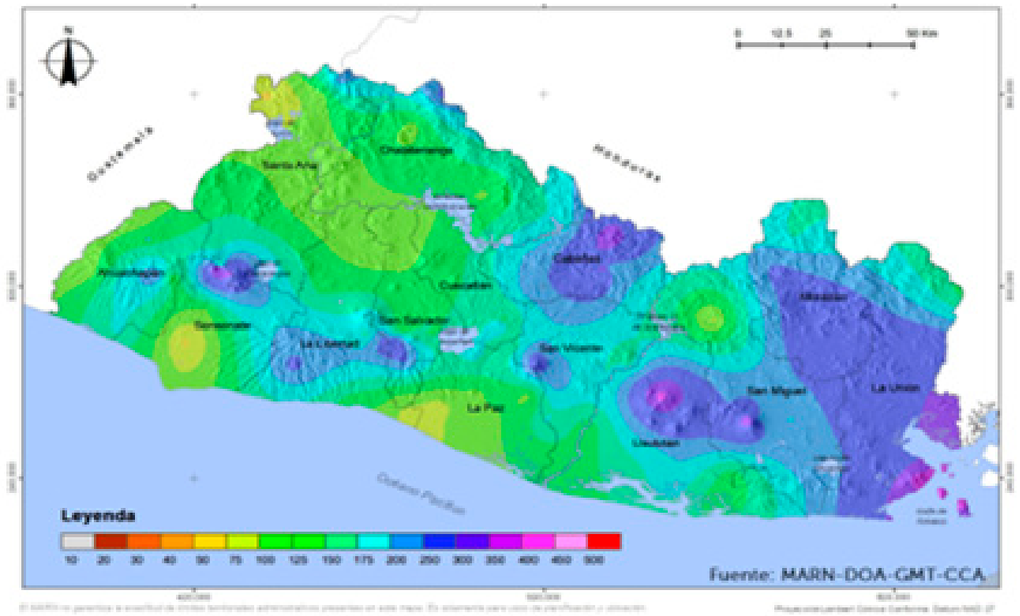


Figura 56. Lluvia acumulada de las 7:00 a. m. del 8 hasta las 7:00 a. m. del 11 de octubre 2022
Fuente: MARN-DOA-CCA.

Durante los tres días del evento, se registró un promedio nacional de lluvia acumulada de 167.7 mm, equivalente al 79 % del promedio mensual de octubre (214.2 mm). El 10 de octubre fue el día más lluvioso, con un promedio nacional de 97.1 mm.

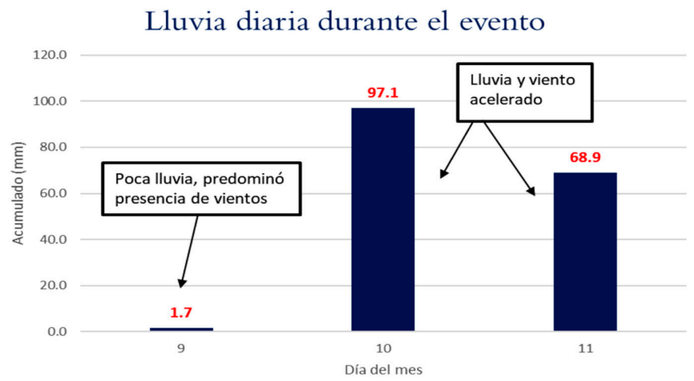


Figura 57. Acumulado de lluvia diaria durante la influencia de Julia sobre El Salvador.
Fuente: MARN/DOA, octubre 2022.

En 4 de las 25 estaciones climatológicas principales, se superó el valor de la norma mensual de octubre durante el evento. Las estaciones con mayores excesos fueron: Finca Los Andes: 122 % del promedio mensual, Las Pilas: 136 %, Los Naranjos: 124 % y Sensuntepeque: 113 %.

En la Figura 58, se muestra el registro de la lluvia diaria por estación y agrupada por zonas climáticas (por elevación), se observa que:

- La distribución promedio de lluvia se muestra de forma más homogénea y con acumulados mayores en las estaciones ubicadas a una elevación de 1200 a 2700 m s. n. m. con promedio de 234.4 mm.

- El acumulado promedio por zona se tuvo en las estaciones ubicadas a menor elevación, es decir las que se ubican entre los 0 y 200 m s.n.m. con un promedio de 149 mm.
- Las estaciones ubicadas entre 1200 y 2700 m s. n. m. registraron acumulados promedios de 234.4 mm.
- Las estaciones de menor elevación (0 a 200 m s. n. m.) promediaron 149 mm.

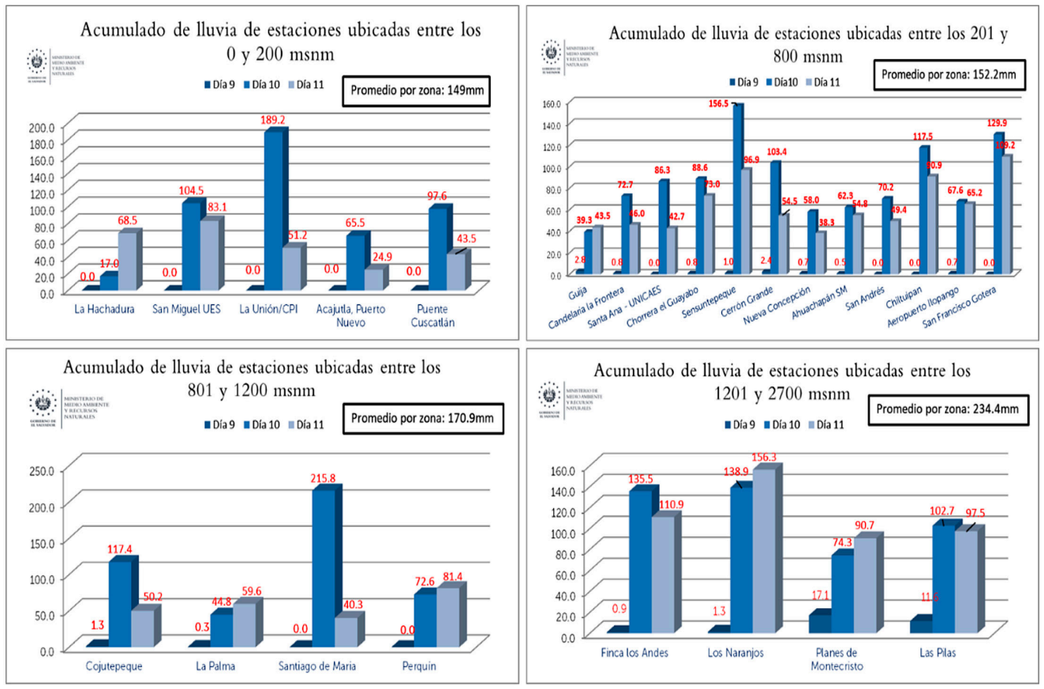


Figura 58. Lluvia diaria por estación agrupadas por zonas climáticas (por elevación).
Fuente: MARN-DOA-CCA.

El Centro de Pronóstico Hidrológico reportó inundaciones y desbordamientos en diferentes puntos de las cuencas de los ríos Lempa, Grande de San Miguel y Goascorán, así como en las regiones hidrográficas Cara Sucia–San Pedro, Grande de Sonsonate, Mandinga–Comalapa y Estero de Jaltepeque.

Las precipitaciones registradas entre el 7:00 a. m. del 8 de octubre y las 7:00 a. m. del 11 de octubre mantuvieron las condiciones críticas de desbordamiento hasta el 13 de octubre. En algunas comunidades como Capitán Lazo, El Tránsito y El Bajo Lempa, se reportaron terrenos anegados incluso después del evento.

Durante el evento se registraron 123 impactos hidrológicos, con la siguiente distribución: 25 bajos, 33 medios, 29 significativos y 22 severos. En cuanto a la clasificación por tipo de evento, se registraron 24 inundaciones urbanas, 79 desbordamientos, 17 crecidas repentinas y 3 anegamientos de terreno.

Entre los eventos críticos se destacan los desbordamientos de la laguna El Jocotal, del río Lempa en el distrito de Tecoluca y Jiquilisco, así como el colapso de bordas del río Grande de San Miguel en el cantón La Canoa el día 11 de octubre y el desbordamiento sobre el cantón Capitán Lazo en el distrito de San Dionisio el mismo día.

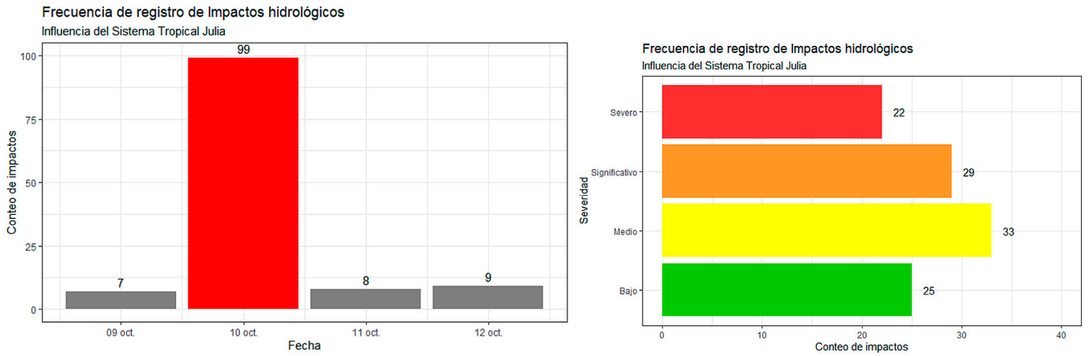


Figura 59. Frecuencia de impactos por inundaciones y desbordamientos. del 9 al 12 de octubre de 2022.
Fuente: DOA/MARN-octubre 2022.

Los deslizamientos reportados por el Sistema Nacional de Protección Civil, redes de observadores locales y redes sociales, se registraron en la base de datos del área de geología. Estos se concentraron a lo largo de la zona montañosa norte, cadena volcánica y cordillera costera.

En la zona central del país se registró la mayor cantidad de impactos, así como los de mayor severidad, incluyendo eventos significativos y uno clasificado como severo en el distrito de Comasagua. Los impactos de categoría baja y moderada afectaron principalmente los ejes de carreteras principales y caminos secundarios, provocando interrupciones parciales en la circulación.

La Figura 60 correspondiente muestra la distribución espacial de los reportes de deslizamientos, clasificados según su nivel de severidad. Los departamentos de La Libertad y San Salvador concentraron la mayor cantidad de eventos, especialmente en la cordillera de El Bálsamo, el sur de San Salvador y la zona sur del lago de Ilopango. Los días con mayor número de deslizamientos fueron el 10 y 11 de octubre, con un total de 159 eventos reportados en esos dos días, de un total de 164 deslizamientos registrados por el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) durante el periodo comprendido entre el 8 y el 11 de octubre, en el contexto de la tormenta tropical Julia.

La distribución de los impactos por deslizamientos, de acuerdo con su severidad, fue la siguiente: 30 % en categoría baja, 61 % en categoría moderada, 8 % en categoría significativa y 1 % en categoría severa.

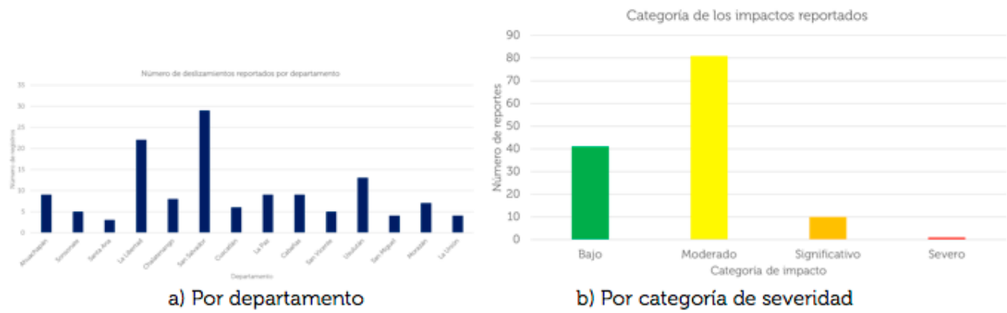


Figura 60. Distribución de impactos de deslizamientos distribuidos por departamento y severidad, ocurridos del 8 al 13 de octubre de 2022.
Fuente: DOA/MARN, octubre de 2022.

3.6 Resumen de Eventos Hidrometeorológicos Extremos 2020-2022

El período comprendido entre 2020 y 2022 estuvo marcado por una recurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos que afectaron al territorio salvadoreño, destacando principalmente por la acumulación de lluvias y sus impactos en infraestructura, vivienda y medios de vida.

El evento combinado Amanda-Cristóbal (2020) fue el de mayor duración (9 días) y acumuló en promedio 490.6 mm de lluvia, equivalente al 27 % de la norma mensual, generando afectaciones significativas en múltiples sectores, particularmente en vivienda, turismo e infraestructura. Por su parte, los ciclones tropicales Eta e Iota (ambos en 2020), aunque de menor duración, provocaron lluvias acumuladas cercanas al 100 % de la norma mensual.

Durante 2022, las tormentas Bonnie y Julia mostraron un patrón de afectación más localizado. Sin embargo, Julia fue especialmente destructiva con un registro de 123 impactos hidrológicos y 164 deslizamientos en solo tres días. Esto indica una intensificación de los efectos a pesar de una menor duración, lo cual puede estar asociado a la acumulación previa de humedad o a la mayor vulnerabilidad del territorio. En resumen, los datos reflejan que tanto la intensidad como la frecuencia de los eventos extremos están en aumento. lo cual plantea importantes desafíos para la gestión del riesgo de desastres, particularmente en lo que respecta al monitoreo hidrometeorológico, planificación territorial y sistemas de alerta temprana.

Tabla 11. Impactos causados por los eventos extremos ocurridos en el período 2020-2022

Evento	Año	Duración (días)	Lluvia Acumulada Promedio (mm)	Impactos Reportados
Amanda-Cristóbal	2020	9	490.6	Fuertes en vivienda, turismo e infraestructura
Eta	2020	4	105.0	Desbordamientos, inundaciones y deslizamientos
Iota	2020	4	105.0	Deslizamientos e impactos acumulados con Eta
Bonnie	2022	4	120.6	Inundaciones y daños viales localizados
Julia	2022	3	167.7	Impactos hidrológicos, deslizamientos

Fuente: Elaboración propia con registros DOA/MARN (2022)

Capítulo 4

4 Amenazas naturales en El Salvador

4.1 Amenaza sísmica

4.1.1 Marco sismo-tectónico

Los países de América Central están ubicados dentro de los límites de las placas del Caribe, Norteamérica, Cocos y Nazca; una región donde los movimientos relativos de las placas, que varían de 2 a 9 cm/año, están acompañados por vulcanismo activo y alta sismicidad superficial e intermedia. (Benito, B. et al., 2008)

El Salvador se encuentra en la parte norte de Centroamérica, en el margen activo del noroeste de la placa Caribe. Enmarcado en el límite entre las placas del Coco y Caribe, caracterizada por la subducción de la primera bajo la segunda a una velocidad que supera los 70 mm/año, es uno de los países centroamericanos con un régimen tectónico más complejo. Esta convergencia se traduce a la vez en la existencia de un sistema de fallas de desgarre en el continente, alineadas con la cadena volcánica con una importante actividad. La velocidad de la mayor de este sistema de fallas, la Zona de Falla de El Salvador (ZFES), que atraviesa el país de este a oeste, alcanza los 14 mm/año y es responsable de terremotos frecuentes, algunos de elevada magnitud. (Staller, A. 2014)

La convergencia entre las placas de Cocos y del Caribe, a lo largo de la costa pacífica de Centroamérica, se acomoda principalmente a dos procesos: (i) la subducción hacia el noreste de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, a una velocidad estimada de 70-85 mm/año y el movimiento en dirección noroeste paralelo a la trinchera del bloque antearco a una tasa de 10-15 mm/año (Hernández-Moreno, C. 2011) (ver Figura 61 y Figura 62).

Los mecanismos focales indican fallamiento inverso a profundidades entre los 15 y 40 km y a profundidades mayores, sismos intraplaca, que generalmente son de fallamiento normal. A partir de la sismicidad histórica se conoce que sismos con magnitudes de hasta Mw 8.0 pueden ocurrir en esta zona.

El arco volcánico es la segunda zona sismogeneradora y responsable de la mayoría de sismos destructores. Eventos asociados a esta zona son generalmente de magnitudes moderadas (inferiores a M 6.8), pero de profundidades someras (5-20 km). Sismos importantes (Chinameca, 1951, San Salvador 1965 y 1986, y San Vicente de 2001) han sido generados por fallas transversales. Otras zonas con actividad sísmica importante son el sistema de fallas de Motagua y Chixoy Polochic en Guatemala (generadora del sismo más destructivo en la historia de América Central, Guatemala 1976, MS 7.5) y la depresión de Honduras situada en la parte central de territorio hondureño.



Figura 61. Tectónica de Centroamérica.
Fuente: Benito, B. et al., 2008.

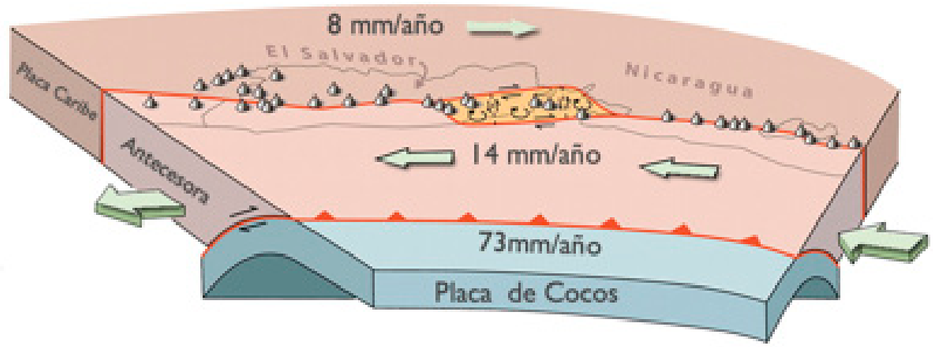


Figura 62. Ilustración esquemática tridimensional del movimiento del antearco de El Salvador y Nicaragua.
Fuente: Alvarado, D., et al. 2011

- Zonas de Enjambres Sísmicos en El Salvador

En el arco volcánico es común registrar sismicidad en forma de enjambres sísmicos. De acuerdo con las características de los eventos, los enjambres pueden agruparse en 12 zonas. Las principales zonas y sus características se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Zonas de enjambres sísmicos por fallamiento local en El Salvador

Zona	Poblaciones	Magnitud Máx. (1900-2023)	Último sismo que ha causado daños
Z1	San Lorenzo, Atiquizaya, Turín	5.8 M_S (1937)	15.01.2023 (5.1 M_W)
Z2	Juayúa, Apaneca, Los Naranjos	5.1 M_W (2007)	03.05.2009 (4.3 M_L)
Z3	El Coco, Candelaria de La Frontera, El Porvenir, Chalchuapa	5.0 M_W (2016)	29.08.2016 (5.0 M_W)
Z4	Armenia, Sacacoyo, Ateos, Ciudad Arce, Lourdes	6.5 M_S (1917)	07.06.1917 (6.5 M_S)
Z5	San Juan Opico, San Matías, San Pablo Tacachico	3.5 M_C (2001)	Ninguno
Z6	San Salvador, Nueva San Salvador, Antiguo Cuscatlán, San Marcos, Santo Tomás, Santiago Texacuangos; Soyapango, Ciudad Delgado, Mejicanos, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque	6.4 M_S (1917)	10.04.2017 (4.8 M_W)
Z7	Ilopango, San Martín, San Miguel Tepezontes, San Juan Tepezontes	4.6 M_W (2001)	Ninguno
Z8	San Emigdio, Candelaria, San Ramón, Santa Cruz Analquito, Paraíso de Osorio; Santa María Ostuma, San Pedro Nonualco, Guadalupe, Mercedes de La Ceiba, Jerusalén; Verapaz, Tepetitán, San Cayetano Istepeque, San Esteban, San Esteban Catarina, Apastepque, San Vicente, Tecoluca	6.6 M_W (2001)	13.02.2001 (6.6 M_W)
Z9	Berlín, Tecapán, California, Alegría, Santiago de María; Mercedes Umaña, El Triunfo, Nueva Granada, San Buenaventura, Jucuapa; Chinameca, Nueva Guadalupe, Lolotique	6.2 M_S (1951)	09.08.2015 (4.0 M_L)
Z10	Zona del volcán de San Miguel	4.2 M_W (2017)	12.04.2017 (4.2 M_W)
Z11	El Carmen, Chirilagua, Intipucá, Conchagua, La Unión	5.4 M_W (2018)	06.05.2018 (5.4 M_W)
Z12	Islas del golfo de Fonseca	6.1 M_W (1982)	03.04.1999 (6.0 M_W)

Fuente: Base de datos MARN.
Notas:
Nota 1: Se mencionan las poblaciones más cercanas a los epicentros sísmicos, sin embargo, otras poblaciones dentro de la zona o zonas vecinas pueden ser afectadas durante la ocurrencia de un sismo.
Nota 2: MS: magnitud de ondas superficiales, MW: magnitud momento, ML: magnitud local, MC: magnitud duración.
Nota 3: Las profundidades focales características de estos enjambres sísmicos son menores a 10 km.

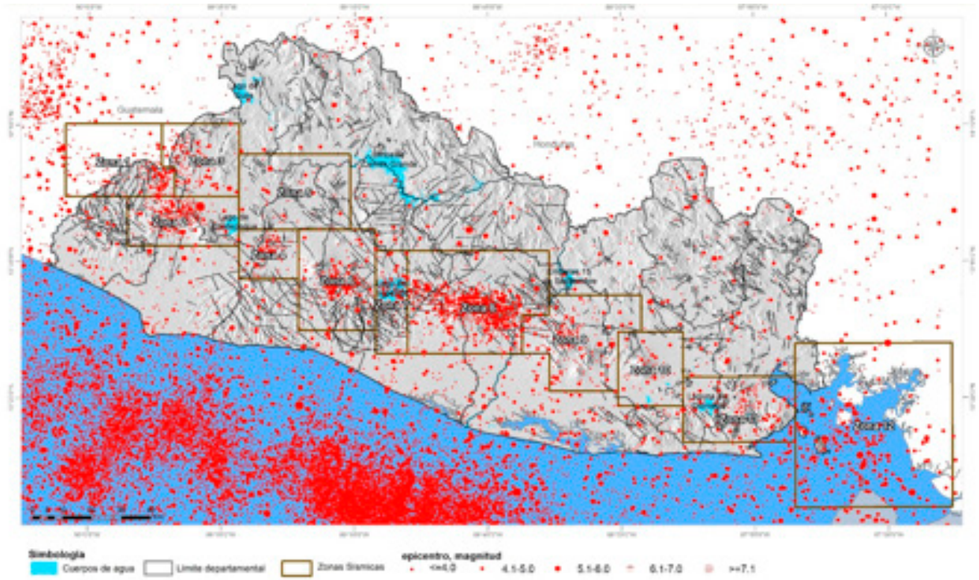


Figura 63. Zonas de enjambres sísmicos por fallamiento local en El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos MARN.

4.1.2 Sismicidad histórica

En promedio, la República de El Salvador sufre un terremoto destructivo una vez por década, y la ciudad de San Salvador es probablemente la ciudad en América más frecuentemente dañada por los sismos (López, M. et al., 2004); fue gravemente afectada el 3 de mayo de 1965 (Ms 6.0) y el 10 de octubre de 1986 (Mw 5.7). El terremoto de 1965 dejó unos 120 muertos, mientras que el de 1986, a pesar de ser de menor magnitud, se tradujo en 1,500 muertos y más de 100,000 personas afectadas. (Bommer, J., et al., 1998)

En la Tabla 13 se presenta un resumen de los sismos de mayor magnitud que han afectado al país en el último siglo; la Figura 64, muestra los sismos destructivos del Siglo XX y XXI en términos del número de muertes. La Figura 65 muestra las máximas intensidades sísmicas observadas en el territorio y las curvas de isosistas mayor o igual a VII MMI para sismos superficiales.

La mayoría de los sismos por falla local que han generado pérdidas humanas se ubicaron en zonas cercanas al Área Metropolitana de San Salvador, donde existe una mayor densidad poblacional. En general, los sismos corticales, pese a presentar magnitudes moderadas, han causado más daño que eventos de mayor magnitud relacionados a la zona de subducción, por sus focos superficiales y coincidencia con principales centros urbanos.

Tabla 13. Sismos de mayor magnitud en El Salvador en el último siglo

Fecha	Ubicación	Magnitud	MMI máx.	Epicentro	Comentarios
19/07/1912	13.87° N -89.57° O	Ms=5.9	---	---	Violento temblor causa daños en Armenia, Izalco y Santa Ana.
07/06/1917	13.70° N -89.50° O	Ms=6.5	---	---	Erupción del Boquerón. Sismo causa destrucción en Armenia y graves daños en Ateos, Sacacoyo y San Julián. Un segundo sismo causa daños en San Salvador, Apopa, Nejapa, Opico y Santa Tecla.
07/06/1917	13.75° N -89.27° O	Ms=6.4	---	---	
20/12/1936	13.72° N -88.93° O	Ms=6.1	---	San Vicente	Destrucción de San Vicente. Entre 100 a 200 muertos.
06/05/1951	13.52° N -88.40° O	Ms=6.2	---	Jucuapa y Chinameca	Murieron más de 400 personas
07/05/1951	13.48° N -88.45° O	Ms=5.8	---	Jucuapa y Chinameca	---
03/05/1965	13.70° N -89.17° O	Ms=6.0	VII en San Salvador	San Salvador	125 muertos, 400 heridos y 4000 casas destruidas
19/06/1982	13.30° N -89.30° O	Mw=7.3	VII en San Salvador	Océano Pacífico	8 personas murieron, 96 resultaron heridas y un promedio de 5000 damnificadas
10/10/1986	13.67° N - 89.19° O	Mw=5.7	VIII-IX en San Salvador	San Salvador	1,500 muertos, 10,000 heridos, unas 60,000 viviendas destruidas o dañadas
13/01/2001	12.83° N -88.79° O	Mw=7.7	VII en San Salvador	Zona de Subducción	Se reportan 944 fallecidos, 1155 edificios públicos dañados, 108,261 viviendas destruidas, 19 hospitales dañados, 445 derrumbes
13/02/2001	13.64° N -88.94° O	Mw=6.6	VI en San Salvador	Zona de San Vicente	Se reportan 315 fallecidos, 82 edificios públicos dañados, 41302 viviendas destruidas, 5 hospitales dañados, 71 derrumbes
26/08/2012	12.139° N -88.59° O	Mw = 7.3	II en San Salvador	Zona de Subducción	Generación de un tsunami en las costas de Usulután, con las mayores afectaciones materiales en las playas de la península de San Juan del Gozo. Alturas máximas del tsunami de hasta 6 metros e inundación de hasta 350 metros tierra adentro
13/10/2014	12.5262° N -88.1225° O	Mw = 7.3	V en San Salvador	Zona de Subducción	Se reportaron 3 personas fallecidas, dos por infarto y una por la caída de un poste del tendido eléctrico. Se contabilizó un total de 17 viviendas dañadas en los departamentos de Usulután y San Miguel
24/11/2016	11.9586° N -88.9209° O	Mw = 6.9	IV en San Salvador	Zona de Subducción	No se reportaron daños
10/04/2017	13.6983° N -89.2553° O	Mw = 4.8	V – VI en San Salvador	San Salvador	Se reportó un fallecido por caída de rocas en la carretera de Los Chorros, y daños estructurales menores en algunas edificaciones de San Salvador y Antiguo Cuscatlán
06/05/2018	13.2415° N -88.0593° O	Mw = 5.4	VI - VII en Intipucá	Chirilagua e Intipucá	Destrucción de varias viviendas de adobe y bahareque, y agrietamientos en mampostería
15/01/2023	14.0699° N -89.8376° O	Mw = 5.1	VI en San Lorenzo	Guatemala/ San Lorenzo	Viviendas parcialmente destruidas en el cantón La Danta de Ahuachapán

Fuente: Modificado de https://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas

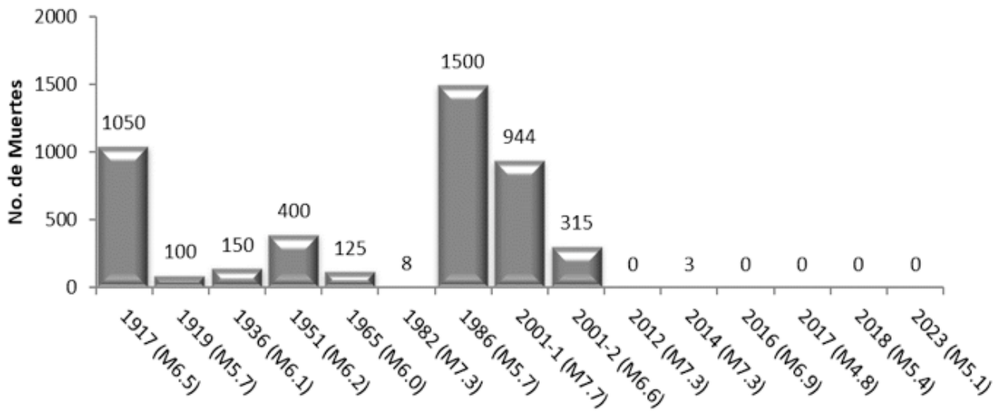


Figura 64. Sismos de gran magnitud de los siglos XX y XXI en El Salvador, por año/cantidad de muertes registradas.
Fuente: Elaboración propia con datos de https://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas

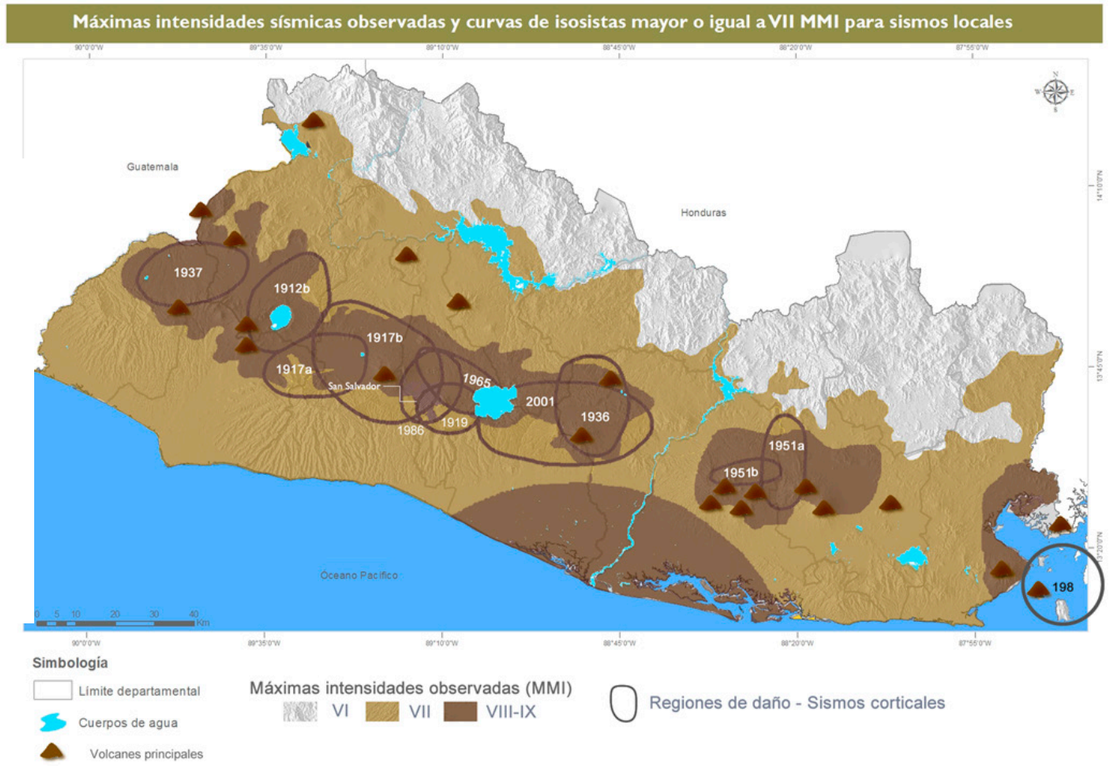


Figura 65. Máximas intensidades sísmicas observadas y curvas de isosistas mayor o igual a VII MMI para eventos corticales.
Fuente: Modificado de Bommer J. et al., 1998)

4.1.3 Estadística de sismicidad diaria registrada

Actualmente el área de sismología maneja un promedio de sismicidad diario de aproximadamente 13 eventos sísmicos; sin embargo, este promedio no refleja la variabilidad de la sismicidad en el país puesto que no considera las distintas fuentes sísmicas.

Con el objetivo de abordar esta limitación, se realizó un análisis estadístico básico orientado a estimar un valor representativo diario de la sismicidad, desagregado por fuente generadora. Esta clasificación considera tanto la actividad sísmica asociada a fallas geológicas locales, como aquella vinculada a procesos de subducción y a estructuras tectónicas activas ubicadas en países vecinos.

• Sismos regionales

Para estimar un valor representativo de sismos regionales diarios, se utilizaron registros comprendidos entre 2002 y 2022. El año 2001 fue excluido del análisis debido a la anormalidad en la actividad sísmica asociada a los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero. La cantidad total de sismos considerados para este cálculo se presenta en la Figura 66.

En 2011 hubo una sismicidad anómala, por lo que no se incluyó la totalidad de los eventos de ese año en la Figura 66. En concreto, se excluyeron cuatro meses con anomalías significativas. Tomando en cuenta estas exclusiones y la metodología aplicada, se estima que el valor representativo de la sismicidad regional diaria es de 7 sismos.

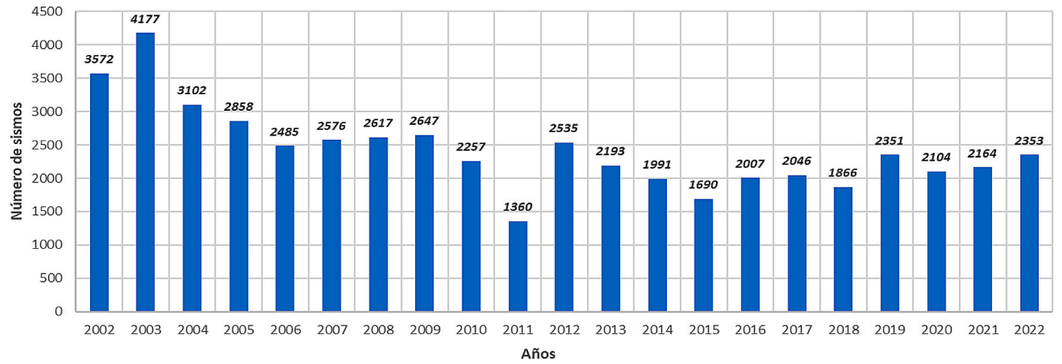


Figura 66. Datos utilizados de sismicidad anual registrada de eventos sísmicos regionales.
Fuente: Elaboración propia con datos de base de datos MARN.

• Sismos locales

El análisis se realizó utilizando datos de sismicidad registrados entre 2010 y 2022. La Tabla 14 presenta la información empleada para calcular el valor representativo diario de sismos locales. Para este cálculo, fue necesario excluir aquellos meses que presentaron sismicidad anómala, ya sea por una actividad inusualmente alta — debido a series o enjambres sísmicos — o por una sismicidad anormalmente baja.

Tabla 14. Datos utilizados de sismicidad mensual registrada de eventos sísmicos locales

Mes\Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Enero	308	134	167	260	46	30	49	92	145	71	119	71	109
Febrero	91	76	191	242	19	47	46	33	51	52	64	26	64
Marzo	129	130	281	286	62	69	60	110	46	13	41	58	120
Abril	105	179	152	174	45	53	82	660	237	90	33	59	132
Mayo	180	154	146	254	520	66	65	90	1569	72	15	67	194
Junio	142	270	211	114	79	37	96	84	148	41	67	50	102
Julio	332	2229	140	123	180	76	44	59	77	80	54	254	187
Agosto	271	280	80	158	58	400	61	58	142	36	521	60	41
Septiembre	327	117	246	88	34	574	50	102	138	36	181	35	94
Octubre	91	155	222	133	53	1044	58	339	108	70	49	53	69
Noviembre	183	2244	130	132	44	41	46	161	52	330	73	90	39
Diciembre	144	496	164	127	48	46	60	69	42	128	100	65	16

Fuente: Elaboración propia con datos de base de datos MARN.

Para el cálculo, los datos mensuales fueron filtrados aplicando un umbral inferior de 45 eventos y un umbral superior de 200 eventos. Como resultado, más del 65 % de los meses analizados presentaron una cantidad de eventos dentro de este rango. Con base en estos datos depurados, se estimó un valor representativo de aproximadamente 3 sismos locales diarios.

4.1.4 Amenaza sísmica en El Salvador

El nivel de amenaza sísmica depende de las características de la región de análisis: la sismicidad del área de influencia, la atenuación sísmica regional y el efecto local del suelo en el sitio. La intensidad y duración del movimiento en un sitio depende tanto del tamaño y localización del sismo (atenuación) como de las características geológicas y topográficas particulares del lugar (efecto de sitio).

La Figura 67 muestra el mapa de amenaza sísmica para El Salvador en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA por sus siglas en inglés) para un período de retorno de 475 años, considerando condiciones de roca. Este tipo de mapa es la base para la elaboración de códigos de diseño por sismo. El mapa de amenaza (PGA, TR=475 años) muestra que los valores más altos de PGA se concentran a lo largo de la cadena volcánica, donde se suma la influencia de la actividad de fallamiento local junto con la subducción.

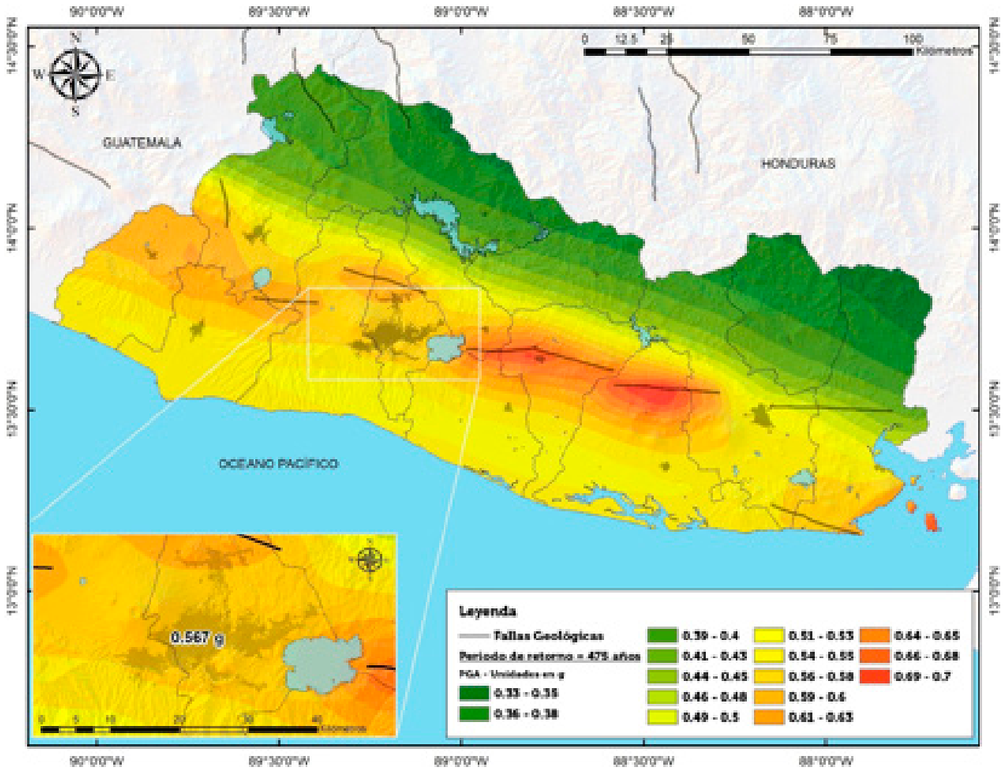


Figura 67. Mapa de amenaza sísmica de El Salvador en PGA (gal) para PR=475 años.
Fuente: Mixco, L. 2021a

Este mapa fue desarrollado en el año 2021 bajo un enfoque probabilístico, utilizando un catálogo sísmico actualizado, una caracterización local del movimiento fuerte a base de registros acelerográficos propios y la configuración de un nuevo modelo de fuentes sísmicas para la zona de subducción y corteza superficial activa. En este última, se consideró la contribución suavizada de la sismicidad de fondo junto al aporte del movimiento de fallas geológicas. En todas las etapas del proceso se aplicó un tratamiento riguroso de la incertidumbre inherente en los datos.

Cabe señalar, que en el mapa de la Figura 67 se muestra la amenaza sísmica nacional en condiciones de suelo firme o roca, donde se estima que el promedio ponderado de la velocidad de ondas de corte que atravesarían un paquete de suelos (de 30 metros de espesor) debajo de un sitio particular, equivaldría a 760 m/s (Vs30). Sin embargo, pocas veces se tienen tales condiciones y la geología superficial puede llegar a tener un efecto considerable de amplificación de las ondas. El factor sitio generalmente se define en función de la geología superficial y aspectos topográficos del lugar, pudiendo llegar a dominar sobre la amenaza sísmica debido a los efectos de amplificación de la radiación en la base rocosa. El efecto de sitio en el país está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o piroclastos no consolidados (por ejemplo, los depósitos de tierra blanca joven).

Con el objetivo de caracterizar este factor de amplificación del terreno a nivel nacional, se elaboró un mapa de respuesta sísmica homogénea, en términos de la velocidad promedio de las ondas de corte en los 30 metros superiores del subsuelo (Vs30), configurándose diferentes clases de sitio de acuerdo a la clasificación NEHRP 2020, a las cuales se asignan funciones de amplificación y transferencia particulares. Este mapa se muestra en la Figura 68 y funciona como un diferenciador geográfico de clases de sitio de suelos a nivel nacional, derivado de un modelo estadístico espacial empleando herramientas de aprendizaje supervisado, cuyos datos de entrada fueron la compilación de bases de datos de mediciones geofísicas en pozos de exploración e información geológica proveniente del Sistema de Monitoreo Integrado de Recursos Hídricos- (SIMIH) del Ministerio de Medio Ambiente.

De la Figura 69 a la Figura 72 se presentan las funciones de transferencia promedio obtenidas, considerando diferentes períodos de retorno sobre cada clase de sitio, reflejándose en algunas de ellas más de un período fundamental de vibración del paquete de suelos. Su determinación se realizó mediante técnicas analíticas y empíricas considerando el comportamiento inelástico de los suelos, asociándose a diferentes niveles de intensidad sísmica a las que podría verse sometida su estructura.

Dado que los valores de amplificación obtenidos en las funciones de transferencia para cada período estructural constituyen una aportación conjunta de diferentes niveles de intensidades sísmica, es menester construir funciones de amplificación para cada clase de sitio y período estructural, de tal forma que integren la mayoría de respuestas de los suelos para valores específicos de aceleración del terreno, permitiendo capturar el comportamiento dinámico y no-lineal existente en los paquetes de suelo respecto al cambio en los niveles de sacudida.

Con lo anterior, y considerando la incertidumbre asociada a dichas funciones, se obtienen tablas de factores de amplificación que facilitan la determinación espectros de amenaza uniforme a nivel de la superficie. De la Figura 73 a la Figura 76 se muestran las funciones de amplificación para las diferentes clases de sitio, mostrando únicamente ciertos períodos estructurales. En la Tabla 15 se muestra un extracto de los factores de amplificación obtenidos.

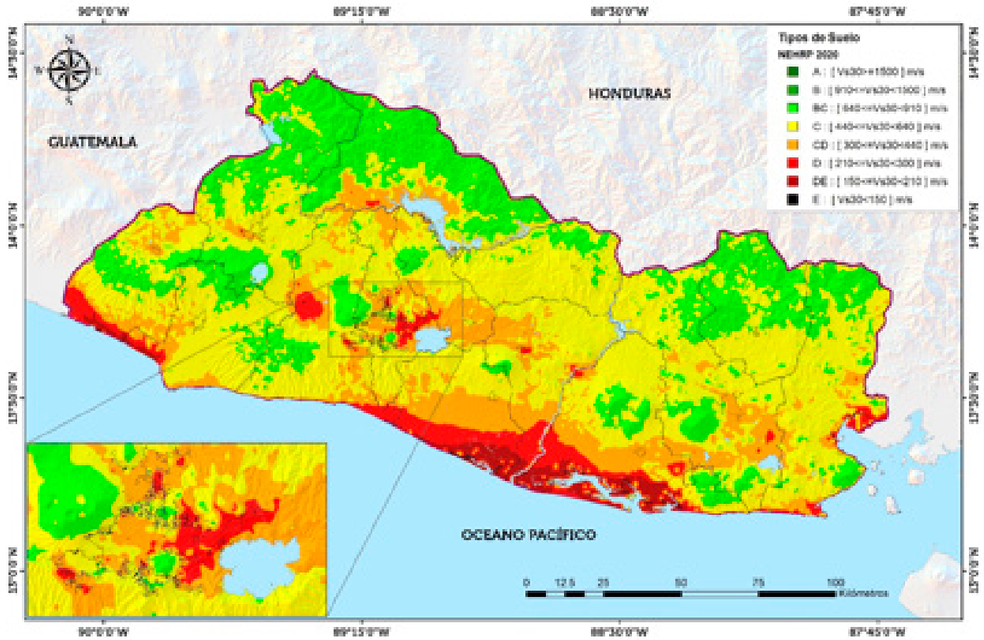


Figura 68. Mapa de clases de sitio a nivel nacional en términos de Vs30.
Fuente: Mixco, L. 2021b

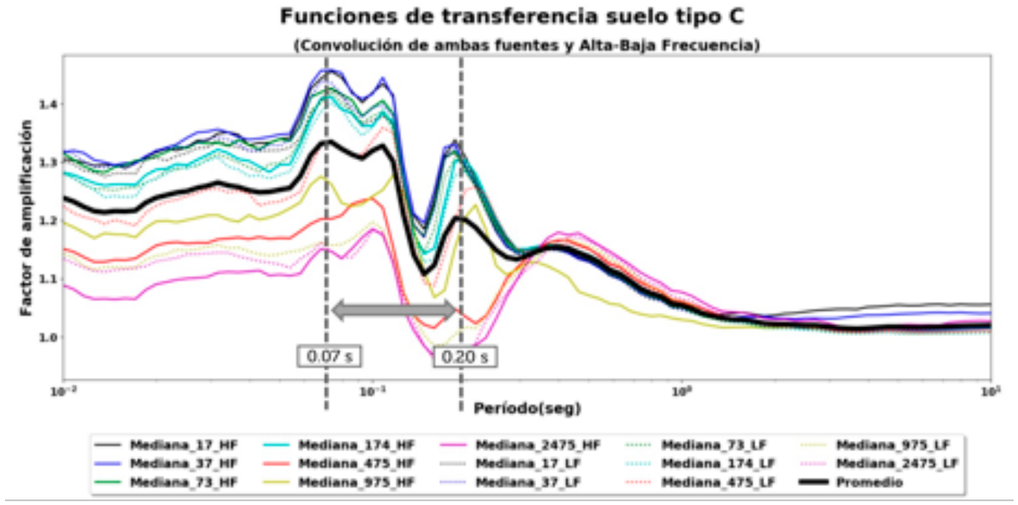


Figura 69. Funciones de transferencia promedio de clases de sitio C dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

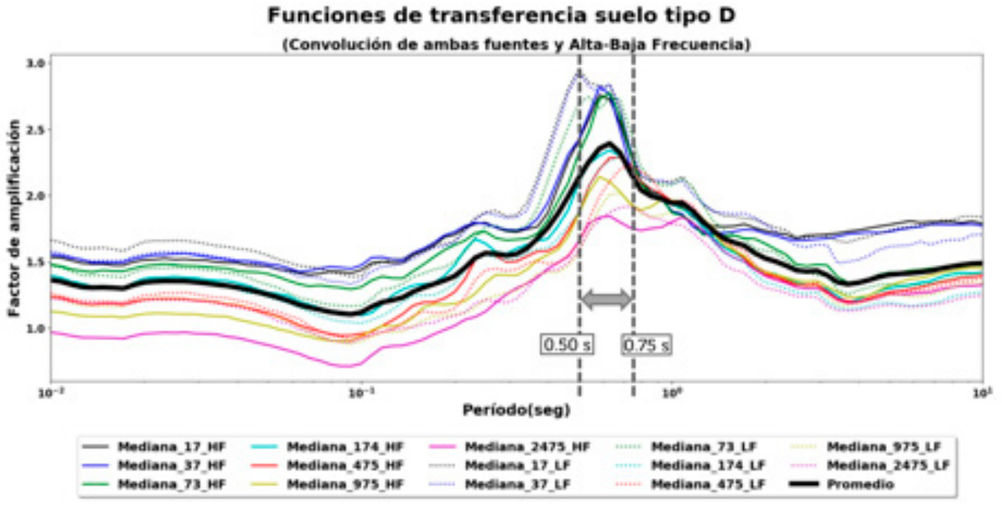


Figura 70. Funciones de transferencia promedio de clases de sitio D dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

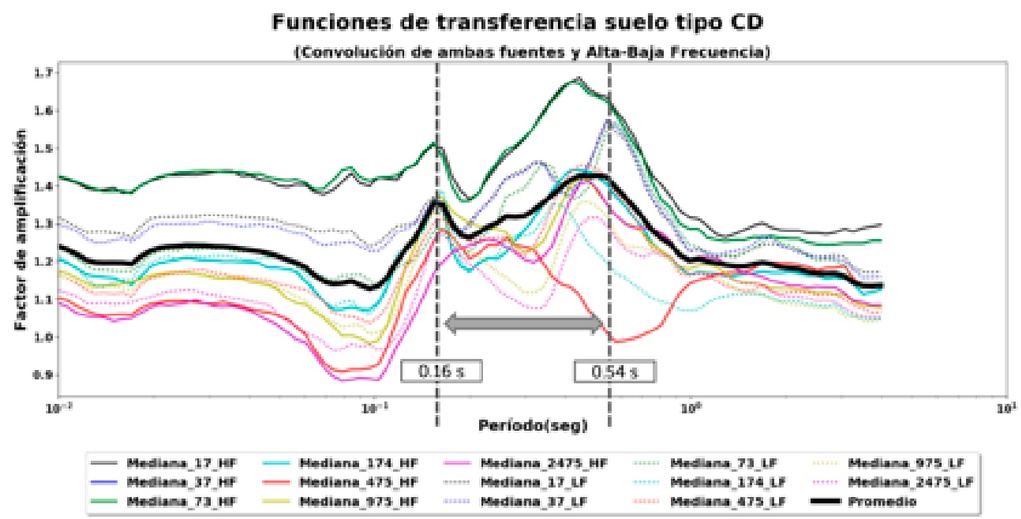


Figura 71. Funciones de transferencia promedio de clases de sitio CD dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

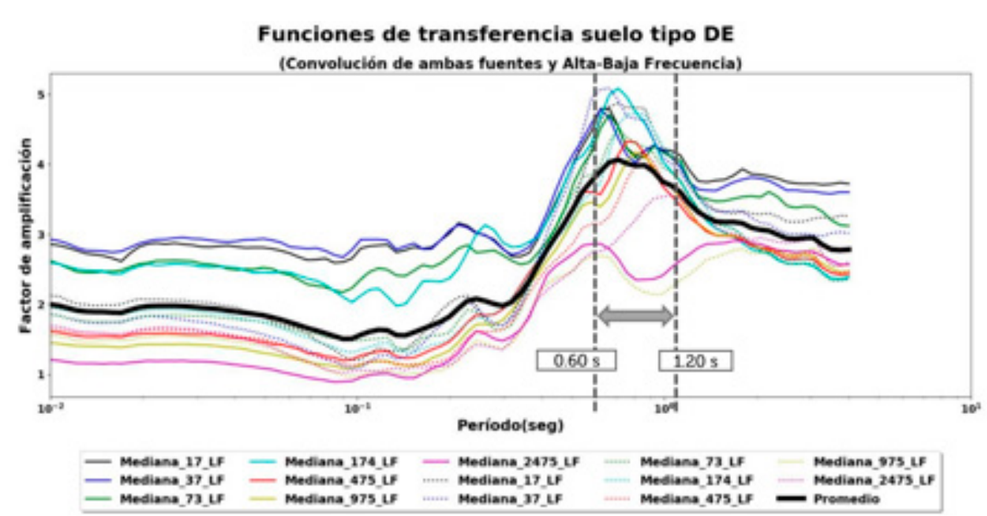


Figura 72. Funciones de transferencia promedio de clases de sitio tipo DE dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

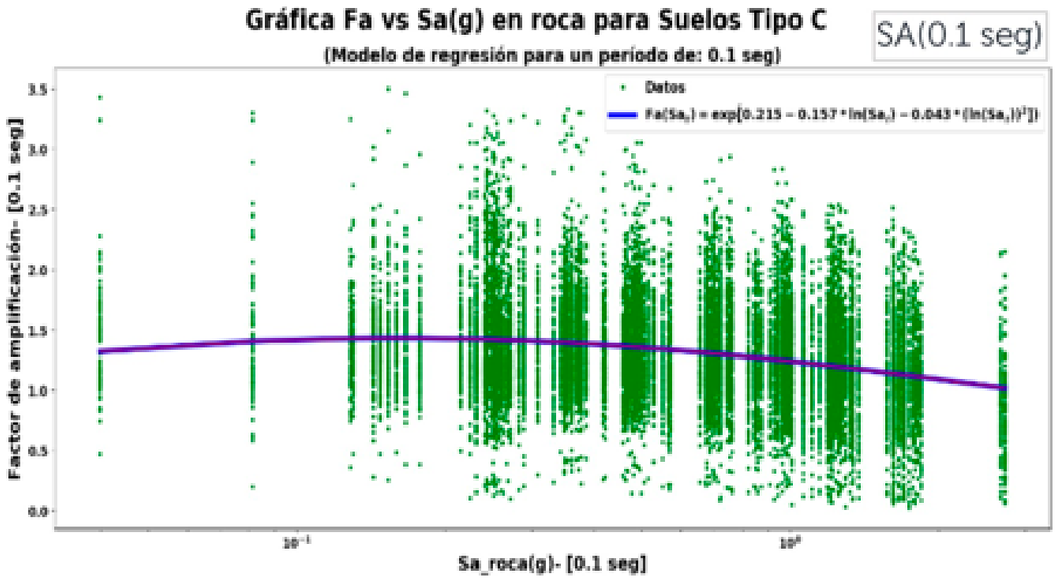


Figura 73. Funciones de amplificación sobre clases de sitio tipo C dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

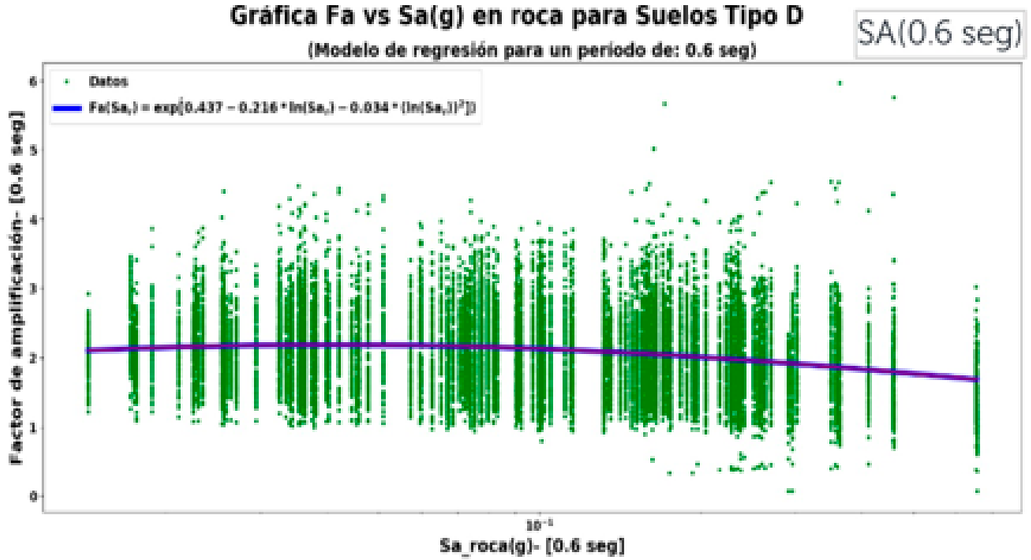


Figura 74. Funciones de amplificación sobre clases de sitio tipo D dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

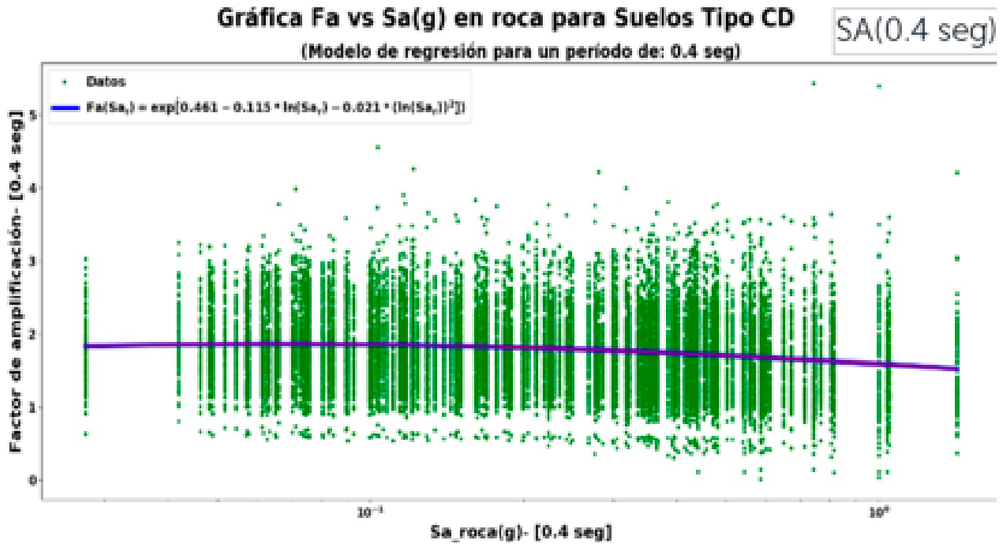


Figura 75. Funciones de amplificación sobre clases de sitio tipo CD dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

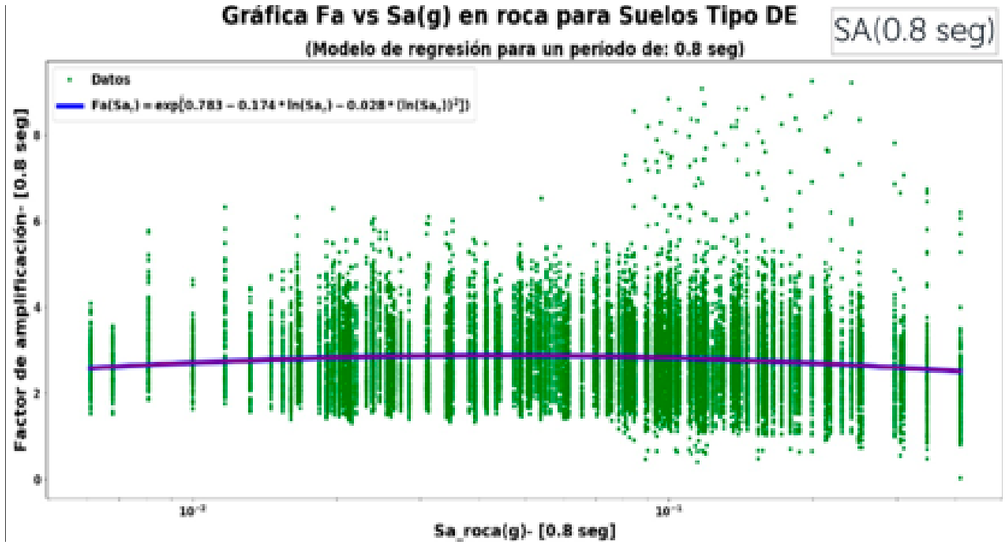


Figura 76. Funciones de amplificación sobre clases de sitio tipo DE dentro de El Salvador.
Fuente: Mixco, L. 2021c

Tabla 15. Factores de amplificación sobre clases de sitio de El Salvador

	Aceleración máxima de terreno [PGA)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando únicamente período de retorno de 2475										
Clase de sitio	PGA = 0.01g	PGA = 0.05g	PGA = 0.1g	PGA = 0.15g	PGA = 0.2g	PGA = 0.25g	PGA = 0.3g	PGA = 0.35g	PGA = 0.4g	PGA = 0.45g	PGA = 0.5g
BC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.27	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21
CD	1.63	1.63	1.63	1.63	1.59	1.53	1.47	1.43	1.39	1.35	1.32
D	1.73	1.73	1.64	1.53	1.46	1.40	1.36	1.32	1.28	1.25	1.23
DE	1.69	1.69	1.69	1.69	1.54	1.43	1.35	1.27	1.20	1.15	1.10
E	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.13	1.09	1.05	1.02	1.00	0.98

	Aceleración espectral de terreno [SA (0.2 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando únicamente el período de retorno										
Clase de sitio	SA (0.2 seg) = 0.01g	SA (0.2 seg) = 0.05g	SA (0.2 seg) = 0.1g	SA (0.2 seg) = 0.15g	SA (0.2 seg) = 0.2g	SA (0.2 seg) = 0.25g	SA (0.2 seg) = 0.3g	SA (0.2 seg) = 0.35g	SA (0.2 seg) = 0.4g	SA (0.2 seg) = 0.45g	SA (0.2 seg) = 0.5g
BC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
CD	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
D	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.48	1.45	1.42	1.39	1.37
DE	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
E	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01

	Aceleración espectral de terreno [SA (0.5 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando únicamente el período de retorno										
Clase de sitio	SA (0.5 seg) = 0.01g	SA (0.5 seg) = 0.05g	SA (0.5 seg) = 0.1g	SA (0.5 seg) = 0.15g	SA (0.5 seg) = 0.2g	SA (0.5 seg) = 0.25g	SA (0.5 seg) = 0.3g	SA (0.5seg) == 0.35g	SA (0.5seg) == 0.4g	SA (0.5 seg) = 0.45g	SA (0.5 seg) = 0.5g
BC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.27	1.27	1.26	1.26
CD	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.75	1.74	1.73	1.72	1.71
D	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	1.96	1.95	1.93	1.92	1.91	1.90
DE	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924
E	1.896	1.896	1.896	1.896	1.896	1.896	1.855	1.811	1.774	1.740	1.711

	Aceleración espectral de terreno [SA (1.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando únicamente el período de retorno										
Clase de sitio	SA (1.0 seg) = 0.01g	SA (1.0 seg) = 0.05g	SA (1.0 seg) = 0.1g	SA (1.0 seg) = 0.15g	SA (1.0 seg) = 0.2g	SA (1.0 seg) = 0.25g	SA (1.0 seg) = 0.3g	SA (1.0 seg) = 0.35g	SA (1.0seg) == 0.4g	SA (1.0seg) == 0.45g	SA (1.0 seg) = 0.5g
BC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18
CD	1.57	1.57	1.57	1.56	1.56	1.56	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
D	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934	1.934
DE	2.634	2.634	2.634	2.634	2.364	2.613	2.557	2.488	2.419	2.386	2.386
E	2.882	2.882	2.875	2.854	2.831	2.808	2.788	2.788	2.788	2.788	2.788

	Aceleración espectral de terreno [SA (2.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando únicamente el período de retorno										
Clase de sitio	SA (2.0 seg) = 0.01g	SA (2.0 seg) = 0.05g	SA (2.0 seg) = 0.1g	SA (2.0 seg) = 0.15g	SA (2.0 seg) = 0.2g	SA (2.0 seg) = 0.25g	SA (2.0 seg) = 0.3g	SA (2.0 seg) = 0.35g	SA (2.0 seg) = 0.4g	SA (2.0 seg) = 0.45g	SA (2.0 seg) = 0.5g
BC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C	1.18	1.17	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
CD	1.45	1.43	1.42	1.41	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
D	1.895	1.890	1.888	1.887	1.887	1.887	1.887	1.887	1.887	1.887	1.887
DE	2.620	2.555	2.492	2.457	2.439	2.439	2.439	2.439	2.439	2.439	2.439
E	3.284	3.284	3.206	3.139	3.139	3.139	3.139	3.139	3.139	3.139	3.139

Fuente: Mixco, L. 2021c

Por otro lado, el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) es una zona importante para el estudio de los sismos, debido a la concentración de edificaciones y población. Para mejorar la normativa de construcción se requiere hacer estudios a detalle denominados de Microzonificación Sísmica.

Tomando como base los mapas geológicos y topográficos de la región, así como la información geológica/geotécnica recopilada, se han estimado de forma preliminar Zonas de Respuesta Sísmica Similar (ver Figura 78) (Kattan, C. 2012), utilizando como principal criterio para su delimitación, la profundidad y características dinámicas generalizadas de los piroclastos no consolidados sobre la base rocosa y los períodos predominantes obtenidos a partir de datos de movimiento fuerte y registros de microtemblores.

Las funciones de amplificación relativa para cada zona, estimadas sobre la base de datos sísmicos, reflejan una función de modificación al espectro de respuesta obtenido del estudio de amenaza a nivel nacional para la condición de "roca", considerado como un espectro de línea base de efecto de sitio.

La Figura 77 ilustra la metodología empleada para el cálculo de funciones de transferencia, utilizando registros obtenidos en un pozo instrumentado tanto en el fondo como en la superficie. En esta etapa del análisis, se ha considerado únicamente el comportamiento elástico de los suelos, tomando como base registros sísmicos de amplitud moderada.

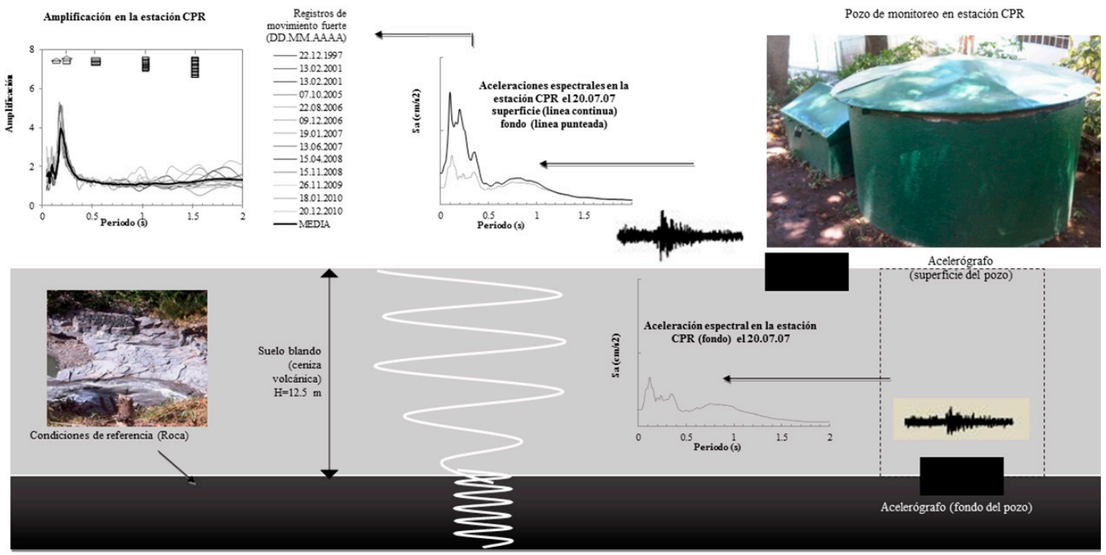


Figura 77. Amplificación de ondas sísmicas para el caso del pozo instrumentado en Casa Presidencial (CPRS/CPRF).
Fuente: Kattan, C. et al., 2012.

El mapa preliminar de Zonas de Respuesta Sísmica Similar (Figura 78) es una primera aproximación para la estimación de respuesta de sitio, y debe ser considerada como tal; no pretende, bajo ningún punto de vista, reemplazar ni descartar estudios de detalle. El detalle del espesor de suelo blando superficial, función de amplificación típica, y la descripción del tipo de edificación que pudiera verse más afectada por efectos de sitio se muestra en la Tabla 16.

Debido a la geología particular del Área Metropolitana de San Salvador, los períodos más bajos se observan en las cercanías del volcán de San Salvador. Estos períodos aumentan progresivamente hacia las zonas aledañas al lago de Ilopango, donde se encuentran los mayores espesores de piroclásticos no consolidados. En estas áreas, se observan amplificaciones sísmicas importantes en un amplio rango de períodos de interés ingenieril y períodos de resonancia cercanos a los característicos de las estructuras más comunes dominantes en la mayoría de las zonas.

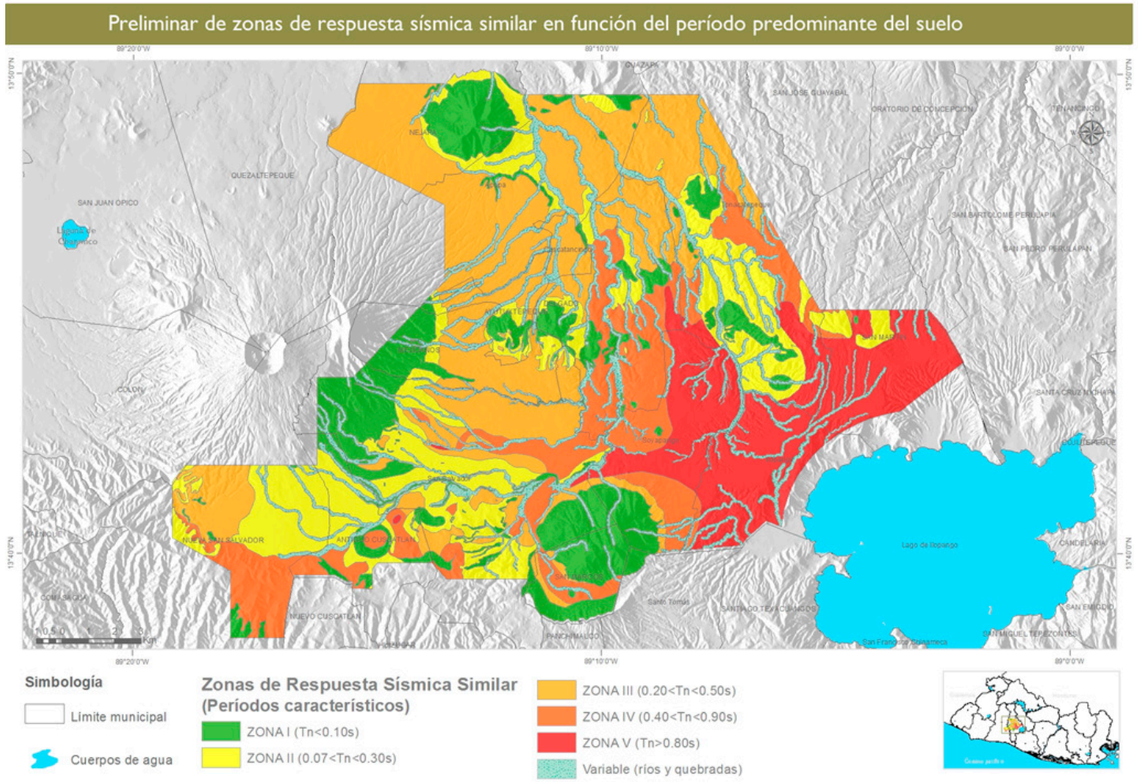
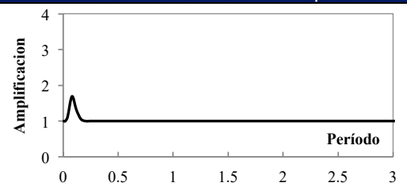
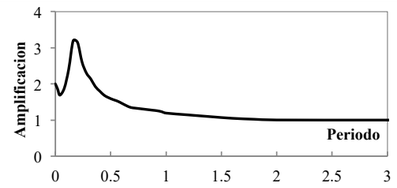
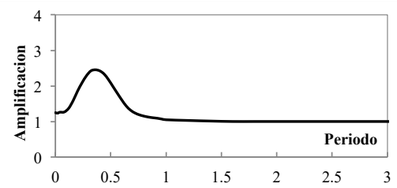
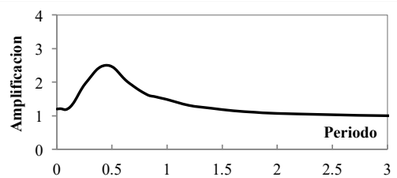
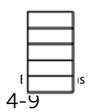
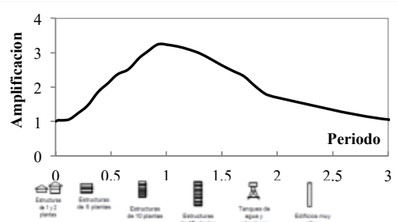


Figura 78. Mapa preliminar de Zonas de Respuesta Sísmica Similar en función del período predominante del suelo (suelo en rango elástico).
Fuente: Kattan, C. 2012.

Tabla 16. Condiciones típicas de sitio, funciones de transferencia y estructuras afectadas por efectos de sitio.

Zona	Condiciones típicas de suelo	Funciones de amplificación (rango elástico) y estructuras más afectadas por efectos de sitio	
ZONA I Suelo blando< 5m	 Colonia Escalón (2011)		 Estructuras 1 Nivel
ZONA II Suelo blando 5-15m	 Zona de Multiplaza(2007*)		 Estructuras **1-3 Niveles** (Típico 2)
ZONA III Suelo blando 15-25m	 Centro de Gobierno (2010)		 2-5 Niveles (Típico 3)
ZONA IV Suelo blando 25-50m	 Altos del Boulevard (2008*)		 4-9 Niveles (Típico
ZONA V Suelo blando >50m	 Rio Las Cañas (2010)		 >8 Niveles (Típico
*Fotografías cortesía de Walter Hernández			

Fuente: Kattan, C. 2012.

4.2 Amenaza por tsunamis

4.2.1 Tsunamis El Salvador

Un tsunami es una ola o serie de olas que se producen en una masa de agua al ser empujada violentamente por una fuerza que la desplaza verticalmente. Estos pueden ser provocados por terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos costeros o subterráneos, explosiones de gran magnitud o incluso meteoritos. Estas olas se propagan rápidamente en todas las direcciones desde su lugar de origen. En alta mar, las masas de agua que se desplazan llegan a alcanzar altas velocidades con altura de olas muy pequeñas; conforme el tsunami se acerca a la costa la ola pierde velocidad, pero va aumentando su altura (IH Cantabria y MARN, 2012).

Los tsunamis son considerados fenómenos naturales que causan daños menores para Centroamérica en comparación con los daños provocados por fenómenos más frecuentes como los terremotos, los deslizamientos y las inundaciones; sin embargo, datos históricos muestran que los tsunamis han causado pérdida de vidas y daños en la infraestructura costera centroamericana. Los países de Centroamérica están expuestos a tsunamis generados por fuentes cercanas, es decir, sismos localizados frente sus costas, así como por fuentes lejanas o sismos distantes cuyo epicentro se localiza a una distancia mayor a 1,000 kilómetros de las costas centroamericanas.

4.2.2 Tsunamis históricos

El catálogo de tsunamis para Centroamérica (1539-1996) tiene un registro de 50 eventos, 47 de ellos fueron generados en las costas de Centroamérica, tanto en el Caribe como en el Pacifico, uno en Ecuador en 1906, uno en Chile en 1960 y uno en las islas Aleutianas en 1957 (Molina, 1997).

Muchos de los eventos de tsunami pasados causaron pérdidas de vidas humanas, y destrucción de infraestructuras y cultivos. En el caso de El Salvador, han sido los ocurridos en 1902 y 1957. El tsunami del 26 de febrero de 1902 ha sido el más devastador, afectó a la zona occidental del país en Barra de Santiago y Garita Palmera, causando 185 muertes y daños materiales importantes, abarcando 120 kilómetros de costa aproximadamente. El del 9 de marzo de 1957, originado por un sismo en las islas Aleutianas, causó afectación en la costa salvadoreña, pérdidas humanas e importantes daños en el puerto de Acajutla. En 1992 se produjo un importante tsunami en Nicaragua, considerado el más grande ocurrido en Centroamérica; sin embargo, su amplitud al llegar a la costa de El Salvador fue pequeña y apenas causó daños. El más reciente, aunque de menor magnitud, ocurrió el 26 de agosto de 2012 afectando la península San Juan del Gozo de la bahía de Jiquilisco. En la Tabla 17 se presenta información de los tsunamis registrados en El Salvador a nivel local, regional y distal.

El tsunami registrado el 26 de agosto del 2012, fue causado por un sismo localizado frente a las costas de Usulután. Causó daños en la infraestructura ubicada en la Isla de Méndez, península de San Juan del Gozo, lesionó a varias personas que estaban desarrollando actividades económicas en la costa en ese momento (Figura 79). Este sismo tuvo deficiencias considerables de energía de ondas primarias de alta frecuencia (corto período), y a pesar de su magnitud (Mw 7.3) solo fue levemente percibido en zonas cercanas al epicentro. Este tipo de eventos son conocidos como sismos lentos o sismos-tsunami.

Tal como se indica en la Tabla 17, los tsunamis generados por los eventos de Chile en 2010 y Japón en 2011 provocaron, según los registros del mareógrafo ubicado en el puerto de Acajutla, variaciones menores a los 50 centímetros en el nivel del mar. De igual manera, la más reciente alteración registrada por este instrumento, asociada a la erupción del volcán Hunga Tonga-Hunga Ha'apai en enero de 2022, mostró una variación inferior a los 30 centímetros.

Tabla 17. Tsunamis registrados en El Salvador

FECHA	DATOS SISMO		DATOS TSUNAMI			EFECTOS DEL TSUNAMI
	País	Magnitud	Registro del tsunami[2]	Distancia al origen (km)	Altura de registro (m)[3]	Muertos
25/08/1859	El Salvador	6.2	La Unión	-	Desconocido	-
09/12/1859	El Salvador	7.0	Acajutla	15	Desconocido	-
26/02/1902	El Salvador	7.0	Acajutla	37	Desconocido	-
			Barra de Santiago	59	Desconocido	100
			Barra de Santiago y Garita Palmera	-	Desconocido	85
31/01/1906	Ecuador	8.8	Los Negros	1,584	Desconocido	-
25/05/1906	El Salvador	-	Los Negros	-	Desconocido	-
07/09/1915	El Salvador	7.9	Barra de Santiago	115	Desconocido	-
05/10/1950	Costa Rica	7.7	La Libertad	545	0.09	-
			La Unión	401	0.1	-
23/10/1950	Guatemala	7.5	La Unión	456	0.1	-
04/11/1952	Rusia	9.0	La Libertad	10,149	0.58	-
09/03/1957	Estados Unidos	8.6	Acajutla	8,548	0.5	-
			La Unión	8,706	0.03	-
22/05/1960	Chile	9.5	La Unión	5,919	0.53	-
28/03/1964	Estados Unidos	9.2	Acajutla	6,991	0.2	-
			La Unión	7,116	0.1	-
19/09/1985	México	8.0	Acajutla	1,452	0.29	-
13/01/2001	El Salvador	7.7	Acajutla	139	0.25	-
26/12/2004	Indonesia	9.1	Acajutla	18,040	0.16	-
27/02/2010	Chile	8.8	Acajutla	5,806	0.25	-
11/03/2011	Japón	9.1	Acajutla	12,100	0.48	-
			La Unión	12,262	0.05	-
27/08/2012	El Salvador	7.3	Península San Juan del Gozo	120	6.3	-
			La Unión	157	0.1	-
			Acajutla	209	0.03	-
07/11/2012	Guatemala	7.3	Acajutla	227	0.1	-
14/10/2014	El Salvador	7.3	La Unión	96	0.02	-
16/09/2015	Chile	8.3	Acajutla	5,383	0.17	-
			La Unión	5,283	0.07	-
24/11/2016	Nicaragua	6.9	La Libertad	180	0.08	-
			Acajutla	211	0.03	-
08/09/2017	México	8.2	Acajutla	467	0.58	-
			La Libertad	523	0.38	-
			La Unión	682	0.06	-
15/01/2022	Tonga	Erupción volcánica	Acajutla	10,086	0.26	-

[2] No indica que solamente allí fue observado, sino que es allí donde se tiene el registro.
[3] La altura del registro es el nivel registrado, no necesariamente la altura de ola en la costa.

Fuente: (National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5PN93H7)



Figura 79. Efectos del tsunami ocurrido el 26 de agosto de 2012, Isla de Méndez.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

4.2.3 Amenaza por tsunamis

La primera medida de prevención ante los tsunamis es evaluar la peligrosidad, es decir, determinar las características de un posible tsunami, la altura de olas, las áreas de inundación y el tiempo de arribo de olas.

La elaboración de mapas temáticos de peligrosidad por tsunamis requiere de la caracterización y elaboración de información base (recolección de eventos históricos, caracterización de fuentes de generación, reconstrucción de topo-batimetrías), caracterización de escenarios de tsunamis, la aplicación de modelos numéricos para la generación, propagación e inundación en la costa y la generación de mapas temáticos.

El mapa de inundación por tsunami de El Salvador fue generado considerando los siguientes escenarios (incluye casos desfavorables pero probables):

- Escenario 1, Fuentes lejanas. Es la combinación de 5 “casos creíbles” de tsunami. El terremoto de 1960 en Chile (Mw9.5), el de 2010, también en Chile (Mw 8.8), el terremoto de Kamchatka en 1952 (Mw9.0), el de Alaska en 1964 (Mw 9.0) y el de Samoa en 2009 (Mw 8.1). Estos eventos han sido simulados en un nivel del mar de pleamar media viva equinoccial.
- Escenario 2, Fuentes regionales o intermedias. Se representa por dos eventos, el ocurrido en México en 1787 (Mw 8.7), y el ocurrido en Colombia en 1906 (Mw 8.8). Estos eventos también han sido simulados en un nivel del mar de pleamar media viva equinoccial.
- Escenario 3, Fuentes cercanas. Se representa por 16 eventos potenciales en la zona de subducción centroamericana: 12 eventos asociados a 12 fallas tipo normal y a 4 fallas tipo inverso. Estos eventos también han sido simulados en un nivel del mar de pleamar viva equinoccial.

El mapa nacional de peligrosidad por tsunami (Figura 80) muestra la zona de máxima inundación en tierra por un tsunami. La escala de colores representa la peligrosidad asociada a la profundidad de la lámina de agua. De esta manera se pueden identificar los puntos críticos considerados como de alta peligrosidad que son más importantes, entre ellos: la planicie costera occidental, el estero de Jaltepeque y la bahía de Jiquilisco.

En la zona de la planicie costera occidental se observan alturas de ola que alcanzan los 4 metros en la zona de la Barra de Santiago, e incluso elevaciones mayores en la zona al sur del puerto de Acajutla. Además, se observan alturas considerables en las zonas bajas, y a gran distancia de la costa, que se encuentran detrás del estero Garita Palmera. El arribo de un tsunami local puede tardar entre 30 y 90 minutos; la altura de las olas puede alcanzar hasta los 6 metros, las inundaciones pueden tener una profundidad de hasta 7 metros y las velocidades un nivel de arrastre de 5 m/s.

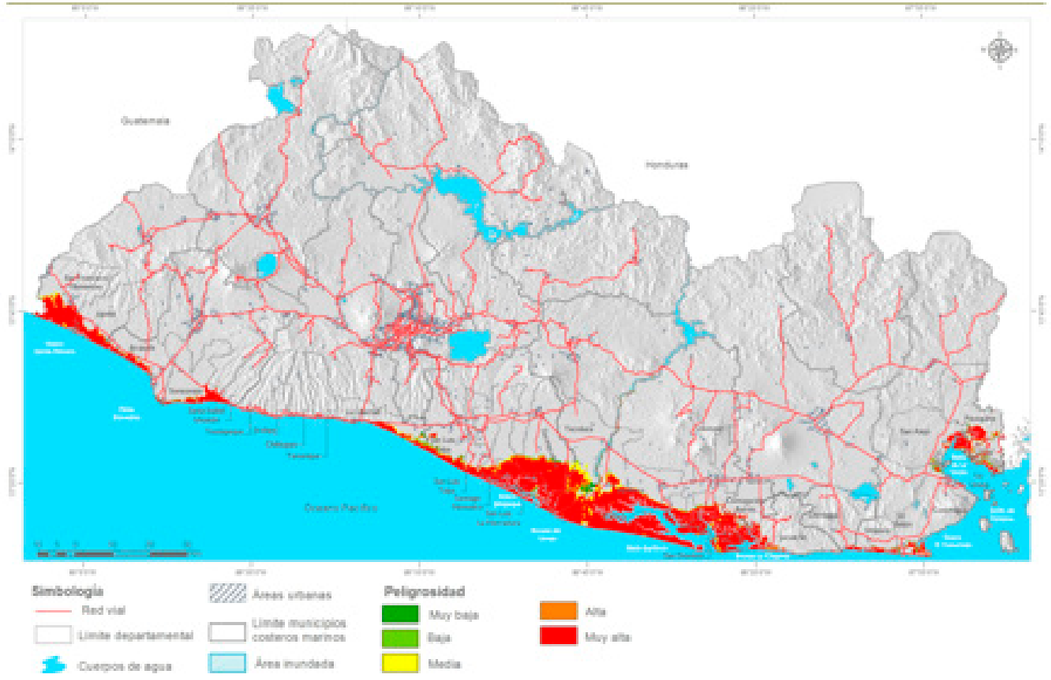


Figura 80. Mapa de peligrosidad por tsunami.
Fuente: Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) y Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) (2011). Evaluación del riesgo de tsunamis en la costa de El Salvador Fase I: Peligrosidad.

4.2.4 Mapas de evacuación ante tsunami

Estos tienen el propósito de indicar las rutas que los habitantes podrían tomar para salvaguardar su integridad física ante la llegada de un tsunami a nuestra costa. En el departamento de La Libertad, se realizaron mapas de evacuación para los distritos La Libertad (Figura 81 a Figura 88) y Tamanique (Figura 89 y Figura 90), en el marco del proyecto Tsunami Ready[4]. Esta iniciativa contó con la participación de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (UNESCO/COI), para la acreditación, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), Plan Internacional, la Dirección General de Protección Civil, el Ministerio de Medio Ambiente y las alcaldías de La Libertad y Tamanique.

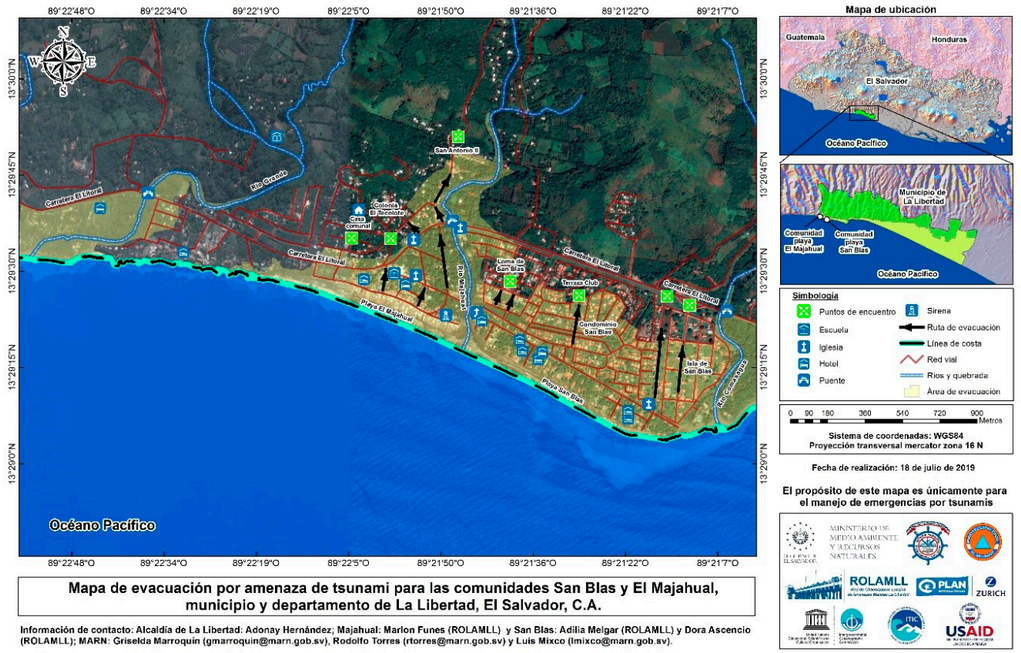
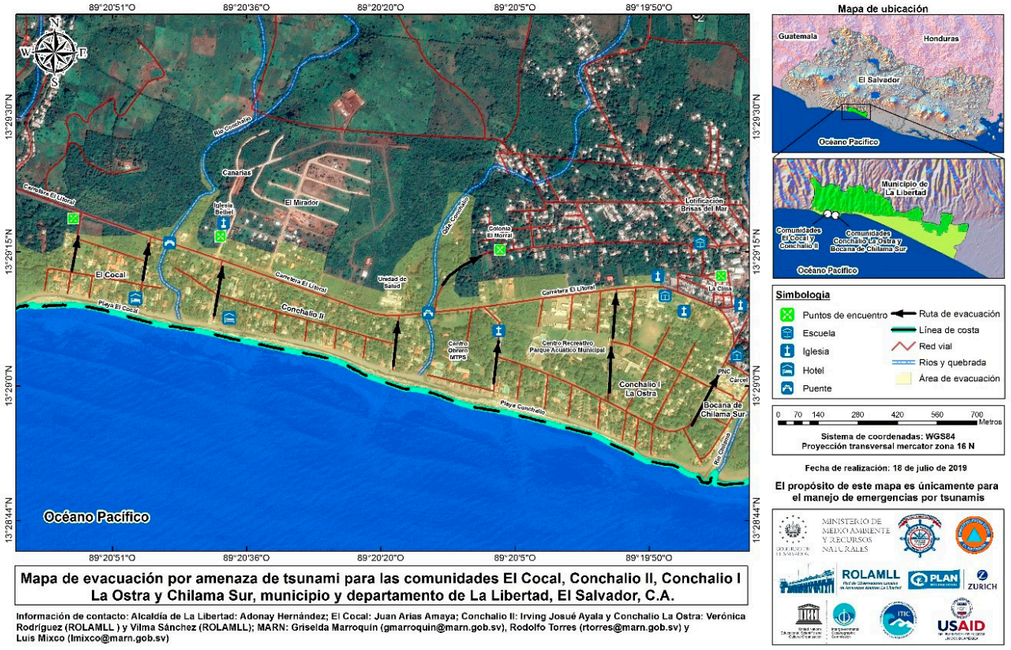


Figura 81. Mapa de evacuación para las comunidades de San Blas y El Majahual, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa , departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

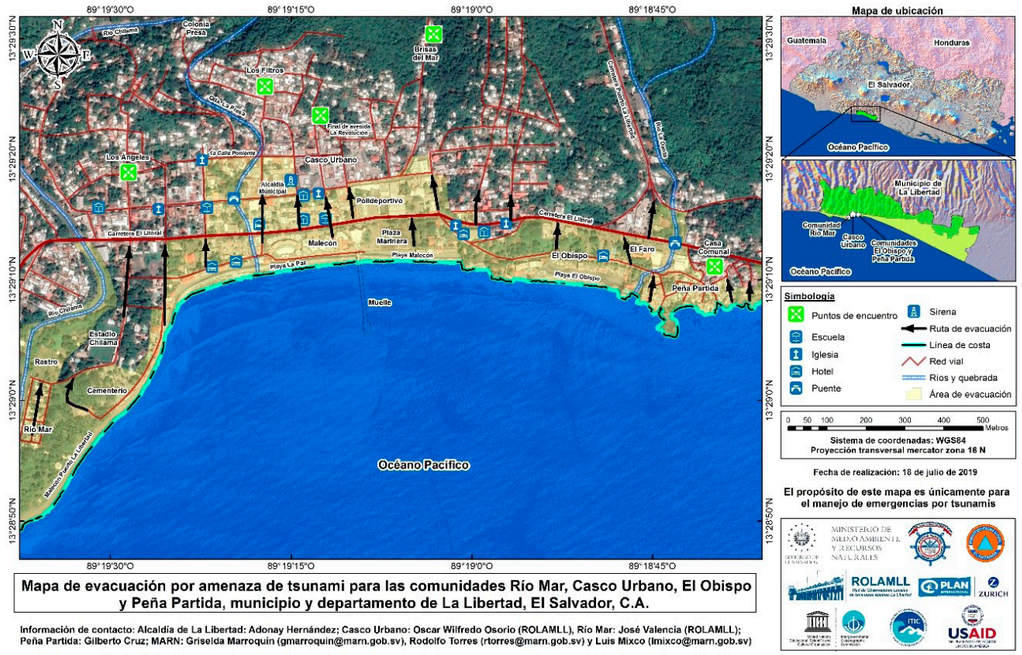
[4]Tsunami Ready - Es un programa voluntario de reconocimiento comunitario que promueve la preparación ante los peligros de un tsunami como una colaboración activa entre las agencias de manejo de emergencias estatales/territoriales y locales, los líderes comunitarios y el público.



Mapa de evacuación por amenaza de tsunami para las comunidades El Cocal, Conchalío II, Conchalío I La Ostra y Chilama Sur, municipio y departamento de La Libertad, El Salvador, C.A.

Información de contacto: Alcaldía de La Libertad: Adonay Hernández; El Cocal: Juan Arias Amaya; Conchalío II: Irving Josué Ayala y Conchalío La Ostra: Verónica Rodríguez (ROLAMLL) y Vilma Sánchez (ROLAMLL); MARN: Griselda Marroquín (gmarroquin@marn.gob.sv), Rodolfo Torres (rtorres@marn.gob.sv) y Luis Mixco (lmixco@marn.gob.sv)

Figura 82. Mapa de evacuación para las comunidades de El Cocal, Conchalío I, Conchalío II, La Ostra y Chilama Sur, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.



Mapa de evacuación por amenaza de tsunami para las comunidades Río Mar, Casco Urbano, El Obispo y Peña Partida, municipio y departamento de La Libertad, El Salvador, C.A.

Información de contacto: Alcaldía de La Libertad: Adonay Hernández; Casco Urbano: Oscar Wilfredo Osorio (ROLAMLL), Río Mar: José Valencia (ROLAMLL); Peña Partida: Gilberto Cruz; MARN: Griselda Marroquín (gmarroquin@marn.gob.sv), Rodolfo Torres (rtorres@marn.gob.sv) y Luis Mixco (lmixco@marn.gob.sv)

Figura 83. Mapa de evacuación para las comunidades de Río Mar, Casco Urbano, El Obispo y Peña Partida, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

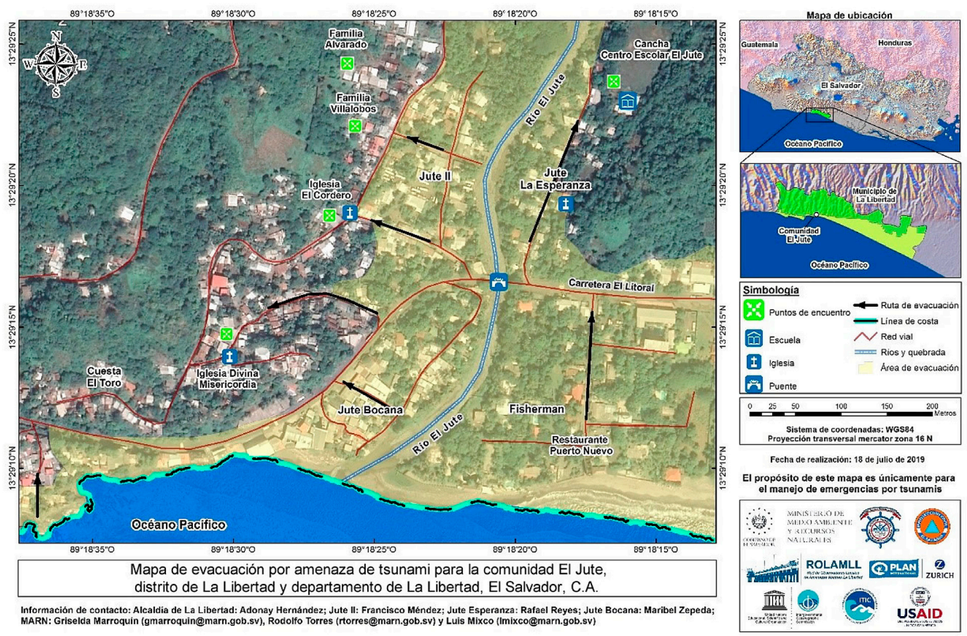


Figura 84. Mapa de evacuación para la comunidad El Jute, ubicadas en el distrito La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

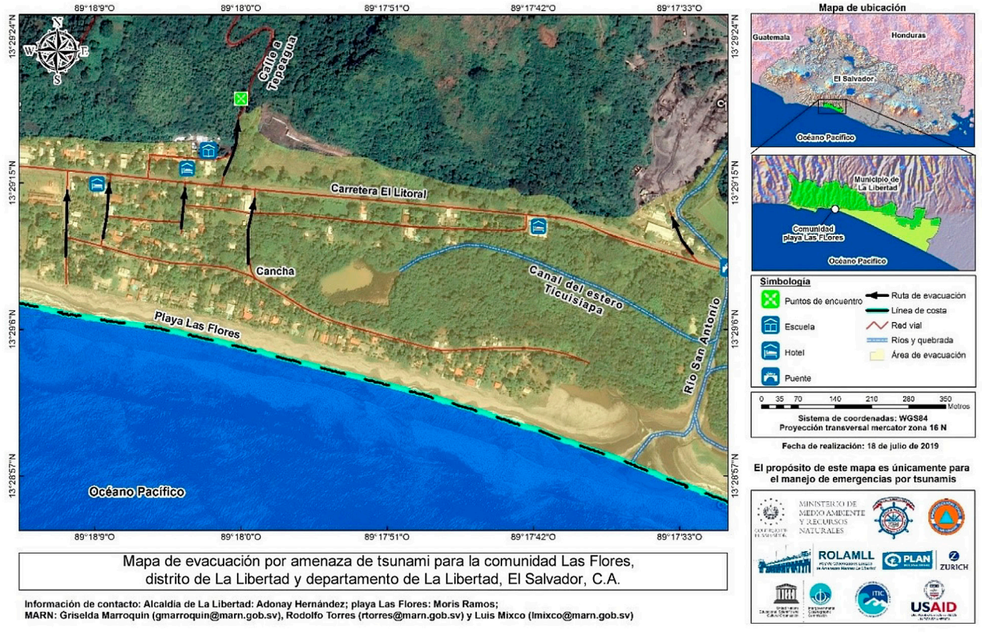


Figura 85. Mapa de evacuación para la comunidad Las Flores, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

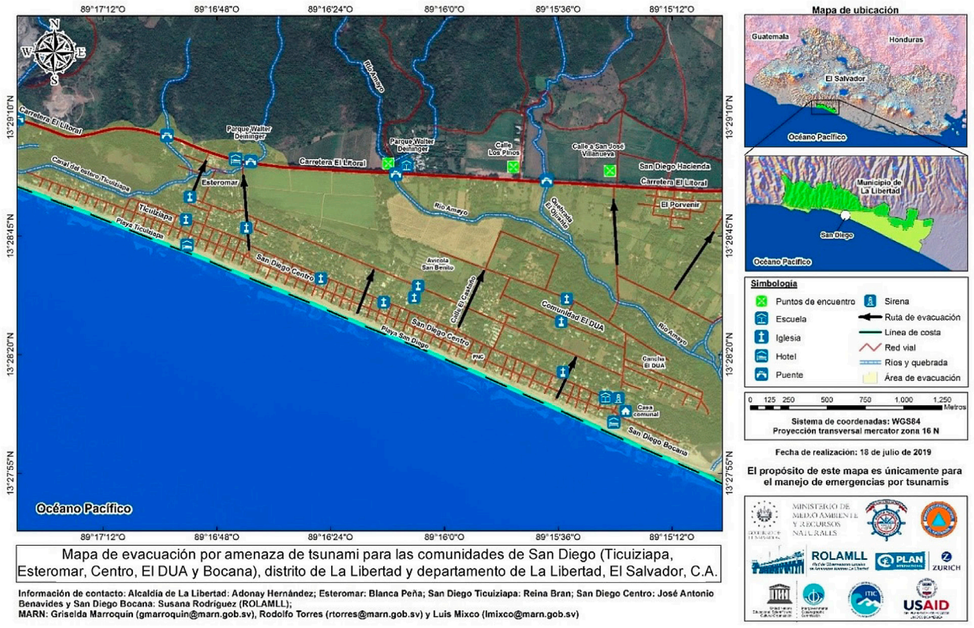


Figura 86. Mapa de evacuación para las comunidades de San Diego (Ticuiziapa, Esteromar, Centro, El DUA y Bocana), ubicadas en el distrito de La Libertad, del departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

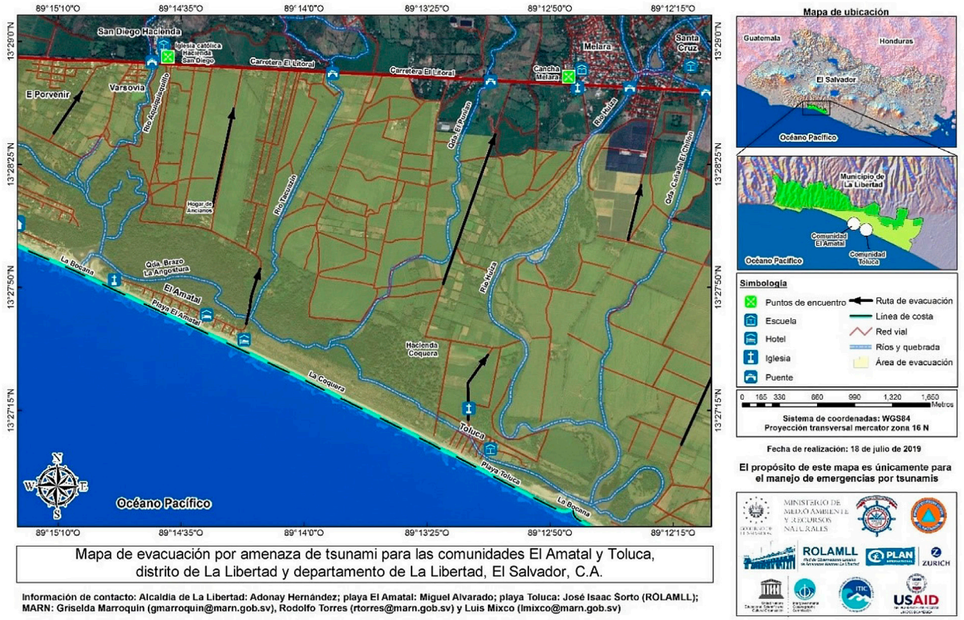
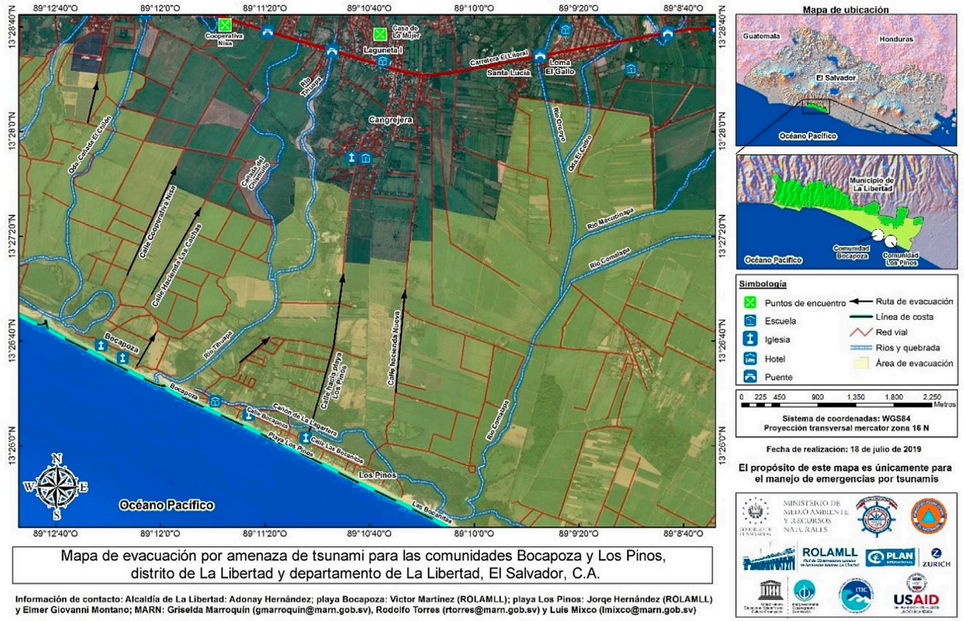


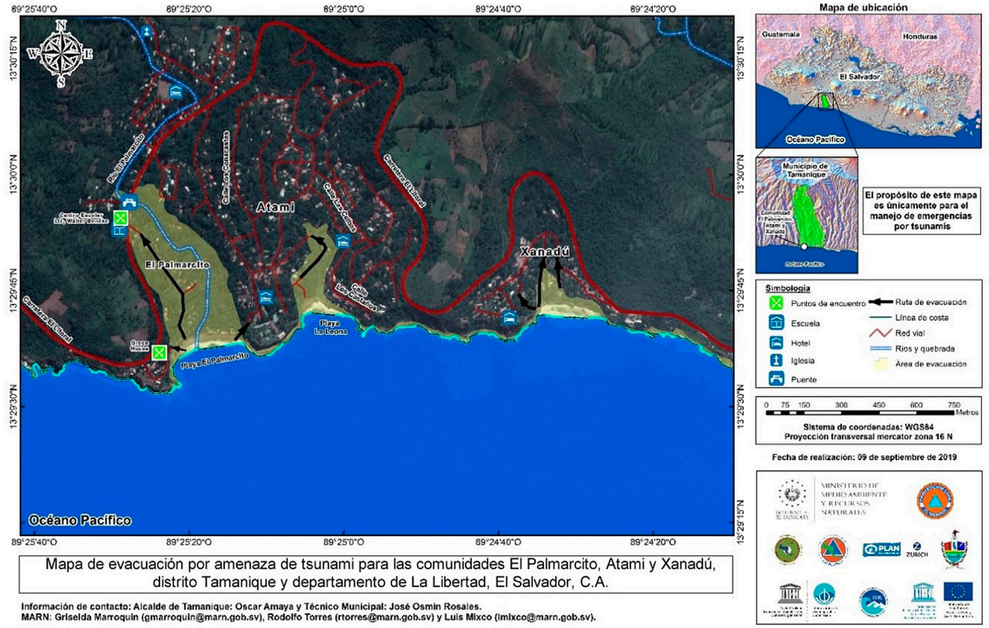
Figura 87. Mapa de evacuación para las comunidades de El Amatal y Toluca, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.



Mapa de evacuación por amenaza de tsunami para las comunidades Bocapoza y Los Pinos, distrito de La Libertad y departamento de La Libertad, El Salvador, C.A.

Información de contacto: Alcaldía de La Libertad: Adonay Hernández; playa Bocapoza: Víctor Martínez (ROLAMLL); playa Los Pinos: Jorge Hernández (ROLAMLL) y Elmer Giovanni Montano; MARN: Griselda Marroquín (gmarroquin@marn.gob.sv), Rodolfo Torres (rtorres@marn.gob.sv) y Luis Mixco (lmixco@marn.gob.sv)

Figura 88. Mapa de evacuación para las comunidades de Bocapoza y Los Pinos, ubicadas en el distrito de La Libertad, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.



Mapa de evacuación por amenaza de tsunami para las comunidades El Palmarcito, Atami y Xanadú, distrito Tamanique y departamento de La Libertad, El Salvador, C.A.

Información de contacto: Alcalde de Tamanique: Oscar Amaya y Técnico Municipal: José Osmin Rosales.
MARN: Griselda Marroquín (gmarroquin@marn.gob.sv), Rodolfo Torres (rtorres@marn.gob.sv) y Luis Mixco (lmixco@marn.gob.sv).

Figura 89. Mapa de evacuación para las comunidades de El Palmarcito, Atami y Xanadú en el distrito de Tamanique, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

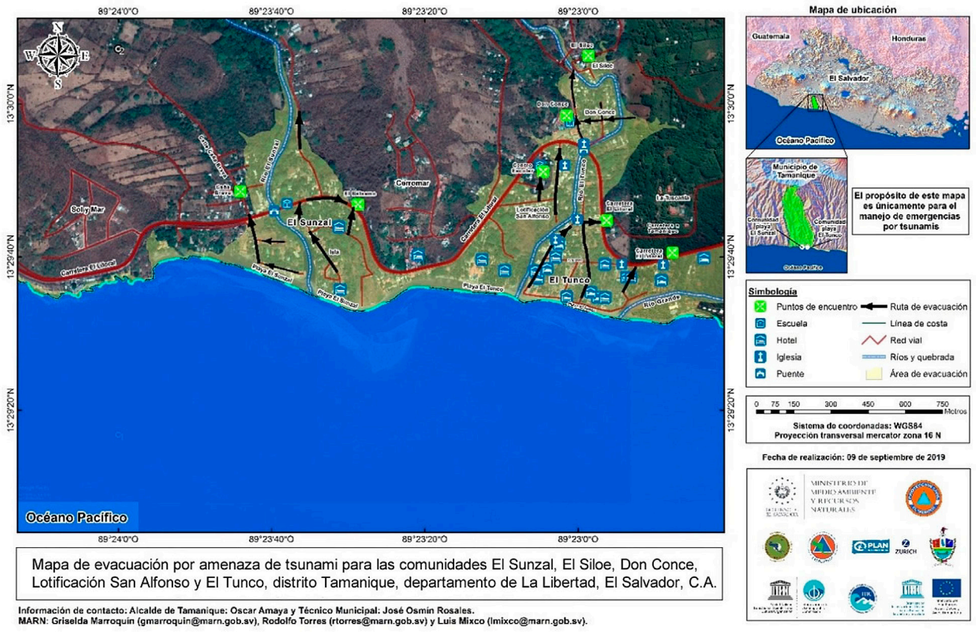


Figura 90. Mapa de evacuación para las comunidades de El Sunzal, El Siloe, Don Conce, Lotificación San Alfonso y El Tunco en el distrito de Tamanique, municipio de La Libertad Costa, departamento de La Libertad.
Fuente: MARN. Programa Tsunami Ready.

Adicionalmente, también se cuenta con mapas de evacuación para la zona costera occidental del país, para los distritos de San Francisco Menéndez, Jujutla y Acajutla; además de la Bahía de Jiquilisco en la zona oriental, que comprende los distritos de Jiquilisco, Puerto El Triunfo, Usulután , San Dionisio, Concepción Batres y Jucuarán, los cuales fueron realizados durante un proyecto coordinado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y el Ministerio de Medio Ambiente en el año 2012. Esta información puede ser consultada en el documento Evaluación del riesgo por tsunami en la costa de El Salvador Fase II: Vulnerabilidad y riesgo, el cual ha sido referido con anterioridad.

4.2.5 Amenazas por tsunami con metodología NTHMP para zonas con modelaciones globales

Para realizar los mapas globales el proyecto ejecutado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC) utilizó modelos globales de batimetría ya que no existía un levantamiento batimétrico para toda la costa de El Salvador. Sin embargo, fue posible incorporar batimetría de mayor detalle en áreas portuarias, donde esta información se actualiza regularmente por ser esencial para el funcionamiento operativo de los puertos. Actualmente, la institución responsable no tiene previsto, a corto plazo, realizar un levantamiento batimétrico completo de la línea costera, por lo que dicho insumo sigue siendo limitado.

Planteamientos metodológicos recientes del National Tsunami Hazard Mitigation Program (NTHMP) establecen, en base a la experiencia y observación de estos fenómenos, lineamientos que permiten delimitar las zonas de amenaza por tsunami en lugares en donde las modelaciones son globales y no se dispone de información que permita estimaciones de mayor detalle.

En este apartado se presentan los resultados y metodología para delimitar las zonas de inundación por tsunami en la costa salvadoreña utilizando la metodología del NTHMP en las zonas en que las evaluaciones han sido globales, proveyendo para toda la costa salvadoreña información de mayor detalle que permite establecer planes de evacuación y estimaciones de riesgo.

• Metodología del NTHMP

El NTHMP es el Programa Nacional de Mitigación de Peligros de Tsunami de los Estados Unidos (según sus siglas en inglés) y colabora en la preparación de mapas que sirven para diseñar evacuaciones y determinar los límites de las áreas con probabilidad de inundación en caso del impacto de un tsunami. En la elaboración de los mapas de detalle, para las diferentes zonas del país, se realizaron distintos pasos que permitieron adaptar la información existente para la determinación de las zonas de mayor amenaza dentro del territorio nacional.

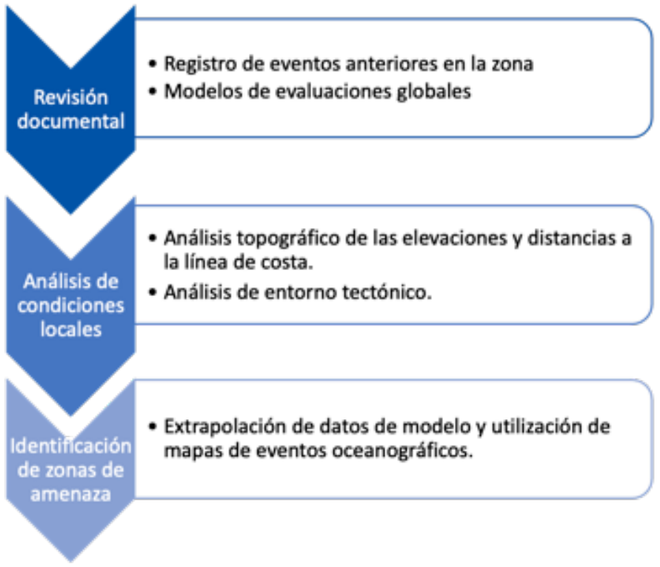


Figura 91. Identificación de zonas en que las evaluaciones han sido globales.
Fuente: Adaptado de NTHMP.

Revisión documental. La revisión documental se realizó registrando los eventos anteriores conocidos en todos los puntos de la zona costera del país y con el análisis del documento Evaluación del Riesgo de Tsunamis en la costa de El Salvador, elaborado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC). También fueron utilizados los mapas de impacto por oleaje que se tienen registrados entre los eventos oceanográficos de mayor importancia que se han dado en el país.

Análisis de las condiciones locales. El análisis topográfico se realizó basándose en un modelo de elevación de 1 metro de precisión o DEM (Digital Elevation Model) que fue levantado con tecnología Light Detection and Ranging (LIDAR) en el año 2014. Para la elaboración de mapas para las zonas no priorizadas se determinaron dos curvas con la base del DEM LIDAR y del Mapa de Sombras. Las curvas utilizadas fueron la curva cero y la curva 10 metros, las que se delinearon eliminando o integrando detalles importantes del terreno como ríos de mediano y gran caudal, lagunas costeras, acantilados, y otras formas del relieve. El entorno tectónico se tomó de los estudios realizados para la elaboración del catálogo de tsunamis realizado por el IHC.

Identificación de las zonas de amenaza. Se estimó la inundación incluyendo un factor de seguridad para la altura de inundación. Se combinó la distancia máxima de penetración de 3 kilómetros con alturas de 10 metros como cota superior. El área resultante se combinó finalmente con el área de inundación modelada por el IHC. Las áreas críticas corresponden a la envolvente que une todas las posibles zonas de inundación ante la amenaza por tsunami.

• Mapas de amenaza

La Figura 92 muestra el resultado del análisis y cruce de datos relevantes para la identificación de áreas críticas ante la amenaza de tsunamis. Para su generación, se destaca los siguientes aspectos:

- El estudio con el método del NTHMP, bajo un enfoque No modeling, permitió que a través de la utilización de una topografía de alta precisión obtenida con tecnología LIDAR, se generaran mapas de zonas de alta vulnerabilidad por la amenaza de tsunami.
- Este estudio permite que las comunidades en riesgo puedan definir mejor sus zonas de amenaza y desarrollar planes de contingencia y evacuación con elementos locales de identificación de la amenaza.
- En las zonas subestimadas por el modelo, las zonas de amenaza se marcan por la franja de intersección entre alcance máximo de inundación y el área de las curvas entre 0 y 10.
- En las zonas sobreestimadas por el modelo, las zonas de amenaza corresponden al área definida por el modelo.
- El área resultante de amenaza por tsunamis es la envolvente, área definida por el modelo combinado con la franja de máximo alcance de inundación.

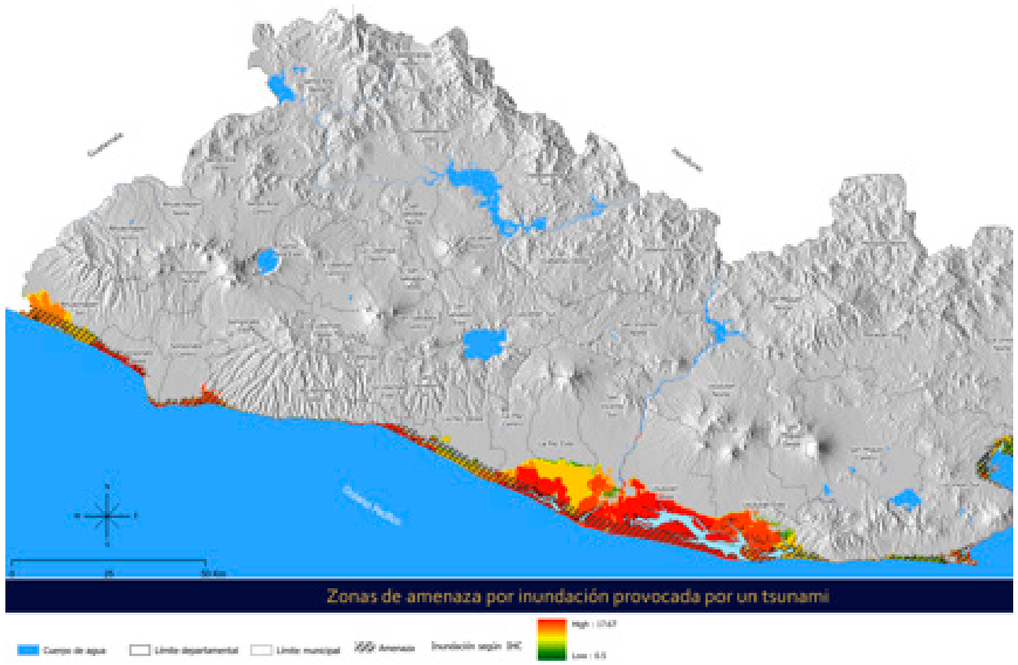


Figura 92. Mapa global de zonas de amenaza por inundación provocada por un tsunami.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

4.3 Amenaza volcánica

4.3.1 Vulcanismo

Vulcanismo es el conjunto de procesos asociados con la actividad de un volcán, comprendiendo que un volcán, desde el punto de vista físico, es todo ambiente geológico que a cualquier escala se caracteriza por tres elementos: magma, erupción y edificio, en el que al menos un elemento puede ser identificado en superficie y los demás inferidos. Es decir, una estructura geológica del tipo fisura, grieta o boca eruptiva, por donde a través de un conducto ha ascendido magma hacia la superficie proveniente de la astenosfera superior, generando una erupción volcánica (Figura 93). Por lo que vulcanismo comprende el estudio de la generación y ascensos magmáticos, estilo eruptivo, explosividad, sismicidad, etc.

La actividad volcánica es generada a partir de estos ascensos magmáticos que resultan de la interacción de las placas, en el caso de El Salvador por un proceso de subducción entre las placas de Cocos y Caribe. Estos procesos generan erupciones volcánicas y forman los edificios volcánicos, a partir del ascenso de magma a través de fallas y fracturas de la corteza continental hasta alcanzar la superficie terrestre (Figura 94).

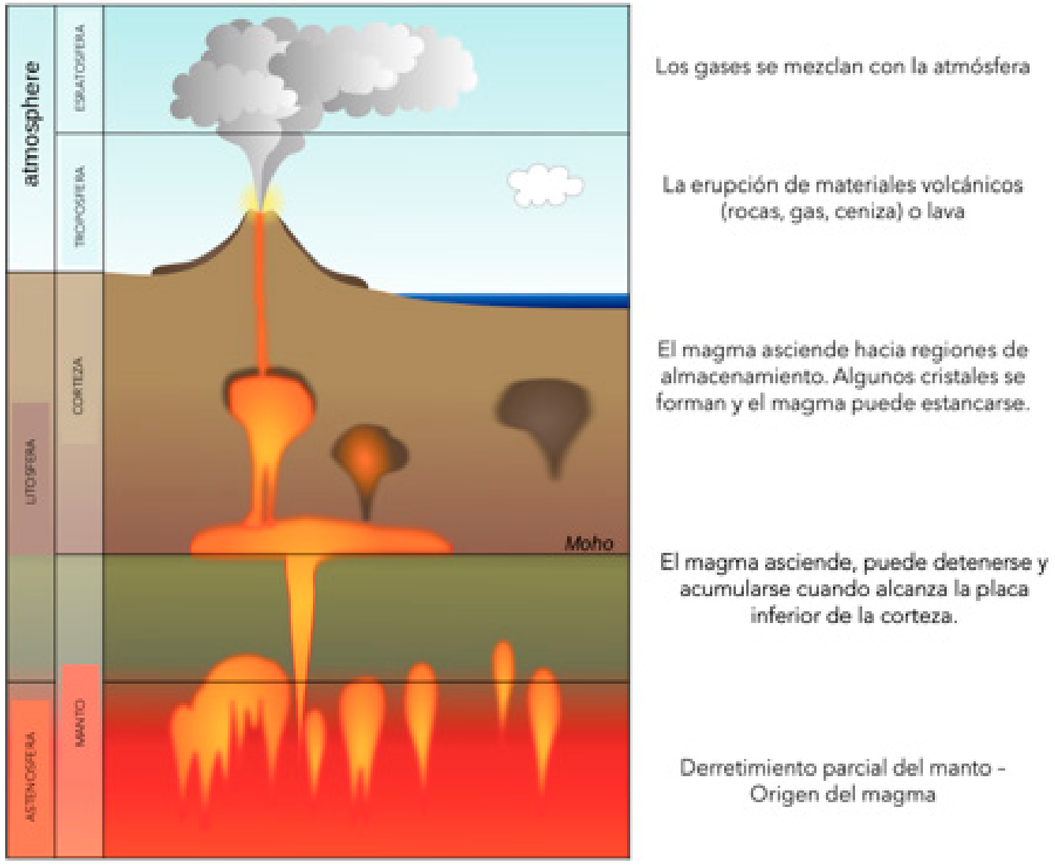


Figura 93. Ilustración del proceso básico de formación de magma, movimiento hacia la superficie y erupción a través de una chimenea volcánica
Fuente: Traducido de USGS (2017).

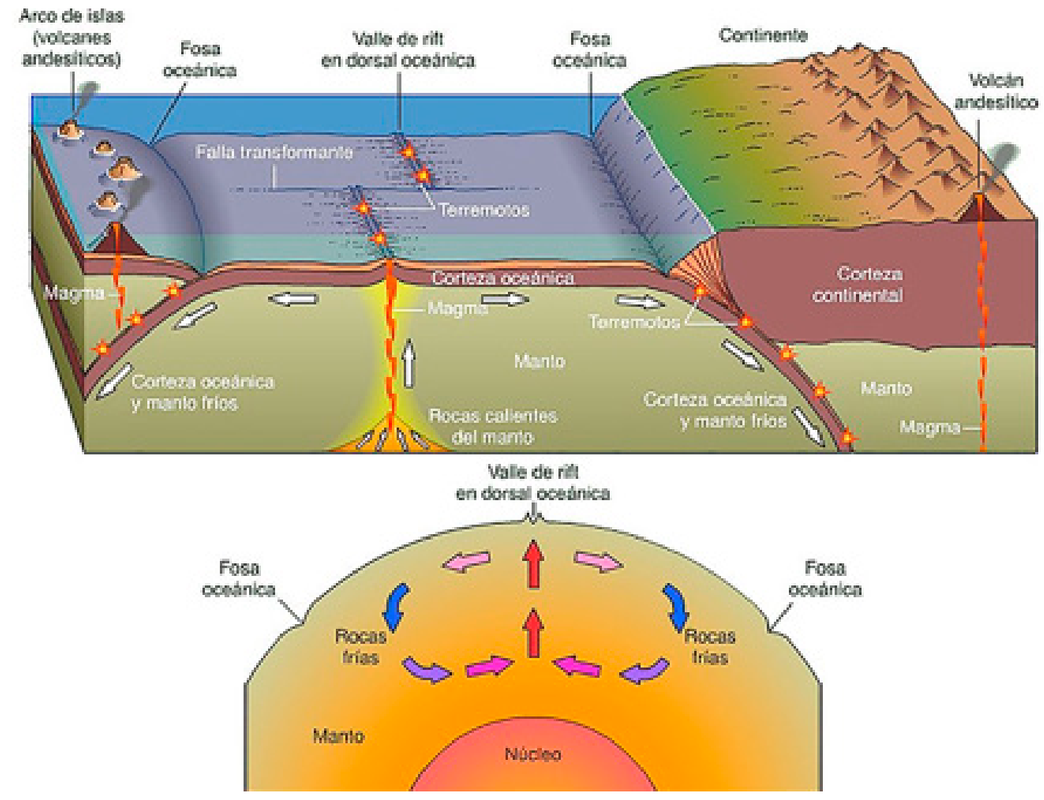


Figura 94. Esquema resumido del vulcanismo e interacción entre placas
Fuente: (Blogodisea, 2012)

Los volcanes pueden clasificarse de acuerdo con el nivel de actividad, es decir en extinto, dormido y activo, conceptos de los cuales sus definiciones aún son discutidas por expertos, pero las de mayor consenso son:

- Volcán activo es aquel que ha tenido erupciones recientes (al menos en los últimos 11, 700 años, holoceno) y que también presentan signos de microsismicidad, fumarolas, anomalías térmicas.

  Suelen denominarse como "latentes" si tienen signos claros de actividad, pero no están en erupción, y "activo en erupción" cuando presenta una clara expulsión de materiales volcánicos (cenizas, lava, etc.).

- Volcán dormido (durmiente), también llamados "inactivos", son aquellos que no han entrado en erupción durante mucho tiempo (decenas, cientos y miles de años). Pueden presentar ciertos rasgos de actividad como microsismicidad, fumarolas, anomalías térmicas. Es posible que en el futuro puedan presentar períodos de actividad eruptiva.

- Volcán extinto, son aquellos volcanes que estuvieron en actividad hace miles de años, pero que ya no presentan ningún signo de actividad y no se espera entren en erupción en el futuro.

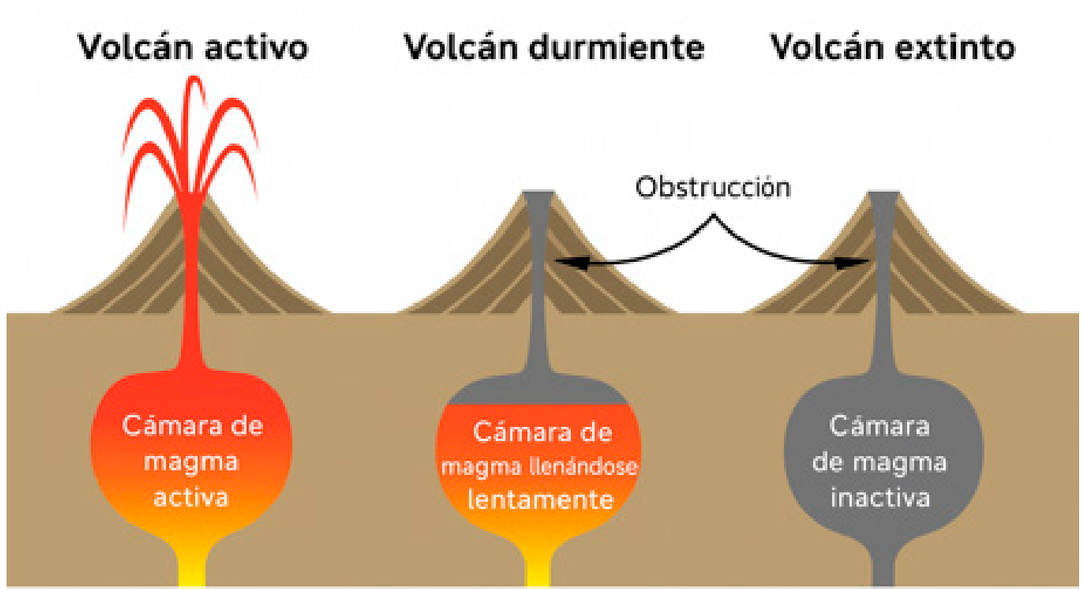


Figura 95. Tipos de volcanes de acuerdo con su actividad.
Fuente: Modificado de "Volcanic Stages: active, dormant, and extinct" (vector por Designua, Dreamstime (s.f)).

Los rasgos que caracterizan a un volcán en particular dependerán del tipo de volcán, composición y evolución del magma durante el tiempo de almacenamiento en la cámara magmática. Estas características permiten definir -de forma general- los posibles estilos eruptivos, así como las dinámicas de trayectoria y depósito de los materiales volcánicos, ya sea en la superficie o en el aire.

La composición del magma se caracteriza, principalmente, por la concentración de dióxido de silicio (SiO_2) que es el modulador del estilo eruptivo. Los magmas con concentraciones de SiO_2 menor al 52 % se denominan "básicos" y los que superan el 66 % se denominan "ácidos". De esta manera se clasifica a los volcanes en efusivos (magmas "básicos" que generan actividad predominantemente con flujos de lava) o explosivos (magmas "ácidos" que generan explosiones de columnas de cenizas y balísticos).

Se utiliza el diagrama Total Alkalis vs Silica (TAS) para clasificar las rocas volcánicas por su composición química en rocas en ultrabásicas, básicas, intermedias, y ácidas, en función de la abundancia de SiO_2 en porcentajes en peso.

Clasificación de rocas volcánicas en función de su composición química (diagrama TAS). Basada en Le Bas *et al.* (1986).

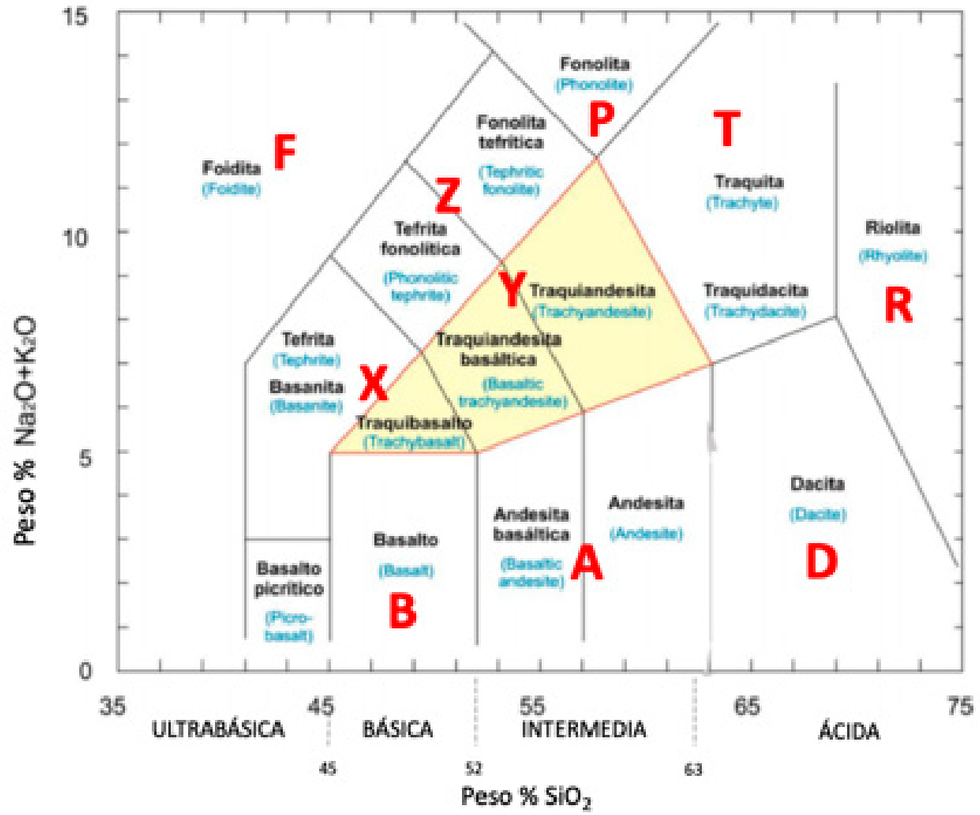


Figura 96. Diagrama de clasificación TAS (Total Alkalis vs. Silica, por sus siglas en inglés)
Fuente: Le Bas et al., 1986. Adaptado con referencia para caracterización de magmas en volcanes activos El Salvador.

Las erupciones efusivas y explosivas se pueden definir como (ver Figura 97):

- Las erupciones efusivas son erupciones poco explosivas, donde el magma se encuentra en estado muy fluido y con pocos gases, por lo que sale al exterior en forma de lava (roca fundida), esparciéndose relativamente lento y alcanzando varios kilómetros de longitud. Por su bajo contenido de gases son menos violentas. Los flujos de lava generados varían en forma, grosor, longitud y ancho, dependiendo del tipo de lava, composición y densidad. Su peligro radica en las zonas donde se encauzan los flujos debido a sus altas temperaturas y volúmenes.

- Las erupciones explosivas se caracterizan por la liberación violenta de gas y cenizas, producto de magma altamente viscoso que retiene una gran cantidad de gases, aumentando la presión interna y dando lugar a fuertes explosiones. Pueden expulsar rocas, polvo, gases y material piroclástico hasta 20 kilómetros en la atmósfera con volúmenes que suelen llegar a las 100.000 toneladas por segundo, viajando a varios cientos de metros por segundo. Por lo que suelen ser altamente peligrosas y destructivas.

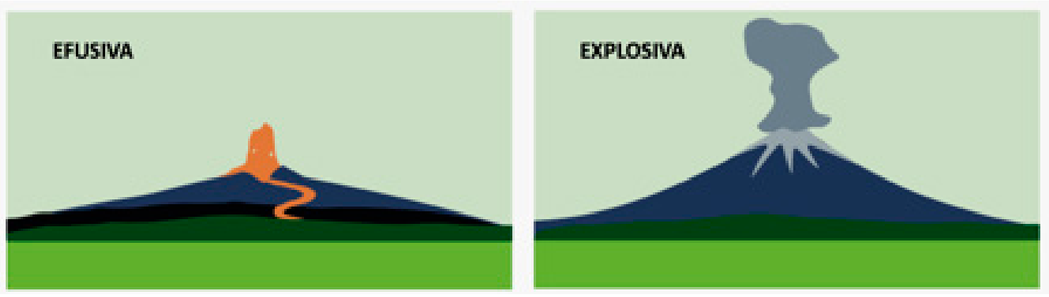


Figura 97. Erupciones explosivas y erupciones efusivas.
Si bien un volcán puede erupcionar comportándose de una sola manera, también hay otros que en una sola erupción se combinan estos estilos, incluso algunos volcanes tienen períodos eruptivos-efusivos y períodos únicamente explosivos.
Fuente: Universidad de Cambrige, Departamento de Ciencias de la Tierra (s.f.).

La explosividad de un volcán depende de la concentración de SiO_2 en el magma. A mayor concentración de SiO_2, más explosiva es la erupción. Su magnitud se mide con el Índice de Explosividad Volcánica (IEV) que representa, de manera general, el carácter explosivo de una erupción volcánica, para dar estimación de su magnitud de acuerdo con la cantidad de material volcánico expulsado, la altitud que alcanza la columna eruptiva y su duración. Comprende valores de 0 a 8, siendo 0 una erupción débil como las efusivas y 8 una erupción explosiva ultra pliniana, cuyo impacto es planetario. Su escala no es lineal y el aumento en una unidad indica una erupción 10 veces más potente que la de su nivel inferior más próximo (Ver Figura 98).

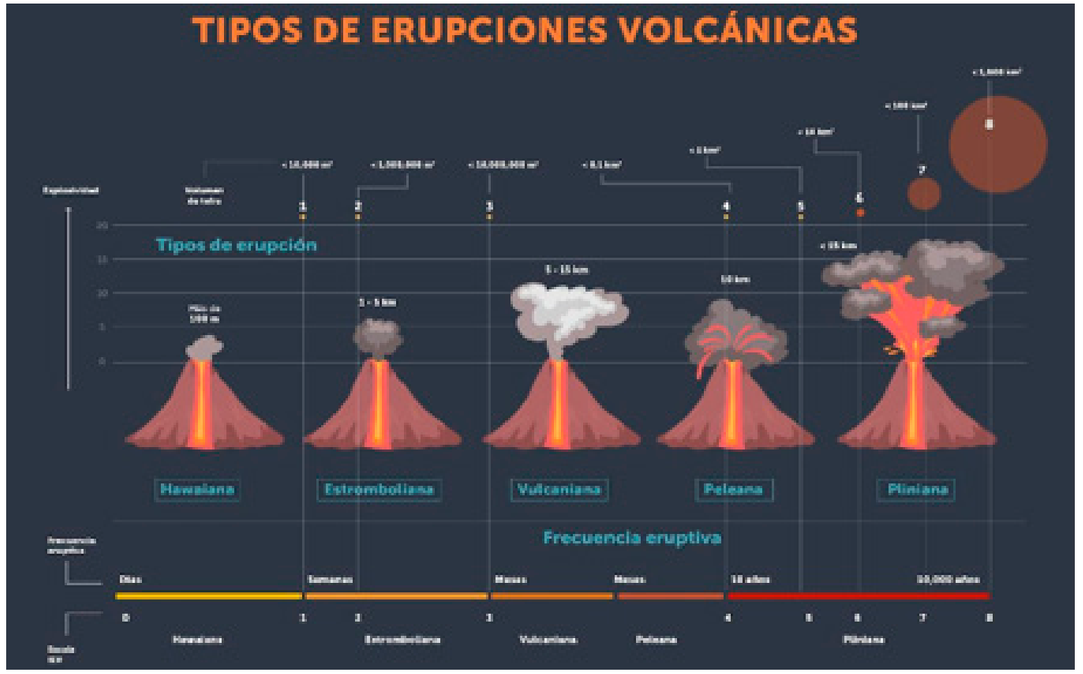


Figura 97. Erupciones explosivas y erupciones efusivas.
Si bien un volcán puede erupcionar comportándose de una sola manera, también hay otros que en una sola erupción se combinan estos estilos, incluso algunos volcanes tienen períodos eruptivos-efusivos y períodos únicamente explosivos.
Fuente: Universidad de Cambrige, Departamento de Ciencias de la Tierra (s.f.).

4.3.2 Caracterización de los volcanes activos salvadoreños

La cadena volcánica de El Salvador forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las regiones tectónicamente más activas del planeta, donde se localizan la mayoría de las zonas de subducción del mundo y se concentra una intensa actividad sísmica y volcánica. En el caso particular de El Salvador, esta cadena se desarrolla como resultado de la interacción entre la Placa de Cocos y la Placa del Caribe.

A pesar de que la interacción de los procesos físicos y químicos que ocurren en la subducción es compleja, existen características comunes asociadas al magmatismo de estas zonas, tales como la presencia de líneas de volcanes y la correlación negativa entre el ancho del arco volcánico y el ángulo de la subducción (Figura 99). La profundidad a la superficie de la litosfera que subduce es constante a ~110 km (profundidad correspondiente a la presión esperada para la deshidratación de anfíboles y cloritas) y ~170 km (profundidad correspondiente a la presión esperada para la deshidratación de las flogopitas), respectivamente, por debajo del arco volcánico. Como en muchos arcos volcánicos que resultan de procesos de subducción, en El Salvador se tienen dos regiones de magmatismo, el frente volcánico y el backarc. Estos volcanes que se encuentran referidos al backarc (Tatsumi, 2005; Patino, 2000), muy posiblemente estén asociados a un proceso de migración magmática más que al vulcanismo moderno. El vulcanismo en El Salvador ha sido un fenómeno geológico que ha hecho que, prácticamente, más de un 90 % del territorio esté formado por rocas y suelos de origen volcánico.

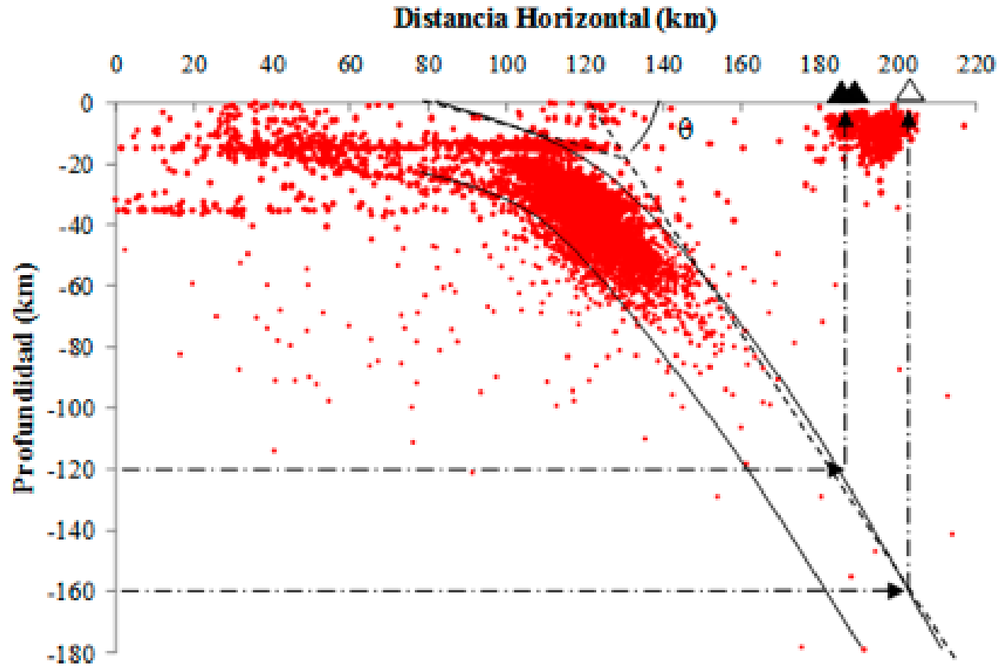


Figura 99. Sismicidad 1992-2012 según profundidad hipocentral.
Triángulos llenos representan volcanes del frente volcánico, triángulos abiertos representan volcanes del backarc.
Fuente: (Tatsumi, 2005; Patino, 2000).

La zona central de El Salvador es escenario de una cadena volcánica joven en donde fácilmente pueden identificarse más de 242 volcanes extintos, dormidos y activos, así como de diferente forma y tipo. Los volcanes más jóvenes son aquellos con edades menores a 2.58 millones de años, y que en El Salvador se encuentran a lo largo de una franja central, y es allí donde se localizan los volcanes más activos del territorio. Para definir su nivel de actividad se considera un volcán, activo aquel que "ha tenido erupciones recientes (al menos en los últimos 11,700 años - holoceno) y que también presentan signos como microsismicidad, fumarolas, anomalías térmicas, y que puede o no estar en proceso eruptivo (expulsando materiales volcánicos)" (Figura 100).

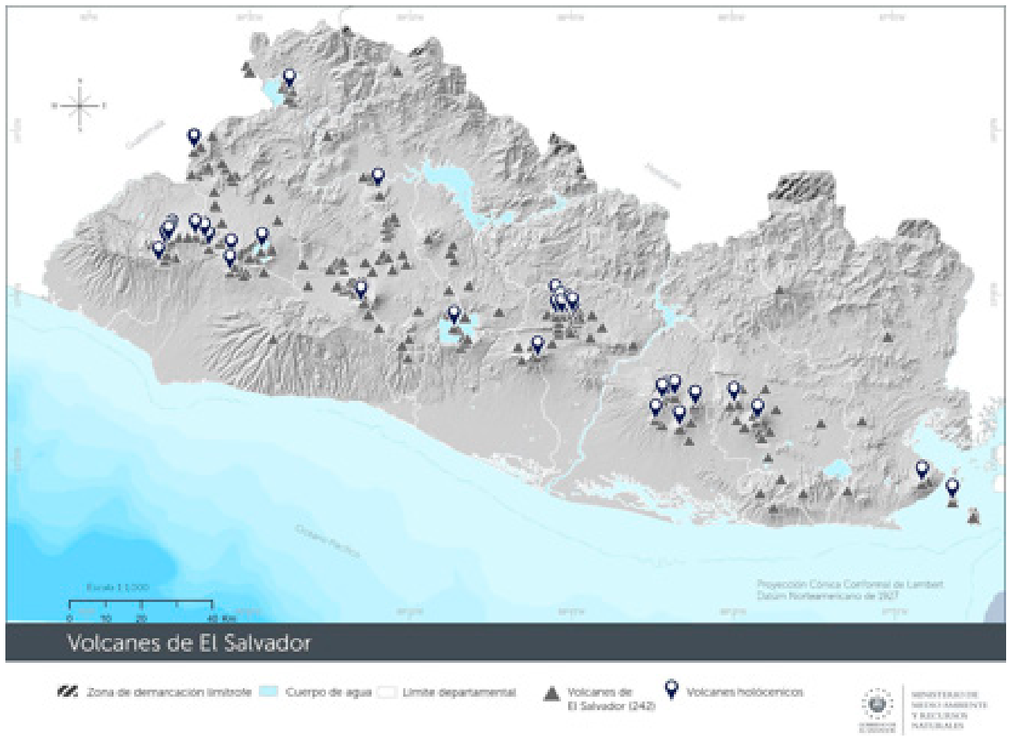


Figura 100. Volcanes identificados en el territorio, se distinguen de los 242 aquellos determinados como "Holocénicos".
Fuente: Datos tomados de (Bosse et al., 1978; Siebert et al., 2010; Bohnenberger, 1973; Volcanism Program-GVP (s. f)). Elaboración propia.

Con respecto a los volcanes activos (ver Figura 101), en El Salvador:

- Se han identificado 242 centros eruptivos (tomando en cuenta tanto volcanes extintos, dormidos y activos). Por investigaciones históricas se conoce que puede haber hasta más de 700 centros eruptivos.
- De estos centros eruptivos identificados 36 son considerados activos, ya que cuentan con algunas manifestaciones como microsismicidad, fumarolas, anomalías térmicas o incluso algunas erupciones recientes.
- 10 de esos 36 centros eruptivos son vigilados constantemente, debido a que su actividad es más visible y constante, y por sus procesos eruptivos recientes como San Miguel en el 2022, Santa Ana en 2005; así como, el ausol Agua Shuca en Ahuachapán, volcán de Izalco, Complejo Volcánico de San Salvador-Boquerón, caldera de Ilopango; volcán de San Vicente, volcán Tecapa en Usulután, volcán el Ollón en Usulután y el volcán isla Conchagüita, los cuales presentan alguna de las siguientes características: se encuentran en zonas con antecedentes de enjambres sísmicos; en sus alrededores ocurren sismos o poseen un cráter y un cono bien conservado, con sismicidad, fumarolas y fuentes termales, aunque no exista registro de erupciones históricas.



Figura 101. Volcanes activos de El Salvador.
Fuente: Datos tomados de (Bosse et al., 1978; Siebert et al., 2010; Bohnenberger, 1973; Volcanism Program-GVP (s. f)). Elaboración propia.

En El Salvador, se estima que más de 1.3 millones de habitantes residen a menos de 10 km de un volcán históricamente activo, el valor máximo de la región.

La implicación de la caracterización magmática varía en los volcanes salvadoreños, teniendo volcanes con características "básicas" que han presentado erupciones poco violentas con producción de flujos de lava como el volcán Izalco y el volcán de San Miguel, así como estructuras de características "ácidas" como la caldera de Ilopango, caldera de Coatepeque y volcán de San Vicente que han producido erupciones colosales de gran poder explosivo. Cabe mencionar que otras estructuras volcánicas como el volcán de Santa Ana y volcán de San Salvador han presentado ambos estilos eruptivos debido a la evolución del magma que ocurre durante su almacenamiento en la cámara magmática que tiende a acidificarse conforme el tiempo de reactivación sea más prolongado. En la Tabla 18, se muestra el resumen de la caracterización de los volcanes activos, código del tipo de roca predominante (Figura 96) y población de acuerdo a la cercanía en kilómetros del cráter central.

Tabla 18. Población expuesta a los principales volcanes activos

VOLCÁN	LATITUD N	LONGITUD W	ELEVACÓN (m.s.n.m.)	POBLACIÓN				TIPO DE ROCA	TIPO DE VOLCÁN	ESTADO
				5 km	10 km	30 km	100 km			
San Miguel	13.434 N	88.269W	2130	4	5	6	7	AB	Estratovolcán	Histórico
Santa Ana	13.853	89.63	2381	3	5	7	7	AYBdr	Estratovolcán	Histórico
San Salvador	13.734N	89.294W	1893	5	6	7	7	ABD	Estratovolcán	Histórico
Izalco	13.813	89.633	1950	3	5	7	7	Ab	Estratovolcán	Histórico
Ilopango	13.672N	89.053 W	450	7	7	7	7	DABr	Caldera	Histórico
San Vicente	13.595 N	88.837W	2182	4	6	6	7	ADBr	Estratovolcán	Holoceno

Nota: El código de población corresponde a 0 = 0 personas, 1 = menor que 10, 2 = mayor que 10; 3 = mayor que 100, 4 = mayor que 1,000, 5 = mayor que 10,000; 6 = mayor que 100,000, 7 = mayor que 1,000,000 y 8 = mayor que 10,000,000.
Fuente: Elaboración propia con datos de DOA-MARN.

4.3.3 Erupciones históricas

Una erupción histórica es aquella ocurrida en los últimos 500 años. El historial eruptivo de los volcanes salvadoreños data del siglo XVI (1501-1600 d. C.), ya que es en la época de la conquista cuando se comienza a tener registros escritos de algunas erupciones, quedando muchas sin datación.

Como ejemplo, se tienen 54 registros eruptivos del volcán de Izalco, el cual surgió a finales de 1770 y finalizó su ciclo eruptivo en 1966, convirtiéndose en el volcán salvadoreño con mayor cantidad de datos en su historial eruptivo. En el caso del volcán de San Salvador se tienen únicamente 7 eventos eruptivos datados y para el volcán San Vicente no se tiene el registro de erupción. En la Tabla 19 se muestra el resumen del historial eruptivo, tipo de erupción y características del registro eruptivo de los cuatro volcanes activos de El Salvador.

Tabla 19. Resumen del historial eruptivo, tipo de erupción y características del registro eruptivo de cuatro volcanes activos de El Salvador

FUENTE ERUPTIVA: CRATER CENTRAL (SE ESPECIFICA OTRA FUENTE ERUPTIVA DISTINTA AL CRÁTER CENTRAL)		HISTORIAL ERUPTIVO																																	
		INICIO		FINALIZA		CARACTERISTICAS ERUPTIVAS																												INDICE DE EXLOSIVIDAD VOLCANICA (IEV)	VOLUMEN DE PRODUCTOS TEFRA (T) LAVA (L) Vol L/T
		AÑO	MES-DIA	AÑO	MES-DIA	Central	Flanco	Fisura radial	Regional	Submarina	Nueva Isla	Subglacial	Lago cratérico		Explosivo	Flujo Piroclástico	Freática	Caldérica		Flujo de lava	Lago de lava	Domo	Espina		Fatal	Daño	Flujo de lodo	Tsunami							
Volcán San Miguel																																			
Erupción 70-80 años antes de 1586		1510e				X									X?					?															
SE flank (400 rin)		1699					X	X							X					X														2	
NE flank (400 m)		1762						X							?					X														2	
Flanco Este ?		1769						?							?					X														2	
Cráter central, Flancos Norte y Sureste		1787	921	1787	923	X	X	X							X					X						X								2	
	?	1798?													?																				2	
	?	1811													?																				2	
Flanco Sur-Sureste (400 msnm, cerca de Los Perolitos)		1819	718					X							X					X						X								2	
Flanco Nor-Noroeste(120 msnm) y parte alta del flanco Este		1844	725	1848			X	X							X					X														2	
	?	1854													?																				2?	
Flanco Sur-Sureste (800 m)		1855	12				X	X							X					X														2	
		1857	11												X					X														2?	
		1862	1												X																				2	
Flanco Oeste-Suroeste (1000 msnm)		1867	1214	1868	0216>		X	X							X					X						X								2	
		1882	1205d												X																				2	
Noreste del cráter central		1884	125	1884	0128a	X									X					X															2	
		1890		1891		X									X																				2	
		1919	1210	1920											X																				2	
		1920	814	1925											X																				2	
		1929	8			X									X																				2	
		1930	0126e			X									X																				2	
		1931	3	1931	6	X									X					?															2	
	?	1936?													?																				2	
		1939	5	1939	7										X																				2	
		1954	1021	1954	1021												X																		2	
		1964	1023	1964	11	X									X												X								2	
		1966	222												X																				2	
		1966	7												X																				2	
		1967	105			X									X												?								2	
		1970	330	1970	405	X									X												X								1	-/4
		1976	1203	1977	301	X									X					X							X								1	6/-
		1985	11	1986	02>	X									X		X																		1	
		1995	112	1995	419	X									X		?										X								1	
		1997	1231			X									X		X																		1	
		2002	116	2002	116	X									X																				1	
		2013	1229	2013	1229	X									X	X											X								3	
		2022	1115	2022	1202	X									X		?																		1	
Volcán Santa Ana																																			
	?	1520													?																					
		1521	1231y												X												X								3	
		1524	0430p												X																				3	
		1570?													X																					
		1576													X																				3	
	?	1621																																	
Volcán San Marcelino (dudoso)	X	1650´t						?												?						?									
Flanco Sureste (Volcán San Marcelino)		1722	0321				X	X							X					X						X								2	
		1734	06 <																	X						X								2?	
		1874																		X						X								3	
	?	1878																		?															2	
		1879	0201p																	X															2	
Flanco Noroeste (volcán Mala Cara)		1880	3				X								X											X								3	
	?	1882																																	
		1884	309	1884	310										X																				2	
		1904	112	1904	0126?	X									X																				2	
	?	1920	11												?																				2?	
		2005	616	2005	1001?	X								X	X	X	X									X	X	X							3*	

FUENTE ERUPTIVA: CRATER CENTRAL (SE ESPECIFICA OTRA FUENTE ERUPTIVA DISTINTA AL CRÁTER CENTRAL)		HISTORIAL ERUPTIVO																													
		INICIO		FINALIZA		CARACTERISTICAS ERUPTIVAS																								INDICE DE EXLOSIVIDAD VOLCANICA (IEV)	VOLUMEN DE PRODUCTOS TEFRA (T) LAVA (L) Vol L/T
		AÑO	MES-DIA	AÑO	MES-DIA	Central	Flanco	Fisura radial	Regional		Submarina	Nueva Isla	Subglacial	Lago cratérico		Explosivo	Flujo Piroclástico	Freática	Caldérica		Flujo de lava	Lago de lava	Domo	Espina		Fatal	Daño	Flujo de lodo	Tsunami		
Volcán Izalco																															
	X	1636																													
(Actividad fumarolica 1770)		1770	223													X					X									2	
		1772?														X														2	
		1783	07 ?					?													X									0	
		1793	329	1793	9											X					X									2	
		1798	4			X										X					?									2	
		1802		2E+08												X					X									2	
		1805														X														2	
		1817														X														2	
		1825														X					X									2	
		1836														X														2	
		1838		1840		X										X					X									2	
		1842														X					X									2	
		1844	6	1844	10											X														2	
		1850				X										X														2	
		1854	513	1854	908											X					X									2	
Crárte y flanco sur		1856	524	1856	0901a	X		X								X					X						X			2	
		1857	215	1857	0219>	X										X					X									2	
		1858	206	1859	7											X					?									0	
		1859	208	1860	122																X									0	
		1863																			X									2	
Cráter y flanco NE		1864	0515b	1865	0615e	X	X									X					X									2	
		1866	427	1866	0815e											X														2	
		1867	4	1867	8											X														2	
		1868	216	1868	217											?														2	
Cráter y flanco Este		1869	0301?	1869	0618>	X	X	X								X	X				X						X			2?	
(posiblemente confundido con mayo 19,1869)	?	1870	519																		?									2	
		1872	12	1873	0319>											X															
	?	1874		?1875																											
		1878																													
		1879	1225	1880	3											X														2	
		1881	101																		X									0	
		1882	712													X														2	
		1883	0905d	1883	1113		X									X														2	
		1884	309	1884	310		X									X					X									2	
		1885					X									X					X									2	
		1887		1889												X														2	
Cráter y flanco superior Este		1890	0326e	1890	420	X	X	X								X					X									0	
		1891		1898	7											X					X									2	
		1899	1231	1900	3											X														2	
Cráter y flanco NE		1902	510	1902	1230	X	X	X								X					X									2	
Cráter y flanco Este		1903	11	1905	3	X	X									X														2	
Cráter y flanco NE		1912	116	1916	126	X	X	X								X					X									2	
Flanco SE		1920	1029	1921	410		X									X					X									2	
		1924	3													X														2	
		1925	1226	1927	1											X					X					X	X			3?	
		1927		1928?												X														2	
Outer slope of eastern summit crater		1930	4		...			x								x?					x									0	
		1931	0331 t		...											x														2	
		1933	1130	1934	112>											x					x									2	
		1937?	....	1938	...											x					x									2?	
Summit and SSE flank		1939	2	1948	2	x	x									x					x									2	
Summit, SW and NE flanks		1948	1104	1957	1201p	x	x									x	x				x									3*	
SSE flank (550 m below summit)		1966	1028	1966	11		x														x									0	5/-
Caldera de Ilopango																															
	G	0450R	...	...	...	X										X	X		X							X	X			6+	-/10
Islas Quemadas		1879	1231	1880	0326e	X								X		X							X				X			3*	8/-

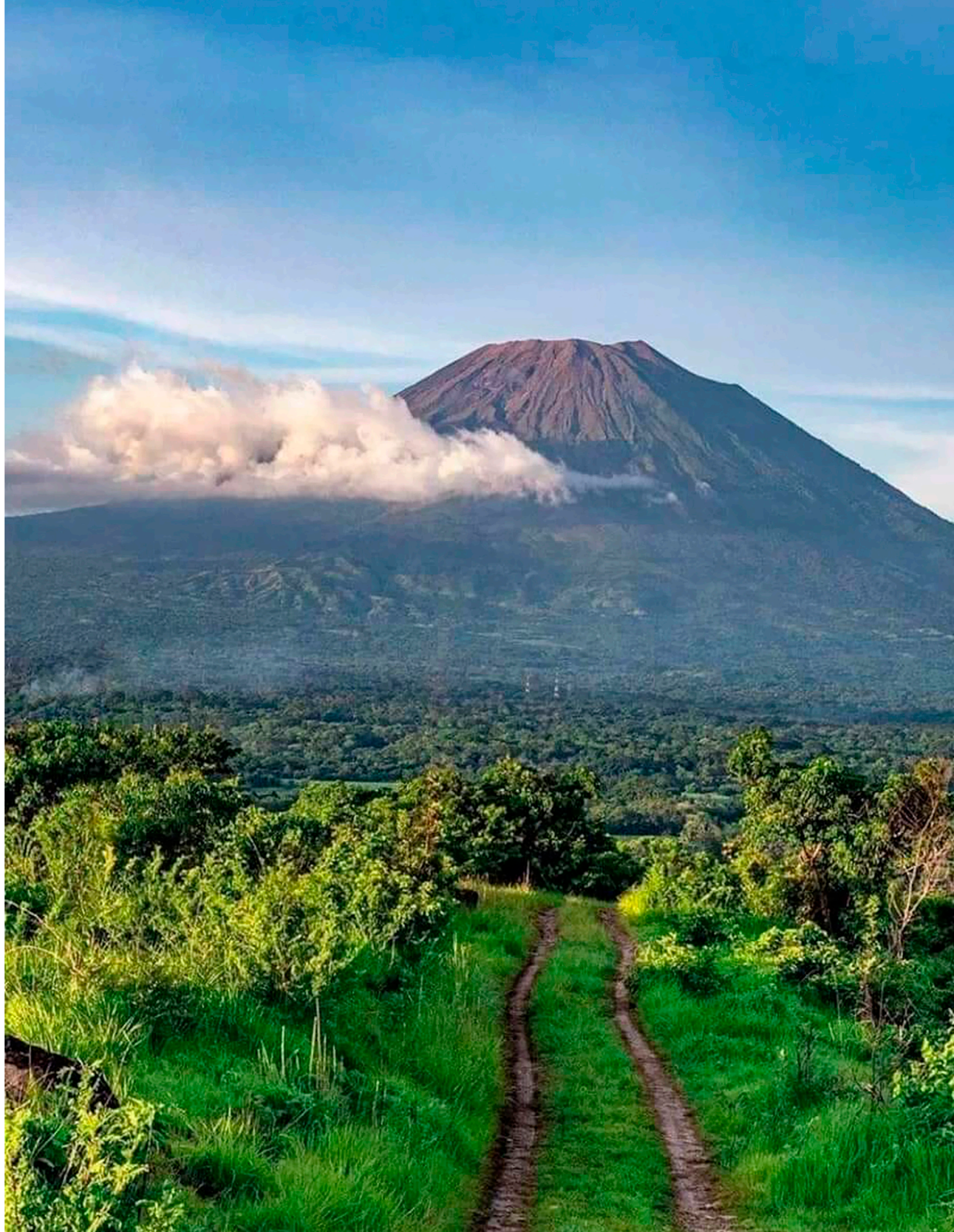
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Se han realizado continuos estudios de la historia eruptiva de los principales volcanes activos del territorio, a continuación, se presentan los historiales eruptivos de los volcanes de San Miguel, Santa Ana, San Salvador e Ilopango; construidos con base en la evidencia científica, geológica y estudios previos.

Un historial eruptivo es una cronología de la actividad registrada en un volcán. El estudio de la historia eruptiva de centros volcánicos es útil para definir la secuencialidad de los eventos y la mecánica de las erupciones involucradas en su edificación. Este conocimiento de las variantes de las erupciones volcánicas es relevante para la evaluación de los riesgos relacionados con los mismos. Debido a la complejidad de la actividad volcánica, todo historial eruptivo puede estar sujeto a modificaciones futuras, por futuros hallazgos.

- **Historial eruptivo del volcán de San Miguel**

El volcán de San Miguel cuenta con un historial eruptivo documentado, caracterizado por frecuentes erupciones que no exceden un IEV de 1-2. Ha presentado estilos eruptivos de tipo explosivos y efusivos, de los cuales los episodios explosivos se han registrado en mayor cantidad; sin embargo, también existen registros de episodios efusivos, de los cuales aún se observan los depósitos de flujos de lava, aunque estos en menor número de episodios. Se han identificado alrededor de 30 erupciones históricas, de las cuales 8 han sido efusivas (flujos de lava por los cuatro flancos) y 22 explosivas por su cráter central.



Volcán San Miguel (VSM)

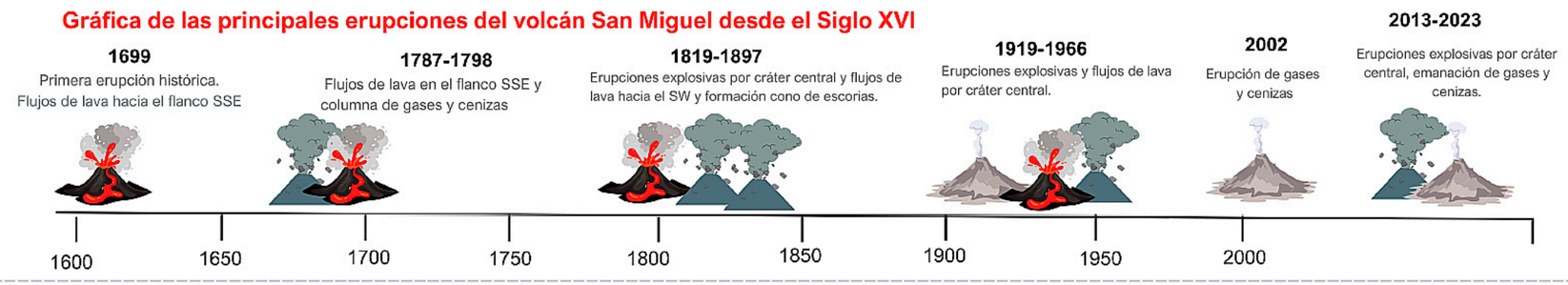


Nombre local: Chaparrastique
Tipo de volcán: Estratovolcán
Tipo de erupción: Estromboliana-Vulcaniana
Altura: 2130 m

El volcán San Miguel se encuentra a 12 km al sureste de la ciudad de San Miguel, la segunda zona urbana más grande de El Salvador. Más de 60.000 personas viven en un radio de 10 km del cráter. Los cafetales se extienden hasta unos pocos cientos de metros en los flancos orientales.



Gráfica de las principales erupciones del volcán San Miguel desde el Siglo XVI



Simbología : Emanación de gases | Erupciones efusivas: flujos de lava | Erupciones explosivas: gases y cenizas

Episodios eruptivos

- **1699. Primera erupción histórica**
  Flujos de lava hacia el flanco SSE.
- **1787-1798.**
  Emisiones de gases, cenizas y flujos de lava.
  Flujos de lava hacia el NE en dirección a la ciudad de San Miguel, y flujos de lava por tres bocas eruptivas hacia el flanco SSE.
- **1819-1897. Emisiones de gases, cenizas, bloques y flujos de lava.**
  1844. Flujos de lava a partir de 14 centros eruptivos flanco NNW.
- **1919-1966. Emisiones de gases, cenizas, flujos de lava y lahares.**
  Actividad principalmente explosiva, emanación de gases y cenizas, flujo de lava rebasando cráter central, lahares.
- **2002. Emisiones de gases de gases, cenizas**
  Actividad principalmente explosiva, emanación de gases y cenizas.
- **2013-2023. Emisiones de gases de gases, cenizas.**
  Actividad principalmente explosiva, emanación de gases y cenizas.

Figura 102. Historial eruptivo del volcán de San Miguel.
El volcán más activo del territorio, presentando frecuentes períodos de erupciones explosivas de bajo IEV durante los últimos 10 años.
Fuente: Elaboración propia DOA con datos tomados de Smithsonian Institution (Global Volcanism Program, 2025); Escobar (2003).

• **Historial eruptivo del volcán de Santa Ana**

El volcán de Santa Ana tiene como vecinos al Cerro Verde, la caldera de Coatepeque, el volcán de Izalco y varios conos de escoria y cráteres de explosión a lo largo de fisuras noroeste y sureste que atraviesan el volcán. Al interior del cráter principal del volcán se encuentra una laguna ácida de origen volcánico y una serie de grietas que conforman pequeñas zonas de fumarolas.

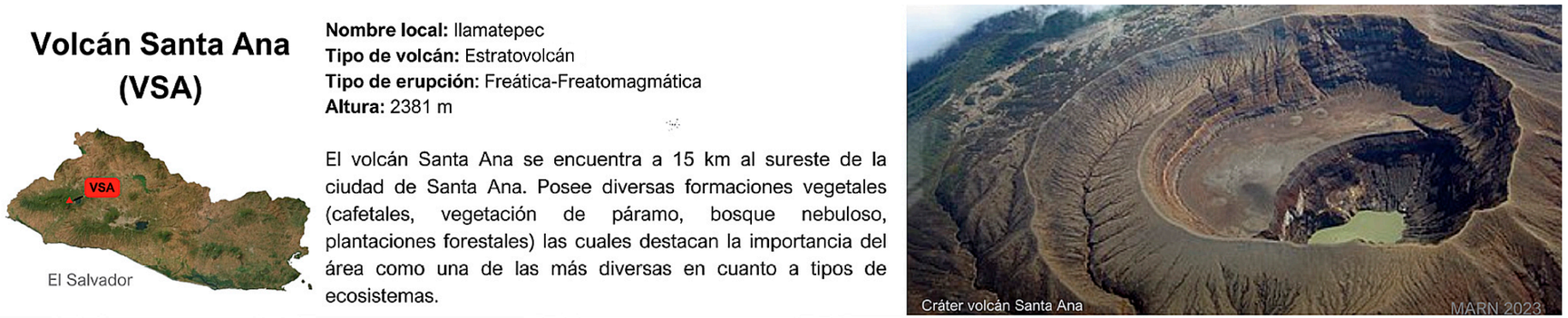


Figura 103. Historial eruptivo del volcán de Santa Ana.
Con 2,381 Con 2,381 metros de altura sobre el nivel del mar es el volcán activo más alto del territorio.
Fuente: Elaboración propia DOA con datos tomados de Smithsonian Institution (Global Volcanism Program, 2025);

• **Historial eruptivo del Complejo Volcánico de San Salvador**

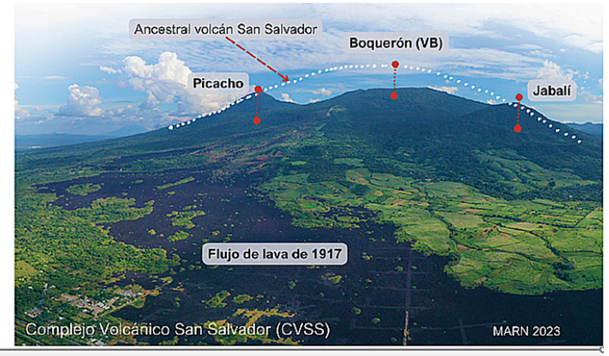
El Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS) visto de norte a sur desde El Playón, es definido claramente por el volcán Boquerón (VB) (al centro), Picacho (izquierda) y Jabalí (derecha). Tiene un largo registro de erupciones en su historia geológica, caracterizadas por cambios periódicos en su estilo eruptivo y ubicación de centros de emisión a lo largo de sus flancos. Este complejo es representado hoy en día por el VB, construido dentro de la caldera formada al colapsar el antiguo volcán de San Salvador, el cerro El Picacho es un remanente de este mismo edificio colapsado.



El complejo volcánico de San Salvador (CVSS) está constituido por un estratovolcán compuesto (volcán San Salvador (VSS), el volcán Boquerón (VB) y alrededor de veinticinco volcanes monogenéticos ubicados en los flancos sureste, norte y noroeste: conos de escorias y cráteres de explosión.

Los remanentes de las laderas del antiguo volcán San Salvador son al oeste el Cerro Jabalí y al este el cerro El Picacho, el cual con 1950 metros sobre el nivel del mar es el pico más alto del complejo.

Tipo de erupciones: estrombolianas, subplinianas y plinianas.



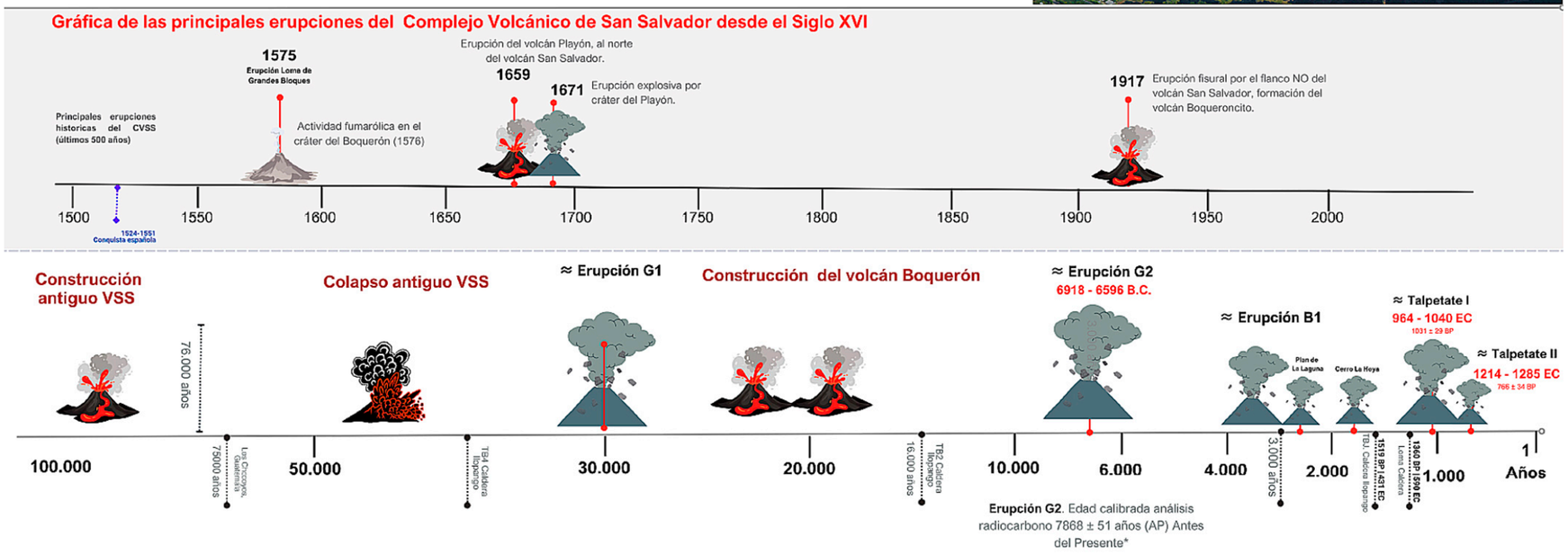


Figura 104. Historial eruptivo del volcán de San Salvador.
Fuente: Elaboración propia DOA con datos tomados de Smithsonian Institution (Global Volcanism Program, 2025); Escobar (2003).

• **Historial eruptivo de la caldera de Ilopango**

La caldera de Ilopango actualmente aloja el cuerpo de agua (de origen meteórico, es decir, formado por lluvia que escurre hacia la depresión formada por la caldera) del lago de Ilopango, está compuesto de rocas predominantemente dacíticas. Esta caldera es considerada activa, en tanto que su última actividad eruptiva fue registrada entre 1879 y 1880 donde formó el domo conocido como islas Quemadas. La caldera es el resultado de varios colapsos asociados a grandes erupciones explosivas formadoras de ignimbrita, su última gran erupción explosiva fue la TBJ (Tierra Blanca Joven), que se estima que hizo erupción ~30 km^3 DRE (Densidad de Roca Equivalente de magma) hace aproximadamente 1,500 años.

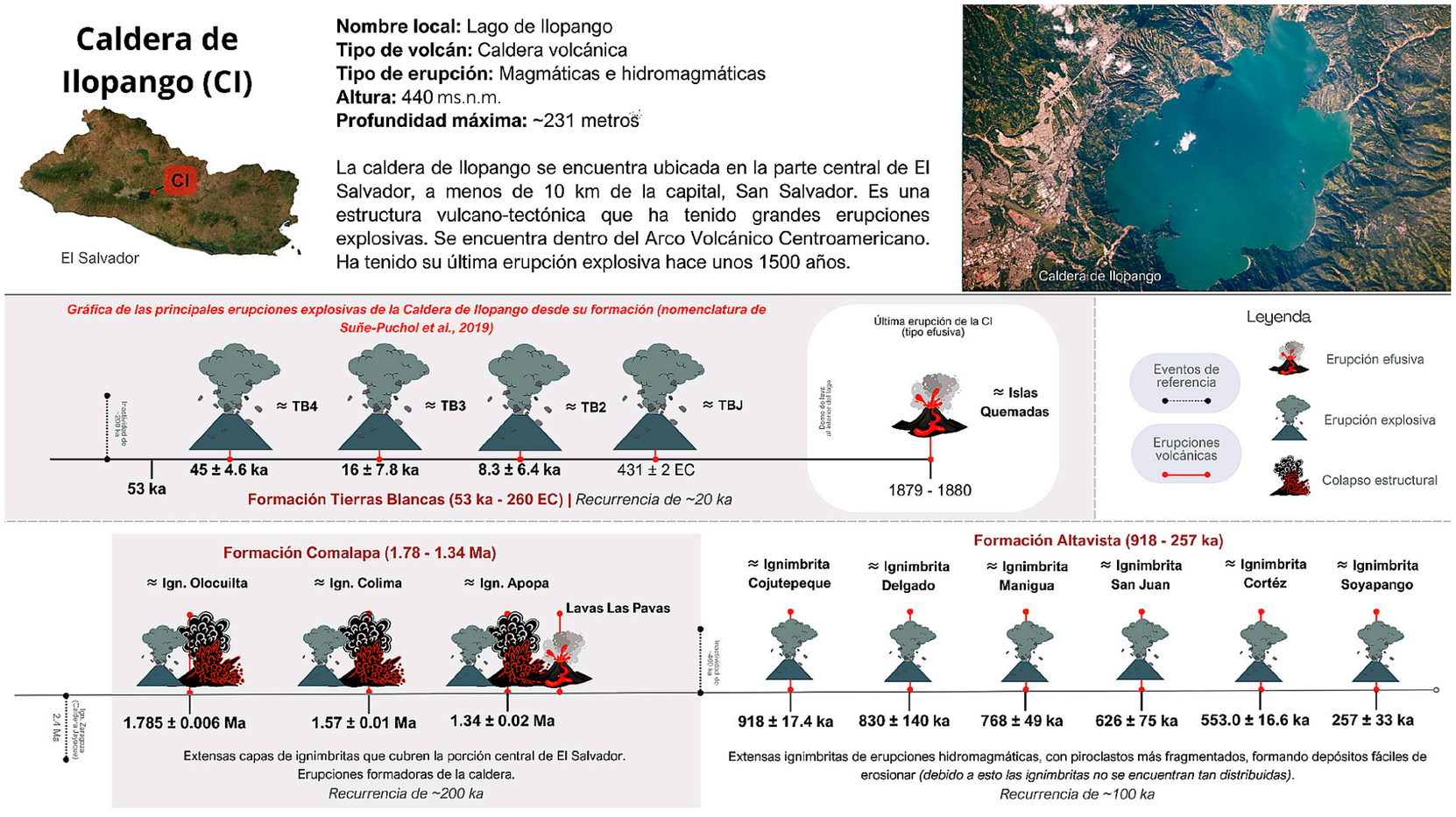


Figura 105. Historial eruptivo de la caldera de Ilopango.
Fuente: Elaboración propia DOA con datos tomados de Smithsonian Institution (Global Volcanism Program, 2025); (Suñé-Puchol, 2019).

4.3.4 Amenaza volcánica

El concepto de amenaza volcánica engloba todo el conjunto de fenómenos que se pueden generar en un determinado volcán y proceso de actividad eruptiva, los cuales pueden ser peligrosos y provocar daños a personas y/o bienes expuestos.

En el caso de la actividad volcánica sus amenazas son múltiples (Figura 106) por lo que se evalúan fenómenos específicos que pueden ser caída de cenizas, flujos de lava, caídas de balísticos (rocas calientes), emisiones de gases volcánicos, avalanchas (flujos de escombros o lahares), entre otros; estos últimos pueden ocurrir aun cuando el volcán no se encuentra en erupción. Es importante mencionar que estos fenómenos pueden suceder en conjunto o no durante un episodio eruptivo, dependiendo tanto del tipo de erupción, tipo de volcán, entre otros factores; así mismo, la actividad eruptiva en un volcán puede cambiar con el tiempo, incluso durante un mismo episodio eruptivo.

La salida del magma a la superficie se produce en tres formas: a) líquido (lavas), b) gases y c) proyección de fragmentos sólidos (piroclastos). Adicionalmente a la salida de material juvenil desde una fuente eruptiva, hay otras amenazas indirectas que pueden desencadenarse en los edificios volcánicos como son los flujos de lodo (lahares) que pueden ser detonados por intensas lluvias, lluvia ácida, deshielo o fuertes terremotos. Por este motivo, generalmente, en un área volcánica activa se elabora un mapa de amenaza por cada uno de los peligros esperables en dicha área.

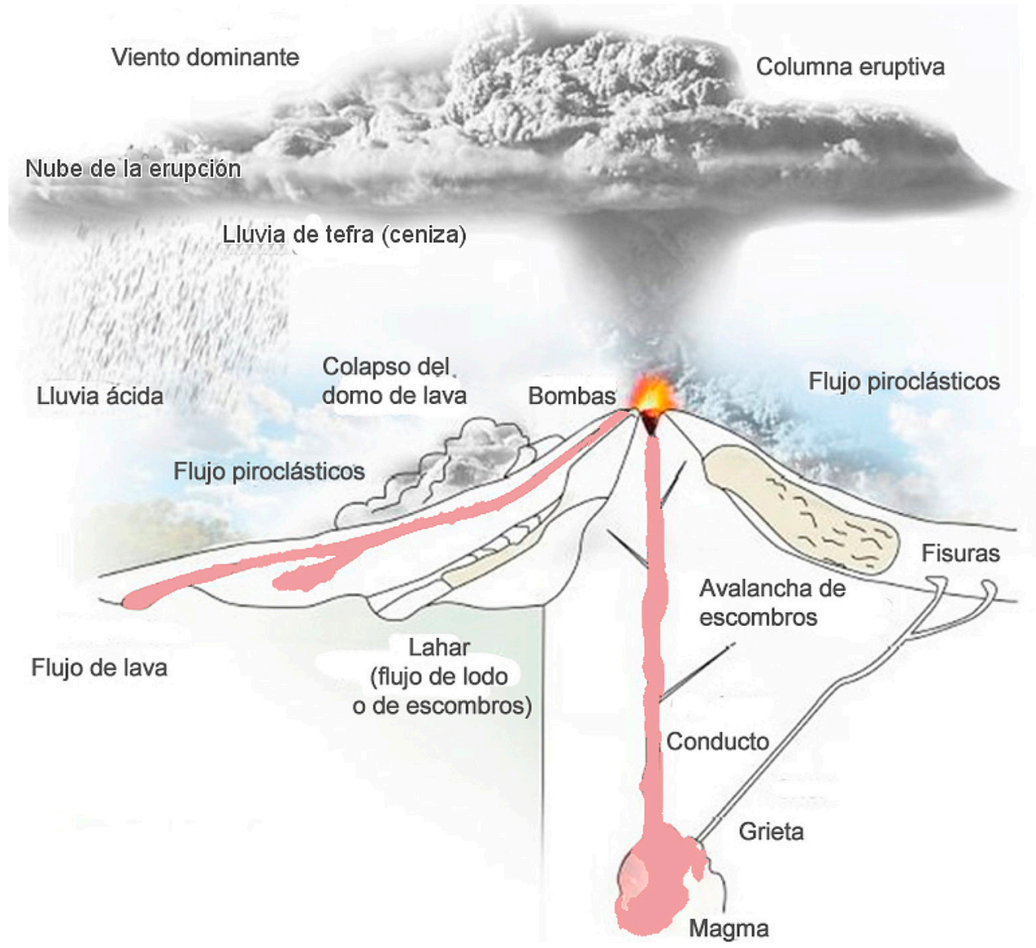


Figura 106. Esquema de los principales peligros volcánicos. Cada volcán puede producir diversos tipos de peligros dependiendo de la dinámica del proceso eruptivo y tipo de volcán.
Fuente: Adaptado de USGS, http://volcanoes.usgs.gov/hazards/index.php.

El estudio de los materiales expulsados por erupciones pasadas permite reconstruir la historia de los volcanes, conocer cómo fue la erupción, cuáles fueron las zonas afectadas e interpretar cómo sería una erupción futura. Esta es la base de los estudios de vulcanología física para la elaboración de mapas de peligrosidad volcánica y la determinación de los tiempos de recurrencia de un volcán analizando las posibles trayectorias de los fenómenos volcánicos con posibilidad de ocurrencia en el volcán, obtenidas a partir de la caracterización de los depósitos según estudios geológicos anteriores y la simulación computacional de los fenómenos volcánicos que los produjeron. Los fenómenos se modelaron utilizando diferentes herramientas de simulación.

Estos mapas (de la Figura 107 a la Figura 109) son la culminación de un proceso complejo en el que debe sintetizarse prácticamente toda la información disponible acerca del sistema volcánico en estudio, tomando en cuenta al menos tres escenarios posibles con base en su magnitud: a) baja magnitud (menor alcance) con mayor periodicidad (corto tiempo de reposo), b) intermedios (magnitud y periodicidad) y c) alta magnitud (gran alcance) con baja periodicidad (largo tiempo de reposo).

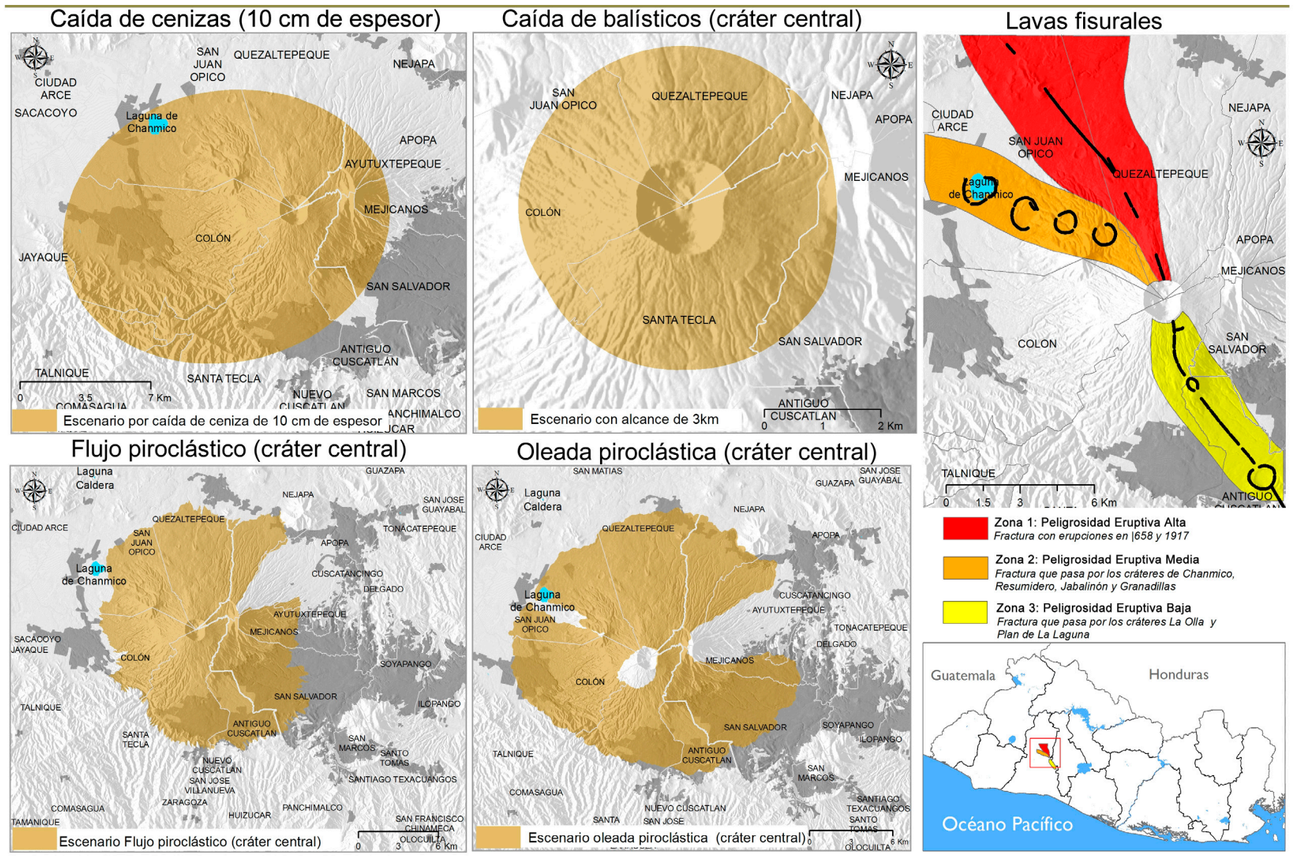
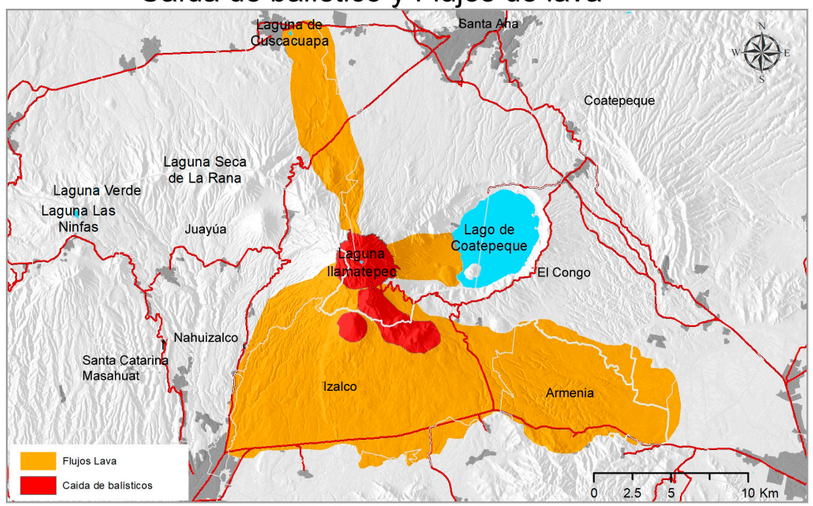
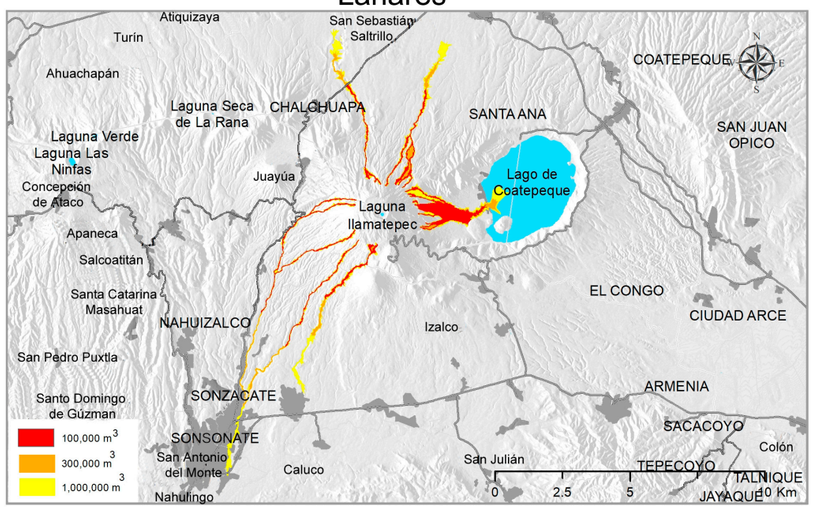


Figura 107. Escenarios de amenaza volcánica para el volcán de San Salvador.
Fuente: Elaboración DOA con datos tomados de Ferrés et al 2013

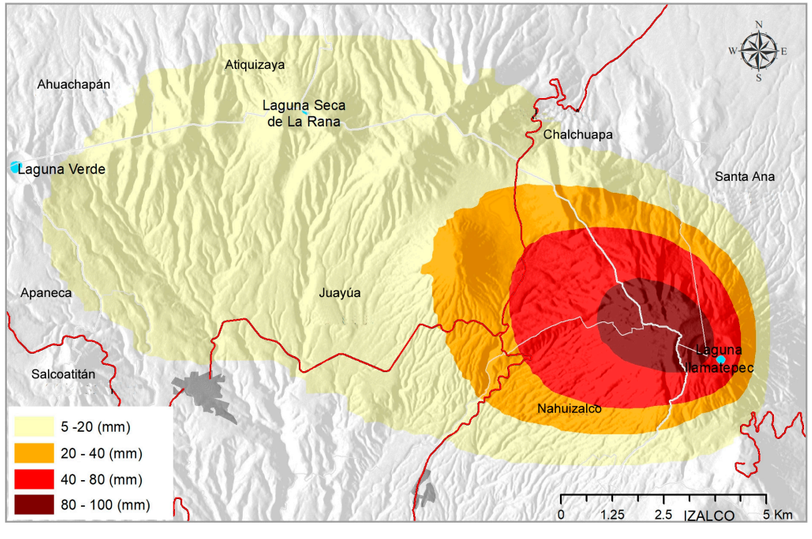
Caída de balístico y Flujos de lava



Lahares



Caída de ceniza



Gases

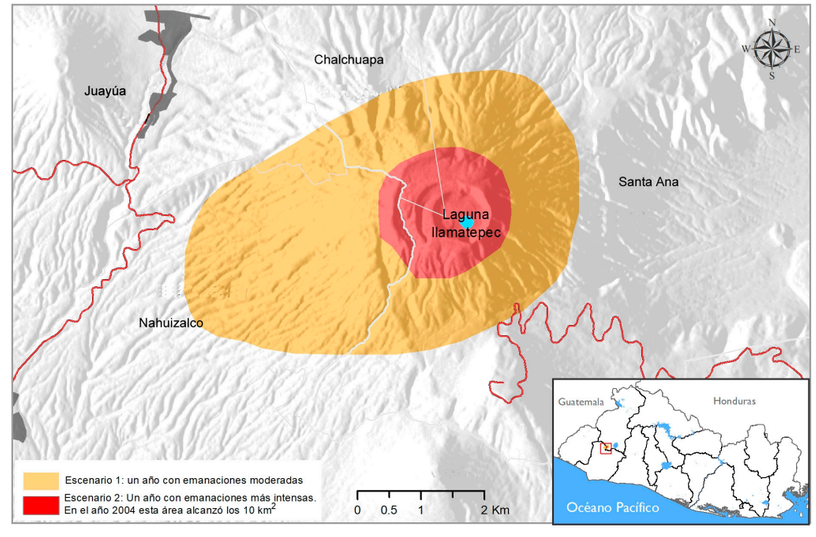


Figura 108. Escenarios de amenaza volcánica para el volcán de Santa Ana.
Fuente: Elaboración DOA con datos tomados de Ferrés et al 2004.

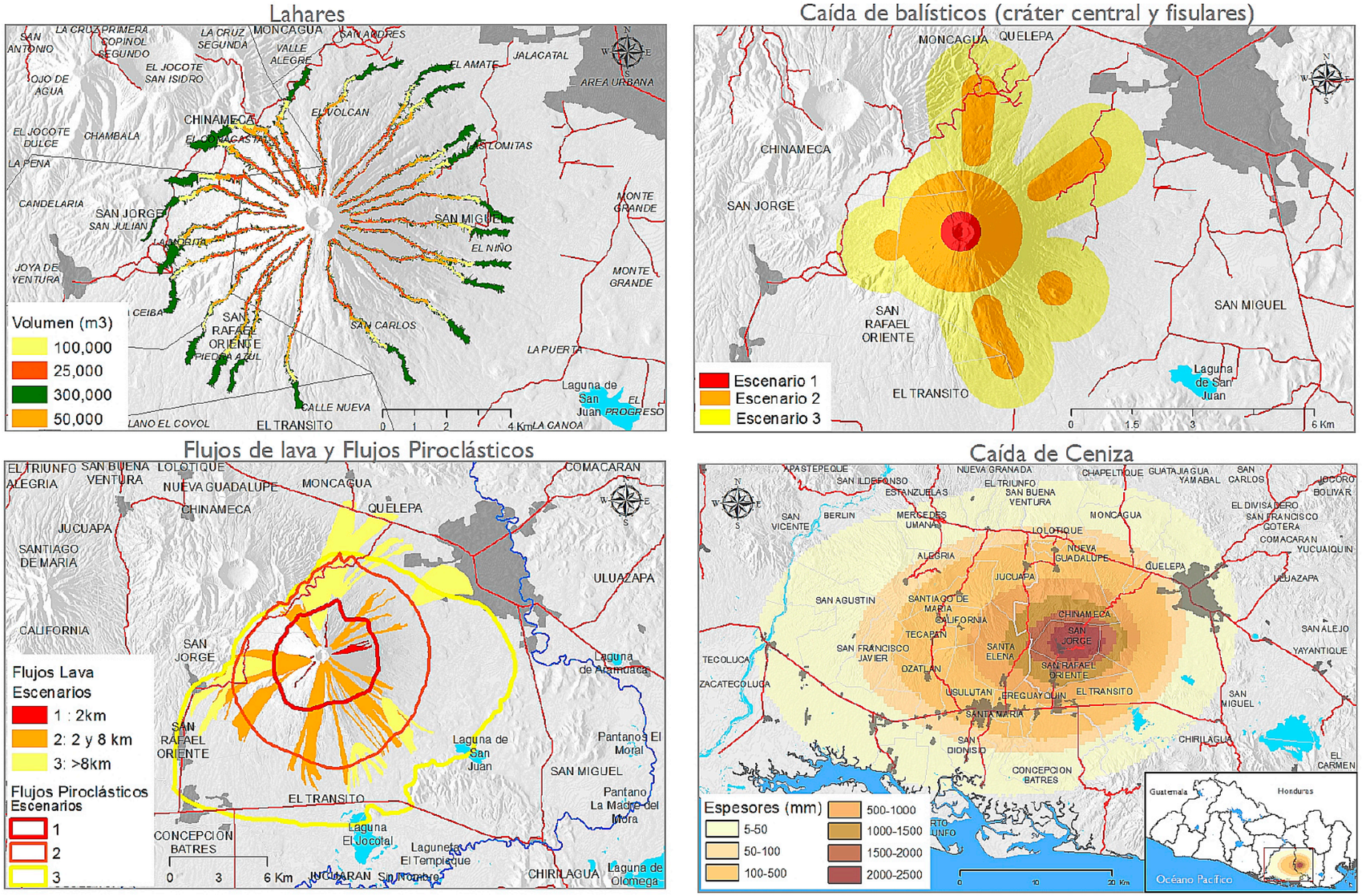


Figura 109. Escenarios de amenaza volcánica para el volcán de San Miguel.
Fuente: Elaboración DOA con datos tomados de Escobar et al 2004.

4.4 Movimiento de masas

4.4.1 Deslizamientos en El Salvador

Los deslizamientos son movimientos de suelos, rocas y materia orgánica a lo largo de una pendiente por la acción de la gravedad. Los factores que influyen en la ocurrencia de deslizamientos están relacionados a las condiciones climáticas, sísmicas y topográficas particulares que afectan la estabilidad de las laderas.

Los deslizamientos pueden clasificarse según el tipo de movimiento que se genera; en la Figura 110 se muestra un esquema con diferentes tipos de deslizamientos.

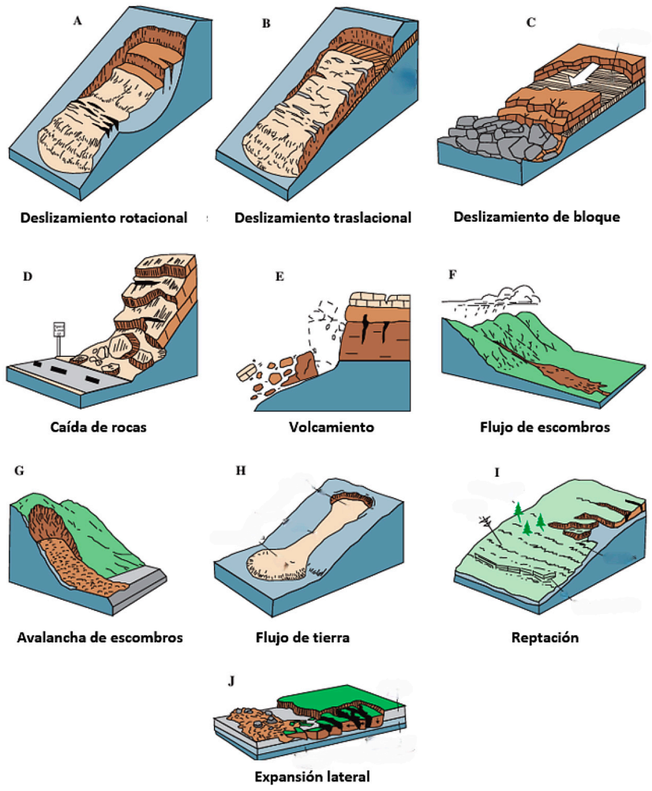


Figura 110. Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimiento.
Fuente: Modificado de Highland y Johnson (2004). Landslide Types and Processes, USGS Fact Sheet 2004-3072.

En El Salvador son más comunes los deslizamientos rotacionales, traslacionales, las caídas de rocas, los flujos de escombros y la reptación.

La mayoría de los deslizamientos en El Salvador son ocasionados por lluvias intensas; sin embargo, la actividad sísmica también ha generado importantes deslizamientos. En la Figura 111 y Figura 112, se muestran algunos de los deslizamientos que han generado más afectaciones en las últimas décadas, causados por lluvias y sismos, respectivamente.



Figura 111. Flujo de escombros ocurrido en el volcán de San Vicente, ocasionado por el sistema de baja presión 96E y el huracán Ida en noviembre de 2009.
Fuente: MARN.



Figura 112. Deslizamiento de Las Colinas, ocasionado por el terremoto del 13 de enero de 2001.

De forma general, los deslizamientos ocurren en zonas con morfología accidentada que presentan fuertes pendientes y suelos poco consolidados. En la mayoría de los casos, estos eventos han ocurrido en las cadenas montañosas del norte y costera del país y en la cadena volcánica central. En la Figura 113 se muestran estas zonas en las cuales ocurren con más frecuencia los deslizamientos.

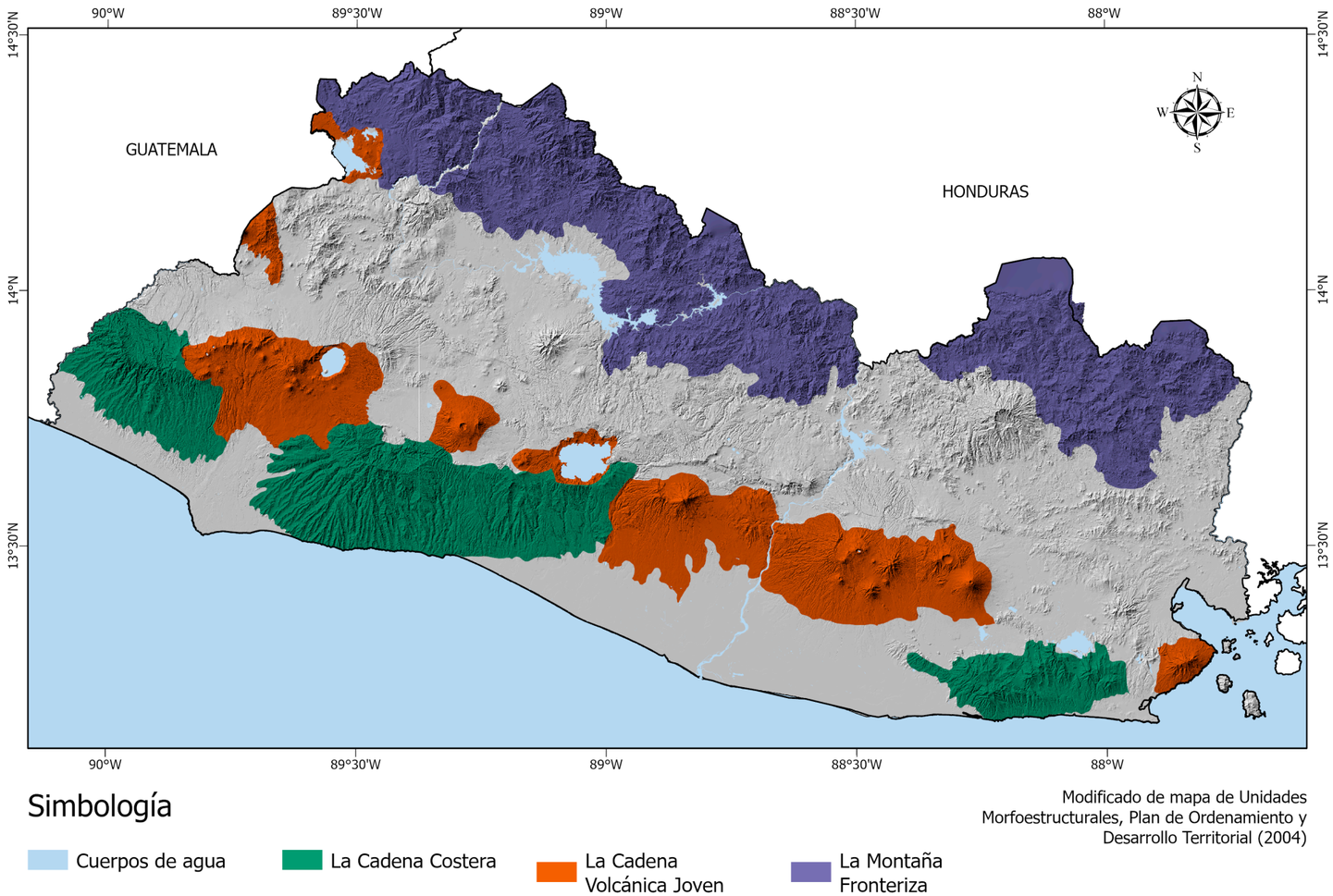


Figura 113. Zonas susceptibles a deslizamientos en El Salvador.
Fuente: Elaboración propia DOA/MARN, 2024.

La zona montañosa del norte del país se caracteriza por producir deslizamientos de lento desplazamiento, normalmente del tipo rotacional y traslacional, los cuales ocurren sobre una superficie de ruptura con forma cóncava y curva, o casi plana en algunas ocasiones. Los suelos arcillosos que prevalecen en esta porción del territorio, conformados por erupciones volcánicas muy antiguas (del período terciario) han favorecido este tipo de fenómeno. En general, el factor desencadenante para este tipo de deslizamientos está asociado con la ocurrencia de precipitaciones prolongadas tipo temporal.

A diferencia de la zona anterior, la cadena volcánica central se caracteriza por producir deslizamientos de tierra súbitos tipificados como deslaves, lahares o flujos de escombros, los cuales se originan en la parte alta de cerros y volcanes, y se desplazan hacia abajo a gran velocidad, encauzándose por las quebradas del sistema de drenaje en este tipo de relieve. La geología superficial de esta parte del país está conformada principalmente por suelos poco consolidados como la Tierra Blanca, escorias, lapilli, tefra, rocas fracturadas, etc., provenientes de un vulcanismo joven del período cuaternario. Esta condición geológica y las fuertes pendientes favorecen la ocurrencia de este tipo de fenómeno. El factor de disparo está asociado con la ocurrencia de precipitaciones intensas.

En el caso particular de la cadena volcánica central (incluyendo el escarpe norte de la cordillera del Bálsamo), también se pueden observar deslizamientos disparados por sismos como los casos de Las Colinas, el río Desagüe y la curva de la Leona, que tuvieron lugar durante la actividad sísmica del año 2001.

Finalmente, la zona sur de la cordillera del Bálsamo y la sierra de Jucuarán, se caracterizan por generar deslizamientos de tipo traslacional y caída de rocas, que son favorecidos por una geología del período terciario, compuesta por rocas y suelos arcillosos. El factor de disparo para este tipo de eventos suele ser la lluvia.

De acuerdo con los registros históricos, es posible identificar ocho grandes zonas críticas en el territorio nacional, en donde la susceptibilidad a deslizamientos ha ocasionado la pérdida de vidas y daño a la infraestructura: 1) el cerro de Apaneca; 2) el volcán de Santa Ana; 3) El Picacho en el volcán de San Salvador; 4) la ladera norte del volcán de San Vicente; 5) Berlín en Usulután, 6) el volcán de San Miguel, 7) el volcán de Conchagua; 8) y La Montañona en Chalatenango.

Es importante mencionar que la época del año en que ocurren los deslizamientos de tierra en el país corresponde a la época lluviosa, es decir al período de mayo a octubre. En general, las lluvias incrementan el peso de los suelos, generan procesos de erosión y cambios mineralógicos. Estos procesos modifican las propiedades y la resistencia de los suelos, haciéndolos susceptibles a deslizarse.

4.4.2 Deslizamientos históricos

Los principales deslizamientos en El Salvador, durante el período 1982-2020, ocurrieron en El Picacho (volcán de San Salvador), en Las Colinas (Santa Tecla); en el cerro Pelón (Berlín, Usulután); en La Zompopera (Chalatenango), en Verapaz y en Guadalupe (San Vicente), en el cantón Vainillas (Chalatenango), entre otros (véase Tabla 20 y Figuras de la 114 a 123).

Tabla 20. Principales deslizamientos en El Salvador desde 1982 hasta el 2020

DESLIZAMIENTOS	FECHA (dd/mm/aa)	TIPO	ZONA MORFOLÓGICA	FACTOR DISPARO
El Picacho, San Salvador	19-Sep-82	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Volcán de Conchagua	13-Jun-88	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Maradiaga, San Vicente	19-Ago-95	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
La Cuaresma, Metapán	21-Sep-95	Flujo de escombros	Cadena montañosa del norte	Lluvia
La Burrera, Cabañas.	27-Sep-96	Rotacional	Cadena montañosa del norte	Lluvia
La Zompopera, Chalatenango	01-Nov-98	Traslacional	Cadena montañosa del norte	Lluvia
Cerro Pelón, Usulután	01-Nov-98	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Las Colinas, La Leona, El Desagüe	Ene-Feb-2001	Rotacional	Cadena volcánica central	Sismo
Guadalupe, San Vicente	15-Sep-01	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Apaneca, Ahuachapán.	26-Jun-05	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Volcán de Santa Ana, Santa Ana	02-Oct-05	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Cerro El Picacho, Mejicanos	Oct-2008	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Volcán de San Vicente	8-nov-2009	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Cantón Vainillas y caserío El Camalote, distrito de El Carrizal (Chalatenango)	26-sep-2011	Rotacional	Cadena montañosa del norte	Lluvia
Comasagua, La Libertad	Oct-2012	Cárcava	Cadena volcánica central	Lluvia
Cantón Las Granadillas	31-May-2020	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia
Cerro El Picacho, Nejapa	29-Oct-2020	Flujo de escombros	Cadena volcánica central	Lluvia

Fuente: Base de datos de deslizamientos MARN.



Figura 114. Viviendas afectadas por flujo de escombros (deslave) originado en El Picacho, afectó Montebello en septiembre de 1982.
Fuente: Archivo El Diario de Hoy.

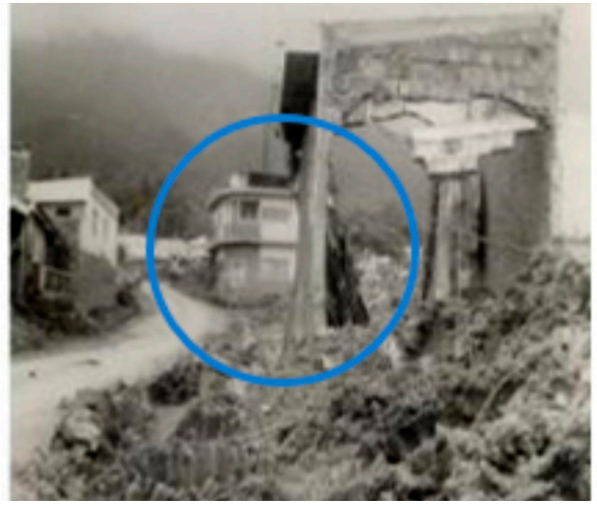


Figura 115. La Casa Rosada" fue una de las pocas viviendas que soportó el deslave que afectó Montebello en septiembre de 1982.



Figura 116. Deslizamiento La Zompopera, Chalatenango, activado en 1998.
Fuente: MARN (2017)



Figura 117. Cicatriz de deslizamiento en la parte alta de El Picacho, volcán de San Salvador, octubre de 2008
Fuente: MARN (2017)



Figura 122. Vista aérea del deslizamiento en La Montañona, Chalatenango.
Fuente: MARN (2017)



Figura 123. Vista aérea del flujo de escombros que afectó los caseríos Los Angelitos I y II, Nejapa, octubre de 2020.
Fuente: MARN (2020)



Figura 118. Flujo de escombros que afectó la ciudad de Verapaz en San Vicente, noviembre 2009.
Fuente: MARN (2017)



Figura 119. Rocas depositadas en quebrada El Derrumbo, cercanías de Guadalupe, San Vicente, noviembre 2009.
Fuente: MARN (2017)



Figura 120. Flujo de escombros en Verapaz, noviembre 2009.



Figura 121. Vista aérea de la parte alta de la cárcava en la finca La Ascensión, Comasagua.

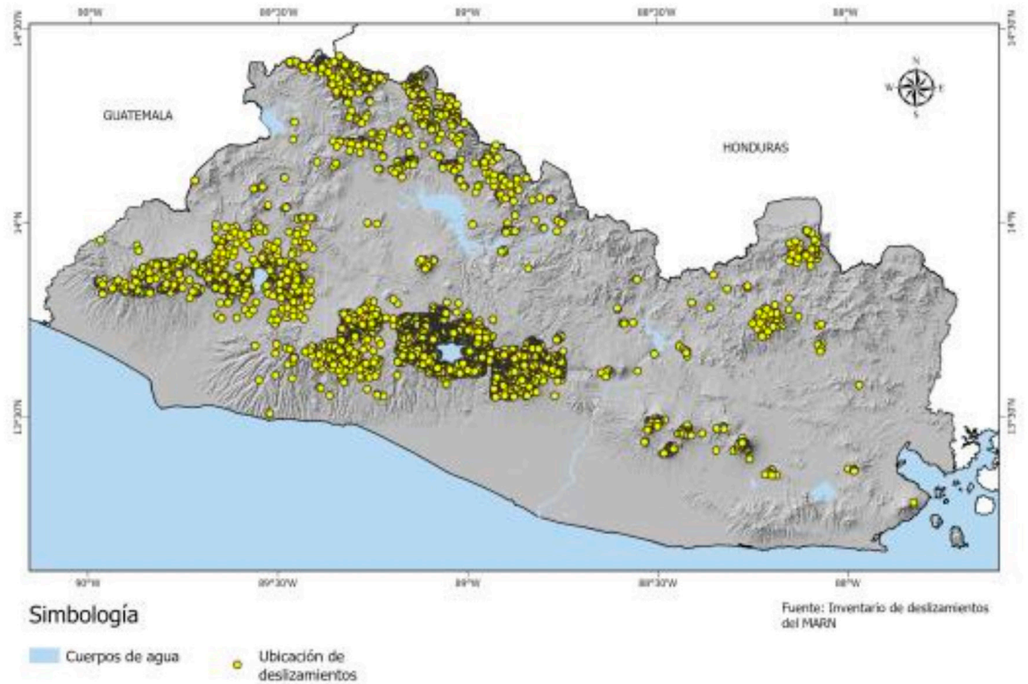


Figura 124. Ubicación de lugares de ocurrencia de deslizamientos en El Salvador desde 1774 hasta el 2020.
Fuente: Inventario deslizamientos DOA/MARN.

Es importante mencionar que los deslizamientos mostrados en la Figura 124 no representan la totalidad de los deslizamientos ocurridos en el período mencionado, dado que hay muchos que no son reportados por su pequeño tamaño. El mapa muestra solamente un panorama general de los sitios donde han ocurrido deslizamientos, en su mayoría, en pendientes naturales.

En El Salvador también es frecuente la ocurrencia de deslizamientos en caminos y carreteras, generalmente en taludes que han sido intervenidos por procesos constructivos. En la Figura 125 se muestra la ubicación de deslizamientos atendidos por el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) para el período 2014-2020.

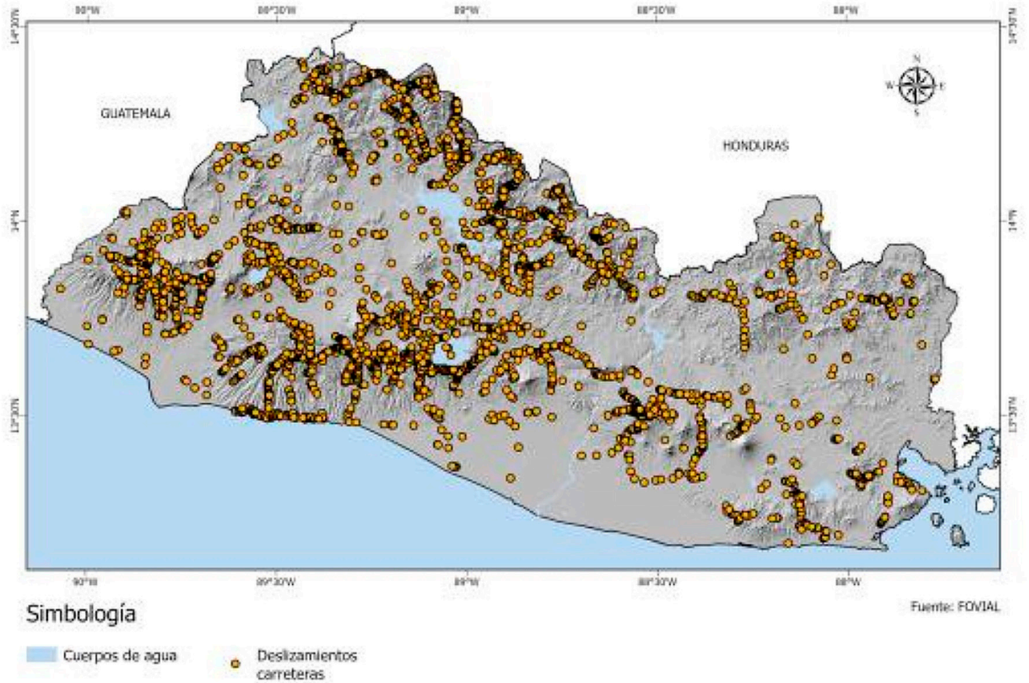


Figura 125. Ubicación de deslizamientos ocurridos en carreteras y caminos en El Salvador desde 2014 hasta el 2020.
Fuente: Base de datos FOVIAL.

4.4.3 Deslizamientos de tierra en sitios críticos

Las zonas en las que han ocurrido la mayoría de los deslizamientos que han ocasionado pérdidas humanas y de infraestructura se muestran en la Figura 126.



Figura 126. Zonas críticas por deslizamientos.
Fuente Elaboración propia con datos de DOA/MARN

- Cerro de Apaneca. En junio de 2005, un flujo de escombros en el flanco oriental del cerro de Apaneca (Chichicastepec) afectó al caserío Tizapa y al cantón Taltapanca, del municipio de Apaneca. El área total que fue afectada fue de, aproximadamente, 26,000 m^2. El evento causó cuatro muertos, varios heridos y la destrucción de varias viviendas.

- Volcán de Santa Ana. En octubre del 2005 hubo varios flujos de escombros en la ladera oriente del volcán de Santa Ana, producto de la erupción del 1 de octubre y por la situación lluviosa que afectó al país. Los flujos se originaron cerca del cráter y se movilizaron por las quebradas hasta depositarse en el cantón Planes de la Laguna, en la ribera poniente del lago de Coatepeque. El saldo de este evento fue la acumulación de grandes cantidades de lodo y de rocas que, a su vez, produjeron la destrucción de varias viviendas.

- La Montañona, Chalatenango. El 23 de septiembre de 2011, se produjo un deslizamiento que obstruyó completamente la carretera entre La Laguna y El Carrizal, en el departamento de Chalatenango, en un tramo de 150 metros aproximadamente. Este deslizamiento además destruyó el sistema de agua potable del caserío San Cristóbal, el sistema eléctrico de la zona y ocasionó pérdidas en ganado y cultivos. Alrededor de 18 familias fueron evacuadas por la Dirección General de Protección Civil.

- El Picacho, volcán de San Salvador. El 19 de septiembre de 1982 ocurrió un flujo de escombros que se originó en la parte alta de El Picacho y encauzó en la quebrada El Níspero, arrastrando rocas y árboles a su paso por la quebrada hasta depositarse en la colonia Montebello y en otras colonias cercanas. El volumen del deslave osciló entre 200 a 300 mil metros cúbicos de suelo y rocas, y la distancia recorrida fue de unos cuatro kilómetros. Este deslave sepultó varias viviendas, y ocasionó que 500 personas perdieran la vida y que 2380 resultaran damnificadas. Asimismo, un total de 65 viviendas fueron afectadas por el deslave, de las cuales 17 quedaron totalmente destruidas. Las colonias afectadas fueron el reparto Montebello Poniente, la colonia Lorena, la colonia San Mauricio, la residencial Montebello, la colonia San Ramón y la colonia Santa Margarita, todas en el distrito de Mejicanos.

  El 29 de octubre de 2020 ocurrió otro flujo de escombros en el flanco norte de El Picacho, que afectó las comunidades Los Angelitos I y II, del distrito de Nejapa. Fue originado por un período de lluvia que tuvo un acumulado de alrededor de 134 mm en 3 horas. Fallecieron 10 personas y alrededor de 135 viviendas fueron destruidas.

- El Boquerón, volcán de San Salvador. El 31 de mayo de 2020, un flujo de escombros se originó en el flanco noroeste del volcán El Boquerón, afectando el cantón Las Granadillas, en San Juan Opico. Las lluvias estuvieron asociadas a la tormenta tropical Amanda. Fallecieron 3 personas y resultaron afectadas alrededor de 12 familias. En esa misma fecha, otro flujo de escombros originado en el flanco suroeste del mismo volcán afectó el turicentro Los Chorros, originando daños considerables.

- Volcán de San Vicente. Las lluvias del 7 y del 8 de noviembre del 2009 generaron varios flujos de escombros en el volcán de San Vicente, los cuales afectaron a las ciudades de Verapaz y de Guadalupe, y que causaron pérdidas en vidas humanas y daños materiales. El registro de lluvia alcanzó los 355 mm en unas seis horas. Por otro lado, los flujos empezaron en la parte media alta del volcán y activaron, al menos, cuatro quebradas: El Derrumbo (en dirección a Guadalupe), La Quebradona (en dirección a Verapaz), El Infiernillo y Amate Blanco (en dirección a Tepetitán).

  Otros flujos importantes ocurrieron en 1974: flujo en la ladera noreste del volcán, el cual afectó a la ciudad de San Vicente. 1921: flujo que destruyó totalmente a Verapaz, causando numerosas muertes tanto en Verapaz como en Agua Agria, poblado situado en la parte alta de la ladera del volcán. 1934: destrucción total de Tepetitán por flujo originado en la quebrada El Amate Blanco. El desastre provocó numerosas víctimas. 1966: en la ladera sur del volcán un desprendimiento bloqueó la vía principal entre Tecoluca y Zacatecoluca. 2001: derrumbes ocasionados por el terremoto del 13 de febrero en las laderas norte y noroeste del volcán. Aunque estos movimientos no llegaron a transformarse en flujos. Los derrumbes depositaron más de 200,000 metros cúbicos de sedimentos en los canales que drenan del volcán. Esta situación incrementó la probabilidad de inundaciones y

flujos aguas abajo hacia Guadalupe, Tepetitán y Verapaz. 2001, 15 de septiembre: un flujo, provocado por lluvias y proveniente de la quebrada El Derrumbo, afectó a Guadalupe. El saldo de este hecho fue una víctima mortal y numerosas casas destruidas en, aproximadamente, la misma zona afectada por el evento de 1934.

- Berlín, Usulután. En mayo del 2007, tres flujos se originaron en el cerro Pelón, ubicado a un kilómetro al sureste de la ciudad de Berlín. Este evento fue provocado por una intensa lluvia que dejó 170 mm de lluvia en unas cuatro horas. Los deslizamientos consistieron en el desprendimiento superficial de rocas y suelos que se encauzaron por quebradas poco profundas, arrastrando árboles y maleza en su recorrido. El volumen del flujo más grande se estimó en unos 2,500 metros cúbicos que, al llegar a la base del cerro, impactó en la lotificación Brisas del Sol causando la muerte de cuatro personas y la destrucción de varias viviendas. Un deslizamiento similar tuvo lugar en 1998, producto de las lluvias generadas por el Huracán Mitch.

- Volcán de Conchagua. El 13 de junio de 1988 ocurrió un flujo de escombros en el flanco noreste del volcán de Conchagua, que afectó la hacienda El Yologual en el cantón Agua Escondida, municipio de La Unión Sur. Este flujo ocasionó la muerte de 17 personas y 2 menores desaparecidos.

Las condiciones de lluvia que causan deslizamientos como los mencionados anteriormente, a menudo están asociadas a fenómenos meteorológicos extremos como huracanes o tormentas tropicales. En la Figura 127 se muestran los eventos de lluvia de 2005 a 2020 en el Complejo Volcánico de San Salvador, separando los que han originado flujos de escombros de los que no. Se ha graficado para cada evento la duración de estos en el eje horizontal y la lluvia acumulada durante el evento en el eje vertical.

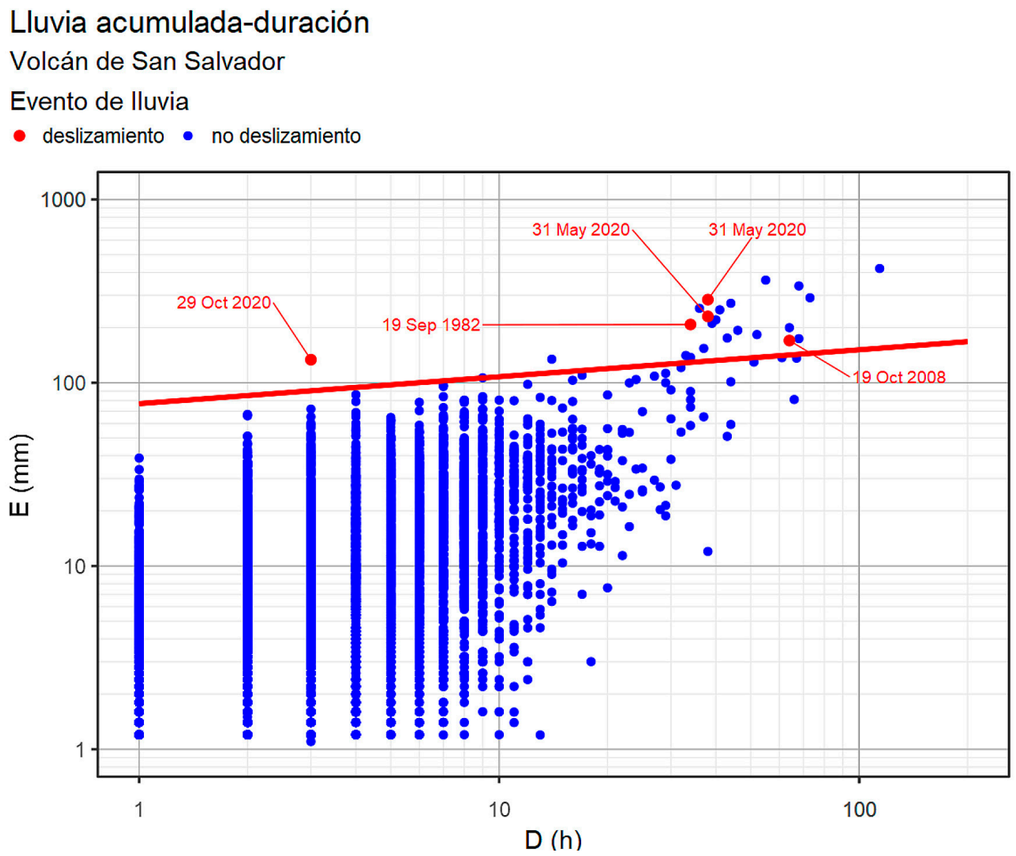


Figura 127. Eventos de lluvia en el Complejo Volcánico de San Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos de DOA/MARN

De los 5 flujos de escombros de los que se tiene registro de lluvia, sólo el del 29 de octubre de 2020 ocurrió debido a lluvias típicas de la época lluviosa. El resto de ellos están relacionados a eventos meteorológicos extremos. La línea roja es un umbral que se ha delimitado como un límite inferior de las condiciones de lluvia que causan deslizamientos.

4.4.4 Mapa de susceptibilidad por deslizamientos

La susceptibilidad a deslizamientos puede definirse como la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en una zona en función de sus características. Es importante mencionar que un mapa de susceptibilidad a deslizamientos no muestra que tan grandes o que tan frecuentes pueden ser los deslizamientos, solamente dónde se espera que ocurran.

Para determinar la susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador, se ha utilizado el modelo Mora-Vahrson (Mora C., S., & Vahrson, W. G. ,1994)). El modelo evalúa cinco factores: relieve relativo, litología, humedad, la intensidad de los sismos y la intensidad de las lluvias.

Cada uno de los factores se pondera con un valor, el cual define su grado de influencia en los deslizamientos de tierra. El resultado es un mapa que muestra cuatro tipos de zonas, caracterizadas según un grado de susceptibilidad:

- Muy alta susceptibilidad: zonas en donde todas las condiciones del terreno son muy favorables para generar deslizamientos.
- Alta susceptibilidad: zonas en donde la mayoría de condiciones del terreno son favorables para generar deslizamientos.
- Moderada susceptibilidad: zonas en donde el terreno presenta algunas condiciones para generar deslizamientos.
- Baja susceptibilidad: zonas en donde las condiciones del terreno no son favorables para generar deslizamientos.



Figura 128. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos de DOA/MARN

El modelo Mora-Vahrson es un modelo heurístico o de opinión experta, en el que no se han usado inventarios de deslizamientos locales para calibrarlo. En años recientes, ha habido una tendencia a usar modelos estadísticos, en los que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos se basa en la relación entre los factores de inestabilidad y la distribución pasada de deslizamientos. Para esto es necesario tener inventarios detallados de deslizamientos, los cuales son más fáciles de crear para áreas de extensiones más pequeñas.

En el marco del Proyecto Regional de Formación aplicada a los escenarios de Riesgos con Vigilancia y Monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos, hidrogeológicos en Centroamérica (RIESCA), financiado por la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo y coordinado por la Universidad de Palermo de Italia, se trabajaron modelos estadísticos para la susceptibilidad a deslizamientos en zonas específicas.

Para estos modelos se usó la técnica Multi-Adaptive Regression Splines (MARS). En esta técnica, la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y los factores no tiene una forma predeterminada, si no que se va construyendo a partir de información derivada de los datos. El resultado final es un mapa que muestra la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos como un valor entre 0 y 1, el cual se reclasifica a una escala categórica (baja, alta, etc.).

Usando modelos estadísticos se han trabajado dos zonas, las cuales se muestran en la Figura 129: un sector de la cordillera de Apaneca y otro en el volcán de San Vicente.

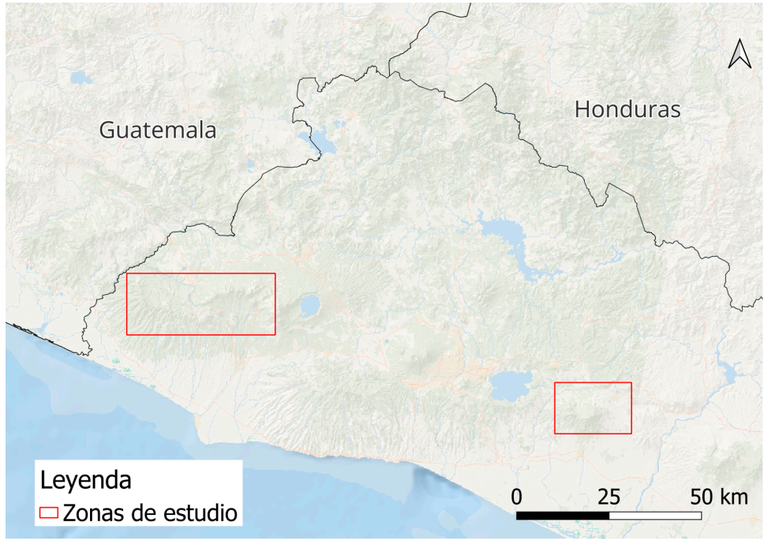


Figura 129. Zonas de estudio para modelos estadísticos de susceptibilidad a deslizamientos.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

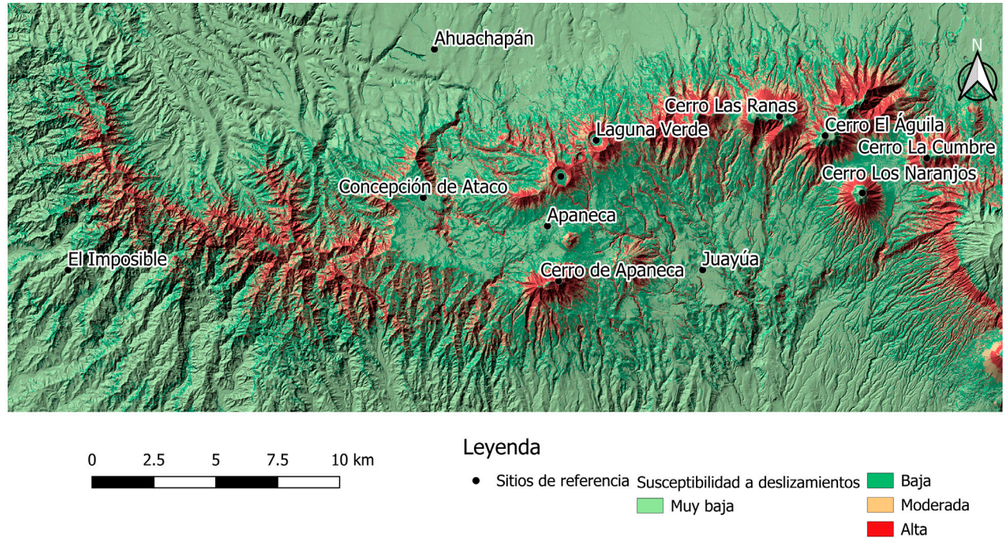


Figura 130. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos para la zona de Apaneca.
Fuente: Mercurio y mas (2021). Mapping Susceptibility to Debris Flows Triggered by Tropical Storms: A Case Study of the San Vicente Volcano Area

Para una zona en los alrededores del volcán de San Vicente, la Universidad de Palermo, en colaboración con el Ministerio de Medio Ambiente, creó un mapa de susceptibilidad para un área de 288 km^2, el cual fue publicado en la revista Earth que se muestra en la Figura 131 (Mercurio y mas, 2021).

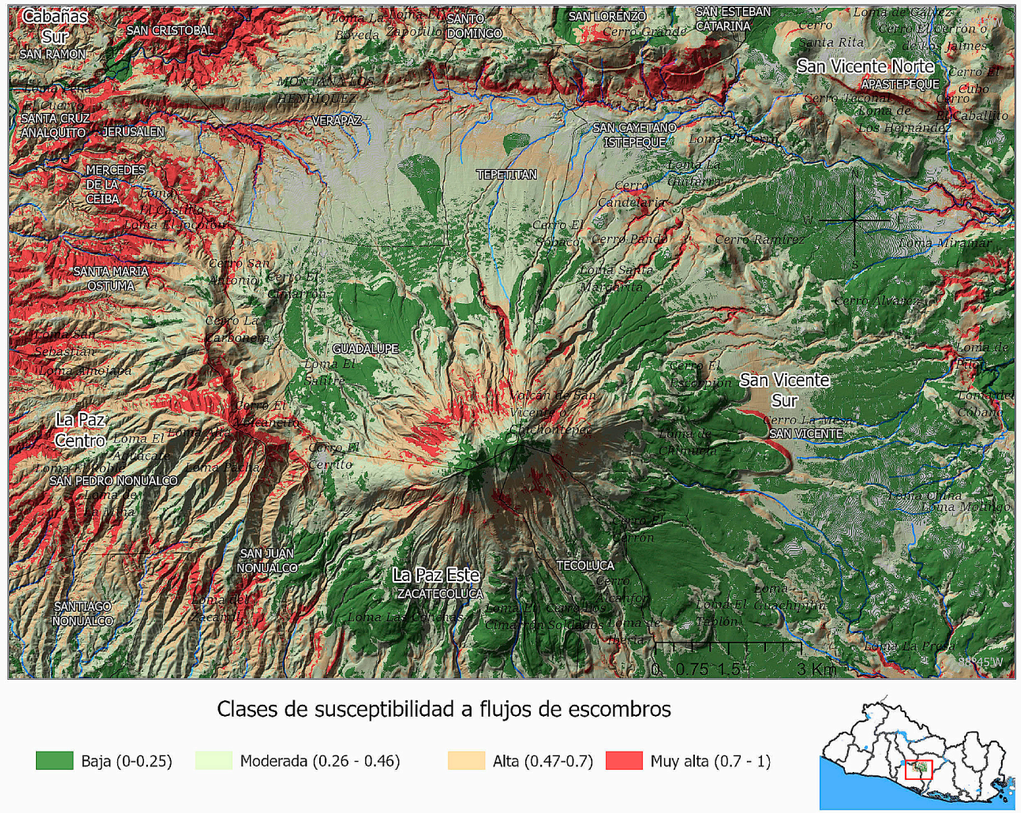


Figura 131.Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en zona de volcán de San Vicente.
Fuente: Mercurio y mas (2021). Mapping Susceptibility to Debris Flows Triggered by Tropical Storms: A Case Study of the San Vicente Volcano Area

4.4.5 Modelaciones de flujos de escombros en sitios críticos

Los sitios en los que de manera recurrente hay deslizamientos de tierra, tipo deslaves (lahares o flujos de escombros), por lluvia o por movimiento sísmico son: el cerro de Apaneca; el volcán de Santa Ana; El Picacho en el volcán de San Salvador; las laderas norte y sur del volcán de San Vicente; Berlín en Usulután, el volcán de San Miguel y el volcán de Conchagua. En esas áreas se han realizado simulaciones de los flujos de escombros que podrían generarse para diferentes volúmenes de suelo utilizando el programa LAHARZ (ver Figura de 132 a Figura 141).

El programa LAHARZ ha sido desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y tiene como objetivo delimitar las áreas con probabilidades de sufrir inundaciones por deslaves y/o flujos de escombros que cubran zonas de interés.

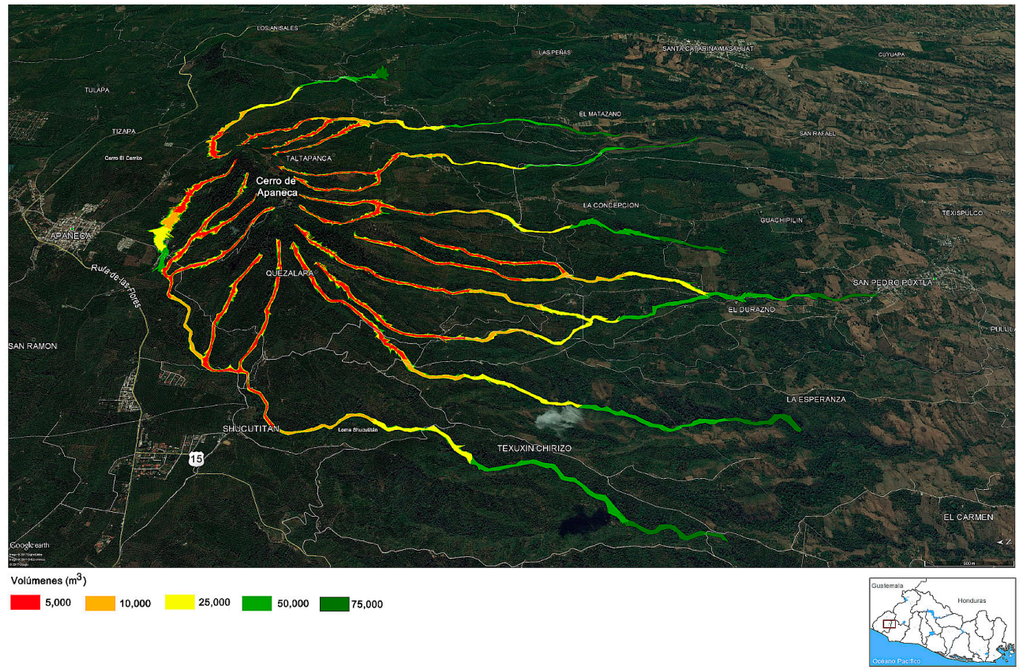


Figura 132. Amenaza por flujos de escombros o lahares en cerro de Apaneca, Ahuachapán.
Fuente. Elaboración propia con datos de MARN.

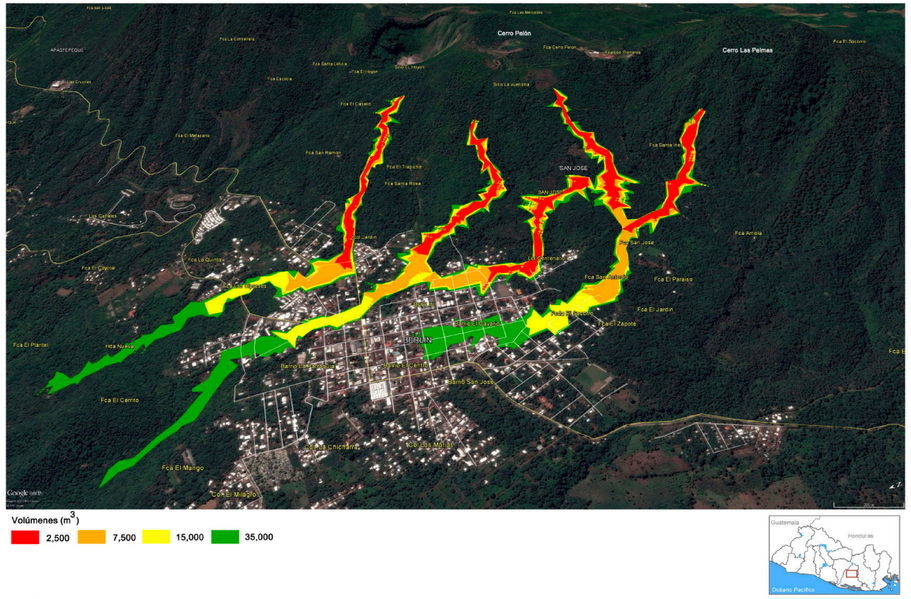


Figura 133. Amenaza por deslaves en ladera noroeste de los cerros Las Palmas, Pelón y El Pinal, ciudad de Berlín, Usulután.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

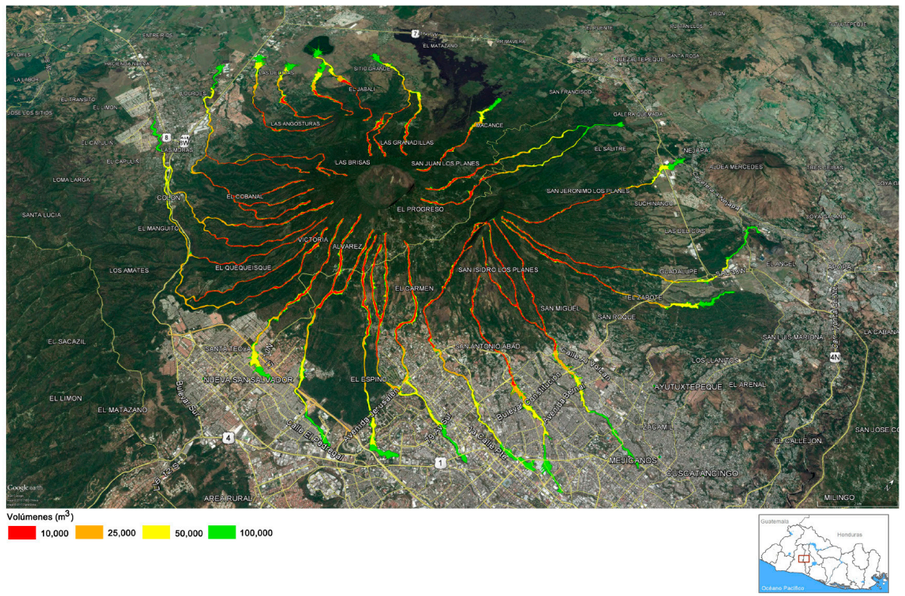


Figura 134. Amenaza por deslaves en el volcán de Conchagua para un volumen máximo de 100,000 m³.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

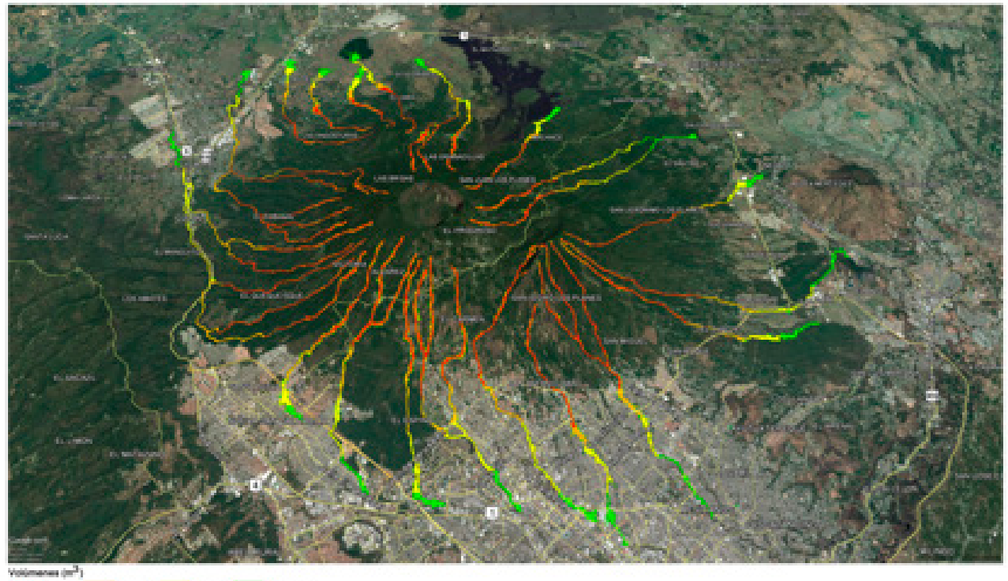


Figura 135. Amenaza por deslaves en el volcán de San Salvador, para un volumen máximo de 100,000 m³.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

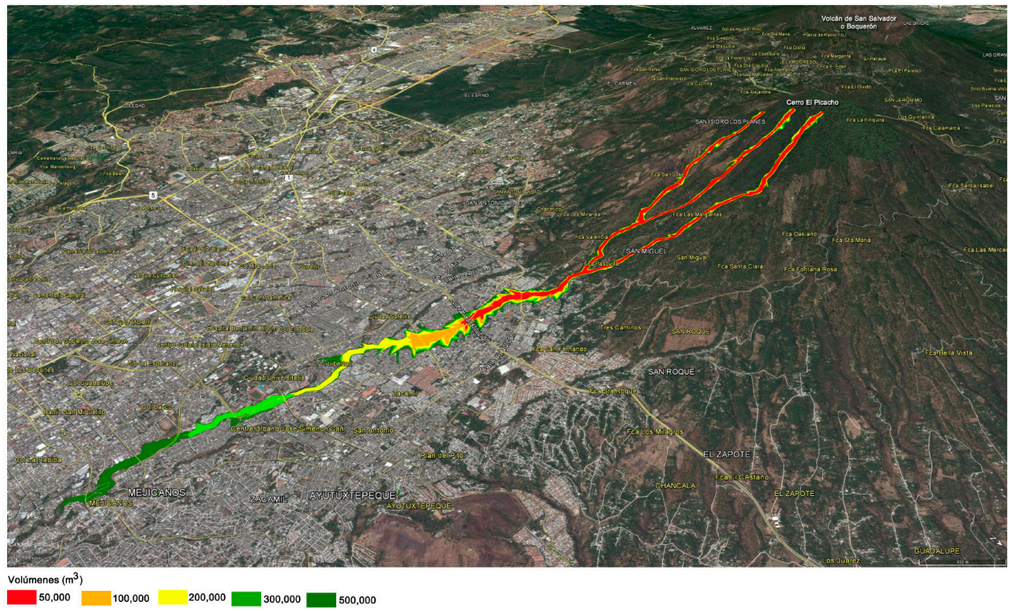


Figura 136. Amenaza por deslaves para las quebradas principales de El Picacho, volcán de San Salvador.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

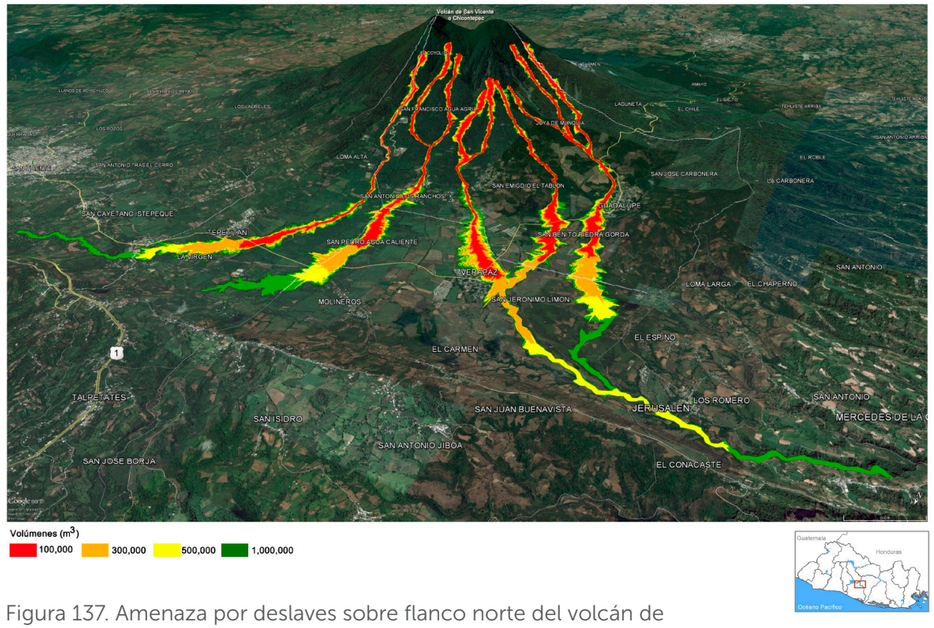


Figura 137. Amenaza por deslaves sobre flanco norte del volcán de San Vicente, sobre los distritos de Guadalupe, Verapaz y Tepetitán, departamento de San Vicente.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

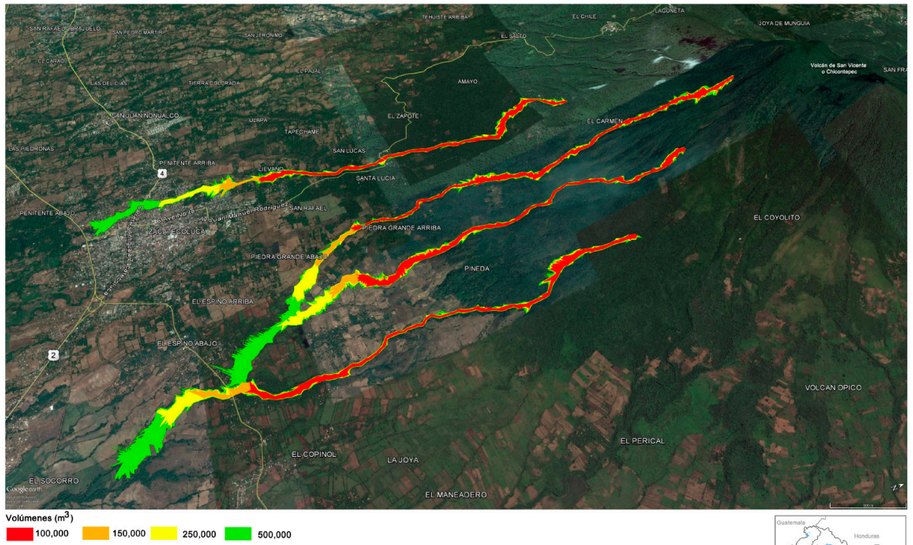


Figura 138. Amenaza por deslaves en flanco sur del volcán de San Vicente, distrito de Zacatecoluca, departamento de La Paz.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

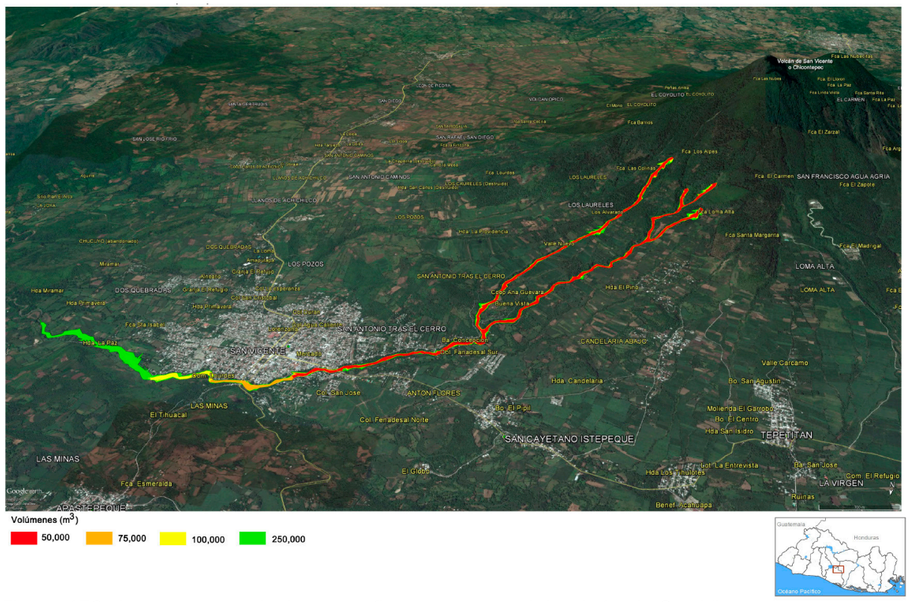


Figura 139. Amenaza por deslaves en flanco noreste del volcán de San Vicente, distrito de San Vicente, departamento de San Vicente.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

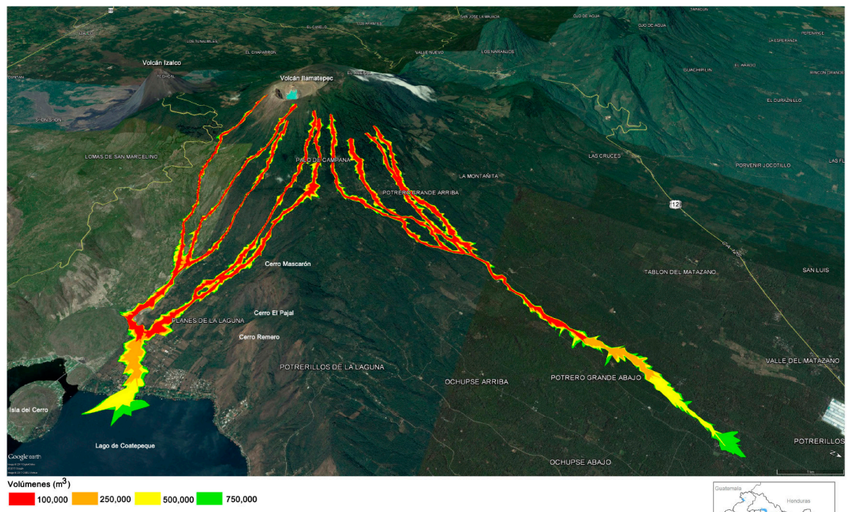


Figura 140. Amenaza por deslaves en el volcán de Santa Ana.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

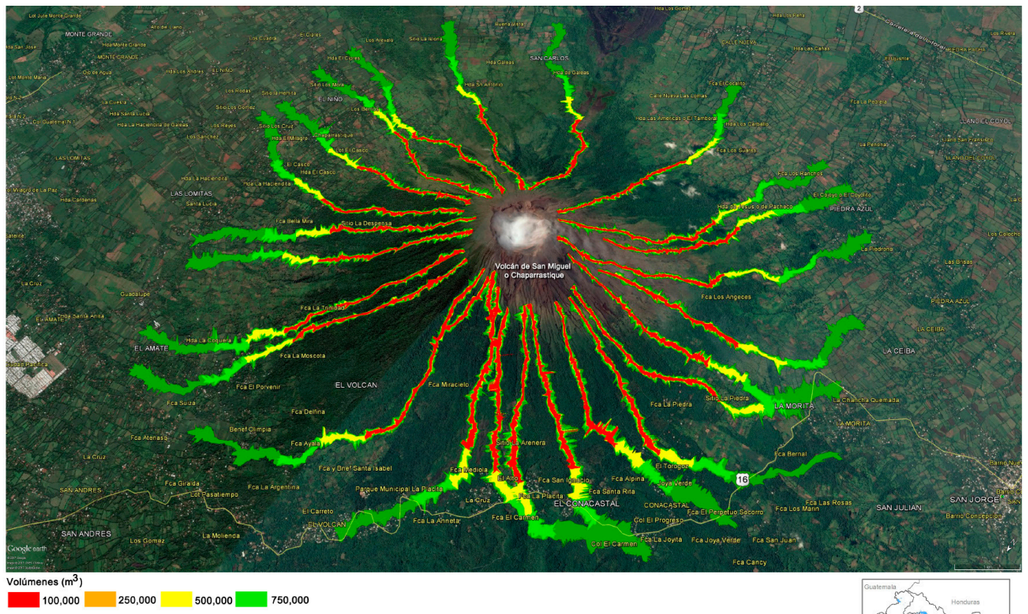




Figura 141. Amenaza por deslaves en el volcán de San Miguel.
Fuente. Elaboración propia con datos MARN.

4.5 Amenaza climática y fenómenos hidrometeorológicos extremos

4.5.1 Tendencias del clima: cambio climático y variabilidad climática

La variabilidad climática, se define como la desviación de las pautas normales del clima o climatología en un lugar determinado. Esta variabilidad puede ocurrir en diversas escalas de tiempo, desde variabilidad intraestacional hasta de varios años o décadas. La variabilidad del clima se asocia con fenómenos que producen impactos de importantes consecuencias y se ve exacerbada por el cambio climático.

El cambio climático puede definirse como una modificación natural del clima respecto a su historial en la escala regional y global, el cual también se asocia al impacto humano sobre el planeta. Más allá de los cambios lentos e inexorables de la temperatura y del nivel del mar, en El Salvador ya se experimentan elevadas pérdidas y daños por eventos climáticos extremos que comprometen, en el corto plazo, la posibilidad del desarrollo económico y social (MARN, 2013b).

Producto de la variabilidad climática y del cambio climático se ha evidenciado una clara tendencia a que se exacerben los extremos, es decir, se hacen más frecuentes e intensos los fenómenos hidrometeorológicos, hay un incremento en la convectividad de las tormentas (mayor intensidad de lluvia), la distribución espacial y temporal de las precipitaciones es mucho más irregular; existen cambios en el origen o nacimiento, la trayectoria y número de sistemas ciclónicos originados en los océanos Pacífico y Atlántico que inciden sobre el territorio; se registran Vientos “Nortes” más fuertes y prolongados, heladas y temperatura ambiente más alta o más baja, así como las temperaturas de las aguas de estos océanos se han vuelto más extremas.

La amenaza climática creciente que enfrenta El Salvador producto del cambio climático global es el hecho ambiental de mayor reconocimiento nacional. Lo anterior también ha sido reconocido internacionalmente por la organización Germanwatch, cuando en

el 2009 colocó al país en la primera posición del Índice Global de Riesgo Climático, a raíz de los impactos de la Baja Presión E96 asociada al huracán Ida de noviembre del mismo año. De acuerdo al Índice de Riesgo Climático Global 2000- 2019 nuestro país se ubicó en la posición 103.

Eventos posteriores como la Tormenta Tropical Agatha (Mayo 2010) y la Depresión Tropical 12E (octubre 2011), Tormenta Tropical Amanda/Cristóbal (mayo-junio 2020) confirmaron que la variabilidad climática es una amenaza creciente para El Salvador, siendo los años 2010, 2011 y 2020 en los que se registró la mayor cantidad de lluvia acumulada en 53 años de registro. A estos tres años de precipitaciones extremas – 2020 a 2022 - les precedieron —entre 2012 y 2017— varios períodos marcados por condiciones de sequía y reducción significativa de lluvias, que provocaron afectaciones socioeconómicas importantes, especialmente en comunidades vulnerables.

Según el último Informe de Índice de Riesgo Climático, presentado por Germanwatch en el año 2021, la región centroamericana fue una de las zonas más afectadas por eventos climáticos para el período 2000-2019, encontrándose El Salvador entre los veinte países más impactados (ver Figura 142).

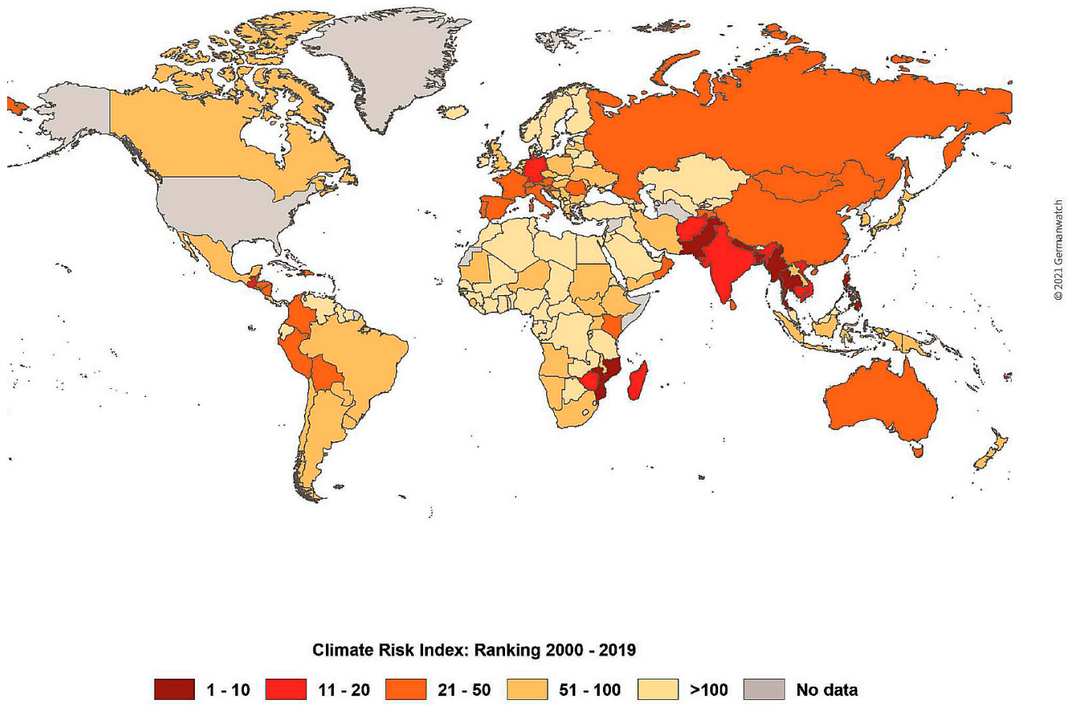


Figura 142. Índice de Riesgo Climático Global 2000-2019
Fuente: Germanwatch y Munich Re NatCatSERVICE 2021

Escenarios de cambio climático realizados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) reflejan, para El Salvador, una progresiva disminución de las lluvias durante el primer trimestre de cada época lluviosa, tendiendo hacia la desaparición de la curva bimodal que ha sido característica en el país; desplazando la lluvia más hacia el final del año. De hecho, el régimen de lluvias, caracterizado típicamente por una estación seca (de noviembre a abril) y una estación lluviosa (de mayo a octubre), se alteró en las últimas décadas durante las que se presentaron diversas anomalías en el patrón temporal y espacial de lluvias, lo que ha derivado en un incremento de los desastres vinculados a fenómenos hidrometeorológicos, tanto por exceso como por falta de precipitación.

Los escenarios climáticos desarrollados por el proyecto Euroclima para Centroamérica muestran que, durante los últimos 53 años, la mayoría de estaciones en El Salvador han registrado un aumento en las precipitaciones durante el mes de mayo y una disminución en junio. Asimismo, se ha mantenido septiembre como el mes con mayor acumulación de lluvia, acompañado de un incremento notable en octubre y, en menor medida, en noviembre. A pesar de estas variaciones, el patrón bimodal de la distribución de lluvias persiste a escala nacional.

Investigaciones recientes advierten que los cambios permanentes del clima, inducidos por el cambio climático, podrían establecerse antes de lo estimado, especialmente en países tropicales como El Salvador. Se proyecta que estos cambios podrían consolidarse hacia la década de 2030, aunque las tendencias actuales observadas a nivel nacional y regional sugieren que podrían adelantarse aún más.

En este contexto, el análisis del aumento progresivo de pérdidas y daños asociados a eventos extremos adquiere un papel crucial para fortalecer las estrategias de reducción del riesgo ante fenómenos naturales y socionaturales.

4.5.2 Lluvias intensas en El Salvador entre 1974 y 2023

En El Salvador se consideran como eventos hidrometeorológicos extremos aquellos que producen una precipitación superior a 100 milímetros (mm) en 24 horas y acumulados de más de 350 mm en 72 horas. Este informe analiza el comportamiento histórico de eventos extremos registrados entre 1974 y 2023, basándose en datos oficiales que documentan 24 eventos significativos, incluyendo huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales. Los registros históricos muestran que, desde la década de los sesenta, El Salvador ha sido impactado por múltiples eventos hidrometeorológicos extremos, con un patrón de intensificación notable en las décadas recientes.

- Distribución temporal y frecuencia

El análisis de los datos revela una distribución temporal irregular de eventos extremos, con un incremento significativo en la frecuencia durante las décadas recientes. Los registros históricos indican que en las décadas de los sesenta y setenta se registró solamente un evento por década; en los ochenta, el número aumentó a dos eventos y en los noventa a cuatro eventos. Ya para el período 2009-2011 hubo uno o más eventos en cada estación lluviosa, evidenciando una clara tendencia de intensificación.

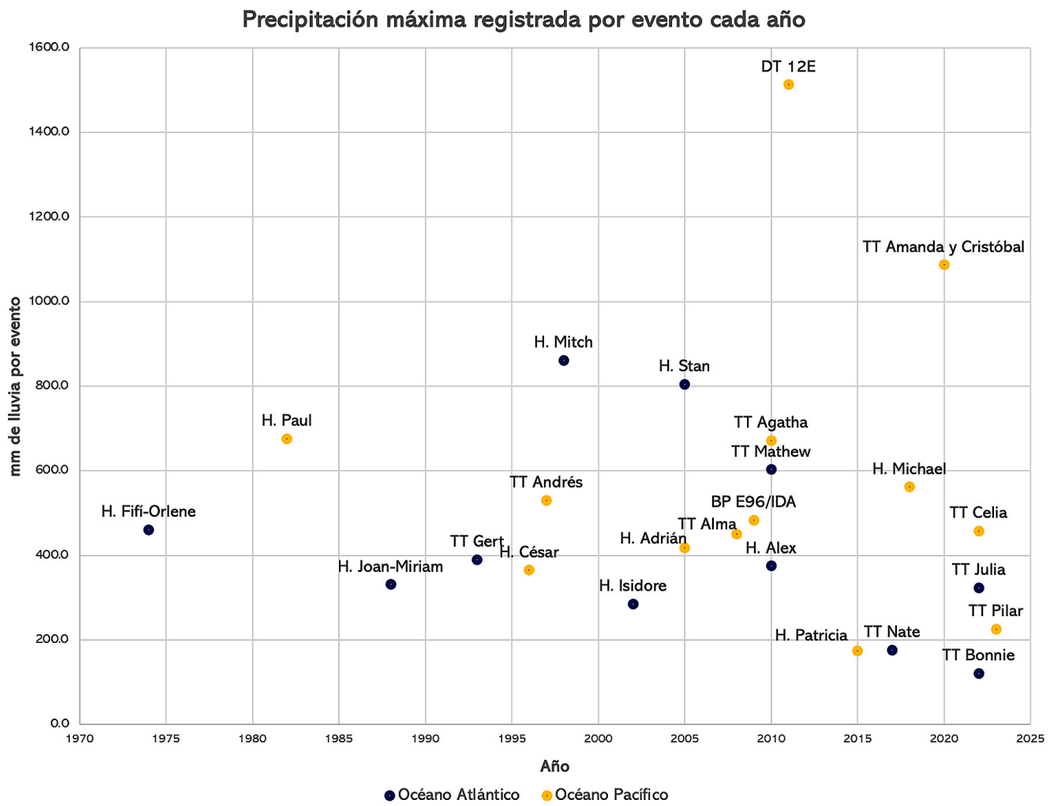


Figura 143. Precipitaciones máximas registradas en una estación durante un evento extremo.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Además, los eventos se concentran principalmente durante la temporada de huracanes (mayo-noviembre), con una notable incidencia en los meses de septiembre y octubre para eventos del Atlántico, y mayo-junio para eventos del Pacífico. La década de 1990 y el período 2005-2011 muestran una intensificación particular en la frecuencia de eventos extremos.

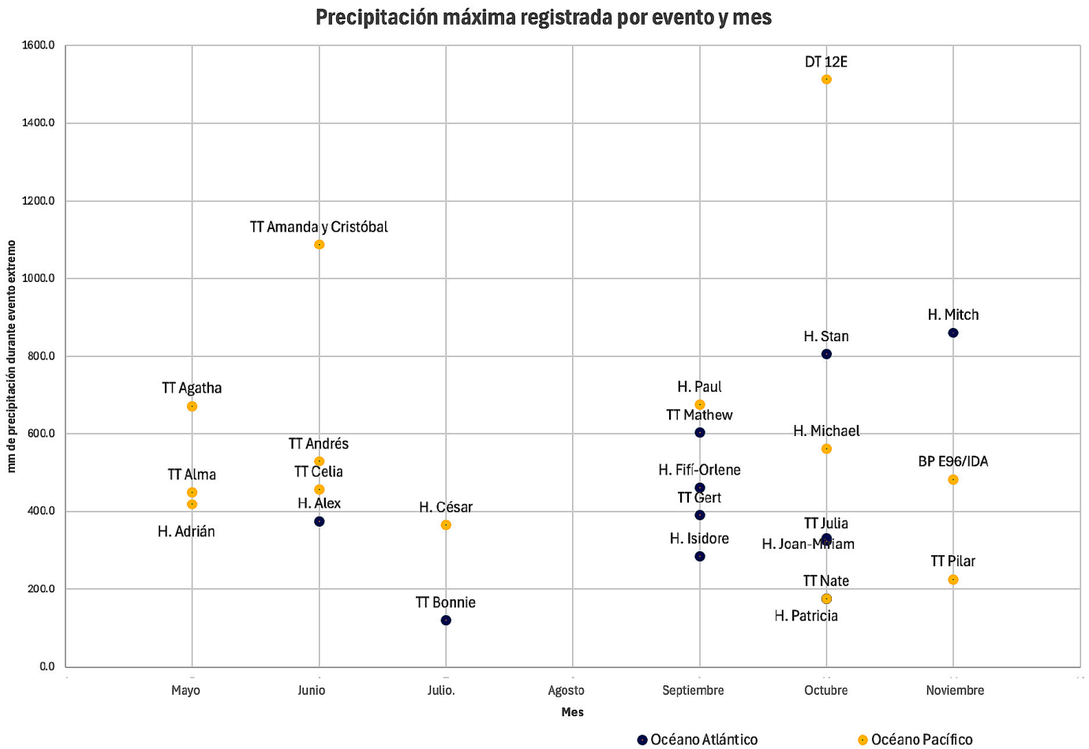


Figura 144. Lluvia acumulada por evento y mes
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

El año 2020 fue particularmente significativo, al ser catalogado como una temporada récord en la cuenca del océano Atlántico. Durante ese período, varios sistemas como Amanda/Cristóbal, Eta e Iota impactaron el territorio salvadoreño. De forma similar, el año 2022 destacó por la alta frecuencia de ciclones tropicales, entre ellos Celia, Bonnie y Julia. Un aspecto notable de esta temporada fue la presencia de ciclones que cruzaron de una cuenca oceánica a otra sin perder su nombre, lo que refleja condiciones inusuales en su evolución y trayectoria.

• Origen y Trayectorias

Al evaluar los 24 eventos, se observa que los eventos extremos que afectan El Salvador se originan en dos cuencas principales: el océano Atlántico y el océano Pacífico. Los sistemas atlánticos tienden a ser más intensos y destructivos, como evidencia el huracán Mitch (1998) con vientos de 288 km/h, que representa el evento más devastador registrado en el período analizado.

Los eventos del Pacífico, aunque generalmente menos intensos en términos de velocidad del viento, pueden generar precipitaciones extraordinarias. La depresión tropical 12E (2011) ejemplifica este patrón, registrando 1,513 mm de lluvia total con vientos relativamente moderados de 55 km/h, pero afectando el 70% del territorio nacional.

• Intensidad y precipitaciones

El análisis de intensidad revela una amplia variabilidad en las características de los eventos. Las precipitaciones máximas en 24 horas oscilan entre 101.6 mm (tormenta tropical Bonnie, 2022) y 483 mm (tormenta tropical Agatha, 2010). La precipitación total por evento muestra un rango aún más amplio, desde 120.6 mm hasta 1,513 mm. Entre los eventos más significativos destacan aquellos que han marcado nuevos récords de intensidad. Tal es el caso de la baja presión E96, asociada al huracán Ida en noviembre de 2009, que estableció un récord de precipitación al acumular 350 mm de lluvia en solo seis horas en el volcán Chichontepec, San Vicente. Este fue el primer evento extremo registrado durante la transición hacia la estación seca, y sus impactos fueron devastadores: provocó deslizamientos de tierra de gran magnitud en el distrito de Verapaz, dejando un saldo de 199 personas fallecidas y 15 mil desplazadas (CEPAL, 2009; MARN, 2013b).

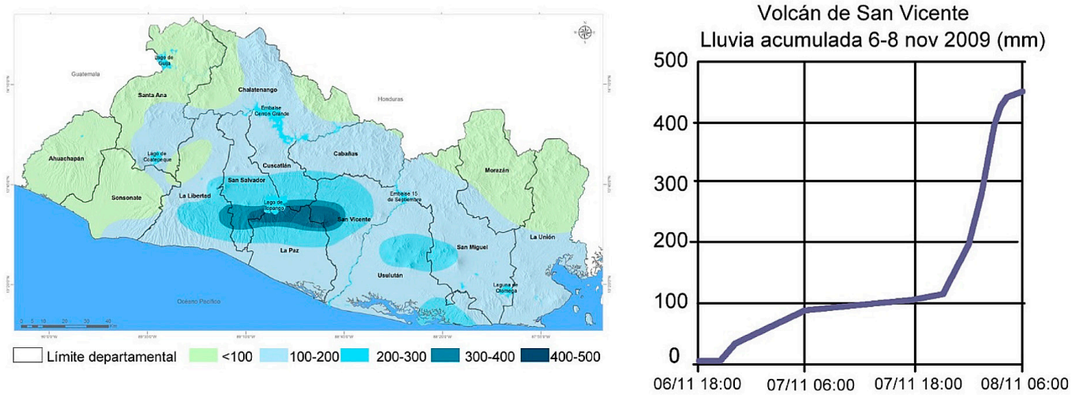


Figura 145. Lluvia registrada durante la baja presión E96 e Ida.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

La depresión tropical 12-E (octubre 2011) estableció récords de duración con diez días de lluvia continua y un máximo acumulado de 1,513 mm en la cordillera del Bálsamo, causando daños cuantificados en aproximadamente 4% del Producto Interno Bruto (PIB).

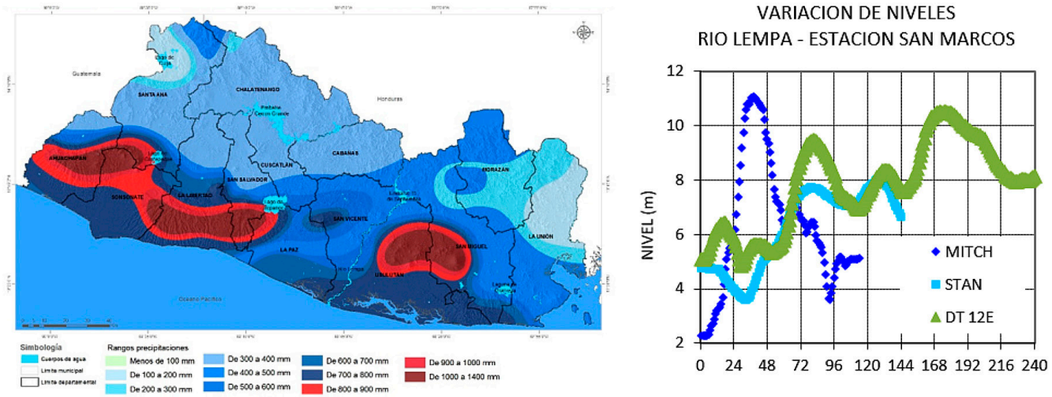


Figura 146. Lluvia acumulada registrada durante Depresión Tropical 12E (izq.) y variaciones de niveles causados por la misma en comparación con otros eventos hidrometeorológicos extremos (der.)
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Las tormentas Amanda y Cristóbal (2020) acumularon entre ambas 1,087.1 mm del 30 de mayo al 7 de junio, y el huracán Mitch (1998) con 861 mm permanece como uno de los eventos más devastadores del período analizado.

- **Distribución Geográfica de Impactos**

Los datos revelan patrones claros en la distribución geográfica de los impactos. El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) aparece afectada en aproximadamente 40 % de los eventos, reflejando tanto su vulnerabilidad como su importancia estratégica para el monitoreo nacional. Las zonas costeras, particularmente la planicie costera occidental, muestran una alta susceptibilidad a impactos, siendo afectadas en más del 50 % de los eventos registrados.

Las cuencas hidrográficas principales del país - río Lempa, río Paz, río Jiboa y río Grande de San Miguel - constituyen corredores naturales que amplifican los efectos de las precipitaciones extremas. La cuenca del río Lempa, siendo la más extensa, aparece afectada recurrentemente, especialmente en su sector bajo donde la topografía plana favorece las inundaciones.

La zona oriental del país, que incluye los departamentos de San Miguel, Usulután y La Unión, presenta una vulnerabilidad particular tanto a eventos húmedos extremos como a sequías meteorológicas, sugiriendo una variabilidad climática más pronunciada en esta región.

- **Impactos económicos y sociales**

El análisis de los impactos económicos de eventos extremos seleccionados entre 1982-2011 revela la magnitud de los daños causados por estos fenómenos. Los datos oficiales muestran pérdidas totales de 2,201.8 millones de dólares, distribuidas entre sectores sociales (498.9 millones), sectores productivos (854.9 millones), infraestructura (655.9 millones) y medio ambiente (177.5 millones).

Los eventos más costosos incluyen la depresión tropical 12-E (2011) con pérdidas de 902.3 millones de dólares, el huracán Mitch (1998) con 388.1 millones, y la tormenta tropical Stan (2005) con 355.6 millones. El huracán Ida (2009) causó pérdidas de 314.8 millones, mientras que la tormenta tropical agatha (2010) generó daños por 112.1 millones.

Esta información económica subraya la vulnerabilidad del país ante eventos extremos y la necesidad de fortalecer la infraestructura resiliente y los sistemas de preparación. Los sectores productivos han sido consistentemente los más afectados, seguidos por la infraestructura y los sectores sociales, lo que indica la necesidad de enfoques integrales de gestión de riesgos.

En la Figura 147 se muestran los ciclones tropicales y los sistemas de baja presión que provocaron lluvias torrenciales en el período 1961-2011 (se especifica la duración del evento, el promedio nacional de lluvia acumulada, y la máxima lluvia acumulada en puntos concretos del país). En la Tabla 21 se muestran los impactos económicos de eventos extremos entre 1982–2011.

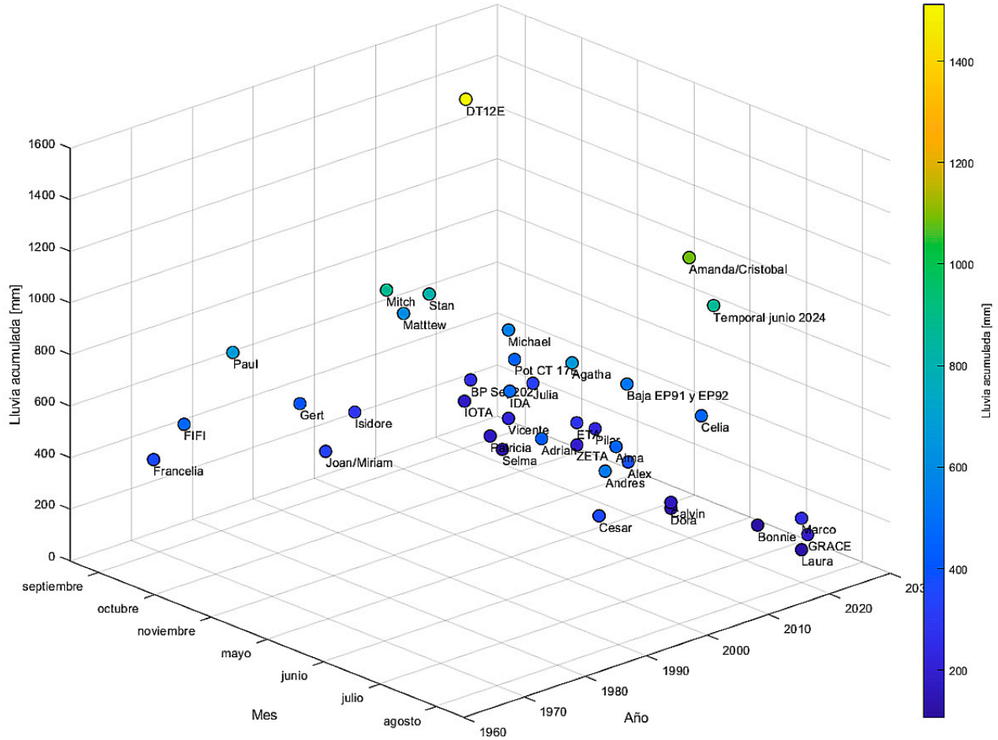


Figura 147. Eventos meteorológicos extremos del Océano Pacífico y Atlántico que han impactado a El Salvador. Fuente (MARN, 2013 a)

Tabla 21. El Salvador: impactos económicos de eventos seleccionados 1982-2011 (millones de dólares)

Evento y año	Sectores sociales	Sectores productivos	Infraestructura	Medio ambiente	Total
Huracán Paul (1982)*	21.1	87.5	20.3	n.d.	128.9
Huracán Mitch (1998)	37.6	269.2	74.3	7.0	388.1
Tormenta Tropical Stan (2005)**	149.5	56.1	113.5	21.8	355.6
Huracán Ida (2009)	39.7	82.4	132.7	60.1	314.8
Tormenta Tropical Agatha (2010)	43.9	20.6	35.5	12.1	112.1
Depresión Tropical 12-E (2011)	207.1	339.1	279.6	76.5	902.3
Totales	498.9	854.9	655.9	177.5	2,201.8

* Incluye impactos económicos ocasionados por el terremoto de 1982.
Fuente (MARN, 2013 a)

• Tendencias y Patrones Evolutivos

Los registros del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) sobre ciclones tropicales confirman que en los años más recientes los eventos extremos han continuado incidiendo en El Salvador con mayor intensidad y frecuencia, denotando un marcado incremento en su ocurrencia.

La década de 2010-2020 muestra una alternancia más marcada entre eventos de precipitación extrema y sequías prolongadas. Los eventos recientes (2020-2023) muestran características particulares, incluyendo la ocurrencia de sistemas tropicales consecutivos y la intensificación rápida de algunos eventos.

4.5.3 Inundaciones en El Salvador

Las inundaciones en El Salvador son fenómenos recurrentes provocados principalmente por lluvias intensas asociadas a sistemas meteorológicos como tormentas y depresiones tropicales. Su ocurrencia depende tanto de factores naturales —como la topografía y el régimen de lluvias— como de causas humanas, entre ellas la urbanización desordenada, el uso inadecuado del suelo y la insuficiencia en infraestructura de drenaje.

Según el Catálogo Cualitativo de Inundaciones del Ministerio de Medio Ambiente, entre 2010 y 2011 se registró un número elevado de eventos, mientras que entre 2012 y 2017 se observó una disminución. A partir de 2018, los reportes aumentaron nuevamente y se mantuvieron frecuentes hasta 2022.

Entre los eventos más significativos destacan el sistema Michael (2018), las tormentas Amanda y Cristóbal (2020), y Bonnie (2022), los cuales generaron inundaciones severas en diversas regiones del país.

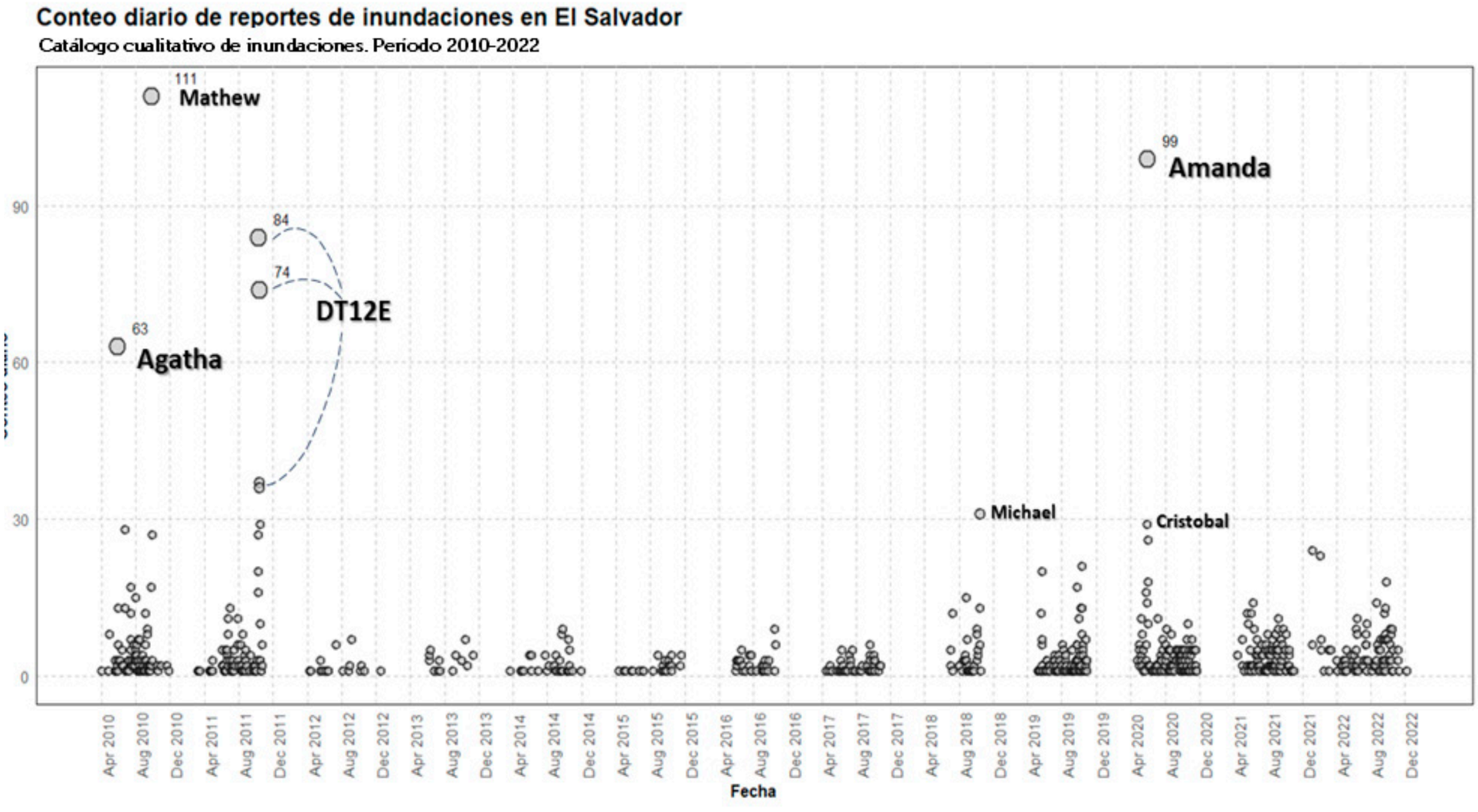


Figura 148. Conteo diario de reportes de inundaciones en El Salvador.
Fuente: Catálogo cualitativo de inundaciones del Centro de Pronóstico Hidrológico del Ministerio de Medio Ambiente, para el período 2010-2022.

La Figura 149 presenta la distribución mensual de las inundaciones registradas entre 2010 y 2022. Octubre destaca como el mes con mayor frecuencia, concentrando el 26 % del total de reportes. En contraste, los meses de julio y agosto muestran una disminución, lo cual coincide con la reducción típica de lluvias durante la canícula. Las precipitaciones aisladas en los meses de la época seca también pueden provocar inundaciones, aunque estas son menos frecuentes.

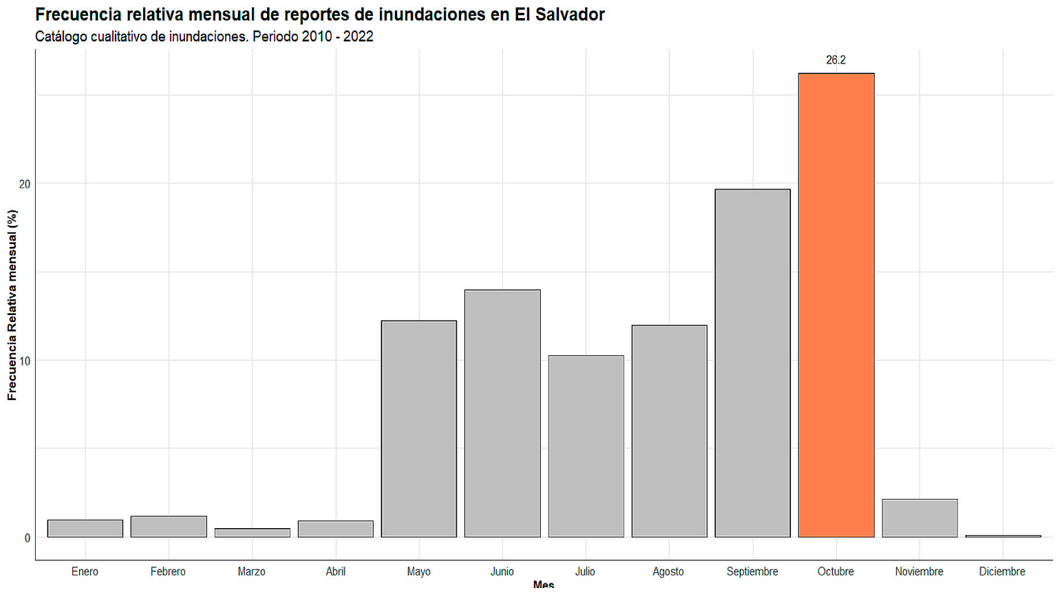


Figura 149. Frecuencia relativa de reportes de inundaciones en El Salvador, según el mes de ocurrencia, para el período 2010-2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En El Salvador, de acuerdo con los factores físicos naturales detonantes de las inundaciones, estas se clasifican en:

• Inundaciones pluviales: generadas por los procesos de escorrentía en sitios con poca capacidad de infiltración de los suelos. La intensidad de las lluvias es el detonante natural principal de la inundación. Factores locales condicionan características de las inundaciones pluviales como el área de afectación y el daño generado en superficie. Además, estos factores están asociados principalmente a las actividades humanas como la impermeabilización de suelos, red de drenaje pluvial insuficiente, entre otros. Entre las inundaciones pluviales se encuentran las inundaciones que ocurren en centros urbanos y los anegamientos de terrenos en zonas rurales.

• Inundaciones fluviales: generadas por el comportamiento de una cuenca hidrográfica en respuesta de procesos de precipitación y escorrentía en la cuenca. La distribución temporal y espacial de la lluvia, así como el comportamiento del caudal dentro de los cauces son los detonantes naturales de estas inundaciones. Las crecidas repentinas en ríos de respuesta rápida y los desbordamientos de ríos principales en planicies aluviales forman parte de este tipo de inundaciones.

• Inundaciones costeras: producto de una interacción entre la marea, el oleaje y el flujo de los ríos en la desembocadura al océano Pacífico. Los fenómenos oceanográficos corresponden con los factores naturales, principales generadores de las inundaciones costeras, y en la interacción tierra-mar los procesos geomorfológicos, que forman barras de arena temporales, corresponden con un factor importante en inundaciones por desbordamientos en desembocaduras a inicios de la estación lluviosa.

Entre el período 2010-2022, en El Salvador se generaron reportes de aproximadamente 3,100 inundaciones, entre pluviales y fluviales (ver Figura 150). Estos reportes generados a través de redes sociales, medios de comunicación, red de observadores locales, entre otros, muestran una mayor concentración en las zonas urbanas principales (Área Metropolitana de San Salvador, Santa Ana, Sonsonate, San Miguel, La Unión y valle de San Andrés) y hacia la franja costera del país. Las inundaciones urbanas y los desbordamientos de ríos constituyen las amenazas hidrológicas más reportadas por la población.

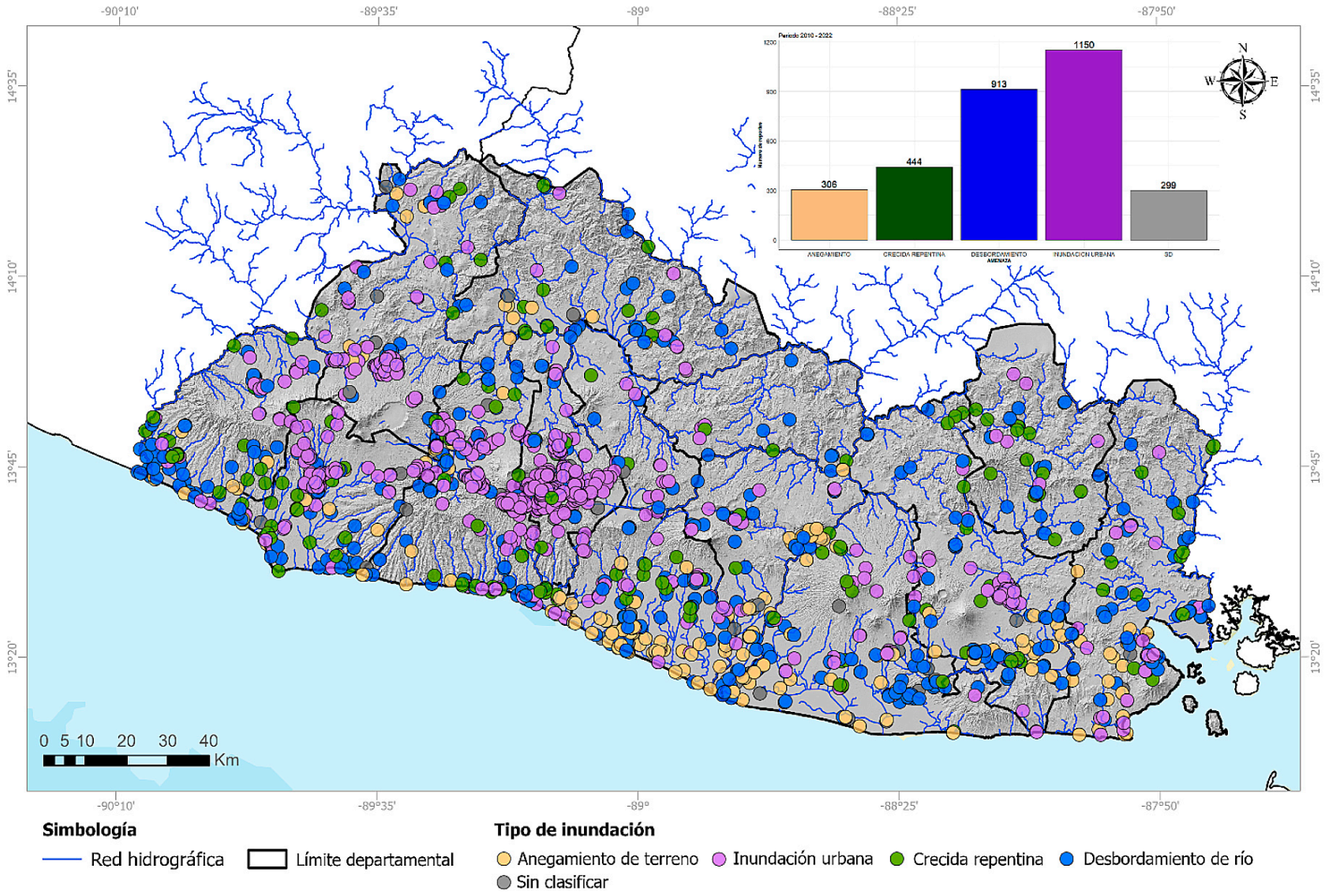


Figura 150. Ubicación de los reportes de inundaciones en El Salvador clasificados según el tipo de amenaza hidrológica, para el período 2010-2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Durante el período analizado, las inundaciones pluviales y fluviales se han concentrado principalmente en los departamentos de San Salvador (621 reportes) y La Libertad (410), seguidos por San Miguel (298), según lo mostrado en la Figura 146. A nivel distrital, los mayores números de reportes se registraron en San Salvador (321), San Miguel (205) y San Francisco Menéndez (130), seguidos por los distritos de La Libertad y Santa Ana.

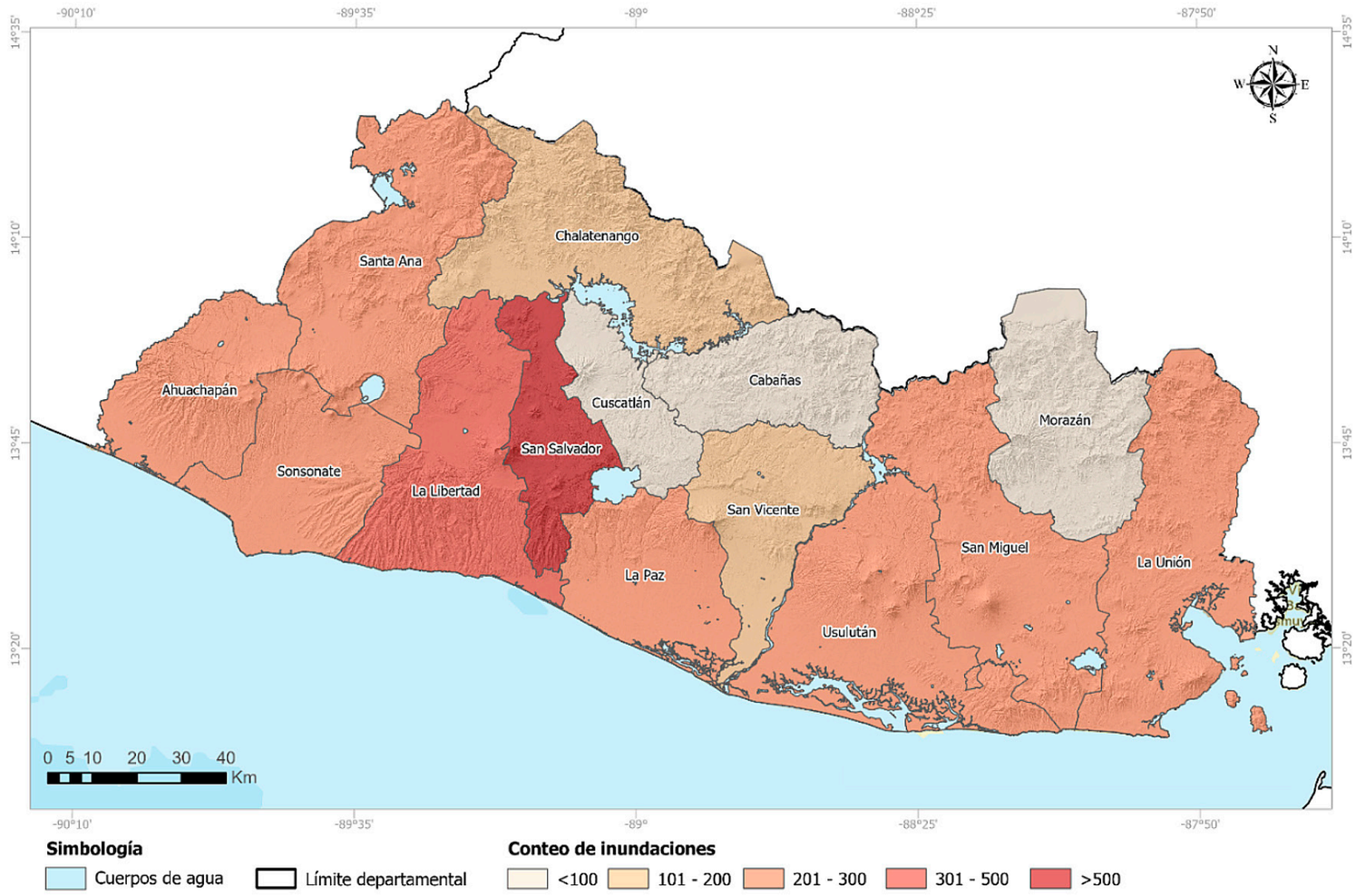


Figura 151. Conteo de inundaciones reportadas por departamento para el período 2010-2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

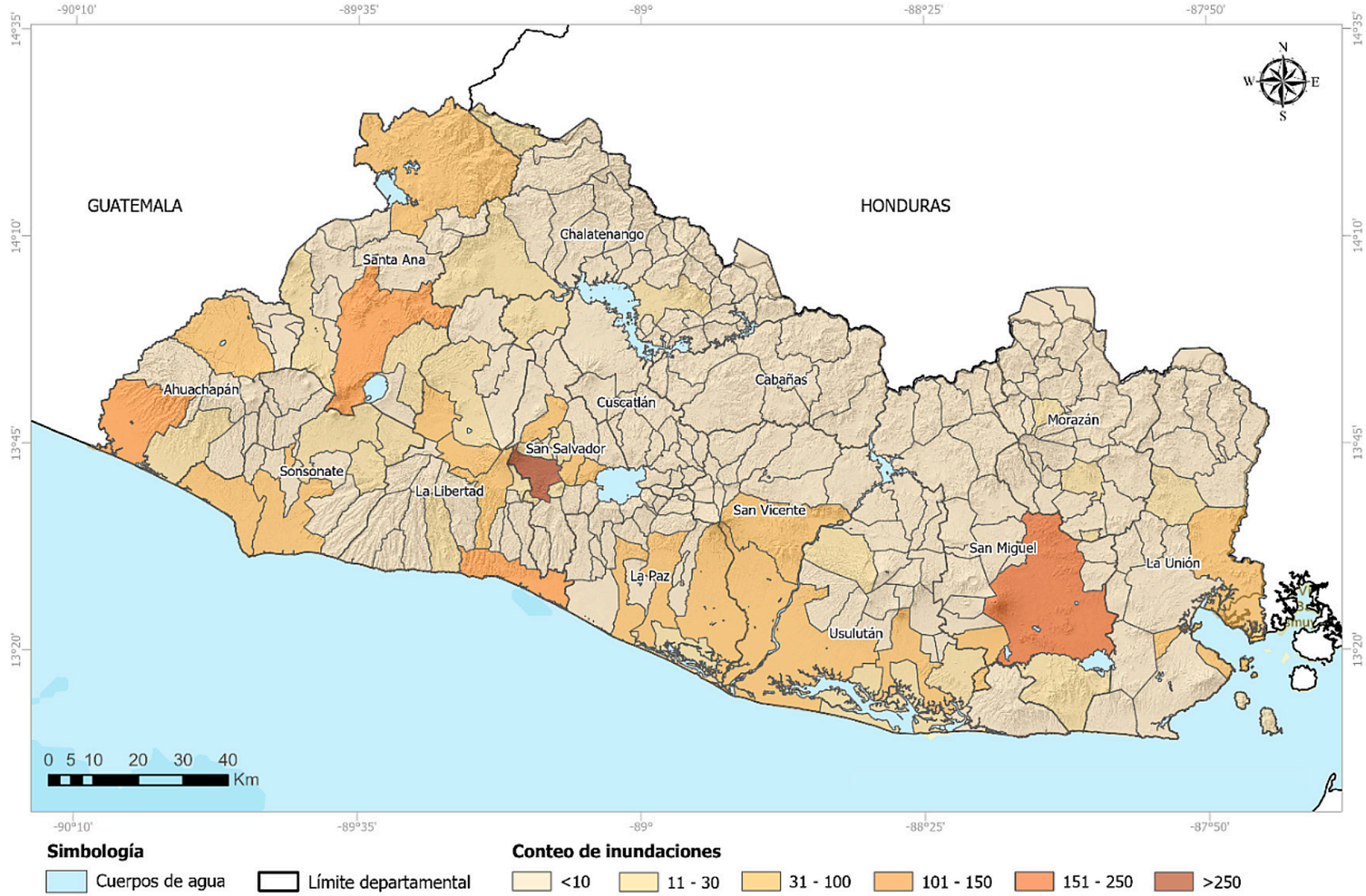


Figura 152. Conteo de inundaciones reportadas por distritos para el período 2010-2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Una visualización de las inundaciones con enfoque en cuencas hidrográficas permite identificar las regiones con mayor recurrencia de estos eventos. Destacan las cuencas Lempa Alta, Grande de San Miguel, Mandinga-Comalapa y Grande de Sonsonate, donde se concentran los registros más elevados. En estas regiones resulta prioritario profundizar en el análisis de los procesos lluvia–escorrentía, así como en la interacción con factores antropogénicos que pueden estar agravando la ocurrencia y severidad de las inundaciones.

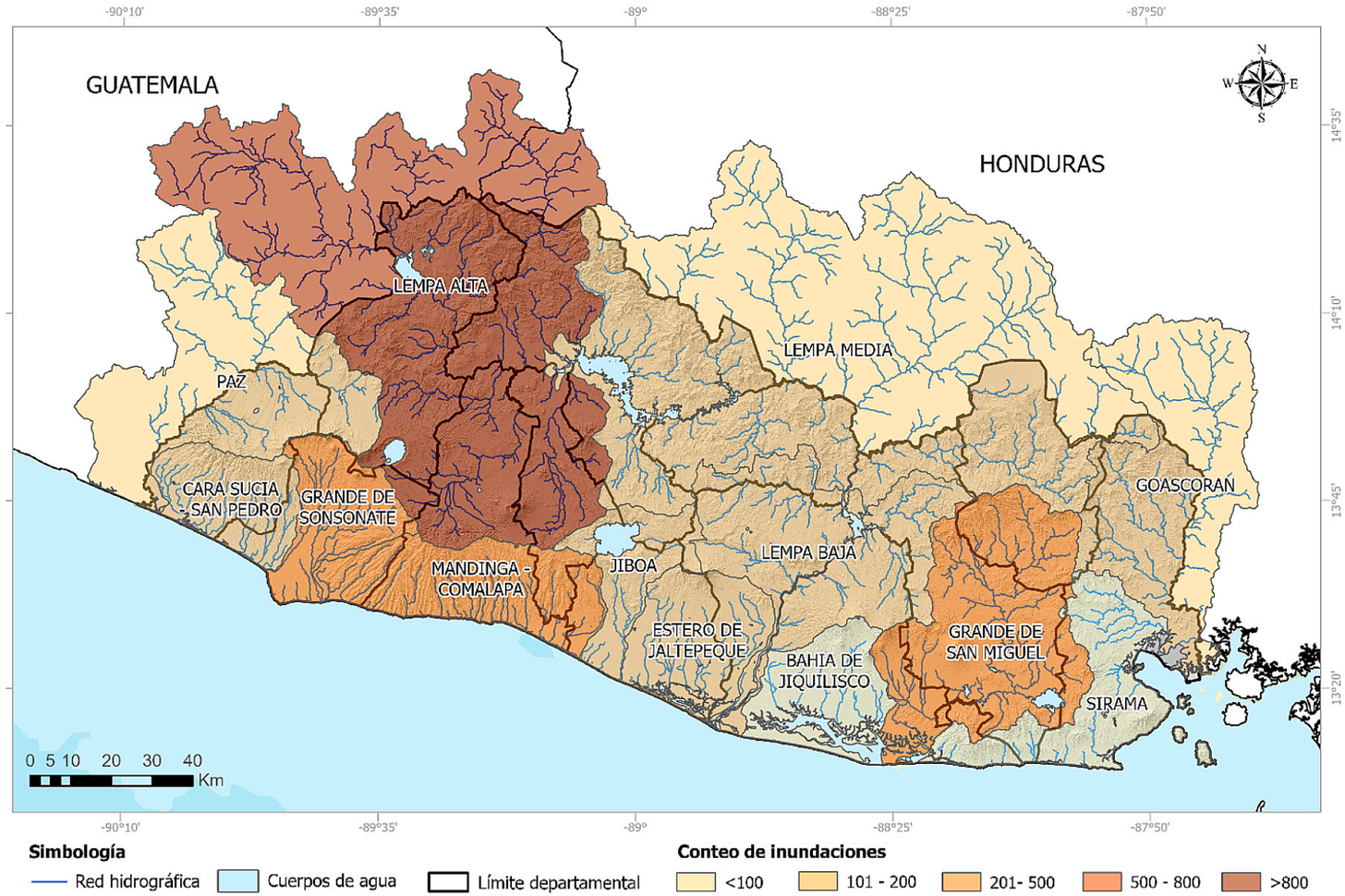


Figura 153. Inundaciones por región hidrográfica.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• **Susceptibilidad y amenaza de inundaciones en El Salvador**

Según el mapa nacional de susceptibilidad a inundaciones, aproximadamente el 10 % del territorio salvadoreño presenta condiciones propensas a este tipo de amenaza, lo que equivale a un área estimada de 2,000 kilómetros cuadrados. De esta superficie, cerca del 80 % se localiza en la franja costera, caracterizada por elevaciones menores a los 10 metros sobre el nivel medio del mar (m s. n. m.).

Este mapa fue desarrollado a partir del análisis de eventos históricos relevantes, como el huracán Mitch (1998), las tormentas tropicales Stan (2005) y Agatha (2010), así como la depresión tropical 12E (2011), entre otros. A partir de esta información, se identificaron y delimitaron zonas susceptibles a inundaciones, clasificadas en tres niveles según su frecuencia:

- Zona de susceptibilidad moderada, correspondiente a áreas expuestas a inundaciones extraordinarias.
- Zona de susceptibilidad alta, con eventos más recurrentes.
- Zona de susceptibilidad muy alta, donde la ocurrencia de inundaciones es aún más frecuente.



Figura 154. Mapa de susceptibilidad a inundaciones.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Asimismo, el mapa de amenaza por inundaciones, además de delimitar las zonas potencialmente inundables, incorpora la estimación de profundidades de inundación asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno de tormentas.

El mapa de referencia nacional considera duraciones de tormentas de 1, 2 y 5 días, y períodos de retorno de 2, 25, 50 y 100, y es utilizado como herramienta fundamental en planes de ordenamiento territorial, elaboración de planes de emergencia y evaluación de riesgo hídrico. De igual forma el mapa de amenaza de inundaciones del Área Metropolitana de San Salvador, considera períodos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años y duraciones de tormenta desde los 30 hasta 2170 minutos.

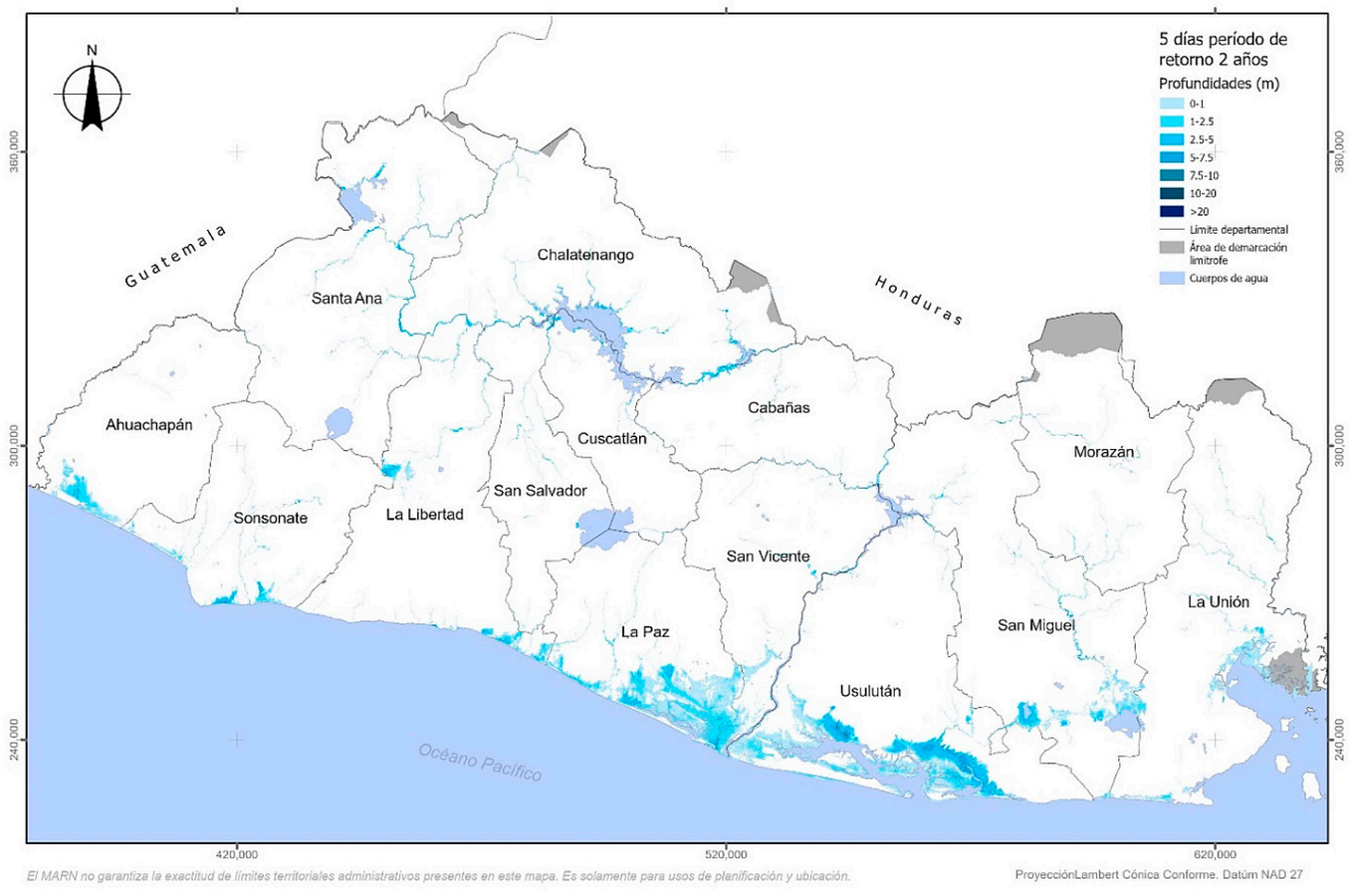


Figura 155. Mapa de amenaza (probabilístico) a inundaciones para un periodo de retorno de 2 años y 5 días de duración de tormenta. Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• **Comportamiento de las lluvias en el Área Metropolitana de San Salvador**

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) presenta una alta vulnerabilidad frente a amenazas hidrometeorológicas, en particular inundaciones fluviales y pluviales, las cuales han generado impactos significativos en los últimos años. Estas amenazas se vinculan tanto al desbordamiento de ríos y quebradas como al colapso de sistemas de drenaje urbano y la saturación de suelos.

La caracterización del comportamiento de la lluvia en el AMSS —considerando su intensidad, duración y distribución espacial y temporal— se basa en el análisis de 14 distritos pertenecientes a los departamentos de San Salvador y La Libertad. Esta región cuenta con una red hídrica compuesta por ríos de respuesta rápida y quebradas estacionales, principalmente ubicadas en las cuencas de los ríos Acelhuate y Tomayate, siendo la del Acelhuate la que ha registrado los mayores impactos hidrológicos en el Área Metropolitana.

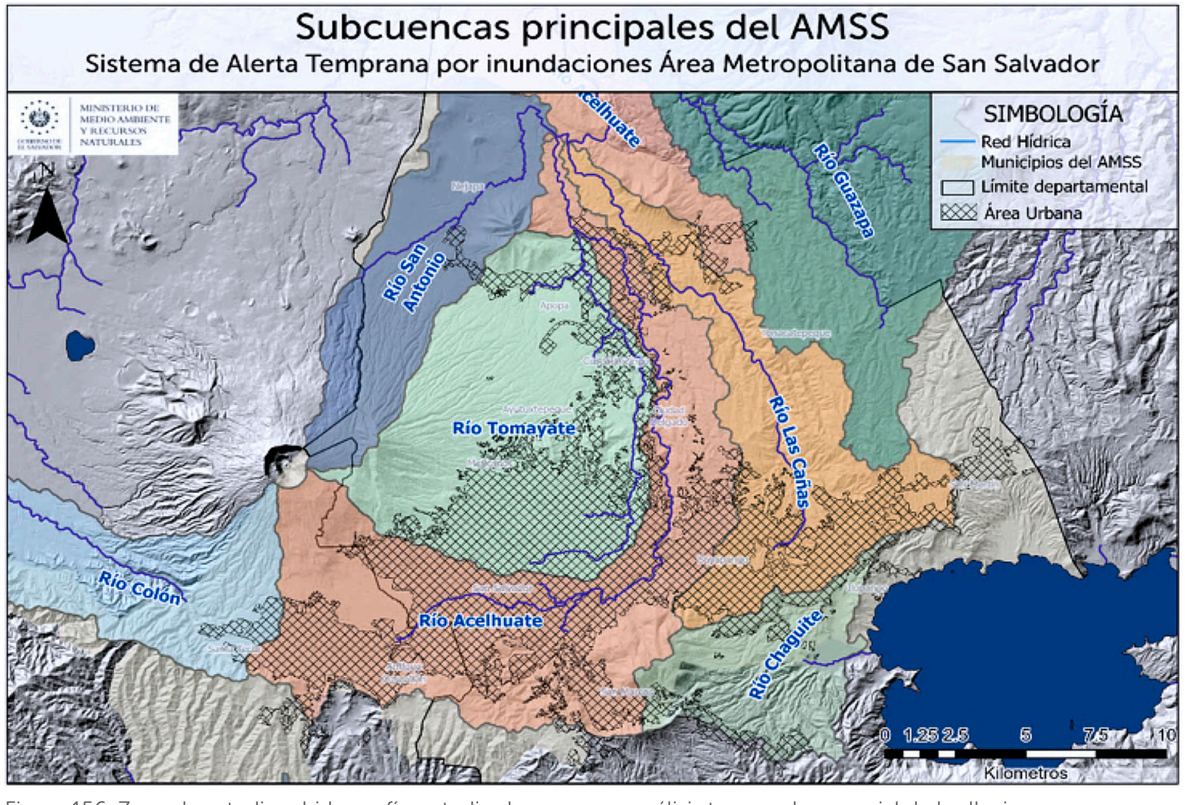


Figura 156. Zona de estudio e hidrografía, estudio de caso para análisis temporal y espacial de las lluvias.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• **Red de monitoreo en el AMSS**

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) cuenta con una red de monitoreo hidrometeorológico operada por el Sistema de Alerta Temprana del Ministerio de Medio Ambiente, a través de su Observatorio de Amenazas. Esta red incluye estaciones telemétricas en el AMSS, las cuales transmiten información cada 5 a 15 minutos sobre variables como nivel de ríos, temperatura, presión atmosférica y precipitación. Esta infraestructura ha permitido analizar, entre 2010 y 2022, la dinámica temporal y espacial de las lluvias en la región.

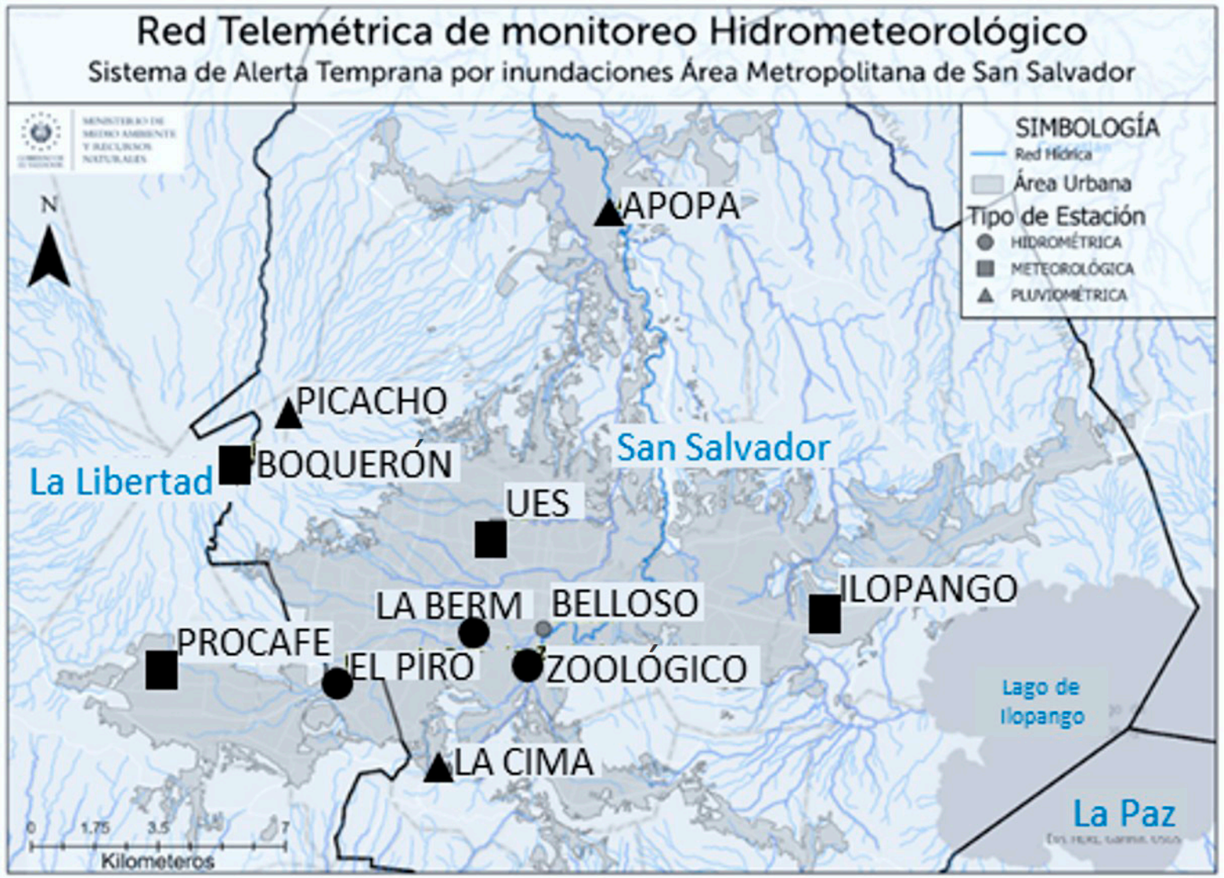


Figura 157. Red telemétrica del AMSS, estudio de caso para análisis temporal y espacial de las lluvias.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Para este análisis se procesaron datos horarios de precipitación de los registros de mayo a octubre, utilizando herramientas especializadas que permitieron generar series de cinco minutos, depurar errores, completar vacíos de información y eliminar valores extremos. Se aplicaron metodologías estadísticas para identificar eventos de lluvia significativos, caracterizarlos por su intensidad y duración, y determinar su comportamiento dentro del año y del día. Adicionalmente, se utilizó la prueba Mann-Kendall para evaluar tendencias de eventos extremos, considerando umbrales de intensidad de 30 y 50 mm/h (Renderos y Orellana, 2024).

Los resultados muestran que los eventos de tormenta en el AMSS presentan una distribución variada en duración y magnitud, reflejando la diversidad de eventos y con acumulados de lluvia mayormente inferiores a 20 mm, con una curva inclinada hacia la derecha en cada estación, revelando patrones generales similares entre ellos (ver Figura 158). Se destaca que las tormentas en el país tienden a ser de rápido desplazamiento y corta duración, categorizadas en el primer cuartil, seguidas de eventos con duraciones moderadas en el segundo cuartil. Por otra parte, el análisis estadístico con la prueba de Mann-Kendall concluyó que no hay una tendencia significativa de aumento o disminución en los eventos de alta intensidad de precipitación entre 2010 y 2022.

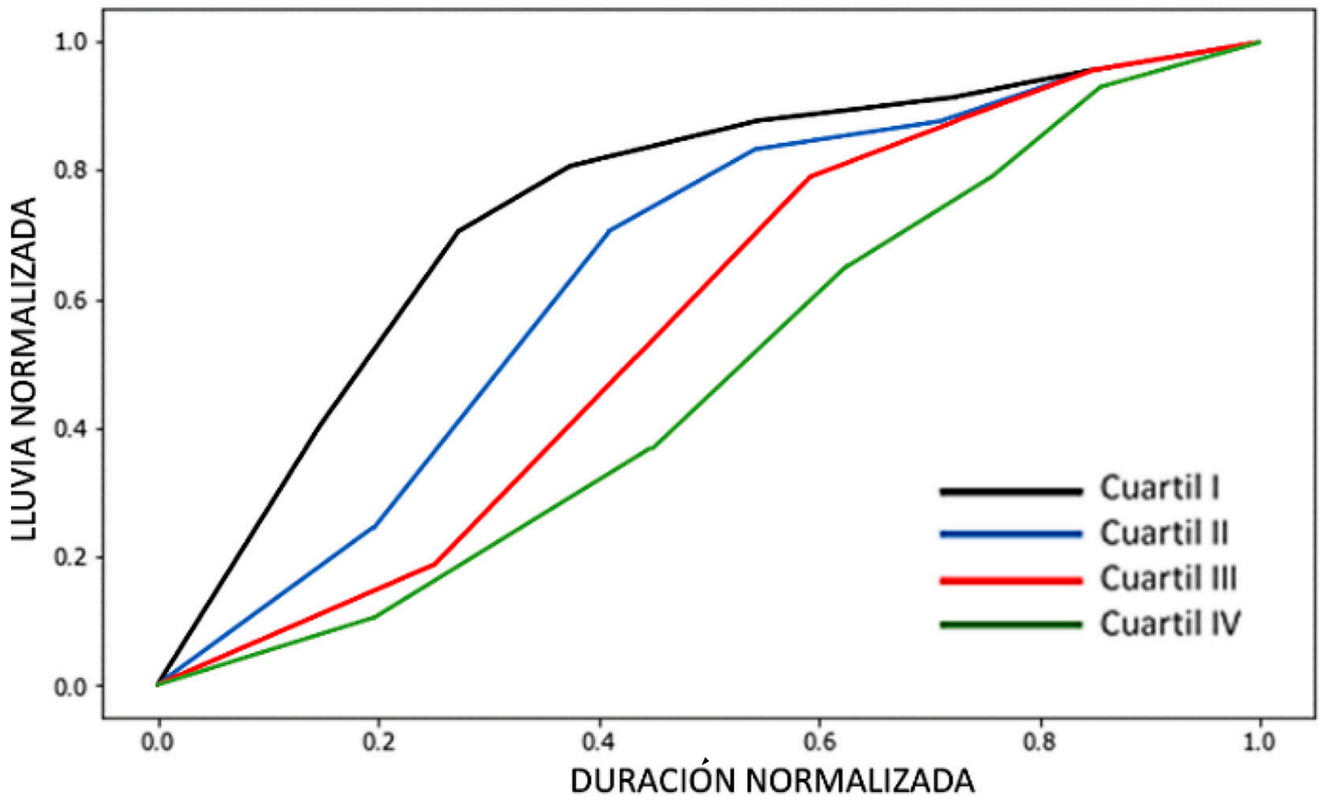


Figura 158. Ejemplos de curvas de Huff obtenidas. Gráfico para una estación, mostrando una curva por categoría.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Los datos confirman que las lluvias en el AMSS, suelen empezar alrededor del mediodía, aumentando hacia la tarde y la noche. Se identifican tres períodos clave de incremento en las precipitaciones: de 1:00 p. m. a 3:00 p. m.; de 4:00 p. m. a 6:00 p. m. y, de 8:00 p. m. a 10:00 p. m.

En el análisis espacial, las zonas de mayor altitud como el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo presentan los acumulados anuales y las horas lluviosas más elevadas, con diferencias de hasta 500 mm entre zonas altas y bajas del AMSS. Además, eventos como la tormenta tropical Amanda o diversas ondas tropicales han demostrado que la distribución de las lluvias varía considerablemente según el tipo de fenómeno y las condiciones topográficas.

Finalmente, las microcuencas de los ríos Acelhuate y Tomayate registran la mayor incidencia de impactos por inundaciones, tanto pluviales como fluviales. Las cuencas del río Las Cañas, Chagüite y San Antonio presentan un menor número de impactos por desbordamientos (Figura 159). Sin embargo, se observó una deficiencia en el catálogo cualitativo de inundaciones, ya que muchos eventos no están correctamente clasificados con el fenómeno meteorológico limitando la capacidad para realizar el análisis.

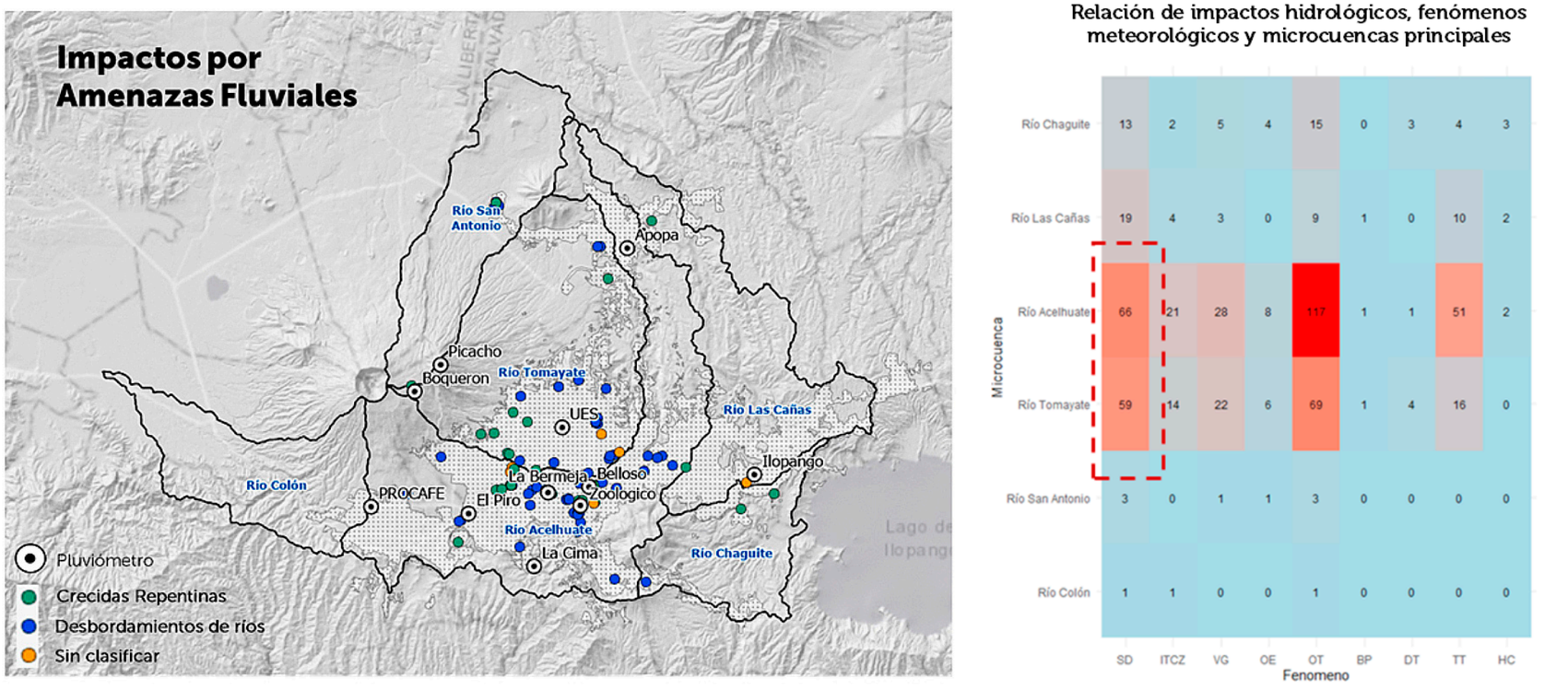


Figura 159. Distribución espacial de los impactos por amenazas fluviales en el AMSS (izquierda). Relación entre los impactos por amenazas hidrológicas según el fenómeno meteorológico generador de lluvias y la microcuenca de registro (derecha)
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

4.5.4 Sequías en El Salvador

La ubicación geográfica de El Salvador en Centroamérica, rodeado de dos océanos, lo hace vulnerable a los cambios de temperatura en las vertientes oceánicas. En muchos casos el fenómeno de la canícula y la sequía meteorológica es desencadenada por el calentamiento de las aguas del océano Pacífico Ecuatorial Central y en otras ocasiones por un enfriamiento del océano Atlántico Tropical Norte. El impacto de la sequía se aumenta por factores como la deforestación, mal uso de la tierra, la erosión, tipos de suelo, entre otros.

Históricamente, la variabilidad climática océano-atmosférica ha tenido una fuerte influencia sobre el clima salvadoreño, provocando alternancia de períodos de sequías e inundaciones. En general, los eventos de El Niño se asocian a sequías, mientras que los de La Niña, a lluvias intensas. Estas fluctuaciones impactan directamente la agricultura, el recurso hídrico y los medios de vida rurales, particularmente en comunidades con alta vulnerabilidad socioeconómica.

Desde el punto de vista climatológico la sequía es una manifestación común en todo tipo de regímenes climáticos, independiente del mayor o menor volumen de precipitación que registren. La sequía supone una desviación con respecto a los valores considerados habituales que viene marcada por su temporalidad, no se trata de un fenómeno permanente como pueda ser la aridez.

Las sequías generan fuertes impactos en la producción agrícola y seguridad alimentaria de la población. Más del 85 % de la agricultura salvadoreña es de secano y depende de las lluvias entre mayo y octubre. Por ello, las reducciones de precipitación en este período pueden desencadenar crisis agrícolas vinculadas a la disminución en rendimientos y/o disminución en los niveles de rentabilidad para los productores. Entre 2014 y 2015, por ejemplo, las pérdidas superaron los 140 millones de dólares, mientras que la sequía de 2018 provocó daños por más de 42 millones (DGEA-MAG, 2018).

Los eventos secos y las altas temperaturas que los acompañan, también tienen repercusiones en la salud, la ganadería y los ecosistemas. La reducción prolongada de lluvias afecta la disponibilidad de agua superficial y subterránea, comprometiendo el abastecimiento para consumo humano, la agricultura, la producción de energía y la sostenibilidad ambiental. A esto se suma el aumento de enfermedades transmitidas por vectores, incremento de plagas agrícolas, deterioro de los pastizales e incremento del riesgo de incendios forestales. Además, el calentamiento del Pacífico costero asociado a El Niño reduce significativamente la productividad pesquera.

- **Régimen de lluvias**

El régimen pluviométrico o lluvioso que se extiende entre abril y octubre presenta cuatro variantes o regiones en el país:

a) Regiones costeras, régimen bimodal con máximos de precipitación en junio y septiembre, separados por una disminución en julio-agosto. (Figura 160)
b) Regiones de valle interiores, no es claro un máximo, ni tampoco el déficit en julio. (Figura 161)
c) Regiones de la zona norte, bimodal, con un primer máximo en junio, reducción en julio y segundo pico en septiembre. (Figura 162)
d) Región noroccidental, cercano al lago de Güija, régimen similar a valles interiores, pero con menor cantidad de lluvia. (Figura 163)

Durante julio y agosto, es común la ocurrencia de una disminución temporal de las lluvias conocida como canícula, caracterizada por varios días consecutivos sin lluvia. Este fenómeno genera estrés hídrico en los cultivos, particularmente en maíz y frijol. La canícula suele presentarse entre la segunda quincena de julio y los primeros días de agosto. Un caso extremo ocurrió en julio de 2014, cuando se registraron acumulados inferiores a 10 mm en la zona suroriental, representando un déficit del 95 % respecto al promedio mensual.

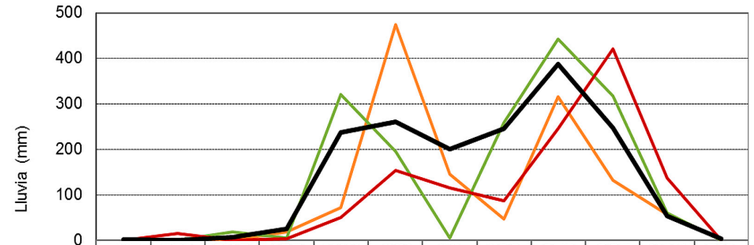
La mayor frecuencia de la canícula ocurre en la segunda quincena de julio y los primeros diez días de agosto, teniéndose registro de disminuciones extremas como la de julio de 2014, cuando en la zona suroriental de El Salvador se registraron -en el mes- cantidades de lluvia acumuladas inferiores a 10 mm, es decir un déficit del 95 % respecto al promedio o normal.

Las Figuras de las 160 a la 163, muestran el régimen de precipitación para distintas estaciones ubicadas en las cuatro regiones mencionadas, mostrando sus valores medios climatológicos y valores registrados en años muy secos (1997, 2014, 2015). En las regiones costeras, la mayoría de las estaciones presentan un máximo primario de precipitación en septiembre y un máximo secundario en junio, o sea un comportamiento bimodal, así como disminución clara y fuerte de la misma en julio y agosto, tal como se observa en la Figura 160 donde aparece la distribución anual de la lluvia de La Unión, representativa de la zona costera.

En las regiones de los valles interiores, el comportamiento mensual de las estaciones muestra un solo máximo o unimodal en el mes de septiembre, no se logra distinguir siempre el déficit de julio, y no se observa déficit en agosto, siendo esta su principal característica como se muestra en la Figura 161 en la estación meteorológica de Ilopango.

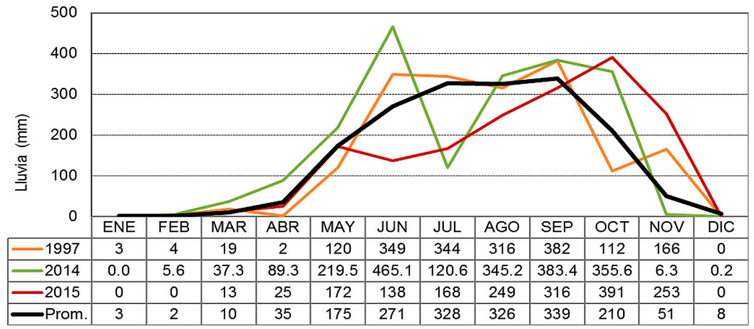
La región de la zona norte muestra las estaciones en relación con la distribución mensual de la lluvia tipo bimodal, el máximo de precipitación en junio y disminución en julio. Por otro lado, anualmente las estaciones presentan una tendencia similar, diferenciándose principalmente en las cantidades de precipitación, ya que cuenta con estaciones de diferentes alturas, observándose los valores de lluvia anuales más altos por arriba de los 2500 mm (Figura 162, estación Nueva Concepción).

La región noroccidental, cercana al lago de Güija, tiene un comportamiento parecido en la distribución mensual de la lluvia de las estaciones comprendidas en la región de los valles interiores, pero con lluvia acumulada en menor cantidad; es bimodal, pero el máximo principal se observa en junio y una ligera disminución en julio (ver Figura 163, estación Güija).



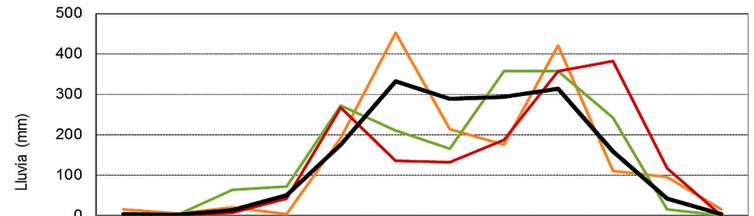
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1997	2	3	0	19	72	474	146	47	316	133	58	2
2014	0	1	19	5	320	196	6	260	443	318	61	0
2015	0	16	0	3	51	153	115	87	245	421	138	0
Prom.	2	1	7	25	237	261	200	246	387	248	54	4

Figura 160. Región costera con comportamiento bimodal, máximo en septiembre, disminución en julio y agosto. Lluvia mensual 1980-2010 y años secos 1997, 2014 y 2015, estación La Unión.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



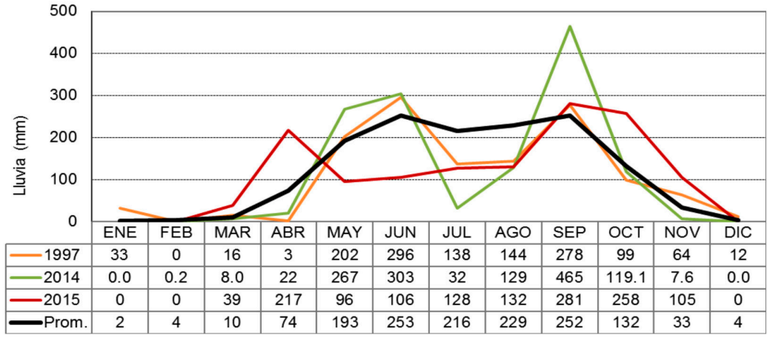
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1997	3	4	19	2	120	349	344	316	382	112	166	0
2014	0.0	5.6	37.3	89.3	219.5	465.1	120.6	345.2	383.4	355.6	6.3	0.2
2015	0	0	13	25	172	138	168	249	316	391	253	0
Prom.	3	2	10	35	175	271	328	326	339	210	51	8

Figura 161. Región valles interiores con comportamiento unimodal, máximo en septiembre, sin canícula identificable. Lluvia mensual 1980-2010 y años secos 1997, 2014 y 2015, estación Ilopango.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1997	16	6	21	4	192	453	214	175	420	111	95	16
2014	0.0	2.2	63.9	72.8	272.0	211.0	165.9	357.6	358.3	242.5	15.2	0.1
2015	0.1	0.4	7.2	42	268	136	133	187	357	382	117	1
Prom.	4	3	14	50	176	333	289	294	314	159	42	5

Figura 162. Región zona norte con comportamiento bimodal, máximo en junio, leve disminución en julio. Lluvia mensual 1980-2010 y años secos 1997, 2014 y 2015, estación Nueva Concepción.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1997	33	0	16	3	202	296	138	144	278	99	64	12
2014	0.0	0.2	8.0	22	267	303	32	129	465	119.1	7.6	0.0
2015	0	0	39	217	96	106	128	132	281	258	105	0
Prom.	2	4	10	74	193	253	216	229	252	132	33	4

Figura 163. Región zona noroccidental con comportamiento bimodal, poca diferencia entre los máximos de junio y septiembre, ligera disminución en julio. Lluvia mensual 1980-2010 y años secos 1997, 2014 y 2015, estación Güija.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

- **Relación entre El Niño, la canícula y las sequías agrícolas**

La relación entre la lluvia y el fenómeno El Niño indican que en julio y agosto el déficit se incrementa, siendo claro esto para la zona costera y el oriente de El Salvador, con mayor énfasis durante episodios fuertes y muy fuertes, los que tienen una frecuencia de alrededor de 10 años y una duración entre 12 y 36 meses.

Las canículas convertidas en sequías agrícolas registradas en la zona oriental del país, donde se han reportado cuantiosas pérdidas de las cosechas, se presentan mayoritariamente por una combinación de déficit de lluvias en junio, situación que se prolonga hasta julio y agosto. Los meses de junio secos ocurren más frecuentemente con episodios fríos en el Atlántico Tropical Norte (ATN), mientras que en julio y agosto se presentan con la combinación de eventos cálidos en el Pacífico (“Niños”) y fríos en el ATN.

Se ha observado que los episodios El Niño han aumentado su frecuencia en el transcurso de los años y el mismo comportamiento han tenido los períodos caniculares entre julio y agosto. Cuando se analiza el número de días secos no consecutivos entre junio y agosto en la zona oriental, se destaca que en años deficitarios como 1972, 1977, 1982, 1991, 1994, 1997, 2001, 2004, 2012, 2014, 2015 se contabiliza una cantidad cercana a los 60 días secos (ver Figura 164).

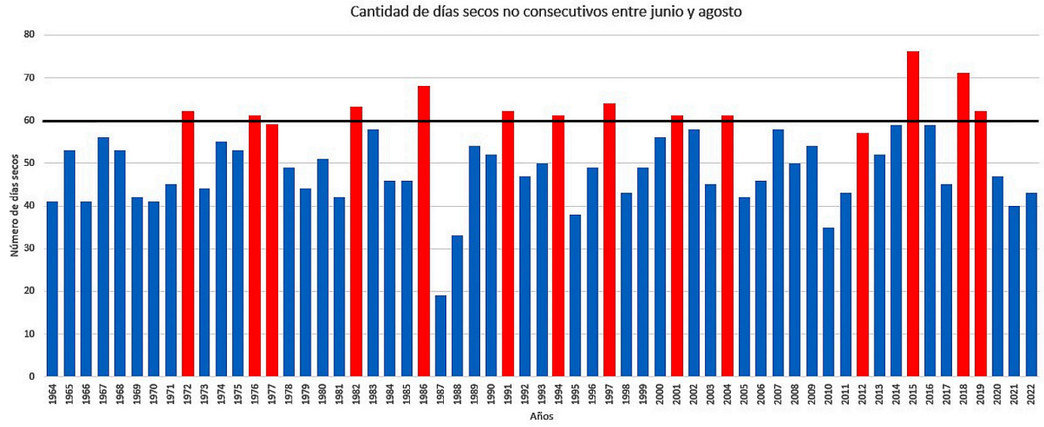


Figura 164. Número de días secos en trimestre junio-agosto. San Miguel.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• Clasificación de la sequía meteorológica y susceptibilidad territorial

La sequía meteorológica se clasifica de acuerdo al número de días secos consecutivos (definidos como aquellos con menos de 1 mm de lluvia). Para el país se define como débil cuando se presentan 5 a 10 días secos consecutivos, moderada por períodos de 11 a 15 días secos consecutivos y fuerte en períodos mayores de 15 días.

La Figura 165 muestra la propensión (susceptibilidad) de ocurrencia de la sequía en el territorio nacional cuando se produce anomalía cálida en la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Ecuatorial en la región NIÑO 3.4 (conocida comúnmente como El Niño) y una anomalía negativa de la temperatura en el océano Atlántico Tropical Norte (ATN). Bajo estas condiciones, se encuentra que aproximadamente:

- El 70 % del territorio nacional es susceptible a sufrir una sequía meteorológica débil o mayor.
- El 50 % a sufrir una sequía meteorológica moderada o mayor.
- El 30 % del territorio nacional a sufrir una sequía meteorológica fuerte.

El resto del país no es frecuentemente afectado con períodos secos asociados a la canícula.



Figura 165. Mapa de sequía meteorológica síntesis en El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos de GMT DOA MARN.

4.5.5 Sequía hidrológica

La sequía hidrológica es un concepto que suele definirse como la desviación de las pautas de escurrimiento de agua en la superficie y en el subsuelo, tomando como referencia valores promedio de las series de datos registrados, que conlleva a la deficiencia en las disponibilidades de recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos al disminuir la escorrentía superficial y recarga de acuíferos.

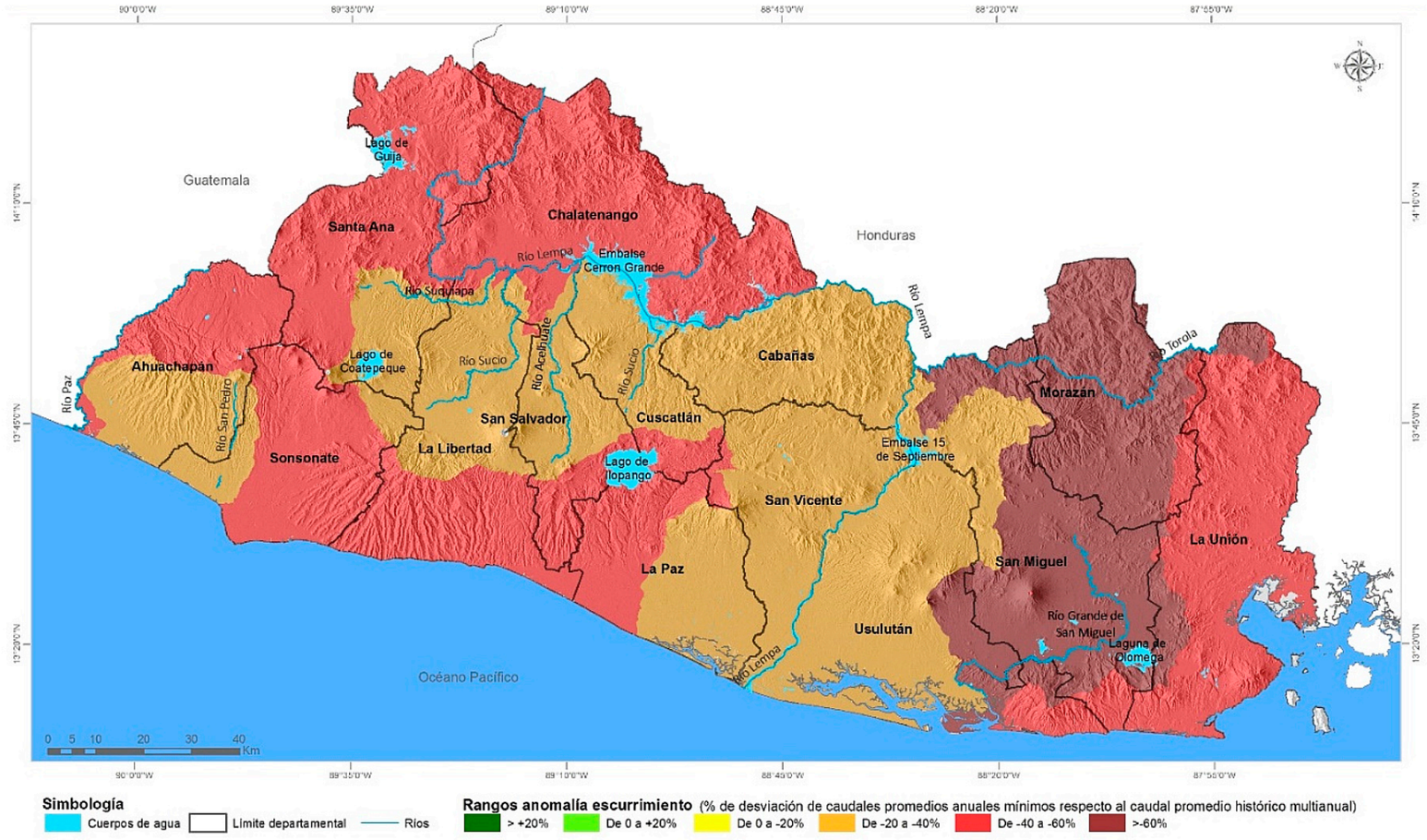


Figura 166. Mapa de anomalía de escurrimiento registrada en valores mínimos anuales.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En lo que respecta a agua superficial y específicamente al caudal de los ríos, la reducción de lluvias de los últimos años ha afectado de manera considerable los caudales promedio en todo el territorio nacional y los niveles de agua subterránea, generando una condición de sequía hidrológica en los años 2015, 2016 y principios del 2017.

Las condiciones de los ríos a nivel nacional se monitorean permanentemente por medio de la red de estaciones hidrométricas o hidrológicas equipadas para el registro automático de datos, y complementada por un programa de mediciones de campo rutinarias por parte del personal técnico del Ministerio de Medio Ambiente. Los datos muestran que durante los años hidrológicos 2015-2016 y 2016-2017, los caudales registrados en el río Paz en la zona occidental, rio Lempa en la zona central, río Grande de San Miguel y río Goascorán en la zona oriental, se mantuvieron por debajo del promedio histórico y en algunos casos bastante cercanos a los valores mínimos históricamente registrados (ver Figuras 167 a 169).

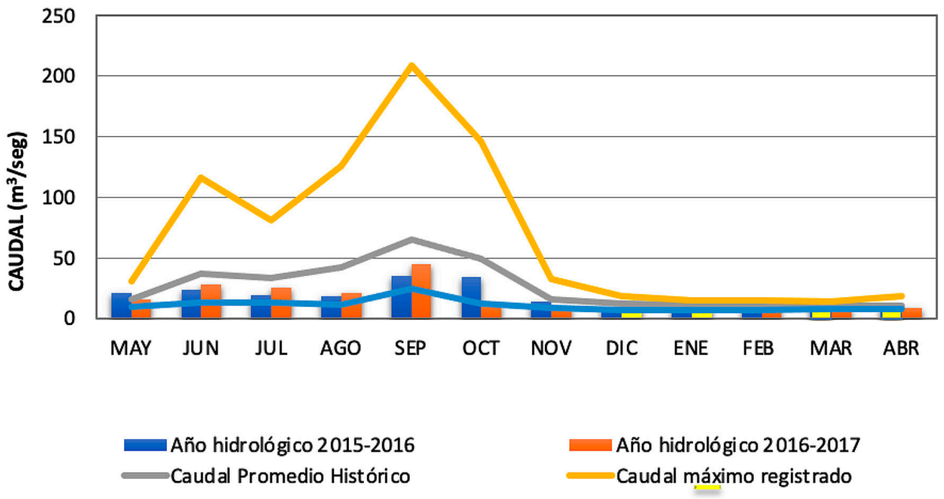


Figura 167. Relación de caudales promedios mensuales en ríos respecto al promedio histórico mensual. Río Paz, estación hidrométrica La Hachadura.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

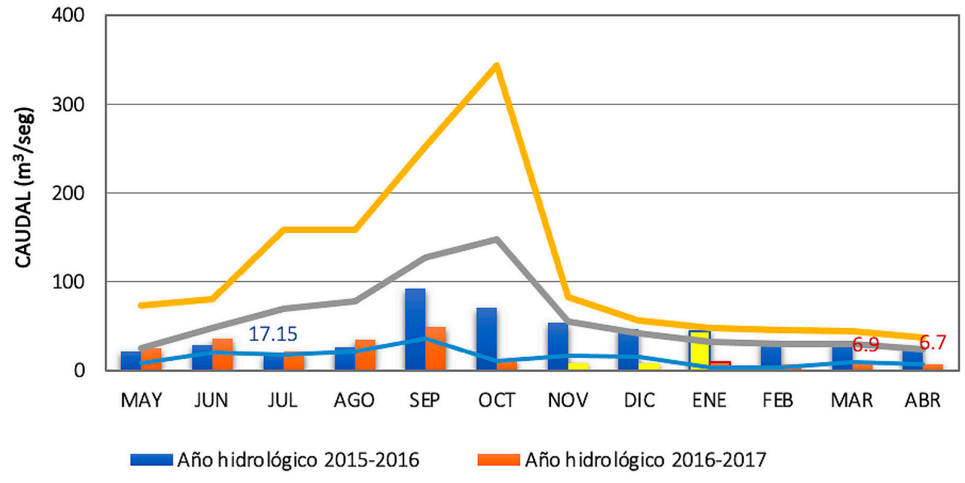


Figura 168. Relación de caudales promedios mensuales en ríos respecto al promedio histórico mensual. Cauce principal del río Lempa (cuenca alta), estación hidrométrica El Zapotillo.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

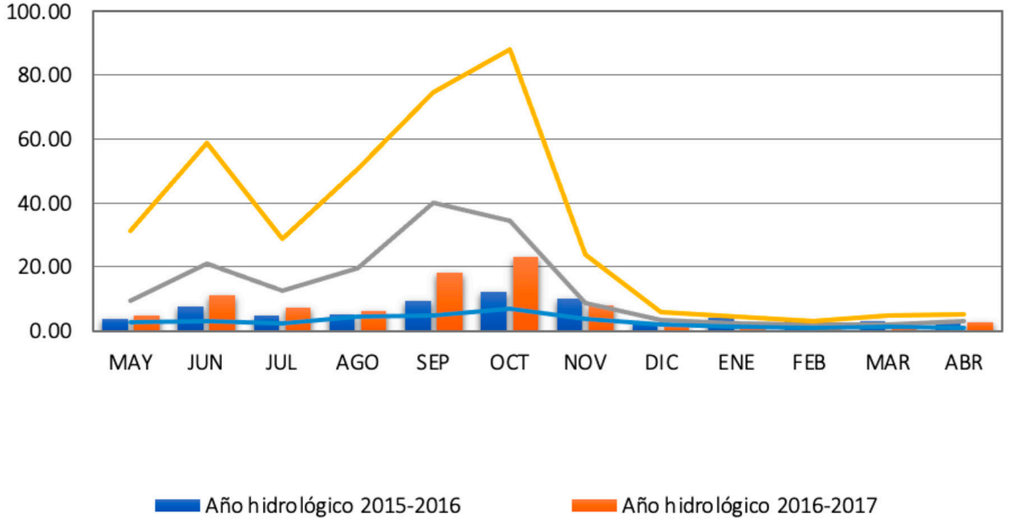


Figura 169. Relación de caudales promedios mensuales en ríos respecto al promedio histórico mensual. Río Grande de San Miguel, estación hidrométrica Villerías Campo Aventura.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Las sequías hidrológicas también afectan los recursos hídricos subterráneos y la generación hidroeléctrica. Las Figuras 170 y 171 ilustran los niveles de almacenamiento estacional en los embalses de las centrales hidroeléctricas Cerrón Grande y Guajoyo, evidenciando los años en que no se alcanzaron los niveles máximos de operación. Estos déficits reflejan la influencia directa de las condiciones de sequía prolongada sobre la capacidad de generación energética del país y resaltan la necesidad de gestionar integralmente los recursos hídricos frente a la variabilidad climática.

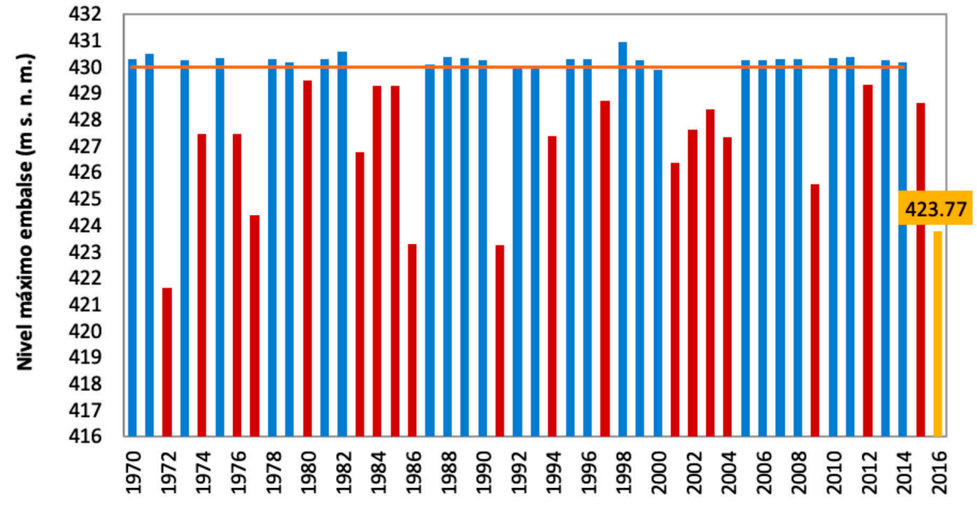


Figura 170. Niveles máximos anuales en embalse de Guajoyo periodo 1970-2016.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

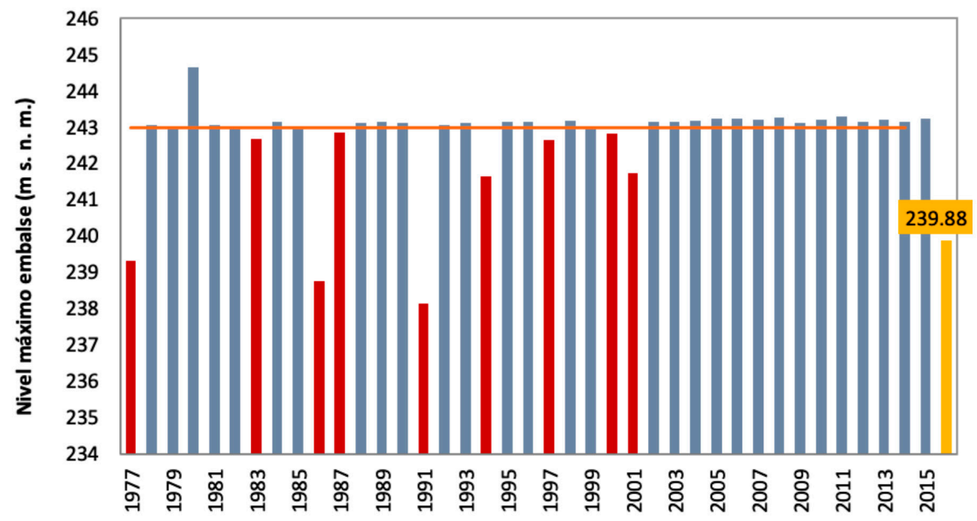


Figura 171. Niveles máximos anuales en embalse de Cerrón Grande periodo 1977-2016.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



4.6 Oleaje extremo

4.6.1 Origen de oleaje extremo

El oleaje en El Salvador es del tipo de mar de leva porque es generado por el viento de tormentas lejanas. Las tormentas pueden clasificarse por su localización con respecto al ecuador geográfico en tropicales, extratropicales y polares.

En El Salvador, es frecuente leer sobre las tormentas tropicales que se desplazan de este a oeste alrededor del ecuador geográfico, porque asociadas a ellas se registran incrementos en la precipitación. También, con frecuencia se informa sobre las tormentas extratropicales del hemisferio norte que se desplazan de oeste a este alrededor de los 45° norte, porque asociadas a ellas, se registran incrementos en la velocidad del viento y decrementos en la temperatura del aire.

El oleaje en la costa salvadoreña es generado por las tormentas extratropicales del hemisferio sur que se desplazan de este a este alrededor de los 45° sur. En el Pacífico, la trayectoria de estas tormentas es sobre el agua de mar que les transfiere calor y humedad. En su zona de generación tiene velocidades entre 10 y 20 km/h y altura entre 4 y 12 metros; luego se propaga en todo el Pacífico y arriba a la costa de El Salvador con velocidades entre 30 y 60 km/h, y altura entre 1 y 3 metros en aguas profundas. La dirección de propagación es del suroeste debido al efecto de la rotación de la Tierra (ver Figura 172).

La altura de las olas es mayor y los eventos de oleaje extremo tienen mayor incidencia entre los meses de marzo a octubre, debido a que las tormentas extratropicales que los generan son más intensas en los meses del invierno del hemisferio sur (mayo, junio, julio y agosto). La altura de las olas es mayor en occidente que en oriente por el efecto sombrilla del archipiélago de las islas Galápagos. Cuando el tren de olas que proviene del suroeste pasa por las islas, la altura disminuye atrás de estas, es decir hacia el noreste por efecto de la difracción.

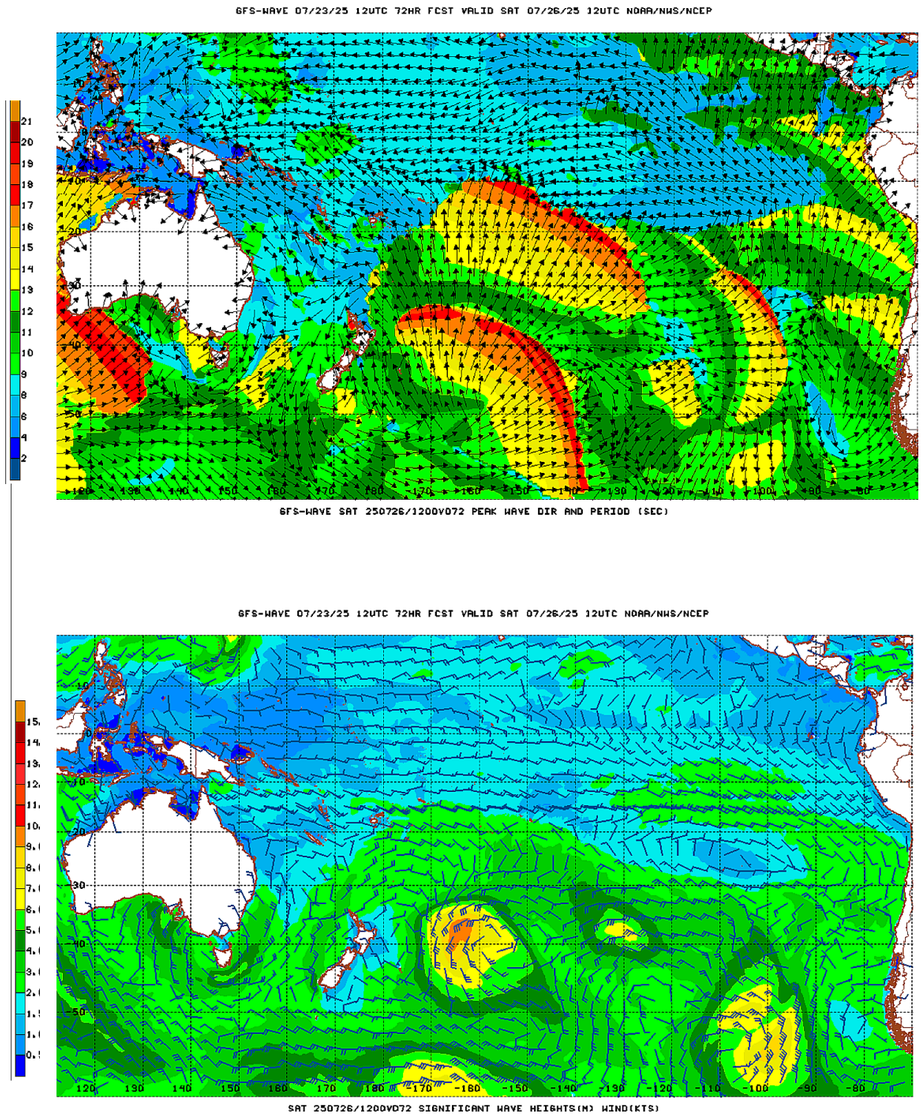


Figura 172. Zona de generación de las tormentas extratropicales del hemisferio sur y propagación del oleaje.
a. Período de la componente más energética del oleaje en segundos representada por contornos de color rellenados. Arriba del mapa se incluye la barra de correspondencia de valor de período y color. Dirección del oleaje en grados de rumbo (con respecto al Norte) representada por flechas de color negro.
b. Altura significante del oleaje en metros representada por contornos de color rellenados. Abajo del mapa se incluye la barra de correspondencia de valor de altura significante y color. Viento en superficie en nudos representado por barbas de color negro.
Fuente: https://mag.ncep.noaa.gov/

4.6.2 Eventos de oleaje extremo

Para caracterizar los eventos de oleaje se determina la frecuencia y la potencia a partir de las relaciones:

$$Frecuencia = \frac{eventos\ de\ cada\ mes}{eventos\ anuales}$$

$$Potencia\ (kW) = 0.5 * Período(s) * Altura^2(m)$$

Las Figuras 173 y 174 muestran la frecuencia y potencia de los eventos extremos ocurridos entre 2008 y 2016. Puede observarse que la frecuencia del oleaje extremo es nula (0.0) en noviembre, diciembre, enero, febrero; baja (0.1) en septiembre y octubre; media (0.3) en marzo, abril y agosto; y alta (0.6 y 0.7) en mayo, junio y julio. Al analizar la potencia del oleaje extremo en los últimos 10 años, se puede evidenciar que la mayoría de los eventos alcanzan una potencia inferior a los 60 kW, superado únicamente por nueve eventos y un evento extremo con potencia mayor a 80 kW ocurrido entre el 2 al 4 de mayo de 2015.

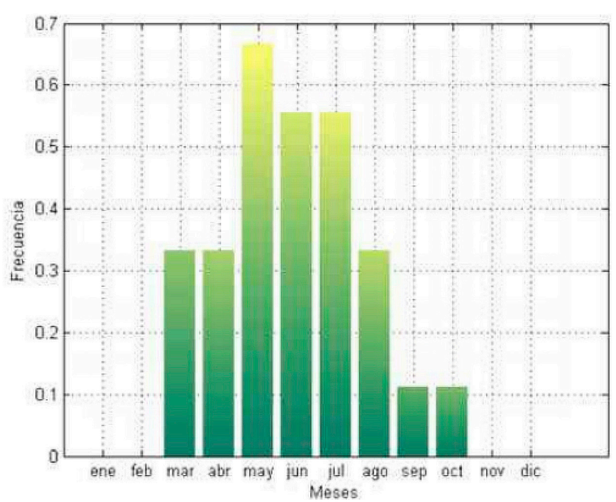


Figura 173. Diagrama de barras de la frecuencia de eventos de oleaje extremo.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

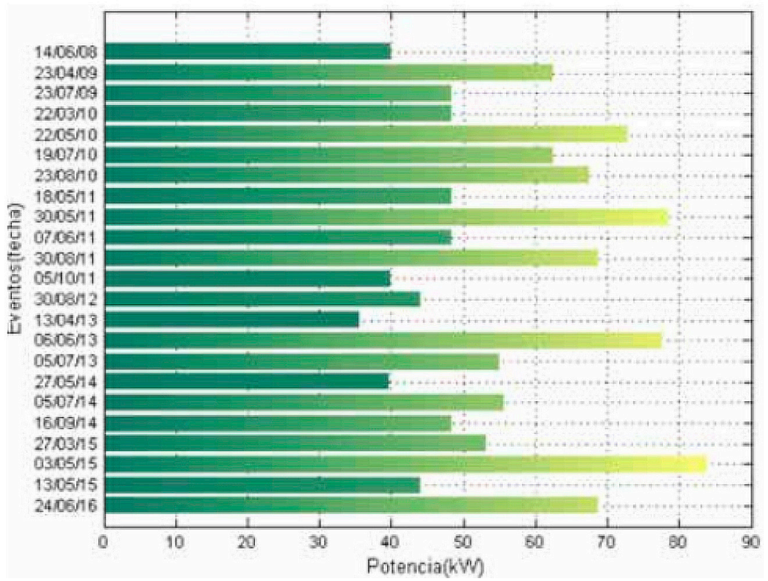


Figura 174. Diagrama de barras de la potencia de eventos de oleaje extremo.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

- Evento del 2-4 de mayo de 2015

El 27 de abril de 2015 una tormenta extratropical del hemisferio sur generó un oleaje que se propagó hacia las costas de Sudamérica, Centroamérica y Norteamérica, ocasionando daños en infraestructura marina (puertos mercantes, pesqueros y deportivos) e inundación tierra adentro, afectando a la población que habita en la línea de costa.

El 2 de mayo arribaron a toda la costa de El Salvador olas muy rápidas (70 km/h) y altas (entre 1 y 2 m). El 3 de mayo, las olas fueron rápidas (60 km/h) y muy altas (entre 2 y 3 m). El 4 de mayo las olas fueron rápidas (50 km/h) y más altas (entre 1 y 2 m) de lo normal. Las Figuras 175 y 176 muestran la altura y distancia de inundación registrada durante el evento de oleaje extremo. La Figura 177 muestra los impactos causados por el oleaje. La dinámica de erosión y sedimentación se aborda con más detalle en el siguiente apartado.



Figura 175. Mapas de altura de lámina de inundación durante el evento de oleaje extremo de mayo 2015.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



Figura 176. Mapas de distancia de inundación durante el evento de oleaje extremo de mayo 2015.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



(a) Fuerte oleaje impactando la estructura del muelle de La Libertad entre el 2 - 4 de mayo de 2015



(b) Impactos observados en la línea de costa tras el oleaje extremo del 2 al 4 de mayo de 2015



(c) Fuerte oleaje ingresando a las calles en El Zonte entre el 2 y el 4 de mayo de 2015 (Foto: Olas Permanentes)



(d) Impactos observados en la línea de costa tras el oleaje extremo del 2 al 4 de mayo de 2015.

Figura 177. Impactos causados por el oleaje.
Fuente: MARN.

4.6.3 Amenaza por eventos de oleaje extremo

Los eventos de oleaje extremo ocasionan afectaciones en actividades marítimas como pesca, navegación y turismo. En marea alta, la mayor altura de las olas en la zona de rompiente puede ocasionar volcamiento de embarcaciones e inundación de la berma de playa. En marea baja, la mayor velocidad de las corrientes de retorno puede ocasionar ahogamiento de personas que ingresan al mar y rompimiento de amarras de embarcaciones en dársenas de puertos.

Además, por el constante impacto de olas más rápidas y altas, el riesgo en la navegación de embarcaciones y las actividades que se realizan en infraestructura dentro del mar es mayor. Por otra parte, durante la ocurrencia de eventos de oleaje extremo aumenta la intensidad de los procesos costeros, acelerando la erosión de playas y azolvamiento de canales en desembocaduras de ríos, bocanas de esteros y entradas de bahías.

El mapa de amenaza por eventos de oleaje extremo se ha elaborado considerando que las afectaciones son entre la zona de rompiente y la berma de playa; el grado de afectación depende de la geomorfología de la línea de costa. En El Salvador, se cuenta con planicies, elevaciones, lagunas y ríos a las cuales están asociadas playas extendidas, playas de bolsillo, barras de arena y estuarios.

Para calcular los umbrales de intensidad se procesaron las series temporales de los parámetros del oleaje del modelo Wave Watch III. A partir de los umbrales de intensidad, se definieron los niveles de amenaza para diferentes secciones de la línea de costa de El Salvador y se calculó la potencia o flujo de energía del oleaje (Tabla 22).

Tabla 22. Niveles de amenaza por eventos de oleaje extremo para secciones de la línea de costa de El Salvador

Nivel / Sección	Alta Potencia (kW)	Media Potencia (kW)	Baja Potencia (kW)
Planicie Costera Occidental	54	38	29
Cordillera del Bálsamo	57	41	31
Planicie Costera Central	51	35	28
Planicie Costera Oriental	50	34	27
Sierra de Jucuarán	48	33	26

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Los niveles de amenaza por eventos de oleaje extremo se presentan en cada sección de línea de costa en el formato de barras de colores. Nótese que la línea de costa es representada por una línea doble porque las afectaciones impactan entre la zona de rompiente y la berma de playa (Figura 178).

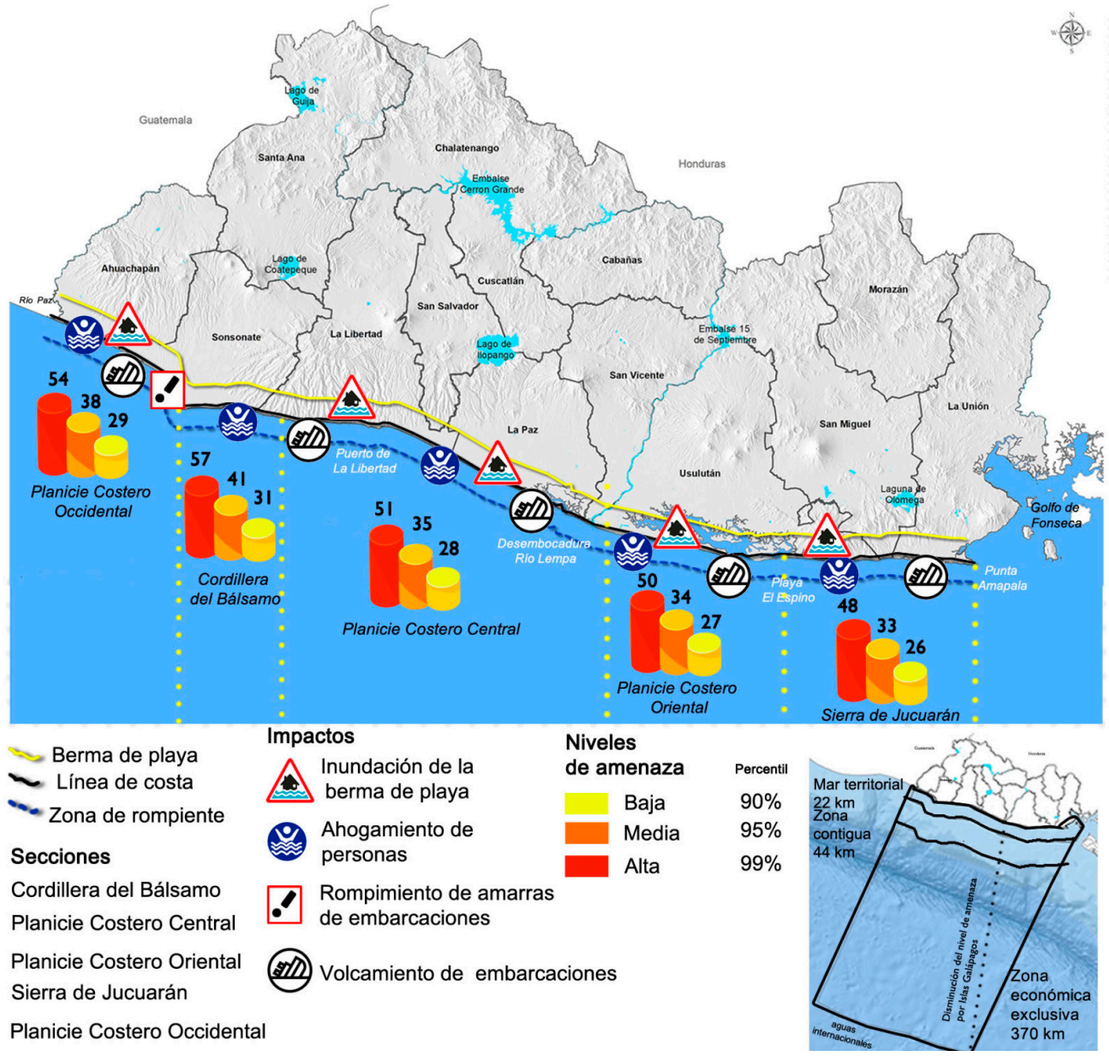


Figura 178. Mapa de niveles de amenaza por eventos de oleaje extremo para secciones de la línea de costa de El Salvador y sus impactos.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• **Caso de Estudio: El campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador**

La estimación de valores de parámetros de variables hidrodinámicas que son superados al menos una vez cada cierto número de años, umbrales asociados a períodos de retorno, son necesarios para el diseño de barcos, estructuras de protección costera, plataformas en mar abierto y para la elaboración de mapas de riesgo por inundación costera. Según el tipo de aplicación, los períodos de retorno requeridos varían: entre 10 y 100 años para embarcaciones y plataformas en mar abierto; entre 1,000 y 10,000 años para obras de protección costera; y entre 100 y 1,000 años para análisis de riesgo por inundaciones en zonas costeras. Usualmente las series temporales de mediciones de variables hidrodinámicas son entre 1 y 10 años, y las de salidas de modelos entre 10 y 100 años por lo que -para obtener los umbrales asociados a los períodos de retorno referidos- es usual recurrir a los métodos estadísticos de largo plazo basados en la teoría del Análisis de Valores Extremos (AVE) (Caires, 2011).

Procesando mediciones de oleaje en las inmediaciones de plataformas al norte del Mar Adriático, se generó la Serie de Valores Extremos Mensuales (SVEM) y la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) se estimaron los parámetros de localización, escala y forma con el Método de Máxima Similitud (MMS) y se seleccionó la Función de distribución de Probabilidad (FDP) Generalizada de Valores Extremos (GVE). El análisis determinó que la distribución que mejor se ajustó fue la del Tipo I (Gumbel), obteniendo los umbrales mensual y anual con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años de la altura significante del oleaje (Leder et al, 1998).

Con el objetivo de estimar los umbrales con períodos de retorno asociados, de la altura significante del oleaje, para ser usados en el diseño de estructuras costeras de protección, se analizaron mediciones de oleaje frente al puerto Galle al suroeste de Sri Lanka. La serie temporal se dividió en sus componentes (mar local generado por viento local, mar de leva generado por viento lejano y la suma de ambos componentes) y para las estaciones (mayo–septiembre, octubre– noviembre, diciembre–febrero, marzo–abril). El sistema atmosférico dominante en el océano Índico, Los Monzones, se presenta en la primera estación. Para cada una de las componentes del oleaje, se obtuvieron las Series de Valores Extremos Estacionales (SVEE) con el Método de Evento Extremo (POT por sus siglas en inglés). Las SVEE se ajustaron a la FDP/GVE, estimando parámetros con el MMS. El resultado fue que en las estaciones mayo – septiembre y octubre– noviembre, el mejor ajuste se obtuvo con: Tipo I (Gumbel) para mar local; Tipo III (Weibull) para mar de leva; Tipo II (Frechet) para la suma de ambos componentes. Los mayores umbrales corresponden al mar local en la estación mayo–septiembre (durante Los Monzones) por lo que son los que se recomiendan para el diseño de estructuras costeras (Thevasiyani y Perera, 2014).

El análisis estadístico de series temporales (1 de enero de 1958 – 31 de diciembre de 1999), de estados de mar (promedio sobre 3 horas), de parámetros del oleaje (altura, significativa, período y dirección de la componente más energética) obtenidos con el modelo WAM (WAM-DI Group, 1988) forzado con el viento de la base de datos de reanálisis ERA-40 (Uppala et al, 2005) en localizaciones (nodos) frente a la costa italiana, produjo los siguientes resultados: (i) tendencia negativa en el promedio anual y de invierno de la altura significativa; (ii) cambio en el signo de la tendencia, a finales de la década de 1980 en el norte del mar Adriático, en número de estados de mar por año y promedio anual de la altura significativa, durante eventos "Bora" (estados del mar con dirección de componente más energética del sector 0° - 90° con respecto al Norte Geográfico); (iii) tendencia del promedio anual de la duración de estados de mar que sobrepasan los umbrales percentil 50, percentil 75 y percentil 90 de la altura significativa no es estadísticamente diferente de cero; (iv) los umbrales con períodos de retorno menor que 100 años son mayores cuando se ajustó la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) que la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE) a Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) Generalizada de Valores Extremos (GVE) (Martucci et al, 2010).

Para investigar el campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador, se procesaron y analizaron las series temporales horarias de los parámetros del oleaje (altura significativa, período y dirección de la componente más energética) que resultan de la simulación con el modelo WAM (Osuna, 2010). Un parámetro derivado de la altura (energía potencial) y del período (energía cinética) del oleaje es la potencia o flujo de energía, la cual se puede estimar con la siguiente relación:

$$\overline{P} = \bar{E} C_g \cong {}^{1}/_{2}\, T_P H_S^2$$

Las unidades de la relación anterior son kW/m porque es el flujo de energía por unidad de longitud del frente del oleaje. Las series temporales son desde febrero de 1968 hasta diciembre de 2009 en tres localizaciones frente a la costa de El Salvador (Figura 179): Nodo 1, 13° N – 90° W (90 km frente a Punta Remedios); Nodo 2, 13° N – 89° W (60 km frente a la desembocadura del río Lempa); Nodo 3, 13° N – 88° W (30 km frente a Punta Amapala).

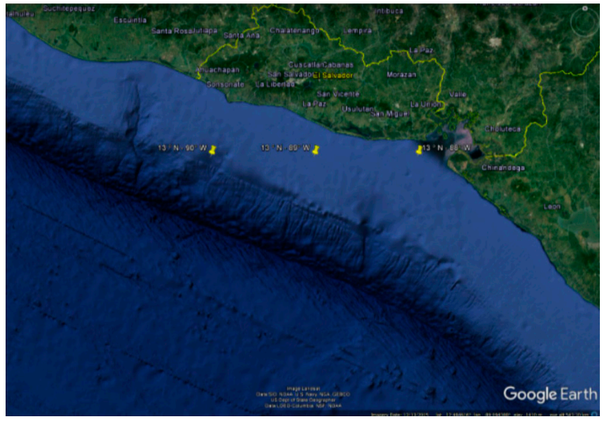


Figura 179. Localizaciones frente a la costa de El Salvador.
Fuente: DOA/MARN, 2017

• Metodología para el análisis de eventos extremos en variables hidrodinámicas

Los métodos estadísticos de largo plazo se utilizan para analizar los eventos extremos en series temporales largas. Son necesarios para conocer, por ejemplo: cuál es la potencia máxima del oleaje (Pmw) a la que estará expuesta una infraestructura que ha sido diseñada para una vida útil de 25 años (Thompson, 2002).

Los eventos del campo extremo, que pueden generar grandes impactos, por lo general tienen una alta variabilidad en intensidad y frecuencia. Por definición son considerados poco frecuentes. Los métodos estadísticos de largo plazo deben estimar los parámetros de los eventos del campo extremo a partir de una pequeña muestra con una alta variabilidad.

Por lo tanto, los métodos estadísticos de largo plazo deben ser capaces de:

• Extender la información disponible a un intervalo de tiempo mayor. Por ejemplo, como estimar el valor extremo para los próximos 25 años a partir de 10 años de información.

• Usar una pequeña muestra de valores extremos para obtener estimaciones sin sesgo y con algún nivel de confianza aceptable.

Los procesos costeros son un ejemplo de proceso estocástico[7] desde el punto de vista estadístico, porque la evolución en el largo plazo del transporte de sedimentos responsable de darle forma a la línea de costa depende tanto de una gran variedad de eventos del campo medio como de los relativamente pocos frecuentes eventos del campo extremo, los cuales pueden ocasionar la muerte de muchas personas y

[7] En estadística y, específicamente en la teoría de la probabilidad, un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para tratar con magnitudes aleatorias que varían con el tiempo, o más exactamente para caracterizar una sucesión de variables aleatorias (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y pueden o no estar correlacionadas entre ellas.

grandes pérdidas económicas. Las series temporales de las variables dinámicas que controlan los procesos costeros (marea, oleaje, viento y sus corrientes asociadas) son sucesiones de eventos que pueden ser caracterizados por su período de retorno y probabilidad de ocurrencia que se obtiene a partir de su Función de Distribución de Probabilidad (FDP).

Extremos (EVA), que establece que los valores extremos de un conjunto de variables aleatorias pueden converger a tres tipos de FDP (Fisher y Tippett, 1928) cuyas expresiones matemáticas son funciones que incluyen los parámetros de localización (α), escala (β) y forma (γ):

Nombre	Expresión matemática
Tipo I o Gumbel	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-e^{\left[-\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]}-\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]} \qquad \gamma = 0$
Tipo II o Frechet	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right]\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}} \qquad \gamma > 0$
Tipo III o Weibull	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right]\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}} \qquad \gamma < 0$

Figura 180. Ecuaciones de Función de Distribución de Probabilidad (FDP)
Fuente: Tomado de Fisher y Tippett, (1928)

El procedimiento para identificar la FDP que mejor se ajusta a una serie de eventos del campo extremo, consiste en: seleccionar eventos del campo extremo; estimar parámetros de las FDP, seleccionar FDP.

Algunos criterios a tomar en cuenta para la selección de eventos son los siguientes:

- Se deben seleccionar solo los eventos que sean representativos del campo extremo.
- Se deben seleccionar eventos diferentes para asegurar la independencia estadística entre eventos.
- Los eventos seleccionados deben representar eventos del campo extremo.
- Los eventos del campo extremo se consideran estacionarios, es decir sin tendencia como la que está asociada al calentamiento global.
- No se debe tomar toda la serie temporal original porque esta contiene información tanto de los eventos del campo medio como del campo extremo.

Hay dos métodos para seleccionar eventos del campo extremo. El primer método selecciona los eventos del campo extremo que sobrepasan un umbral y que están separados un cierto intervalo de tiempo, creando Series de Valores de Eventos Extremos (SVEE). El segundo método selecciona el valor extremo de cada año creando Series de Valores Extremos Anuales (SVEA). La SVEE puede tener un número de valores igual que el número de años o más dependiendo del umbral seleccionado. La SVEA se recomienda para series temporales de más de 20 años. La SVEE contiene información de todos aquellos eventos que sobrepasan el umbral, mientras que la SVEA solo contiene información de los eventos máximos de cada año.

Para la estimación de parámetros se deben considerar varios supuestos. Las Series de Valores Extremos (SVE) son una muestra de un proceso cuya FDP puede converger a alguna de las que se obtienen con EVA. No todos los valores de las SVE se aproximarán a una FDP de valores extremos. Las SVE para algunas variables hidrodinámicas como la marea se aproximará a una FDP de valores extremos específica, mientras que para otras variables como el oleaje se aproximarán a una serie de FDP de valores extremos, por lo que se hace necesario seguir alguno de los métodos de ajuste. Hay

dos métodos para estimar los parámetros de las FDP de valores extremos que mejor se ajusten a las SVEE y SVEA.

El primer método consiste en graficar la SVE en la gráfica de la FDP de valores extremos. Para facilitar la identificación de la FDP de valores extremos que mejor se ajuste a la SVE, se recomienda transformar el eje de la probabilidad a escala logarítmica para que la gráfica de la FDP se aproxime a una línea recta. El segundo método consiste en ajustar a las SVE la FDP de valores extremos ya sea por el Método de Mínimos Cuadrados (MMC) o el Método de Máxima Similitud (MMS). El MMC es recomendable para SVE sin valores atípicos y FDP de valores extremos de dos parámetros. El método de MMS es recomendable para SVE con valores atípicos y FDP de valores extremos de tres parámetros.

Al identificar valores atípicos se debe verificar su validez. Los valores atípicos pueden ser errores sistemáticos en las mediciones o simulaciones en cuyo caso se deben eliminar. También pueden ser valores generados por eventos del campo extremo en cuyo caso se deben de mantener. Para distinguir entre uno y otro se deben de inspeccionar por separado los eventos del campo extremo de las variables hidrodinámicas identificando sus características. Por ejemplo, los eventos del campo extremo del oleaje pueden ser generados por el viento de tormentas lejanas o cercanas. Los eventos del campo extremo de oleaje generados por tormentas lejanas, mar de leva incrementado, tienen una duración típica de 3 a 5 días con varios máximos, generalmente uno diario. Los eventos del campo extremo de oleaje generados por tormentas cercanas, mar local incrementado, tienen una duración típica de un día con un solo máximo.

La FDP de valores extremos que se selecciona es la que mejor se ajusta a las SVE. Un criterio de selección es la inspección de la gráfica de la Función de Distribución de la Probabilidad Acumulada (FDPa) contra la SVE. Otro criterio de selección son las pruebas estadísticas como la correlación entre la FDPa y la SVE. Para que la selección de la FDP sea más robusta, se debe calcular el Intervalo de Confianza (IC) de la estimación de parámetros. Una vez seleccionado la FDP de valores extremos que mejor se ajusta a la SVE se pueden calcular el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia.

El período de retorno (Tr) es el intervalo de tiempo promedio que transcurre entre eventos cuya potencia sea mayor o igual que el valor de diseño (Vr).
El período de retorno se calcula con la siguiente relación:

$$T_r = \frac{1}{1 - P(V_r)}$$

Donde P(Vr) es la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada (FDPa) del valor de diseño (Vr).

La probabilidad de ocurrencia (Po) es la probabilidad de que en un intervalo de tiempo preestablecido (L) ocurra al menos un evento cuya potencia sea mayor o igual que el valor de diseño (Vr) correspondiente a un determinado período de retorno (Tr).
La probabilidad de ocurrencia se calcula con la siguiente relación:

$$P_0 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$

Donde L es la vida útil de una infraestructura.

- Resultados

En la caracterización del campo medio (clima) del oleaje frente a la costa de El Salvador (DOA/MARN, 2017), se propuso al percentil 95 (32 kW-m-1) como umbral de impacto bajo, el percentil 99 (44 kW-m-1) como umbral de impacto medio y al percentil 99.9 (60 kW-m-1) como umbral de impacto alto (Figura 181).

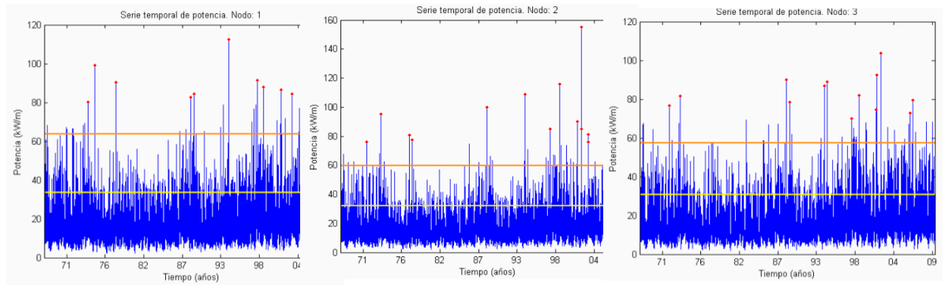


Figura 181. Series temporales de la potencia (kW-m-1) del oleaje.
La línea amarilla indica las series temporales de la potencia (kW-m-1) del oleaje. La línea amarilla indica el percentil 95 (32 kW-m-1), umbral de impacto bajo, la línea naranja indica el percentil 99.9 (60 kW-m-1), umbral de impacto alto; los puntos rojos indican los eventos extremos mayores que el percentil 99.99 (74 kW-m-1).
Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Para la caracterización del campo extremo del oleaje se generó la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) considerando los máximos anuales y la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE) considerando estados de mar, valor promedio cada 3 horas, mayores que el percentil 99.99 (74 kW-m-1).

Para calcular los períodos de retorno de las series de valores extremos de la potencia, se estimaron los parámetros de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos (FDP/GVE) con el Método de Máxima Similitud y un intervalo de confianza del 95 (ver Tablas 23 y 24).

Tabla 23. Parámetros de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos para la serie de valores extremos anuales.

1	62.96	15.18	-0.12
2	58.46	17.25	0.05
3	56.94	13.53	-0.14
Promedio	59.45	15.32	-0.07

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Tabla 24. Parámetros de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos para la serie de valores de eventos extremos

1	84.53	5.37	0.42
2	81.71	7.53	0.71
3	77.60	7.22	0.02
Promedio	81.28	6.71	0.38

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Con el valor de los parámetros, se calculó la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada Generalizada de Valores Extremos. La convergencia de la probabilidad de no excedencia de las series de valores extremos de la potencia muestra que la FDP/GVE que mejor se ajustó a las SVEA es del tipo III o Weibull (Figura 182) y a las SVEE es del tipo II o Frechet (Figura 183). La línea negra es la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada Generalizada de Valores Extremos (FDPa/GVE) ajustada por el Método de Máxima Similitud (MMS). Las líneas cian y magenta indican el límite superior e inferior del intervalo de confianza de 95%.

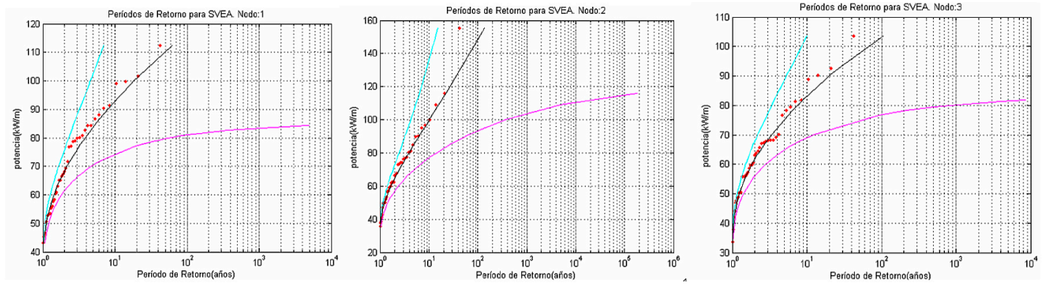


Figura 182. Períodos de retorno (años) para la potencia (kW-m -1) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA).
Fuente: DOA/MARN, 2017

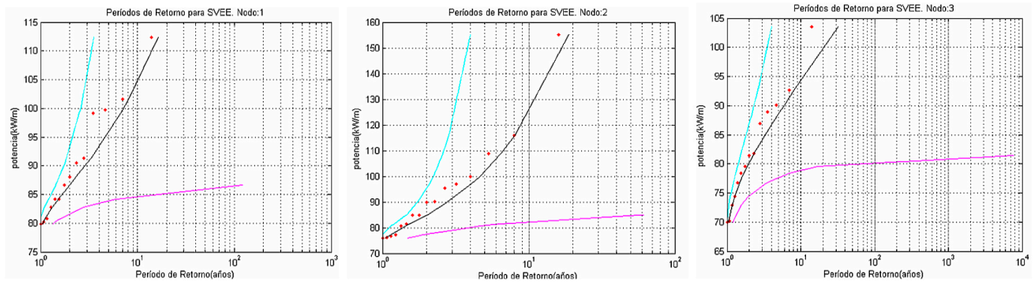


Figura 183. Períodos de retorno (años) para la potencia (kW-m-1) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE).
Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Para calcular el umbral asociado a un período de retorno (Tablas 25 y 26) se empleó la Función de Distribución de Probabilidad Inversa Generalizada de Valores Extremos.

Tabla 25. Umbrales (kW-m-1) para serie de valores extremos anuales

Nodo	Período de retorno				
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
1	84	93	10	110	117
2	85	100	11	133	148
3	75	83	92	98	103
Promedio	81	92	10	114	123

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Tabla 26. Umbrales (kW-m-1) para serie de valores de eventos extremos

Nodo	Período de retorno				
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
1	96	105	121	137	159
2	102	124	175	242	352
3	89	94	102	107	113
Promedio	97	108	133	162	208

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Para calcular la probabilidad de ocurrencia (Tablas 27 y 28) de que la potencia del oleaje supere al menos una vez los valores de diseño durante la vida útil de una infraestructura, se estimó el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo: 1 año para la SVEA, 3 años para la SVEE.

Tabla 27. Probabilidad de ocurrencia (%) para serie de valores extremos anuales

Período de retorno (años)	Vida útil (años)				
	5	10	25	50	100
5	67	89	100	100	100
10	41	65	93	99	100
25	19	34	64	87	98
50	10	18	40	64	87
100	5	10	22	40	63

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

Tabla 28. Probabilidad de ocurrencia (%) para serie de valores de eventos extremos

Período de retorno (años)	Vida útil (años)				
	5	10	25	50	100
5	29	50	82	97	100
10	16	29	57	82	97
25	6	13	29	49	74
50	3	6	15	28	49
100	2	3	8	15	28

Fuente: Tomado de DOA/MARN, 2017

- Discusión

Dos de los hallazgos de la caracterización del campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador son las frecuencias por estación de los valores extremos anuales [9 % (EFM), 43 % (AMJ), 20 % (JAS), 28 % (OND)] y los umbrales para períodos de retorno menor que 5 años [38 kW-m-1 (1 año), 66 kW-m-1 (2 años), 74 kW-m-1 (3 años), 78 kW-m-1 (4 años)].

El primer hallazgo es que los eventos del campo extremo de la potencia del oleaje se pueden observar con más frecuencia en las estaciones de abril-mayo-junio y octubre-noviembre-diciembre, dado que los meses en que la frecuencia es mayor o igual que 10 % son abril (20 %), mayo (19 %), octubre (11 %) y noviembre (10 %). El segundo hallazgo es que eventos del campo extremo que superen el umbral de 75 kW-m-1 (Tablas 25 y 26), tiene una probabilidad de ocurrencia de 64 % para un período de retorno de 25 años (Tablas 27 y 28).

Con el fin de explicar el porqué del primer hallazgo, se analizó una caracterización de los ciclones extratropicales que -comparando bases de datos de reanálisis- estimaron aplicando regresión lineal, la tendencia estacional para 100 años de la densidad e intensidad de los ciclones extratropicales (Wang, Feng, Chan, Isaac. 2016). Las series temporales (1979 – 2009) de presión atmosférica a nivel del mar son los promedios de las estaciones (EFM, AMJ, JAS, OND) sobre las áreas totales de los hemisferios (norte, sur) y de sus regiones (tierra, mar). Las bases de datos de reanálisis fueron: ERA20C; 20CR; JRA55; NCEP1; MERRA; CFSR; ERAINT; NCEP2.

Los ciclones extratropicales considerados son los que en su núcleo tienen una presión atmosférica menor o igual que 980 hPa. Uno de los resultados de la caracterización de los ciclones extratropicales es que la tendencia promedio de la densidad e intensidad es a aumentar.

Tabla 29. Densidad e intensidad de los ciclones extratropicales

Estaciones	Densidad (ciclones-10^6 km ^{2})	Intensidad (10^5 hPa-km ^{2})
EFM	21.4	5.3
AMJ	9.5	6.8
JAS	7.8	0.9
OND	11.8	2.0

Fuente: (Wang, Feng, Chan, Isaac. 2016)

Con el fin de relacionar el segundo hallazgo con eventos del campo extremo de oleaje que han ocurrido anteriormente en El Salvador, se analizó el informe sobre el oleaje extremo del tipo mar de leva incrementado que arribó a la costa de El Salvador entre el 2 y 4 de Mayo de 2015, en donde se describe el arribo de olas rápidas (entre 60 y 70 km/h) y altas (entre 2.4 y 2.7 m), siendo mayor en occidente que en oriente por el efecto sombrilla de la islas Galápagos, que refractan y difractan el tren de olas del oleaje proveniente del sur-suroeste (DOA/MARN. 2015). Uno de los resultados de la caracterización del oleaje extremo es la potencia máxima en secciones de la línea de costa: planicie Costera Occidental (Acajutla), 60 kW-m-1; cordillera del Bálsamo (La

Libertad), 73 kW-m-1; planicie Costera Central (Estero de Jaltepeque), 59 kW-m-1; planicie Costera Oriental (bahía de Jiquilisco), 43 kW-m-1; golfo de Fonseca (bahía de La Unión), 35 kW-m-1, de donde se puede concluir que eventos del campo extremo de oleaje -como el de mayo de 2015- se pueden observar con una probabilidad de ocurrencia de 64% para un período de retorno de 25 años (Tablas 27 y 28).

4.7 Erosión y sedimentación costera

4.7.1 Causas y orígenes

La erosión y la sedimentación costera son procesos naturales que se ven provocados o incrementados por actuaciones antrópicas, los cuales generan impactos económicos y sociales que afectan directamente a las localidades que limitan con el mar. Estos procesos son originados por el desbalance o alteración de la cantidad de sedimentos que llegan a un punto dado de la costa, lo que puede ser generado por diferentes causas individuales o combinadas. Dependiendo del tipo o tipos de causas que generan estos procesos, la velocidad en que se presentan puede ser de forma rápida o lenta y el problema se evidencia con mucha más lentitud.

Entre las causas naturales se distinguen: el efecto de los eventos hidrometeorológicos extremos que generan oleajes de gran energía con alto potencial erosivo; el régimen de mareas, especialmente las mareas vivas que logran penetrar tierra adentro acrecentando su poder erosivo. También, se dan por los cambios en el transporte sedimentario, debido a la modificación en los patrones generales de circulación de las aguas oceánicas; los procesos tectónicos y el aumento del nivel del mar que modifican el perfil de la playa, y que provocan la adaptación a las nuevas condiciones en busca de una configuración de equilibrio para estabilizarse.

Además, existen causas antrópicas que pueden incrementar o minimizar los procesos naturales o generar nuevos, entre las cuales se citan: la construcción de presas y bordas en ríos, lo que reduce la cantidad de sedimento que llega a la costa y que produce desbalance en la alimentación de las playas; la construcción de infraestructura sobre la playa y las dunas. De igual forma se identifica la construcción de obras marítimas; la eliminación de las dunas en el frente de playa, sobre todo la extracción de arena para la construcción; la agricultura en las zonas interiores del territorio que destruye la vegetación originaria e incrementa la erosión en las cuencas; la eliminación de los manglares y zonas de amortiguamiento; la extracción de áridos en los ríos que generan la disminución de los aportes de sedimentos en las playas.

Debido a las causas mencionadas, en El Salvador se presentan los procesos erosivos de costa, especialmente en las playas de arena de la planicie costera central y la occidental, que, por estar conformadas por materiales aluviales de poca cohesión, están sujetas a un mayor impacto erosivo. Los procesos sedimentarios se están manifestando con mayor intensidad en la zona del golfo de Fonseca, no solo por su naturaleza sedimentaria, sino también por la modificación de la deriva litoral que transporta los sedimentos y que se ve interrumpida por la construcción de infraestructura portuaria y turística. En el caso de Barra de Santiago, la disminución de la cobertura vegetal de las cuencas, promueve el aumento de los volúmenes de sedimentos.

4.7.2 Eventos históricos

Entre los procesos erosivos y/o sedimentarios de rápido desarrollo que se han dado en el país, se pueden mencionar eventos asociados a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos u oceanográficos extremos que ocasionaron cambios de considerable magnitud, especialmente en la costa del estero de Jaltepeque (1934), modificaciones en la playa El Espino (2009, 2012, 2015 y 2016) e impactos por oleaje extremo en gran parte de la costa salvadoreña (mayo de 2015).

En el estero de Jaltepeque, en 1934, se produjo un proceso sedimentario de gran magnitud, debido a una tormenta tropical que afectó gran parte del territorio nacional en el mes de junio. Los altos volúmenes de precipitación produjeron grandes cantidades de sedimentos que fueron arrastrados por los ríos hacia el mar, provocando modificaciones morfológicas de importancia en la zona costera. Las desembocaduras de los ríos Lempa, Paz y Jiboa se vieron fuertemente afectadas, según los periódicos de la época. De estos casos el mejor documentado es la modificación de la antigua desembocadura del estero de Jaltepeque, donde el sedimento cerró completamente la antigua desembocadura y azolvó el puerto de La Concordia. El flujo rompió y fragmentó la barra, creando una nueva salida al mar, la que en los años siguientes se reacomodó a la configuración que actualmente tiene (Figura 184).

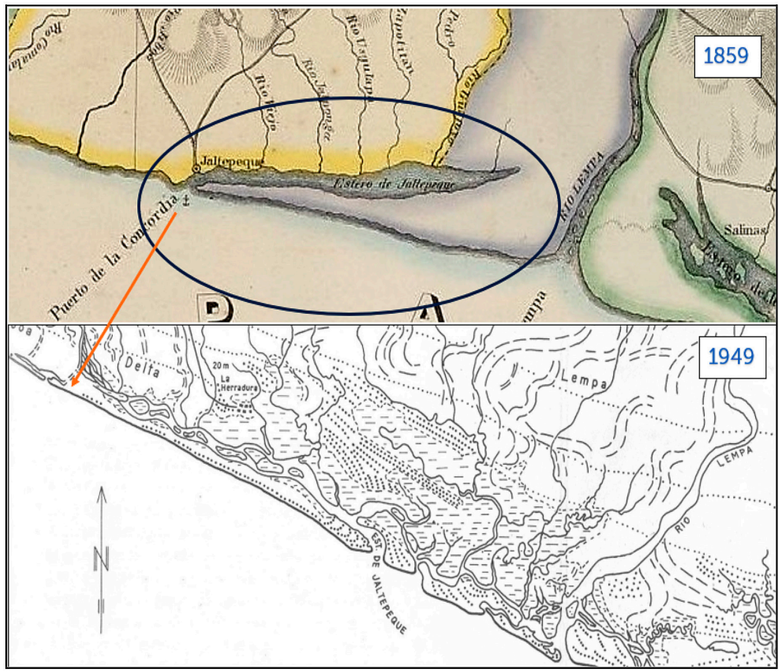


Figura 184. Proceso sedimentario en estero de Jaltepeque (1934)
Arriba el recorte de mapa oficial de El Salvador de 1859 con la anterior desembocadura del estero. El círculo azul indica la antigua ubicación del puerto, donde se encontraba la Hacienda El Jaral.
Fuente: Adaptado del mapa levantado por el geomorfólogo H.G. Gierloff-Emden.

En mayo de 2015, oleajes extremos impactaron las costas salvadoreñas y se produjeron procesos erosivos en los departamentos de Sonsonate y La Unión; de sedimentación en Ahuachapán, La Libertad y Sonsonate, y una combinación de ambos fenómenos en Usulután y La Paz. La variabilidad de estos fenómenos está relacionada con la dirección de las corrientes, con el ángulo de arribo del oleaje a las playas y el material de las mismas.

En este evento, la energía del oleaje modificó fuertemente los perfiles de playa en algunos puntos, lo cual fue advertido por la población con el acercamiento de las zonas de rompiente y el avance del mar tierra adentro. En la Figura 185 se muestra la distribución del impacto en El Salvador.

La playa El Espino, ubicada en el departamento de Usulután, ha sido impactada en julio de 2009, junio de 2012, mayo de 2015 y junio de 2016 por oleajes de fondo, causando destrucción en la primera línea de playa y en la calle paralela al mar, con pérdidas totales en infraestructura hotelera y de restaurantes. La Figura 186 muestra los impactos generados en la playa El Espino producto del oleaje de 2015, el oleaje modificó el perfil de playa, lo que fue perceptible como un cambio en el alcance del mar y el acercamiento de la zona de rompiente debido al movimiento de volúmenes de arena en el fondo marino.

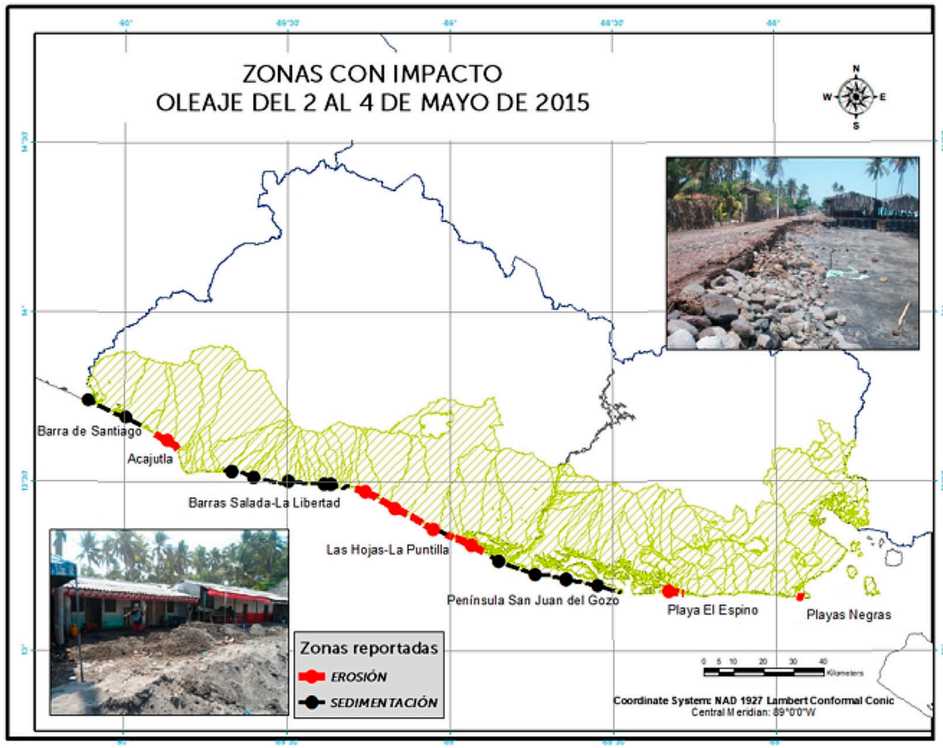


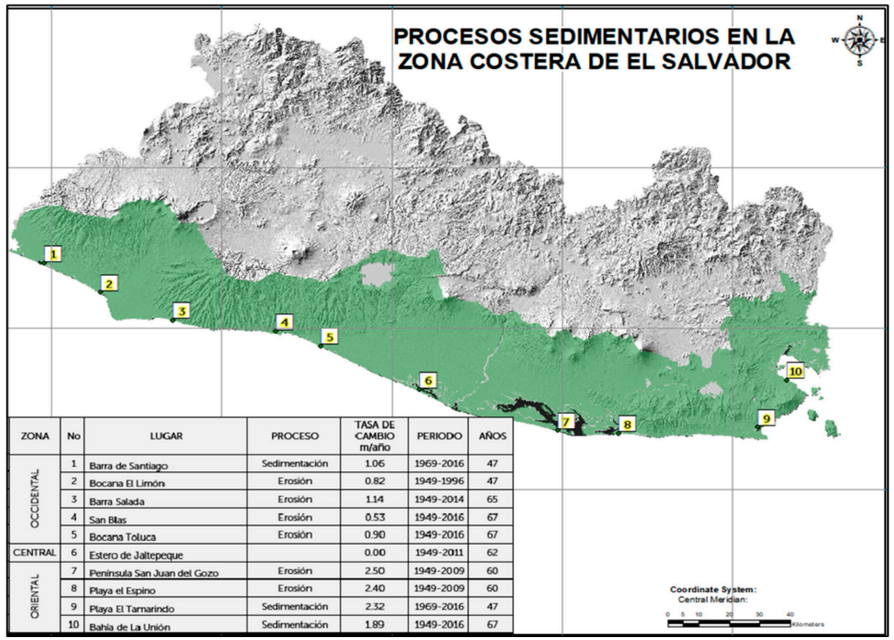
Figura 185. Mapa de distribución de los fenómenos de erosión y sedimentación durante el oleaje del 2 al 4 de mayo de 2015.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



Figura 186. Fotografías de la playa El Espino donde se muestra la erosión dejada por el oleaje de mayo de 2015.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

4.7.3 Amenaza de erosión y sedimentación

La amenaza de erosión/sedimentación está presente en diversas magnitudes a lo largo de la costa salvadoreña. Con base en casos de estudio analizados, se ha identificado la tasa de cambio, ya sea por procesos erosivos y/o por procesos sedimentarios en diferentes playas del país. Puede notarse que en los extremos del territorio se están dando casos de sedimentación asociados a ambientes sedimentarios como lo es el golfo de Fonseca y el estero de Barra de Santiago. En estos lugares, la pérdida de vegetación natural y las construcciones promueven el aumento de los volúmenes de sedimento descargado por las cuencas. En el resto del país predomina la erosión como respuesta a la extracción de áridos y la pérdida de la vegetación natural, entre otras.



ZONA	No	LUGAR	PROCESO	TASA DE CAMBIO m/año	PERIODO	AÑOS
OCCIDENTAL	1	Barra de Santiago	Sedimentación	1.06	1969-2016	47
	2	Bocana El Limón	Erosión	0.82	1949-1996	47
	3	Barra Salada	Erosión	1.14	1949-2014	65
	4	San Blas	Erosión	0.53	1949-2016	67
	5	Bocana Toluca	Erosión	0.90	1949-2016	67
CENTRAL	6	Estero de Jaltepeque		0.00	1949-2011	62
ORIENTAL	7	Península San Juan del Gozo	Erosión	2.50	1949-2009	60
	8	Playa el Espino	Erosión	2.40	1949-2009	60
	9	Playa El Tamarindo	Sedimentación	2.32	1969-2016	47
	10	Bahía de La Unión	Sedimentación	1.89	1949-2016	67

Figura 187. Mapa de puntos estudiados a lo largo del territorio nacional y su grado de erosión o sedimentación según sea el caso.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

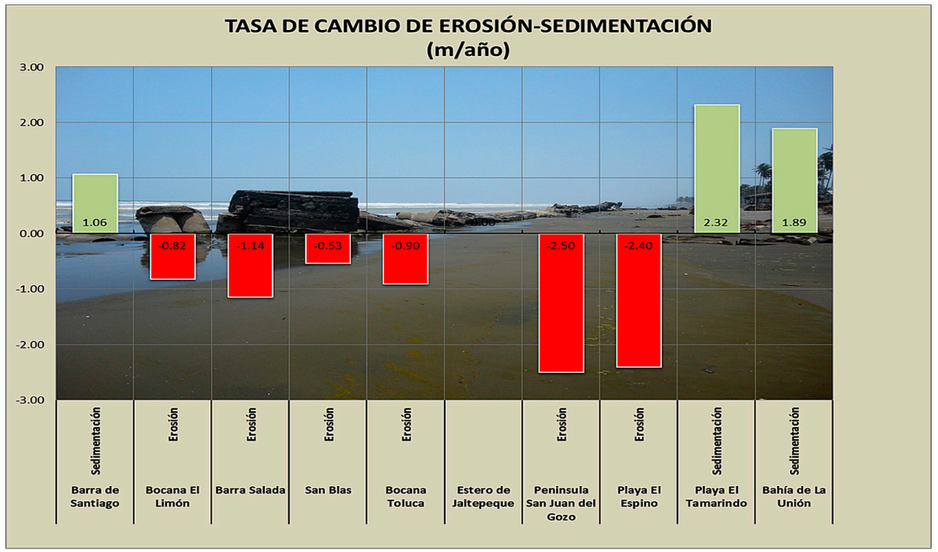


Figura 188. Valores de erosión/sedimentación en playas de El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

4.7.4 Erosión y sedimentación en playa El Espino, isla Montecristo y estero de Barra de Santiago

Los siguientes casos se refieren a playas donde se han identificado impactos significativos por erosión o sedimentación. Aunque estos procesos han estado activos durante décadas, su intensidad ha aumentado en los últimos años. Los análisis se han basado en la medición de cambios morfológicos mediante imágenes satelitales y fotografías aéreas desde 1949, complementados con visitas de campo, registros fotográficos y mediciones realizadas en distintos períodos.

- Playa El Espino

Este es uno de los casos más ampliamente documentados debido a la magnitud de los procesos erosivos que presenta. Entre 1949 y 2016, la pérdida promedio de terreno fue de 2.40 metros por año, con una tendencia creciente. Como resultado, se han perdido dos líneas de edificaciones frente al mar y parte de la calle de acceso paralela a la playa.

Durante el período 1949–1979 se registró una acumulación significativa de sedimentos en el extremo oeste, lo que provocó un aumento notable en la forma de punta de la barra. Sin embargo, en las tres décadas siguientes, la línea de costa retrocedió más de lo que había avanzado inicialmente. Este fenómeno pudo ser resultado de aportes significativos de sedimentos asociados a la influencia de la desembocadura del río Grande de San Miguel y a los efectos del prisma de marea de la bahía de Jiquilisco, además de la incidencia de eventos meteorológicos y oceanográficos extremos que afectan el sistema marino-costero.



Figura 189. Detalle del sector oeste de la playa El Espino, levantado con drones.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En el extremo este de la Barra de Santiago se observa un proceso distinto: una flecha que se está consolidando y cubriendo por vegetación, lo que constituye una clara evidencia de la dirección de la deriva litoral neta en este sector de costa.
Aunque aún no se cuenta con una explicación definitiva sobre las causas de los procesos erosivos en la playa El Espino, se reconoce que las actividades antrópicas desempeñan un papel importante. Entre los principales factores se encuentran la eliminación de la cobertura vegetal original y la construcción de viviendas e infraestructuras sobre la zona activa de la playa, muchas de ellas con estilos constructivos que no favorecen a dinámica morfodinámica del sistema costero.

- Isla Montecristo:

La isla Montecristo, ubicada en el sistema estuarino de la bahía de Jiquilisco, presenta un avanzado proceso de erosión costera. Debido a su ubicación remota y de difícil acceso, se dispone de información limitada sobre las causas que lo originan. No obstante, destaca como antecedente histórico que el río Lempa contaba con un ramal que desembocaba directamente al mar en esta zona, el cual se colmató progresivamente, provocando la conexión de la isla con la barra de San Juan del Gozo.

El análisis de los cambios morfológicos de la isla en un período de 75 años (1949–2024) evidencia un retroceso promedio del frente de playa de aproximadamente 400 metros, lo que representa una tasa anual de erosión cercana a los 5.3 metros por año.

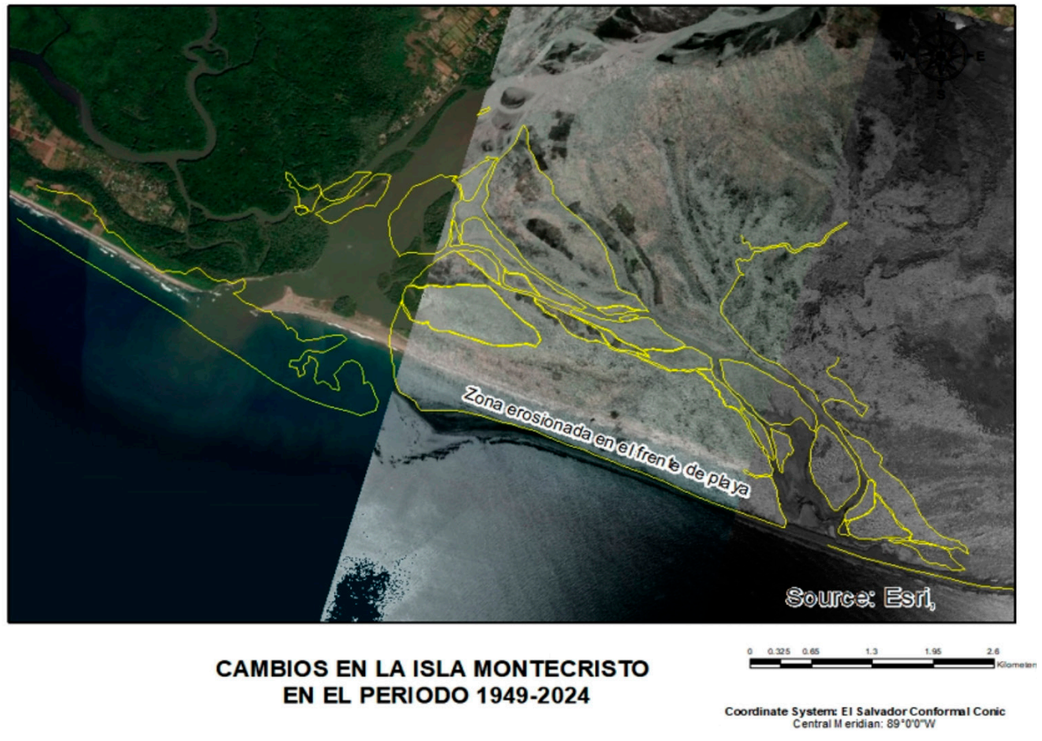


Figura 190. Detalle del sector erosionado de la isla Montecristo.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



Figura 191. Fotografía de parte del sector erosionado de la isla Montecristo
Fuente: MARN.

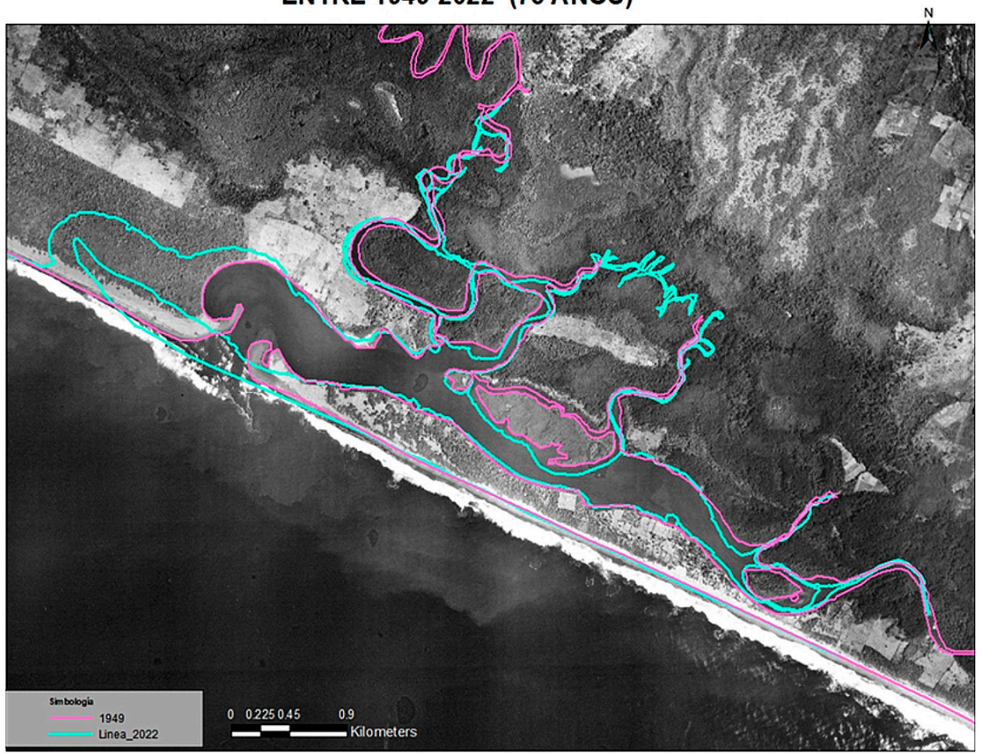


Figura 192. Cambios en el estero de Barra de Santiago, departamento de Ahuachapán en los años 1949 y 2022.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

- **Estero de Barra de Santiago:**

El análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales de la Barra de Santiago revela cambios significativos en el canal principal, el vaso del estero y sus ramales secundarios. Estos cambios han tenido un impacto importante en el crecimiento y consolidación de las islas interiores.

Se estima que la barra arenosa de la Barra de Santiago, se está sedimentando a un ritmo medio de 0.92 metros por año. El período de 1979 a 2016 mostró la mayor tasa de sedimentación, con una ganancia de hasta 40 metros; sin embargo, debido a la amplitud natural de la playa, este efecto puede no ser muy perceptible para la población local.

A largo plazo (evaluación de 73 años) se observó un equilibrio en la bocana a pesar de la fuerte erosión en el lateral izquierdo, esta se compensa con el acelerado crecimiento de la punta de la barra, lo que indica un reacomodamiento de los sedimentos.

Durante el período de 1949-1969, hubo una fuerte depredación del manglar, lo que probablemente provocó un desequilibrio y se reflejó en la erosión en la bocana del estero. Sin embargo, desde entonces hasta la actualidad, el estero parece no haber experimentado cambios significativos. Las islas dentro del vaso del estero se encuentran en una fase estable y se espera que continúen creciendo a medida que disminuyan las profundidades del estero debido a la carga de sedimentos arrastrados por los canales. Los canales secundarios se cerrarán gradualmente a medida que disminuya su tirante hidráulico, como ya ha sucedido con algunos ramales que conforman el manglar.

En resumen, los resultados indican un equilibrio en la bocana a largo plazo, la estabilidad de las islas y la sedimentación de la barra, lo que brinda una comprensión de los cambios y procesos en el estero de la Barra de Santiago.



Capítulo 5

5. Exposición

5.1 Introducción a los modelos de exposición

La evaluación de los efectos provocados por una amenaza natural sobre los activos expuestos —como daños materiales, pérdidas económicas y personas afectadas— es un insumo clave para la planificación urbana y la gestión del riesgo de desastres. Esta evaluación permite a las autoridades tomar decisiones informadas orientadas a reducir el riesgo, ya sea mediante la implementación de medidas de prevención y mitigación, la formulación de planes de emergencia o la asignación eficiente de recursos.

La exposición se refiere a la presencia de población, edificaciones, sistemas y otros elementos en zonas donde existen amenazas naturales, lo que implica su potencial afectación o pérdida. Este componente esencial del riesgo se representa mediante el modelo de exposición, una herramienta que concentra, de manera lo más detallada posible, la ubicación y características de los activos susceptibles a impactos de fenómenos como terremotos, huracanes o inundaciones. Para estimar adecuadamente el nivel de riesgo, cada elemento incluido en el modelo de exposición debe analizarse en función de su vulnerabilidad física frente a la amenaza que enfrenta.

Un modelo de exposición es una herramienta que permite identificar y caracterizar los elementos que podrían verse afectados por una amenaza natural. Estos elementos, también conocidos como activos o bienes, pueden ser edificios (viviendas, escuelas, hospitales, centros comerciales, etc.), infraestructura crítica (puentes, carreteras, redes eléctricas, etc.) y población (número de personas que viven o se alojan en un tiempo determinado dentro de las edificaciones). En la Figura 193 se puede apreciar una vista aérea de un sector de la ciudad de San Salvador, donde se identifican diversas edificaciones con diferentes tipos de techo y áreas expuestas.

En el caso particular del riesgo sísmico, contar con un modelo de exposición confiable resulta esencial, ya que permite estimar con mayor precisión las posibles pérdidas humanas y económicas que podría ocasionar un evento sísmico en una zona determinada. Esta herramienta resulta clave para priorizar acciones de reducción de vulnerabilidad y orientar la planificación territorial hacia criterios de seguridad.
Como primer paso, se ha priorizado la generación de un modelo de exposición orientado principalmente al análisis del riesgo sísmico, dada la relevancia de esta amenaza en el contexto nacional. Sin embargo, se tiene previsto que el modelo sea ajustado y ampliado progresivamente para incorporar otras amenazas, como inundaciones, deslizamientos o eventos climáticos extremos.

Aunque se trata de una primera aproximación, el modelo desarrollado representa un punto de partida sólido y estratégico hacia una modelación integral del riesgo a nivel nacional, y constituye una herramienta fundamental para mejorar la toma de decisiones y avanzar en la gestión del riesgo de desastres en El Salvador.

5.2 Metodología y datos de entrada

5.2.1 Fuentes de información y procesamiento

Para desarrollar un modelo de exposición de edificaciones es necesario contar con información detallada sobre la ubicación de las estructuras, sus atributos estructurales y sus activos expuestos (ocupantes, valor económico, tiempo de afectación, etc.). La

información necesaria depende del tipo de evaluación de riesgo que se va a realizar. Idealmente, el desarrollo de un modelo de exposición podría partir de datos catastrales que reporten al mayor nivel de detalle, es decir, edificio por edificio.

Sin embargo, la información catastral disponible, se encuentra agregada por distritos, lo que requiere una demanda importante de tiempo y recursos para recopilar y armonizar datos que puedan tener diferencias entre períodos de actualización, información disponible, actualización y cobertura. Por esta razón, una alternativa para la recolección de datos es por percepción remota. Las nuevas tecnologías permiten obtener información sobre la superficie terrestre a partir de imágenes tomadas desde satélites o aviones, obteniendo información de forma eficiente a nivel nacional, incluso en zonas con información catastral no actualizada o de difícil acceso.



Figura 193. Vista aérea del Área Metropolitana de San Salvador.
Fuente: MARN

5.2.2 Variables clave para la construccion del modelo de exposición de infraestructura

Entre 2022 y 2024, el Ministerio de Medio Ambiente ha impulsado esfuerzos significativos para desarrollar un modelo de exposición a nivel nacional. Este proceso ha implicado la recopilación y procesamiento de diversos conjuntos de datos, incluyendo información demográfica censal, cartografía histórica, imágenes satelitales, insumos fotogramétricos y topográficos, levantamientos con tecnología Light Detection and Ranging (LIDAR), así como fuentes disponibles en línea, con el objetivo de caracterizar el entorno construido y sus transformaciones en el espacio y el tiempo (López y Chávez, 2022).

Asimismo, se ha procurado mantener la representatividad de los datos provenientes del VI Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en 2007. Este censo proporcionó una base de datos de puntos de construcción distribuidos a nivel nacional, diferenciando campos específicos para la infraestructura habitacional y la población. La Tabla 30 enlista los campos incluidos en este instrumento que son de especial interés para la construcción del modelo de exposición.

A partir de dicha información, y mediante criterios de ingeniería, se identificaron los principales sistemas estructurales presentes en las edificaciones del país, así como su distribución geográfica.

Cabe destacar que en el año 2024, el Banco Central de Reserva se elaboró el VII Censo de Población y VI de Vivienda, cuyos resultados se espera puedan ser incorporados en futuras actualizaciones del Modelo de Exposición Nacional.

Tabla 30. Campos de información del VI Censo Nacional de Vivienda de 2007 usado en la construcción del modelo de exposición de El Salvador

Vivienda	Población
Departamento	Área
Municipio	Perímetro
Coordenadas	Departamento
Conteo de viviendas por cuadra urbana	Municipio
Tipo de material de paredes	Hectáreas
Tipo de material de techo	Densidad poblacional
Tipo de material de piso	Coordenadas

Fuente: DIGESTYC (2007).

En general, los análisis de riesgo requieren modelos de exposición que integren información clave sobre los activos expuestos. Estos insumos permiten estimar con mayor precisión los posibles daños, pérdidas económicas y afectaciones humanas ante la ocurrencia de una amenaza natural. A continuación, se describen los principales componentes que fueron incorporados:

- **Ubicación**

La ubicación define la distancia que existe entre una estructura y la fuente de la amenaza, como una falla sísmica activa. Por lo general, la intensidad que puede ocasionar daños a los elementos expuestos aumenta con la proximidad a la fuente. Para determinar la ubicación de los edificios expuestos de una ciudad, es necesario contar con una base de datos georreferenciada como las bases de datos de información geográfica, o censos de población y vivienda. En la Figura 194 se puede observar la ubicación geográfica de diferentes huellas de activos con su elevación extruida dentro del AMSS, reflejando sus diferentes extensiones y tamaños.



Figura 194. Ubicación georreferenciada de edificaciones en el AMSS.
Fuente: (L. López 2023).

• Atributos estructurales

Los atributos estructurales ayudan a clasificar las edificaciones según su vulnerabilidad física. Entre los principales atributos destacan: el material de construcción (madera, concreto reforzado, acero), el sistema sismorresistente (columnas y vigas, muros de corte, sistemas duales), el tipo de cimentación, el año de construcción; la normativa de diseño, el número de pisos, la regularidad en planta, en altura y el tipo de estructura de techo o cubierta (Brzev et al. 2013). Estos atributos generalmente están reportados en bases de datos de permisos constructivos, bases de datos catastrales y en los censos de población y vivienda. En la Figura 195 se visualizan los atributos estructurales de la mampostería confinada.



Figura 195. Sistema constructivo de mampostería confinada.
Fuente: (L. López 2023).

• Valor expuesto, número de ocupantes y costo de reemplazo

El número de ocupantes y el costo de reemplazo son elementos esenciales para estimar las posibles pérdidas humanas y económicas. El valor de reposición se calcula comúnmente a partir del área construida promedio y el costo por metro cuadrado correspondiente a cada tipología constructiva.

Cabe señalar que el costo de reemplazo suele ser superior al valor actual de la edificación, ya que excluye el costo del terreno e incorpora requerimientos adicionales de calidad y normativa constructiva. Esta información puede obtenerse de fuentes como catastros municipales, estadísticas sectoriales, bancos centrales, oficinas de planificación o gremios de la construcción.

• Identificación de áreas de infraestructura

Gracias a los avances en tecnologías de percepción remota y análisis de imágenes, actualmente es posible obtener información detallada de la infraestructura construida a partir de imágenes satelitales de alta resolución. Un ejemplo destacado es el proyecto Open Buildings de Google Research (https://sites.research.google/open-buildings/), que genera conjuntos de datos abiertos sobre la ubicación, tamaño y forma de edificaciones a nivel mundial, cuyo objetivo es la construcción de un conjunto de datos abiertos y accesibles que contengan información sobre la ubicación, el tamaño y la forma de los edificios en todo el mundo.

El conjunto de datos proporcionado por Open Buildings consta de tres partes: polígonos de construcción, puntos de construcción y umbrales de puntuación. Los puntos y polígonos de construcción se almacenan en archivos de tabla fragmentados espacialmente; cada fila de un archivo representa un polígono o punto de construcción. La información cartográfica de Open Buildings en su versión 3, se convierte en un casillero vacío en el que se definen las características fundamentales de cada una de las edificaciones expuestas para construir el modelo de exposición de infraestructura para El Salvador.

5.2.3 Procesamiento de información

Es importante señalar que la información utilizada para construir el modelo de exposición nacional atraviesa distintas fases de preprocesamiento y preparación, con el fin de detectar vacíos de información o coberturas incompletas. En los casos donde se identifican atributos faltantes en las edificaciones, se aplican técnicas de inferencia mediante algoritmos de aprendizaje supervisado. En particular, se ha utilizado el algoritmo K-Nearest Neighbors (KNN) o "k-vecinos más cercanos", que permite estimar los valores ausentes tomando como referencia características conocidas de edificaciones similares en el entorno construido.

A través de esta metodología, se logró completar atributos clave como el tipo de cubierta, el uso de suelo, los materiales de las paredes, el sistema resistente a cargas laterales y el año estimado de construcción, mejorando significativamente la robustez y consistencia del modelo.

Una vez recopilados e inferidos todos los atributos, los activos fueron agrupados en clases de edificación con características estructurales comunes, tales como el número de niveles, el material predominante, el área construida y el uso asignado. Esta agrupación sigue una taxonomía estructural específica, que permite organizar y clasificar los tipos constructivos con fines analíticos y de modelación del riesgo. Este concepto será abordado en mayor detalle en el capítulo de vulnerabilidad.

La Figura 196 presenta un diagrama de flujo que sintetiza el proceso de recopilación, procesamiento e integración de los distintos conjuntos de datos utilizados para la construcción del modelo de exposición nacional de edificaciones.

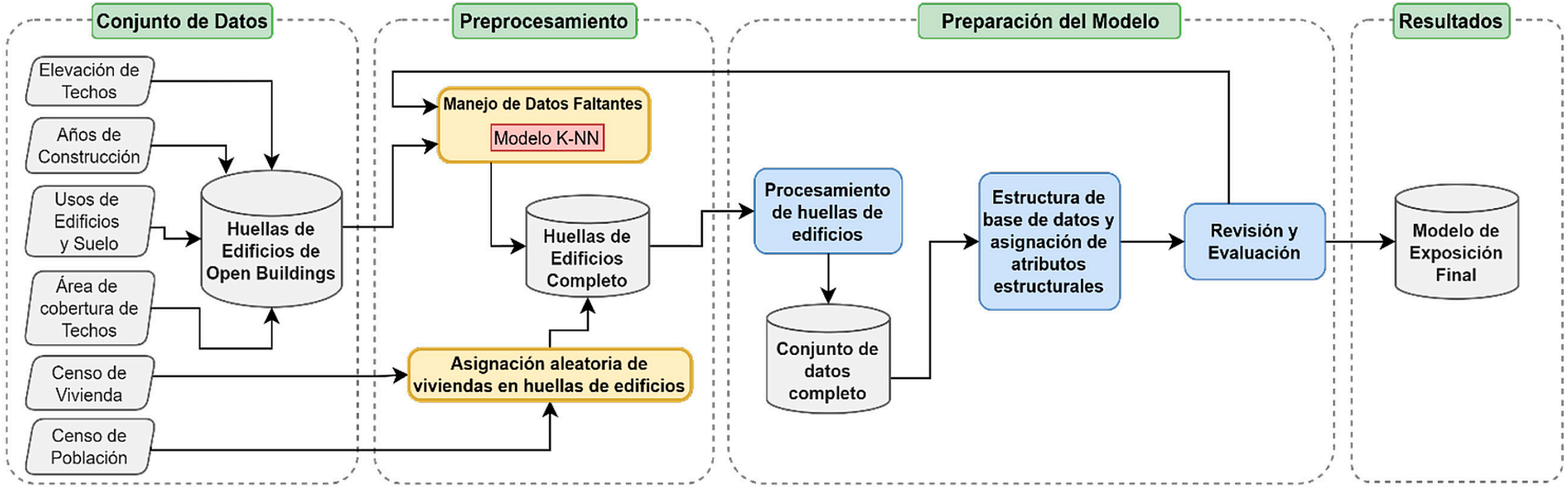


Figura 196. Diagrama de flujo que presenta el proceso de recolección, procesamiento y preparación de datos realizado para obtener un modelo de exposición nacional para El Salvador.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Clasificación de las edificaciones

Para poder categorizar de mejor manera los diferentes tipos de edificaciones existentes en el territorio nacional, se ha adoptado el concepto de la taxonomía de edificios sugerida por el Global Earthquake Model (GEM), la cual satisface y describe muy detalladamente los diferentes tipos de tipologías estructurales que puedan existir en una región determinada. La taxonomía propuesta es lo suficientemente flexible como para adaptarse al nivel de detalle disponible, permitiendo recopilar información con la profundidad requerida sin perder facilidad de manejo y aplicación.
La Fundación GEM es una de las organizaciones sin fines de lucro pioneras en el desarrollo de herramientas de uso libre para llevar a cabo análisis y evaluaciones del riesgo sísmico, donde este enfoque de cálculo de funciones de vulnerabilidad se contempla en sus algoritmos.

• Taxonomía de edificios de GEM

El objetivo de asignar una taxonomía en el modelo de exposición es crear un ADN de los diferentes tipos de edificaciones, la cual define una serie de atributos que se encuentran ligados a las características físicas que afectan su desempeño estructural. La cantidad y tipo de atributos que se consideran dependen tanto del uso previsto de la taxonomía como de la disponibilidad y nivel de detalle de la información sobre las edificaciones.

Otro de los objetivos principales de crear una taxonomía asociada a cada tipo de edificaciones es su utilización en aplicaciones informáticas, para poder describir un edificio seleccionando atributos y detalles en menús desplegables.

Para el caso de El Salvador, las taxonomías se obtienen de acuerdo al material y tipo del sistema resistente a cargas laterales, el tipo de código con el que se construyó la edificación, número de niveles, y el uso de la misma. Los atributos necesarios para la clasificación de las estructuras siguiendo la taxonomía de edificaciones propuestas por GEM se resumen a continuación en la Figura 197.

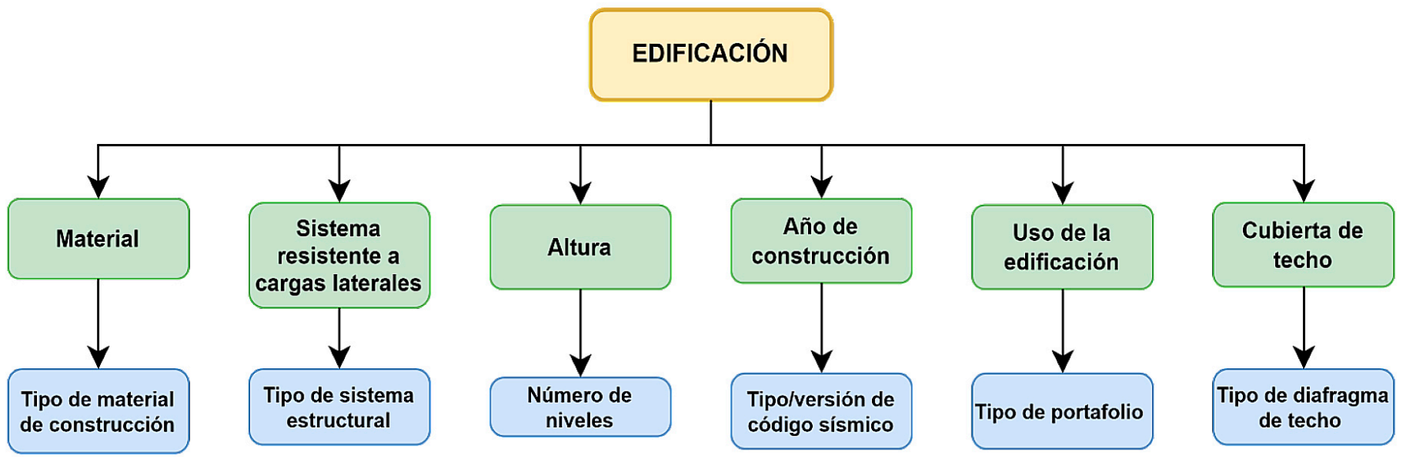


Figura 197. Taxonomía de edificios GEM con cada atributo asociado.
Fuente: Adaptado a El Salvador, basado en taxonomía de edificaciones GEM.

5.3 Atributos estructurales

Para cada edificación se analizan variables categóricas como el material constructivo de las paredes externas, el tipo de techo, el año de construcción, la altura, el uso u ocupación principal de la estructura, el área de construcción, etc.; cada una de estas variables ayuda a determinar un atributo estructural de la edificación. Siguiendo la clasificación de edificaciones propuestas en la taxonomía de la Fundación GEM para la clasificación de edificios (Silva et al. 2021), se determinaron -como mínimo- los siguientes atributos estructurales:

5.3.1 Material constructivo

Corresponde al material predominante del sistema constructivo de la edificación. En El Salvador, así como en otros países de la región, los más comunes son la mampostería y sus variantes, así como el concreto reforzado. Las variables más importantes para determinar el material constructivo son el material de las paredes exteriores y el tipo de armazón o estructura exterior. La definición de las taxonomías de acuerdo con el material de construcción de la edificación se detalla en la Tabla 31.

Tabla 31. Taxonomía de edificios GEM para tipo de material constructivo

Taxonomía de material	Tipología constructiva
MR+CBH	Mampostería reforzada
MCF+CLBRS	Mampostería confinada
CR	Concreto reforzado
MATO	Material informal: tales como lamina de asbesto, lona, cartón, etc.
MUR+ADO	Adobe
W+WLI	Madera
W+WWD	Bahareque
S	Acero

Fuente: Basado en Silva et al (2021).

5.3.2 Sistema Resistente a Cargas Laterales

También llamado LLRS (por sus siglas en inglés) es el sistema que resiste la acción de las fuerzas sísmicas o viento. Los sistemas más comunes son los muros de cortante y los marcos o pórticos. Las variables más importantes para determinar el LLRS son el material de las paredes exteriores, el tipo de armazón de la estructura y la altura de la edificación. En la Tabla 32 se definen las taxonomías correspondientes.

Tabla 32. Taxonomía de edificios GEM, para Sistema Resistente a Cargas Laterales (LLRS)

Taxonomía de LLRS	Tipo de sistema estructural
LWAL	Pared de corte
LFM	Marcos a momento
LFINF	Marcos a momento con paredes de relleno
LDUAL	Sistema dual: marco-pared
LFBR	Marcos arriostrados
LN	No tiene sistema

Fuente: Basado en Silva et al (2021).

En la Tabla 33 se muestran fotografías de edificaciones en El Salvador, clasificadas de acuerdo al material de sus paredes externas.

Tabla 33. Clasificación de las edificaciones de acuerdo con el material de las paredes y Sistema Constructivo Resistente a Cargas Laterales

MAMPOSTERÍA REFORZADA	
Mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral (MR/LWAL) Paredes de mampostería con celdas huecas en bloques de concreto, las cuales se refuerzan con varillas de acero verticales, horizontales y algunas se rellenan con mortero (grout), para confinar el acero.	
Mampostería Confinada (MCF/LWAL) Paredes con paneles de mampostería sin reforzar a base de bloques de barro, arcilla o concreto, debidamente confinados por elementos de concreto reforzado horizontal (vigas o soleras) y verticales (columnas o nervios).	
CONCRETO REFORZADO	
Marcos de concreto resistente a momento (CR/LFM) Sistema totalmente restringido a momento en el cual el marco es el encargado de resistir las cargas verticales impuestas y las horizontales por sismo.	
Marcos de concreto resistentes a momento con elementos de mampostería de relleno (CR/LFM+LFINF) El marco se encarga de resistir las cargas verticales impuestas y las horizontales por sismo, pero además poseen elementos de relleno de mampostería, ya sea ligados o desligados del marco.	
Paredes de carga estructural de concreto (CR/LWAL) En estos sistemas estructurales los componentes verticales (paredes) se encargan de resistir las fuerzas laterales impuestas, dichos elementos se encuentran conformados por muros estructurales a cortante. Esta tipología estructural se ha vuelto común en la construcción de apartamentos en San Salvador.	
Sistema dual marcos de concretos resistentes a momento y paredes de carga de concreto (CR/LDUAL) Este sistema estructural se caracteriza por contar con marcos de concreto resistente a momento en el cual toman carga vertical y una parte de la carga horizontal, además cuenta con muros estructurales a cortante los cuales se encargan, casi en su totalidad, de transmitir las cargas horizontales impuestas y tomar parte de las cargas verticales.	
OTROS MATERIALES Y SISTEMAS RESISTENTES A CARGAS LATERALES	
BAHAREQUE (W+WWD) Es la pared construida a base de lodo mezclado con zacate o pedazos de teja de barro, sostenida en una armazón hecha principalmente con juncos de varas de castilla o material similar.	
ADOBE (MUR+ADO/LWAL) Está fabricado a base de ladrillos de tierra sin reforzar mezclada con zacate, el cual es compactado en moldes y secado al sol. Los adobes son pegados entre sí con lodo. Los espesores de sus paredes son superiores a los 40 centímetros.	
MADERA (W+WO/LN) Generalmente están construidas con tablas y sostenidas por una armazón de cuartones o cuartoncillo.	
ACERO (S+SR/LFBR) Son sistemas de marcos resistentes a momentos excéntricos o concéntricos, con ductilidad importante, que en ocasiones presentan elementos diagonales que se encargan de rigidizar la estructura, limitando parcialmente los desplazamientos y o deformaciones de las mismas ante solicitaciones sísmicas o de viento.	
MATERIAL INFORMAL (MATO/LN)	
Lámina metálica: Las láminas pueden ser lisas o acanaladas, sostenidas comúnmente por armazones de madera.	
Paja, palma u otro vegetal: Este tipo de material se utiliza para construir los ranchos, mayormente localizados en el área rural.	

Desechos: Esta clase de material se encuentra en las viviendas marginales y se refiere a pedazos de madera, láminas, plásticos, etc.	 

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

5.3.3 Año de construcción y código sísmico

Corresponde al año en el cual fue construida o modificada estructuralmente una edificación. Adicionalmente, el año de construcción permite inferir (junto con el tipo de material constructivo) si la edificación fue construida bajo los lineamientos de un código sísmico establecido en el país, y puede hacer referencia a la ductilidad esperada de la edificación (capacidad de la estructura a soportar cargas laterales sin perder su integridad o poner en riesgo la vida de los ocupantes, los componentes y los contenidos); donde a mayor ductilidad, mejor es el desempeño de la estructura durante un sismo.

Para la determinación y posterior asignación de los años constructivos de las edificaciones contenidas en el modelo de exposición, se utilizaron imágenes históricas de las diferentes ciudades principales de El Salvador, provenientes de levantamientos en campo realizados por el Ministerio de Medio Ambiente y de un catálogo fotogramétrico gestionado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). En la Figura 198 se observa la distribución estimada de años de construcción a lo largo de un sector del AMSS.

Una vez compiladas cronológicamente las imágenes, se seleccionaron diferentes rangos de años de construcción para la clasificación en tipo de código sísmico, de acuerdo a la siguiente descripción:

- No Código (CDN), todas aquellas construcciones antes de 1966, donde no existía un reglamento para diseño sísmico propiamente establecido.
- Código Bajo (CDL), correspondiente al período de construcción entre 1966 y 1997 asociado al primer código sísmico, el cual fue adoptado en mayo de 1966 tras el devastador sismo del 3 de mayo de 1965 en San Salvador.
- Código Medio (CDM), comprende las construcciones después de 1997, en relación al Reglamento de Emergencia de Diseño Sísmico de El Salvador (REDSES), promulgado en el año 1989 como respuesta al evento del 10 de octubre de 1986, y al posterior reglamento de 1994 denominado RESESCO (Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones).

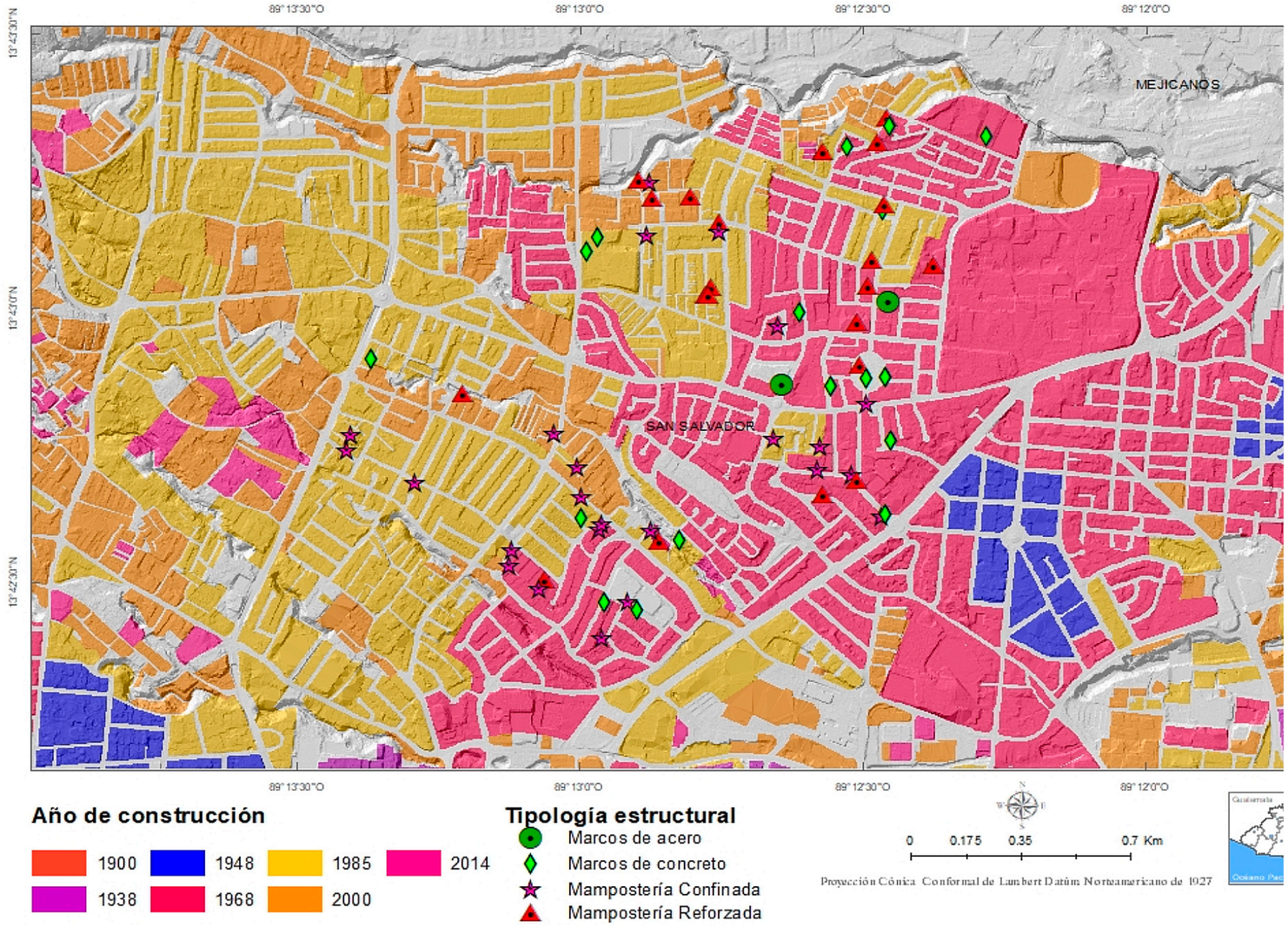


Figura 198. Distribución de años de construcción en un sector de San Salvador.
Fuente: L. López (2021).

El crecimiento de la mancha urbana en el AMSS ha sido un proceso acelerado y constante durante las últimas décadas, impulsado por diversos factores socioeconómicos naturales y políticos. Este fenómeno ha traído consigo importantes transformaciones en el paisaje urbano y ha generado diversos desafíos para la planificación y el desarrollo sostenible de la región, tales como la expansión desordenada y no planificada.

Esto ha generado problemas como la proliferación de asentamientos informales, la falta de infraestructura básica y la deficiencia en la prestación de servicios públicos; una expansión impulsada por la búsqueda de vivienda por parte de la población de ingresos bajos y medios, que ha encontrado en las periferias urbanas una alternativa más asequible en comparación al centro de la ciudad. En la Figura 199 se observa un mapa de evolución de la mancha urbana de las ciudades de San Salvador y Santa Tecla.

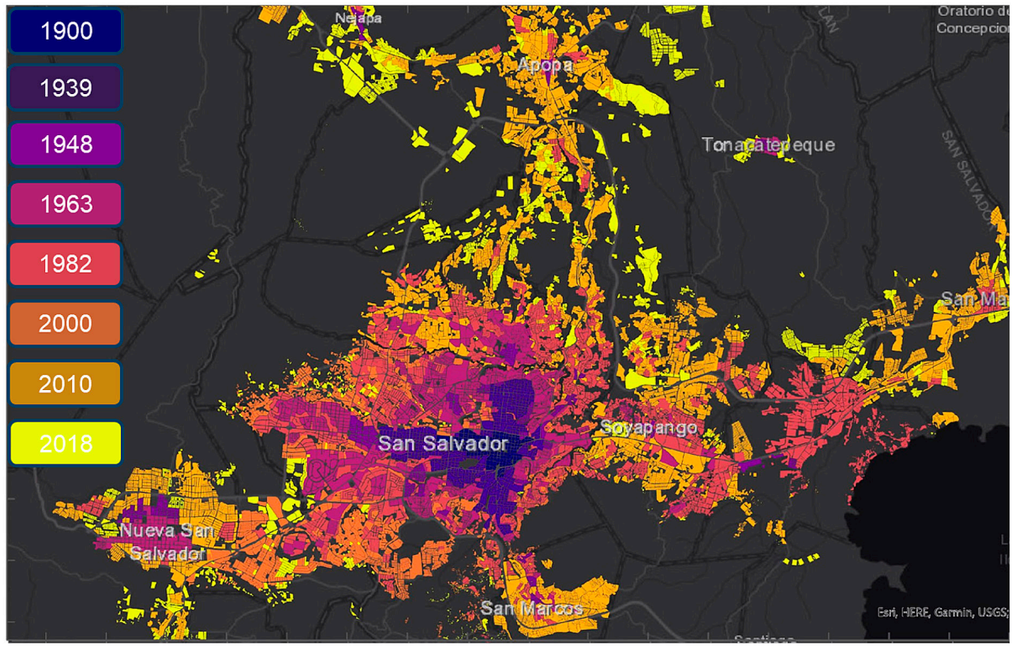


Figura 199. Evolución de la mancha urbana en las ciudades de San Salvador y Santa Tecla entre 1900 y 2018.
Fuente: L. López (2022).

5.3.4 Altura de edificaciones

Se relaciona con el número o rango de pisos de la edificación que se encuentra en la base de datos del modelo de exposición. Para la determinación de las alturas de las diferentes edificaciones se tomó en cuenta el levantamiento a nivel nacional de LIDAR 2014 (MARN, 2014), realizando una asignación directa de elevaciones a las huellas de edificios de Open Buildings y procesos de inferencias empleando inteligencia artificial, para los polígonos que no poseen información.

El proyecto de vuelo LIDAR a nivel nacional, tuvo como objetivo la obtención y generación de productos que permitieran realizar modelos de terreno a una resolución espacial de 1 metro, enfocados en el mejoramiento de la gestión de riesgos ambientales. Para este proyecto se realizaron 133 vuelos distribuidos en 88 días, en el período del 25 de febrero al 28 de agosto del año 2014. Entre los meses de febrero a abril (2 meses, 4 días) se levantó el 70 % del país. El 30 % restante se levantó en los meses de mayo a agosto (4 meses).

Con la obtención de las elevaciones de cada una de las huellas de las edificaciones, y considerando que se debe de definir un rango de número de niveles para las mismas, se determinaron los números de niveles de cada edificación de acuerdo a su tipo de ocupación, considerando la altura promedio de entrepiso como lo establecen los lineamientos establecidos en el Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del AMSS, y el Reglamento de La Ley de Urbanismo y Construcción en lo relativo a Parcelaciones y Urbanizaciones Habitacionales.

En la Figura 200 se puede apreciar una extrusión de las huellas de las edificaciones con la información de altura derivada del levantamiento LIDAR.



Figura 200. Representación de alturas de edificios utilizando la información de alturas de LIDAR.
Fuente: T. Chávez (2020).

5.3.5 Ocupación o Portafolio

La ocupación se refiere al uso de la estructura. Se deriva directamente de las variables de uso de suelo, los cuales fueron obtenidos mediante la digitalización directa de edificios con sus respectivos usos, con apoyo de la Universidad de El Salvador (UES), empleando bases consolidadas en el Ministerio de Medio Ambiente, servicios gratuitos de imágenes satelitales y de catastro del Centro Nacional de Registros (CNR), junto a los planes de desarrollo territorial elaborados por el Viceministerio de Vivienda.
En el modelo de exposición nacional se han clasificado todos los posibles usos principales en los siguientes atributos de ocupación: residencial, comercial, industrial, educativo, sanitario, institucional y otros, los cuales reúnen las actividades comerciales, públicas y privadas más representativas. A continuación, se enumeran los siete portafolios contenidos en el modelo de exposición nacional:

- El portafolio residencial comprende todas las estructuras utilizadas con fines habitacionales sin un objetivo comercial.
- El portafolio comercial incluye todas las estructuras que se dedican a una actividad comercial.
- El portafolio industrial incluye todas las estructuras que se dedican a una actividad industrial o manufacturera.
- El portafolio educativo contiene las instalaciones educativas de los sectores público y privado, incluidas escuelas primarias, secundarias y universidades.
- El portafolio de salud incluye centros proveedores de atención sanitaria, clínicas y hospitales urbanos importantes.
- El portafolio institucional incluye todos los edificios dedicados a la gobernanza y servicios públicos no incluidos en los sectores anteriores, como comisarías e instalaciones municipales.
- Por último, el resto de estructuras se agrupan en un sector especial para "otros" usos, como estructuras dedicadas a la promoción de actividades culturales, deportivas y lugares de congregación.

Cabe destacar que estos atributos de ocupación permiten identificar la ubicación de infraestructura prioritaria, como centros de salud, instituciones educativas e inversiones públicas y privadas. Esta información es fundamental para que los tomadores de decisiones puedan evaluar los principales impactos económicos y en vidas humanas ante la ocurrencia de un evento natural.

En concordancia con esta línea de trabajo, entre 2022 y 2023, el Ministerio de Medio Ambiente, con el apoyo de estudiantes de la Universidad de El Salvador (UES), llevó a cabo levantamientos de campo para registrar el uso u ocupación de edificaciones en zonas urbanas. Este esfuerzo abarcó 14 distritos del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), así como las ciudades de Santa Ana, Sonsonate, Sonzacate, Nahuilingo, San Antonio del Monte, Ahuachapán, Usulután, Santa María y San Miguel. En la Figura 201 se presentan los usos asignados a las cuadras urbanas del AMSS.

Con el objetivo de fortalecer la cartografía producida por el Ministerio de Medio Ambiente y mejorar la precisión en la asignación de usos a las huellas edificadas provenientes de la base de datos de Open Buildings, se integraron los Planes de Desarrollo Territorial (Figura 202) como fuente complementaria.

A partir de esta información, se realizó una asignación directa de usos de suelo a las huellas edificadas. Para aquellas huellas que carecían de información específica, se aplicó un modelo de inferencia utilizando técnicas de inteligencia artificial, específicamente el algoritmo KNeighborsClassifier de Python. Este enfoque permitió estimar de forma robusta el uso predominante de cada edificación, alcanzando un error absoluto porcentual medio del 7.9 % y una precisión del 97.13 % en la clasificación de valores verdaderos.

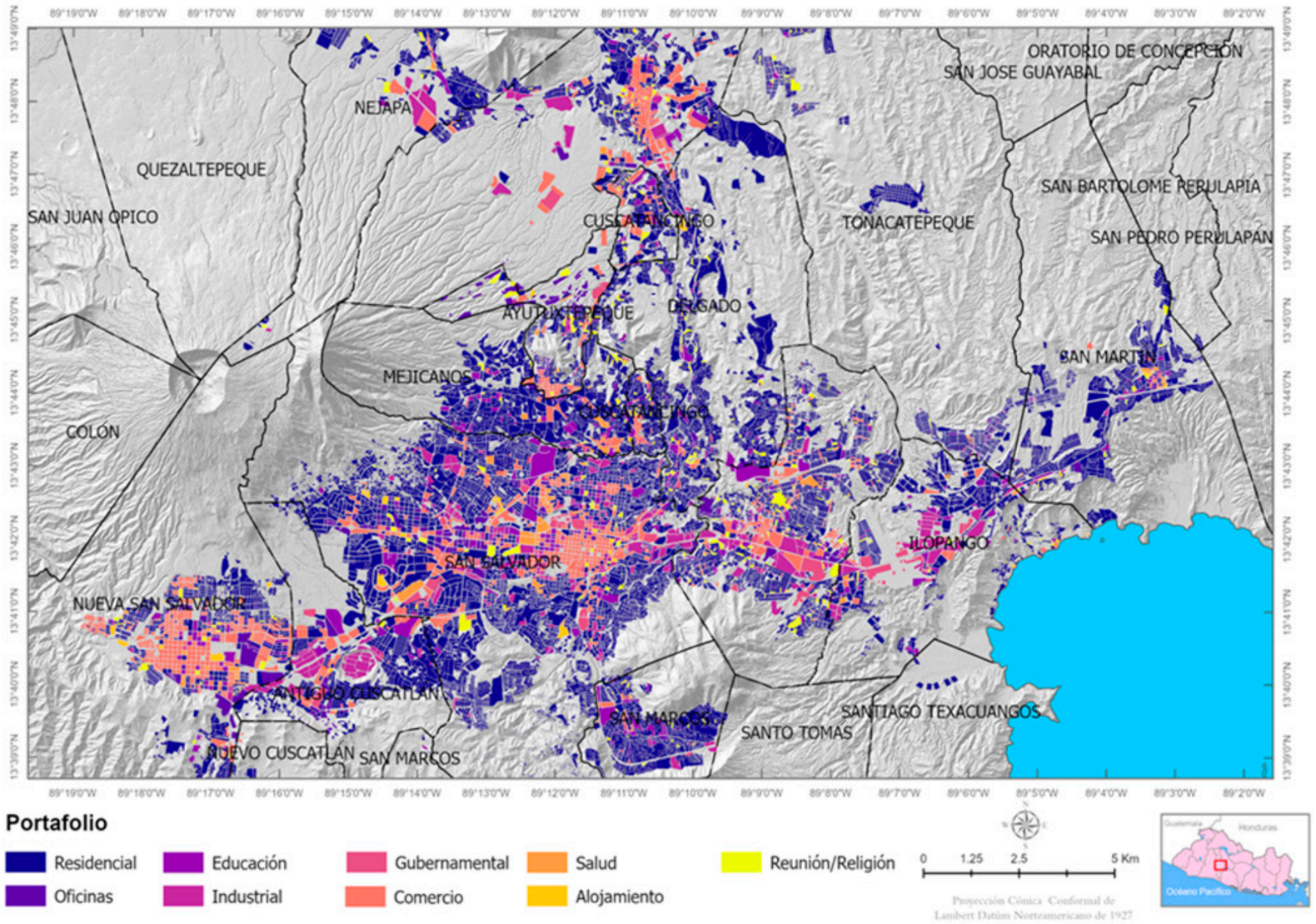


Figura 201. Definición de usos de suelo en ciudades de San Salvador y Santa Tecla.
Fuente: L. López (2022).

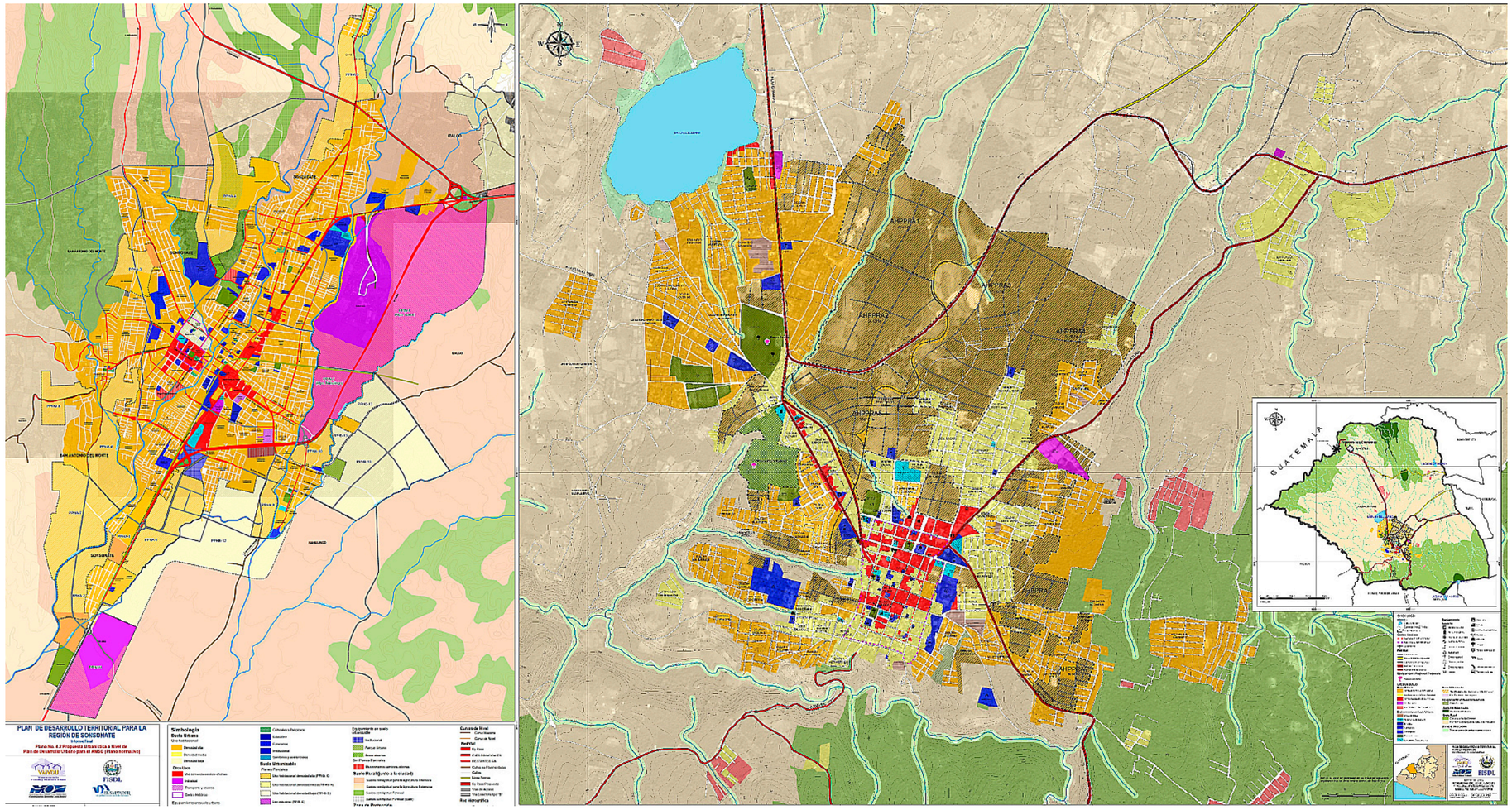


Figura 202. Mapas de planes de desarrollo territorial para las ciudades de Sonsonate y Ahuachapán.
Fuente: L. López (2022).

5.4 Tipologías constructivas y usos de suelo predominantes en El Salvador

La Figura 203 muestra la distribución -a nivel nacional- de los edificios contenida en el modelo de exposición, de acuerdo con el material de las paredes externas (o sistema constructivo) y su ocupación. Por otro lado, en las Figuras 204 y 205 se muestra la misma distribución por departamento.

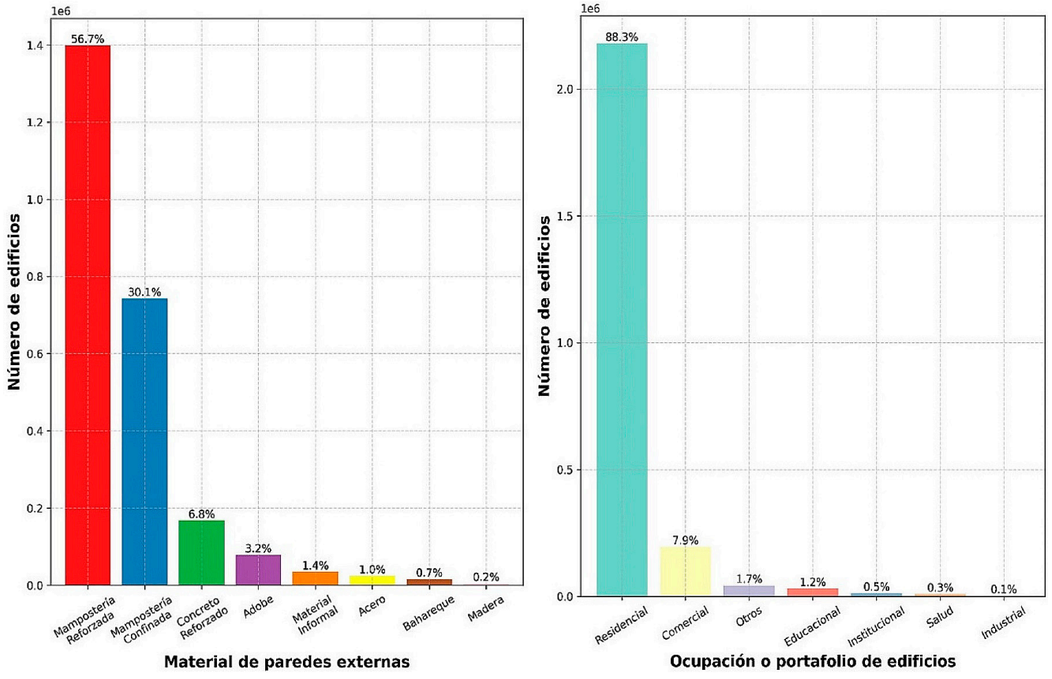


Figura 203. Distribución de modelo de exposición nacional de acuerdo a tipología constructiva y portafolio
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En la Figura 203 se observa que, a nivel nacional, la mayor cantidad de edificaciones se concentra en la tipología constructiva de mampostería, representando aproximadamente el 87 % del universo de los activos. Un 56.7 % se asocia a la mampostería reforzada configurada con bloques de concreto con refuerzo integral y el 30.1 % restante corresponde a la mampostería confinada, a base de ladrillo de arcilla o barro cocido, confinada por columnas y vigas de concreto reforzado.

Un dato relevante del modelo es que no se identifican edificaciones construidas con mampostería no reforzada, una tipología común en otras regiones donde la aplicación de normativas constructivas es limitada y predomina la autoconstrucción informal. Esta ausencia sugiere una transición hacia sistemas constructivos más robustos, posiblemente impulsada por una mayor fiscalización municipal y la experiencia acumulada frente a eventos sísmicos.

En cuanto a la tercera tipología constructiva más representativa, el modelo muestra que el concreto reforzado representa aproximadamente el 6.8 % del total de edificaciones. Este sistema estructural es ampliamente utilizado en edificaciones verticales, como apartamentos residenciales, y también en ampliaciones de estructuras existentes. Se presenta en diferentes configuraciones, incluyendo marcos resistentes a momento, marcos con elementos de mampostería de relleno, y paredes estructurales de concreto que actúan como elementos de carga.

Finalmente, el modelo identifica edificaciones construidas con materiales y sistemas estructurales considerados de mayor vulnerabilidad sísmica, como el adobe, bahareque, madera, acero y materiales informales (láminas metálicas, cartón, paja, desechos, entre otros). En conjunto, estas tipologías representan aproximadamente el 6.5 % del total de edificaciones a nivel nacional.

De particular relevancia para el análisis de riesgo sísmico son aquellas estructuras construidas con adobe y bahareque, debido a su baja capacidad para resistir cargas laterales. Asimismo, se presta especial atención a las edificaciones que no cuentan con un sistema resistente a cargas laterales identificado, principalmente aquellas

construidas con materiales informales. Estas representan un 5.3 % del universo de edificaciones, una proporción que ha disminuido en las últimas décadas como resultado de los efectos devastadores observados en eventos anteriores y del refuerzo de los controles municipales sobre el cumplimiento de normativas de construcción.

Por otro lado, como se observa en la Figura 203, el Modelo de exposición nacional indica que el portafolio residencial es el predominante, abarcando el 88.3% de los activos. Le siguen los usos comerciales con un 7.9 %, mientras que el 3.8 % restante se distribuye entre portafolios institucionales, educativos, sanitarios, industriales y otros. Esta caracterización es fundamental para definir la fragilidad estructural de los distintos sistemas constructivos y orientar las estrategias de reducción del riesgo sísmico.

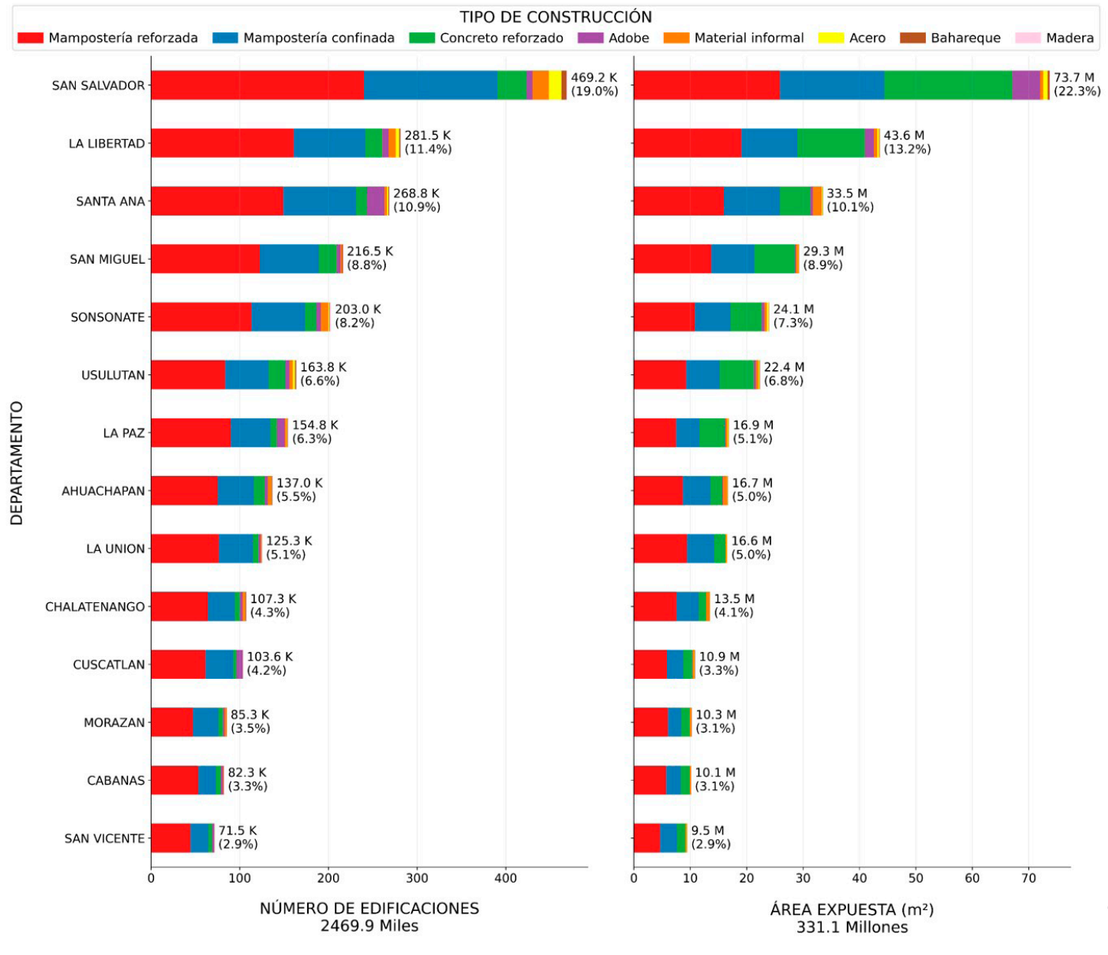


Figura 204. Distribución departamental del Modelo de exposición de acuerdo a la tipología constructiva
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En las figura 204 y 205, se presentan la distribución del total de edificaciones registradas en el modelo de exposición nacional, desagregadas por departamento, de acuerdo con su tipología constructiva y portafolio de uso de suelo. Asimismo, se muestra la proporción del área de construcción expuesta en cada uno de los 14 departamentos del país.

Destaca el departamento de San Salvador, que alberga la capital, al concentrar el 19 % del total de edificaciones del país, lo cual representa el 22.3% del área de construcción expuesta a nivel nacional.

A nivel departamental, se observa que la mampostería reforzada con bloques de concreto y refuerzo integral constituye la tipología constructiva predominante. Por su parte, el concreto reforzado tiene una mayor representación en los departamentos con mayor densidad urbana, como San Salvador, La Libertad, Santa Ana, Sonsonate y San Miguel.

Un patrón particular que revelan estas distribuciones es la concentración relativa más alta de edificaciones de adobe y bahareque en los departamentos de Santa Ana, La Paz y Cuscatlán, lo cual implica mayores niveles de vulnerabilidad estructural en esas zonas.

En cuanto a los portafolios de uso de suelo, la Figura 205 confirma la predominancia del uso residencial en todos los departamentos, seguido por el uso comercial. En tercer lugar, destaca el portafolio educativo, principalmente en el departamento de San Salvador, donde se registra una mayor cantidad de instalaciones escolares y universitarias.

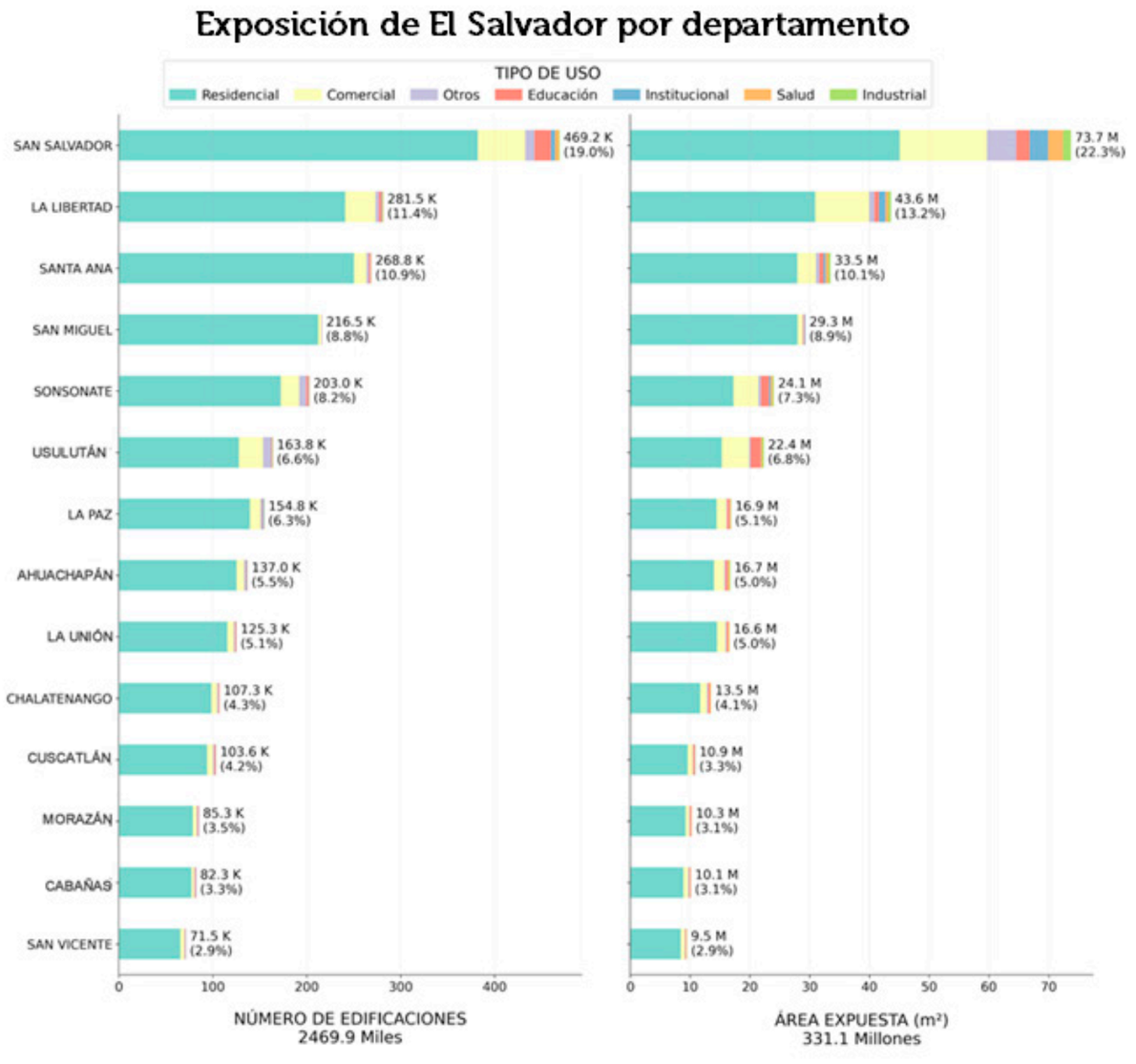


Figura 205. Distribución departamental del Modelo de exposición nacional de acuerdo al portafolio.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

5.5 Población expuesta

Para la distribución de la población expuesta, se adoptó la metodología desarrollada para el modelo de pérdidas semiempírico del sistema PAGER (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response), implementado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Esta metodología permite estimar de forma más precisa la exposición humana ante eventos sísmicos, a partir de la variabilidad espacial y temporal de la ocupación poblacional.

El enfoque se basa en datos demográficos diferenciados para zonas urbanas y rurales, considerando la distribución de la población en distintos entornos —hogares, lugares de trabajo y espacios exteriores— a lo largo del día. Para ello, se emplean fracciones representativas de la población laboral y no laboral, segmentando la fuerza laboral en sectores industrial, servicios y agrícola, según su patrón de actividad.

Asimismo, se incorpora la tipología de las edificaciones como variable clave para estimar la carga de ocupación estructural en distintos momentos del día. Esta integración permite reflejar las diferencias en concentración poblacional dependiendo del uso del edificio (residencial, educativo, comercial, entre otros) y del horario, lo cual es esencial para una adecuada estimación de pérdidas humanas y planificación de la respuesta ante sismos.

5.5.1 Metodología de identificación de ocupantes en el día y la noche

La metodología de identificación de ocupantes durante el día y la noche se basa en características demográficas específicas, utilizando un algoritmo desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (FEMA, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS, por sus siglas en inglés).

Este algoritmo toma en cuenta factores como la edad de la población, la fracción de la población empleada y la distribución de la fuerza laboral por sector de empleo. Esto permite estimar la cantidad de personas que se encuentran en residencias (ya sea viviendas unifamiliares o multifamiliares) y en edificios no residenciales (lugares de trabajo).

De igual manera, se consideran horas de trabajo a las 2:00 a. m. (noche), 2:00 p. m. (día) y 5:00 p. m. (en tránsito), y patrones de ocupación específicos de cada edificación. Esta distribución varía en áreas rurales dependiendo de las características demográficas y coeficientes asociados a esas áreas. Para luego distribuir la población total en una celda de cuadrícula de población en categorías de ocupación por horas diurnas, nocturnas y de tránsito.

La Figura 206 presenta la distribución de los ocupantes en las edificaciones del Modelo de exposición nacional, según el horario (día, noche o tránsito) y el correspondiente uso de la edificación.

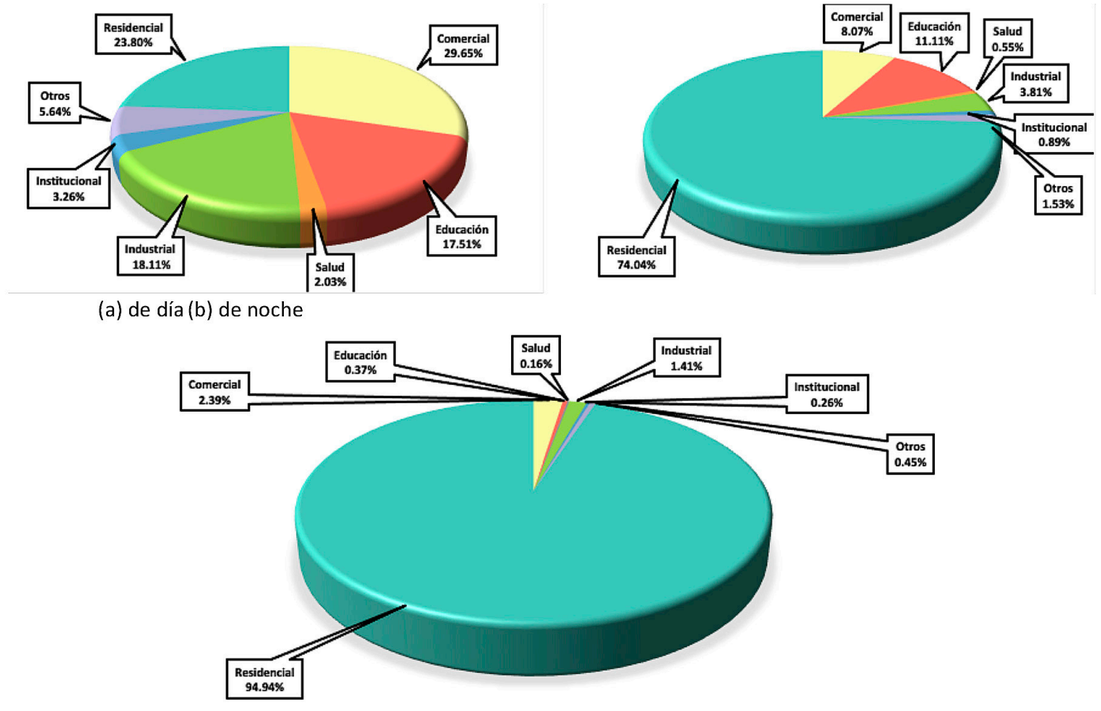


Figura 206. Distribución de la población.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

5.5.2 Mapas de modelo de exposición a nivel nacional

En la Figura 207 se muestra la distribución, a nivel nacional, de las edificaciones expuestas por municipio clasificadas según el tipo de material de construcción contenidos en el modelo de exposición nacional. La información se presenta en términos de cantidad de estructuras y la clase constructiva predominante en cada área, ofreciendo una visión integral de la distribución y composición de las estructuras en El Salvador.

Tal como se ha expresado anteriormente, la mampostería (rosa claro) es predominante en muchas áreas, especialmente en municipios con mayor densidad de edificaciones. Las estructuras de concreto (azul) prevalecen en municipios como San Salvador, Santa Ana y San Miguel. El adobe (marrón) y la madera (verde claro) tienen una menor representación, pero están presentes en algunas áreas del país. El bahareque (amarillo) y las estructuras precarias (rojo) tienen una presencia muy limitada.

La cantidad total estimada de activos expuestos es de aproximadamente 2 millones. El mapa destaca una mayor concentración de estructuras en zonas de alta densidad poblacional como el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), y en las zonas oriental (San Ana Centro) y occidental (San Miguel Centro) del país. Las estructuras se concentran principalmente en áreas urbanas, mientras que en las zonas rurales la densidad es menor.

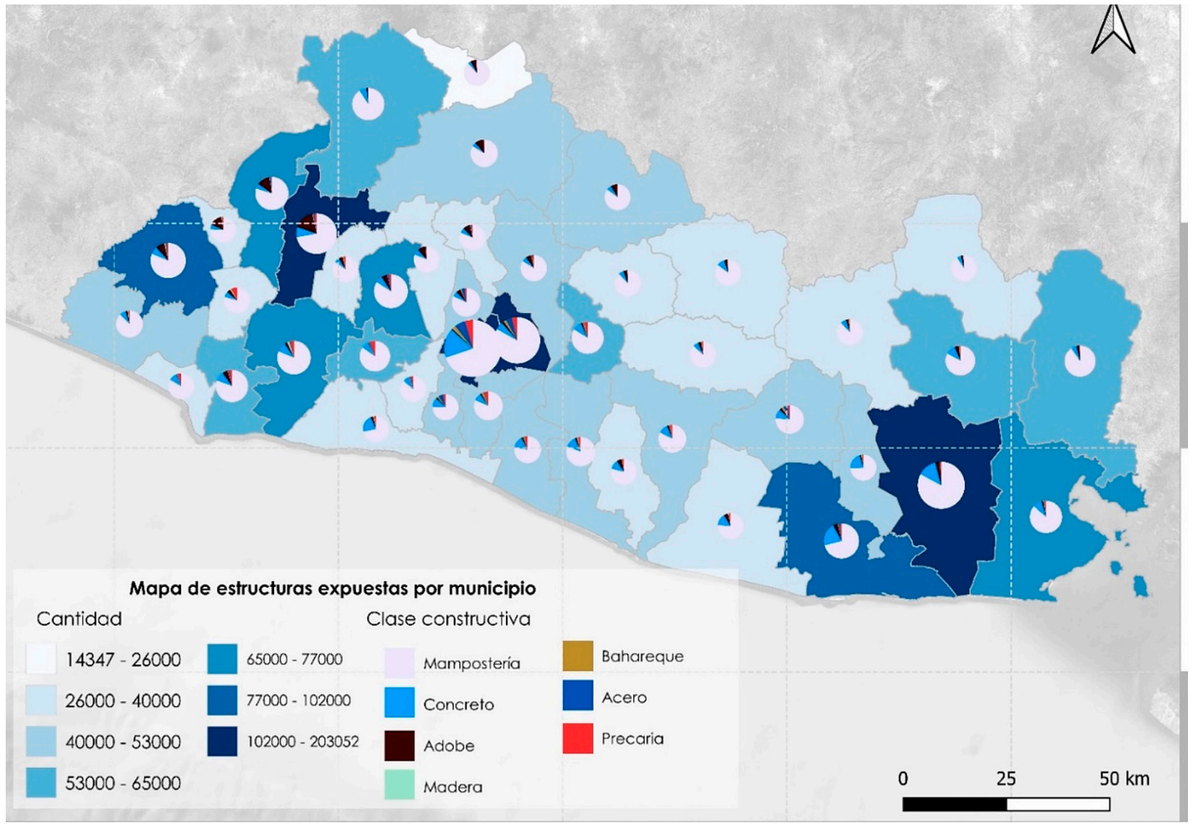


Figura 207. Distribución del número de edificaciones contenidas en el Modelo de exposición nacional.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Por otro lado, en la Figura 208 se muestra la distribución de la población por municipio en El Salvador, utilizando datos de Data for Good y la metodología PAGER para distinguir entre ocupantes durante el día, la noche y en tránsito. En muchos municipios, especialmente los que están más cerca de la capital (San Salvador), se observa una alta proporción de ocupantes de día y ocupantes en tránsito, coincidiendo con el lugar donde se ubica un mayor número de edificaciones (ver Figura 207) debido a la concentración económica que se genera en el AMSS.

Los municipios con una alta densidad de población (azul oscuro y muy oscuro) tienden a tener una distribución más equilibrada entre ocupantes de día y noche, especialmente en los departamentos de Santa Ana, San Salvador y San Miguel. En municipios del sector rural o con menor densidad de población (blanco y azul claro), se observa una mayor proporción de ocupantes de noche (azul), sugiriendo una mayor estabilidad en la población residente.

De acuerdo con la población estimada para el 2023 por esta herramienta, El Salvador presenta un total de 6.1 millones de población expuesta, concentrándose la mayoría en las zonas urbanas de los municipios Santa Ana Centro, San Salvador Centro y San Miguel Centro.

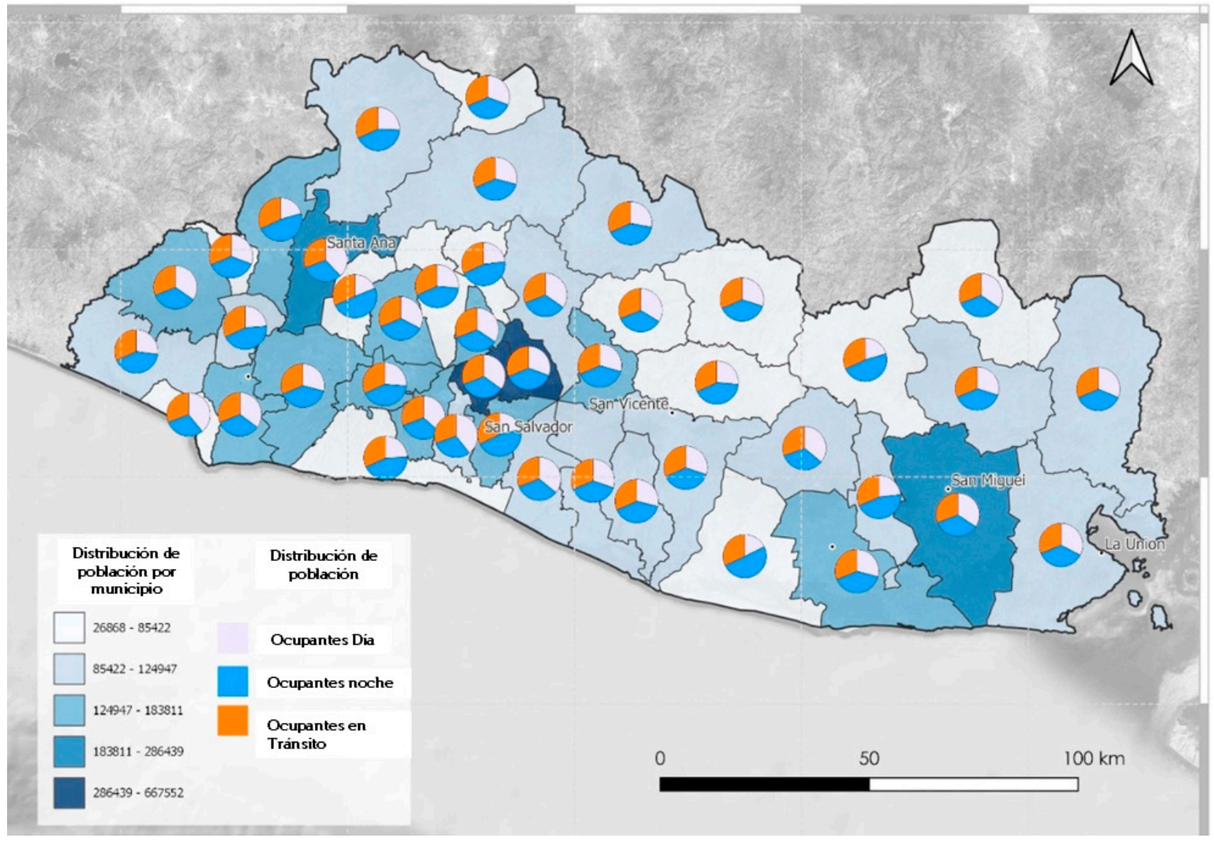


Figura 208. Distribución del número de ocupantes contenidos en el Modelo de exposición nacional. Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.



Capítulo 6

6. Vulnerabilidad ante el riesgo sísmico

6.1 Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad en sus diferentes dimensiones -física, social, ambiental, económica, cultural, y otras- es esencial para caracterizar y comprender las condiciones específicas en que se encuentran los puntos críticos de riesgos. Por ejemplo, la vulnerabilidad física determina la intensidad de los daños que puede sufrir la infraestructura ante la ocurrencia efectiva de una amenaza sobre un territorio. Evaluar la vulnerabilidad es clave en la implementación de estrategias y políticas orientadas a la reducción del riesgo, y al fortalecimiento de la resiliencia y la capacidad de respuesta de la población ante las diferentes amenazas.

En el Informe Nacional de Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades (INERV 2017), se abordaron diferentes conceptos y métodos de estimación de los principales tipos de vulnerabilidad de cara a la evaluación del riesgo sísmico; estos son, la vulnerabilidad física asociada a las deficiencias de la infraestructura expuesta para "absorber" los efectos de una amenaza de cierta intensidad, y la vulnerabilidad social asociada a las características de la población expuesta.

Dependiendo de la amenaza, los factores determinantes de la vulnerabilidad física pueden variar. Por ejemplo:

- Ante inundaciones, la vulnerabilidad física se ve mayormente influenciada por el tipo de material de construcción.
- En amenazas geológicas como caída de ceniza, influyen factores como el tipo de cubierta y las conexiones existentes de la edificación en general.
- En el caso de sismos y vientos, es necesario analizar la capacidad del sistema estructural para resistir fuerzas o desplazamientos laterales impuestos, lo cual está condicionado por las propiedades de los materiales de construcción que componen el sistema estructural, las características del sistema estructural, el nivel de diseño sismorresistente; los modos de vibración y el período dominante, entre otros.

6.1.1 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad física

El INERV 2017 ya identificaba diversos métodos para evaluar la vulnerabilidad física, incluidos métodos empíricos simplificados (como opiniones de expertos), modelos analíticos simples y procedimientos de análisis detallados, los cuales se diferenciaban en esfuerzo y precisión.

Actualmente, la práctica más extendida, y sobre la cual se desarrollan procedimientos detallados, se basa en la construcción analítica de funciones de daño o fragilidad estructural para tipologías constructivas específicas (variando tipos de materiales, número de niveles, usos, etc.). Estas funciones permiten calcular la probabilidad de exceder algún estado de daño (ej. ligero, moderado o completo) según se exceda cierto nivel de agitación del terreno o demanda sísmica.

Una vez se efectúa el análisis para cada estado de daño, estas fragilidades son vinculadas con matrices o modelos de consecuencia, también conocidas como funciones de daño a pérdida, las cuales usualmente son asignadas de manera discreta para diferentes métricas de riesgos (pérdidas humanas y económicas, damnificados, heridos, etc.) y tipologías constructivas específicas. Estos modelos tienen como objetivo reflejar que proporción entre costo/pérdida (en términos monetarios u ocupantes afectados) representaría el haber alcanzado dichos niveles de daño en la estructura; logrando así obtener Modelos de Vulnerabilidad Física, los cuales relacionan las tasas de pérdidas medias (loss ratios) y coeficientes de variación correspondientes condicionados a las

intensidades de agitación del terreno que se puedan experimentar.

Además, estos modelos pueden considerar elementos no estructurales y contenido mobiliario al interior de una edificación; parámetros cruciales al momento de estimar un escenario de riesgo sísmico.

En la última década el Ministerio de Medio Ambiente, junto con instituciones académicas como la Universidad de El Salvador (UES) y la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), ha trabajado en la elaboración de funciones de fragilidad adaptadas a las condiciones constructivas y sísmicas del país. Estas funciones consideran:

- Las propiedades de los materiales de construcción utilizados en las estructuras de El Salvador
- Las agitaciones sísmicas registradas en el territorio producidas por las fuentes sísmicas imperantes.

Este capítulo presenta un resumen de las funciones locales desarrolladas y los respectivos procedimientos de cálculo de tres tipologías:

- Mampostería reforzada a base de bloques de concreto con refuerzo integral.
- Mampostería confinada.
- Adobe.

Cabe mencionar que, de manera excepcional, para la tipología de adobe se utilizó la curva de capacidad de Tarque, et al., 2020, desarrollada con propiedades mecánicas de estructuras peruanas; sin embargo, se emplearon demandas sísmicas específicas de El Salvador para la derivación de sus curvas de fragilidad.

Además, se ha utilizado el estudio de riesgo sísmico del municipio de San Salvador (PREPARE, 2020), desarrollado por la Oficina de Asistencia Humanitaria de Estados Unidos (USAID) y la compañía privada Miyamoto International. De este estudio se extrajeron las funciones de consecuencia para pérdidas económicas por daños estructurales, modificadas específicamente para San Salvador a partir de las propuestas por la metodología para la estimación de pérdidas en Estados Unidos (HAZUS) desarrollada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) en el año 2013.

Las modificaciones se basaron en investigaciones de pérdidas económicas debido a sismos, realizadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para diferentes países incluyendo El Salvador (USGS, 2011), así como en estimaciones de daños estructurales de terremotos históricos de fallamiento local en San Salvador.

Se realizó una única modificación específica para las tipologías de mampostería, consistente en la aplicación de un factor de ajuste de 1.125 a los valores originales de HAZUS para los estados de daño leve, moderado y severo, de acuerdo con el estudio PREPARE (2020). Cabe destacar que estas funciones de consecuencia están vinculadas a los mismos estados de daño considerados en las curvas de fragilidad desarrolladas localmente.

Por otra parte, la literatura internacional ofrece un amplio repertorio de modelos que permiten establecer comparaciones significativas entre distintos sistemas constructivos. Por ejemplo, el modelo HAZUS incluye una extensa variedad de funciones de vulnerabilidad y matrices de consecuencia aplicables a las tipologías constructivas comunes en Estados Unidos. Asimismo, la Fundación GEM (Global Earthquake Model) cuenta con un compendio global de funciones de fragilidad, modelos de consecuencia y funciones de vulnerabilidad desarrolladas por distintos investigadores y disponibles de forma gratuita para uso técnico y académico.

En síntesis, este análisis integró funciones de fragilidad estructural tanto desarrolladas en El Salvador como provenientes de fuentes internacionales. Estos modelos fueron considerados en los resultados del análisis de riesgo sísmico. Para tipologías constructivas similares encontradas en ambos modelos se asignaron pesos acordados que reflejan la contribución de cada una, asegurando que la suma de estos pesos sea igual a 1. Esta metodología permite capturar una probabilidad conjunta en la estimación del riesgo sísmico, al tiempo que considera la incertidumbre en el comportamiento estructural inherente a las diversas configuraciones constructivas presentes en el modelo de exposición nacional.

6.2 Modelos de vulnerabilidad

La evaluación de daños, pérdidas económicas y fatalidades requiere la integración de un conjunto coherente de modelos de fragilidad y vulnerabilidad, alineados con las clases de edificaciones identificadas en el modelo de exposición.

Como se ha señalado previamente, el uso de modelos de fragilidad que reflejan las condiciones locales de diseño y construcción en El Salvador ha sido parcialmente abordado mediante metodologías analíticas en estudios piloto de riesgo sísmico realizados en los últimos años. Estos estudios han cubierto principalmente tipologías constructivas comunes en los sectores educativo y residencial, con predominancia de edificaciones de un nivel en mampostería reforzada y confinada.

No obstante, salvo el ajuste empírico realizado en el estudio PREPARE en 2020, hasta la fecha no se ha establecido una metodología para construir un modelo de consecuencias a nivel local que permita estimar de forma precisa los índices de pérdidas humanas y estructurales. Esta limitación responde, en gran medida, a la falta de una base de datos sistematizada sobre los costos de daños provocados por terremotos pasados, y su evolución a lo largo del tiempo sobre los distintos componentes que conforman los activos expuestos.

Asimismo, no se cuenta con un modelo de vulnerabilidad específico para estimar pérdidas humanas, a pesar de su importancia crítica para la evaluación del riesgo sísmico. Este componente resulta especialmente relevante en contextos urbanos con alta densidad poblacional, como la ciudad de San Salvador, donde es fundamental conocer al momento de un terremoto una estimación de la diferenciación de habitabilidad de ocupantes, ya sea en jornadas diurnas y nocturnas.

6.3 Funciones de fragilidad para El Salvador

El Salvador es un país con un alto grado de exposición de infraestructura, representada en su mayoría por el sector residencial (ver Figura 203), el cual se compone -en su mayoría- por viviendas a base de mampostería reforzada y confinada, y en menor cantidad viviendas de materiales de adobe, bahareque e informales (ver Figura 203).

Los impactos generados por los principales eventos sísmicos en El Salvador han motivado a instituciones académicas, como la Universidad de El Salvador (UES) y la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), a desarrollar investigaciones orientadas al análisis del comportamiento estructural de paredes de mampostería y el comportamiento mecánico de los elementos estructurales que las componen.

Con el fin de poder tener una metodología práctica de aplicación para la derivación de curvas de fragilidad estructural local, usando la información de materiales y ensayos desarrollados en El Salvador, se empleó el software desarrollado por GEM denominado Herramienta Modeladora de la Vulnerabilidad (VMTK por sus siglas en inglés Vulnerability Modellers Toolkit). Dicha herramienta cuenta con una interfaz gráfica que contiene todos los módulos necesarios para calcular curvas de fragilidad y vulnerabilidad sísmica estructural. Estos módulos se muestran en la Figura 209.

Adicionalmente, VMTK permite realizar análisis dinámicos no lineales incrementales a través de la idealización de la curva de capacidad estructural del edificio como un material uniaxial, haciendo uso de herramientas específicas del software de código abierto utilizada para la simulación y análisis de estructuras llamado OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation, por sus siglas en inglés).

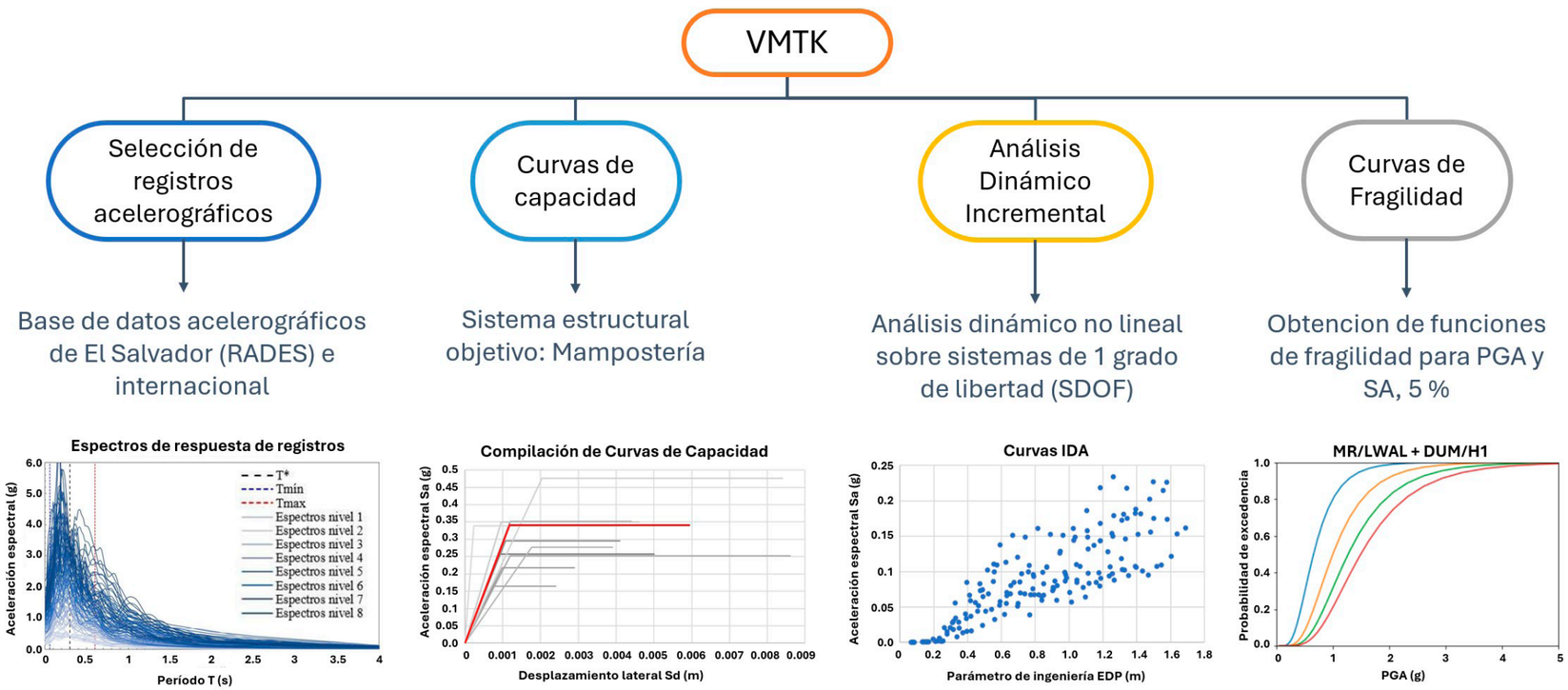


Figura 209. Diagrama metodológico de obtención de curvas de fragilidad estructural.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

El conjunto de herramientas del VMTK está dividido en seis módulos destinados a proporcionar un flujo de trabajo lógico a través de las diferentes etapas del modelado analítico de vulnerabilidad, utilizando análisis dinámicos no lineales. Estos módulos están organizados en: (i) selección de registros de movimiento del suelo, (ii) definición de capacidad estructural, (iii) análisis dinámicos no lineales en osciladores de un solo grado de libertad (SDOF) para estimar la respuesta del edificio a cargas sísmicas, (iv) conversión de los resultados de los análisis dinámicos en funciones de fragilidad, (v) derivación de funciones de vulnerabilidad, y (vi) validación de los resultados mediante el cálculo de pérdidas anuales promedio y otras métricas de riesgo comunes (Martins et al., 2021).

6.3.1 Selección de registros acelerográficos

Para derivar las funciones de fragilidad local, se utilizaron registros acelerográficos de estaciones sísmicas en El Salvador y registros internacionales de ambientes tectónicos similares. Los registros nacionales se extraen de la base de datos RADES (Registros Acelerográficos de El Salvador), gestionada por el Ministerio de Medio Ambiente. Para seleccionar registros idóneos y construir las curvas de fragilidad, se utilizó el criterio de similitud espectral entre las respuestas elásticas de los movimientos sísmicos correspondientes a los registros con un espectro objetivo definido usualmente por

los resultados de peligrosidad sísmica para un emplazamiento particular. Esta referencia obedece a los Espectros de Amenaza Uniforme (UHS, por sus siglas en inglés). Al comparar los UHS para un período de retorno de 475 años presentados en MARN (2020) para distintos sitios de El Salvador, se aprecia que la forma espectral es muy similar (ver Figura 210).

Igualmente se encuentra similitud en los UHS con distintos períodos de retorno para San Salvador.

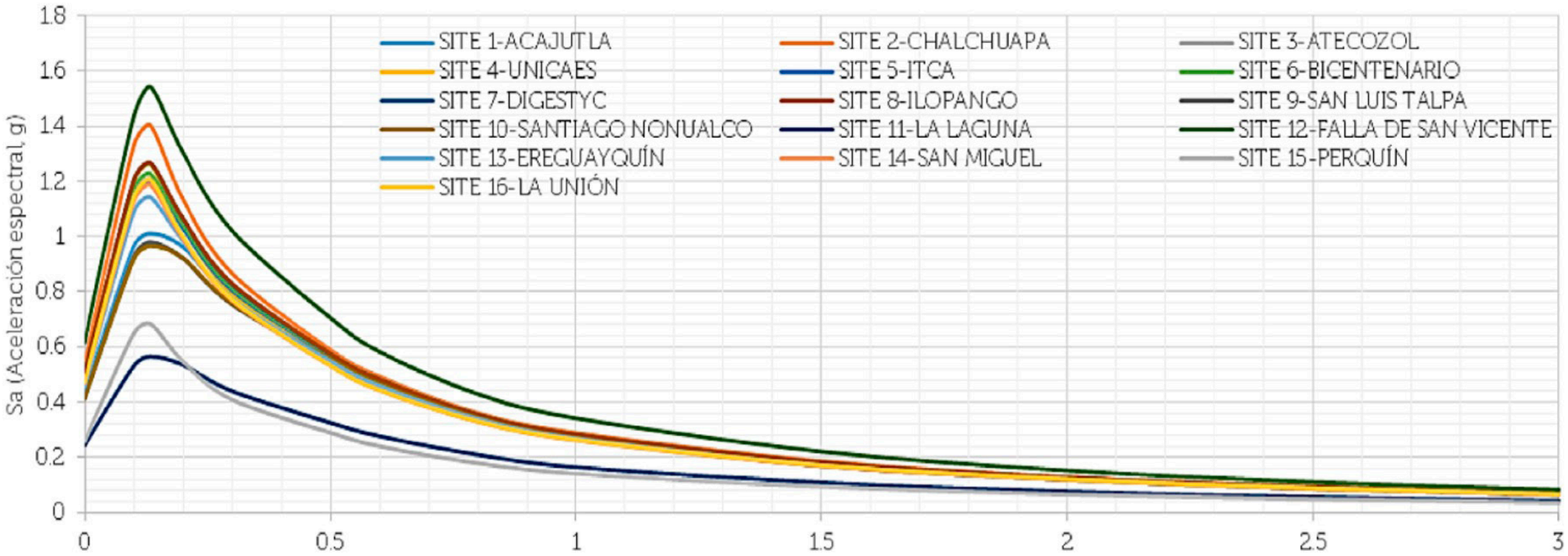


Figura 210. Espectros UHS para Tr=475 años en distintos sitios de El Salvador.
Fuente: MARN (2020a).

No obstante, estos espectros se determinan sobre suelo firme o roca (Vs30 equivalente a 760 m/s), por lo que es necesario considerar el efecto de amplificación. En FEMA (2009), los registros acelerográficos para derivar curvas de fragilidad se seleccionan en sitios con Vs30 entre 210 m/s y 640 m/s equivalentes a clases de sitio D y C, según NEHRP 2020. Por tanto, se considera conveniente utilizar de referencia la forma espectral del UHS asociado a un período de retorno de 2475 años, conocido como Terremoto Máximo Característico, (MCE, por sus siglas en inglés), ubicado en San Salvador para una Clase de Sitio C (ver Figura 211).

La similitud entre el espectro de un movimiento sísmico y el espectro objetivo se evalúa mediante la expresión propuesta Baker (2011), definida por la suma de los errores al cuadrado (SSE) de los logaritmos naturales de las ordenadas espectrales en un rango de períodos de interés, asegurando que los modos de vibración importantes se exciten correctamente y que los movimientos sísmicos contengan suficiente energía conforme la estructura cede inelásticamente. El rango recomendado por ASCE (2022) es de 0.2T* a 2.0T*, siendo T* el periodo fundamental de la estructura. Dado que se necesitan curvas de fragilidad para niveles de aceleración bajos y altos, una estructura debe estar sujeta a una amplia gama de valores de aceleración que reflejen su respuesta completa, desde la elasticidad hasta el colapso global (D'Ayala et al., 2015). Es por ello, que, una vez compilado un conjunto de registros con una aceptable similitud espectral, se empleó el método de escalado de amplitudes, asegurando la consistencia con diferentes niveles de amenaza sísmica del país, preservando el contenido de frecuencia y la variabilidad de los registros. Es importante destacar que, durante el escalado, podrían alcanzarse factores de escala extremos que modifiquen significativamente los registros originales. Según D'Ayala et al. (2015) y Morris et al. (2019), factores de escala mayores a 3.0 son grandes, mientras que ASCE (2022) considera aceptable limitar estos factores entre 0.25 y 4 para evitar movimientos sísmicos poco realistas, como indican Bommer y Acevedo (2004).

Este proceso de escalado se define con base en al espectro de diseño sísmico, conocido como Terremoto Base de Diseño (DBE, por sus siglas en inglés), cuyos valores equivalen a 2/3 del espectro MCE (ver Figura 211). Según FEMA (2018), niveles de aceleración espectral hasta tres veces el DBE son adecuados para calcular la fragilidad al colapso, mientras que para estados de daño menores se usan niveles menores.

En este trabajo se establecieron aceleraciones espectrales objetivo máximas de 2.5 veces el DBE, distribuidas en ocho niveles (múltiplos de 1/8), similar a la evaluación de desempeño de FEMA (2018). Adicionalmente a los períodos de vibración preestablecidos en la versión actual del VMTK, se agregaron cinco nuevos períodos (T=0.4s, T=0.8s, T=1.2s, T=1.5s y T=2.5s) para la selección de registros. Esto permitirá refinar la selección y disponer de estos períodos para futuras actualizaciones.

Las aceleraciones espectrales objetivo y los diferentes niveles de amenaza para cada periodo estructural se muestran en la Figura 211. Para cada nivel de intensidad se seleccionaron 11 registros acelerográficos (6 corticales y 5 de subducción), totalizando 88 registros por cada período estructural.

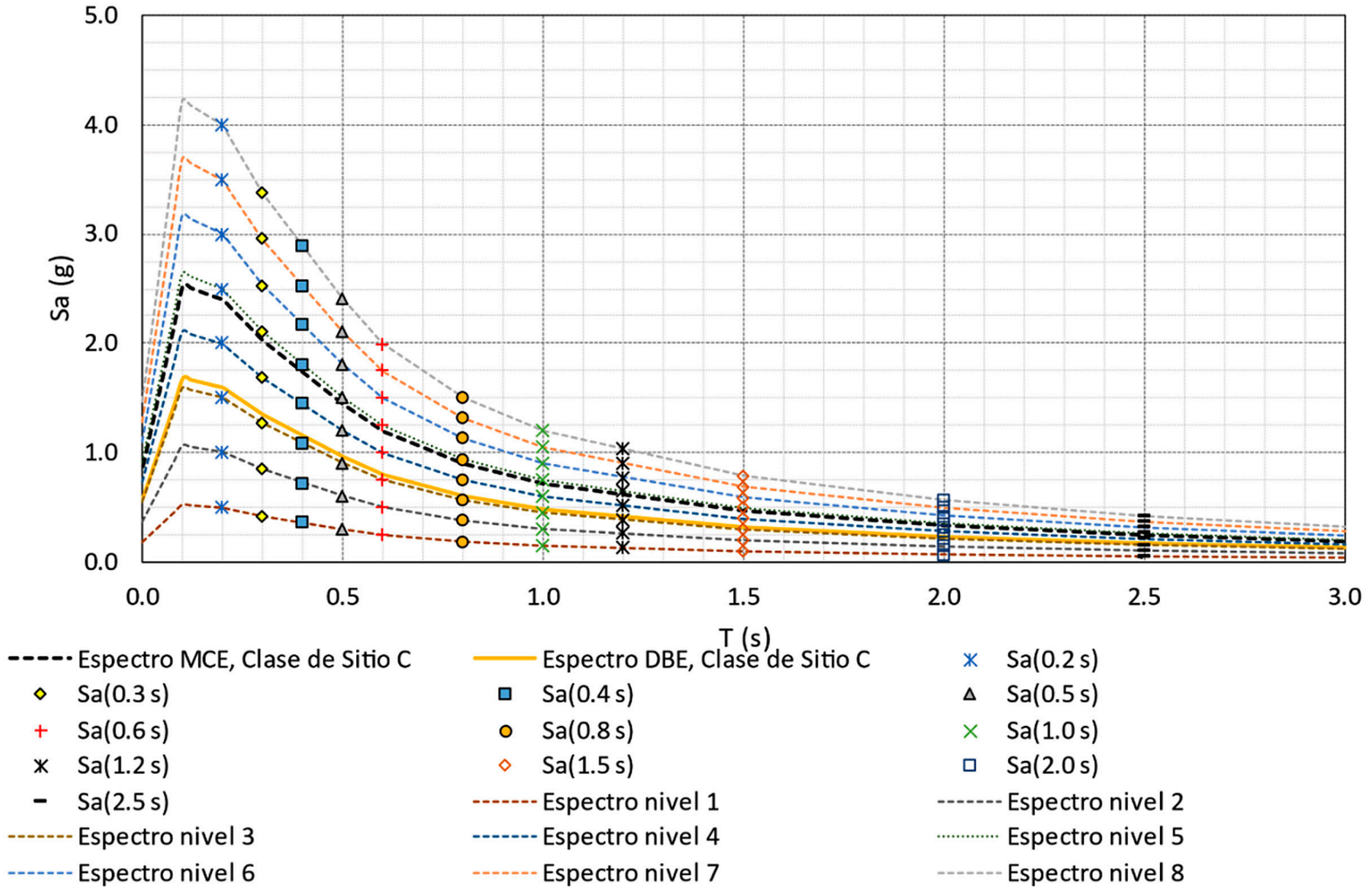


Figura 211. Aceleraciones espectrales objetivo para distintos períodos de vibración.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

En la Figura 212 se observan ejemplos de algunos espectros de respuesta elásticos para las dos componentes horizontales de los 88 registros seleccionados para el período estructural de 0.2 segundos.

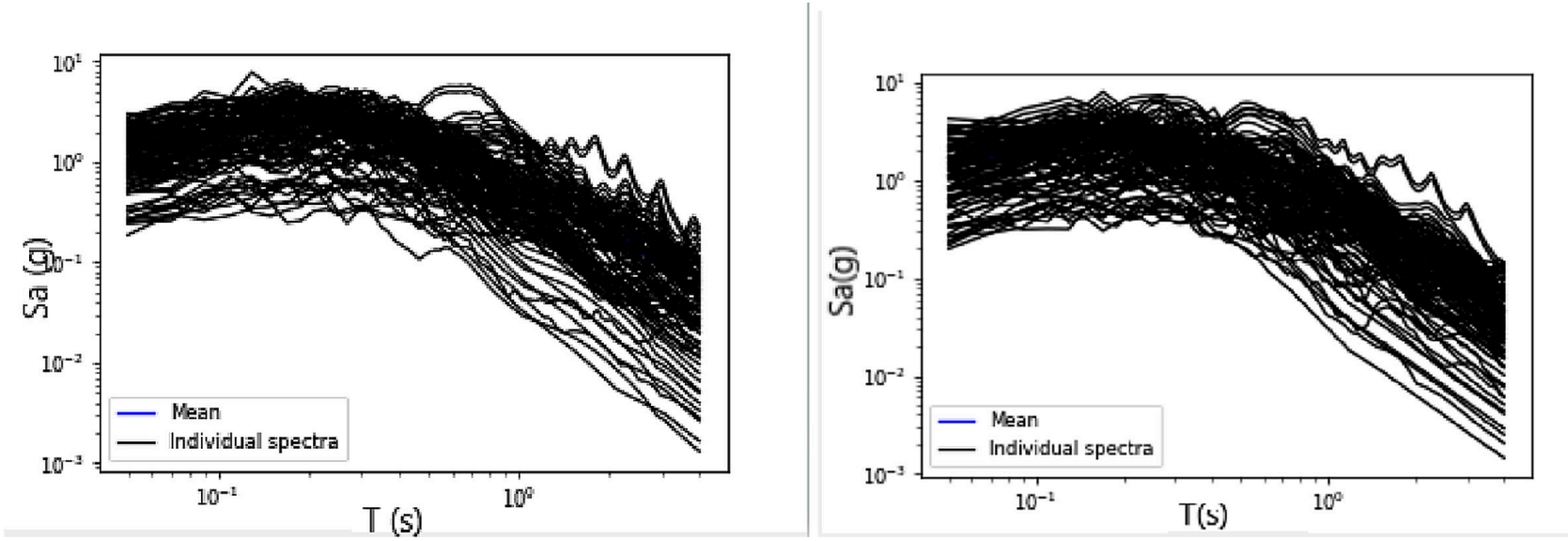


Figura 212. Espectros de respuestas elásticos de las componentes horizontales de los 88 registros seleccionados para T=0.2s.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

6.3.2 Curvas de capacidad estructural

Una curva de capacidad estructural es una representación gráfica que muestra la relación entre la fuerza aplicada a una estructura y la deformación resultante de la misma. Esta curva se utiliza para evaluar el comportamiento de una estructura, especialmente en el contexto de cargas sísmicas o dinámicas.

Para desarrollar curvas de fragilidad estructural específicas para la mampostería en El Salvador, utilizando la metodología VMTK, se emplearon dos estudios locales que incluyeron ensayos a escala en paredes con configuraciones típicas de mampostería reforzada y confinada. Además, se utilizó un estudio internacional para abordar el comportamiento de la tipología constructiva de adobe, del cual se extrajeron únicamente las curvas de capacidad estructural.

Los ensayos locales proporcionaron curvas de capacidad estructural, y posteriormente los autores derivaron curvas de fragilidad fundamentadas en un modelado estructural estático no lineal usando el software 3Muri, sumando un total de 54 modelos estructurales. Ambos estudios se guiaron por las Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings de D'Ayala et al. (2015). Los documentos utilizados para seleccionar las curvas de capacidad se basaron en tres fuentes principales:

a) "Desarrollo de curvas de fragilidad y vulnerabilidad para edificaciones de mampostería reforzada de un nivel" (Galdámez et al., 2020). Acá se crearon 24 modelos estructurales. Estos incluyen 12 modelos de viviendas de mampostería confinada, ubicadas en áreas como Ayutuxtepeque, Quezaltepeque y San Salvador Centro (colonia La Cima). Además, se desarrollaron 7 modelos de mampostería reforzada de un nivel con un espesor de 10 cm, 1 modelo con refuerzo integral de ductilidad media y 4 modelos estructurales en pared de espesor de 20 cm. Cabe mencionar, que estos últimos no fueron considerados en este trabajo. Los parámetros mecánicos de las paredes evaluadas fueron extraídos experimentalmente.

b) "Evaluación de vulnerabilidad de la mampostería y su adecuación estructural" (López et al. 2021). Acá se emplearon 30 modelos estructurales desarrollados en 3Muri. Se incluyen 10 modelos de mampostería confinada, 10 de mampostería reforzada de un nivel con espesor de 10 cm, y 10 modelos con refuerzo integral de ductilidad media con espesor de 15 cm de bloque. En el caso de los parámetros mecánicos de este estudio, estos fueron tomados de los resultados obtenidos en el Proyecto Taishin, descritos en Méndez de Hasbún, y otros (2008).

c) "Assessment of Combined In-Plane and Out-of-Plane Fragility Functions for Adobe Masonry Buildings in the Peruvian Andes" (Tarque et al. 2020). Los autores derivaron un total de 1,000 edificios sintéticos mediante simulaciones Montecarlo, utilizando la variabilidad de las propiedades mecánicas extraídas de ensayos de laboratorio realizados por la Universidad Católica de Perú (Blondet y Vargas, 1978) en paredes de adobe. La selección de esta curva de capacidad estructural promedio se justifica por la gran similitud entre las casas de adobe de un nivel en Perú y las construidas en El Salvador.

Las taxonomías y descripción de cada tipología evaluada en estas investigaciones se muestran a continuación en la Tabla 34.

Tabla 34. Taxonomía de tipologías utilizadas en estudios

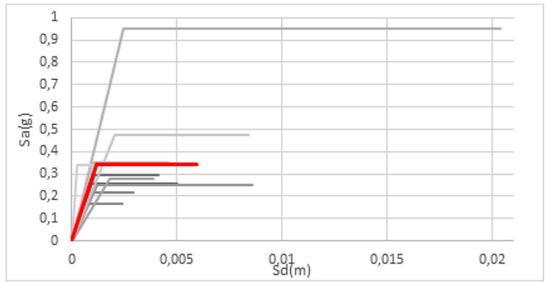
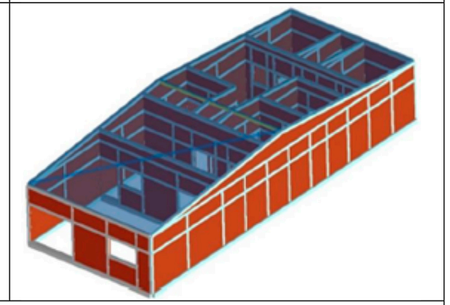
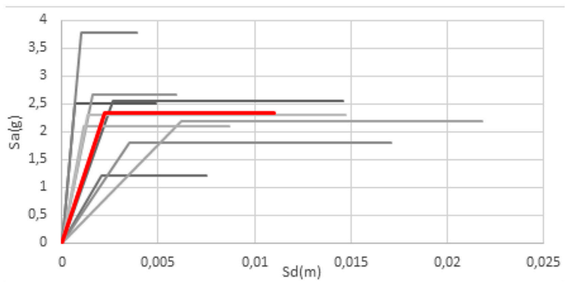
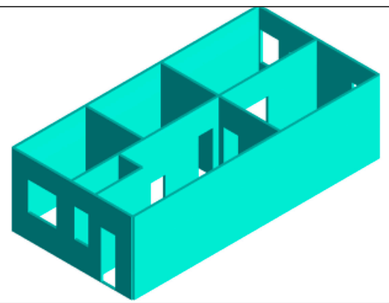
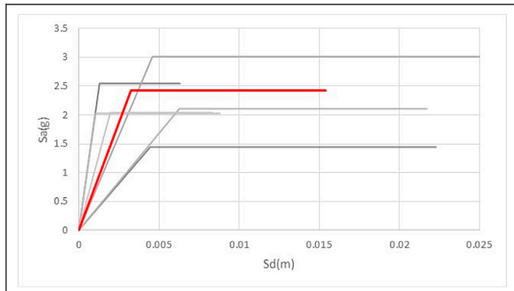
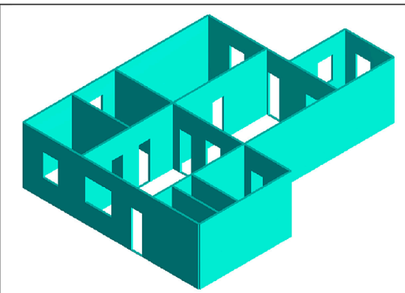
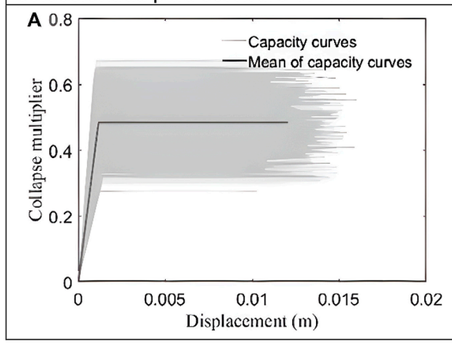
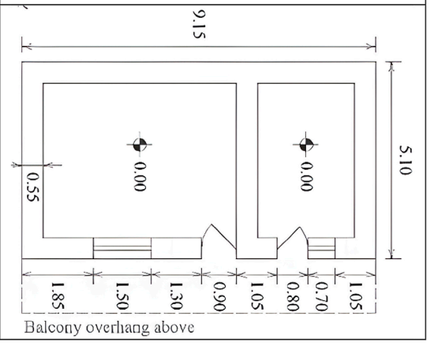
Taxonomía GEM	Descripción	Número de modelos evaluados
MCF/LWAL+DUL/H1/MRN/RES	Mampostería confinada de baja ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial	22
MR/LWAL+DUL/H1/MRN/RES	Mampostería reforzada con refuerzo integral de baja ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial, con espesor de bloques de concreto de 10 cm	17
MR/LWAL+DUM/H1/MRN/RES	Mampostería reforzada con refuerzo integral de media ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial, con espesor de bloques de concreto de 15 cm	11
MUR+ADO/LWAL+DNO/H1/MRN/RES	Estructuras con paredes de adobe, no siguiendo un código sísmico (no ductilidad), de 1 nivel en portafolio residencial	1,000 modelos sintéticos

Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

En esta ocasión se tiene como objetivo construir nuevas curvas de fragilidad utilizando, precisamente, las curvas de capacidad para las taxonomías evaluadas por estos autores (Tabla 34), y aplicando los registros previamente seleccionados a través de análisis dinámicos no lineales, tal como lo dictamina el esquema planteado por el software VMTK. Se priorizaron aquellos resultados que se alinean estrechamente con las métricas de riesgo sísmico de GEM, para asegurar la conformidad con los estándares internacionales de análisis de riesgo sísmico.

En la Tabla 35 se muestran las curvas de capacidad extraídas de los estudios tomados como referencia, así como también un ejemplo de una de las configuraciones de los modelos que se evaluaron.

Tabla 35. Curvas de capacidad estructural de mampostería reforzada y confinada para VMTK

MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BAJA DUCTILIDAD	
Curvas de capacidad estructural de mampostería confinada de baja ductilidad (Galdámez et al., 2020). En rojo es la curva de capacidad media seleccionada para software VMTK.	Modelo analítico estructural creado en 3Muri, para la tipología de mampostería confinada. (Galdámez et al., 2020, pág. 145).
	
MAMPOSTERÍA REFORZADA DE BAJA DUCTILIDAD	
Curvas de capacidad estructural de mampostería reforzada de baja ductilidad (López et al., 2021). En rojo se presenta la curva de capacidad media seleccionada para software VMTK.	Modelo analítico estructural creado en 3Muri, para la tipología de mampostería reforzada. (López et al., 2021, pág. 102).
	
MAMPOSTERÍA REFORZADA DE MEDIA DUCTILIDAD	
Curvas de capacidad estructural de mampostería reforzada de ductilidad media (López et al., 2021). En rojo se presenta la curva de capacidad media seleccionada para software VMTK.	Modelo analítico estructural creado en 3Muri, para la tipología de mampostería reforzada. (López et al., 2021, pág. 98).
	
ADOBE – NO CÓDIGO	
Curvas de capacidad estructural de mampostería reforzada de baja ductilidad (Tarque et al. 2020, pág. 7). En color negro la curva de capacidad media seleccionada para software VMTK.	Plano en planta de una vivienda típica construida en adobe en Perú. (Tarque et al. 2020, pág. 4).
	

Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

6.3.3 Análisis dinámico no lineal incremental

Este análisis se realizó usando un sistema de oscilador de un solo grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés) con la herramienta VMTK, que incorpora el software OpenSees, el cual efectúa los cálculos por elementos finitos (McKenna et al. 2000) mediante lenguaje Python (Zhu et al. 2018). El comportamiento no lineal se modeló con el enfoque de material Uniaxial denominado Pinching4, el cual es un modelo que exhibe la respuesta de la estructura a la deformación por cargas y representa la degradación bajo ciclos de recarga. El análisis numérico considera la degradación cíclica de la resistencia y la rigidez en tres direcciones: descarga, recarga y resistencia. La disipación de energía sísmica se calcula mediante el comportamiento histérico del material Uniaxial y el amortiguamiento de Rayleigh, que combina de manera lineal la matriz de masa y la de rigidez. En la Figura 213 se presenta un ejemplo obtenido en VMTK de los Parámetros de Demanda Ingenieril (EDP por sus siglas en inglés) versus la Medida de Intensidad (IM) para la taxonomía MCF/LWAL+DUL/H1/MRN/RES, correspondiente a una mampostería confinada de baja ductilidad.

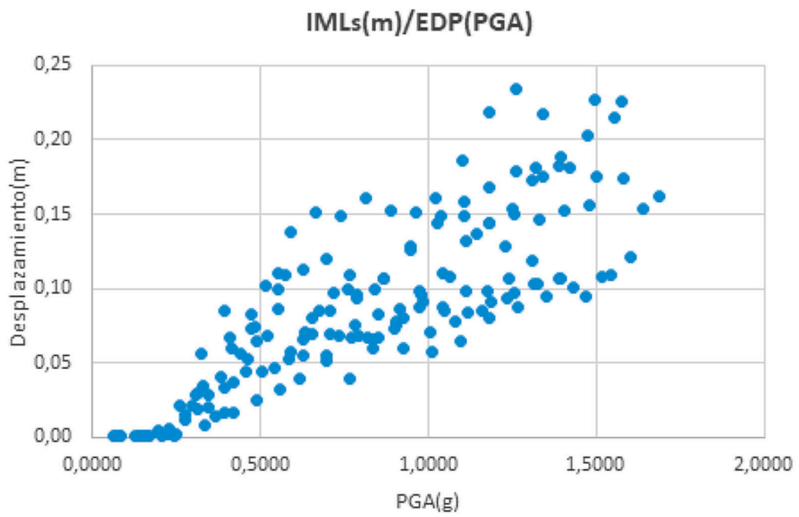


Figura 213. Parámetros de Demanda Ingenieril (EDPs) para MCF/LWAL+DUL/H1/MRN/RES. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Un Análisis dinámico no lineal incremental, a menudo denominado IDA (Incremental Dynamic Analysis), es una técnica utilizada en ingeniería estructural para evaluar el comportamiento de una estructura bajo cargas dinámicas crecientes, como terremotos, considerando las no linealidades del material y la geometría de la estructura.

6.3.4 Definición de los niveles de daño

En la literatura actual se desarrollan metodologías para estipular los umbrales de daño de los EDP, para calcular las funciones de fragilidad estructural. En la Tabla 36 se presentan los valores de umbrales de derivas asociados a los estados de daños de las taxonomías de mampostería investigadas.

Las unidades de las derivas corresponden a distorsiones del tipo rotación, las cuales posteriormente son convertidas en desplazamiento, para ser usado en el VMTK.

Taxonomía GEM	Descripción	Fuente	ESTADOS DE DAÑO			
			Leve	Moderado	Extenso	Colapso
MCF/LWAL+DUL/H1/MRN/RES	Mampostería confinada de baja ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial	Sugano et al., 2022	0.081 %	0.272%	0.535%	0.927%
MR/LWAL+DUL/H1/MRN/RES	Mampostería reforzada con refuerzo integral de baja ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial, con espesor de bloques de concreto de 10 cm	López et al., 2021, pág. 70	0.010 %	0.114%	0.261%	0.356%
MR/LWAL+DUM/H1/MRN/RES	Mampostería reforzada con refuerzo integral de media ductilidad de 1 nivel en portafolio residencial, con espesor de bloques de concreto de 15 cm	López et al., 2021, pág. 70	0.007 %	0.066%	0.196%	0.293%
MUR+ADO/LWAL+DNO/H1/MRN/RES	Estructuras con paredes de adobe, no siguiendo un código sísmico (no ductilidad), de 1 nivel en portafolio residencial	(Blondet et al. 2005)	0.052 %	0.100%	0.260%	0.520%

Tabla 36. Umbrales de deriva para las taxonomías de mampostería reforzada y confinada

6.3.5 Derivación de curvas de fragilidad estructural locales

Las curvas de fragilidad estructural que se han derivado localmente representan las cuatro taxonomías más distintivas del modelo de exposición nacional de infraestructura de El Salvador. Estas curvas se obtuvieron mediante análisis dinámico no lineal utilizando la herramienta VMTK.

Las curvas de fragilidad estructural se definen mediante la siguiente ecuación, cuando son calculadas de manera continua:

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

Donde:

$\bar{S}_{d,ds}$

Es el desplazamiento o aceleración media para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%.

β_{ds}

La desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado límite de daño. Se asocia con la variabilidad correspondiente al estado de daño.

Φ

Es la función de distribución normal estándar acumulada

S_d

El desplazamiento espectral o aceleración.

Tras el Análisis Dinámico no lineal Incremental con el modelo Pinching4, se realiza un análisis estadístico para generar las curvas de fragilidad estructural de tipo discreto, que se desarrollan mediante algoritmos en VMTK basados en una regresión lineal y censurada (Stafford 2008). La ecuación necesaria para calcular la desviación estándar log normal para cada uno de los estados de daños es la siguiente:

$$\beta_{tot} = \sqrt{(\beta_{rec-to-rec})^2 + (\beta_{bld-to-bld})^2}$$

Donde:

β_{tot}

Desviación estándar log normal para cada uno de los estados de daño por tipología estructural.

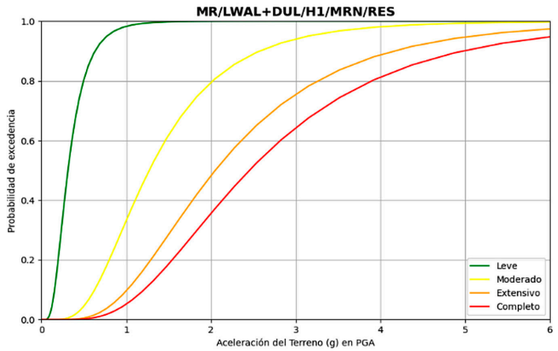
$\beta_{rec-to-rec}$

se asocia a la desviación estándar log normal sismo a sismo para cada estado de daño.

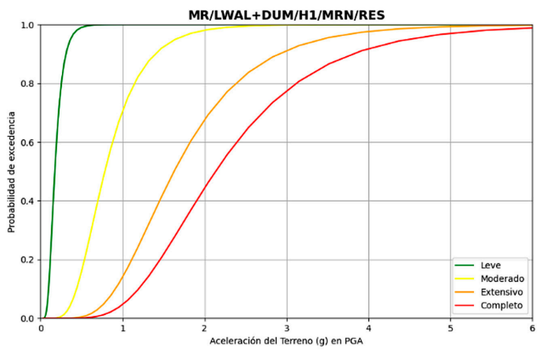
$\beta_{bld-to-bld}$

0.3 tomado según lo recomendado por Gokkaya et al. (2016) y Casotto et al. (2015), para considerar la incertidumbre intrínseca en las diferentes configuraciones presentes de edificios reales.

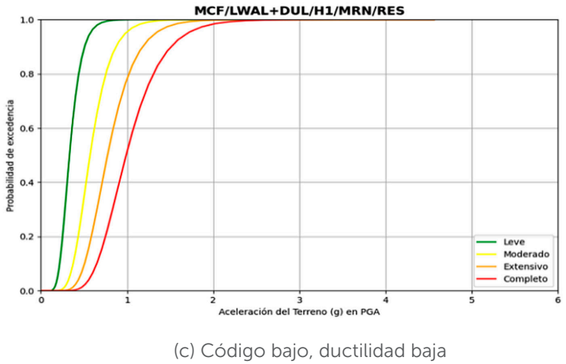
La Figura 214 muestra las curvas de fragilidad estructural para las cuatro tipologías residenciales de un nivel que han sido investigadas.



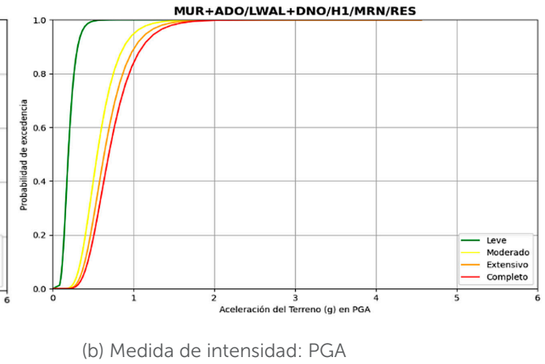
(a) Código bajo, ductilidad baja



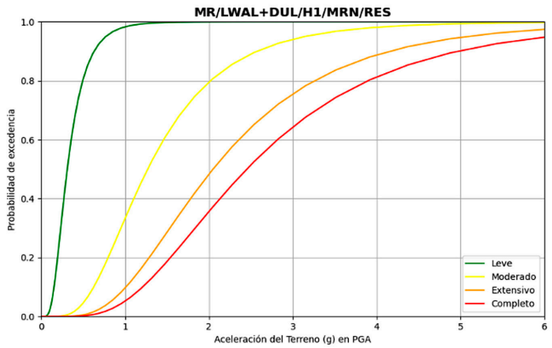
(b) Código bajo, ductilidad media



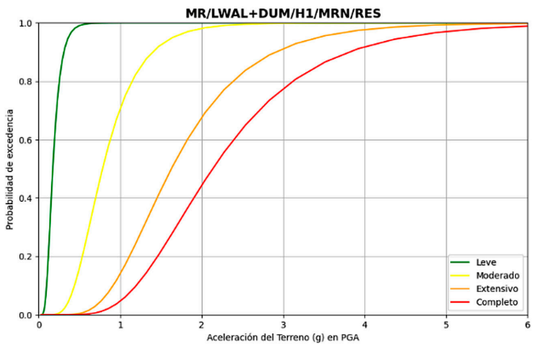
(c) Código bajo, ductilidad baja



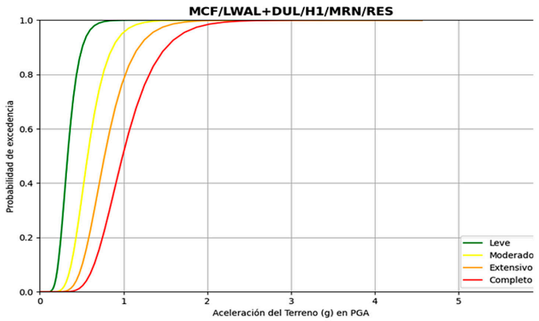
(b) Medida de intensidad: PGA



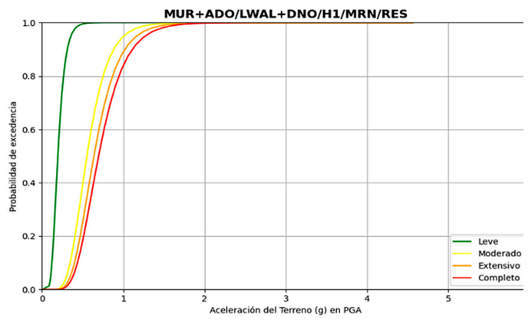
a) Curva de fragilidad local de mampostería reforzada de 1 nivel, código bajo, ductilidad baja



b) Curva de fragilidad local de mampostería reforzada de 1 nivel, código bajo, ductilidad media



c) Curva de fragilidad local de mampostería confinada de 1 nivel, código bajo, ductilidad baja



d) Curva de fragilidad de adobe de 1 nivel, NO código, medida de intensidad: PGA

Figura 214. Curvas de fragilidad estructural locales para tipologías residenciales.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

6.3.6 Funciones de fragilidad global

Los modelos de fragilidad contenidos en el modelo global de riesgo de la Fundación GEM , se desarrollaron teniendo en cuenta la variabilidad entre registros sísmicos, la incertidumbre en el criterio de daño y la variabilidad entre edificios utilizando una metodología analítica para la definición de la capacidad estructural de cada tipología constructiva.

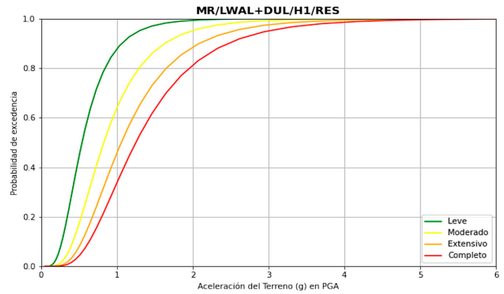
En este proceso se define una curva de capacidad basada en las propiedades estructurales y dinámicas de cada clase de edificio (deriva de fluencia y última, período elástico y de fluencia del primer modo de vibración, factor de participación del primer modo de vibración y mecanismos de falla comunes). Estas curvas de capacidad se utilizaron para desarrollar un SDOF para cada clase de edificio, el cual se sometió a un análisis no lineal utilizando 300 registros de movimiento del suelo, para así propagar la variabilidad entre registros de movimiento sísmico en los modelos de vulnerabilidad. La respuesta estructural de los osciladores (EDP igual a desplazamiento máximo)

se trazó contra el nivel de intensidad de cada registro para establecer una relación entre la demanda y la respuesta, siguiendo el enfoque de análisis de Jalayer et al. (2015); luego se calculó la probabilidad de exceder un conjunto de estados de daño (leve, moderado, extenso y completo) asumiendo un criterio de daño basado en los puntos de fluencia y desplazamiento último, como se describe en Villar-Vega et al. (2017). El rango de intensidad y la probabilidad de exceder los estados de daño se usaron para ajustar una distribución log-normal acumulativa para obtener la curva de fragilidad (Baker, 2015). Básicamente, un procedimiento similar al seguido con la metodología VMTK.

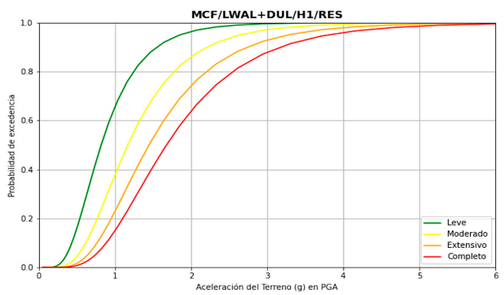
Cabe mencionar que dentro del conjunto de curvas de fragilidad se cuenta con un subgrupo de funciones desarrolladas para Centroamérica y el Caribe, como parte de uno de los proyectos liderados por GEM en el 2017, llamado CCARA; donde se realizó una compilación de modelos de fragilidad existentes en la literatura de la región, ajustándose a los formatos establecidos para poder ser utilizados en la estimación de funciones de vulnerabilidad y, consecuentemente, el riesgo sísmico en la región. Para El Salvador se utilizaron más de 120 modelos de fragilidad y vulnerabilidad sísmica global. Con estos modelos es posible hacer estimaciones de daño estructural en las edificaciones y la afectación de sus ocupantes, incluyendo desplazados, heridos y fatalidades para cualquier evento sísmico cuya intensidad es conocida (eventos con registros de intensidad) o cuya intensidad es simulada (usando los modelos de movimiento del terreno del modelo de amenaza de la ciudad).

Adicionalmente, en este grupo se contemplan funciones calculadas para varios tipos de medidas de intensidad para representar la demanda sísmica (que van desde el PGA hasta aceleraciones espectrales (SA) en períodos de vibración de 0.3, 0.6 y 1.0 segundos); las cuales se pueden asociar al período de vibración que las distintas edificaciones pueden presentar dentro del modelo de exposición.

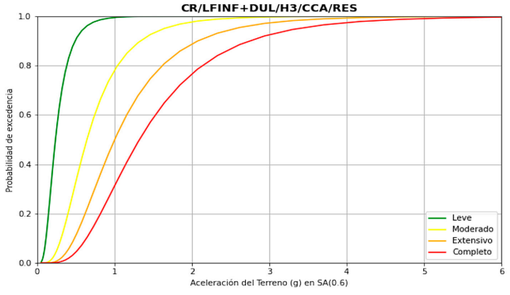
Por ejemplo, estructuras de marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería que van desde dos hasta cuatro pisos, requieren modelos de fragilidad derivados para períodos de (SA) cortos (entre 0.1 y 0.6 segundos). Indudablemente, esta flexibilidad en la información facilita la estimación de daños físicos, pérdidas económicas y número de víctimas en caso de diferentes escenarios sísmicos. A continuación, en la Figura 215 se muestran algunos ejemplos de curvas de fragilidad para las tipologías de mampostería reforzada, mampostería confinada, concreto reforzado con mampostería de relleno y de adobe, respectivamente; todas pertenecientes al portafolio residencial. En la descripción de las curvas se muestran los atributos que conforman su taxonomía y sus medidas de intensidad.



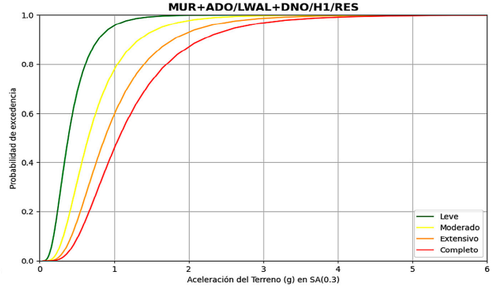
(a) Mampostería reforzada de 1 nivel, código bajo, ductilidad baja



b) Mampostería reforzada confinada de 1 nivel, código bajo, ductilidad baja



(a) Concreto reforzado con mampostería de relleno 3 niveles, código bajo, ductilidad baja



(b) Adobe de 1 nivel, NO código, medida de intensidad: SA (0.3 seg.)

Figura 215. Curvas de fragilidad estructural globales para tipologías residenciales.
Fuente: Global Earthquake Model (GEM)

6.4 Modelos de consecuencia

Los modelos de consecuencia, también llamados modelos de daño a pérdida son esenciales para el análisis del riesgo sísmico en el territorio nacional. Una vez que las funciones de fragilidad establecen la distribución del daño en las estructuras condicionado a un nivel de intensidad, estos modelos convierten el daño resultante de un evento sísmico en pérdidas humanas o económicas. Esto se hace estableciendo la pérdida incurrida cuando las estructuras alcanzan diferentes estados de daño. Esta pérdida se expresa normalmente como un porcentaje del valor total expuesto, también conocida como tasa de pérdida.

Para El Salvador, cada uno de los modelos de fragilidad considerados (locales y globales) ha sido complementado con modelos de consecuencia para pérdidas económicas, fatalidades, damnificados y heridos de gravedad, asociados a las taxonomías de las tipologías constructivas del modelo de exposición nacional. Esto permite calcular métricas de riesgo tanto en análisis deterministas como probabilistas.

Para la mayoría de taxonomías y sus respectivas fragilidades propuestas se utilizaron los modelos de consecuencia de la Fundación GEM. Específicamente, la estimación de las pérdidas económicas directas se basa en el modelo propuesto originalmente por Yepes-Estrada y Silva (2017); mientras que, para la estimación de pérdidas de ocupantes, las tasas de pérdida se basan en lo propuesto por la FEMA (2007) y por Spence (2007).

Sin embargo, tal como se mencionaba en la introducción de este capítulo, también se utilizó el modelo de consecuencia propuesto por PREPARE (2020) para la estimación de las pérdidas económicas por daños en estructuras de mampostería de un nivel. Este modelo resulta de una modificación al modelo de HAZUS con valores ajustados para El Salvador. Estas estructuras corresponden a las taxonomías de mampostería investigadas, ejemplificadas en el Tabla 34. Cabe mencionar que los modelos de PREPARE (2020) para la estimación de pérdidas de ocupantes no fueron utilizados. Finalmente, para abordar la incertidumbre epistémica en estos modelos, se asignaron pesos a ambos, asegurando así la contribución de cada uno en el análisis del comportamiento de estas tipologías.

En la Tabla 37 se muestran las tasas de pérdida para el valor económico y los ocupantes expuestos en tres de las tipologías más comunes en El Salvador: mampostería reforzada de bajo código de un nivel, mampostería reforzada de bajo código de dos niveles y estructuras de adobe de un nivel sin ningún lineamiento de código sísmico. Todas estas tipologías corresponden al portafolio residencial.

En la Tabla 37 también se puede observar que para las tres tipologías mostradas las tasas de pérdidas económicas, según PREPARE 2020, son relativamente menores que las establecidas por la Fundación GEM. Asimismo, es evidente que entre las mamposterías reforzadas, aunque el costo económico incurrido en cualquier estado de daño es igual para ambas tipologías, las tasas de pérdida relacionadas con el riesgo de los ocupantes (fatalidades, heridos o damnificados) son mayores en estructuras de dos pisos debido a su mayor potencial destructivo. No obstante, dada la vulnerabilidad intrínseca de las estructuras de adobe, las tasas de pérdida se incrementan considerablemente.

De esta forma, los modelos de consecuencia pueden convertir las funciones de fragilidad sísmica en funciones de vulnerabilidad sísmica. Las funciones de vulnerabilidad expresan la tasa de pérdida condicionada al nivel de intensidad de la agitación.

Tabla 37. Modelos de consecuencia para tres tipologías constructivas, estableciendo la tasa de pérdida para las diferentes métricas de riesgo dado que se alcance alguno de los 4 estados de daño establecidos por los modelos de fragilidad

Tipología	Taxonomía	Modelos	Métrica de riesgo	Tasa de pérdida según estado de daño			
				Ligero	Moderado	Extenso	Completo
Mampostería reforzada de bajo código de un nivel	MR/LWAL+DUL/H1/MRN/RES	PREPARE 2020	Pérdidas económicas	2.0%	11.0%	45.0%	100.0%
	MR/LWAL+DUL/H1/CCA/RES	Fundación GEM	Pérdidas económicas	5.0%	15.0%	60.0%	100.0%
			Fatalidades	0.0%	0.0%	0.0%	0.90%
			Heridos de gravedad	0.0%	0.025%	0.102%	3.418%
			Damnificados	0.0%	0.0%	100.0%	99.1%
Mampostería reforzada de bajo código de dos niveles	MR/LWAL+DUL/H2/CCA/RES	Fundación GEM	Pérdidas económicas	5.0%	15.0%	60.0%	100.0%
			Fatalidades	0.0%	0.0%	0.0%	1.10%
			Heridos de gravedad	0.0%	0.025%	0.102%	4.617%
			Damnificados	0.0%	0.0%	100.0%	98.9%
Adobe con No código de un nivel	MUR+ADO/LWAL+DNO/H1/MRN/RES	PREPARE 2020	Pérdidas económicas	2.0%	10.0%	40.0%	100.0%
	MUR+ADO/LWAL+DNO/H1/CCA/RES	Fundación GEM	Pérdidas económicas	5.0%	15.0%	60.0%	100.0%
			Fatalidades	0.0%	0.0%	0.0%	5.17%
			Heridos de gravedad	0.0%	0.40%	0.60%	3.42%
			Damnificados	0.0%	0.0%	100.0%	94.8%

Fuente: Valores extraídos de PREPARE (2020), Yepes-Estrada y Silva (2017), (FEMA 2007) y por Spence (2007)

6.5 Mapas de vulnerabilidad física a nivel municipal

La Figura 216 muestra la distribución de estructuras vulnerables por material de construcción en los municipios de El Salvador, destacando las edificaciones más vulnerables ante sismos. Las tipologías más vulnerables se refieren a las que presentan paredes construidas a partir de adobe, bahareque, madera, lámina, paja, palma u otro vegetal y desecho.

En el departamento de San Salvador, representa el 18.42 % de las estructuras vulnerables, seguido por Santa Ana con el 16.91 %, Sonsonate, con el 9.66 % y Ahuachapán con el 8.59 %. De igual manera, se observa que el occidente del país posee una alta concentración de estructuras vulnerables, con una predominancia de construcciones de adobe y una significativa presencia de madera y bahareque, alcanzando un 35.15 % del total de edificaciones a nivel nacional.

Por otro lado, el oriente del país presenta una cantidad moderada de estructuras vulnerables, con una variedad de materiales, predominando las estructuras de adobe y bahareque, alcanzando un 16.19 % del total de edificaciones a nivel nacional. Cabe destacar la predominancia de adobe en la mayoría de los municipios, seguido por madera y bahareque.

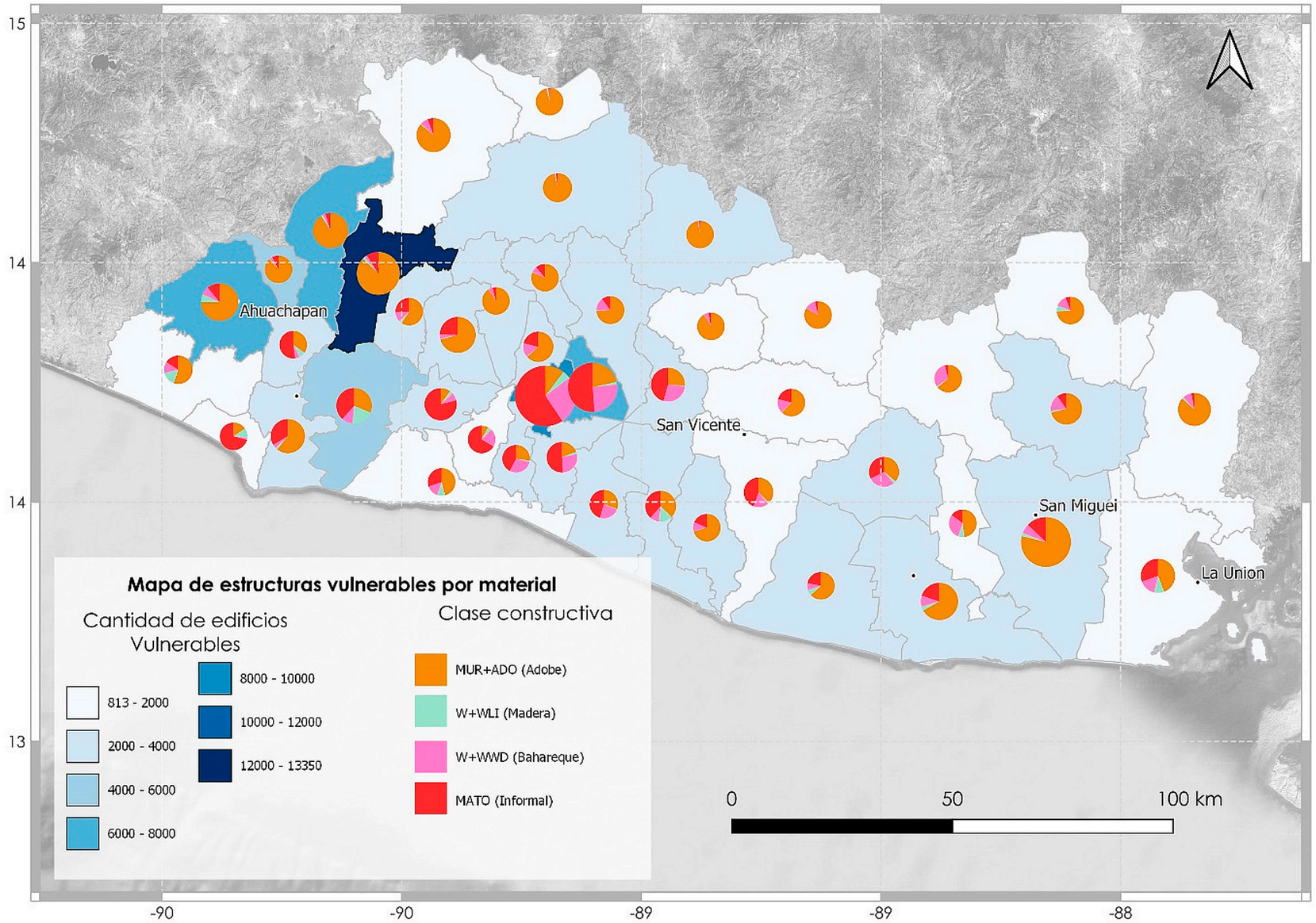


Figura 216. Distribución de estructuras vulnerables por material de construcción por municipio. Las tipologías más vulnerables se refieren a las que presentan paredes construidas a partir de adobe, bahareque, madera, lámina, paja, palma u otro vegetal y desecho.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En la Figura 217 se muestra la distribución de edificaciones totales por municipio en El Salvador y su clasificación por nivel de código de construcción, detallado en el Capítulo 5. En resumen, las tipologías Sin Código (CDN) corresponden a edificaciones construidas antes de 1966, cuando no existía un reglamento para diseño sísmico. Las de Código Bajo (CDL) son aquellas construidas entre 1966 y 1997, asociadas al primer código sísmico de El Salvador. Las de Código Medio (CDM) comprenden edificaciones construidas después de 1997, que de manera implícita han seguido los lineamientos del código sísmico más reciente.

A través del Modelo de exposición nacional se estimó que el 59 % de las edificaciones tienen una categorización de Código Medio, el 35 % de Código Bajo y el 6 % se construyeron Sin ningún código, a nivel departamental.

Tal como se mencionó en apartados anteriores, la mayor concentración de edificaciones se ubica en el departamento de San Salvador. Al analizar la cantidad de edificaciones por tipo de categorización de código, se observa que el 8 % del total de edificaciones son de Código Bajo, el 9.8 % de Código Medio y el 1.3 % construidas Sin Código. Otro de los departamentos más vulnerables es La Libertad, donde se ubican el 3.5 % de edificaciones de Código Bajo, el 7.2 % de Código Medio y el 0.7 % Sin Código.

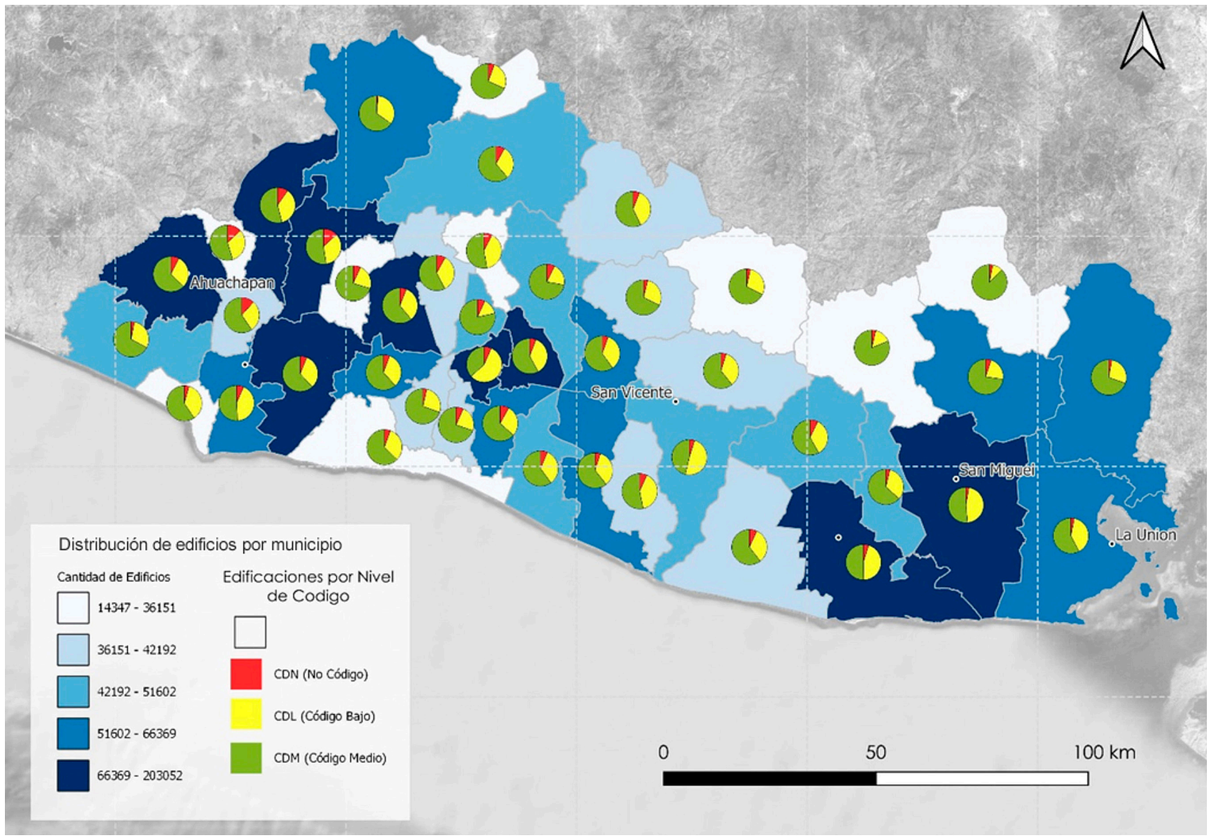


Figura 217. Distribución de edificaciones totales por municipio en El Salvador y su clasificación por nivel de código de construcción.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

6.6 Registros de daños

Aunque El Salvador es un país altamente susceptible a distintas amenazas, nunca se ha realizado una valoración exhaustiva de daños que permita realizar una determinación empírica directa de la vulnerabilidad física basada en datos estadísticos, principalmente debido a que -en caso de desastre- las evaluaciones se centran en las edificaciones o instalaciones más afectadas o colapsadas, dejando fuera del análisis aquellos activos con daños menores o sin daños, información que es fundamental para la determinación de la vulnerabilidad observada, asociada a valores de intensidad.

6.6.1 Sismo de 10 de octubre de 1986

Para el terremoto ocurrido el 10 de octubre de 1986, si bien no se dispone de una base de datos sistematizada de daños, se cuenta con estudios detallados sobre edificaciones afectadas que han permitido analizar el comportamiento sismorresistente de diversos sistemas estructurales, identificar defectos estructurales e inferir la influencia del código de diseño vigente. De la Figura 218 a la 221 se muestran ejemplos de algunos de los daños más emblemáticos ocasionados por el sismo de 1986 (M5.7, San Salvador).



Figura 218. Daños observados durante el sismo de 1986, M5.7 – San Salvador .
Fuente: Earthquake Engineering Online Archive, National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley, Robert A. Olson Collection.



Figura 219. Daños observados durante el sismo de 1986, M5.7 – San Salvador.
Fuente: Earthquake Engineering Online Archive, National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley, Robert A. Olson Collection.



Figura 220. Daños observados durante el sismo de 1986, M5.7 – San Salvador.
Fuente: Earthquake Engineering Online Archive, National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley, Robert A. Olson Collection.



Figura 221. Daños observados durante el sismo de 1986, M5.7 – San Salvador.
Fuente: Earthquake Engineering Online Archive, National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley, Robert A. Olson Collection.

6.6.2 Sismos de enero y febrero 2001

Tras los sismos de 2001, la Universidad Complutense de Madrid junto a la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y el entonces Servicio Nacional de Estudios Territoriales, condujeron un estudio de la caracterización del movimiento del suelo y los efectos en la infraestructura (Benito, B. et al 2005), recopilando información de daños tanto en edificios públicos como viviendas. En las Figuras 222 y 223, se muestra información sobre los daños observados, por departamento, para los sismos de enero de 2001 (Mw 7.7, frente a las costas de La Libertad) y febrero de 2001 (Mw 6.6, San Vicente) respectivamente.

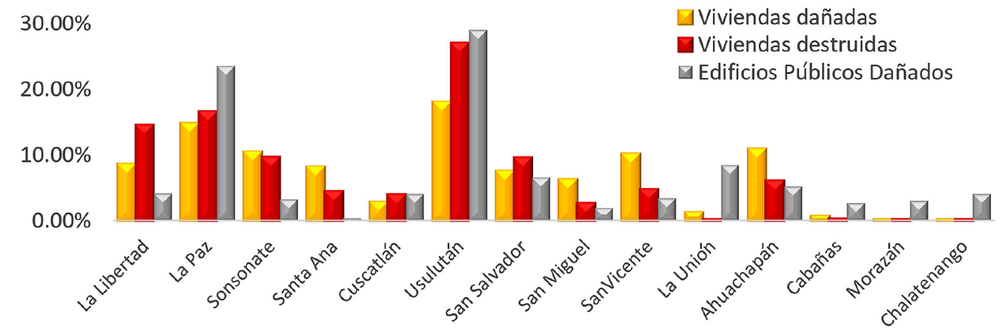


Figura 222. Edificaciones dañadas durante el sismo del 13 de enero de 2001, por departamento.
Fuente: Elaboración propia con datos de Benito et al. 2005.

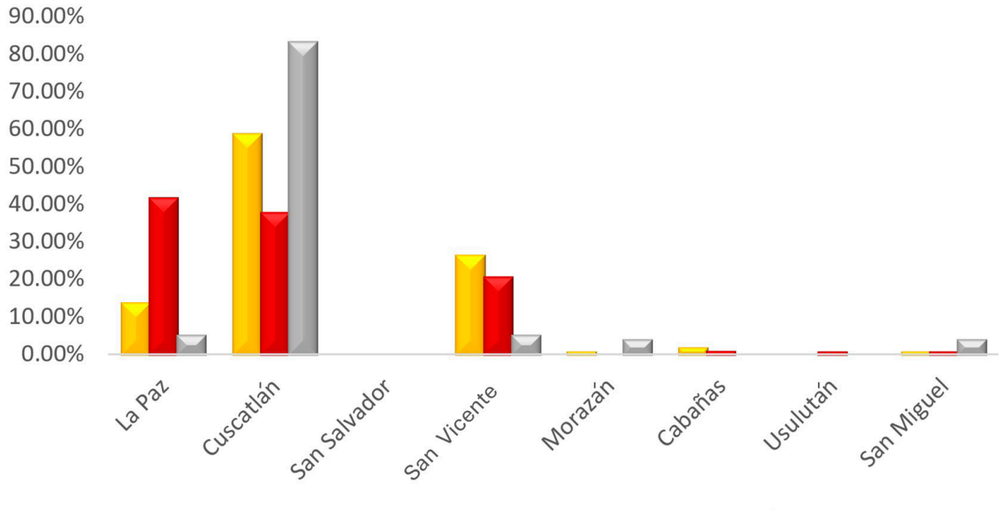


Figura 223. Edificaciones dañadas durante el sismo del 13 de febrero de 2001, por departamento.
Fuente: Elaboración propia con datos de Benito et al. 2005.

Los Grados de Daño (DG) asignados a las estructuras afectadas por los sismos, según tipología constructiva se muestran en la Figura 224. Los Grados de Daño se correlacionaron con las "banderas" asignadas que representaban el estado de los edificios después de los terremotos, de la siguiente manera.

- Bandera Verde (DG1): sin daños visibles en elementos estructurales, Posibles fisuras en repellos de paredes, losas y en elementos estructurales, Pocos daños a la construcción. No presenta reducción de su capacidad sismorresistente.

- Bandera amarilla (DG2): fisuras diagonales y de otro tipo en paredes. Fisuras grandes en elementos estructurales. Disminución de su capacidad sismorresistente. Puede repararse sin necesidad de refuerzo.

- Bandera Naranja (DG3): grietas grandes con trituración del material de las paredes. Grietas grandes con pequeñas dislocaciones en elementos estructurales. Fracturas. Disminución de resistencias y rigideces de los elementos. Muy disminuida su capacidad sismorresistente. Necesitan ser reparadas y reforzadas.

- Bandera Roja (DG4 y DG5): elementos estructurales y uniones muy dañados, dislocados y repetitivos. Colapsos, ruina parcial o total. Posible demolición después de evaluación más detallada.

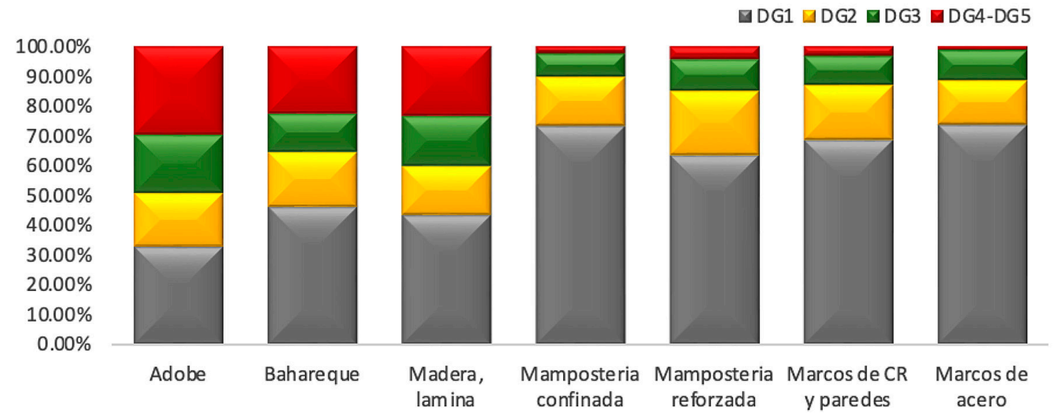


Figura 224. Edificaciones dañadas durante los sismos de 2001, por tipología constructiva.
Fuente: Elaboración propia con datos de Benito et al. 2005.

Puede notarse que tipologías constructivas como adobe, bahareque y madera o lámina, presentan mayores porcentajes de viviendas con daños significativos (DG3-DG5), mientras que para tipologías como mampostería reforzada o confinada y marcos de concreto o acero, los daños significativos son menores. Es decir, las tipologías de mampostería reforzada-confinada y de marcos de concreto o acero, presentaron mejor comportamiento estructural que tipologías como adobe, bahareque y madera o lámina.

Las Figuras 225 y 226 muestran daños registrados durante los sismos de 2001.



Figura 225. Colapso de estructura de adobe de un piso durante los sismos de 2001 .
Fuente: Earthquake Engineering Research Institute, 2001 M 7.7 & M 6.6 El Salvador Ser.



Figura 226. Múltiples colapsos de viviendas de adobe y bahareque durante los sismos de 2001.
Fuente: Earthquake Engineering Research Institute, 2001 M 7.7 & M 6.6 El Salvador Ser.

6.6.3 Sismo del 15 de enero de 2023

Una actividad sísmica reciente que causó daños en estructuras a base de materiales vulnerables como adobe y bahareque, fue el evento de magnitud Mw 5.0 al occidente del país, específicamente en la sección fronteriza entre Guatemala y Ahuachapán, con una profundidad superficial de 6 km; se contabilizaron al menos 600 réplicas.

La mayor afectación ocurrió sobre el cantón La Danta, jurisdicción del municipio de Ahuachapán Centro, ubicado a solamente 4 km al suroeste de la zona epicentral, donde múltiples viviendas de adobe resultaron agrietadas, algunas parcialmente destruidas y otras con paredes colapsadas; no obstante, hubo otras viviendas de mampostería reforzada que no presentaron ningún tipo de daños.

Un aspecto peculiar en el levantamiento de los daños estructurales de las viviendas de adobe fue su predominante fallamiento fuera del plano y posterior volcamiento bajo cargas laterales debido, principalmente, a las débiles conexiones entre sus elementos de borde. Esto plantea un reto en la selección adecuada de la fragilidad estructural sobre esta clase de tipologías, ya que podría subestimarse el daño al centrarse solamente en la resistencia a cargas sísmicas a lo largo del plano.
De la Figura 227 a la 229 se muestran ejemplos de algunos de los daños en las viviendas de adobe ocasionados por el sismo del 15 de enero de 2023.



Figura 227. Casa de adobe con colapso parcial en pared. Falla por volcadura fuera del plano.
Fuente: Fotografía y edición realizada por personal de DOA-MARN.



Figura 228. Casa de adobe con daño en pared frontal a la calle. Falla por volcadura fuera del plano.
Fuente: Fotografía y edición realizada por personal de DOA-MARN.



Figura 229. Casa de adobe con daño en pared trasera. Falla por volcadura fuera del plano.
Fuente: Fotografía y edición realizada por personal de DOA-MARN.

6.7 Instrumento para levantamiento de daños por sismos

Actualmente, en El Salvador persisten numerosas edificaciones antiguas que fueron construidas bajo normativas sísmicas obsoletas o incluso sin ningún tipo de diseño sismorresistente. Muchas de estas han resistido distintos eventos sísmicos sin haber sido posteriormente evaluadas, reparadas o deshabilitadas, a pesar de su evidente condición de alta vulnerabilidad estructural. Esta situación pone en evidencia la necesidad de contar con metodologías específicas para la evaluación del daño estructural posterior a un sismo, apoyadas en herramientas estandarizadas como formularios de inspección técnica.

La evaluación de daños estructurales tras un evento sísmico requiere un conocimiento técnico profundo sobre el comportamiento elástico e inelástico de las estructuras, con el fin de identificar los tipos de daños y caracterizar los fallamientos ocurridos en

cada uno de los componentes estructurales y compararlos con otras fallas ocurridas en el pasado (en el mismo u otro edificio) si es posible.

Tras el terremoto del 10 de octubre de 1986 en San Salvador, diversas investigaciones y reportes técnicos, así como la comisión de emergencia conformada por el MOP, ASIA y CASALCO, documentaron múltiples evaluaciones de daño. Sin embargo, se evidenciaron diferencias significativas en las valoraciones realizadas sobre una misma edificación, junto con la carencia de información clave para una determinación integral de su habitabilidad. Esta experiencia resaltó la necesidad de unificar criterios y estandarizar la recolección de información post-sismo.

Fue hasta los terremotos de 2001 que se conformó un nuevo comité de evaluación de daños (MOP, ASIA, CASALCO y FESIARA), el cual, aunque limitado en su organización, dio origen a las primeras fichas de inspección rápida para edificaciones afectadas. Estas fichas introdujeron una guía básica para dictaminar la seguridad estructural basándose en criterios prácticos y generales. No obstante, se reconoció desde entonces la importancia de mejorar y formalizar esta herramienta de forma anticipada, sin esperar a un nuevo evento catastrófico.

En este contexto, el Ministerio de Medio Ambiente, al ser parte del Sistema Nacional de Protección Civil, tiene como mandato enfocarse tanto en el monitoreo de la actividad sísmica, como también en el estudio y evaluación del riesgo sísmico identificando los impactos asociados a eventos sísmicos destructivos a través de inspecciones a campo y la elaboración de informes técnicos. Es por ello que dentro de la institución se ha desarrollado una guía/formulario para levantamiento de daños de edificaciones.

Esta herramienta ofrece una evaluación del impacto en la estructura post-sismo, decretando en forma rápida cuáles son aquellas edificaciones: a) con daños severos, b) parcialmente dañadas y c) las edificaciones más seguras para permitir nuevamente su habitabilidad.

De igual manera, esta herramienta contribuye a ir construyendo una base de datos relacional que registre las edificaciones habitables y dañadas; enlazándolas con la plataforma de registros acelerográficos que el Ministerio posee, logrando correlacionar ciertos parámetros de movimiento fuerte con los daños observados del edificio. Asimismo, esta base y su posterior análisis sirve en el desarrollo de trabajos más avanzados de análisis estructural, ya sea para ajustes en curvas de fragilidad de ciertos sistemas estructurales y generación de informes rápidos de evaluación de pérdidas. A continuación, se presenta un bosquejo del formulario diseñado para el levantamiento post-sismo de daños.

Código de Activo

INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN RÁPIDA POST-SISMO DE DAÑOS EXISTENTES EN EDIFICIOS Y VIVIENDAS

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES — GOBIERNO DE EL SALVADOR

1. IDENTIFICACIÓN DE LA INSPECCIÓN

► DATOS DEL INSPECTOR

Apellidos:
Nombre:
Teléfonos:
Profesión:
Institución:
E-mail:

► FECHA Y HORA DE INSPECCIÓN

Fecha: Día / Mes / Año
Hora: : AM PM

► PÁRAMETROS DEL SISMO

ID del evento:
Fecha: Día / Mes / Año
Hora: : AM PM
Magnitud: M
Profundidad: Km

► ÁREAS INSPECCIONADAS DEL EDIFICIO

Exterior e interior: Sólo desde el exterior:

9. MEDIDAS RECOMENDADAS

► DEMOLICIÓN
De elementos en peligro de caer
De todo el edificio

► APUNTALAMIENTO
Puntual de elementos
De todo el edificio

► ACORDONAMIENTO

► REQUIERE EVALUACIÓN POR UN:
Ingeniero Civil/Arquitecto
Ingeniero Geotécnico
Ingeniero Estructural
Ingeniero Eléctrico
Otro:

10. RESULTADO DE LA INSPECCIÓN

► HABITABILIDAD DEL EDIFICIO

No accesible (Rojo)
Uso restringido (Amarillo)
Habitable (Verde)



► VEREDICTO

2. IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO

► LOCALIZACIÓN

Dirección:
Municipio: Departamento:
Nombre del contacto: Cantón:
Teléfono de contacto: E-mail de contacto:
Identificación del edificio:
Coordenadas geográficas WGS84: *Latitud norte* *Longitud oeste* Ver en Google Maps ...

► USO ACTUAL DEL EDIFICIO

Almacenamiento
Almacenamiento de sustancias tóxicas
Comercial
Centrales telefónicas y de comunicación
Deportivo
Educacional
Estación de bomberos
Estadio
Hospital
Hostelería
Industrial
Instalaciones militares
Oficinas
Patrimonial y cultural
Recreacional
Religioso
Restaurante
Salud y asistencia social
Terminal de transporte
Vivienda
Otro:
Uso previo:

► AÑO DE CONSTRUCCIÓN

Antes de 1966
Entre 1966 y 1989
Entre 1989 y 1997
Después de 1997

► INTERVENCIONES PREVIAS

Estructura Rehabilitada
Estructura Modificada
Ninguna

► SISTEMA ESTRUCTURAL PREDOMINANTE

FRENTE (X)	FONDO (Y)	DESCRIPCIÓN
☐	☐	Marcos de acero arriostrados [MAA]
☐	☐	MAA concéntricamente
☐	☐	MAA excéntricamente
☐	☐	Marcos de acero estructural resistentes a momento
☐	☐	Marcos de concreto reforzado [MCR]
☐	☐	MCR con mampostería reforzada de relleno
☐	☐	MCR con mampostería no reforzada de relleno
☐	☐	Paredes de concreto
☐	☐	Paredes de concreto combinadas con MCR o acero
☐	☐	Paredes de mampostería combinadas con MCR o acero
☐	☐	Paredes de mampostería confinada
☐	☐	Paredes de mampostería reforzada
☐	☐	Paredes de mampostería no reforzada
☐	☐	Sistemas de tipo péndulo invertido
☐	☐	Sistemas con protección sísmica (Aisladores, Amortiguadores, Rodillos, etc.)

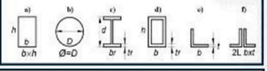
JUNTA DE DILATACIÓN: SI ☐ NO ☐

► ESQUEMAS DE REFERENCIAS



► SECCIONES PREDOMINANTES

	Columnas	Vigas principales	Vigas secundarias	Diagonales
a)Rectangular	☐	☐	☐	☐
b1)Circular	☐	☐	☐	☐
b2)Tubo circular	☐	☐	☐	☐
c)Sección H/I	☐	☐	☐	☐
d) Cajón	☐	☐	☐	☐
e)Sección L	☐	☐	☐	☐
f)Armadura	☐	☐	☐	☐



► MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN ENTREPISO

Losa de concreto reforzado
Losa aligerada
Losa compuesta
Losa pos-tensada
Otro:

► MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN TECHO

Estructura de Soporte		*Cubierta*	
Armaduras o cerchas	☐	Lámina metálica	☐
Largueros	☐	Lámina polimérica	☐
Sistema auto-portante	☐	Fibrocemento	☐
Similar al entrepiso	☐	Panel insulado	☐
Vigas de alma abierta	☐	Teja de barro	☐
Vigas de alma llena	☐	Madera	☐
Otro:		Otro:	

► CONSTRUCCIONES ADICIONALES

Antena de comunicaciones
Escaleras de emergencia
Cuarto de máquinas
Pent-House
Otro:

► ÁREA DEL PRIMER PISO

De 50 m² a 100 m²
De 101 m² a 250 m²
De 251 m² a 500 m²
De 501 m² a 750 m²
De 751 m² a 1000 m²
Más de 1000 m²

► No. DE NIVELES

► No. DE SÓTANOS

► MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PAREDES

Adobe
Bloque de concreto
Madera
Ladrillo de arcilla
Bahareque
Bloque Panel

► FORMA DE LA PLANTA DEL EDIFICIO

Rectangular ☐ Circular ☐ Ángulo ☐ En H ☐
Cruz ☐ Cuadrado ☐ En U ☐ Otro:

Observaciones y comentarios

► DESCRIPCIÓN DE TERRENO Y GEOMETRIA DE EDIFICACIÓN

Altura promedio de entrepisos: (m) Fondo (Y): (m) Altura aproximada: (m)
Altura de planta baja: (m) Fondo (X): (m) Área Promedio: (m²)

Colindancias

Lateral norte: ☐ Lateral este: ☐
Lateral sur: ☐ Lateral oeste: ☐

Forma del terreno

Plano: ☐ Accidentado: ☐
Ondulado: ☐ Otro: ☐

Posición en la cuadra

Aislado: ☐ Esquina: ☐
Intermedio: ☐

3. EFECTOS SOBRE LOS OCUPANTES DEL EDIFICIO

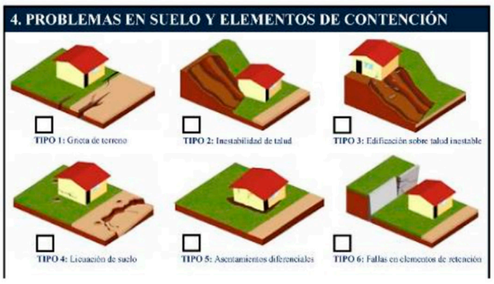
► ESTIMACIÓN DE PERSONAS A REALOJAR

Menores a 2 años:
Entre 11 – 18 años:
Mayores de 65 años:
Entre 2 – 10 años:
Adultos:
Número total de personas a realojar: 0

► No. DE PERSONAS HERIDAS

► No. DE PERSONAS FALLECIDAS

4. PROBLEMAS EN SUELO Y ELEMENTOS DE CONTENCIÓN



☐ **TIPO 1:** Grieta de terreno
☐ **TIPO 2:** Inestabilidad de talud
☐ **TIPO 3:** Edificación sobre talud inestable
☐ **TIPO 4:** Licuación de suelo
☐ **TIPO 5:** Asentamientos diferenciales
☐ **TIPO 6:** Fallas en elementos de retención

5. ESQUEMAS DE ESTRUCTURAS EN ELEVACIÓN Y PLANTA

► ELEVACIÓN

► PLANTA

Código de Activo

INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN RÁPIDA POST-SISMO DE DAÑOS EXISTENTES EN EDIFICIOS Y VIVIENDAS

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

6. EVALUACIÓN DE LA EDIFICACIÓN

► EVALUACIÓN GLOBAL

Daños globales observados

Colapso total	☐ Si	☐ No	Colapso de pisos intermedios	☐ Si	☐ No
Colapso de techo	☐ Si	☐ No	Colisión entre edificios	☐ Si	☐ No
Colapso de planta baja	☐ Si	☐ No	Inclinación de edificios	☐ Si	☐ No

► EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

Problemas observados

Hundimientos diferenciales	☐ Si	☐ No	Fundaciones	☐ Si	☐ No
Deslizamientos de ladera	☐ Si	☐ No	Grietas en el terreno circundante	☐ Si	☐ No
Falla de estructura de contención	☐ Si	☐ No	Licuación de suelo	☐ Si	☐ No
			Socavación de terreno o talud	☐ Si	☐ No

► EVALUACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Elementos observados	*Calificación de daño* Sin daño	Leve	Moderado	Severo	*Niveles afectados y anchos de grietas*
Columnas	☐	☐	☐	☐	
Conexiones de acero	☐	☐	☐	☐	
Contravientos	☐	☐	☐	☐	
Cubo de escaleras	☐	☐	☐	☐	
Estructura de techo	☐	☐	☐	☐	
Losa de entrepiso	☐	☐	☐	☐	
Nudos viga-columna	☐	☐	☐	☐	
Paredes de concreto	☐	☐	☐	☐	
Paredes de mampostería	☐	☐	☐	☐	
Vigas	☐	☐	☐	☐	
Otros:	☐	☐	☐	☐	

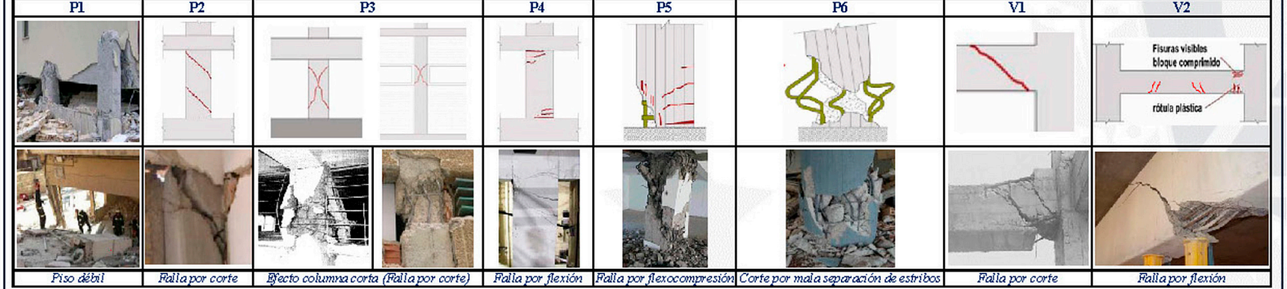
► EVALUACIÓN DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

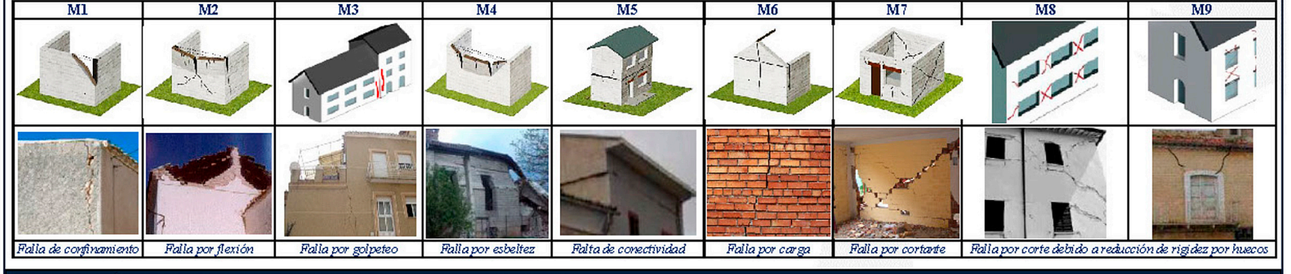
Elementos observados	*Calificación de daño* Sin daño	Leve	Moderado	Severo	*Niveles afectados*
Balcones y parapetos	☐	☐	☐	☐	
Cielo falso o elementos conexos	☐	☐	☐	☐	
Cornisas, aleros y chimeneas	☐	☐	☐	☐	
Cubierta de techo	☐	☐	☐	☐	
Paredes No estructurales	☐	☐	☐	☐	
Pretiles	☐	☐	☐	☐	
Revestimientos y repellos	☐	☐	☐	☐	
Tapiales perimetrales	☐	☐	☐	☐	
Terminaciones arquitectónicas	☐	☐	☐	☐	
Ventanería y puertas	☐	☐	☐	☐	
Otros:	☐	☐	☐	☐	

► DAÑOS ESTRUCTURALES Y SÍNTOMAS EN EL EDIFICIO

Elementos observados y síntoma	Código del daño	Calificación del daño: Severo	Moderado	Leve	Sin Daño	Extensión en el edificio (%): <10	10-50	50-90	>90
COLUMNAS									
Inclinación o Colapso	P1 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fisuración inclinada o rotura	P2 ☐ P3 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fisuración horizontal o rotura	P4 ☐ P5 ☐ P6 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
VIGAS									
Fisuración inclinada o rotura	V1 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fisuración vertical o rotura	V2 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
PAREDES DE CARGA									
Fisuración vertical o rotura	M1 ☐ M2 ☐ M3 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fisuración horizontal o rotura	M4 ☐ M5 ☐ M6 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fisuración inclinada o rotura	M7 ☐ M8 ☐ M9 ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Observaciones y comentarios sobre evaluación de daños





7. EVALUACIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES E INSTALACIONES FIJAS

► DEFECTOS ESTRUCTURALES

Aberturas en entrepiso ☐	Entrepiso sin vigas ☐	Materiales de baja calidad ☐
Aberturas irregulares en elevación ☐	Falta de redundancia en ambas direcciones ☐	Paredes esbeltas y sin amarre ☐
Asimetría estructural ☐	Golpeteo ☐	Piso débil o flexible ☐
Columna corta ☐	Inmueble de esquina ☐	Planta baja de mayor altura ☐
Columna débil – viga fuerte ☐	Inmueble intermedio ☐	Salientes excesivos ☐
Discontinuidad de elementos estructurales ☐	Irregularidad en distribución de masas ☐	Sobrepeso en el edificio ☐
Entrantes excesivas ☐	Irregularidad en planta ☐	Otros:
Entrepisos de altura variable ☐	Irregularidad torsional ☐	

► INSTALACIONES FIJAS

Elementos observados	*Calificación de daño* Sin daño	Leve	Moderado	Severo
Almacenamiento tóxico - químico	☐	☐	☐	☐
Cisterna, elevada o bajo suelo	☐	☐	☐	☐
Elevadores	☐	☐	☐	☐
Enfriadores	☐	☐	☐	☐
Comunicación / Datacenter	☐	☐	☐	☐
Equipo radiactivo	☐	☐	☐	☐
Escaleras de emergencia	☐	☐	☐	☐

	Calificación de daño Sin daño	Leve	Moderado	Severo
Estantes de baterías	☐	☐	☐	☐
Estructura de rótulos o anuncios	☐	☐	☐	☐
Sistema contra incendios	☐	☐	☐	☐
Sistema eléctrico	☐	☐	☐	☐
Postes eléctricos	☐	☐	☐	☐
Tanque de combustible	☐	☐	☐	☐
Otro equipo fijo:				

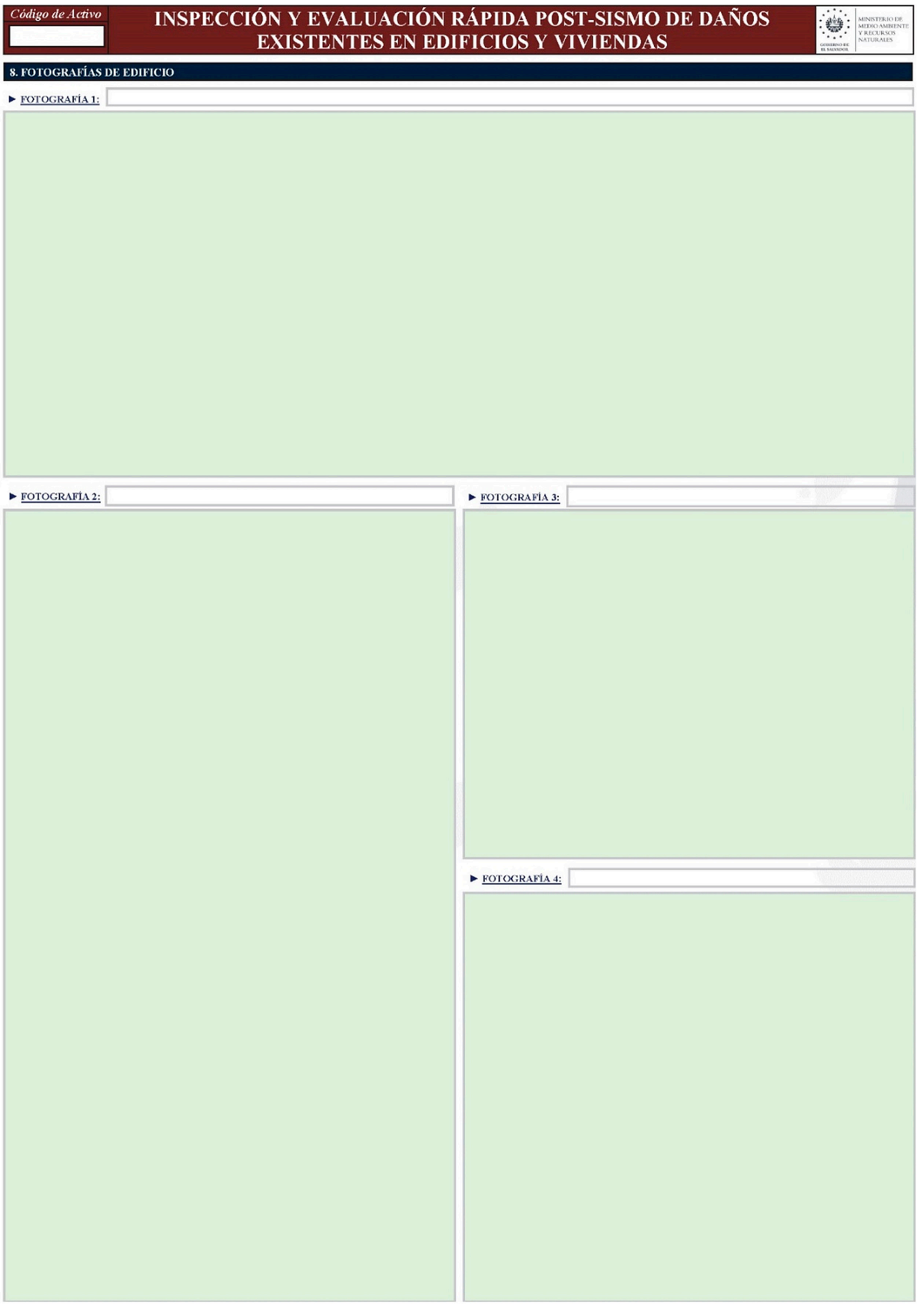


Figura 230. Bosquejo de formulario para levantamiento de daños.
Fuente: Elaboración propia. DOA-MARN.

6.8 Prácticas constructivas históricas y evolución de la normativa de diseño por sismo

Antes de 1942 no existían edificios en El Salvador por encima de tres niveles, y casi todas las construcciones se desarrollaron utilizando métodos tradicionales para la mampostería, aunque mejorado con barras de refuerzo. Las construcciones de madera y bahareque fueron ampliamente utilizadas (Lara, 1987).

Durante el período comprendido entre 1942 y 1957, se construyó en la región la primera serie de edificios de mediana altura (de hasta ocho niveles), la mayoría de ellos utilizando marcos de concreto reforzado con paredes de mampostería (Bommer, 1996). El diseño no consideraba las irregularidades o efectos de torsión que pudieran afectar el comportamiento sísmico de la estructura, y las paredes de mampostería se construían con total interacción con los marcos. No existía un código nacional y no se aplicaban sistemáticamente códigos estructurales extranjeros hasta mediados de los años cuarenta.

El primer código sísmico fue adoptado en mayo de 1966, tras el devastador sismo del 3 de mayo de 1965 en San Salvador, que causó la destrucción total de más de 4,000 casas. El código fue adoptado de la ciudad de Acapulco, México, con algunos cambios menores, pero nunca fue legalmente impuesto. Este código, sin embargo, resulto no ser adecuado para las condiciones sismológicas y geológicas del país.

El 10 de octubre de 1986, un sismo de magnitud 5.7 (Mw) sacudió nuevamente la ciudad de San Salvador. Más de 60,000 viviendas resultaron destruidas o dañadas y numerosas edificaciones colapsaron totalmente. El evento causó daños significativos principalmente en edificaciones de mediana altura (entre 3 y 8 niveles), en correspondencia al período predominante de los suelos del AMSS, lo cual no era adecuadamente contemplado por el código adoptado de la ciudad de Acapulco, el cual utilizaba únicamente un espectro para condiciones de roca. Defectos estructurales asociados a la práctica constructiva de integrar las paredes de mampostería a los sistemas de marcos de concreto reforzado, salieron a relucir durante el evento, ocasionando daños significativos (ver Tabla 38).

A raíz del terremoto del 10 de octubre de 1986 se emitió en el país el Reglamento de Emergencia de Diseño Sísmico de la República de El Salvador, mediante Decreto Ejecutivo n° 14 de fecha 12 de septiembre de 1989, publicado en el Diario Oficial n° 170, Tomo n° 304, del día 14 de ese mismo mes y año, el cual tenía una vigencia limitada debido a su naturaleza.

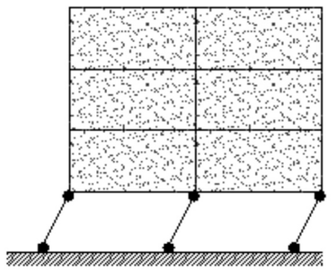
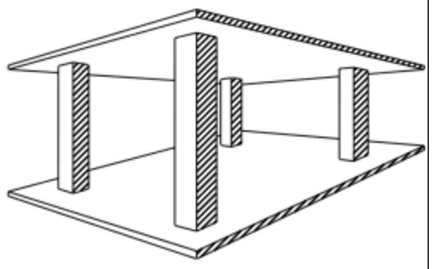
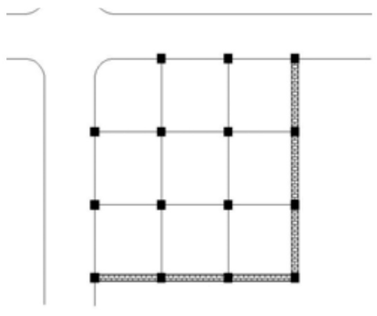
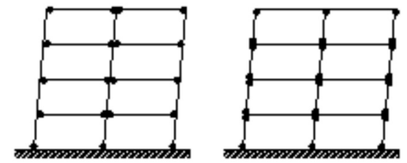
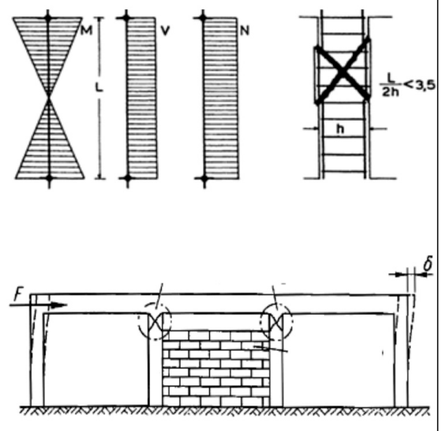
Por tal motivo, y considerando que mediante Decreto Legislativo n° 1904, de fecha 9 de agosto de 1955, publicado en el Diario Oficial n° 151, Tomo n° 168 del 18 del mismo mes y año, se faculta al Órgano Ejecutivo en el Ramo de Obras Públicas para que emita reglamentos que guíen el futuro desarrollo de las poblaciones de un modo coordinado y armónico. Con el objeto de mejorar el diseño de las edificaciones, se opta por dictar un reglamento de carácter permanente que contenga los requisitos mínimos de seguridad estructural, así como los mecanismos adecuados que garanticen su cumplimiento tanto en las construcciones nuevas como en aquellas que vayan a modificarse, repararse o demolerse.

En el año 1994 se establece el Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones de El Salvador (RESESCO), el cual contiene una serie de normas técnicas entre las cuales figura la Norma técnica para diseño por sismo. Dicho Reglamento entró en vigencia hasta el año 1996, mediante Decreto Ejecutivo n°. 105 de fecha 23 de octubre de 1996, publicado en el Diario Oficial N° 204, Tomo n° 333 del 30 de octubre del mismo año.

El nivel de daño ocasionado por los sismos de enero y febrero del 2001 fue considerablemente menor en el Área Metropolitana de San Salvador, lo cual puede atribuirse, en cierta forma, a las medidas de mitigación de riesgo sísmico empleadas en los últimos años, especialmente a la introducción del RESESCO y de la Norma Técnica de Diseño por Sismo (NTDS) incluida en este.

Se debe destacar, sin embargo, que el "buen" desempeño de las estructuras no se debió única- y/o necesariamente a mejoras en el diseño, ya que la demanda impuesta (aceleración espectral) por estos eventos en la mayor parte del AMSS fue considerablemente menor.

Tabla 38. Defectos estructurales comunes observados en El Salvador

	Piso débil o flexible Pisos vulnerables al daño sísmico debido a que tienen menor rigidez, menor resistencia o ambas cosas. Este es uno de los casos más comunes de irregularidad en elevación, y ocurre comúnmente en edificios que tienen el primer nivel abierto (estacionamientos y/o locales comerciales) y paredes de relleno de mampostería integradas al sistema principal en los niveles superiores. Los niveles superiores se transforman, sin intención, en un sistema rígido, y grandes deformaciones ocurren en el piso flexible, induciendo daños en las columnas e incluso el colapso de la edificación.
	Entrepiso sin vigas Corresponde al caso de losas o placas planas que transmiten las cargas directamente a las columnas, sin la ayuda de vigas. La disipación de energía se concentra en la articulación losa-columna, que generalmente no es adecuada para soportar deformaciones inelásticas, resultando en graves daños en dichas uniones e incluso en el colapso total de la estructura (colapso tipo "pancake").
	Irregularidad torsional Muchos edificios de esquina presentan espacios abiertos en las fachadas principales y paredes de mampostería integradas en los bordes interiores. Las paredes tienden a desplazar el centro de rigidez con respecto al centro de masa del edificio, generando grandes excentricidades y momentos torsionales (si los diafragmas no son flexibles). Esta torsión ocasiona que los elementos estructurales de un mismo nivel presenten desplazamientos horizontales diferentes, y las columnas y paredes que se desplazan más, sufren mayores daños.
 a) Columna fuerte – viga débil (adecuado), izquierda, y b) Columna débil, viga fuerte (inadecuado), derecha	Columna débil, viga fuerte El enfoque actualmente aceptado para el diseño sismorresistente de marcos de concreto reforzado es el denominado enfoque de columna fuerte-viga débil. Cuando se sigue este enfoque, se espera que el daño ocurra primero en las vigas, y cuando se asegura un comportamiento dúctil mediante un detallado especial, los marcos pueden deformarse significativamente a pesar del daño progresivo y el aparecimiento de rótulas plásticas (considerado daño aceptable). Cuando las columnas son más débiles que las vigas, tienden a sufrir daños severos localizados en las partes superior e inferior de un piso particular, lo cual puede ocasionar el colapso de un edificio. Las estructuras con columnas débiles y vigas fuertes se caracterizan por dimensiones de columna relativamente pequeñas en comparación con las de las vigas.
	Columna Corta El tipo más peligroso de daño en columnas de concreto, ocasionado por un sismo, se debe al cortante cíclico y baja flexión, cuando existe una fuerte compresión axial. El tipo de daño se manifiesta en forma de grietas en forma de X en las zonas más débiles de la columna. Ocurre en columnas con bajas relaciones de esbeltez en las cuales la capacidad a flexión es menor a la capacidad a cortante, y la falla por cortante prevalece. La forma más extrema de este tipo de daño corresponde a las fallas explosivas de las columnas cortas que pueden llevar a un colapso completo de la estructura. Paredes de mampostería integradas al sistema principal sin un diseño adecuado, pueden disminuir la relación de esbeltez o restringir los desplazamientos laterales de la estructura reduciendo la altura libre de la columna, cambiándolos por elementos rígidos que absorben la mayor porción de las fuerzas laterales

Fuente: Modificado de Kattan Jokisch, C. (2010). Master Thesis, Bauhaus Universität Weimar & Earthquake Damage Analysis Center, Weimar, Alemania.

6.8.1 Hacia un nuevo Código Salvadoreño de Edificaciones

En El Salvador, el Reglamento de Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO) incorpora la Norma Técnica de Diseño por Sismo; sin embargo, esta no ha sido actualizada desde 1994 y presenta limitaciones significativas en la estimación de la amenaza sísmica del país, ya sea en la concepción y forma de modelado de nuevas fuentes de terremotos junto con la incorporación de fallas geológicas, como en la caracterización del movimiento fuerte por fuentes sísmicas específicas y diferentes aceleraciones espectrales.

Asimismo, la normativa vigente carece de una justificación técnica adecuada sobre factores de amplificación del terreno, a pesar de la variabilidad de clases de sitio presentes en el territorio nacional, ya sea por la complejidad estratigráfica de sus unidades como su comportamiento dinámico frente a los terremotos. De igual forma, no se incorpora de manera sistemática la incertidumbre inherente en los distintos pasos de la evaluación del peligro sísmico.

Frente a este panorama, resulta urgente que el país cuente con un nuevo y actualizado Código Salvadoreño de Edificaciones, que corrija la mayoría de las deficiencias encontradas y tenga en cuenta utilizar esta información para convertir las aceleraciones máximas, asociadas a períodos de retorno, en fuerzas de diseño sísmico de edificios, bajo una nueva filosofía de diseño por desempeño estructural. Lo anterior, con el propósito de reducir el riesgo sísmico que representan la construcción de nuevas edificaciones, frente al conocimiento de nuevas solicitaciones sísmicas que pudieran suscitarse.

Entre 2017 y 2021 se sentaron las bases para este cambio normativo mediante el proyecto de cooperación técnica "Plan de Acción para la Implementación del Índice de Gobernabilidad y Política Pública para la Gestión de Riesgo de Desastres ES-T1267"; cofinanciado por el gobierno japonés, ejecutado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y liderado por expertos del Ministerio de Recursos Naturales y Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), con el apoyo de consultores nacionales. Dentro del proyecto se generaron insumos técnicos clave para una futura actualización del marco normativo sismorresistente, así como una propuesta para la reducción de la vulnerabilidad sísmica en el país.

A partir de 2022, el MOP, a través de la Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo (DACGER), dio inicio al proceso formal para la elaboración del nuevo Código Salvadoreño de Edificaciones (CSE). El objetivo del CSE es establecer los lineamientos técnicos necesarios para que el diseño, construcción, supervisión, evaluación y reforzamiento de edificaciones a nivel nacional, para garantizar la seguridad de sus ocupantes a través de la construcción de infraestructuras resilientes que cumplan con los requisitos mínimos de resistencia estructural, serviciabilidad, estabilidad y funcionalidad necesario para enfrentar las condiciones sísmicas y climáticas de la región.

Como etapa inicial del proceso se conformó la Comisión Técnica Rectora Permanente (CRP), cuyos miembros son profesionales de instituciones públicas y privadas encargadas de la legitimación técnica de todos los estatutos que contendrá este nuevo código. Asimismo, se convierte en el brazo técnico del MOP en el área de creación, interpretación, aplicación y emisión de normativas y reglamentos de construcción, específicamente en materias relativas a la evaluación de la amenaza sísmica, análisis y diseño estructural, construcción y evaluación de daños estructurales en edificaciones e infraestructura, que serán contenidas en el CSE.

De igual manera, esta Comisión tiene a su cargo la definición de 9 grupos de trabajo, junto a la selección de sus integrantes y establecimiento de líneas de acción sobre los mismos, con el fin de desarrollar las temáticas de los distintos capítulos que contendrá el CSE. Las instituciones que forman parte de esta Comisión Rectora Permanente y la distribución de los grupos de trabajo con sus temáticas asociadas se muestran en la Figura 231.

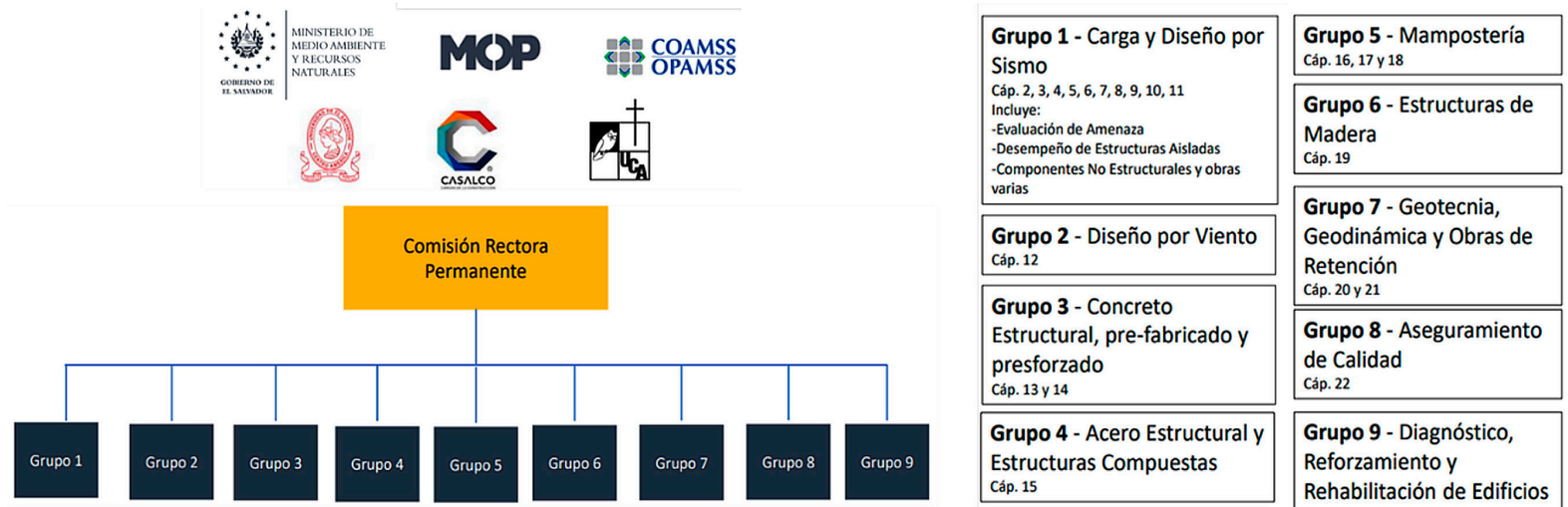


Figura 231. Distribución de grupos de trabajo bajo la tutela de la Comisión Rectora Permanente
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Durante los años 2022 y 2023 se trabajó en conjunto con cada uno de los grupos, a través de reuniones y discusiones técnicas, sobre la base de estándares internacionales reconocidos, los cuales fueron revisados detalladamente y posteriormente adaptados y/o adoptados a las características geográficas, climáticas, técnicas y tecnológicas del país.

Es importante mencionar que el CSE estará en consonancia con la filosofía de reglamentos que plantea la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE (American Society of Civil Engineers) de los Estados Unidos. Para esta primera fase del CSE, se ha tomado como referencia la versión ASCE-7-22; sin embargo, al surgir nuevas actualizaciones del ASCE, estas serán revisadas por la estructura de los equipos de trabajo y validadas por la CRP para ser incorporadas en la nueva versión del CSE, de modo de estar actualizados con el estado del arte ingenieril.

Dentro de del CSE se englobarán diversas áreas de diseño y construcción para estructuras de acero, concreto, mampostería, cimentación, entre otros, además de normativas complementarias orientadas al diseño de elementos estructurales prefabricados, presforzados y postensados de concreto; diseño de estructuras de madera, diseño de mampostería de piedra, control de calidad y aseguramiento de la calidad, reforzamiento y rehabilitación de estructuras entre otras. Dada la magnitud de todo este trabajo, la CRP decidió plantear dos fases de trabajo para la publicación del Código, donde se pretende que en el año 2025 se oficialice la propuesta del documento de CSE para la primera fase.

El índice de capítulos propuestos para el Código Salvadoreño de Edificaciones (CSE) se presenta a continuación. Es importante señalar que, en una primera fase, se priorizará la elaboración de los primeros 17 capítulos, mientras que los capítulos restantes serán desarrollados en una segunda etapa de implementación normativa.

1. Introducción
2. Cargas y combinaciones de carga
3. Criterios de diseño sísmico
4. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras de edificios
5. Procedimiento de la fuerza lateral equivalente
6. Análisis espectral de respuesta modal
7. Análisis no lineal
8. Requerimientos de diseño sísmico para componentes no estructurales
9. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras disímiles a edificios
10. Requerimientos de diseño para estructuras sísmicamente aisladas
11. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de amortiguamiento
12. Diseño por viento
13. Diseño de concreto estructural
14. Diseño de acero estructural y estructuras compuestas
15. Investigación geotécnica
16. Estabilidad de taludes y obras de retención
17. Caracterización del movimiento del terreno y análisis de respuesta del sitio
18. Diseño de prefabricados, presforzados y postensados de concreto
19. Diseño de mampostería con refuerzo integral
20. Diseño de mampostería confinada
21. Diseño de estructuras de madera
22. Provisiones para el aseguramiento de calidad.
23. Diagnóstico, reforzamiento y rehabilitación de edificaciones

Mediante el CSE se brindarán lineamientos y criterios técnicos dirigidos a profesionales en el área de diseño y construcción de infraestructura, incluyendo arquitectos, ingenieros civiles, constructores, autoridades competentes, entidad regulatoria, organismos de gobierno, universidades e instituciones académicas y aseguradoras. Indudablemente este nuevo Código representará un cambio en la filosofía de diseño; ya que se pasará de un enfoque basado en cargas de servicio a uno basado en desempeño, con miras a la prevención del colapso de estructuras. Por lo tanto, el CSE constituye una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y la calidad de las construcciones en el país. Su implementación adecuada contribuirá a la protección de la vida, así como al desarrollo sostenible y resiliente de la población salvadoreña.

6.8.2 Plataforma PRASEDES

Como parte de los insumos generados en el marco del proyecto de cooperación técnica ejecutado entre 2017 y 2021 por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Ministerio de Medio Ambiente identificó la necesidad de consolidar y difundir los productos técnicos desarrollados. Para ello, se diseñó la Plataforma de Resultados de Amenaza Sísmica y Espectros de Diseño Sísmico de El Salvador (PRASEDES), una herramienta web práctica e interactiva que permite a profesionales del área de diseño estructural acceder fácilmente a los resultados y datos generados.

PRASEDES es una plataforma web institucional que pone a disposición información detallada sobre la amenaza sísmica nacional y los espectros de respuesta para diseño estructural. Esta herramienta ha sido implementada en los servidores del Ministerio de Medio Ambiente, integrando tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y módulos interactivos que facilitan una experiencia de usuario intuitiva y eficiente. Esta herramienta fue diseñada para ofrecer una experiencia práctica y de fácil comprensión, orientada especialmente a profesionales del sector construcción, arquitectura e ingeniería estructural. Su objetivo es facilitar la consulta y extracción de parámetros clave de peligrosidad y diseño sísmico, indispensables para la elaboración de proyectos estructurales fundamentados en estudios técnicos actualizados sobre la amenaza sísmica del país.

La plataforma incluye, además, documentos técnico-científicos que respaldan los resultados y valoraciones disponibles, así como un manual de usuario para guiar al profesional en el manejo de esta herramienta, mostrando paso a paso las consideraciones para lograr extraer los resultados de peligrosidad y diseño sísmico apropiadamente.

El esfuerzo de la creación de PRASEDES se alinea totalmente con el impulso de la creación del nuevo Código Salvadoreño de Edificaciones (CSE), convirtiéndose en una de las herramientas que este nuevo código necesitará para su adecuada implementación. Asimismo, con el uso de este tipo de herramientas se garantiza que los profesionales en la rama del diseño de edificaciones nuevas utilicen los resultados proporcionados y obtengan productos de calidad en sintonía con las más modernas provisiones que rigen el diseño sismorresistente.

Sin embargo, es preciso mencionar el descargo de responsabilidad que el Ministerio de Medio Ambiente plantea en el uso de la herramienta PRASEDES; ya que, aunque dentro de la institución se hayan hecho todos los esfuerzos para utilizar adecuadamente los datos obtenidos de fuentes o metodologías confiables, esta institución no ofrece ninguna garantía en cuanto a la exactitud, integridad, confiabilidad o calidad de los datos proporcionados en dicha plataforma.

Asimismo, no se pretende que los resultados proporcionados por esta herramienta reemplacen investigaciones, técnicamente justificadas, que se realicen a mayor detalle sobre un sitio específico, así como también el buen juicio de un profesional competente que tenga conocimiento y experiencia en los campos de práctica apropiados; por lo que, en este caso, los valores de PRASEDES fungirán como un mínimo estándar para que el profesional tome a consideración en sus diseños.

Bajo ninguna circunstancia el Ministerio de Medio Ambiente o sus funcionarios serán responsables ante cualquier persona particular o jurídica por cualquier daño directo, indirecto, especial, incidental o consecuente que surja de o esté relacionado con el uso o confianza en PRASEDES o cualquier información obtenida en ella. De la Figura 232 a la 235 se muestran capturas de la plataforma PRASEDES desde su página principal, sus módulos de amenaza y diseño sísmico hasta los resultados derivados.

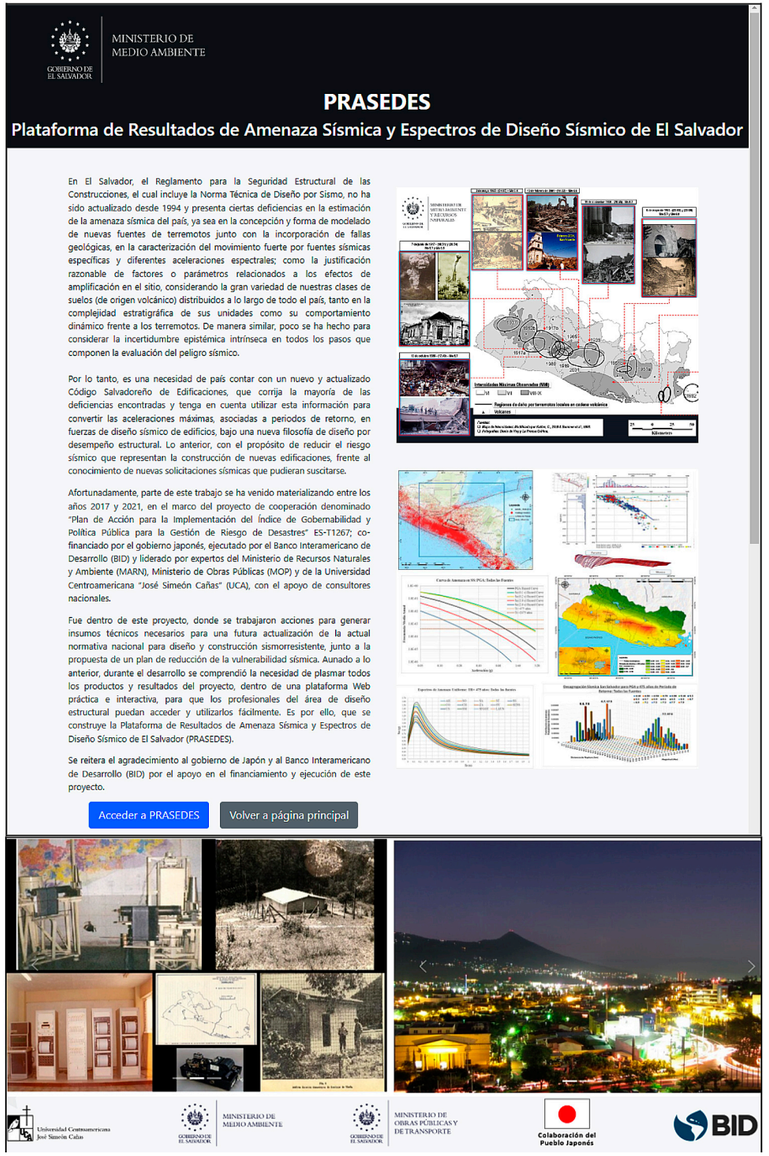


Figura 232. Página principal de plataforma PRASEDES.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

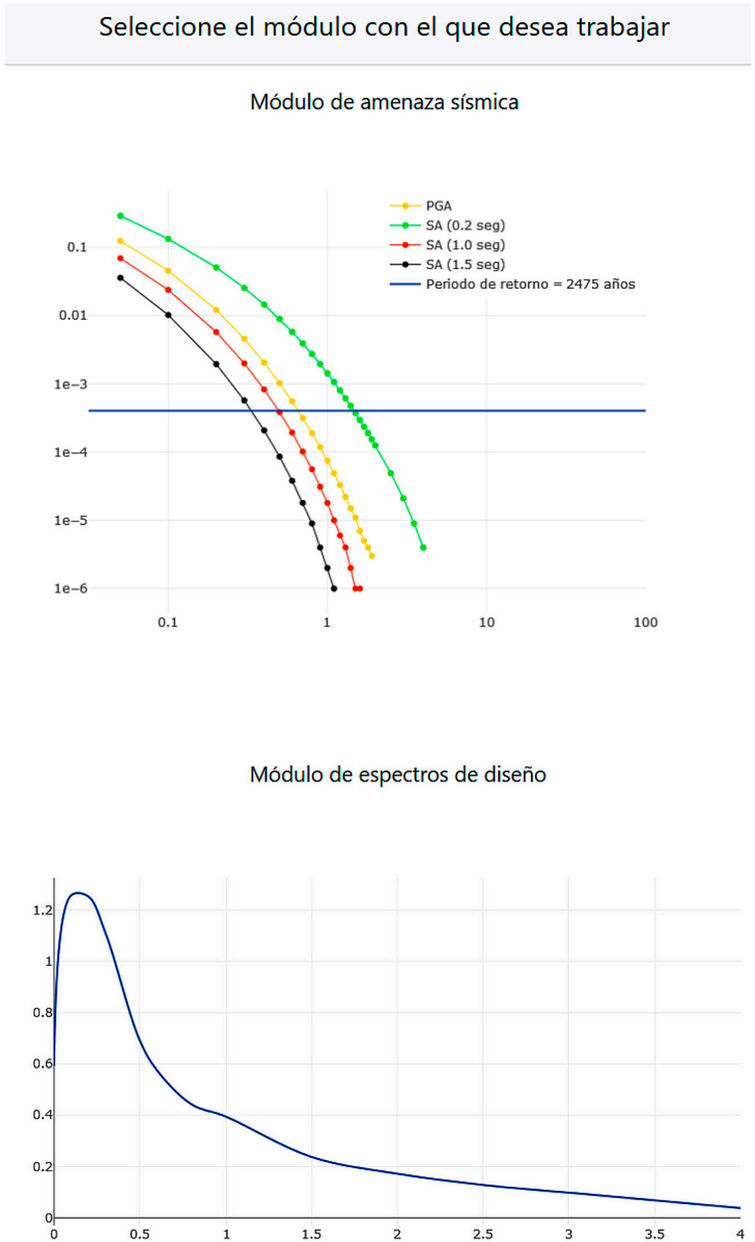


Figura 233. Selección de módulos de amenaza sísmica y espectros de diseño.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

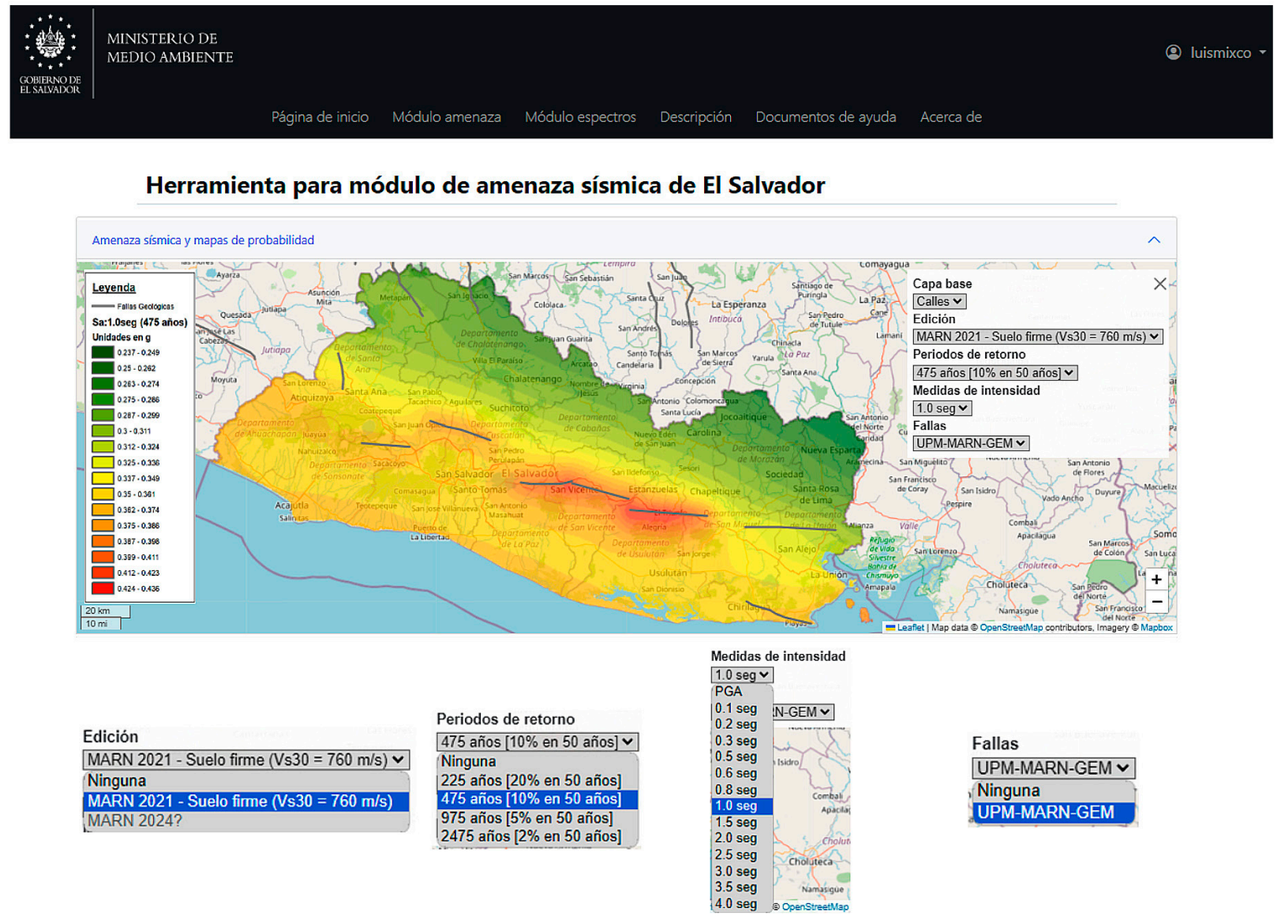


Figura 234. Módulo de amenaza sísmica: período de retorno de 475 años y aceleración máxima del terreno.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Figura 235. Módulo de espectros de diseño sísmico: resultados para clase de sitio CD y categoría de riesgo II.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Resultados para Latitud: 13.693 / Longitud: -89.237

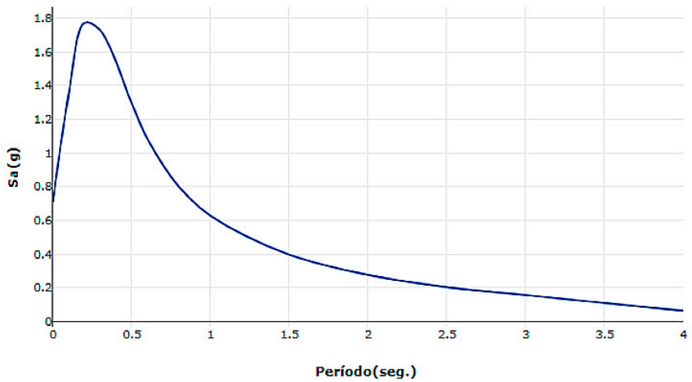
Información Sísmica

INFORMACIÓN SÍSMICA
Para espectro de dos períodos

Categoría de riesgo	Terremoto característico roca (MCE_{ROCA})			Terremoto característico amplificado (MCE_{SITIO})			Terremoto de diseño amplificado (DBE_{SITIO})		Clase de sitio seleccionado	CD	Categoría de diseño sísmico
II	PGA MCE_{ROCA}	S_S	S_1	PGA_{MCE}	S_{MS}	S_{M1}	S_{DS}	S_{D1}	Rango V_{S30} seleccionado(m/s)	SDC	
	0.931	2.076	0.610	1.065	2.392	0.942	1.595	0.628	[300 <= vs30 < 440]	D	

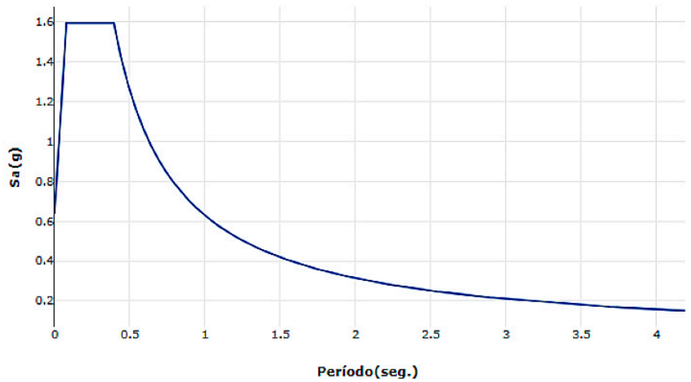
Descargar CSV - Tabla

Espectro de diseño elástico - multiperíodo



Descargar CSV | Descargar TXT

Espectro de diseño elástico - dos períodos



Descargar CSV | Descargar TXT | Subir



Capítulo 7

7. Análisis del riesgo

De acuerdo con la terminología de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2022), el riesgo surge de la interacción entre la exposición y la vulnerabilidad, y solo se manifiesta cuando ambas dimensiones coinciden en el espacio y el tiempo. En este sentido, los desastres no se explican únicamente por la ocurrencia de eventos naturales extremos, sino también por la falta de resiliencia, capacidad de afrontamiento y adaptación de las poblaciones expuestas a estos eventos o a los impactos adversos del cambio climático.

Bajo esta perspectiva, el análisis de riesgo debe partir de la premisa de que la magnitud de un desastre no depende exclusivamente de la intensidad del fenómeno natural, sino también del grado de vulnerabilidad de la sociedad afectada (WorldRiskReport, 2011).

La evaluación del riesgo sísmico consiste en cuantificar el impacto potencial que uno o más eventos sísmicos destructivos pueden generar sobre la infraestructura y la población. Esto incluye la estimación del nivel de daño en las edificaciones, la afectación de los ocupantes y las pérdidas económicas asociadas. Este tipo de análisis se fundamenta en la integración de tres componentes esenciales:

- La amenaza sísmica, desarrollada en el Capítulo 4, que se refiere a la probabilidad de que ocurra un movimiento sísmico de determinada intensidad en una ubicación específica, considerando las características del terreno y su posible efecto de amplificación.
- El modelo de exposición, presentado en el Capítulo 5, que describe detalladamente los elementos presentes en las zonas de interés —tales como edificaciones residenciales, escuelas, hospitales, puentes, entre otros— que pueden verse afectados ante un evento sísmico.
- La vulnerabilidad física, abordada en el Capítulo 6, que evalúa el nivel de daño que pueden experimentar las estructuras y sus ocupantes ante diferentes niveles de amenaza sísmica, considerando las características del diseño, construcción y ocupación (GFDRR, 2014).

Estos tres elementos constituyen la base de la evaluación integral del riesgo sísmico, cuya relación se representa de forma esquemática en la Figura 236.

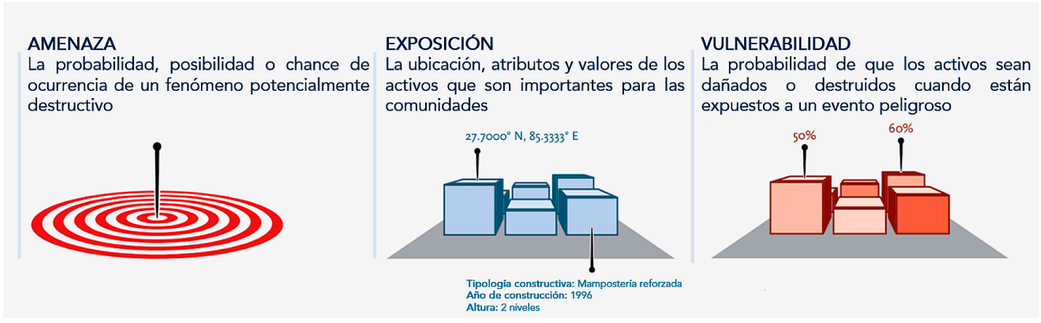


Figura 236. Los tres componentes del riesgo: amenaza, exposición y la vulnerabilidad.
Fuente: Modificada de GFDRR (2014)

En este Capítulo 7, se presenta una actualización de los contenidos incluidos en los subcapítulos desarrollados en la versión anterior del INERV (2017), específicamente sobre: exposición al riesgo, casos de estudio, y riesgo en infraestructura de prioridad estratégica.

7.1 Exposición al riesgo

7.1.1 Exposición al riesgo sísmico

Los modelos de exposición de infraestructura y activos frente a la amenaza sísmica son fundamentales para entender la distribución geográfica de los polos de desarrollo urbano en El Salvador en relación con esta peligrosidad. Estos modelos permiten identificar áreas con mayor riesgo de impactos severos, como colapsos de edificios, desplazamientos de población, y pérdidas económicas y humanas. Básicamente, la evaluación de la exposición es crucial para la planificación territorial, ya que facilita la elaboración de planes urbanos que incorporen criterios de ingeniería para garantizar la construcción segura en zonas de alta amenaza sísmica.

La evaluación de la exposición a la amenaza proporciona una visión clara y rápida de las áreas y activos potencialmente afectados por un fenómeno sísmico específico. Dependiendo de los objetivos del análisis, es fundamental identificar tanto la cantidad de población como la infraestructura vulnerable expuesta, así como el potencial económico en riesgo. Esto es particularmente útil para la preparación y respuesta ante emergencias, así como para el establecimiento de medidas correctivas, prospectivas y de protección financiera.

La exposición se refiere a la distribución espacial de elementos vulnerables a una amenaza, considerando su valor económico y vulnerabilidad estructural. Según expertos de la Fundación GEM, incluye tanto la cantidad como la calidad de los activos en riesgo. El Observatorio Sismológico del Suroccidente de la Universidad del Valle de Cali (Colombia) la describe como la identificación de áreas y elementos susceptibles a ser afectados, como vidas humanas e infraestructura.

En la Figura 237 se presenta como ejemplo una proyección 3D con teselas extruidas (hexágonos de 2.5 km de resolución), las cuales están expuestas a la amenaza sísmica probabilística correspondiente a un período de retorno de 475 años, o un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años. Es evidente que el mayor número de activos expuestos se concentra en las áreas con mayor amenaza sísmica, destacando entre ellas los principales centros de desarrollo urbano del AMSS, así como las principales ciudades del occidente y oriente de El Salvador. Esta concentración de polos de desarrollo urbano en zonas de alta amenaza sísmica se debe, en parte, a su ubicación sobre el arco volcánico del país.

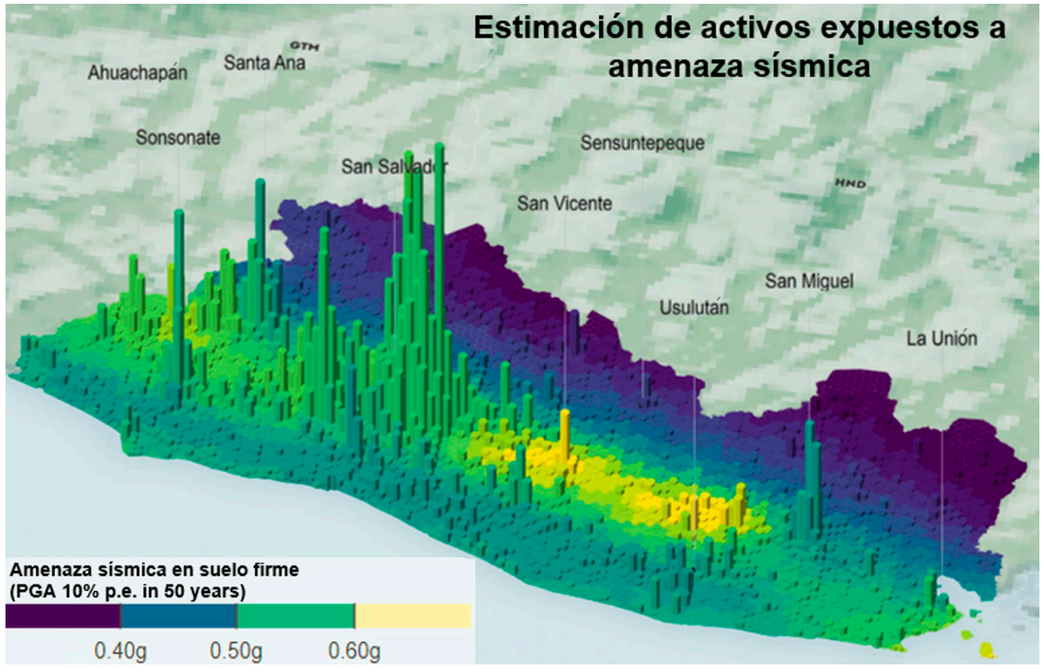


Figura 237. Exposición de edificios a la amenaza probabilística (PR: 475 años) en proyección 3D en El Salvador.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Los valores de aceleración máxima del terreno (PGA) se muestran con una paleta de colores que va de violeta tenue a naranja claro, representando una escala de menor a mayor intensidad sísmica. La superposición de estas dos clasificaciones genera una matriz que ilustra la relación entre la exposición y la amenaza sísmica. Las Figuras 238 y 239 ejemplifican este principio en la parte superior derecha. Siguiendo la dirección de las flechas, es posible identificar combinaciones como baja exposición/bajo PGA, alta exposición/bajo PGA, baja exposición/alto PGA y alta exposición/alto PGA.

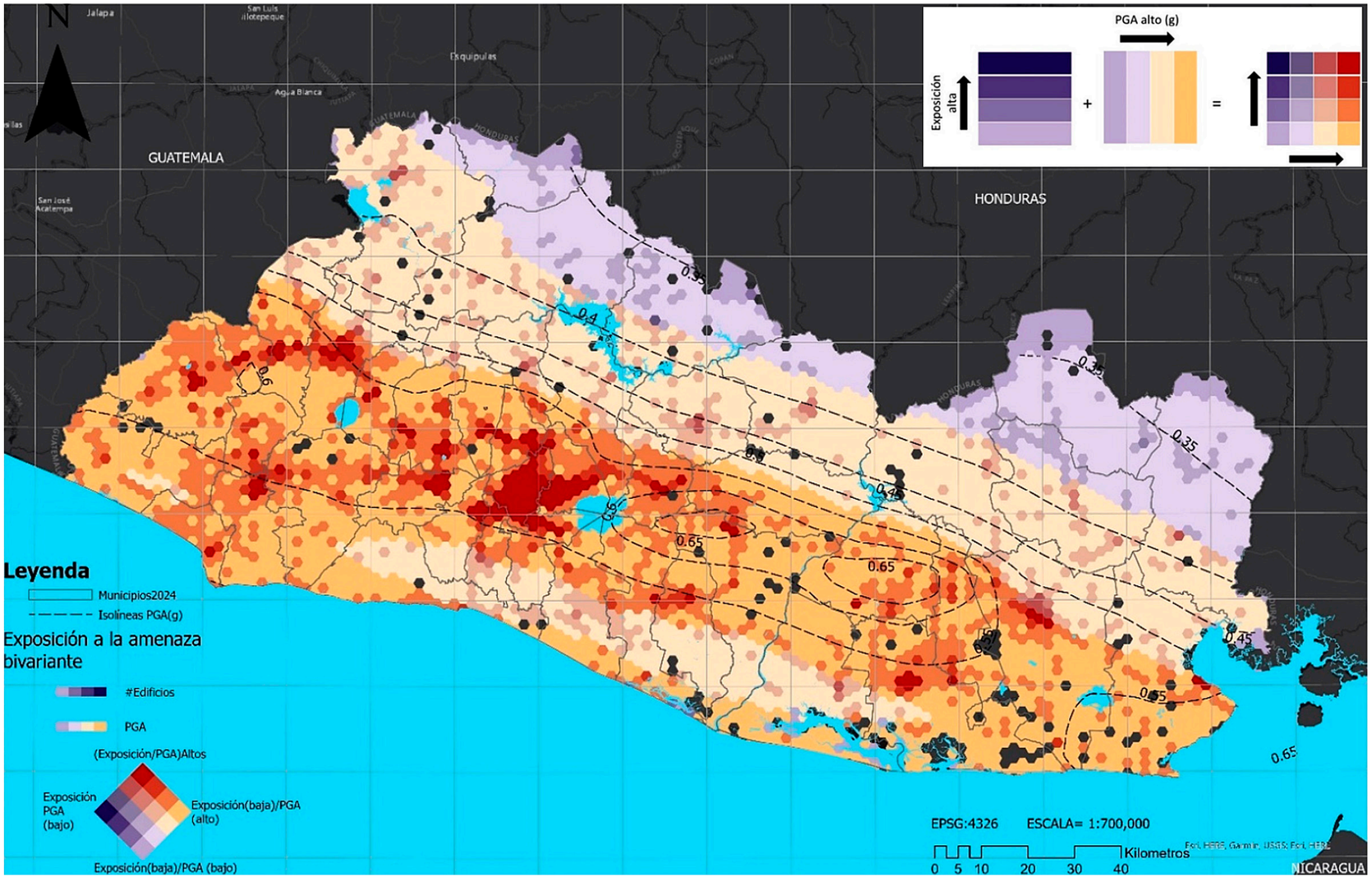


Figura 238. Exposición de edificios a la amenaza, simbología bivariante, PGA 10 % p.e. en 50 años.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

En la Figura 238 se observan los valores de alta exposición y alta amenaza sísmica representados en tonos de naranja oscuro en el arco volcánico de El Salvador, que abarca las principales ciudades del AMSS, así como las regiones occidentales y orientales del país. Esta alta amenaza es particularmente notable en la zona central (departamentos de San Salvador y La Libertad) y en la región occidental (Santa Ana y Sonsonate), donde se concentran edificaciones y se registran altos valores de aceleración máxima del terreno (PGA), evidenciados por las isolíneas de 0.55 g y 0.65 g. En contraste, el norte del país presenta valores bajos de exposición y PGA, reflejando una menor amenaza sísmica. Esto se debe a que las isolíneas en esta región muestran valores bajos de PGA.

La mayor densidad de edificaciones en ciertas áreas se correlaciona con una mayor amenaza sísmica, sugiriendo que las zonas urbanas y densamente pobladas están más expuestas a riesgos sísmicos. En resumen, el mapa destaca que las regiones paracentrales y occidentales de El Salvador enfrentan una mayor exposición a la amenaza sísmica debido a la combinación de alta exposición y elevados valores de PGA. En contraste, las áreas del norte y el este del país presentan una amenaza sísmica menor, con baja exposición y bajos valores de PGA.

Por otra parte, el componente principal del modelo de exposición son los ocupantes de los edificios. La Figura 239 muestra que la mayor concentración de ocupantes, tanto durante el día como en la noche y en tránsito, se encuentra en la zona del arco volcánico salvadoreño. El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) destaca con una tonalidad de naranja oscuro, lo que indica una alta densidad de ocupantes y una significativa concentración del desarrollo económico del país. En contraste, el norte y este de El Salvador presentan una menor cantidad de ocupantes y valores reducidos de PGA.

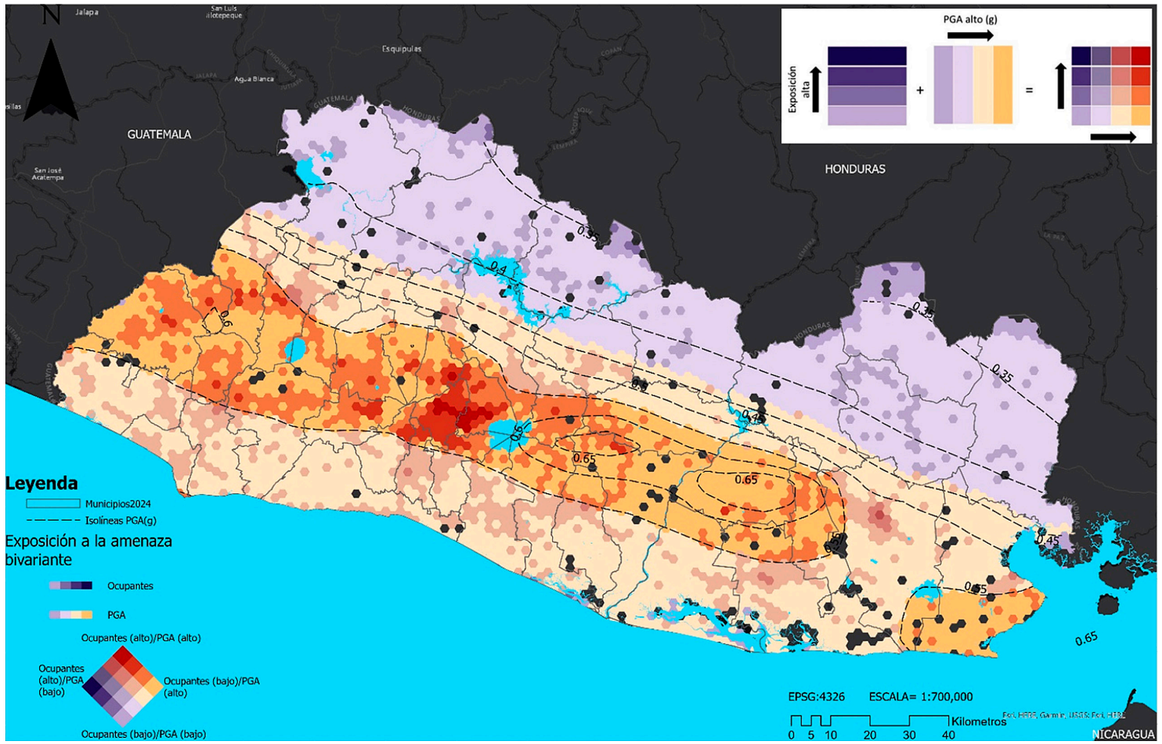


Figura 239. Exposición de ocupantes a la amenaza, simbología bivariante, PGA 10 % p.e. en 50 años.
Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Este patrón de ocupación refleja la amenaza sísmica observada: las áreas con alta densidad de ocupantes, como el AMSS, están expuestas a mayores valores de PGA, lo que implica una mayor exposición al riesgo sísmico. Por el contrario, las regiones con menor densidad de ocupantes y valores de PGA más bajos, como el norte y el este del país, exhiben una exposición sísmica reducida.

En resumen, estos resultados destacan la necesidad de estrategias de mitigación y preparación sísmica en las regiones más vulnerables de El Salvador.

7.1.2 Caso de estudio: Exposición y vulnerabilidad de infraestructura de tipo residencial expuesta a inundabilidad en ciudad de San Miguel

El crecimiento urbano acelerado en San Miguel ha incrementado el riesgo de inundaciones debido a la impermeabilización del suelo y la ubicación de asentamientos en zonas vulnerables, producto de un planeamiento urbano deficiente (Gallegos, 2022; González 2019; Kattan et al., 2017). Entre 1980 y 2024, la ciudad casi duplicó su extensión, intensificando estos impactos.

Las inundaciones en la cuenca del río Grande de San Miguel han aumentado, registrándose al menos una por año, con eventos significativos en 2015-2022, como los huracanes Michael, Vicente y la tormenta tropical Julia. Ante este crecimiento y aumento de la peligrosidad, es crucial realizar estudios sobre el riesgo de inundaciones, los cuales son fundamentales para la planificación de obras de protección y la gestión integral de riesgos (Materón et. al, 2007; Gallegos, 2022).

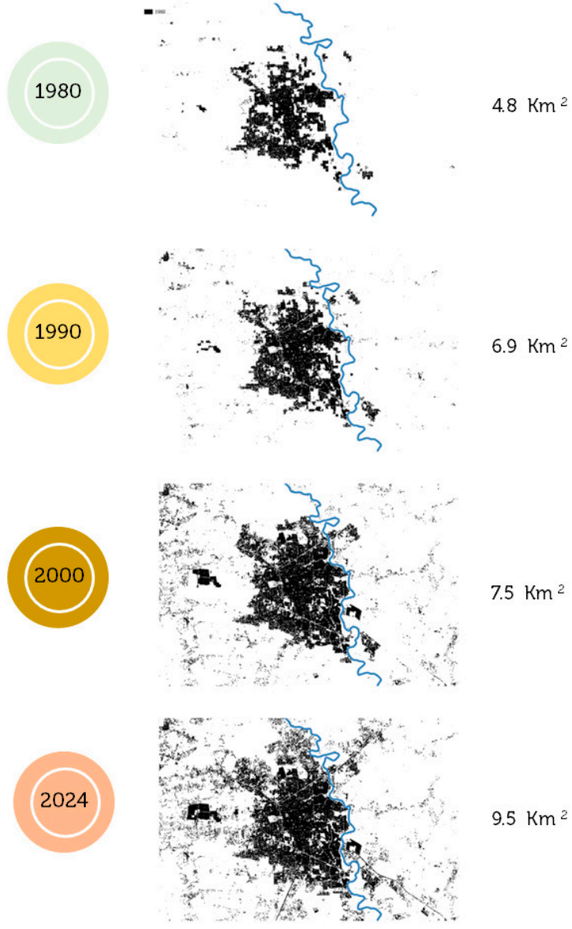


Figura 240. Evolución de la mancha urbana en San Miguel.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• Descripción de la región de estudio

La cuenca del río Grande de San Miguel se extiende por los departamentos de San Miguel, Usulután y La Unión, abarcando 2,446.8 km^2 y un cauce principal de 137 km. Alberga ecosistemas relevantes como las lagunas de Olomega y El Jocotal, y presenta una geología variada que incluye rocas volcánicas, con uso del suelo principalmente de bosques, pastos y agricultura. La cuenca se divide en tres zonas —alta, media y baja—, cada una con diferente comportamiento hidrológico y niveles de riesgo ante inundaciones, influenciados por eventos meteorológicos intensos.

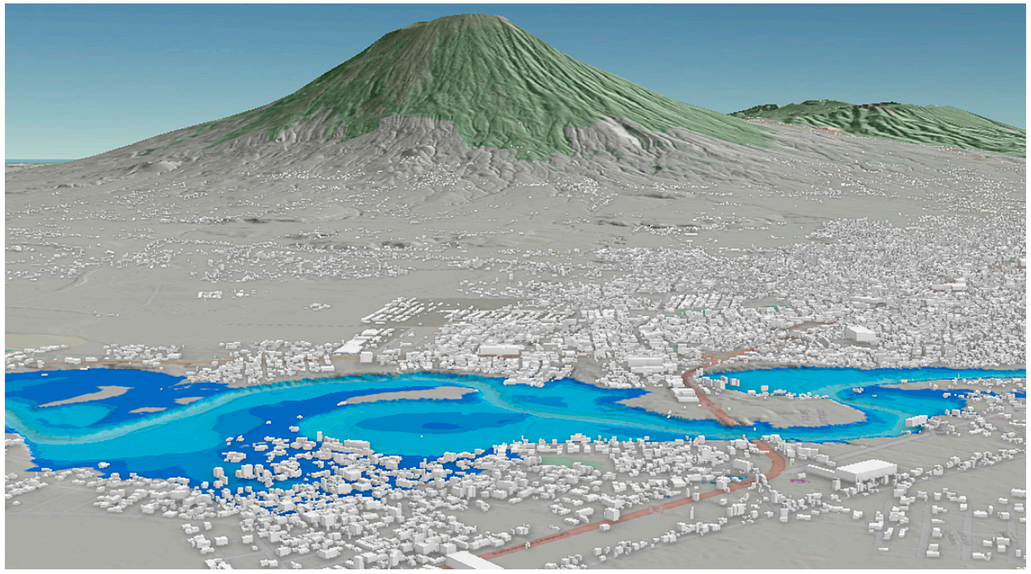


Figura 241. Área urbana de San Miguel expuesta a inundaciones.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

Durante las últimas tres décadas, la cuenca del río Grande de San Miguel, ha enfrentado al menos una inundación anual, muchas de ellas relacionadas con tormentas y huracanes. El evento más reciente fue la tormenta tropical Julia (octubre 2022), que generó lluvias extremas, desbordamientos y afectaciones graves a la infraestructura urbana y rural, especialmente en el oriente del país. Durante Julia, del 8 al 11 de octubre de 2022, se observaron desbordamientos y anegaciones graves, con las condiciones de inundación más severas manteniéndose hasta el 13 de octubre.

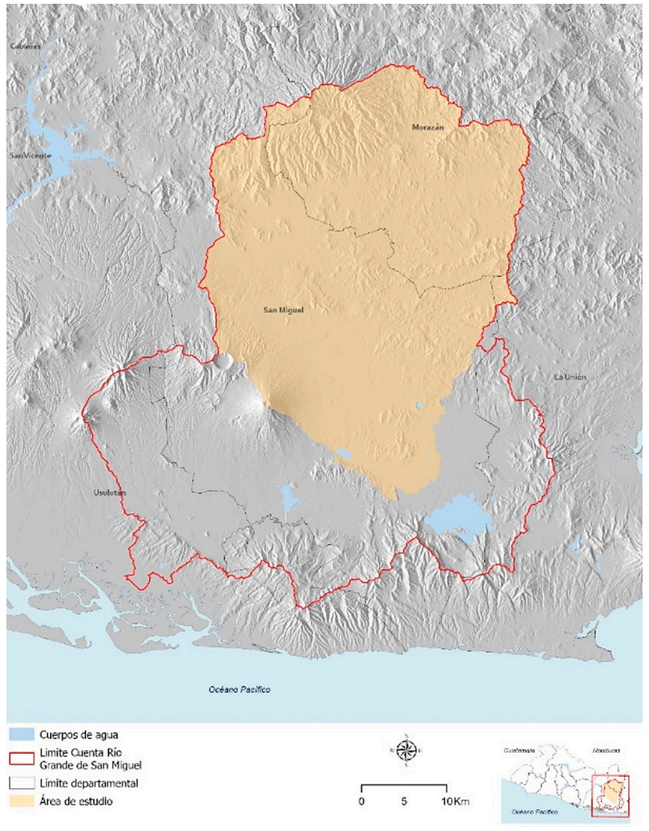


Figura 242. Área de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

• Evaluación de la exposición y riesgo de viviendas

Ante la falta de una base de datos consolidada sobre edificaciones en la cuenca del río Grande de San Miguel, se llevó a cabo un proceso de digitalización y caracterización a partir de información topográfica proveniente del vuelo LIDAR 2014 y del catastro del CNR. Para ello, se clasificaron las edificaciones según tipologías estructurales estandarizadas, siguiendo los criterios empleados en modelos nacionales de exposición física implementados por López y Chávez (2020).

Cada edificación fue caracterizada con atributos clave: altura, sistema estructural, año de construcción, valor de reemplazo y ocupación diferenciada para períodos diurnos y nocturnos. El procesamiento de estos datos se realizó mediante herramientas de geoprocesamiento en Python sobre ArcGIS, complementado con revisiones manuales que permitieron validar y proyectar con mayor precisión el número de edificaciones por tipo de uso o portafolio.

En total, se identificaron 98,734 edificaciones dentro del área de estudio, de las cuales el 90.91 % corresponde al sector residencial. Las tipologías estructurales más representativas fueron la mampostería reforzada y la mampostería confinada de barro. Asimismo, se observó que las zonas urbanas ubicadas al norte del puente de Moscoso presentan una mayor concentración de viviendas construidas en adobe. En general, predomina el uso de mampostería confinada y mampostería de bloque de concreto en las zonas urbanas.



Figura 243. Tipología típica de la casa de adobe en San Miguel.
Fuente: Tomada por MARN (2023).

La vulnerabilidad de la infraestructura residencial en la cuenca del río Grande de San Miguel, ante inundaciones, varía según el tipo de construcción. Los daños y pérdidas están principalmente relacionados con la profundidad de la inundación y la velocidad del flujo de agua.

Las viviendas de adobe son particularmente vulnerables, ya que tienden a colapsar debido a su fragilidad ante fuerzas laterales y pérdida de capacidad para soportar esfuerzos de corte durante inundaciones. Este comportamiento contrasta con el de las edificaciones de mampostería confinada, que han demostrado un mejor desempeño estructural. De hecho, no se reportaron daños significativos en este tipo de viviendas incluso ante niveles de inundación de hasta dos metros de altura, lo que evidencia una mayor fiabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos.



Figura 244. Vivienda de adobe colapsada.
Fuente: Tomada por MARN (2023)

El potencial de colapso de viviendas en zonas de inundación se ve afectado por varias acciones mecánicas, entre las que se incluyen presiones hidrostáticas, golpes de objetos flotantes y la velocidad del flujo. La velocidad del flujo es especialmente crítica, ya que agrava los daños estructurales y puede causar erosión local en la cimentación, llevando al colapso de las viviendas, incluso de mampostería confinada.

Para estimar el riesgo de colapso, se emplearon curvas desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, 1985), que correlacionan la profundidad del agua y la velocidad del flujo con el nivel de daño esperado. Los resultados indican que las viviendas de mampostería pueden experimentar colapsos cuando se exponen a calados de 4 metros combinados con velocidades superiores a 2 m/s. En el caso de viviendas de adobe, el umbral de vulnerabilidad es más bajo, incrementando significativamente el riesgo de colapso a partir de calados de 3 metros o velocidades mayores a 1.5 m/s.

Después de la Tormenta Julia en octubre de 2022, se observaron 10 viviendas de adobe colapsadas en el área de estudio, lo que respalda los resultados mostrados en las gráficas de potencial de colapso.

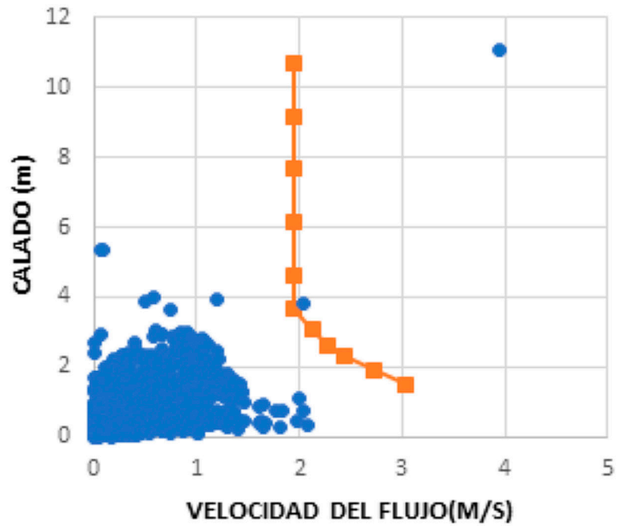


Figura 245. Gráfico del potencial colapso de viviendas de mampostería para un período de retorno de 100 años.
Fuente: USACE (1985)

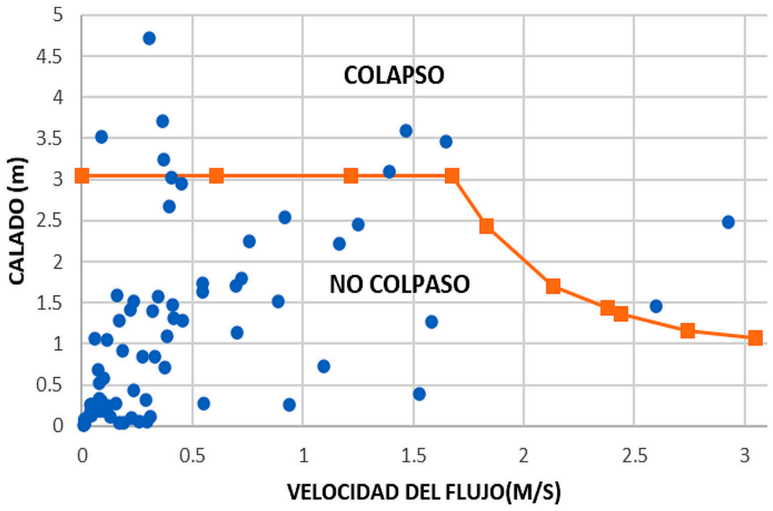


Figura 246. Curvas de colapso en viviendas de adobe.
Fuente: USACE (1985)

- Modelación hidrológica e hidráulica

Para analizar el evento de la tormenta Julia (2022), se utilizaron registros de 13 estaciones telemétricas de los cuatro días que duró el evento. Durante este período, se registraron acumulados máximos de hasta 323.6 mm en el oriente del país.

Para simular la respuesta hidrológica durante el evento de la tormenta Julia, se empleó el modelo HEC-HMS, integrando el cálculo del número de curva (CN) conforme a la metodología del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Este enfoque se fundamentó en información proveniente del mapa de cobertura de suelo de El Salvador (2015-2016), el modelo de elevación digital LIDAR (2014) y el modelo de textura de suelos (2021). Para subsanar vacíos de información espacial, se aplicó un algoritmo de interpolación por vecino más cercano. El resultado fue un mapa de número de curva de alta resolución (2.5 metros) para todo el territorio nacional. Este mapa refleja que las zonas urbanas, humedales y manglares presentan valores altos de CN, lo que indica una mayor escorrentía superficial; en contraste, las regiones montañosas y volcánicas muestran valores más bajos, lo que sugiere una mayor capacidad de infiltración del agua en el suelo.

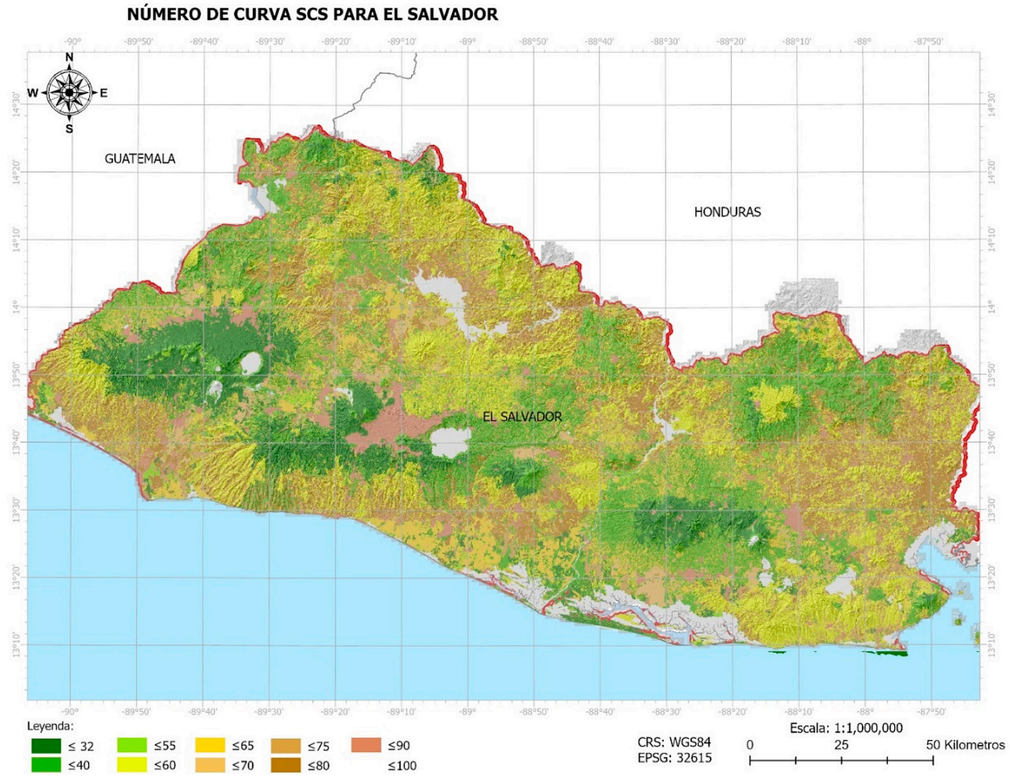


Figura 247. Mapa de número de curva de El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

El flujo en el cauce fue simulado con el método de Muskingum, y se calcularon parámetros como el tiempo de concentración (métodos de Kirpich y SCS) y el coeficiente de almacenamiento (método de Clark), dividiendo la cuenca en 11 subcuencas.

El hidrograma del evento arrojó un caudal pico de 1,474 m^3/s. Para eventos extremos, se generaron curvas IDF, estimando un caudal de hasta 2,193 m^3/s para un período de retorno de 100 años.

La modelación hidráulica se realizó con el software Iber V3.3.1, utilizando ecuaciones bidimensionales de Saint Venant en 34 km del cauce. Se evidenció mayor área de inundabilidad en zonas urbanas (como Carrillo y Vistas del Río) atribuido a cambios en el uso del suelo.



Figura 248. Modelo de inundabilidad en las colonias Carrillo y Jardines del Río.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

La validación del modelo comparó las alturas simuladas con observaciones de campo en 17 secciones, obteniendo un MAPE de 3.52 % y un RMSE de 0.57 m, lo cual indica buena precisión en la simulación del calado de inundación.

• Resultados del estudio

Durante la tormenta Julia (2022), se calibraron modelos hidrológicos e hidráulicos con base en 17 puntos con evidencia de inundación, identificando 1,513 viviendas afectadas, principalmente en las colonias Carrillo y Jardines del Río. Las construcciones más vulnerables fueron las de adobe, mientras que las de mampostería reforzada (RM2L) y confinada (RMC) resistieron mejor los impactos. Para un período de retorno de 100 años, se proyectan hasta 2,260 viviendas afectadas. Los daños incluyen pérdida de menaje y efectos estructurales por presión hidrostática.

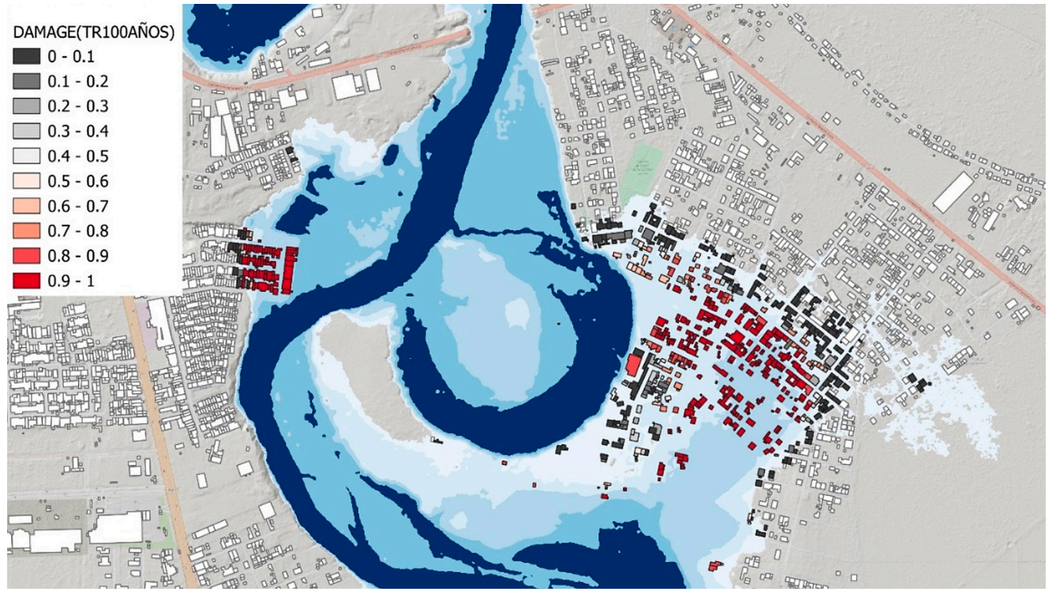


Figura 249. Daños por inundación en las colonias Carrillo y Jardines del Río para un período de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

A pesar de no observar daños arquitectónicos o estructurales en viviendas RM2L y RMC, las viviendas de adobe fueron gravemente afectadas por calados de agua superiores a un metro. Dado que el crecimiento urbano ha aumentado la escorrentía superficial, lo que resalta la necesidad de desarrollar curvas de vulnerabilidad adaptadas al contexto local.

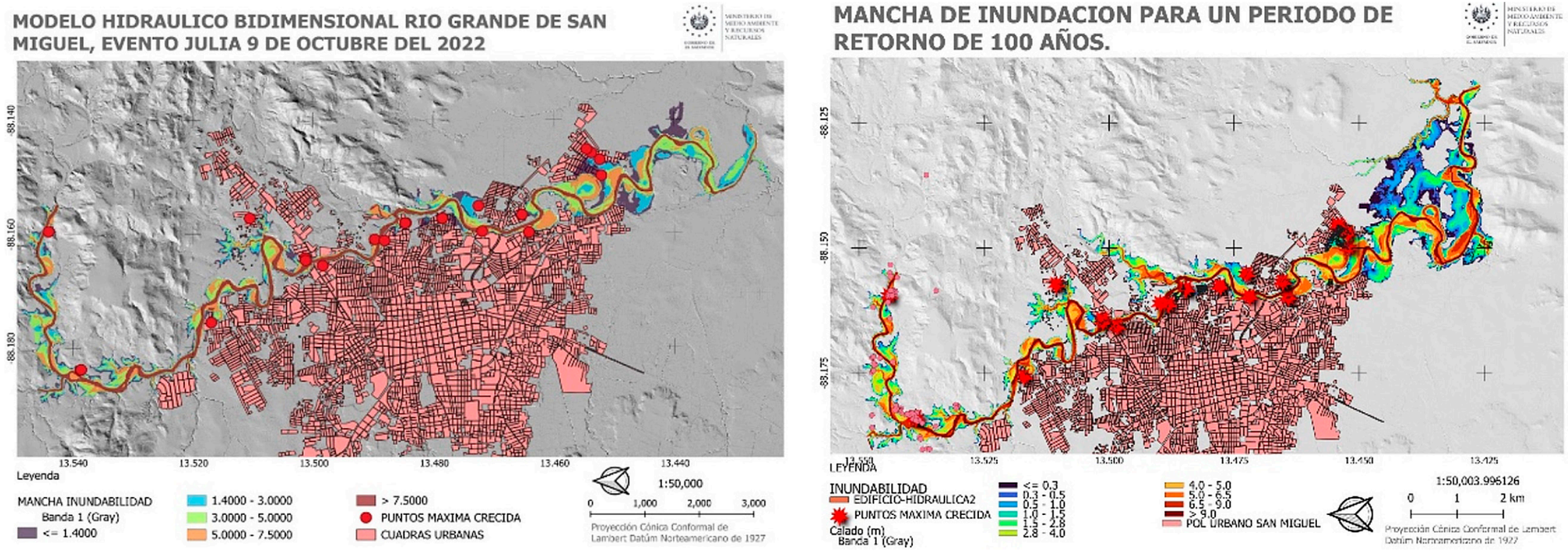


Figura 250. Resultados del modelo hidráulico bidimensional del río Grande de San Miguel para un período de retorno de 50 y 100 años.
Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

7.2 Análisis de riesgo sísmico a nivel nacional

Los trabajos de investigación mostrados anteriormente han proporcionado importantes herramientas de evaluación del riesgo sísmico, como funciones de vulnerabilidad, análisis de costos y beneficios e incluso propuestas de esquemas de seguro contra terremotos para El Salvador; sin embargo, algunos de ellos tienen más de una década de antigüedad y se han enfocado en áreas geográficas específicas —como el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) y Santa Tecla— o en sectores limitados, como el de edificaciones educativas públicas.

Reconociendo la necesidad de contar con modelos actualizados, representativos del contexto nacional y de acceso libre, el Ministerio de Medio Ambiente ha trabajado durante más de cinco años en la recopilación y sistematización de información clave para el desarrollo de nuevos modelos de exposición, vulnerabilidad y amenaza sísmica que fortalezcan la gestión integral del riesgo en el país.

En este marco, y con el apoyo de la Oficina de Asistencia Humanitaria de los Estados Unidos (USAID/BHA), se lanzó en 2021 el proyecto FORCE (Forecasting and Communicating Earthquake Hazard and Risk, 2023–2025). Esta iniciativa, liderada por el Ministerio de Medio Ambiente en conjunto con la Universidad de El Salvador (UES) y la Fundación Global Earthquake Model (GEM), tiene como objetivo la generación de modelos y estimaciones de riesgo sísmico a escala nacional. Para ello, se ha desarrollado una caracterización integral del riesgo para siete portafolios de infraestructura: residencial, comercial, industrial, salud, institucional, educación y otros.

Este proyecto abarca tanto un análisis probabilístico enfocado, primordialmente, en la mitigación y gestión del riesgo futuro como escenarios deterministas que se enfocan en la gestión reactiva, apuntando a la necesidad de establecer planes de preparación y respuesta ante una emergencia.

En esta nueva estimación de riesgo sísmico se utilizan los nuevos productos de la evaluación de la amenaza sísmica y el conglomerado de activos inmersos en el nuevo modelo de exposición nacional, así como modelos de fragilidad provenientes tanto de la literatura como de modelos desarrollados localmente que se acondicionan a las tipologías constructivas de mampostería reforzada, confinada y adobe del país. Esta concatenación se realiza a través de asignación de pesos sobre ambos modelos, logrando propagar la incertidumbre asociada a la estimación del riesgo sísmico a nivel nacional.

Este subcapítulo introduce los dos enfoques empleados para evaluar el riesgo sísmico en el país: el método determinista o por escenarios sísmicos, y el método probabilístico. El enfoque determinista evalúa el riesgo frente a un conjunto selecto de escenarios sísmicos, previamente definidos en cuanto a su ubicación, magnitud, tipo de ruptura y profundidad.

La evaluación del riesgo para estos escenarios empleará la metodología de convolución entre curvas de fragilidad (globales y locales) y matrices de consecuencia discretas, siendo estas últimas los modelos simplificados propuestos por GEM, los cuales describen la relación costo de reparación a costo de reemplazo para las métricas sobre el impacto en la región afectada, expresadas en términos de estructuras colapsadas, personas desplazadas, heridas y fatalidades, y pérdidas económicas. Su objetivo principal es respaldar acciones de concientización, comunicación del riesgo y preparación para posibles desastres.

Por otro lado, el método probabilístico estima el riesgo utilizando un catálogo representativo de la sismicidad posible en el país durante un período de tiempo amplio, que abarca cientos de miles de escenarios potenciales o eventos estocásticos. En este enfoque se usarán funciones de vulnerabilidad predefinidas por la Fundación GEM, junto con sus dispersiones para medidas de intensidad específicas aplicadas a diversas tipologías constructivas del modelo de exposición nacional.

Las métricas de riesgo a considerar incluyen las tasas de pérdida estimadas para

elementos estructurales y no estructurales, contenido mobiliario y fatalidades. Este enfoque permitirá obtener métricas anualizadas, identificando las regiones con mayor probabilidad de impacto, tipologías constructivas que más contribuyen al riesgo, así como curvas de excedencia del riesgo que son fundamentales en las estrategias de transferencia económica, proporcionando información clave a los organismos de gestión del riesgo que pueden utilizarse en políticas de planificación y mitigación a corto, medio y largo plazo.

Las secciones siguientes presentan la metodología aplicada y los principales resultados obtenidos a partir de ambos enfoques de análisis. La información se resume de forma clara y accesible mediante diagramas en formato de una página por municipio (perfiles), lo cual permite una rápida visualización de los datos clave. Para quienes requieran mayor profundidad, también se dispone de información detallada por cada municipio.

7.2.1 Casos de estudios de riesgo sísmico

El análisis de exposición al riesgo ofrece información importante y permite identificar las amenazas o zonas más críticas, donde estudios de mayor detalle deben ser realizados. De igual manera, aunque el cálculo de la peligrosidad sísmica se ha estudiado en El Salvador durante más de 30 años, las investigaciones específicas que evalúan los daños causados por los terremotos son relativamente nuevas. Estos estudios se denominan evaluaciones de riesgo de desastres.

El objetivo principal de la evaluación del riesgo de desastres es proporcionar herramientas para la toma de decisiones relacionadas con la reducción y mitigación del riesgo, incluidas medidas preventivas y de preparación. Esta sección proporciona una revisión histórica y una breve descripción de los resultados obtenidos en los diferentes estudios de riesgo realizados para distintas amenazas y activos expuestos en El Salvador, en los cuales se aplicaron diversas metodologías de análisis seleccionadas en función de los resultados esperados. Finalmente se detalla en profundidad el caso de estudio más reciente sobre la estimación de riesgo sísmico para el portafolio escolar del país.

- Estudios de riesgo probabilístico

- Para el año 2010, la consultora Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina (ERN-AL) realizó una serie de evaluaciones de riesgo sísmico para varios países de Centroamérica, incluido El Salvador, para lo cual se desarrolló el software Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA); iniciativa financiada por el Banco Mundial. Entre los productos, orientados a El Salvador, resultantes de esta iniciativa se encuentran: a) Propuesta de indicadores y funciones de vulnerabilidad, b) Evaluación del riesgo de desastres en San Salvador, c) Análisis beneficio-costo de la mitigación del riesgo sísmico en escuelas a nivel nacional y d) Esquema de seguro contra terremotos para San Salvador.

  Cabe señalar que este esfuerzo tuvo un carácter ilustrativo y estuvo condicionado por la disponibilidad y resolución de la información existente en ese momento. Por ello, es fundamental que los usuarios finales reconozcan las limitaciones asociadas a la escala de análisis, así como a la naturaleza del estudio, el tipo y calidad de los datos utilizados y las posibles interpretaciones realizadas por los distintos actores involucrados.

- En 2012 se llevó a cabo el proyecto Modelación Estocástica de Escenarios de Riesgo Sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) Incluyendo Análisis de las carteras de Educación, Salud y Gobierno. (Kattan et al., 2012). El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con el apoyo del Ministerio de Educación y el Ministerio de Salud, implementaron esta iniciativa a través de un proyecto de asistencia técnica con financiamiento del Banco Mundial y apoyo del consorcio ERN-AL.

  En ese estudio se realizó una modelación probabilística de escenarios de riesgo

sísmico utilizando la plataforma CAPRA para instituciones educativas, de salud pública y gubernamentales del AMSS. El análisis probabilístico de escenarios de riesgo sísmico dio como resultado un "valor de prima puro" (costo de riesgo anual excluyendo los costos de gestión o administración) de $14.7 millones, lo que representa aproximadamente el 5.78 % del valor de la infraestructura expuesta. Las mayores pérdidas físicas se concentraron en la cartera de salud, con primas puras o pérdidas anuales esperadas de $7.16 millones, lo que representa el 6,29 % de la exposición total del portafolio. Para las otras dos carteras, Educación y Gobierno, las pérdidas físicas anuales esperadas se estiman en $2.95 millones y $4.61 millones, respectivamente, correspondientes al 5.61 % y el 5.22 % del valor de exposición de infraestructura analizado.

- Posteriormente, en el año 2015, se lanzó otro proyecto, titulado Modelación probabilística de escenarios de riesgo sísmico en el Área Metropolitana de San Salvador, ciudad de Santa Tecla. (Kattan et al., 2017). La ciudad de Santa Tecla fue fundada en 1854 con el objetivo de construir una nueva capital para El Salvador luego de que San Salvador fuera completamente destruido por un terremoto, objetivo que finalmente no se concretó. Santa Tecla ha corrido la misma suerte que sus vecinos, en parte atribuido a las condiciones del suelo local, con períodos dominantes en el mismo rango que la infraestructura típica de la ciudad. Por lo tanto, Santa Tecla fue identificada como una de las zonas más críticas en términos de riesgo sísmico. Se utilizó nuevamente CAPRA para realizar el análisis de riesgo sísmico. Las instituciones involucradas en este proyecto fueron el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, la Universidad de El Salvador (UES), el Municipio de Santa Tecla y el Ministerio de Obras Públicas y de Transporte (MOPT).

  Este análisis probabilístico de riesgo sísmico consideró 24,966 escenarios sísmicos probables y 16,444 inmuebles pertenecientes a Portafolios Residencial, Comercio, Industria y otros con un valor expuesto alrededor de 963,414 millones de dólares. Como resultado de este análisis, la Pérdida Anual Esperada (AAL) de los activos físicos, sin considerar efectos de sitio, fue de 10,876 millones de dólares, lo que representa el 1.13 % del valor total de los activos. Considerando la afectación de sitio, el AAL fue de 52,573 millones de dólares, lo que representa el 5.46 % del valor total de los activos.

- No fue hasta el año 2016 cuando se desarrolló un nuevo estudio sobre estimación multirriesgo, centrándose en esta ocasión, a nivel nacional. Este esfuerzo se realizó en el marco del proyecto Análisis de Riesgos en infraestructura prioritaria de El Salvador, liderado por el programa global Climate & Development Knowledge Network (CDKN) a través de la empresa canadiense ESSA Technologies Ltd., especializada en medio ambiente y reducción de riesgo de desastre.

  Este estudio ayudó a mejorar la evaluación y la gestión (desde un punto de vista general de múltiples riesgos) de amenazas naturales para infraestructura crítica en El Salvador. Los datos disponibles, incluidas siete infraestructuras críticas y seis tipos de peligros naturales, se compilaron en una plataforma basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cual permitió comparar los riesgos de diferentes amenazas y los niveles relativos de riesgo para diferentes tipos de infraestructura.

  La infraestructura crítica analizada fue el sector educación, agua y saneamiento, vías, puentes viales, torres de transmisión, subestaciones eléctricas y centros de salud. Los peligros considerados fueron terremotos, inundaciones, tsunamis, corrientes piroclásticas, flujos piroclásticos volcánicos y flujos de lava volcánica.

  Dentro de este estudio solo se determinó la Pérdida Promedio Anual (AAL) esperada para cada componente de infraestructura y cada tipo de amenaza natural, argumentando que es la métrica de riesgo que permite comparaciones entre todo tipo de peligros y todo tipo de infraestructura; logrando capturar la pérdida esperada a largo plazo de eventos con diferentes probabilidades y diferentes niveles de daño. Entre los hallazgos obtenidos de este proyecto, se encuentra que los terremotos (49 % del total de AAL) y las inundaciones (29 % del total de AAL) son los mayores y más frecuentes peligros naturales identificados en El Salvador; los demás representan un nivel más bajo de AAL.
  Asimismo, las amenazas examinadas afectaron todos los tipos de infraestructura.

Por ejemplo, educación (49 % del AAL total), las carreteras y puentes (25 % del AAL total), la salud (12 % del total de AAL), y agua y saneamiento (8 % del total de AAL).

El estudio concluyó que, si bien se registran pérdidas significativas en todo el territorio nacional, las mayores concentraciones de pérdidas se ubican en las zonas costeras. Estas áreas presentan una mayor exposición a eventos como inundaciones recurrentes, posibles impactos de tsunamis y terremotos. En particular, los efectos sísmicos tienden a amplificarse en estas regiones debido a la propagación de ondas sísmicas a través de sedimentos o suelos poco consolidados, lo que incrementa la severidad del daño potencial.

- Programa Global para Escuelas más Seguras (GPSS). Plan de mitigación del riesgo sísmico en la infraestructura de las escuelas públicas de El Salvador.

Hasta la fecha, el último estudio de riesgo sísmico realizado a nivel nacional en el país, donde participó el Ministerio de Medio Ambiente, fue el desarrollado como parte del Programa Global para Escuelas Más Seguras (GPSS), financiado por el Fondo Global para la Reducción y Recuperación de Desastres (GFDRR) y gestionado por el Banco Mundial.

Durante los años de 2015 y 2018, se tomaron las acciones necesarias para evaluar el riesgo sísmico de la infraestructura de las escuelas públicas. Para ello, se estableció una alianza entre el Banco Mundial, la Universidad de los Andes (Uniandes) y el University College London (UCL), actuando el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el Ministerio de Educación Nacional como instituciones nacionales contrapartes, así como asesores nacionales (Ramírez et al, 2018).

El principal objetivo del proyecto fue desarrollar las bases para un plan de mitigación del riesgo sísmico para edificios escolares en El Salvador. Para ello fue necesario realizar una evaluación probabilística del riesgo sísmico y analizar posibles medidas de reducción de la vulnerabilidad. Más concretamente, los objetivos del proyecto fueron (Ramírez et al, 2018):

- Identificar y definir una clasificación estructural de la infraestructura escolar del país con una taxonomía consistente.
- Realizar la evaluación de vulnerabilidad y fragilidad de los edificios índice propuestos.
- Identificar estrategias de fortalecimiento sísmico para la reducción de la vulnerabilidad.
- Sentar las bases de un plan de largo plazo para llevar a cabo la reducción de la vulnerabilidad y la mitigación del riesgo sísmico en el sector.

Amenaza sísmica y efectos de sitio

Se utilizó la plataforma CAPRA para realizar la modelación probabilística de escenarios de riesgo sísmico. La amenaza sísmica utilizada fue la obtenida mediante el proyecto RESIS II la cual es la misma que se empleó en los casos de estudio anteriores. Los resultados de la amenaza sísmica fueron expresados en términos de un conjunto de eventos estocásticos colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes, que tienen asociado un epicentro, una magnitud y una frecuencia anual de ocurrencia. Cada evento estocástico corresponde a una fuente sismogénica y produce una distribución de parámetros de intensidad como aceleración máxima del terreno y aceleración espectral para diferentes períodos de vibración estructural.

El total de escenarios considerados fue de aproximadamente 25.000, cuyas magnitudes oscilan entre 5.1 y 7.8, distribuidos entre las dos fuentes sísmicas más importantes en el país: corteza superficial activa y subducción. En la Figura 251 se pueden observar algunos de los eventos o escenarios sísmicos probables derivados del estudio de amenaza sísmica.

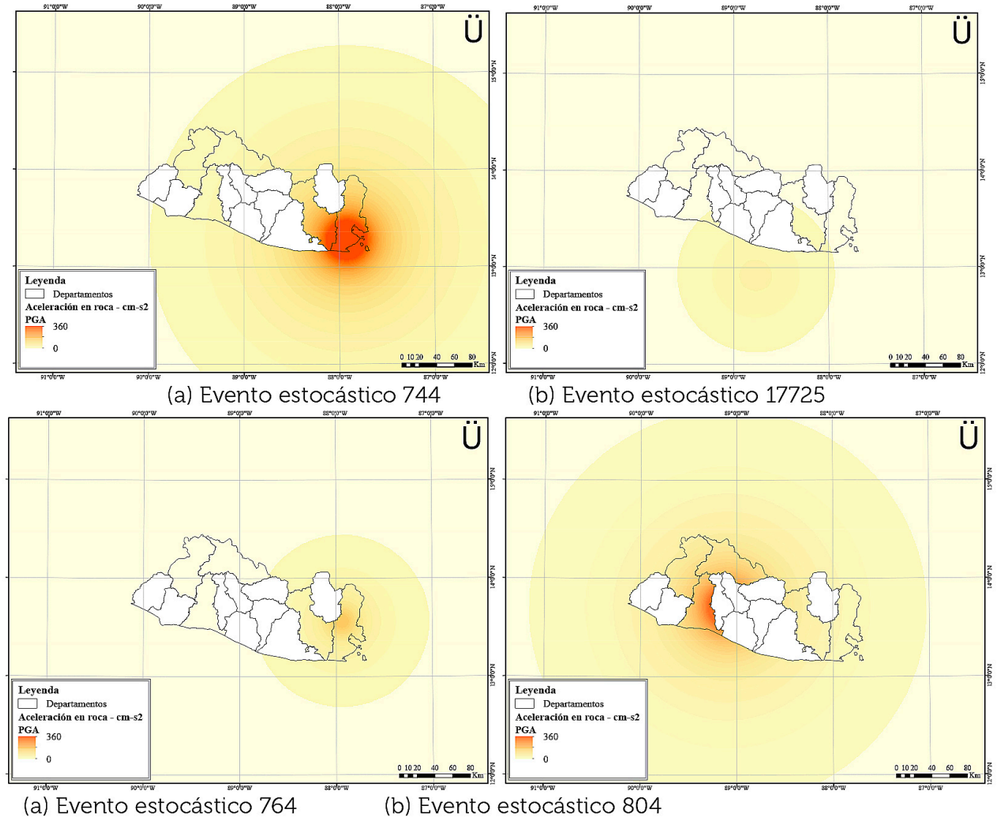


Figura 251. Eventos estocásticos probables derivados del estudio de amenaza sísmica de RESIS II.
Fuente: Ramírez et al. (2018)

En cuanto a la estimación de la respuesta de los depósitos de suelo ante la incidencia de las ondas sísmicas, se construyó un modelo de efectos de sitio que permitió estimar las funciones de amplificación espectral para 8 clases de sitio identificadas y distribuidas por rangos del valor de VS30, teniendo en cuenta propiedades de perfiles estratigráficos típicos encontrados en El Salvador. Estas funciones describen la amplificación en la medida de intensidad sísmica para diferentes períodos estructurales por lo que, al integrar el modelo de efectos de sitio con el modelo de amenaza en roca, es posible conocer en términos probabilistas las aceleraciones esperadas en superficie.

La información de entrada que se empleó para sectorizar las clases de sitio, incluye el modelo digital del terreno del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS 2018) con una resolución de 30 metros y el mapa geológico a nivel nacional, desarrollado por la misión geológica alemana. La Figura 252 muestra la distribución final de las clases de sitio, que fueron sometidas a un análisis de respuesta dinámica del suelo, tomando en cuenta la no-linealidad del mismo y las incertidumbres asociadas a los posibles perfiles estratigráficos que cada clase pueda contener. Esta metodología es similar a la descrita en el Capítulo 4, donde se obtuvieron nuevas funciones de amplificación para todo el país.

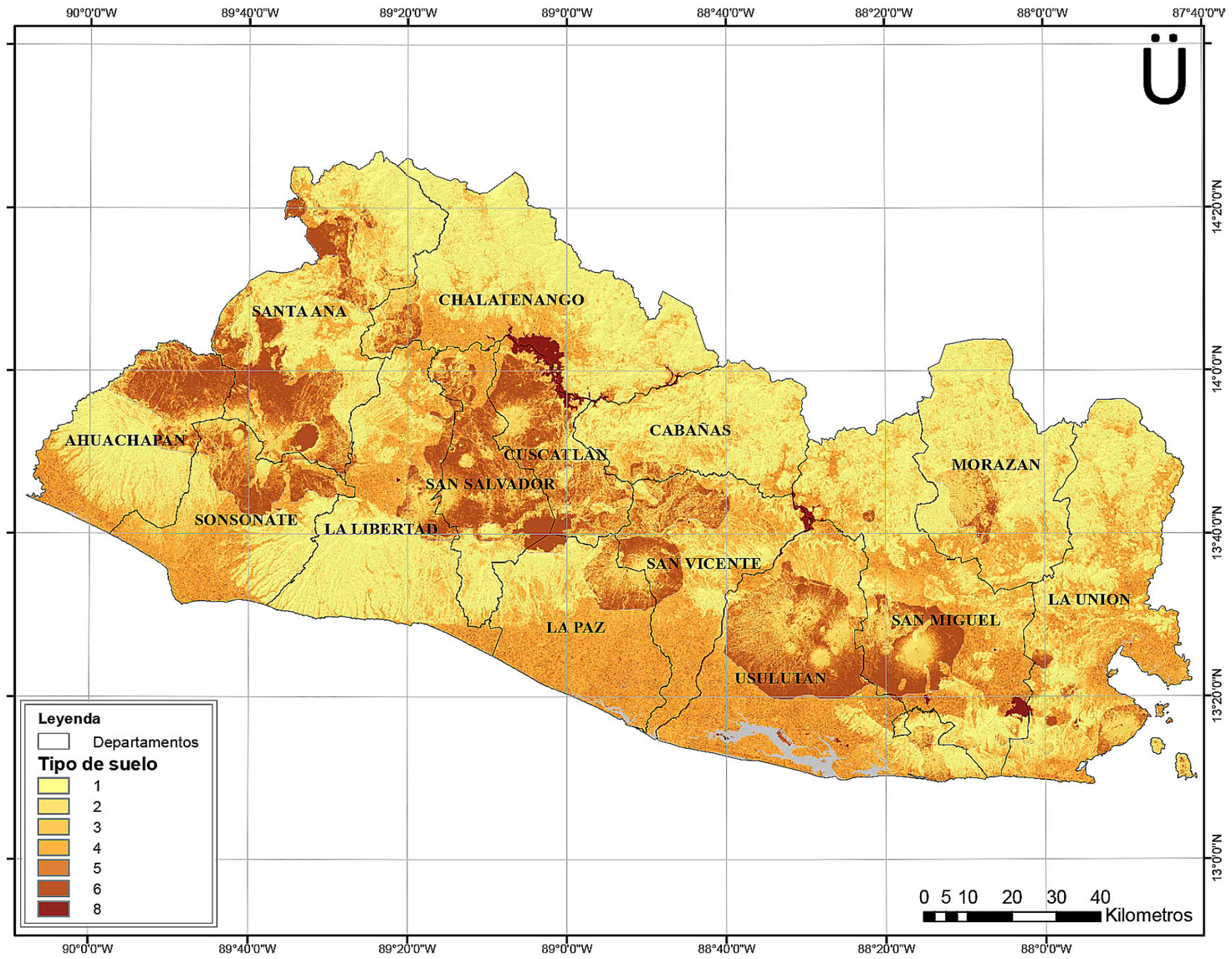


Figura 252. Clases de sitio en el país para la construcción de un modelo de efecto de sitio.
Fuente: Ramírez et al. (2018)

Información de exposición

Se elaboró un modelo de exposición física a nivel nacional del portafolio escolar a través de la recopilación de información de diversas fuentes, tales como la base de centros escolares proporcionada por el Ministerio de Educación, portal del Banco Mundial y levantamientos en campo mediante el apoyo de los directores de las escuelas. Cada componente de este modelo corresponde a una edificación escolar, a la cual se le definió su localización geográfica, valor de reposición mediante avalúos catastrales y presupuestos de construcción, ocupación estudiantil máxima estimada (matrículas) y tipología constructiva que permitió la asignación de una función de vulnerabilidad.

Para asignar estas tipologías constructivas, se empleó el artificio de definición de taxonomías, las cuales se establecieron de acuerdo a información técnica obtenida de cada edificación, considerada a tener mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de las construcciones. Esta información se basó en definir el sistema estructural, rangos de alturas, nivel de diseño sísmico, irregularidad estructural, año de construcción, etc.

La Figura 253 presenta la distribución relativa de las tipologías constructivas con la asignación de su sistema estructural. En la Tabla 39 se muestra la descripción de cada sistema y sus respectivos totales y porcentajes del universo de edificaciones del portafolio escolar. Se obtiene que las mamposterías reforzadas (RM) y confinadas (CM) de baja altura conforman más del 80 % del portafolio, seguido por pórticos de concreto reforzado con problemas de columna corta (RC3) y edificaciones de mampostería con cubierta en marco de acero (SF1).

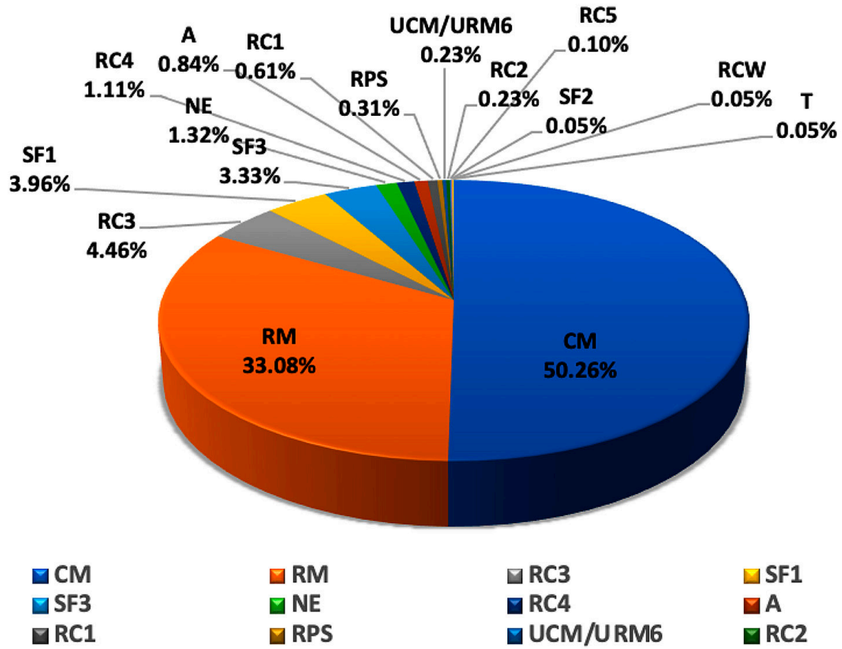


Figura 253. Distribución de sistemas estructurales en la Cartera Educativa de El Salvador.
Se inspeccionaron un total de 16 sistemas distribuidos en 6058 escuelas en el país. Los porcentajes más altos se encuentran en Mampostería Confinada (CM) con 3045 escuelas.
Fuente: Mixco, L. 2018

Tabla 39. Descripción de sistemas y totales de edificaciones del portafolio escolar

Sistema estructural	Descripción	Número de escuelas	Porcentaje (%)
CM	Mampostería confinada de ladrillos de arcilla cocida y columnas de amarre RC para confinamiento	3045	50.10 %
RM	Mampostería reforzada con bloques huecos de concreto con refuerzo de acero integral	2004	32.97 %
RC3	RC1 en una dirección + RC2 en otra dirección	270	4.44 %
SF1	Estructura de acero resistente a momento con RM, CM o elementos prefabricados como rellenos	240	3.95 %
SF3	Estructura de acero resistente a momento con láminas prefabricadas, de concreto o de metal y malla de alambre como relleno	202	3.32 %
NE	Precario	80	1.32 %
RC4	Marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería con juntas sísmicas	67	1.10 %
A	Adobe	51	0.84 %
RC1	Marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería sin juntas sísmicas. La columna corta no existe	37	0.61 %
RPS	Sistemas prefabricados de concreto reforzado	19	0.31 %
UCM/URM6	Mampostería no confinada/no reforzada	14	0.23 %
RC2	Marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería sin juntas sísmicas. La columna corta existe	14	0.23 %
RC5	RC1 en una dirección + RC4 en otra dirección	6	0.10 %
SF2	Estructura de acero arriostrada con RM, CM o elementos prefabricados como relleno	3	0.05 %
RCW	Muros de concreto reforzado	3	0.05 %
T	Marcos de madera	3	0.05 %

Fuente: Elaboración propia con datos de MARN.

En la Figura 254 se muestra la distribución porcentual, por departamentos, de edificaciones educativas construidas en diferentes rangos de fechas asociadas a versiones de normas de construcción sismorresistente del país. Se concluye que en todos los departamentos se presenta un porcentaje dominante (40 % en promedio) de edificaciones construidas en los últimos 20 años.

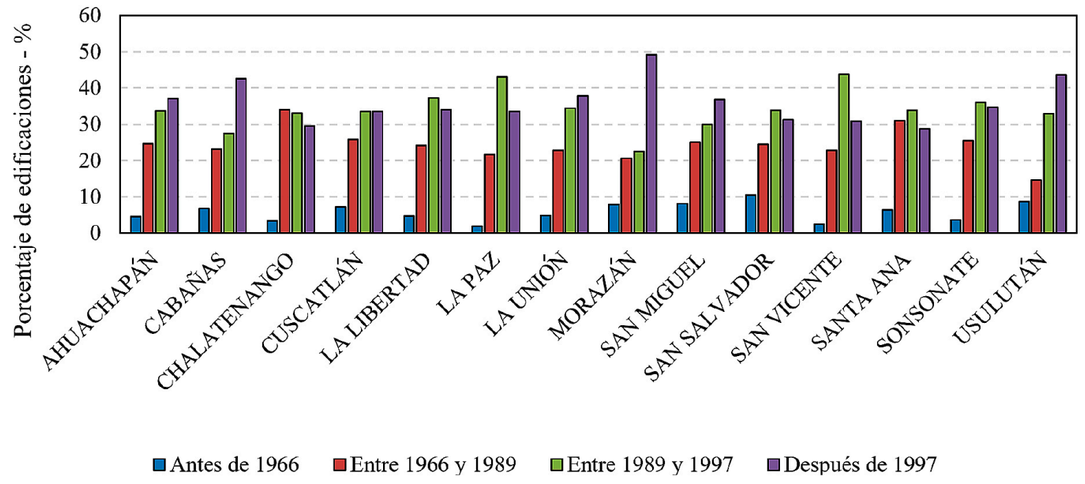


Figura 254. Distribución de años de construcción por departamento.
Fuente:

Vulnerabilidad sísmica

Se definieron edificaciones arquetipo con base al supuesto que su comportamiento no lineal representa el comportamiento esperado para grupos de edificaciones de características similares. En la Figura 255 se muestran estas edificaciones, a las cuales se les generaron funciones de vulnerabilidad, tomando como insumo la taxonomía e información de demanda sísmica particular del país (ver Figura 256).



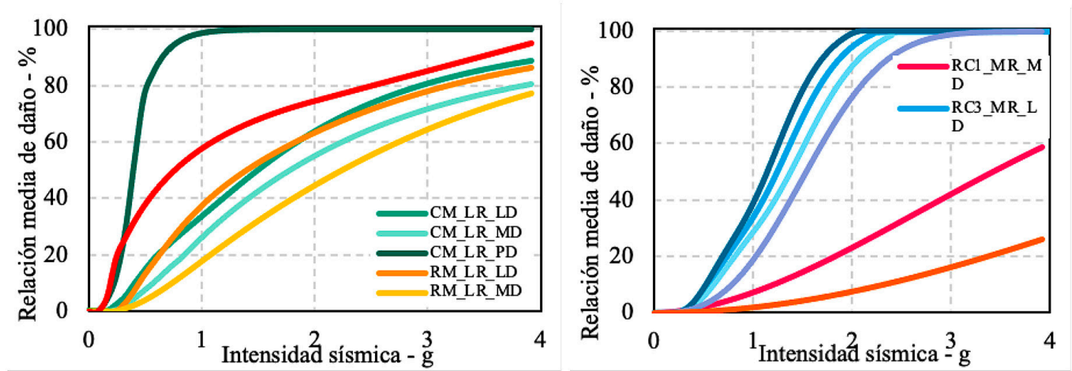
(a) Mampostería confinada de baja altura CM_LR

(b) Mampostería reforzada de baja altura CM_LR

(c) Pórticos de concreto reforzado con columna corta de media altura RC3_MR

(d) Mampostería confinada/reforzada con pórticos de acero para la cubierta de baja altura SF1_LR

Figura 255. Fotografías de tipologías estructurales de portafolio de educación.
Fuente: Ramírez et al. (2018).



(a) De mampostería (b) De concreto reforzado

Figura 256. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones.
Fuente: Ramírez et al. (2018).

Modelo de riesgo sísmico

La evaluación probabilista del riesgo se llevó a cabo utilizando la plataforma CAPRA-GIS, donde se conformó un modelo que concatenaba la información de la amenaza sísmica, efectos de sitios, modelo de exposición y las funciones de vulnerabilidad anteriormente descritos. Cabe mencionar que únicamente se centró la modelación sobre los centros educativos del sector público. En resumen, la situación del riesgo sísmico del portafolio escolar público fue la siguiente:

- Número total estimado de centros escolares: 5,178
- Número total de edificaciones escolares: 14,459
- Área total construida aproximada: 2.84 millones de m^2
- Valor total de reposición: $1,277 millones
- Pérdida anual esperada, AAL: $9.5 millones (7.40 % del valor de reposición total). Calculada a partir de la suma del producto entre la pérdida esperada de cada evento estocástico por su frecuencia anual de ocurrencia.

- Pérdida máxima probable, PMP para 1,000 años de período de retorno: $164 millones (13 %).

La Tabla 40 resume los resultados generales de valor expuesto total y pérdida anual esperada. La Figura 257 resume las pérdidas máximas probables para diferentes períodos de retorno. Los resultados se presentan en millones de dólares y como porcentaje del valor total expuesto.

Tabla 40. Resultados del riesgo sísmico para el portafolio

Valor expuesto	**$ Millones**	$1,276
AAL	**$ Millones**	$9.45
AAL al millar	**‰**	7.40
Pérdida máxima probable		
Periodo de retorno	**Pérdida (Millones $)**	**Pérdida (%)**
31	43	3%
225	110	9%
475	138	11%
1,000	164	13%
2,000	196	15%

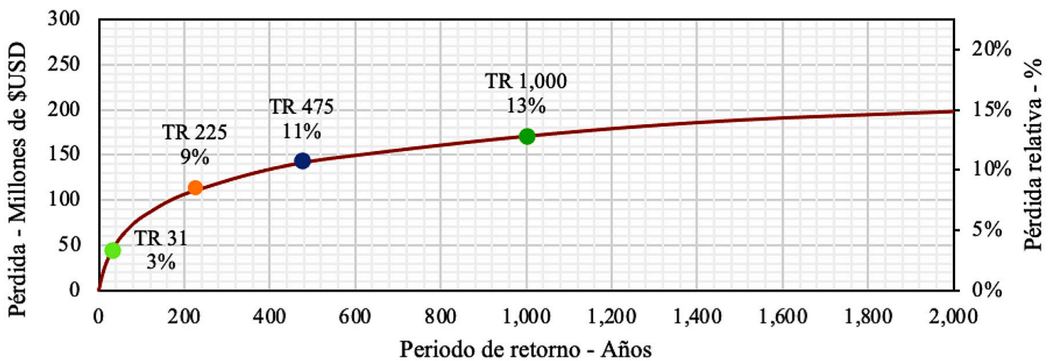


Figura 257. Curva de pérdida máxima probable para el portafolio escolar
Fuente: Ramírez et al. (2018)

En la Figura 258 se representan las Pérdidas Anuales Esperadas (AAL) para cada una de las tipologías constructivas de la zona de estudio. En esta Figura se evidencia que las edificaciones que más contribuyen al riesgo son las edificaciones en adobe (A) y las edificaciones de madera (T), seguido por las edificaciones precarias (NE) y de mampostería no reforzada (UCM/URM6), lo cual se ve representado en las altas pérdidas relativas respecto a las demás tipologías.

De igual manera, se muestra que las edificaciones de mampostería confinada (CM), mampostería reforzada (RM), mampostería confinada/reforzada con pórticos de acero para la cubierta de baja altura (SF1) y pórticos de concreto reforzado con problemas de columna corta (RC3) presentan los mayores valores de pérdidas esperadas en términos absolutos.

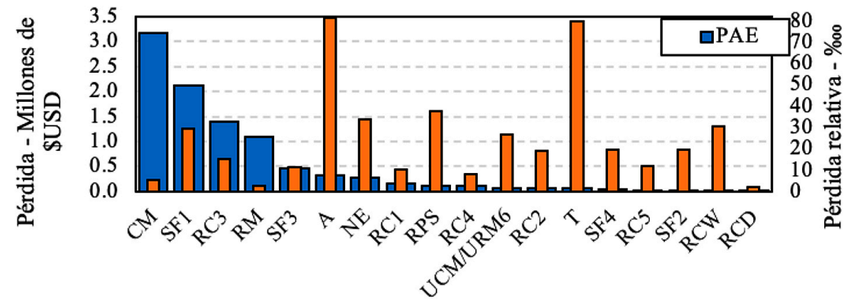


Figura 258. Pérdida Anual Esperada (AAL) por tipologías constructivas.
Fuente: Ramírez et al. (2018)

Por otra parte, la Figura 259 muestra la distribución espacial del riesgo por unidades geográficas. Se observa que el departamento de San Salvador presenta las pérdidas económicas más elevadas, tanto en términos absolutos como relativos, seguido por el departamento de San Miguel. Esta concentración del riesgo se explica no solo por la importancia estratégica de estas regiones, sino también por la alta densidad de población y el valor económico de los activos expuestos en dichas zonas.

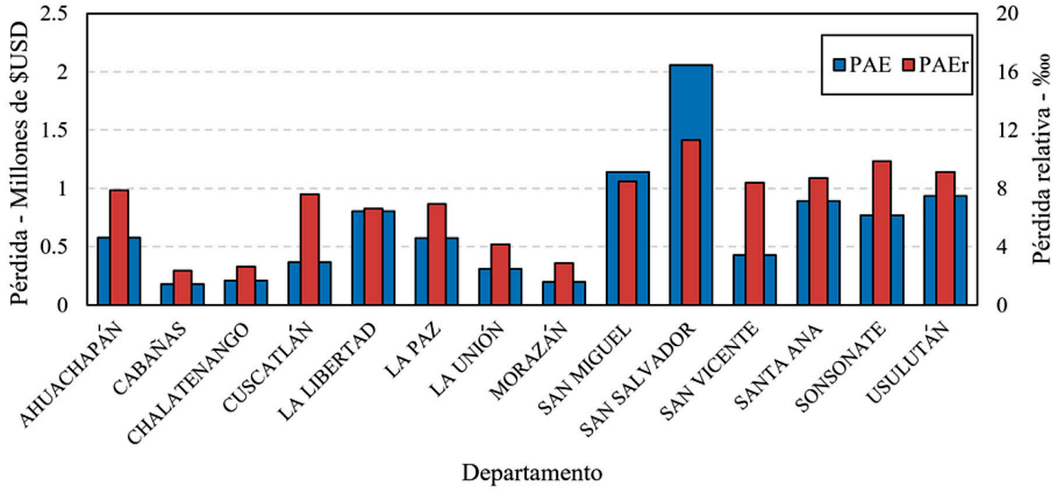


Figura 259. Pérdida anual esperada (AAL) por departamentos.
Fuente: Ramírez et al. (2018)

Modelación de riesgo sísmico con propuestas de reforzamiento en tipologías predominantes

Se evaluaron las variaciones en las pérdidas anuales esperadas para las tipologías constructivas predominantes, con base en lo cual se calcularon las relaciones beneficio-costo de dichas medidas de intervención en los grupos de estructuras de concreto reforzado y de mampostería. En la Tabla 41 se muestran las propuestas de reforzamiento, derivadas de valores con mayor relación beneficio-costo.

Tabla 41. Reforzamiento recomendado a partir de mayores relaciones beneficio-costo

Tipología	Tipo de reforzamiento recomendado
RC3_PD	Muros de concreto + Dilatación de muros divisorios + Refuerzos complementarios
RC3_LD	Marcos de acero arriostrados + Dilatación de muros divisorios
RC3_MD	
CM_PD	Reforzamiento de muros de mampostería mediante platinas + Arriostramiento de cubierta
RM_PD	Reforzamiento de muros de mampostería mediante platinas + Viga perimetral rígida en cubierta
CM_LD	Marcos de acero arriostrados en cubierta para la mampostería confinada
CM_MD	
RM_LD	Viga perimetral rígida para la mampostería reforzada

Fuente: Ramírez et al. (2018)

Seguidamente se evaluó de nuevo el riesgo sísmico en las condiciones del portafolio luego de someterse a un proceso integral de reforzamiento, de acuerdo con las recomendaciones seleccionadas.

Para los sistemas estructurales con alta vulnerabilidad sísmica —como las edificaciones de adobe (A), mampostería simple (URM), mampostería confinada/reforzada con cubiertas ligeras (SF1) y otras estructuras precarias (NE)— se asumió su reemplazo por sistemas convencionales de mampostería reforzada o confinada, diseñados conforme a la normativa sismorresistente vigente. En contraste, para las tipologías de concreto reforzado incluidas en el portafolio, cuya vulnerabilidad es muy baja, no se consideraron intervenciones.

La Tabla 42 presenta un resumen comparativo del valor expuesto total y la pérdida anual esperada del portafolio, tanto en su estado actual como en el escenario con intervenciones de reforzamiento. Los resultados se expresan en millones de dólares y como porcentaje del valor total expuesto.

Asimismo, la Figura 260 presenta las curvas de Pérdidas Máximas Probables (PML) bajo ambas condiciones. Los resultados evidencian que la implementación del plan de reforzamiento integral permitiría reducir en aproximadamente un 7 % la pérdida máxima probable para un período de retorno de 1,000 años, disminuyendo de $164.90 millones a $72.44 millones.

Tabla 42. Resultados del riesgo sísmico para el portafolio actual vs. el portafolio reforzado

		Original		Reforzada
Valor expuesto	**$ Millones**	$1,276	**$ Millones**	$1,276
PAE	**$ Millones**	$9.45	**$ Millones**	$3.10
PAE al millar	**‰**	7.40	**‰**	2.43
Máxima pérdida probable				
Periodo de retorno	**Pérdida ($ Millones)**	**Pérdida (%)**	**Pérdida ($ Millones)**	**Pérdida (%)**
31	43	3%	15	1%
225	110	9%	43	3%
475	138	11%	57	4%
1,000	164	13%	72	6%
2,000	196	15%	88	7%

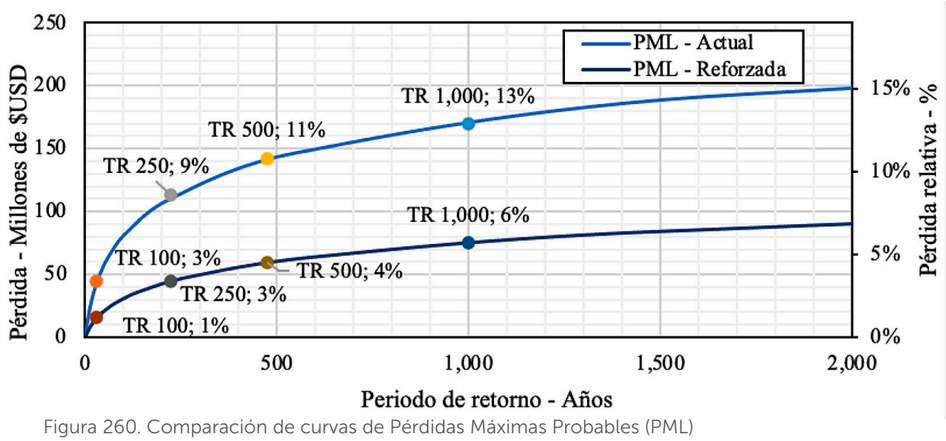


Figura 260. Comparación de curvas de Pérdidas Máximas Probables (PML)
Fuente: Ramírez et al. (2018)

Planteamiento de bases técnicas para un plan de reducción del riesgo sísmico
Finalmente, a partir de la evaluación del riesgo sísmico y del análisis del impacto potencial de diversas estrategias de reforzamiento, se formuló una estrategia integral, práctica y orientada a la reducción del riesgo en la infraestructura educativa del sector público en El Salvador. Esta estrategia se diseñó con base en tres objetivos y prioridades específicas:

- Reducir el riesgo de muerte o lesiones a la comunidad educativa por eventos sísmicos (maximizando el número de estudiantes beneficiados).
- Reducir los daños a la infraestructura, contenidos, instalaciones y proteger la propiedad.
- Reducir la eventual interrupción de los servicios educativos.

7.2.2 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para El Salvador

Los escenarios sísmicos presentan las posibles consecuencias que podría tener un terremoto específico en una región dada. Su utilidad radica en la capacidad de comunicar de manera clara y comprensible información relevante para diversos públicos.

Dentro de los resultados de riesgo ante un escenario sísmico se incluyen mapas de las áreas más afectadas dentro de la región, así como el número y la distribución espacial de las edificaciones destruidas, las víctimas (muertes o heridos) y las pérdidas económicas asociadas. Esta representación detallada facilita la identificación de debilidades y fortalezas en el sistema de atención a emergencias, lo que a su vez contribuye a mejorar la preparación y la capacidad de recuperación ante eventos sísmicos futuros.

Las consecuencias de los eventos sísmicos pueden variar significativamente según diversas características de la ruptura del terremoto, como su magnitud, profundidad hipocentral y la distancia con respecto a la población expuesta. En esta ocasión, la selección de escenarios se limita a cuatro eventos históricos detallados en la Sección 6.6, que comprenden los sismos ocurridos el 10 de octubre de 1986, en enero y febrero de 2001, y el 15 de enero de 2023, como se presenta en la Tabla 43. Estos eventos, aunque representativos, constituyen apenas una pequeña muestra de los numerosos sismos que han impactado al país a lo largo del tiempo.

Es importante señalar que existen otros eventos históricos de relevancia significativa que deberían ser considerados en estudios futuros, así como la evaluación de eventos hipotéticos que podrían afectar diversas zonas del país. Estos últimos pueden ser seleccionados mediante la identificación de combinaciones específicas de distancia, magnitud y fuentes sismogénicas que contribuyan de manera significativa a la amenaza sísmica en regiones específicas. Una selección más exhaustiva de escenarios históricos e hipotéticos para el país forma parte de las actividades futuras a implementarse.

Tabla 43. Lista de eventos históricos utilizados para estimar el riesgo por escenarios y sus correspondientes características sísmicas

Fecha	Nombre: descripción	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Región tectónica
10 de octubre de 1986	San Salvador	5.7	8.0	Corteza superficial activa
13 de enero de 2001	Frente a costa de Usulután	7.7	56	Subducción intraplaca
13 de febrero de 2001	San Vicente	6.6	7.6	Corteza superficial activa
15 de enero de 2023	Ahuachapán	5.1	6.0	Corteza superficial activa

Fuente: Mixco et al. (2025)

• Metodología y suposiciones para el análisis de escenarios sísmicos

La modelación del riesgo por escenarios se realizó usando la calculadora de escenarios del software OpenQuake Engine desarrollado por la Fundación GEM (Pagani et al. 2014, Silva et al., 2014). Para calcular los daños ante un escenario, OpenQuake requiere información relacionada con la ruptura sísmica, el modelo de sitio que incluye las características del suelo, el modelo de exposición y los modelos de fragilidad y consecuencia. Al combinar estos modelos, es posible obtener estadísticas del impacto, como distribución de daños para las edificaciones y la afectación de la población presentes en el modelo de exposición, estadísticas de distribución del impacto agregadas por tipología constructiva, estadísticas de distribución del impacto agregados por región, y mapas de riesgo que contienen la distribución espacial del impacto en toda la región de interés.

Las características de la ruptura, es decir, la magnitud, el hipocentro y la geometría de la falla, se modelan de manera determinística en OpenQuake. Luego, se generan múltiples simulaciones del campo de movimiento del terreno, teniendo en cuenta la variabilidad en los modelos del movimiento del suelo o modelos de atenuación (también conocidos como GMPEs por su nombre en inglés, Ground Motion Models), como se presenta en el Capítulo 4. En el caso de modelar eventos históricos, es posible incluir información registrada durante el evento y condicionar los campos de movimiento con el fin de reducir la variabilidad en los puntos cercanos a las observaciones. Para mayor información sobre la generación de campos de movimiento del terreno en OpenQuake, es posible acceder a la documentación del software en https://docs.openquake.org/oq-engine/master/manual

Posteriormente, para cada campo de movimiento del terreno simulado, se estima el estado de daño para cada edificio presente en el modelo de exposición, y utilizando el modelo de fragilidad se calcula la distribución media de daños. Utilizando los modelos de consecuencia es posible estimar el impacto en la población y las pérdidas económicas asociadas. Dentro de la modelación del riesgo propuesta se partió de las siguientes suposiciones:

- Hora del evento: dependiendo de la hora en la cual ocurre el escenario se obtendrán diferentes métricas de afectación a la población. La ocupación de las edificaciones se modeló considerando tres posibles períodos de ocupación: día, noche y viajes (tránsito), ver detalles adicionales en la sección 5.5.1. Para la modelación de los escenarios históricos, se utilizó la hora en la cual el evento sucedió.
- Consecuencias directas: el análisis de riesgo realizado se enfoca en impacto directo debido a la agitación del terreno. El impacto debido a fenómenos secundarios que pueden ocurrir durante un evento sísmico, como el deslizamiento de taludes o licuefacción de los suelos, no están incluidas en los resultados presentados. Las pérdidas económicas indirectas como las pérdidas económicas a causa de la clausura de comercios, manufacturas, servicios educativos y de salud tampoco están incluidas.
- Colapsos: es el número de estructuras que colapsan como consecuencia de la agitación del terreno simulada de acuerdo con los modelos de fragilidad. Esta métrica de colapsos es un subconjunto específico dentro de la categoría de edificaciones que alcanzaron un estado de daño completo. En los resultados se presenta también el índice de colapsos. Este índice representa el porcentaje de todos los edificios expuestos que colapsaron en el país debido al evento. A nivel de municipio, el índice representa el porcentaje de edificios expuestos en el municipio que colapsaron debido al evento.
- Desplazados o damnificados: es el número de ocupantes cuya residencia resultó en estado de daño extenso o completo debido a la agitación del terreno. En ambos estados de daño se asume que la residencia no es habitable temporal o permanentemente. Por consiguiente, por decisión propia o bajo indicaciones de la autoridad competente, los ocupantes requieren de un refugio temporal.
- Heridos de gravedad: es el número de ocupantes heridos debido al desprendimiento de componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones. Incluye solo las personas que requieren de atención médica urgente debido a heridas de gravedad que ponen en peligro la vida humana.
- Fatalidades: es el número de ocupantes que perdieron la vida debido al desprendimiento de los componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones.

- Pérdidas económicas: es el costo de reparar los elementos estructurales, no estructurales y contenidos para todos los niveles de daño directo causado por el sismo. Las pérdidas consideran que las estructuras deben repararse o reconstruirse siguiendo los lineamientos vigentes de sismo resistencia. Por ejemplo, si una estructura de mampostería sin refuerzo colapsa, el costo de reemplazarla considera que debe ser de mampostería reforzada.

- Perfiles de riesgo para preparación y respuesta ante emergencias

Con el fin de presentar los resultados de riesgo de forma clara y concisa, se utilizan infografías, en adelante llamadas perfiles de riesgo para preparación y respuesta ante emergencias, los cuales resumen en una página las métricas de riesgo más representativas, considerando todas las simulaciones y reportando la variabilidad a través de histogramas. Estos perfiles se construyeron partiendo de los resultados generados en el proyecto TREQ . Se seleccionaron las métricas de riesgo más relevantes para la preparación y respuesta ante emergencias.

El perfil de preparación y respuesta tiene cuatro elementos principales:

- El inventario nacional expuesto: se ubica en el panel superior e incluye la información general sobre el evento sísmico (nombre, fecha, magnitud, profundidad y fuente sísmica de origen) y se resume el modelo de exposición en términos de edificaciones, población y valor económico expuesto, brindando información sobre el total de habitantes, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto (ver Figura 261).
- Mapa de edificaciones colapsadas: un mapa que muestra el mapa de colapsos en la zona de afectación a través de teselas (hexágonos) de 2.5 km de resolución, donde los colores más rojos indican las zonas más vulnerables. Esta métrica considera la fragilidad física de las estructuras, las características del suelo y las características de la ruptura modelada (ver Figura 262). Es importante aclarar que cada tesela representa el resultado del cálculo agregado de la cantidad de activos afectados de manera directa por un sismo específico, con daños atribuibles a colapsos. Esta cantidad corresponde a la suma de todos los activos que se encuentran o se incluyen dentro de la geometría de la tesela; sin embargo, esto no implica que la suma indicada refleje un colapso total de la integridad estructural de un edificio completo.
- Resumen de métricas del evento: se presentan las métricas de riesgo generado por el evento, tanto en una tabla con los distritos más afectados (en la parte inferior del perfil), como también el impacto total en el territorio nacional (en la parte derecha del perfil). Los valores se agrupan en rangos de población expuesta y edificaciones que registraron cierta afectación de acuerdo a los estados de daño ligero, moderado, extenso y completo a partir de las simulaciones realizadas, asociados a una clasificación por banderas. Igualmente, se incluyen otras métricas de riesgo relevante en rangos, tales como colapsos estructurales, fatalidades, heridos de gravedad, el damnificados y pérdidas económicas (ver Figura 263 y Figura 264 de tablas de afectación a nivel distrital y nacional, respectivamente).
- Mensaje de descargo de responsabilidad: Un descargo de responsabilidad es una declaración que limita el compromiso de quien lo emite, aclarando el propósito y las limitaciones del contenido presentado. En este caso, el descargo de responsabilidad se ubicará en el fondo del perfil (ver en el inferior de figuras de los perfiles mostrados a continuación) y manifestará lo siguiente: “Este perfil evalúa el impacto sísmico del país con un enfoque determinístico para guiar políticas de preparación y respuesta ante emergencias derivadas de un escenario sísmico. No es una normativa para construcción, planificación urbana o uso del suelo, ni reemplaza la zonificación sísmica, regulaciones de construcción o el plan de ordenamiento territorial vigente del país. Las suposiciones y limitaciones de los resultados de riesgo presentadas están disponibles en el reporte INERV 2024”.



Figura 261. Ejemplo del panel superior del perfil, con las características principales de la ruptura del evento sísmico, el número de estructuras, los ocupantes y el valor económico expuesto del país.
Fuente: Mixco et al. (2025)

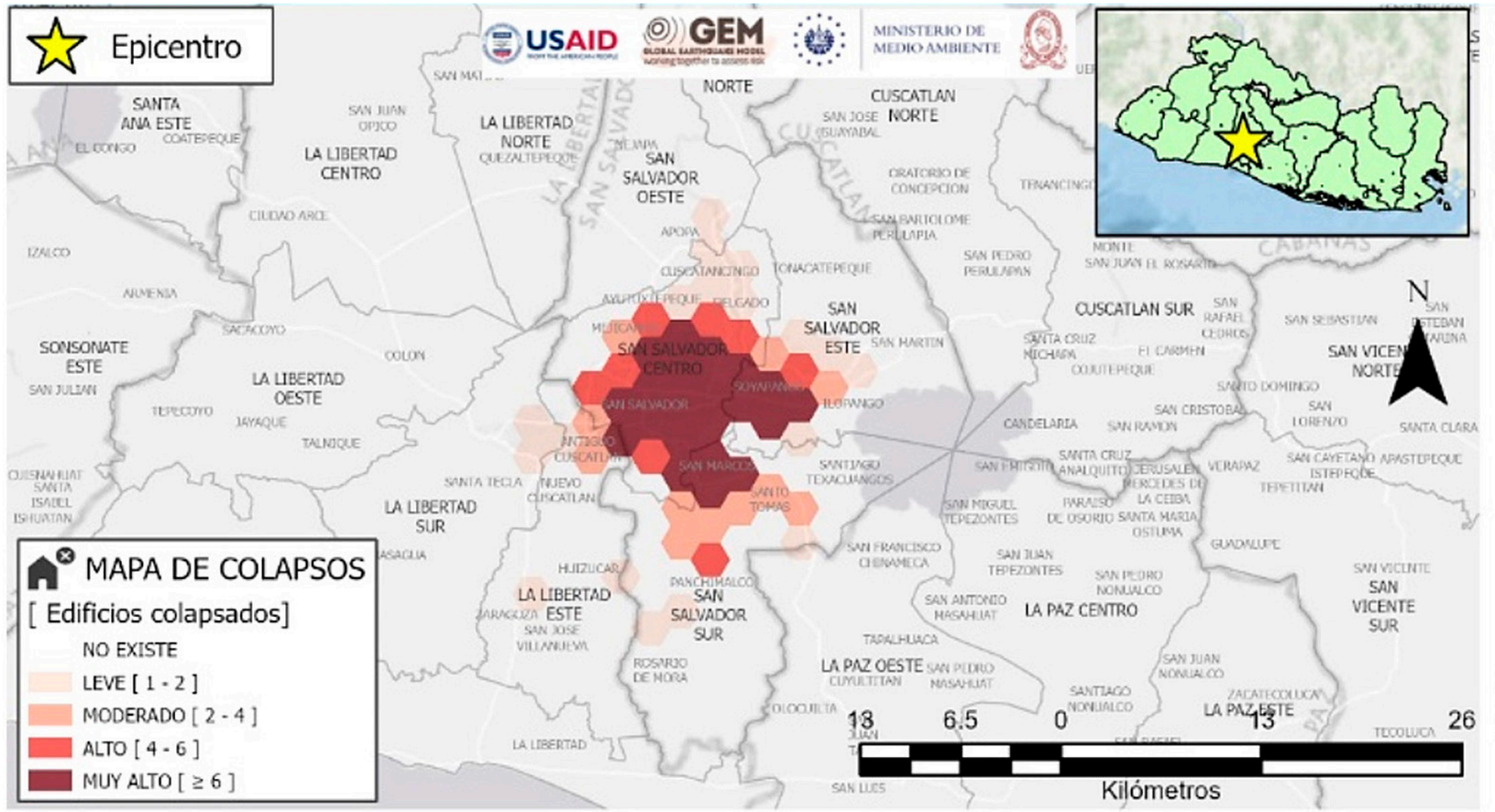


Figura 262. Ejemplo del mapa de edificaciones colapsadas, resaltando las comunidades más vulnerables.
Fuente: Mixco et al. (2025)

AFECTACIÓN EN DISTRITOS CON MAYOR RIESGO SÍSMICO

Distritos	Daño Leve	Daño Moderado	Daño Extenso	Daño Completo	Colapsos	Damnificados	Heridos	Fallecidos	Pérdidas económicas (mill. USD)
SAN SALVADOR	23,290 - 23,730	8,260 - 10,200	3,420 - 5,340	4,090 - 12,940	271 - 880	25,300 - 59,920	1,354 - 3,590	350 - 982	1,213 - 2,465
SOYAPANGO	10,080 - 11,620	2,010 - 3,030	720 - 1,260	780 - 2,414	51 - 160	8,230 - 19,530	320 - 845	53 - 167	201 - 410
MEJICANOS	5,080 - 5,470	1,400 - 1,780	490 - 820	510 - 1,687	42 - 135	6,310 - 17,270	94 - 330	31 - 112	70 - 165
SAN MARCOS	3,850 - 4,350	1,050 - 1,700	350 - 730	420 - 1,730	32 - 125	3,510 - 11,740	50 - 235	16 - 72	42 - 125
DELGADO	4,980 - 5,980	870 - 1,500	330 - 620	370 - 1,269	31 - 100	6,520 - 17,090	111 - 335	37 - 117	44 - 95
PANCHIMALCO	3,390 - 3,650	670 - 1,180	200 - 480	220 - 1,137	19 - 95	1,820 - 5,660	24 - 90	10 - 34	17 - 45
CUSCATANCINGO	2,060 - 2,570	390 - 610	150 - 260	160 - 573	13 - 45	1,160 - 3,050	20 - 65	6 - 23	19 - 40
ILOPANGO	2,800 - 4,090	370 - 870	100 - 340	70 - 571	5 - 35	1,490 - 5,930	42 - 215	8 - 45	40 - 110

Figura 263. Resumen de métricas de riesgo a nivel distrital.
Fuente: Mixco et al. (2025)

IMPACTO TOTAL EN EL TERRITORIO NACIONAL

Damnificados (Miles)
31 - 107

Heridos (Miles)
1 - 4

Fallecidos
248 - 1,080

Pérdidas económicas (Millones USD)
1,129 - 2,842

Daño Leve (Miles)
71.0 - 108.5 **Edificaciones**

Daño Moderado (Miles)
14.3 - 22.9 **Edificaciones**

Daño Extenso (Miles)
4.1 - 9.2 **Edificaciones**

Daño Completo (Miles)
3.1 - 15.3 **Edificaciones**

Colapsos
228 - 1,100 **Edificaciones**

Figura 264. Resumen de métricas de riesgo a nivel nacional.
Fuente: Mixco et al. (2025)

De la Figura 265 a la 268 se mostrarán los perfiles de riesgo determinístico elaborados para los 4 eventos sísmicos mostrados en la Tabla 43.

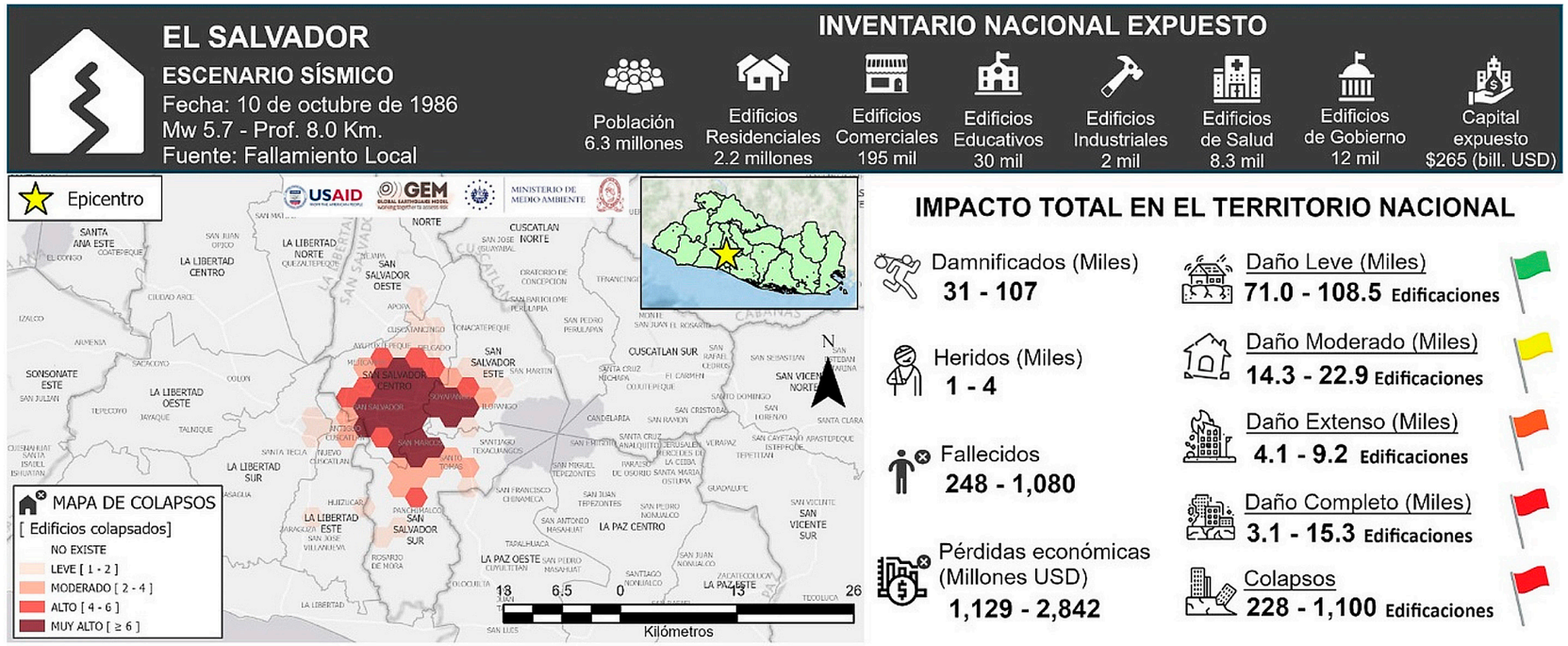
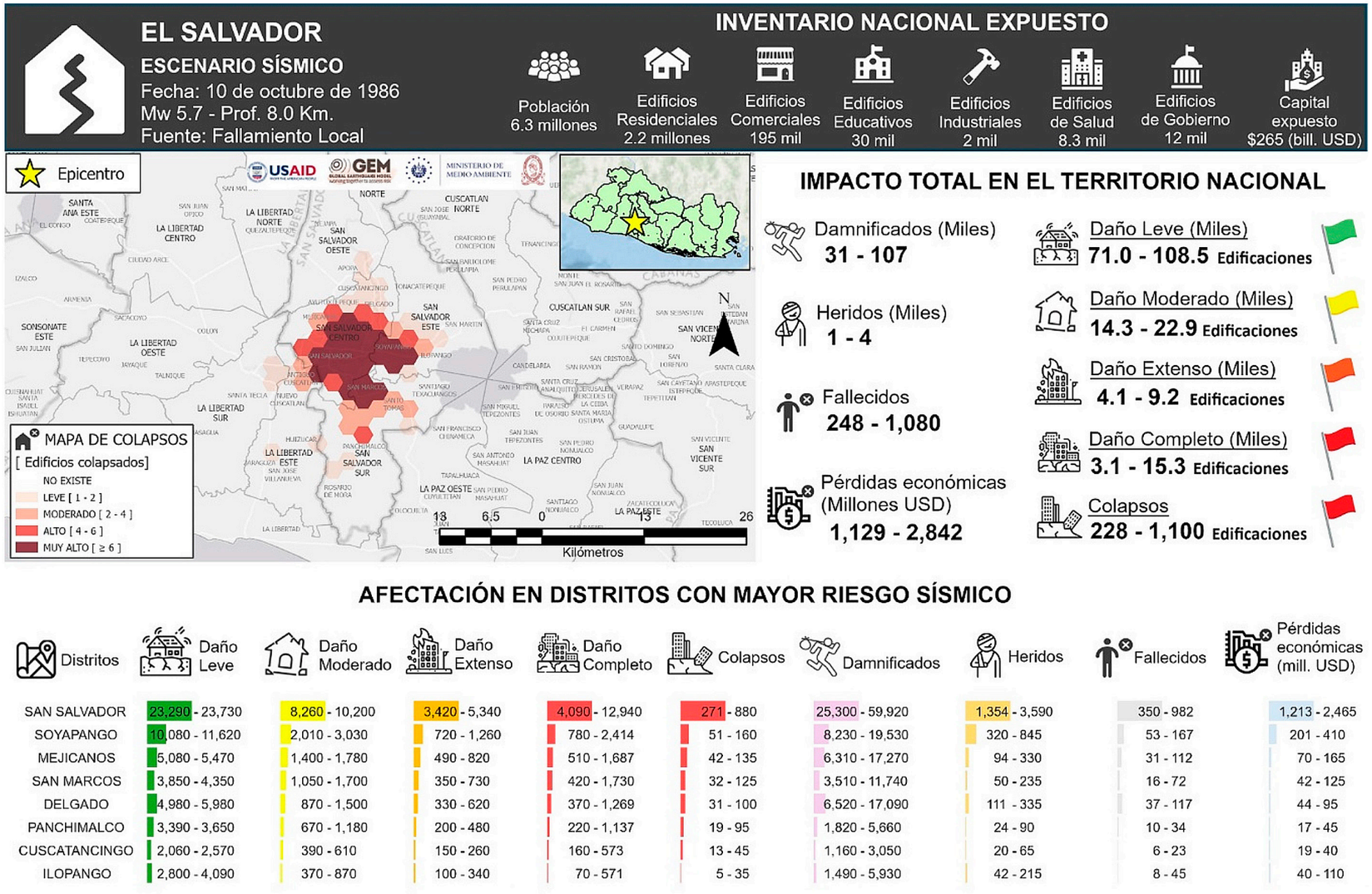


Figura 265. Perfil de respuesta sobre riesgo determinístico para el escenario sísmico local acontecido el 10 de octubre de 1986.
Nota: Los resultados se han obtenido sobre la base del modelo de exposición nacional conformado en este trabajo reciente.
Fuente: Mixco et al. (2025)

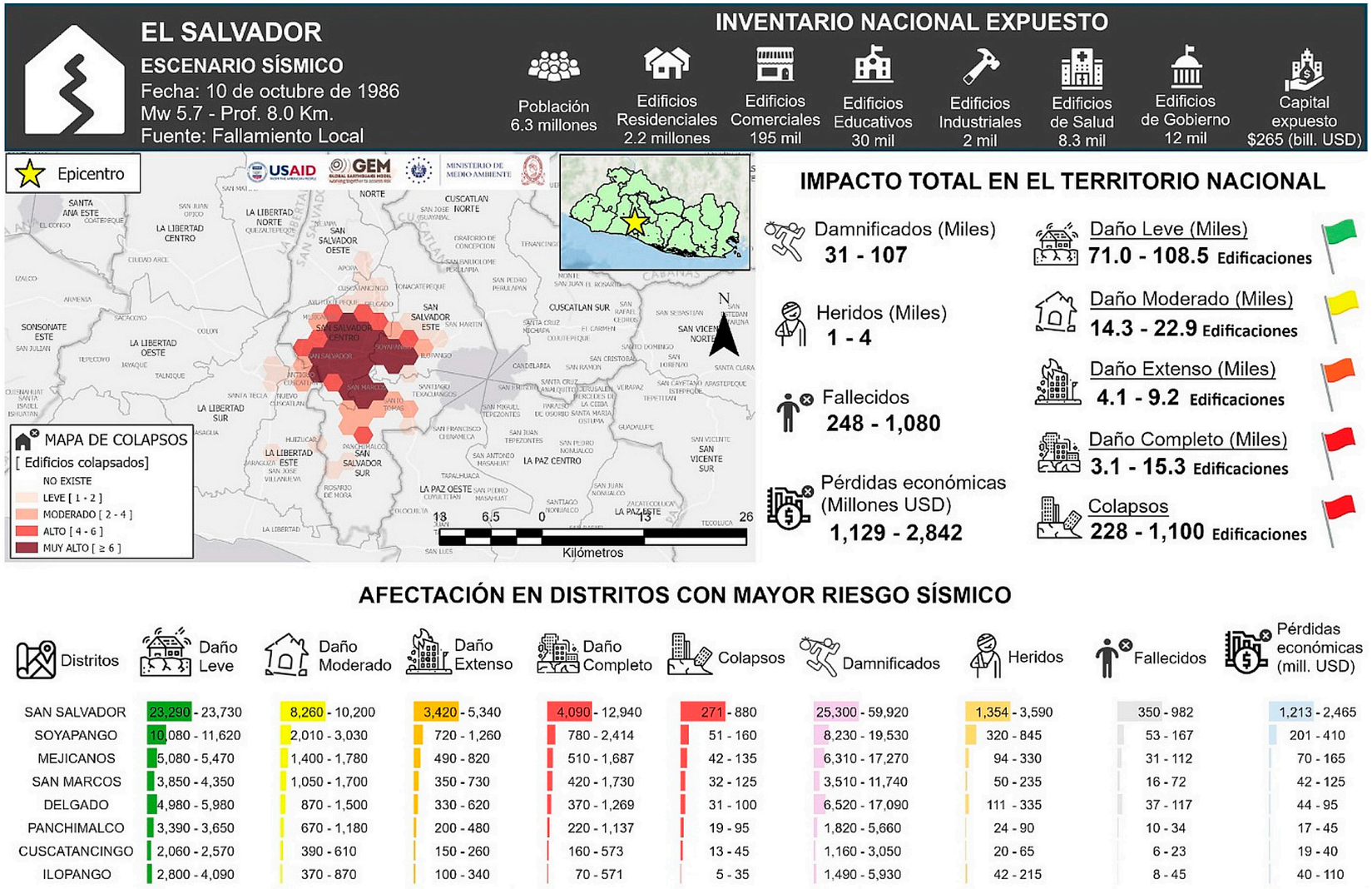


AFECTACIÓN EN DISTRITOS CON MAYOR RIESGO SÍSMICO

Distritos	Daño Leve	Daño Moderado	Daño Extenso	Daño Completo	Colapsos	Damnificados	Heridos	Fallecidos	Pérdidas económicas (mill. USD)
SAN SALVADOR	23,290 - 23,730	8,260 - 10,200	3,420 - 5,340	4,090 - 12,940	271 - 880	25,300 - 59,920	1,354 - 3,590	350 - 982	1,213 - 2,465
SOYAPANGO	10,080 - 11,620	2,010 - 3,030	720 - 1,260	780 - 2,414	51 - 160	8,230 - 19,530	320 - 845	53 - 167	201 - 410
MEJICANOS	5,080 - 5,470	1,400 - 1,780	490 - 820	510 - 1,687	42 - 135	6,310 - 17,270	94 - 330	31 - 112	70 - 165
SAN MARCOS	3,850 - 4,350	1,050 - 1,700	350 - 730	420 - 1,730	32 - 125	3,510 - 11,740	50 - 235	16 - 72	42 - 125
DELGADO	4,980 - 5,980	870 - 1,500	330 - 620	370 - 1,269	31 - 100	6,520 - 17,090	111 - 335	37 - 117	44 - 95
PANCHIMALCO	3,390 - 3,650	670 - 1,180	200 - 480	220 - 1,137	19 - 95	1,820 - 5,660	24 - 90	10 - 34	17 - 45
CUSCATANCINGO	2,060 - 2,570	390 - 610	150 - 260	160 - 573	13 - 45	1,160 - 3,050	20 - 65	6 - 23	19 - 40
ILOPANGO	2,800 - 4,090	370 - 870	100 - 340	70 - 571	5 - 35	1,490 - 5,930	42 - 215	8 - 45	40 - 110

Este perfil evalúa el impacto sísmico del país con un enfoque determinístico para guiar políticas de preparación y respuesta ante emergencias derivadas de un escenario sísmico. No es una normativa para construcción, planificación urbana o uso del suelo, ni reemplaza la zonificación sísmica, regulaciones de construcción o el plan de ordenamiento territorial vigente del país. Las suposiciones y limitaciones de los resultados de riesgo presentadas están disponibles en el reporte INERV 2024.

Figura 266. Perfil de respuesta sobre riesgo determinístico para el escenario sísmico de subducción acontecido el 13 de enero de 2001.
Nota: Los resultados se han obtenido sobre la base del modelo de exposición nacional conformado en este trabajo reciente.
Fuente: Mixco et al. (2025)



AFECTACIÓN EN DISTRITOS CON MAYOR RIESGO SÍSMICO

Distritos	Daño Leve	Daño Moderado	Daño Extenso	Daño Completo	Colapsos	Damnificados	Heridos	Fallecidos	Pérdidas económicas (mill. USD)
SAN SALVADOR	23,290 - 23,730	8,260 - 10,200	3,420 - 5,340	4,090 - 12,940	271 - 880	25,300 - 59,920	1,354 - 3,590	350 - 982	1,213 - 2,465
SOYAPANGO	10,080 - 11,620	2,010 - 3,030	720 - 1,260	780 - 2,414	51 - 160	8,230 - 19,530	320 - 845	53 - 167	201 - 410
MEJICANOS	5,080 - 5,470	1,400 - 1,780	490 - 820	510 - 1,687	42 - 135	6,310 - 17,270	94 - 330	31 - 112	70 - 165
SAN MARCOS	3,850 - 4,350	1,050 - 1,700	350 - 730	420 - 1,730	32 - 125	3,510 - 11,740	50 - 235	16 - 72	42 - 125
DELGADO	4,980 - 5,980	870 - 1,500	330 - 620	370 - 1,269	31 - 100	6,520 - 17,090	111 - 335	37 - 117	44 - 95
PANCHIMALCO	3,390 - 3,650	670 - 1,180	200 - 480	220 - 1,137	19 - 95	1,820 - 5,660	24 - 90	10 - 34	17 - 45
CUSCATANCINGO	2,060 - 2,570	390 - 610	150 - 260	160 - 573	13 - 45	1,160 - 3,050	20 - 65	6 - 23	19 - 40
ILOPANGO	2,800 - 4,090	370 - 870	100 - 340	70 - 571	5 - 35	1,490 - 5,930	42 - 215	8 - 45	40 - 110

Este perfil evalúa el impacto sísmico del país con un enfoque determinístico para guiar políticas de preparación y respuesta ante emergencias derivadas de un escenario sísmico. No es una normativa para construcción, planificación urbana o uso del suelo, ni reemplaza la zonificación sísmica, regulaciones de construcción o el plan de ordenamiento territorial vigente del país. Las suposiciones y limitaciones de los resultados de riesgo presentadas están disponibles en el reporte INERV 2024.

Figura 267. Perfil de respuesta sobre riesgo determinístico para el escenario sísmico local acontecido el 13 de febrero de 2001.
Nota: Los resultados se han obtenido sobre la base del modelo de exposición nacional conformado en este trabajo reciente.
Fuente: Mixco et al. (2025)

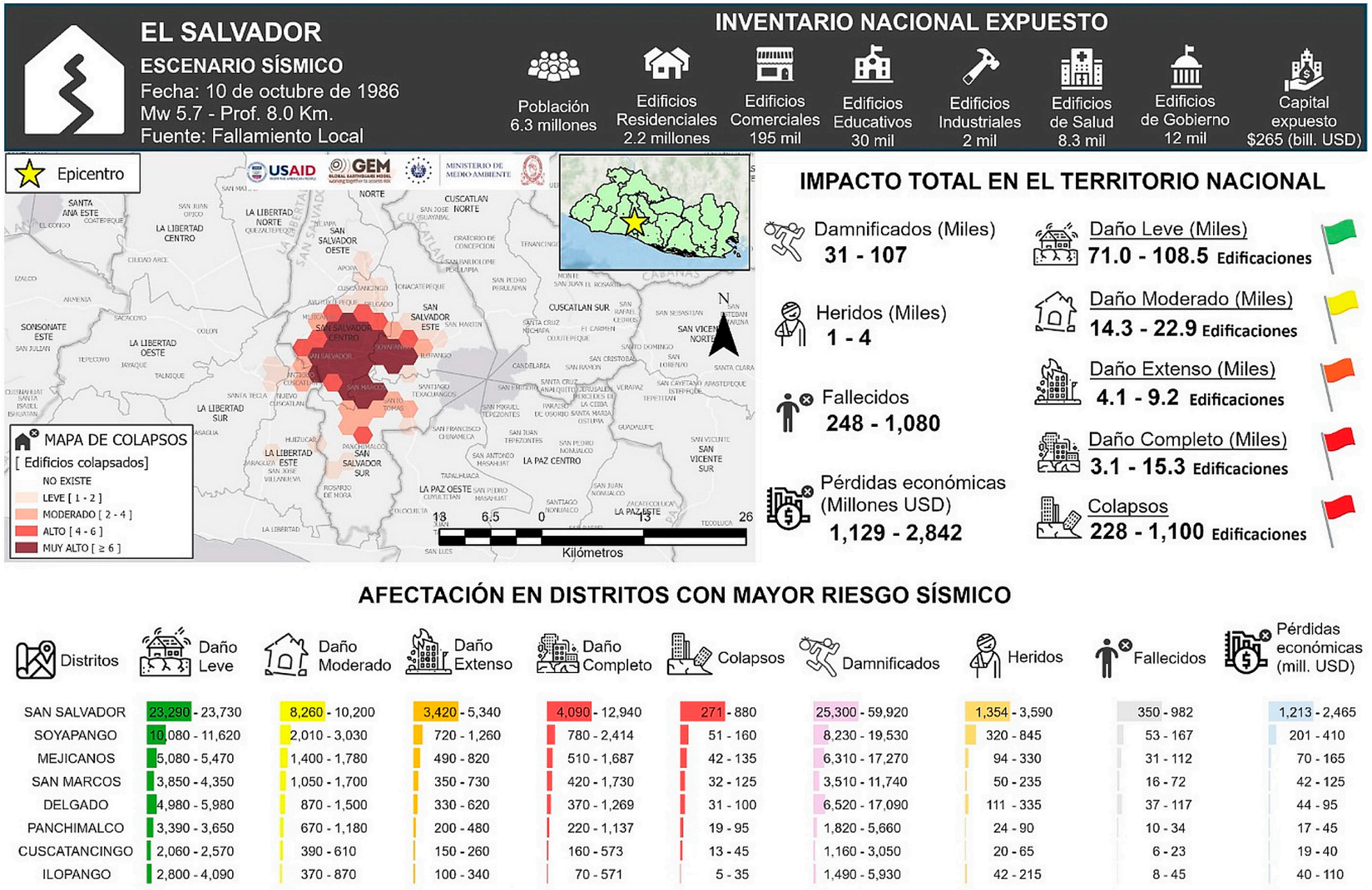
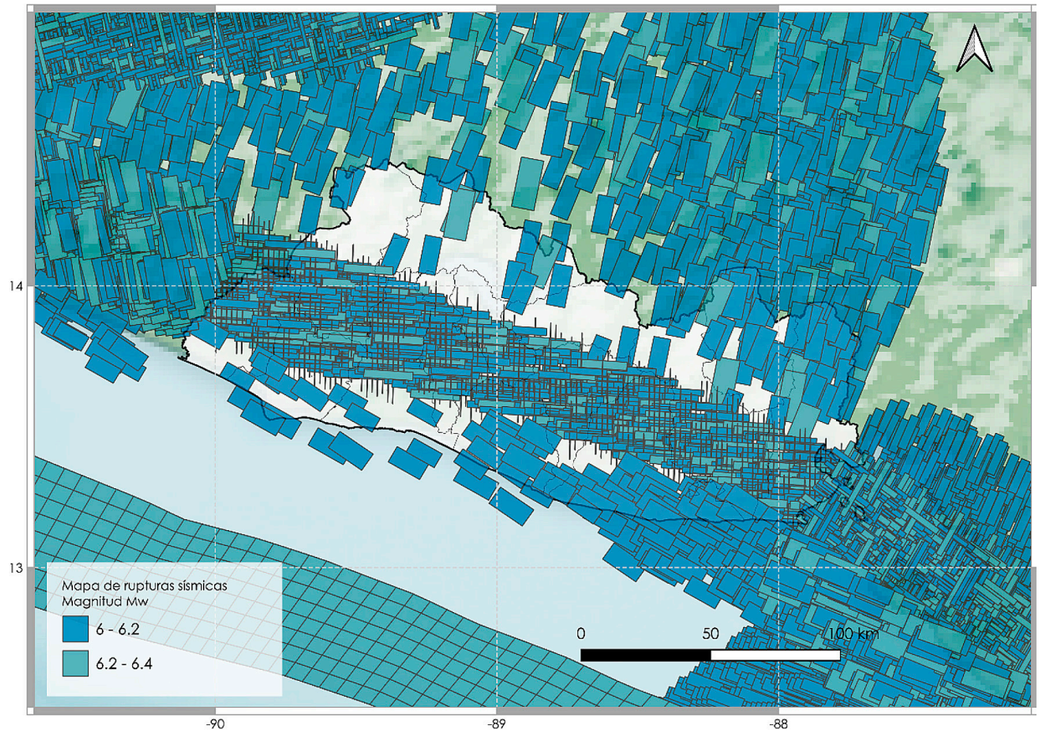


Figura 268. Perfil de respuesta sobre riesgo determinístico para el escenario sísmico local acontecido el 15 de enero de 2023.
Nota: Los resultados se han obtenido sobre la base del modelo de exposición nacional conformado en este trabajo reciente.
Fuente: Mixco et al. (2025)

7.2.3 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para El Salvador

La evaluación de riesgo sísmico probabilístico para El Salvador se realizó utilizando la calculadora de riesgo de eventos estocásticos del software de OpenQuake (Silva et al. 2014). El software utiliza el modelo de fuentes sísmicas de El Salvador (Capítulo 4) para generar varias realizaciones de sismicidad condicionadas a un tiempo de investigación. A estas realizaciones se les conoce como conjunto de eventos estocásticos o SES, por sus siglas en inglés. Los eventos se generan siguiendo un muestreo de Monte Carlo, que utiliza las relaciones magnitud-frecuencia establecidas en cada fuente de sismicidad. Cada ruptura generada está definida por una geometría, magnitud, profundidad sismogénica superior e inferior, hipocentro y ángulos de buzamiento, inclinación y rumbo.

Para El Salvador se generaron 100,000 SES con una duración de 1 año por rama en el árbol lógico del modelo de amenaza. Esto resulta en una simulación de 100,000 años de sismicidad en cada rama, donde cada año puede contener diversos eventos sísmicos. Como cada evento está definido por una ruptura, para cada una se hacen simulaciones de cómo se puede sentir el evento en la superficie en forma de intensidades de agitación, usando los modelos de movimiento del terreno establecidos en el modelo de riesgo del país. Las intensidades se estimaron en el lecho rocoso, y se amplificaron usando la calidad del suelo establecida en el modelo de los efectos en sitio. En la Figura 269 se muestran las rupturas sísmicas generadas para el territorio salvadoreño para un período de tiempo de 100,000 años de sismicidad. Para beneficiar la claridad, solo se dibujan las rupturas con magnitud de momento (Mw) entre 6.0 y 6.4.



Fuente: Mixco et al. (2025)

Como resultado de la generación de eventos estocásticos, se obtiene una simulación de sismicidad que contiene cientos de miles de eventos sísmicos. Con la intensidad de cada uno, se estima el impacto total que cada evento tiene en el inventario nacional de edificios y su correspondiente tasa de excedencia, tal y como se ha expuesto en la sección de escenarios sísmicos.

Al calcular el impacto de cada evento, se asume que los eventos han ocurrido independientemente el uno del otro (es decir, no se considera acumulación de daño en las estructuras, ni enjambres sísmicos). Los resultados totales para el país se registran en una tabla de daños y pérdidas totales, mientras que los resultados por elemento expuesto los registramos en una tabla de daños y pérdidas por elemento expuesto. Estas tablas contienen todo el daño y pérdidas posibles que pueden ocurrir dentro del período de sismicidad simulado. Por ende, se utilizan para entender el riesgo con tres métricas fundamentales:

1. El riesgo por período de retorno, a esta métrica se le conoce también como Pérdida Máxima Probable: la tabla de daños y pérdidas totales tiene el impacto que causa cada uno de los eventos sísmicos en el territorio nacional. Al estudiar el número de veces con que se exceden ciertos niveles de daño y pérdida en la tabla, es posible estimar qué tan frecuentes son dentro del período de investigación. En este reporte se presenta esa frecuencia como un período de retorno (cada cuántos años se exceden los niveles pérdida en el tiempo de investigación de la sismicidad).

2. El riesgo anualizado, a esta métrica se le conoce también como Pérdida Anual Esperada (AAL, por sus siglas en inglés): es el riesgo que se obtiene al tomar todo el daño y pérdidas registradas durante el período de sismicidad, dividido entre la duración del período. Debido a que considera todos los eventos sísmicos, es una estimación de la condición de riesgo promedio (o esperado) en que se encuentra el país cada año. Es por eso que el riesgo anualizado es útil para la asignación de recursos y la planificación de la gestión del riesgo a mediano y largo plazo.

3. Comunidades en alto riesgo: con la tabla de daños y pérdidas por activos, también se puede estudiar el riesgo anualizado en cualquier nivel administrativo. Es decir, sumando las pérdidas de todos los elementos expuestos dentro de una región (e.g., departamento, municipio, distrito o cantón). Así se identifican cuáles comunidades sufren más daños y pérdidas durante el periodo de sismicidad simulada. En este análisis se resaltan las comunidades más afectadas, debido a que reportan un riesgo mayor por la frecuencia con que experimentan sismos destructivos, las características físicas de sus edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran.

• Perfil de mitigación y gestión del riesgo

Los resultados del riesgo probabilístico son insumos fundamentales para la identificación de factores de riesgo, y para mitigar sus efectos en el mediano y largo plazo. Con base a los resultados obtenidos para El Salvador, se ha generado un perfil de riesgo probabilista o perfil de mitigación del riesgo sísmico, el cual se puede apreciar en la Figura 270.

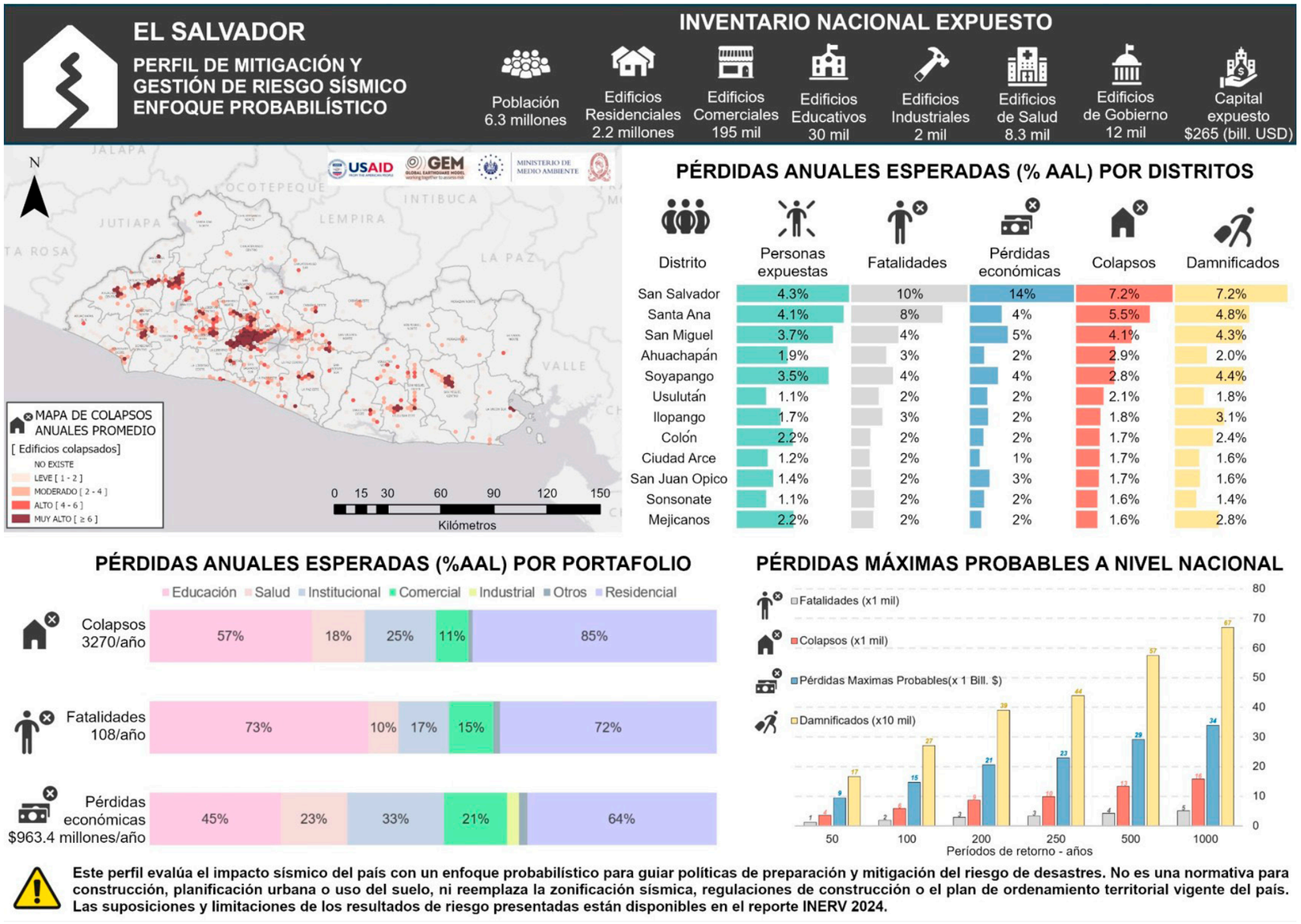


Figura 270. Perfil de mitigación del riesgo sísmico para El Salvador.
Nota: Los resultados se han obtenido sobre la base del Modelo de exposición nacional conformado en este trabajo reciente.
Fuente: Mixco et al. (2025)

El perfil ha sido elaborado en conjunto por sismólogos, ingenieros civiles y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El perfil de mitigación del riesgo tiene el objetivo fundamental de mostrar el riesgo sísmico anual promedio de El Salvador, presentando la siguiente información:

- El inventario nacional expuesto: se ubica en el panel superior, proporciona un resumen sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico del inventario nacional de edificaciones.
- Mapa de edificaciones colapsadas: un mapa que muestra el número de colapsos anuales promedio debido a sismos, y resalta las zonas del país más vulnerables a sacudidas sísmicas. Esta vulnerabilidad considera la frecuencia de los eventos sísmicos estocásticos, las características físicas de las edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran. Las comunidades que se resaltan en el mapa serían las más beneficiadas por una mejor fiscalización de la calidad constructiva, campañas de concientización del riesgo sísmico y estrategias de mitigación a largo plazo.
- Los distritos con mayor riesgo, es una tabla que muestra métricas de riesgo (pérdidas anuales esperadas) adicionales de forma agregada para las zonas delimitadas administrativamente por los 262 distritos del país; las cuales coinciden con las regiones resaltadas en el mapa de colapsos. Las métricas adicionales incluyen -por distrito- el número de personas expuesto, las fatalidades, damnificados, las pérdidas económicas y el índice de colapsos anuales promedio.
- El riesgo anualizado por portafolio, que muestra -en forma de una gráfica de barras horizontales- las pérdidas anuales esperadas por portafolio encontrado en el modelo de exposición nacional. Los portafolios que más contribuyen al riesgo sísmico se resaltan en el gráfico, mostrando la contribución de cada una a la mortalidad, los daños y las pérdidas económicas anuales promedio del país. De esta forma, dependiendo del riesgo que se desea mitigar a largo plazo, se puede visualizar en cuales portafolios los esfuerzos serían más efectivos.
- El riesgo por perodo de retorno, que también se muestra en forma de una gráfica de barras de tipo vertical. Esta figura presenta la frecuencia promedio de eventos destructivos y su impacto en el territorio nacional, reflejando las pérdidas máximas probables de cada métrica analizada. Se proveen los períodos de retorno calculados para daños (en número de estructuras destruidas), fatalidades, heridos de gravedad y pérdidas económicas. La frecuencia se muestra para los períodos de retorno de 50, 100, 200, 250, 500 y 1000 años. Esta información puede informar políticas de preparación, gestión y transferencia del riesgo para los eventos sísmicos, dependiendo de su frecuencia e impacto.

7.2.4 Evaluación rápida de pérdidas

La evaluación rápida de pérdidas después de un terremoto, conocida como Rapid Loss Assessment, es crucial para una respuesta inmediata y efectiva ante desastres. Utilizando las herramientas desarrolladas por la Fundación GEM, el Ministerio de Medio Ambiente ha trabajado en automatizar estos procesos y articularlos con sus procedimientos actuales para generar productos valiosos que evalúen los impactos preliminares después de un movimiento sísmico fuerte. Esto permitirá, junto con la publicación del mapa de intensidad sísmica (ShakeMap), obtener estimaciones del riesgo en términos de colapsos y pérdidas económicas y humanas en pocos minutos después de un sismo significativo.

Con la experiencia adquirida en la generación de perfiles de riesgo sísmico por respuesta, el Ministerio de Medio Ambiente ha desarrollado un panel web interactivo que integra esta metodología de cálculo y los resultados de riesgo sísmico, permitiendo que tras un escenario sísmico importante, los principales actores como Protección Civil y o tras instituciones estatales dedicadas a emergencias, puedan visualizar rápidamente una estimación a nivel nacional del riesgo sísmico en términos de colapsos estructurales y posibles afectaciones a los habitantes incluidos en el modelo de exposición.

En la Figura 271 se presenta el flujo de procesamiento para la evaluación rápida de pérdidas. Se establecen umbrales basados en la magnitud del sismo y su contexto tectónico para iniciar el proceso. Además, se ilustra cómo la información de métricas de riesgo generada mediante el software OpenQuake se integra a las bases de datos que alimentan el panel web desarrollado en ArcGIS Online.

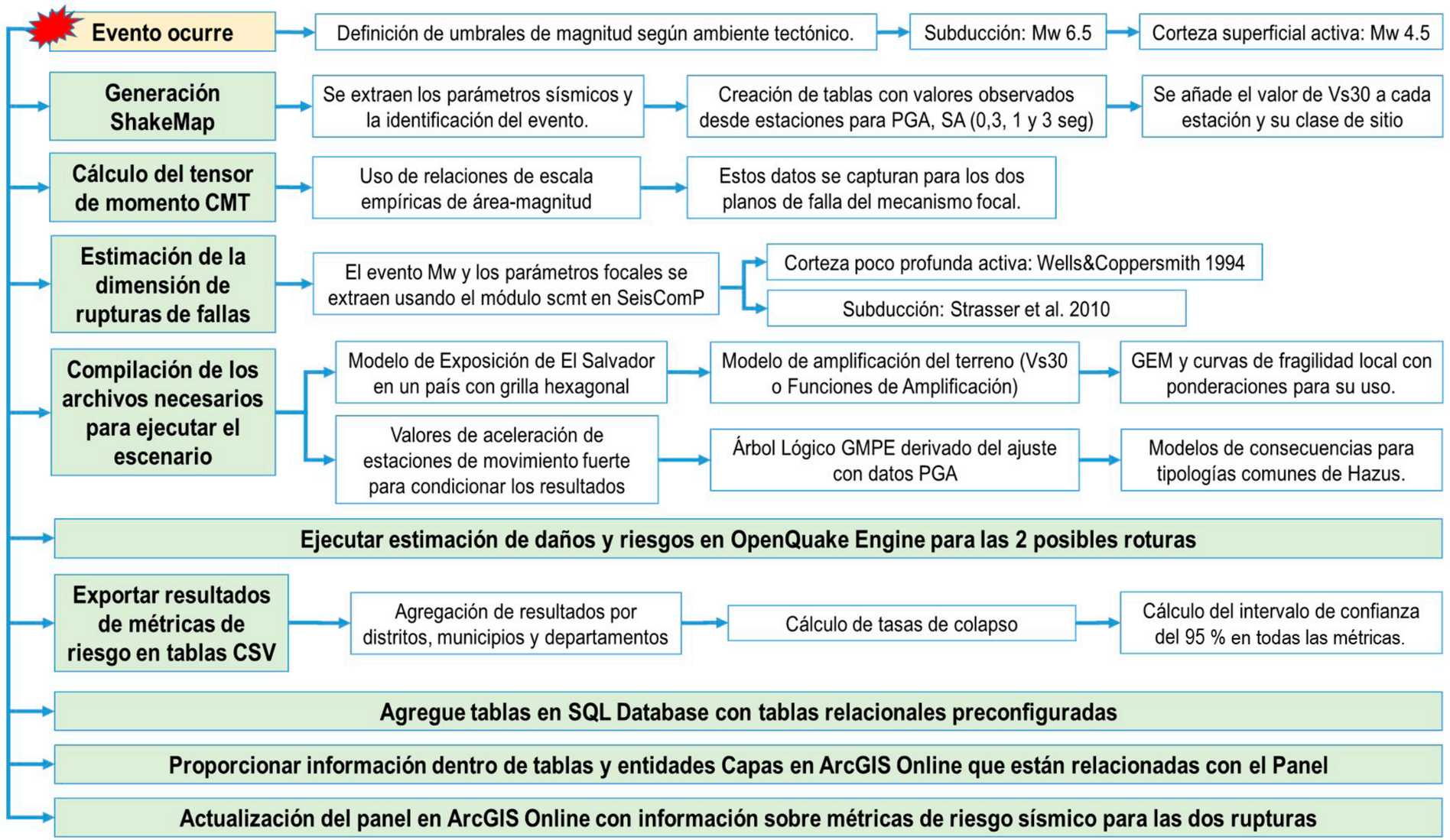


Figura 271. Flujo de procesamiento para la evaluación rápida de pérdidas dentro de panel web.
Fuente: Mixco et al. (2025)

El panel ha sido desarrollado en colaboración con los tomadores de decisiones para optimizar la interpretación de los análisis de riesgo y sus limitaciones. Un ejemplo de esto es la clasificación de daños en edificaciones mediante un sistema de banderas: verde para daño leve, amarilla para daño moderado, naranja para daño extenso y roja para colapso total. Este enfoque proporciona claridad y una comunicación eficaz entre los equipos de emergencia, las autoridades y el público en general, facilitando la toma de decisiones y alineándolos con conceptos previamente establecidos. Además, mejora la eficiencia en el reconocimiento de daños reales en el campo.

La interfaz gráfica del panel web se mantiene consistente con los perfiles de riesgo de respuesta presentados para los escenarios sísmicos. La Figura 272, muestra una captura del panel con los resultados del escenario sísmico local del 10 de octubre de 1986 (ver Tabla 43). Se resume en la parte superior el impacto total estimado en el territorio, incluyendo rangos para considerar la incertidumbre en el número de edificaciones (con sus banderas correspondientes), población afectada y pérdidas económicas.

El panel también incluye un mapa interactivo que muestra la distribución de edificaciones colapsadas, alternable para visualizar las intensidades sísmicas y niveles de aceleración del terreno. En la sección derecha, se presentan las estadísticas a nivel distrital, municipal y departamental, abarcando métricas de riesgo como índices de colapsos, fatalidades, damnificados, heridos graves y pérdidas económicas.

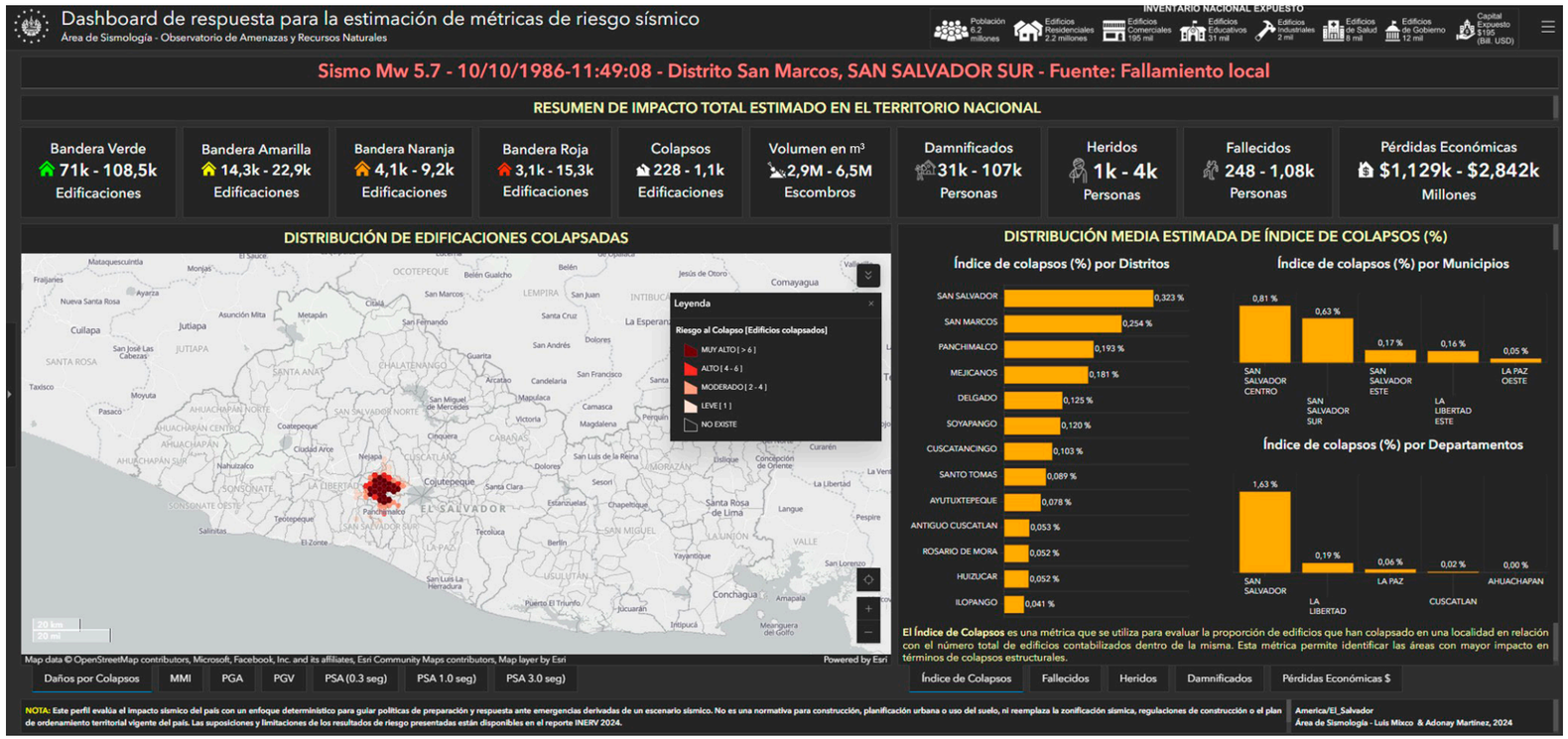


Figura 272. Visualización de interfaz gráfica del Dashboard de Atención y Respuesta para la Evaluación de Métricas de Riesgo Sísmico en El Salvador (DAREMES).
Fuente: Mixco et al. (2025)

Esta herramienta ha sido desarrollada en el hub de ArcGIS Online del Ministerio de Ambiente y estará disponible para las entidades que conforman la Comisión Nacional de Protección Civil a través de un enlace web. Estas entidades podrán interactuar con el panel y utilizar sus funcionalidades según lo requieran para sus actividades de emergencia.

El objetivo principal de esta herramienta es facilitar la identificación de áreas que necesitan mayor atención y recursos, optimizando así la respuesta y eficiencia en la gestión de desastres y la mitigación de sus impactos.

7.2.5 Limitaciones de los modelos y trabajos a futuro

El análisis de riesgo sísmico presentado, junto con los perfiles de riesgo generados, tiene como propósito dimensionar el impacto potencial que uno o varios eventos sísmicos podrían causar en El Salvador, considerando las condiciones actuales reflejadas en los modelos nacionales de exposición, vulnerabilidad y amenaza sísmica. Es importante destacar que cada componente del modelo conlleva incertidumbres epistémicas inherentes, producto de las limitaciones en el conocimiento disponible. En este contexto, los perfiles de riesgo tienen como finalidad proporcionar métricas útiles que orienten la formulación de políticas públicas en materia de preparación, mitigación y respuesta ante desastres.

Estos perfiles se fundamentan en una caracterización detallada de las edificaciones existentes y sus condiciones físicas actuales, reconociendo las limitaciones descritas previamente en los Capítulos 5 y 6.

Cabe aclarar que los resultados obtenidos no deben interpretarse como normativas para diseño estructural, planificación urbana o uso del suelo. Tampoco sustituyen la zonificación sísmica, las especificaciones establecidas en el código sísmico nacional ni los planes de ordenamiento territorial vigentes en cada municipio.

El mantenimiento y actualización del modelo de riesgo sísmico constituye un proceso continuo, orientado a mejorar progresivamente sus componentes y reducir, en la medida de lo posible, la incertidumbre asociada. A continuación, se presentan las principales limitaciones del modelo actual, así como las líneas de mejora previstas para versiones futuras.

- Modelo de amenaza sísmica: el modelo de amenaza sísmica utilizado en este documento representa un avance significativo en el modelado de las fuentes sísmicas que afectan al país, especialmente en nuestro contexto tectónico, donde la actividad sísmica es producto tanto del movimiento de fallas geológicas como del proceso de subducción. Asimismo, la caracterización del movimiento fuerte del suelo ha mejorado mediante la utilización de modelos de predicción del terreno ajustados a registros acelerográficos capturados dentro del país.

Sin embargo, aún existen ciertos aspectos que requieren consideración en nuestro contexto sismo-tectónico. Entre ellos se incluye la consideración de sismos sucesivos debido al rompimiento múltiple de fallas geológicas y la inducción sísmica inherente. Esta situación ha sido una realidad en nuestro país, como lo demuestran eventos históricos significativos. Los terremotos de Armenia-San Salvador en 1917 y Jucuapa-Chinameca en 1951 ejemplifican casos de sismos sucesivos que han impactado el país, subrayando la necesidad de integrar estos fenómenos en los modelos de amenaza sísmica y así mejorar la precisión en las evaluaciones del riesgo sísmico.

También es necesario incorporar modelos dependientes del tiempo para las fuentes superficiales y de subducción. Con la información sísmica relativamente densa disponible en los catálogos sísmicos actuales, es posible ajustar la sincronización de los terremotos dentro de las tasas de actividad de las fallas y/o la motricidad de la subducción ya establecidas, así como en las distribuciones de frecuencias de sus magnitudes. Esto proporcionaría una representación más realista del comportamiento del ciclo sísmico en El Salvador para ambas fuentes sísmicas principales.

El Ministerio de Medio Ambiente y la Fundación GEM, en el marco del proyecto FORCE, tienen previsto desarrollar por primera vez un modelo de amenaza sísmica dependiente del tiempo para El Salvador, enfocado en la caracterización de la fuente de subducción, como parte del pilar de previsión del riesgo de desastres futuros debido a terremotos.

- Modelo de condiciones del suelo y efectos de sitio: los resultados presentados utilizan modelos simplificados de Vs30 en el territorio y, por razones de eficiencia computacional y para la estimación rápida de pérdidas a nivel nacional, fue necesario simplificar su resolución.

Una mejor manera de representar el comportamiento dinámico de los paquetes de suelos encontrados en un sitio es a través de funciones de amplificación de la agitación sísmica. El Ministerio de Medio Ambiente ha desarrollado dichas funciones para El Salvador utilizando información obtenida mediante pruebas geofísicas y geotécnicas en diversos puntos del país.

No obstante, se planea una reevaluación de estas funciones, incorporando datos provenientes de nuevos lugares del territorio y considerando demandas sísmicas de entrada correspondientes a sismos de control obtenidos mediante procesos de desagregación sísmica para diferentes medidas de intensidad y períodos de retorno. Se espera que la implementación de estas funciones ayude a modelar de mejor manera la amplificación de la amenaza sísmica y, consecuentemente, el riesgo sísmico.

- Modelo de exposición: la cuantificación del número y características del inventario de edificaciones en El Salvador se basa en supuestos y metodologías para inferir información no disponible directamente en censos e información catastral. La calidad y confiabilidad de la información varía según la característica analizada; por ejemplo, el número de edificaciones y el material de construcción son más confiables que el número de pisos o el nivel de ductilidad.

Los usuarios deben ser conscientes de las limitaciones del modelo de exposición y usarlo con discreción. El Ministerio de Medio Ambiente continúa con el proceso de digitalización de toda la información que puede ayudar a determinar, de forma más precisa, las características físicas de las estructuras en el territorio nacional. Esto incluye, pero no se limita a los mapas de desarrollo urbano y planificación territorial, así como las capas de acceso libre de Open Building y OpenStreetMaps.

Al mismo tiempo, la información estadística demográfica y censal, disponible en las siguientes iteraciones del censo nacional, será incorporada en el modelo en el momento en que se haga pública. De esta forma se planea mantener actualizada la cantidad de estructuras y ocupantes en el modelo de riesgo de la manera más precisa posible.

- Modelo de vulnerabilidad: la escasez de datos empíricos sobre el comportamiento de los edificios típicos de la región durante terremotos pasados impone una seria limitación tanto en la calibración como en la validación de los modelos de fragilidad y vulnerabilidad derivados analíticamente.

Aunque se han desarrollado modelos de fragilidad locales para tipologías de mampostería comunes en el país, aún es necesario evaluar muchas más configuraciones constructivas. Para compensar esta falta de información, se utilizan datos de otras regiones del mundo con tipos de construcción y regiones tectónicas sísmicas similares. Esto se ha realizado mediante la asignación de pesos de contribución tanto para los modelos locales como globales.

Las funciones de fragilidad seleccionadas son aplicables para configuraciones estructurales específicas al portafolio residencial, comercial e industrial, por lo que es necesario utilizar funciones adecuadas y compatibles para cada portafolio analizado en futuras evaluaciones del riesgo sísmico, así como incorporar más estudios locales que reflejen de forma más certera el comportamiento de las edificaciones en el país.

El Ministerio de Medio Ambiente tiene el objetivo de validar y seguir implementando funciones de fragilidad sísmica para las tipologías estructurales más comunes en El Salvador. En futuras versiones del modelo de riesgo, se espera incluir funciones de fragilidad, consecuencia y vulnerabilidad que caractericen las prácticas y materiales constructivos típicos de El Salvador, mejorando así las estimaciones del comportamiento de estas edificaciones ante sismos.

- Escenarios sísmicos: en este informe se han presentado diferentes escenarios sísmicos y su impacto en el territorio nacional, con el objetivo de proveer métricas útiles para generar políticas de preparación y respuesta ante desastres. Sin embargo, estos escenarios se basan en eventos históricos y no constituyen una representación exhaustiva de todos los eventos con potencial dañino para El Salvador.

Es importante destacar que los resultados de estos escenarios históricos, al ser evaluados utilizando un modelo de exposición nacional reciente, no reflejan con exactitud la estimación de los impactos reales que se obtuvieron en la época en que ocurrió el evento sísmico. No obstante, proporcionan una idea de la situación que podría presentarse si se llegasen a activar nuevamente esas rupturas específicas.
Más escenarios posibles y de potencial destructivo pueden identificarse mediante la desagregación de la amenaza sísmica para las diferentes zonas urbanas y metropolitanas del país. El Ministerio de Medio Ambiente tiene el objetivo de incluir más escenarios sísmicos en el futuro, incluyendo escenarios hipotéticos relevantes para el país.

- Resultados y métricas de riesgo: en la estimación del riesgo sísmico se pretende propagar las incertidumbres epistémicas y aleatorias asociadas a la complejidad del fenómeno sísmico. Los resultados incluyen variabilidades significativas que reflejan la incertidumbre de los modelos utilizados.

Para beneficiar la claridad y legibilidad de los perfiles de riesgo, los resultados presentados muestran el valor del riesgo cerca de la media o valor promedio. Sin embargo, el riesgo promedio no presenta la incertidumbre asociada a los resultados. Para la toma de decisiones, se recomienda considerar que los valores presentados pueden tener variaciones importantes. Es posible solicitar información adicional para comprender con mayor claridad la variabilidad y su impacto en las acciones subsiguientes.

7.3 Riesgo en infraestructura de prioridad estratégica

Ante la ocurrencia de un desastre, es fundamental que un país garantice la continuidad operativa de los servicios esenciales que aseguran el bienestar de la población y el funcionamiento de su economía. Para ello, es indispensable identificar la infraestructura cuya pérdida comprometería gravemente dichas funciones.

La evaluación del riesgo de desastres exige un enfoque integral, que combine métodos cuantitativos y cualitativos para analizar tanto la naturaleza como la magnitud del riesgo. Este enfoque incluye el estudio de amenazas potenciales y la evaluación de las condiciones actuales de exposición y vulnerabilidad que podrían afectar a las personas, los bienes, los servicios, los medios de vida y el entorno (UNDRR, 2023).
Evaluar el riesgo de desastres considerando la infraestructura prioritaria permite determinar cuáles activos o sectores están más expuestos a daños y pérdidas, así como identificar las amenazas cuyo impacto generaría mayores consecuencias. Es importante señalar que esta evaluación se enfoca exclusivamente en la vulnerabilidad física de la infraestructura.

En 2017 se publicaron los resultados del primer Estudio de Riesgo en Infraestructura Prioritaria de El Salvador, elaborado con el apoyo de la Alianza Clima y Desarrollo (CDKN). En dicho estudio se construyó, con la participación de instituciones gubernamentales y no gubernamentales, un inventario de bienes críticos cuya operatividad es indispensable tras un evento extremo, con el fin de asegurar la continuidad de los servicios básicos y el funcionamiento económico del país. Los resultados presentados en esta sección retoman la base de dicho estudio, incorporando además información actualizada de exposición y amenaza disponible al año 2023.

• Enfoque aplicado para análisis de riesgo

El enfoque analítico aplicado en este estudio se basó en un inventario espacial detallado que integró información sobre la intensidad, magnitud y probabilidad de ocurrencia de diversas amenazas, así como la ubicación, características y costos de reposición de la infraestructura prioritaria. Esta información permitió estimar la Pérdida Anual Esperada (AAL, por sus siglas en inglés) para cada componente de infraestructura y para cada tipo de amenaza evaluada.

La AAL fue seleccionada como métrica principal de riesgo, ya que permite realizar comparaciones estandarizadas entre diferentes amenazas e infraestructuras. Esta medida refleja las pérdidas esperadas a largo plazo, considerando eventos de diversas probabilidades y niveles de impacto, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas en materia de gestión del riesgo.

Tal como se señaló en el estudio publicado en 2017 "Análisis de riesgo en infraestructura prioritaria", las limitaciones en la disponibilidad y precisión de los datos pueden generar cierto grado de incertidumbre en las estimaciones de riesgo a nivel de instalaciones específicas. Por ello, se recomienda que los usuarios enfoquen su atención en los patrones de riesgo a escala nacional, que son más robustos frente a diferentes supuestos metodológicos. Para el análisis se utilizaron valores típicos derivados de estudios internacionales y nacionales, incluyendo funciones de vulnerabilidad específicas para cada amenaza.

El análisis de riesgo para infraestructura estratégica se realizó considerando cinco amenazas principales: actividad volcánica, inundaciones, tsunamis, deslizamientos y lahares. La evaluación incorporó tanto la localización como las características físicas de los activos expuestos. La infraestructura analizada incluye vías de comunicación terrestre (carreteras y puentes), subestaciones y torres de transmisión eléctrica, centros escolares, hospitales e instalaciones de agua potable y alcantarillado. A cada uno de estos elementos se le asignaron curvas de daño apropiadas, en función de atributos como la tipología estructural, el tipo de material, el año de construcción y otras variables relevantes, con el fin de evaluar su vulnerabilidad física ante los distintos escenarios de amenaza.

Los resultados del análisis (Figura 273) revelaron que los centros de salud y los centros escolares son los tipos de infraestructura prioritaria con mayor pérdida anual esperada (AAL). Entre las amenazas evaluadas, las inundaciones —ya sean causadas por eventos hidrometeorológicos extremos o por tsunamis— representan el mayor riesgo potencial, al ser las que generan las mayores pérdidas económicas en la infraestructura estratégica del país.

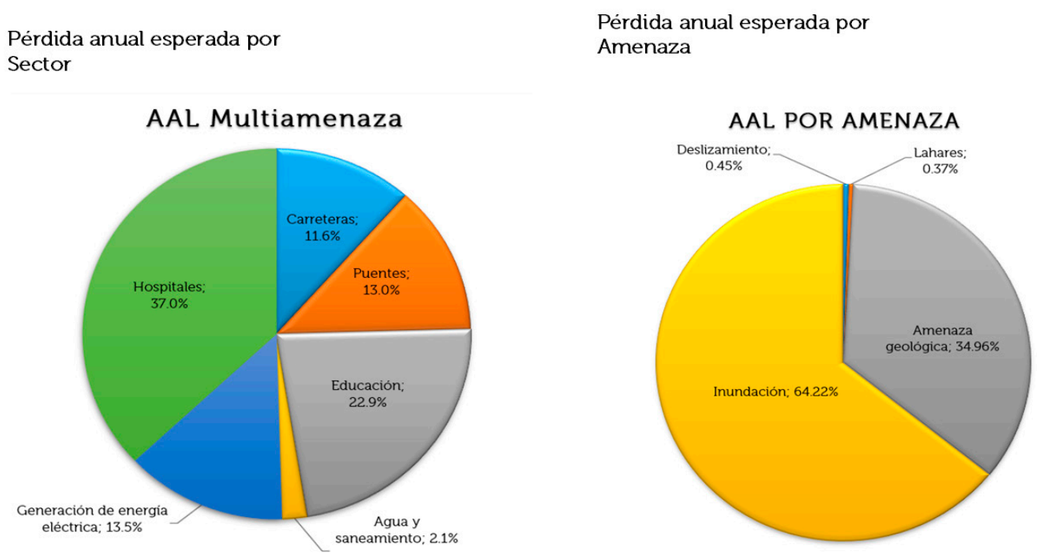


Figura 272. Visualización de interfaz gráfica del Dashboard de Atención y Respuesta para la Evaluación de Métricas de Riesgo Sísmico en El Salvador (DAREMES).
Fuente: Mixco et al. (2025)

• Amenazas consideradas en evaluación

El análisis priorizó la generación de indicadores de pérdidas y daños en infraestructura estratégica, considerando de forma individual y combinada las amenazas naturales hidrometeorológicas (inundaciones y deslizamientos) y volcánicas:

• Inundaciones: Se incluyeron 18 escenarios extremos: seis eventos históricos y 12 escenarios estadísticos con períodos de retorno de 1, 2, 25, 50 y 100 años, basados en manchas de inundabilidad (Gómez et al., 2018). Asimismo, se consideró la amenaza de tsunamis, evaluando su impacto hasta una cota de 10 metros sobre el nivel del mar.

• Lahares: Se modelaron diversas combinaciones de volumen y ubicación para los volcanes de Santa Ana, San Vicente (incluyendo zonas norte, sur y ciudad de San Vicente), Conchagua, Berlín, Apaneca y San Salvador, con base en estudios de Rivera (2017, 2018).

• Deslizamientos: Se utilizó una capa de susceptibilidad, categorizando las áreas según su propensión al deslizamiento.

• Amenazas volcánicas: Se evaluaron escenarios de erupciones que pudieran generar caída de ceniza, proyectiles balísticos, flujos de lava y corrientes piroclásticas para los volcanes de San Salvador, San Miguel y Santa Ana.
No se abordó la amenaza sísmica en esta evaluación, ya que fue evaluada en profundidad en un análisis independiente que se presenta en este informe. Dado que se trata de un enfoque probabilístico, además de los valores de intensidad de las amenazas (altura de inundación, profundidad de caída de ceniza, entre otras), se definen períodos de retorno obtenidos a partir de las diversas modelaciones realizadas, datos históricos y criterios de experto.

• Infraestructura de prioridad estratégica expuesta

En este análisis, la infraestructura prioritaria incluye aquellos bienes cuya conservación y reducción del riesgo resultan estratégicas, ya sea porque su operación es indispensable para garantizar la continuidad de los servicios esenciales a la población durante situaciones de desastre, o porque su funcionamiento es vital para el desempeño de la economía nacional o subregional. La selección se basa en la disponibilidad de información suficiente que permita una asignación simplificada de curvas de daño, considerando únicamente las vías de comunicación pavimentadas (primarias, secundarias y terciarias), puentes viales, torres de transmisión eléctrica de alto voltaje, centros de salud de referencia y centros educativos estratégicos, según el detalle de Tabla 44.

Tabla 44. Infraestructura considerada en la evaluación de riesgo

Institución	Dato	Cantidad
Ministerio de Obras públicas, MOPT	Puentes	1989
	Red vial no pavimentada	2994.36 km lineales
	Red vial pavimentada	4316.93 km lineales
Ministerio de Educación, MINED	Centros escolares	5165
Ministerio de Salud, MINSAL	Hospitales	30
Instituto Salvadoreño del Seguro Social, ISSS	Hospital	12
	Unidad médica	16
Empresa Transmisora de El Salvador, ETESAL	Subestaciones	35
	Marco	230
	Poste	280
	Torre	3183

Fuente: Elaboración propia, DOA-MARN, 2024.

• Vulnerabilidad a partir de curvas de daño

Para estimar los niveles promedio de daño en distintos tipos de instalaciones ante diversos niveles de intensidad de amenaza, se desarrolló un conjunto de funciones de daño o funciones de vulnerabilidad. Estas funciones permiten simular el porcentaje estimado de afectación que podría provocar una amenaza específica, considerando su magnitud e intensidad; por ejemplo, el daño esperado en un centro escolar en función de la profundidad de una inundación. Debido a las limitaciones en la disponibilidad de datos detallados sobre la infraestructura expuesta, fue necesario emplear curvas de daño generales, aplicables a una amplia variedad de tipologías constructivas. En el caso de las inundaciones, se utilizaron las curvas propuestas en el Manual Técnico HAZUS para este tipo de amenaza, así como un estudio realizado en Nueva Zelanda que analiza el aumento del riesgo de inundaciones en el contexto del cambio climático.

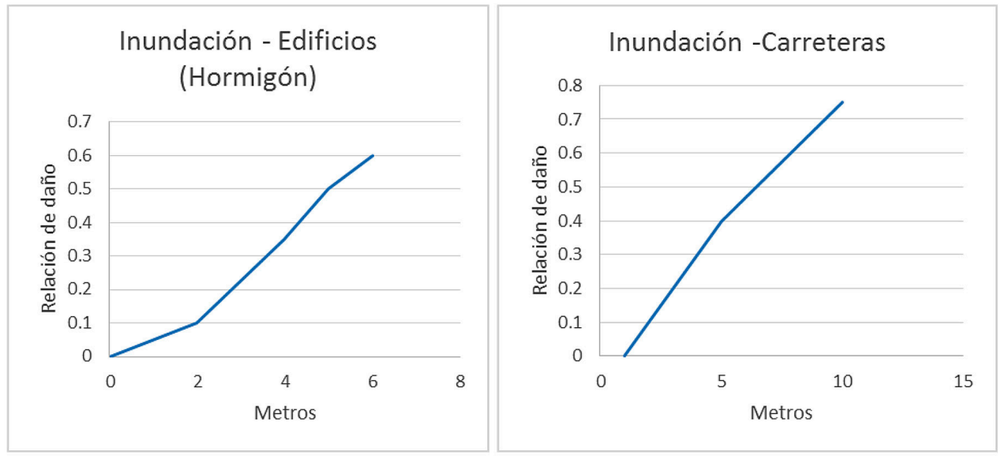


Figura 274. Curvas de daño por inundación en edificios de hormigón y carreteras.
Fuente: (Webb, Sorto y Grande, 2016)

En cuanto a los daños que ocasionan los tsunamis, al igual que en el caso de las inundaciones, se utilizó el parámetro de profundidad para evaluar el nivel de daño.

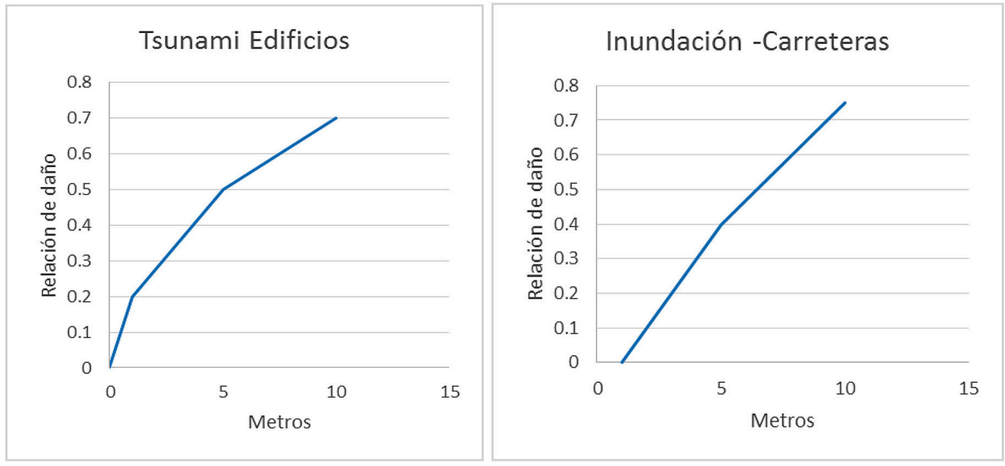


Figura 275. Curvas de daño por tsunamis en edificios de hormigón y carreteras.
Fuente: (Webb, Sorto y Grande, 2016)

Para la evaluación de los daños por ceniza se utilizaron los resultados de los estudios del USGS para daños generados por ceniza. Para estos casos las curvas indicaban un máximo porcentaje de año para la infraestructura vinculada a la generación de energía eléctrica, edificios e infraestructura de agua y saneamiento del 50 % de daño. Finalmente, se consideró que, al ocurrir lahares, flujos de lava, proyectiles balísticos, flujo piroclásticos y deslizamientos, se causaría un daño del 100 % en la infraestructura impactada, independientemente del tipo que sea.

- Resultados

El análisis de pérdidas anuales estimadas revela que el 60 % del total se concentra en infraestructura de salud y educación, siendo las inundaciones, deslizamientos, lahares y amenazas geológicas las principales causas. Las inundaciones generan el mayor impacto en hospitales (50.6 %) y escuelas (24.3 %). En el caso de amenazas geológicas, el sector energético resulta el más afectado (30 %), seguido por el educativo (20.7 %). Estas amenazas, junto con los deslizam ientos, representan un riesgo crítico para el suministro eléctrico. Los deslizamientos afectan principalmente las carreteras (22.6 % de pérdidas), mientras que los lahares son la principal amenaza para los puentes (72.1 %).
En términos sectoriales, las obras públicas (carreteras y puentes) concentran el 93.9 % de sus pérdidas por inundaciones (49.8 %) y amenazas geológicas. El sector salud es particularmente vulnerable a las inundaciones (85.6 %), mientras que, en educación, estas representan el 61.5 % de las pérdidas, seguidas por las amenazas geológicas (32.9%). En conjunto, los eventos hidrometeorológicos y tsunamis explican el 64.2 % de la pérdida anual total esperada, frente al 35 % de las amenazas geológicas.

Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar acciones de reducción de riesgos en infraestructura estratégica. Las prioridades incluyen fortalecer la respuesta ante amenazas geológicas para los sectores de agua, energía y transporte, así como planes de mitigación y respuesta frente a inundaciones en centros de salud, vías de comunicación y escuelas.

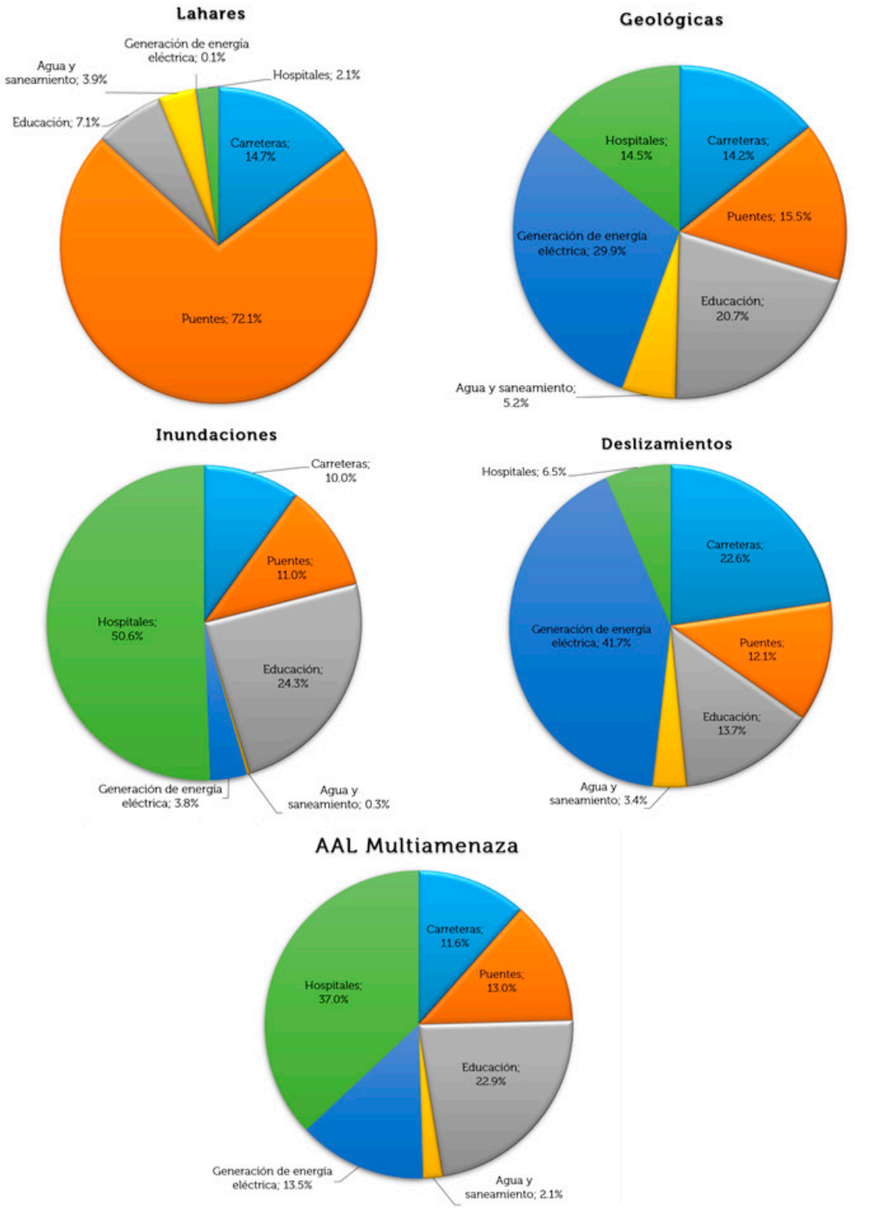


Figura 276. Tipo de infraestructura más afectada por las amenazas hidrometereológicas, geológicas y tsunamis.
Fuente: (Webb, Sorto y Grande, 2016; Chávez, López, Clímaco y Escalante, 2024)

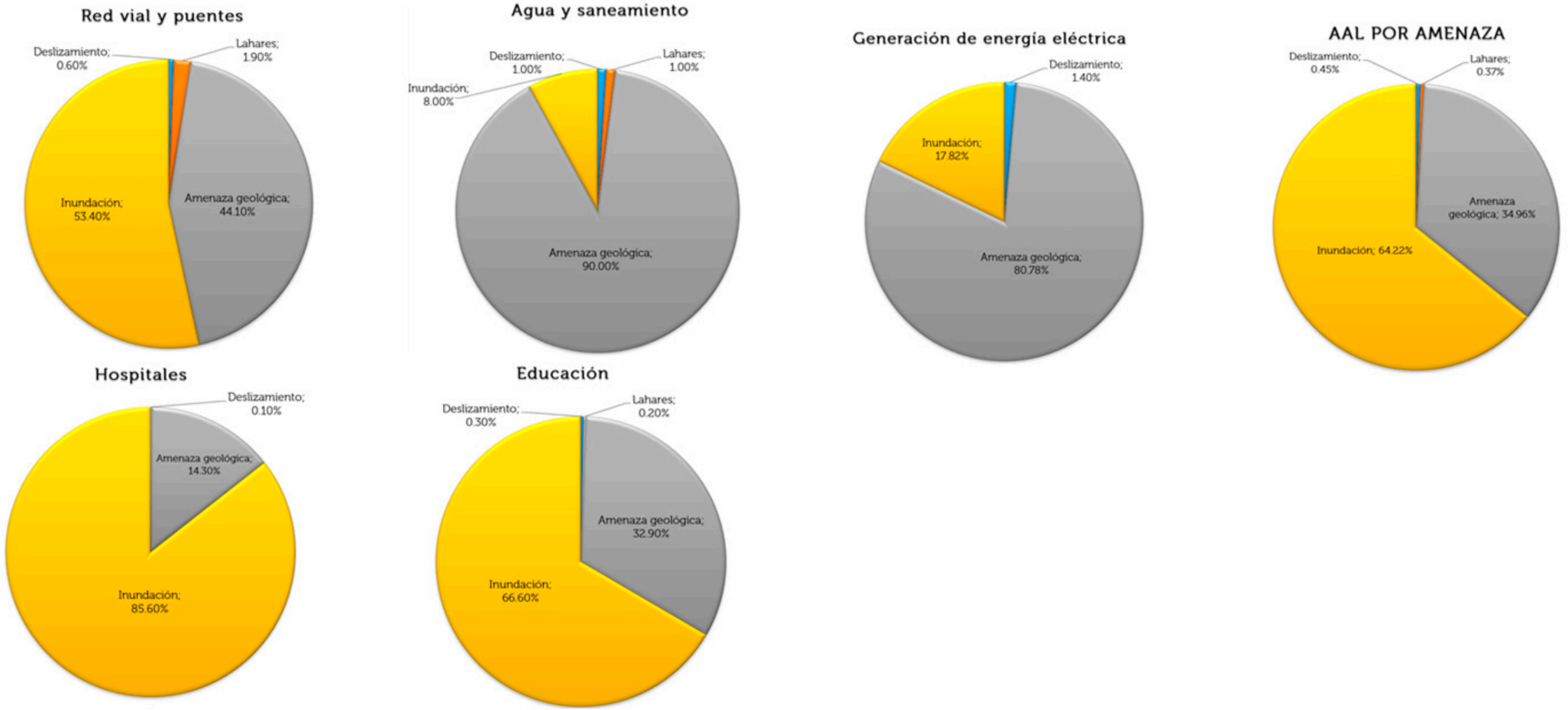


Figura 277. Amenaza que más impacta cada sector de infraestructura
Fuente: (Webb, Sorto y Grande, 2016; Chávez, López, Clímaco y Escalante, 2024)

Capítulo 8

8. Indicadores de riesgo de desastre y gestión del riesgo

8.1 Elementos generales

El riesgo de desastres se define como "la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas", en función de la combinación de amenaza, exposición y vulnerabilidad.

La gestión del riesgo está referido al proceso de identificar, evaluar, analizar riesgos, mitigar y controlar los peligros y amenazas que pueden afectar negativamente al medio ambiente y la salud humana.

El riesgo de desastres se refiere no solo a la posibilidad que se presenten eventos o fenómenos naturales intensos, sino también de las condiciones de vulnerabilidad que favorecen o facilitan que se desencadenen desastres cuando se presentan dichos fenómenos.

Los desastres son eventos socioambientales cuya materialización es el resultado de la construcción social del riesgo. Su reducción debe ser parte de la toma de decisiones y de formulación de políticas públicas.

A través del seguimiento de indicadores se facilita el acceso de información relevante para identificar y proponer acciones efectivas de gestión del riesgo.

Para poder gestionar de manera efectiva el riesgo de los desastres es necesario "dimensionar". Medir el riesgo a través de un sistema de indicadores significa que se debe tomar en cuenta, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha ido desarrollando en los últimos años, para diferentes países de la región, un sistema de indicadores para mejorar el entendimiento del riesgo de desastre y el desempeño de la gestión del riesgo.

El propósito de este sistema de indicadores es dimensionar la vulnerabilidad y el riesgo, usando indicadores a escala nacional, para facilitar a los tomadores de decisiones de cada país tener acceso a información relevante que les permita identificar y proponer acciones efectivas de gestión del riesgo, considerando aspectos macroeconómicos, sociales, institucionales y técnicos.

Este sistema de indicadores tiene tres objetivos específicos:

a) Mejorar el uso y la presentación de información sobre riesgos, con el fin de ayudar a los responsables de formular políticas públicas a identificar las prioridades de inversión en prevención de riesgos y dirigir el proceso de recuperación después de un desastre.
b) Suministrarles los medios necesarios para que puedan medir los elementos fundamentales de la vulnerabilidad de sus países ante los desastres de origen natural y su capacidad de gestión de riesgos, así como los parámetros comparativos para evaluar los efectos de sus políticas e inversiones en el desempeño de la gestión del riesgo de desastres.
c) Fomentar el intercambio de información técnica para la formulación de políticas y programas de gestión de riesgos en la región.

Se describen a continuación los indicadores del presente informe en materia de gestión del riesgo:

1. El Índice de Déficit por Desastre (IDD) refleja el riesgo del país en términos macroeconómicos y financieros ante eventos catastróficos probables, para lo cual es necesario estimar la situación de impacto más crítica en un tiempo de exposición, definido como referente, y la capacidad financiera del país para hacer frente a esa situación.
2. El Índice de Desastres Locales (IDL) captura la problemática de riesgo social y ambiental que se deriva de los eventos frecuentes menores que afectan de manera crónica el ámbito local y sub nacional; afectan en particular a los estratos socioeconómicos más frágiles de la población y generan un efecto altamente perjudicial para el desarrollo del país.
3. El Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) está constituido por una serie de indicadores que caracterizan las condiciones prevalecientes de vulnerabilidad del país en términos de exposición en áreas propensas, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia en general.
4. El Índice de Gestión de Riesgo (IGR) corresponde a un conjunto de indicadores relacionados con el desempeño de la gestión de riesgos del país, que reflejan su organización, capacidad, desarrollo y acción institucional para reducir la vulnerabilidad, las pérdidas, prepararse para responder en caso de crisis y de recuperarse con eficiencia.
5. Índice de Gestión de Riesgos INFORM, es una herramienta que busca evaluar y medir el riesgo en crisis humanitarias y desastres, proporcionando una visión integral de la vulnerabilidad y la capacidad de afrontamiento de una región o país.
6. Intersecciones entre dimensiones de vulnerabilidad ante eventos y riesgos ambientales (% de hogares).

   Los resultados de dichos indicadores muestran períodos de tiempo, según los informes de referencia para diferentes períodos de tiempo disponibles.

8.2 Estimación de los indicadores

8.2.1 Índice de Déficit por Desastre (IDD)

El IDD representa la pérdida económica que el país podría sufrir cuando se enfrenta a la ocurrencia de un evento catastrófico y sus implicaciones en términos de los recursos que se requieren para atender la situación. El IDD es una relación entre la demanda de fondos económicos contingentes o pérdida económica que debe asumir como resultado de la responsabilidad fiscal el sector público, que incluye la reposición de los bienes fiscales (la infraestructura pública) y de la vivienda de los estratos socioeconómicos de más bajos ingresos (ESEB) de la población potencialmente afectada a causa de un Evento Máximo Considerado (EMC) y la Resiliencia Económica (RE) de dicho sector.

Para calcular las pérdidas causadas por el EMC se utiliza un modelo que tiene en cuenta, por una parte, diferentes amenazas naturales –que se calculan en forma probabilista de acuerdo con el registro histórico de las intensidades de los fenómenos que las caracterizan– y por otra parte la vulnerabilidad física actual que presentan los elementos expuestos ante dichos fenómenos. La RE se obtiene de estimar los posibles fondos internos o externos a los que el gobierno, como responsable de la recuperación o propietario de los bienes afectados, puede acceder en el momento de la evaluación.

Un IDD superior a 1.0 indica que el país carece de la capacidad económica para hacer frente a desastres extremos, incluso si maximizara su endeudamiento. Es decir, cuanto mayor es el IDD, mayor es el déficit económico frente a eventos catastróficos. De manera complementaria, se calcula el IDD', que representa la proporción del gasto de capital del país que equivaldría al valor de la pérdida anual esperada o prima pura de riesgo (IDDGC). El indicador IDDGC expresa qué porcentaje del presupuesto

de inversión pública tendría que destinarse anualmente para cubrir las pérdidas por desastres futuros (IDEA, 2005; Cardona, 2005). El IDD' también se calcula con respecto a la cantidad del superávit o ahorro que el Gobierno podría emplear para atender desastres (IDDSI). El IDDSI es el porcentaje de los ahorros del país que corresponde a la pérdida anual esperada.

En la siguiente tabla se presentan los IDD para el Evento Máximo Considerado (EMC) de períodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

Tabla 45. IDD para diferentes períodos de retorno

IDD para diferentes períodos de retorno				
IDD	**2000**	**2005**	**2010**	**2012**
IDD50	0.55	0.61	0.22	0.27
IDD100	1.45	1.59	0.59	0.74
IDD500	2.24	2.4	1.02	1.25

Fuente: elaboración propia a partir de datos del BID.

En la siguiente tabla se muestran los valores del IDD' que son el porcentaje, tanto con respecto a los gastos de capital (IDDGC) o presupuesto anual de inversión:

Tabla 46. IDD´respecto a gastos de capital y superávit/déficit

IDD' con respecto a gastos de capital y superávit/déficit				
IDD'	**2000**	**2005**	**2010**	**2012**
IDD_{GC}	6.67 %	5.11 %	3.71 %	3.54 %

Fuente: elaboración propia a partir de datos del BID.

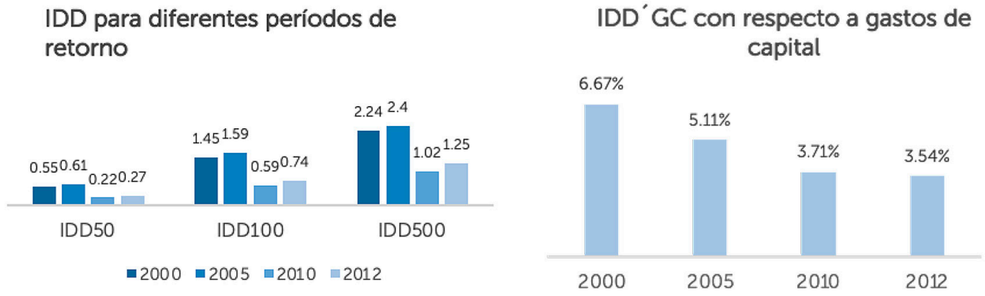


Figura 278. IDD para diferentes períodos de retorno IDD´GC con respecto a gastos de capital.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BID.

Para los eventos extremos máximos en 500 años de período de retorno para todos los años evaluados y de 100 años de periodo de retorno para 2000 y 2005, el IDD es superior a 1,0, lo que indica que el país no tendría recursos suficientes, o por transferencia o financiación factible para afrontar las pérdidas y realizar la reposición del stock de capital afectado. Para los eventos extremos máximo en 50 años de período de retorno para todos los años evaluados y para 100 años de período de retorno para 2010 y 2012, el IDD es menor a 1,0 lo que indica que el país podría tener recursos propios suficientes para afrontar las posibles pérdidas. Se puede observar que el valor del IDD disminuyó de 2000 a 2010 pero presentó un aumento en 2012 en todos los períodos de retorno.

8.2.2 Índice de Desastres Locales (IDL)

El IDL es un índice que capta de manera simultánea la incidencia y la uniformidad de la distribución de efectos a nivel local, es decir da cuenta del peso relativo y la persistencia de los efectos causados por los diferentes fenómenos que originan desastres en la escala municipal. El IDL lo constituye la suma de tres subindicadores calculados con base en las cifras de personas fallecidas (K), personas afectadas (A) y pérdidas económicas (L) en cada municipio del país, causadas por cuatro tipos de eventos genéricamente denominados: deslizamientos y flujos, fenómenos sismos tectónicos, inundaciones y tormentas, y otros eventos. Un mayor valor relativo del IDL significa una mayor regularidad de los diferentes tipos de eventos y la distribución de los efectos entre todos los municipios de un país, debido a los diferentes tipos de fenómeno que los originan.

El Índice de Localización de Desastres (IDL) varía de 0 a 100 para cada tipo de efecto (fallecidos, afectados y pérdidas económicas), y su suma conforma el IDL total, que puede alcanzar un máximo de 300. Valores bajos (0–20 por componente y 0–60 en total) indican una alta concentración de desastres menores en pocos municipios, con escasa distribución espacial de sus efectos. Valores medios (20–50 por componente y 60–150 en total) reflejan una concentración intermedia de eventos y una distribución más amplia de sus impactos. Por su parte, valores altos (más de 50 por componente y más de 150 en total) evidencian que la mayoría de municipios enfrentan desastres menores con efectos similares, lo cual sugiere una vulnerabilidad y amenazas generalizadas en el territorio.

De manera complementaria, se ha formulado el IDL' que da cuenta de la concentración de las pérdidas económicas agregadas a nivel municipal. Su valor ahora va de 0,0 a 1,0. A mayor IDL', mayor es la concentración de pérdidas económicas por desastres menores en muy pocos municipios.

En la Tabla 47 se puede apreciar el IDL para muertos, afectados y pérdidas, así como el IDL total y el IDL' para todos los eventos que se presentaron en el país en los períodos de 1981-1985, 1986-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010 y 2011-2013.

Tabla 47. Valores IDL

	Valores IDL						
	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2013
IDLK	25.6	51.53	38.73	51.74	88.3	65.15	43.64
IDLA	68.12	61.93	13.41	2.25	55.2	71.22	21.81
IDLL	36.74	47.25	8.86	2.32	10.86	56.66	9.18
IDL	130.47	160.71	61	56.32	154.36	193.03	74.63
IDL'	0.91	0.92	0.94	0.91	0.63	0.5	0.76

Fuente: elaboración propia a partir de datos de BID.

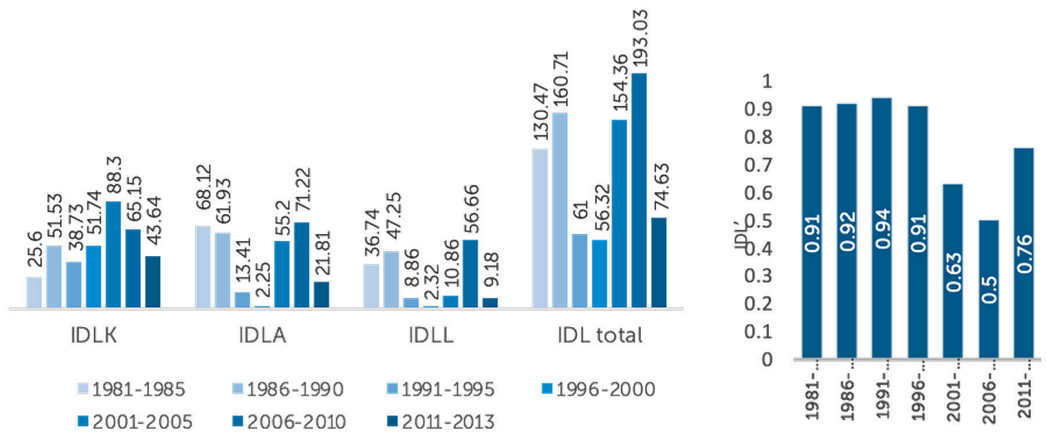


Figura 279. IDL y sus componentes e IDL' para diferentes períodos.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

En el gráfico anterior se puede observar que el IDL por fallecidos es el más similar en todos los períodos evaluados, sus valores indican que existió una distribución regular y uniforme en los efectos entre los diferentes tipos de evento, mientras que en el IDL por afectados se puede observar, según los bajos valores en el indicador en períodos como 1991-1995, 1996-2000 y 2011-2013, que los efectos estuvieron muy concentrados. Al igual que el IDL por afectados, el IDL por pérdidas económicas desde 1991 a 2005 y en el período 2011-2013 los valores estuvieron concentrados.

Aquí es importante recalcar que la cantidad de pérdidas económicas en los períodos 2001-2005 es mayor que muchas de las pérdidas económicas de los demás períodos evaluados, y sin embargo estas estuvieron muy concentradas, especialmente en el tipo de eventos (inundaciones y tormentas). En cuanto al periodo 2011-2013, a pesar de ser únicamente tres años, los efectos, tanto en personas afectadas como en pérdidas económicas alcanzaron cifras bastante altas.

Por otro lado, las pérdidas económicas dentro de los municipios que las presentaron, como lo ilustra el IDL', han tenido una concentración espacial de dichas pérdidas, principalmente en los primeros períodos evaluados. A partir de 2001 se presentó una mayor distribución geográfica de las pérdidas económicas en el país.

8.2.3 Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP)

El IVP es un índice que caracteriza las condiciones prevalentes de vulnerabilidad del país en términos de exposición en áreas propensas, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia. El IVP refleja susceptibilidad por el grado de exposición física de bienes y personas, IVPES, lo que favorece el impacto directo en caso de eventos peligrosos. Igualmente, refleja condiciones de fragilidad social y económica que favorecen el impacto indirecto e intangible, IVPFS, y también refleja falta de capacidad para anticiparse para absorber las consecuencias, responder eficientemente y recuperarse, IVPFR (Cardona, 2005).

En general, cada IVP varía entre 0 y 100, siendo 80 un valor muy alto, de 40 a 80 un valor alto, de 20 a 40 un valor medio y menos de 20 un valor bajo.

Los indicadores de exposición y susceptibilidad (ES), son variables que reflejan una noción de susceptibilidad ante la acción de eventos peligrosos, cualquiera que sea la naturaleza y severidad de estos. "Estar expuesto y ser susceptible" es una condición necesaria para que exista riesgo.

La fragilidad socioeconómica, FS, se representa mediante indicadores de pobreza, inseguridad humana, dependencia, analfabetismo, disparidad social, desempleo; inflación, dependencia, deuda y degradación ambiental. Son indicadores que reflejan debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos.

Los indicadores de falta de resiliencia, FR, son variables que captan de manera macro la capacidad para recuperarse o absorber el impacto de los fenómenos peligrosos, cualquiera que sea la naturaleza y severidad de estos eventos (es decir, en su mayoría no son dependientes de las amenazas). "No estar en capacidad" de enfrentar con solvencia desastres es una condición de vulnerabilidad.

En la siguiente tabla se puede observar el IVP total y sus componentes relacionados con exposición y susceptibilidad, fragilidad socioeconómica, y falta de resiliencia.

Tabla 48. Valores del Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) para diferentes años

	Valores del Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) para diferentes años						
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011
IVPES	31.88	40.26	51.92	48.13	41.79	35.52	36.02
IVPFS	46.43	47.74	46.63	41.14	38.29	36.14	36.05
IVPFR	70.73	68.8	67.84	65.36	57.48	59.56	67.36
IVP	49.68	52.27	55.46	51.54	45.86	43.74	46.47

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BID.

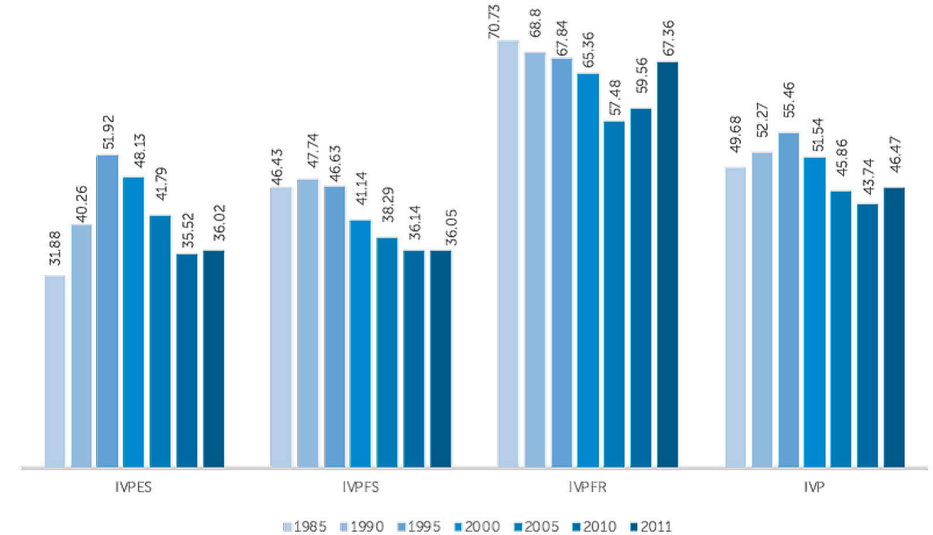


Figura 280. Valores del Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) para diferentes años.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BID.

Según los resultados del IVPES, en el país se detecta un control en el crecimiento poblacional y urbano, y se presenta una disminución de la población en condiciones de pobreza, lo que hace que la vulnerabilidad por exposición y susceptibilidad tenga una tendencia a disminuir que es favorable para el país.

La vulnerabilidad por fragilidad socioeconómica del país ha descendido gradualmente desde 1990.

Para la el IVPFR se puede observar que el país presenta una tendencia continua a la disminución durante el período entre 1985 y 2005, con una reducción importante en el 2005.

Las gráficas del IVP ilustran que la vulnerabilidad prevalente sigue una tendencia a disminuir a lo largo del período de estudio y que la falta de resiliencia es el indicador que más contribuye a la vulnerabilidad prevalente. La tendencia a disminuir es producto de los esfuerzos del país en las mejoras de las condiciones de vida de la población.

8.2.4 Índice de Gestión del Riesgo (IGR)

El IGR es una medición cualitativa de la gestión con base en unos niveles preestablecidos (targets) o referentes deseables (benchmarking) hacia los cuales se debe dirigir la gestión del riesgo, según sea su grado de avance. Para la formulación del IGR se tienen en cuenta cuatro componentes o políticas públicas: Identificación del Riesgo, (IR); Reducción del Riesgo (RR); Manejo de Desastres (MD) y Gobernabilidad y Protección Financiera (PF).

El valor de cada indicador compuesto está en un rango entre 0 y 100, siendo 0 el nivel mínimo de desempeño y 100 el nivel máximo. El IGR total es el promedio de los cuatro indicadores compuestos que dan cuenta de cada política pública. A mayor IGR se tendrá un mejor desempeño de la gestión del riesgo en el país.

La identificación del riesgo (IR), metodológicamente involucra la valoración de las amenazas factibles, de los diferentes aspectos de la vulnerabilidad de la sociedad ante dichas amenazas, y de su estimación como una situación de posibles consecuencias de diferente índole en un tiempo de exposición definido como referente.

La reducción del riesgo (RR), es la acción de anticiparse con el fin de evitar o disminuir el impacto económico, social y ambiental de los fenómenos peligrosos potenciales. Implica procesos de planificación; pero, fundamentalmente, de ejecución de medidas que modifiquen las condiciones de riesgo mediante la intervención correctiva y prospectiva de los factores de vulnerabilidad existente o potencial, y control de las amenazas cuando eso es factible.

El manejo de desastres (MD) corresponde a la apropiada respuesta y recuperación post desastre, que depende del nivel de preparación de las instituciones operativas y la comunidad.

La Gobernabilidad y Protección Financiera (PF) implica, por una parte, la coordinación de diferentes actores sociales que necesariamente tienen diversos enfoques disciplinarios, valores, intereses y estrategias.

A continuación, se presentan las calificaciones de los indicadores

Tabla 49. Valores de IGR y sus componentes

	Valores IGR y sus componentes					
	1995	**2000**	**2005**	**2008**	**2010**	**2013**
IGR_{IR}	29,44	30,12	30,12	36,42	42,72	52,33
IGR_{RR}	13,76	26,21	5,25	9,33	23,34	25,05
IGR_{MD}	11,38	38,31	11,06	33,83	33,83	43,02
IGR_{PF}	35,98	37,43	7,65	12,41	12,9	16,02
IGR	22,64	33,02	13,52	23,00	28,2	34,1

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BID

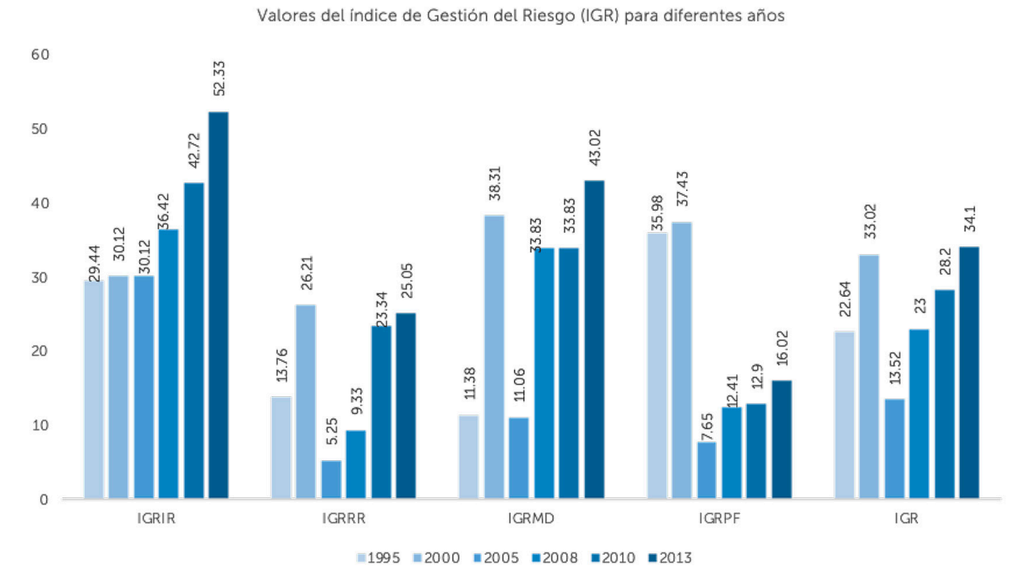


Figura 281. Valores del Índice de Gestión del Riesgo (IGR) para diferentes años.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del BID.

Con el IGR obtenido se puede observar que la gestión de riesgos ha tenido avances desde el año 2005. El IGR promedio del país representa actualmente un nivel de desempeño apreciable, lo cual implica que existe aún mucho trabajo por hacer para lograr que el país logre una sostenibilidad de la gestión del riesgo a niveles altos.

8.2.5 Índice de Gestión de Riesgo (INFORM)

El Índice de Gestión de Riesgos (INFORM) es una herramienta que busca evaluar y medir el riesgo en crisis humanitarias y desastres, proporcionando una visión integral de la vulnerabilidad y la capacidad de afrontamiento de una región o país. Utiliza 96 indicadores en total, los cuales se agrupan en tres dimensiones clave: Peligro y Exposición, Vulnerabilidad, y Falta de capacidad de afrontamiento.

1. Dimensión Peligro y Exposición

a. Categoría "Natural": esta se refiere a los eventos peligrosos de origen natural como terremotos, inundaciones, huracanes, entre otros. Evalúa la probabilidad de que estos eventos ocurran en una región específica.
b. Categoría "Humana": en esta categoría se considera la exposición de las personas a eventos peligrosos. Por ejemplo, la densidad de población en áreas propensas a deslizamientos de tierra. Evalúa la vulnerabilidad de la población ante eventos peligrosos.

2. Dimensión Vulnerabilidad:

a. Categoría "Socioeconómica": mide la susceptibilidad de los sistemas socioeconómicos ante desastres. Incluye factores como la estabilidad económica, la calidad de la infraestructura y la capacidad financiera para hacer frente a eventos adversos.
b. Categoría "Grupos vulnerables": evalúa la vulnerabilidad de grupos específicos de la población como personas mayores, niños, personas con discapacidades, entre otros. Reconoce que ciertos grupos pueden estar más expuestos y ser más susceptibles a los impactos de un desastre.

3. Dimensión Falta de capacidad de afrontamiento:

a. Categoría "Institucional": evalúa la capacidad de las instituciones gubernamentales y organizaciones para prepararse y responder a desastres. Incluye la eficacia de los sistemas de alerta temprana, la capacidad de coordinación y las políticas de gestión de riesgos.
b. Categoría "Infraestructura": se refiere a la capacidad de la infraestructura para resistir y recuperarse de eventos adversos. Esto abarca desde la robustez de los edificios hasta la eficiencia de las redes de comunicación y transporte.

Los países se clasifican en una escala de 0 a 10 para cada dimensión y sus categorías. Valores bajos indican una mejor condición, es decir, un menor nivel de riesgo, mientras que valores altos representan una condición peor, con un mayor nivel de riesgo.

- La dimensión Peligro y Exposición busca identificar y cuantificar los eventos peligrosos y la exposición potencial.
- La dimensión Vulnerabilidad se centra en la susceptibilidad de la sociedad y los sistemas ante los riesgos identificados.
- La dimensión Falta de capacidad de afrontamiento analiza la capacidad de las instituciones y la infraestructura para responder y recuperarse de eventos adversos.

En conjunto, estas dimensiones y categorías permiten una evaluación completa de la situación de riesgo, facilitando la toma de decisiones informada y la priorización de recursos en la prevención, preparación y respuesta ante desastres y crisis humanitarias.

Tabla 50. Valor del Índice INFORM 2024 para El Salvador

Indicador	Puntuación	Categorías
Índice INFORM	**4.0 (medio)**	
Peligro y exposición	3.5	Natural:5.6
		Humano: 0.7
Vulnerabilidad	4.1	Vulnerabilidad
		socioeconómica: 4.5
		Grupos vulnerables: 3.7
Falta de capacidad de afrontamiento	4.3	Institucional: 5.7
		Infraestructura: 2.5

Fuente: INFORM Risk Index 2024, https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index.

8.2.6 Intersecciones entre dimensiones de vulnerabilidad ante eventos y riesgos ambientales (% de hogares)

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en su reporte especial Desarrollo Humano en el Bicentenario: El Salvador 2021, destaca que, la vulnerabilidad de los hogares es mayor cuando se presentan carencias ambientales en diversas dimensiones. Según datos de la Dirección General de Estadística y Censos, en 2020 se observa que el 32.9 % de los hogares en el país no experimenta ninguna carencia ambiental, mientras que el 21 % presenta carencias únicamente en una dimensión, y el 46.1 % enfrenta carencias en dos o tres dimensiones simultáneamente (27.8 % en dos y 18.3 % en tres).

Tabla 51. Porcentaje de hogares con carencias en una, dos y tres dimensiones

Dimensiones	Porcentajes
Carencias en una dimensión	
Prácticas contaminantes	17.1
Exposición a inclemencias y riesgos ambientales	2
Privación en servicios básicos	1.9
Carencias en dos dimensiones	
Prácticas contaminantes / Exposición a inclemencias y riesgos ambientales	2.3
Prácticas contaminantes / Privación en servicios básicos	25.1
Privación en servicios básicos / Exposición a inclemencias y riesgos ambientales	0.4
Carencias en tres dimensiones	
Prácticas contaminantes / Exposición a inclemencias y riesgos ambientales / Privación en servicios básicos	18.3

Fuente: PNUD (2022). Reporte especial: Desarrollo Humano en el Bicentenario. El Salvador 2021.

Es relevante destacar que las intersecciones de dimensiones de vulnerabilidad son más frecuentes en el 80.5 % de los hogares rurales en comparación con el 26 % de los hogares urbanos. A nivel departamental, La Paz sobresale con la mayor proporción de hogares en situación de desequilibrio múltiple en las relaciones materiales con el planeta (72.3 %), seguido por La Unión (68.6 %), Cuscatlán (68.4 %) y Ahuachapán (68.3 %).

A nivel nacional, se observa que siete de cada diez hogares presentan al menos una carencia ambiental. Las carencias más comunes están relacionadas con la dimensión de prácticas contaminantes, que a menudo se manifiestan a través de la disposición inadecuada de basura o aguas grises. Estas acciones, realizadas de manera cotidiana, conllevan consecuencias perjudiciales tanto para la salud de las personas como para el entorno en el que residen. Este panorama destaca la necesidad urgente de abordar integralmente estas problemáticas ambientales en los hogares del país.

En El Salvador, aproximadamente 1.1 millones de personas enfrentan necesidades humanitarias, lo que representa aproximadamente el 16 % de la población total de alrededor de 6.6 millones.

Referencias bibliográficas

Alfonso-Naya, V., F. Courboulex, L. F. Bonilla, M. Ruiz, M. Vallée, and H. Yépes (2012). A large earthquake in Quito (Ecuador): Ground motion simulations and site effects, 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Number 4475, 10 pp.

Allen, T.I., and Wald, D.J., 2007, Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (VS30) and amplification around the globe: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357, 69 p.

Alvarado A., Audin L., Nocquet J. M., Lagreulet S., et al., (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. Tectonics. 33(2): 67-83. Doi: 10.1002/2012TC003224.

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

Ameri, G., Hollender, F., Perron, V., & Martin, C. (2017). Site specific partially nonergodic PSHA for a hard-rock critical site in southern France: adjustment of ground motion prediction equations and sensitivity analysis. Bulletin of Earthquake Engineering. https://doi.org/10.1007/s10518-017 0118-6

Aristizábal C, Bard P-Y, Beauval C, Lorito S, Selva J et al (2016). Guidelines and case studies of site monitoring to reduce the uncertainties affecting site-specific earthquake hazard assessment.
Deliverable D3.4—STREST—harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards. http://www.strest-eu.org/opencms/opencms/results/

Bazzurro, P. and Cornell, C. A. (2004). Ground-Motion Ampli cation in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties. Bulletin of the Seismological Society of America, 94:2110–2123, 2004.

Banco Central de Reserva de El Salvador & Oficina Nacional de Estadística y Censos. (2023). Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples 2022. San Salvador: BCR. Recuperado de https://ophi.org.uk/sites/default/files/2023-12/bcr_publicacion_ehpm_2022.pdf

Banco Central de Reserva de El Salvador & Oficina Nacional de Estadística y Censos. (2024). Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples 2023. San Salvador: BCR. Recuperado de https://ophi.org.uk/Publications/Encuesta-El-Salvador-2023

Beauval C., J. Marinière, H. Yepes, L. Audin, J.M. Nocquet, A. Alvarado, S. Baize, J. Aguilar, J.C. Singaucho, H. Jomard (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador.Bulletin of the Seismological Society of America; 108 (3A): 1443–1464. Doi: https://doi.org/10.1785/0120170259

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, y Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2a), 773-786.

Blanco, P., Fernández, L., Amurrio, C., López, E. Escrivá, A. y Ortiz, J. Consultoría para la elaboración de mapa probabilístico de inundaciones. Contrato MARN/AECID/SLV-056-B No 12/2018. San Salvador

Blenkinsop, Stephen, Elizabeth Lewis, Steven Chan, y Hayley Fowler. «Quality control of an hourly rainfall dataset and climatology of extremes for the UK». International Journal of climatology, 2016.

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

Bommer, J.J. (1996) "Sismología para Ingenieros" Papeles Técnicos UCA, Universidad
Centroamericana "José Simeón Cañas", San Salvador, El Salvador.

Bosse Hr, Lorenz W, Merino A, Mihm A, Rode K, Schmidt-Thomé M, Wiesemann G, Weber Hs (1978) Geologische Karte Der Republik El Salvador, Mittelamerika. Bundesanstalt Für Geowissenschaften Und Rohstoffe, Hannover, 6 Sheets.

Bohnenberger, O. H. (1973). Geology of the Western Altos Cuchumatanes, Northwestern
Guatemala [incluye contextos volcánicos centroamericanos]. GSA Bulletin, 84(3), 805–826. pubs.geoscienceworld.org+4periodicos.capes.gov.br+4pubs.geoscienceworld.org+4

C. Sánchez y otros, "Caracterización de los espacios rurales en El Salvador a partir de estadísticas nacionales" (2021), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Caires, S. 2011. Extreme value analysis: wave data. JCOMM Technical Report No. 57.

Dirección General de Estadística y Censos. (2008). VI Censo Nacional de Población y Vivienda (2007). San Salvador: Ministerio de Economía.

Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis, Bull. Seismol. Soc. Am. 58, 1568–1606.

David Eckstein, V. K. (2021). Global Climate Risk Index 2021, Germanwatch e.V. https://www.germanwatch.org/en/19777.

Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, Deslizamientos, https://www.snet.gob.sv/informacion/?area=deslizamientos

DIGESTYC, 2021. Estimaciones y Proyecciones Nacionales de Poblacion. Revisión 2021. San Salvador.

DOA – MARN. (2023). Guía de Sismos y Tsunamis. San Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

DOA/MARN. 2015. Informe oleaje extremo del tipo mar de leva incrementado: 2 -4 de mayo de 2015.

DOA/MARN. 2017. Variabilidad del campo medio del oleaje frente a la costa de El Salvador. http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/estudios/variabilidad+del+campo+medio+del+oleaje+rente+a+la+costa+de+el+salvador/

ECLAC - CEPAL 2021. v 0.1, https://www.cepal.org/es/fida-nuevas-narrativas/salvador

Edgar C, Cas R, P.H. Olin, Wolff J, Martí J, Simmons J. Causes of complexity in a fallout dominated plinian eruption sequence: 312ka Fasnia Member, Diego Hernández Formation, Tenerife, Spain, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 345, 2017, Pages 21-45, ISSN 0377 0273, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.07.008

EPN (1994). The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview. Geohazards International Publication, San Francisco, USA.

Electric Power Research Institute (2013) Seismic evaluation guidance: Screening, prioritization and implementation details (SPID) for the resolution of Fukushima near-term task force recommendation 2.1: Seismic (EPRI report no. 1025281). Palo Alto, CA: Electrical Power Research Institute.

ERN (2012). Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local.

Estadísticas Económicas CEPAL. Perfil económico: El Salvador.
Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2007) HAZUS-MH MR3 Technical Manual. National Institute of Building Sciences. Washington, DC: FEMA.

Felpeto, A., Araña, V., Ortiz, R. et al. Assessment and Modelling of Lava Flow Hazard on Lanzarote
(Canary Islands). Natural Hazards 23, 247–257 (2001). https://doi.org/10.1023/A:1011112330766 Federal Emergency Management Agency. (2013). HAZUS-MH 2.1: Multi-hazard loss estimation methodology, flood model – Technical manual. U.S. Department of Homeland Security.
https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_flood-model_user-manual_2.1.pdf

Fisher, R.A.; Tippett, L.H.C. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest and smallest member of a sample. Proc. Cambridge Phil. Soc. 24: 180-190.

Global Facility for Disaster Risk Reduction - GFDRR (2014). Open Data for Resilience Initiative: Field Guide. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank 1818 H Street NW, Washington DC 20433. Fuente: www.gfdrr.org

Global Volcanism Program. (s. f.). Volcanoes of El Salvador. Smithsonian Institution. Recuperado el 3 de julio de 2025, de https://volcano.si.edu/volcanolist_countries.cfm?country=El%20Salvador

Goda, Y. 1988. On the Methodology of Selecting Design Wave Height. Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, pp 899 913.

Guéguen, P. (1997). Microzonificación de Quito (Ecuador). Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) and Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional.

Heath, D., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., and Scmocyk, G. (2020). "A Global Hybrid VS30 Map with a Topographic-Slope-Based Default and Regional Map Insets", Earthquake Spectra, vol. 36, 3: pp. 1570-1584.

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

Huff, F. A. «Time distribution of rainfall in heavy storm water». Water Resources Research, 1967: 1007-1019.

INFORM 2023. INFORM Risk Index 2024. https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index. INFORM is a collaboration of the Inter-Agency Standing Committee Reference Group on Risk, Early Warning and Preparedness and the European Commission. The European Commission Joint Research Centre is the scientific lead of INFORM.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador – INEC (2010). Censo Nacional de Estadísticas y Censos de 2011. Take from www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/

Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) y Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) (2012). Evaluación del riesgo por tsunami en la costa de El Salvador Fase II: Vulnerabilidad y riesgo.

Jones, Mari R, Hayley J Fowler, Christopher Kilsby, by Stephen Blenkinsop. «An Assessment of changes in seasonal and annual extreme rainfall in the UK between 1961 and 2009». International
Journal of Climatology, 2012.

Kamai, R., Abrahamson, N. A., and Silva, W. J., 2014. Nonlinear horizontal site amplification for constraining the NGA-West2 GMPEs, Earthquake Spectra 30, 1223–1240.

Kattan, C. López M., Menjivar L. (2016), Seismic Risk Scenarios for the City of Santa Tecla, El Salvador, Conference Paper - 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE-2017, Santiago Chile.

Kattán, C. (2012). Estudio de Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de San Salvador Kottke, A. and Rathje, E. (2013). Comparison of time series and random-vibration theory site response methods. Bull Seismol Soc Am 103(3):2111–2127.

Lara, M. [1987] "The San Salvador Earthquake of October 10, 1986 – History of Construction Practices in San Salvador", Earthquake Spectra, v. 3, no. 3, p. 491-496

Laurendeau, A., Courboulex, F., Bonilla, L. F., Alvarado, A., Alfonso, Naya V., Mercerat, D., et al. (2017). Low frequency seismic amplification in the Quito basin (Ecuador) revealed by accelerometric recordings of the RENAC network. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(6), 2917–2926.

Leder, N., Smircic, A. and Vilibic, I. 1998. Extreme values of surface wave heights in the Northern Adriatic. GEOFIZIKA. Volume 15.

Leon, A. (2018). Generacion de mapas Vs30 y microzonas sísmicas en el distrito metropolitano de Quito, Ecuador, proyecto de grado, Universidad Simón Bolívar.

Li, Yafei, Hayley Fowler, Daniel Argueso, y Stephen, Evans, Jason Blenkinsop. «Strong intensification of hourly rainfall extremes by urbanization». American Geophysical Union, 2020.

Liu, Z., & Burcharth, H. F. 1998. Encounter Probability of Significant Wave Height. Aalborg: Department of Mechanical Engineering, Aalborg University.

López, A, Chávez, T. (2022) Modelo de exposición física y caracterización de vulnerabilidad aplicado a municipios del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) [Technical Report]. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

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

MARN (2012). Política Nacional del Medio Ambiente. El Salvador.

MARN, (2013 a). Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de El Salvador. El Salvador

MARN (2013 b). Estrategia Nacional de Cambio Climático. El Salvador

MARN (2017), Informe Nacional del Estado de Riesgos y Vulnerabilidades. El Salvador

MARN (2022). Resumen Climatológico Anual 2022 (Datos preliminares).

MARN. Informe del Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades. San Salvador: MARN, 2017.

Martucci, G., Carniel, S., Chiggiato, J., Sclavo, M., Lionello, P., Galati, M.B. 2010. Statistical trend analysis and extreme distribution of significant wave height from 1958 to 1999 - An application to the Italian Seas. Ocean Science, 6 (2), pp. 525-538.

McGuire, R. K. (2004), Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

Mercurio, C.; Martinello, C.; Rotigliano, E.; Argueta-Platero, A.A.; Reyes-Martínez, M.E.; Rivera Ayala, J.Y.; Conoscenti, C. Mapping Susceptibility to Debris Flows Triggered by Tropical Storms: A Case Study of the San Vicente Volcano Area (El Salvador, CA). Earth 2021, 2, 66-85. https://doi.org/10.3390/earth2010005

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda – MIDUVI (2013). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Capítulo 2 Peligro Sísmico. Tomado de https://www.docsity.com/es/nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/5550516/

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Proyecto de obtención de imágenes LIDAR y fotogrametría para la producción de modelos de elevación digital y de superficies ortofotografías, 2014.

Mixco, L. (2021), Evaluación Probabilística de la Amenaza Sísmica de El Salvador. Informe realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Mixco, L. (2021b), Generación de mapa de velocidades promedio a 30 metros de profundidad (Vs30) de El Salvador. Informe realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Mixco, L. (2021c), Modelos analíticos de respuesta de sitio a nivel nacional. Informe realizado por el MARN. Modificado de https://srt.snet.gob.sv/tallerdivulgacion/Amenaza/6.%20Modelos%20anal%c3%adticos%20para%20an%c3%a1lisis%20de%20respuesta%20de%20sitio%20a%20nivel%20nacional%202020.%20%20.pdf

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

Molina, E. (1997). Tsunami Catalogue for Central America 1539-1996. Reduction of Natural Disasters in Central America, Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation, Phase II 1996-2000. Mora C., S., & Vahrson, W. G. (1994) Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulletin-Association of Engineering Geologists, 31(1): 49–58.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito – MDMQ (2015). Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Tomado de http://www.emaseo.gob.ec/documentos/lotaip_2015/s/actas_y_resoluciones/Plan_Metropolitano_Desarrollo_y_Ordenamiento_Territorial_DMQ_2015_2025.pdf

National Center for Environmental Information. (s.f.). NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database, 2100 BC to present. NOAA. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (2022). Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2022. Nuestro mundo en peligro: Transformar la gobernanza para un futuro resiliente. Ginebra.

Oficina Nacional de Estadística y Censos (ONEC), Encuesta de Hogares y Propósitos Múltiples, 2022.

Oficina Nacional de Estadística y Censos (ONEC), Proyecciones de población 2021 del Censo Nacional de Población y Vivienda 2007.

ONU-Habitat Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos y Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (2022), GESTIÓN METROPOLITANA INTEGRADA: El caso del Área Metropolitana de San Salvador.

OPAMSS. Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador. San Salvador: OPAMSS, 2016. Osuna, P. 2010. Implementación y validación del modelo WAM ciclo 4.5 en el Océano Pacífico. Departamento de Oceanografía Física. División de Oceanología. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.

Oxford Poverty and Human Development Initiative (OPHI) (2021), Global MPI Country Briefing 2021: El Salvador (Latin America and the Caribbean).

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D (2014). OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. Seismol Res Lett 85:692–702

Patino, L. C., Carr, M. J., and Feigenson, M. D. (2000). "Local and regional variations in Central American arc lavas controlled by variations in subducted sediment input." Contributions to Mineralogy and Petrology, 138(3), 265–283

PNUD (2022). Reporte Especial: Desarrollo Humano en el Bicentenario. El Salvador 2021.

Rathje, E. M., and M. C. Ozbey (2006). Site-specific validation of random vibration theory-based seismic site response analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 132, no. 7, 911–922. Renderos, Adriel. Desarrollo de script para la clasificación de la calidad del dato de la red Hidrométrica Pluviométrica. San Salvador: MARN, 2022.

Renderos, G.; Orellana, P. (2024). Análisis temporal y espacial de las lluvias en el Área Metropolitana de San Salvador. Amenazas Naturales 1(1), pp. 9-22.

Renderos, Guillermo Adriel. Monitoreo Hidrológico de Impactos por Inundaciones. San Salvador: MARN, 2020.

Rivera, J. (2017). Mapas de amenaza. Lahares en zonas críticas. Picacho y San Vicente. DGOA/MARN. San Salvador.

Rivera, J. (2018). Mapas de amenaza. Lahares en zonas críticas. Santa Ana, San Miguel y Conchagua. DGOA/MARN. San Salvador.

Rodriguez-Marek A, Rathje EM, Bommer JJ, Scherbaum F and Stafford PJ (2014). Application of single-station sigma and site response characterization in a probabilistic seismic hazard analysis for a new nuclear site. Bulletin of the Seismological Society of America 104(4): 1601–1619.

S. Reese y D. Ramsay, "RiskScape: Flood fragility methodology". National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd; Technical Report: WLG2010-45; NIWA Project: RSKA113, Wellington, Nueva Zelanda, 2010.

Sa'adi, Zulfaqar, Shamsuddin Shahid, Tarmizi Ismail, Eun-Sung Chung, y Xiao-Jun Wang. «Trends
analysis of rainfall and Rainfall extremes in Sarawak, Malasysia using modified Mann – Kendall test». Meteorology and Atmospheric Physics, 2017.

Silva V, Crowley H, Pagani M, Monelli D and Pinho R (2014) Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. Natural Hazards 72(3): 1409–1427.

Silva, V, Horspool, N. Combining USGS ShakeMaps and the OpenQuake-engine for damage and loss assessment. Earthquake Engng Struct Dyn. 2019; 48: 634– 652. https://doi.org/10.1002/eqe.3154

Spence R (2007) Earthquake loss estimation for reinforced concrete buildings: Some problems— Morley symposium on concrete plasticity and its applications. Cambridge University Department of Engineering, technical report CUED/D-STRUCT/TR.222. Cambridge: Department of Engineering, Cambridge University.

Staller, A. V., Modelización de las deformaciones corticales en El Salvador (Centroamérica) mediante la integración de datos geodésicos (GPS), geológicos y sismológicos. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.

Tatsumi, Y. (2005). "The subduction factory: How it operates in the evolving Earth." GSA today, 15(7), 4–10.

Thevasiyani T. Perera K. 2014. Statistical analysis of extreme ocean waves in Galle, Sri Lanka. Weather and Climate Extremes. Vol. 5-6. Pp. 40–47. Elsevier.
Thompson E. F. 2002. Hydrodynamic Analysis and Design Conditions. Coastal Engineering Manual: Chapter II-8. Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center.

Torres-Corredor, R.A., Ponce-Villarreal, P., y Gómez-Martínez, D.M. 2017. Vulnerabilidad

física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. Boletín de Geología, 39(2): 67-8. doi: http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017005

Tromans, I.J., Aldama-Bustos, G., Douglas, J., Lessi-Cheimariou, A., Hunt, S., Daví, M., and Robertson, C. (2019). Probabilistic seismic hazard assessment for a new-build nuclear power plant site in the UK. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(1), 1-36.

UNDRR (2021), Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR).

Uppala, S. M., et al. 2005. The ERA-40 re-analysis, Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 131, 2961–3012. Villagómez, D. (2003). Evolución geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino central en Ecuador (zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio), Eng. Thesis, Escuela Politécnica Nacional Facultad de Geología, Quito Ecuador, 133.

Wald D, Quitoriano V, Heaton T, Kanamori H, Scrivner C, Worden BC. Trinet "ShakeMaps": rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California. Earth Spectra. 1999; 15: 537- 556.

Webb, T., Sorto, M., Grande, L. 2016. Análisis de riesgo en infraestructura prioritaria. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

WAM-DI Group. 1988. The WAM model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model, J. Phys. Oceanogr., 18, 1775–1810.

Wang, X. L., Feng, Y., Chan, R., Isaac, V. 2016. Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets. Atmospheric Research 181. 133–153.

Waskom, Michael. Seaborn V0.13.2. s.f. https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.kdeplot.html (Último acceso: Octubre de 2023).

Yepes, H., L. Audin, A. Alvarado, C. Beauval, J. Aguilar, Y. Font, and F. Cotton (2016). \, Tectonics 35, Doi: 10.1002/2015TC003941

Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A.B, Tarque N, Hube M.A, Coronel G, and SantaMaría H, "Modelling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment", Earthquake Spectra, Vol. 33, n°. 1, 2017, pp. 299-322.

GOBIERNO DE
EL SALVADOR

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE