

CATÁLOGO DE MAPAS DE PELIGROSIDAD E INUNDACIÓN POR TSUNAMIS EN LA COSTA DE EL SALVADOR

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA COSTA DE EL SALVADOR
FASE I: PELIGROSIDAD

Catálogo de Mapas de Peligrosidad e Inundación por Tsunamis en la costa de El Salvador

Proyecto:

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA COSTA DE EL SALVADOR FASE I: PELIGROSIDAD

entre:

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria

Ministerio de Fomento de España

y con financiamiento de

La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO



Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales



Evaluación del Riesgo de Tsunamis en la costa de El Salvador Fase I: Peligrosidad

Fecha de elaboración del Catálogo:	Abril de 2011
Fecha de inicio del proyecto:	1 de Octubre de 2009
Duración:	20 meses
Nombre del Director del Proyecto:	Profesor Mauricio González Rodríguez
Nombre institución española coordinadora:	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC)
Coordinador local por parte de El Salvador:	Lic. Francisco José Gavidia Medina
Nombre Institución salvadoreña:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Entidad financiadora del Proyecto:	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID)

Grupos de Trabajo

Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria: Ernesto Mauricio González Rodríguez, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor titular de la Universidad de Cantabria, e investigador del IHC (Director del Proyecto); José Antonio Álvarez. Doctor en Geología e investigador en el IHC; Omar Q. Gutiérrez Gutiérrez. Oceanógrafo físico, candidato a doctor e investigador en el IHC; Iñigo Aniel Quiroga, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos e investigador en IHC

Instituto Geográfico Nacional: Emilio Carreño, Doctor en Ciencias Físicas (Director de la Red Sísmica de España)

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Francisco Gavidia Medina, Licenciado en Oceanología (Coordinador de Proyecto), Jeniffer Alejandra Larreynaga, Ingeniero civil, Miguel Castro y Paolo Estrada, estudiantes de Física.



Contenido

Resumen Ejecutivo

Antecedentes , contexto y justificación del Proyecto	3
Propósito del Catálogo y Contenido global	4
Metodología de ejecución del Proyecto	5
Descripción de mapas temáticos agregados	6

<i>Mapas batimétricos y mallas de propagación de tsunamis (Mapa 1)</i>	7
---	----------

Mapas de localización de fuentes tsunamigénicas lejanas, regionales y locales (Mapa 2)	8
---	----------

Mapas temáticos de peligrosidad por tsunamis

<i>Mapa de amenaza por tsunamis de la costa de El Salvador (Mapa 3)</i>	9
--	----------

Mapa de elevación máxima por tsunamis

Mapa de la planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 4.1)	10
Mapa de La Libertad (Mapa 4.2)	11
Mapa del Golfo de Fonseca (Mapa 4.3)	12

Mapa de profundidad máxima del agua por tsunamis

Mapa de planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 5.1)	13
Mapa de La Libertad (Mapa 5.2)	14
Mapa del Golfo de Fonseca (Mapa 5.3)	15

Mapa de peligrosidad de arrastre de personas

Mapa de la planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 6.1)	16
Mapa de La Libertad (Mapa 6.2)	17
Mapa del Golfo de Fonseca (Mapa 6.3)	18



Antecedentes , contexto y justificación del Proyecto

Se han registrado 37 tsunamis en la costa pacífica de Centroamérica entre los años 1539 y 1996. El Salvador ha sido impactado por 11 tsunamis entre 1859 y 1997, nueve de ellos registrados en el siglo XX, todos ellos generados por terremotos. Estos tsunamis ocasionaron pérdidas de vidas humanas y destrucción de infraestructuras y cultivos, siendo dos de ellos altamente destructivos, uno en 1859 que afectó la zona oriental del país, y otro en 1902, con gran impacto en Acajutla. Si se generara frente a la costa de El Salvador, un tsunami similar al ocurrido en la costa de Nicaragua en 1992, dejaría un alto saldo de muertos y destrucción, tal como sucedió con este evento en Nicaragua.

Los tsunamis son una realidad en la costa salvadoreña y su potencial destructivo no debe priorizarse por su baja frecuencia de ocurrencia sino por su grado de amenaza y de vulnerabilidad para una gestión adecuada del riesgo. Evaluar la peligrosidad y el riesgo de tsunamis, implementar medidas de mitigación y preparación de la población en materia de prevención y la operación de un Sistema de Alerta de Tsunamis, son los elementos básicos para reducir la pérdida de vidas humanas y daños en bienes materiales.

El Salvador posee 29 municipios costeros expuestos a la amenaza por tsunamis, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales es el responsable de emitir la alarma de tsunamis lejanos en El Salvador, emitidas por el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC). Sin embargo, El Salvador requiere fortalecer las capacidades para la emisión de alertas de tsunamis generados por fuentes cercanas (frente) a la costa de El Salvador, los cuales tienen potencialmente una gran capacidad de destrucción. La carencia de un Sistema de Alerta Temprana para atender estos eventos de origen cercano, unido a la falta de medidas de mitigación y preparación de la población a lo largo de su costa, lo hacen un país vulnerable frente al riesgo.

Bajo este contexto el Ministerio solicitó apoyo técnico al Instituto de Hidráulica Ambiental Cantabria (IHC) y al Centro Nacional de Información Geográfica (IGN) de España, instancias que tienen una amplia experiencia en la transferencia científico-tecnológica, desarrollando herramientas, instrumentos y metodología para la gestión de riesgos naturales y alcanzar objetivos de sostenibilidad a largo plazo en las costas.

Así, en abril de 2009 el Instituto de Hidráulica Ambiental Cantabria (IHC) presentó una propuesta de Proyecto a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) para trabajar en El Salvador evaluando la peligrosidad de Tsunamis en la costa, la cual fue aprobada el 4 de agosto de 2009 y publicado en el Boletín Oficial de Estado en España del 29 de septiembre de 2009.

El Proyecto "Evaluación del Riesgo de Tsunamis en la costa de El Salvador Fase I: Peligrosidad" ha sido ejecutado por el Instituto de Hidráulica Ambiental Cantabria (IHC), con la participación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (IGN) del Ministerio de Fomento de España.

El objetivo del Proyecto en su Fase I, es evaluar la peligrosidad frente a tsunamis en la costa salvadoreña, con el fin de predecir o pronosticar su comportamiento sobre todo en cuanto a la capacidad de destruir y/o causar daños, siendo este el primer paso para reducir el riesgo de tsunamis en la costa de El Salvador. En el estudio de peligrosidad se evalúan parámetros máximos de alturas de ola, profundidad del agua, extensión espacial, zonas de arrastre de personas y mínimos tiempos de llegada de un tsunami a la costa. Con todo esto es posible identificar las zonas más expuestas y proporcionar a las comunidades costeras herramientas de gestión para la toma de decisiones preliminares respecto a medidas de mitigación.

Como resultados del proyecto se elaboran mapas de peligrosidad (global) e inundación (local), el estudio de medidas preliminares de mitigación a escala nacional y local, un programa de formación de personal técnico local, y la transferencia tecnológica de herramientas numéricas y metodologías adaptadas al sistema costero salvadoreño, que permitirá al MARN, evaluar el riesgo frente a tsunamis y aplicar dichas herramientas para el diseño de un futuro sistema de alerta local.

Los resultados de la Fase I son la base para el desarrollo de la Fase II del proyecto, titulada "Evaluación del Riesgo de Tsunamis en la costa de El Salvador Fase II: Vulnerabilidad, Riesgo y Mapas de Evacuación", con el cual se evaluará el riesgo por tsunamis en la costa de El Salvador y se elaborarán mapas de vulnerabilidad y riesgo (humano, socioeconómico, ambiental e infraestructuras), que permitirán establecer medidas de mitigación a escala nacional y local frente a los tsunamis.



Propósito del catálogo y contenido global

Este documento recoge los mapas temáticos desarrollados en el Proyecto “Evaluación del Riesgo de Tsunamis en la costa de El Salvador Fase I: Peligrosidad”. El objetivo de este documento es dar una breve descripción de la metodología de ejecución de Proyecto, así como presentar los resultados obtenidos del mismo: mapas de peligrosidad por tsunamis a escala global y mapas de inundación por tsunamis para tres sitios costeros de especial relevancia para El Salvador: Acajutla, La Libertad y La Unión.

Además se presentan los mapas batimétricos realizados de la cuenca del Pacífico y de Centro América utilizados para modelar escenarios históricos de tsunamis y generar mapas de peligrosidad, así como los mapas batimétricos de las zonas de detalle utilizados para la generación de mapas de inundación. En el proyecto se modelaron las diferentes fuentes sismo-tectónicas a lo largo de 4 niveles de mallas, utilizando seis mallas en total (véase Mapa 1).

Adicionalmente se presentan los mapas con la localización de las 23 fuentes sismo-tectónicas utilizadas para generar las superficies iniciales del mar: cinco fuentes lejanas asociadas a: el terremoto de 1960 en Chile (Mw 9.5), el de 2010, también en Chile (Mw 8.8), el terremoto de Kamchatka en 1952 (Mw 9.0), el de Alaska en 1964 (Mw 9.0) y el de Samoa en 2009 (Mw 8.1); dos fuentes intermedias asociadas a: el terremoto de México en 1787 (Mw 8.7), y el terremoto ocurrido en Colombia en 1906 (Mw 8.8); y dieciséis fuentes cercanas asociadas a los peores terremotos que potencialmente pueden ser generados en la zona de subducción de El Salvador, en la denominada zona Outer rising (12 fuentes), y fuentes cercanas en El Salvador thrust, Chiapas thrust, Guatemala thrust y Nicaragua thrust (véase Mapa 2).

Finalmente, y como uno de los resultados del Proyecto en su primera fase, se dan a conocer el mapa de Amenaza por tsunamis para toda la costa de El Salvador (Mapa 3) y los mapas de inundación por tsunamis en tres sitios costeros de gran importancia para el desarrollo económico del país: Planicie costera occidental y Acajutla (Mapas 4), La Libertad (Mapas 5) y Golfo de Fonseca (Mapas 6).

Metodología de ejecución del Proyecto

La elaboración de mapas temáticos de peligrosidad por tsunamis en el litoral salvadoreño, 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.

Información base para elaboración de mapas

La Metodología que se siguió en la obtención de la información base para la elaboración de los mapas de peligrosidad e inundación es:

- Determinación eventos históricos de tsunamis de origen cercano y lejano que han afectado las costas de El Salvador, a través de una investigación de catálogos de eventos de tsunamis históricos y revisión bibliográfica.
- Caracterización de fuentes sismo-tectónicas de origen cercano y lejano de generación de tsunamis, esta identificación y caracterización implicó determinar las fuentes, los eventos extremos de tsunami que se pueden generar en cada fuente y con base en las características geológicas la determinación de mecanismos focales de generación.
- Recopilación y digitalización de cartas náuticas, extracción de los valores de profundidad de cada carta náutica e interpolación espacial para crear las mallas de batimetría.
- Acoplamiento de mallas regionales (de menor tamaño: Acajutla, La Libertad, La Unión) con las de mayor tamaño (El Salvador, Centroamérica y cuenca del pacífico).
- Combinación de los datos provenientes de cartas náuticas (puntos) con los datos provenientes de mallas, específicamente de la zona de subducción y de conjunto de datos batimétricos (data sets) como GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans) y ETOPO (modelo de relieve global de la superficie de la Tierra a 1 minuto de arco que integra la topografía en terrestre y la batimetría oceánica).

Simulación numérica de escenarios

Definición de escenarios

Los mapas de peligrosidad e inundación que se presentan se basan en la caracterización de escenarios asociados a los peores casos creíbles de tsunami de origen cercano, que corresponden en cada fuente, al terremoto de máxima magnitud que se puede generar en esa fuente, el cual se propaga en condiciones de nivel del mar de pleamar viva equinoccial (condición mas desfavorable). Aunque estos peores escenarios son de baja probabilidad de ocurrencia, permiten estar del lado de la seguridad en cuanto máximas cotas de inundación

y alturas de ola posibles en la zona. Para las fuentes regionales y lejanas, denominaremos caso "creíble" a aquel que se basa en un evento histórico de terremoto de gran magnitud y proximidad a esa fuente.

Generación, propagación e inundación

La propagación de los escenarios se llevó a cabo mediante el modelo numérico C3 (CANTABRIA, COMCOT, TSUNAMI-CLAW), desarrollado por el IH-Cantabria. Modelo que requiere de unas mallas generadas a partir de la topo-batimetría, sobre las cuales se generan los distintos escenarios de tsunami, y se propagan desde las fuentes hasta la costa. Para los mapas de inundación locales, el modelo calcula la inundación en función de la topografía de la zona de tierra cercana a la costa. Para los mapas de amenaza globales, el modelo proporciona las alturas de ola en cercanías a la costa, donde a partir de la geometría del perfil de costa y aplicando formulaciones empíricas contrastadas, se obtiene un estimativo de la cota de inundación.



Descripción de mapas temáticos agregados

Concepto de mapa agregado

Los mapas que se presentan en este documento son mapas que denominamos “agregados”, dado que combinan en un solo mapa los 23 peores casos “creíbles”. En cada punto de la malla en agua y tierra, se tendrá un valor representativo del tsunami (por ejemplo altura de ola máxima o profundidad máxima), de las 23 simulaciones numéricas. El mapa agregado representa en cada punto de la malla, el peor valor de los 23 eventos. Estos mapas nos permiten visualizar en un solo imagen la peor condición en cualquier punto de la costa.

Mapa temático global (mapa agregado)

Mapa de amenaza por tsunamis de la costa de El Salvador (Mapa 3)

En este mapa agregado se representa para toda la costa de El Salvador:

- **La elevación máxima de altura de ola en el mar** (η en metros en Figura 1), tomando como base o nivel medio del mar, el nivel de pleamar viva equinoccial en la cota + 2.0 m. En la figura se representa por una escala de colores.
- **La cota de máxima inundación o “Run-up”** (Ru en metros en Figura 1), es la elevación hasta el punto donde llegó la máxima inundación en tierra. Elevación también medida desde el nivel de Pleamar viva equinoccial. Este parámetro se representa por las barras verticales a lo largo de la línea de costa.
- **Zona de máxima inundación**, se representa en el mapa como la zona sombreada en tierra. Genera el límite máximo de inundación en tierra por un tsunami.
- **Tiempo mínimo de viaje del tsunami (en minutos)**. Es el tiempo mínimo que tarda un tsunami en viajar desde la fuente más cercana, a un punto de la costa. Este es un parámetro interesante a efectos de mapas de evacuación y tiempos de respuesta ante un alerta. Este será el tiempo del tsunami más cercano.

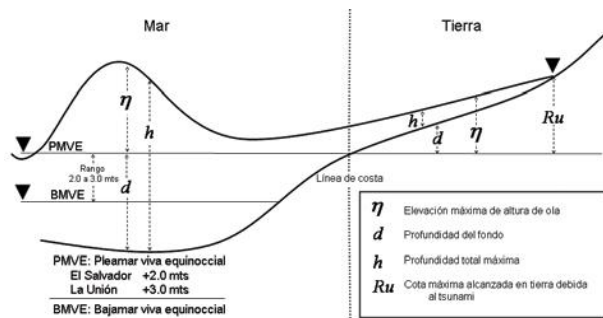


Figura 1. Descripción de parámetros en la inundación

Dado que no se cuenta con topo-batimetrías de detalle a lo largo de todo el litoral de El Salvador, que permita al modelo C3 inundar la costa (excepto en las tres localidades seleccionadas), ha sido necesario combinar los resultados del modelo con relaciones empíricas obtenidas en las tres localidades (Planicie costera occidental y Acajutla, La Libertad y Golfo de Fonseca) donde sí se ha inundado con el modelo. En este caso, la inundación máxima en la costa (Ru), se obtiene a partir de aplicar una formulación empírica tomando la altura de ola propagada por el modelo C3 en una profundidad cercana a la costa. Luego se aplica un algoritmo de interpolación que tiene en cuenta los máximos Run-up de los demás puntos cercanos. La formulación empírica ha sido obtenida a partir de las tres localidades donde ha sido posible inundar, formulación muy similar a la utilizada por Synolakis (1987), pero con coeficientes ajustados a El Salvador.

Mapas de inundación por tsunamis en planicie costera occidental y Acajutla, La Libertad, y Golfo de Fonseca (Mapas Agregados)

Mapa de elevación máxima por tsunami (Mapas 4.1, 4.2 y 4.3)

Es la misma variable η descrita en la sección anterior y Figura 1, pero en este caso calculada con el modelo C3 en tierra.

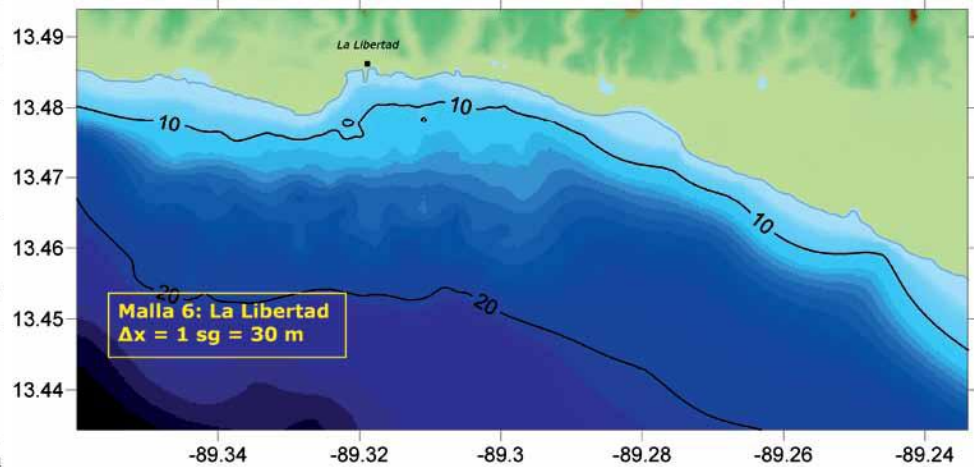
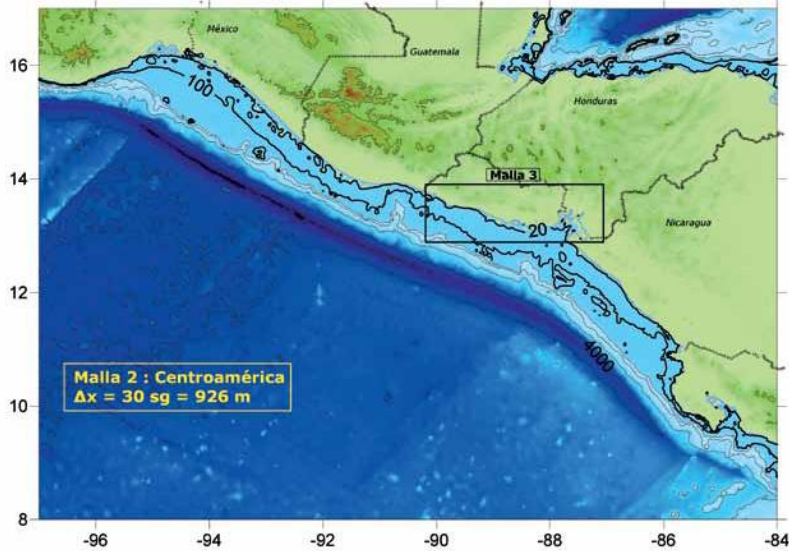
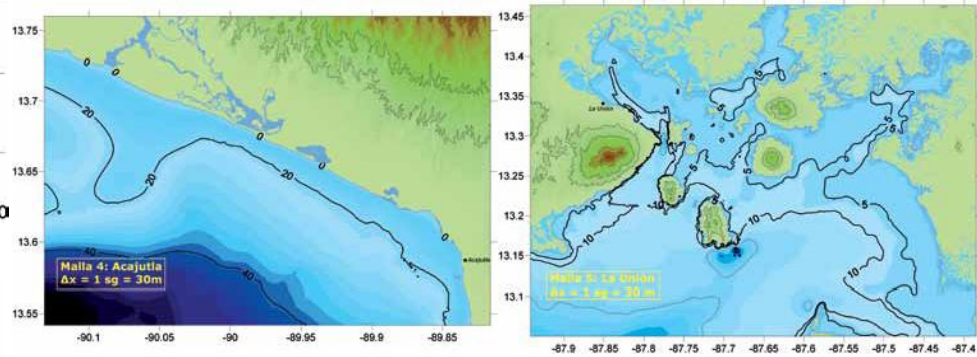
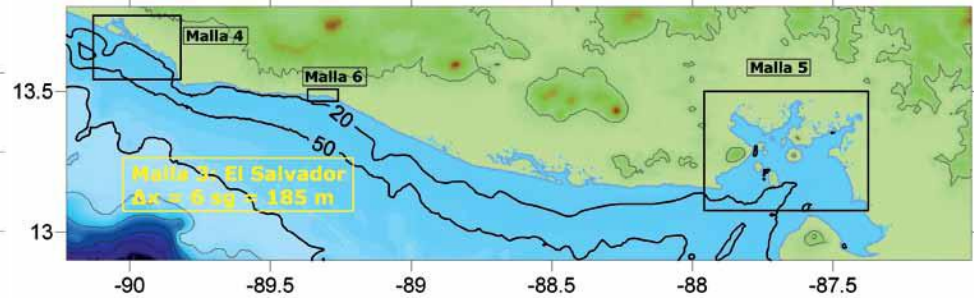
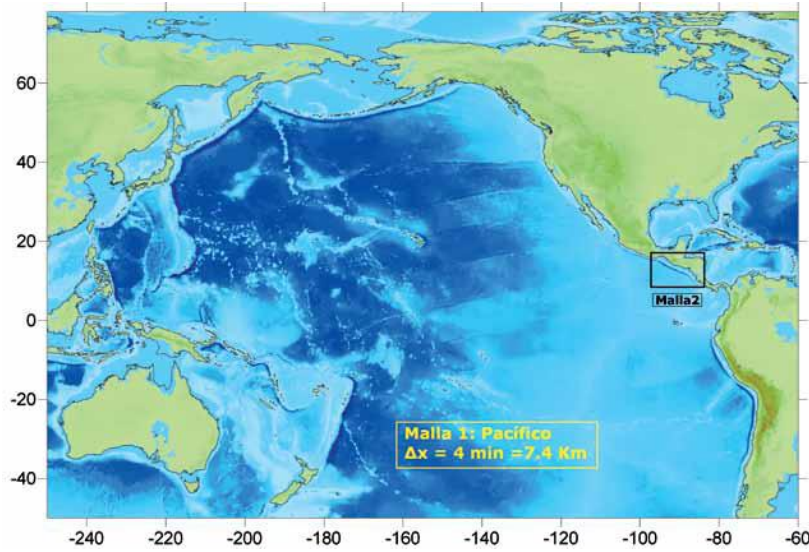
Mapa de profundidad máxima del agua por tsunami (Mapas 5.1, 5.2 y 5.3)

En estos mapas se representa la profundidad total máxima como $h = \eta + d$ en metros (véase Figura 1). Nos permite ver en cada punto cual sería la máxima profundidad de agua que se podría tener por un tsunami.

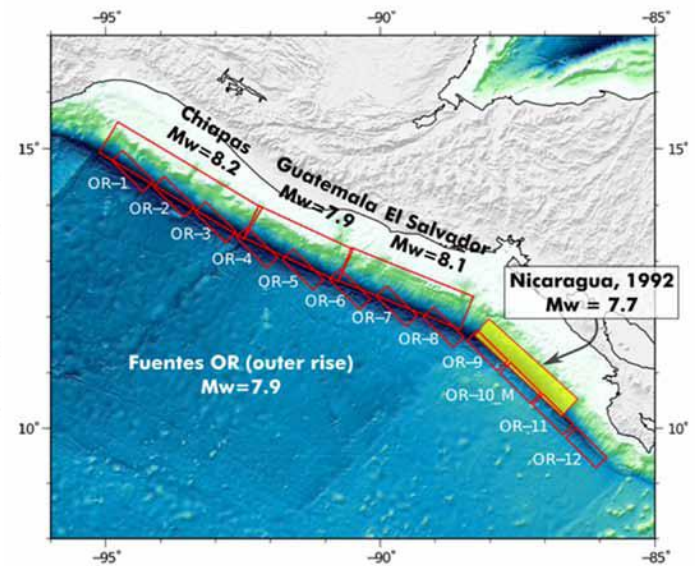
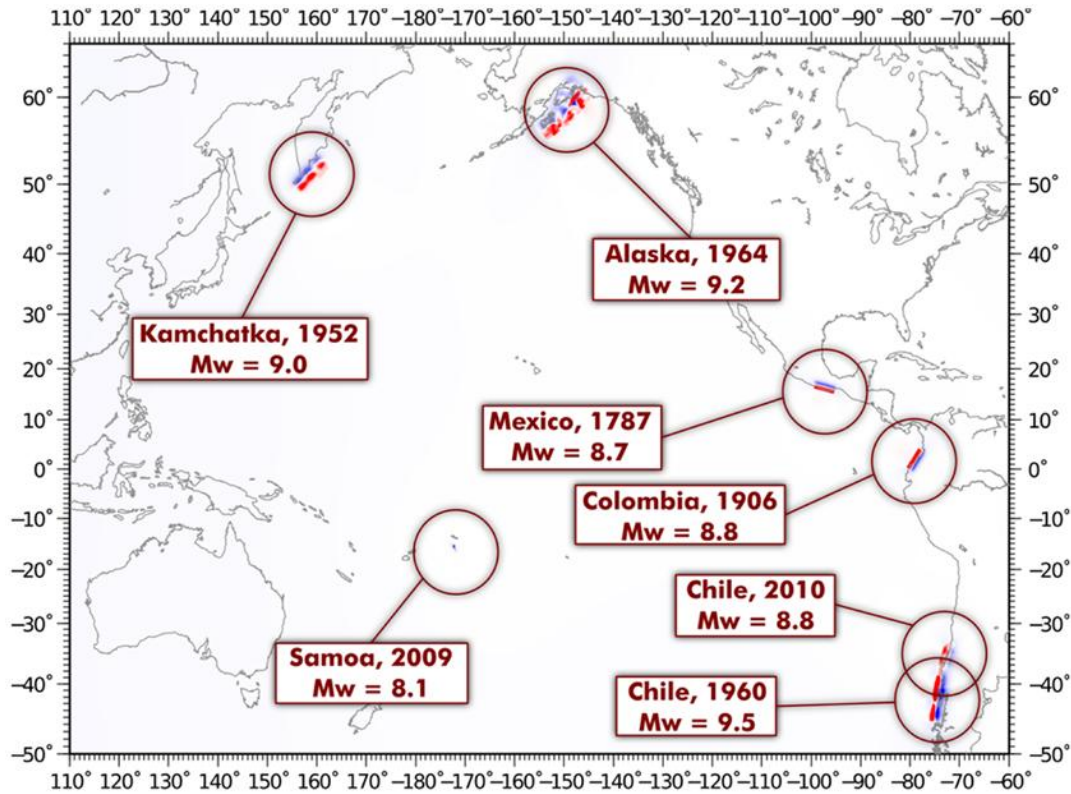
Mapa de nivel peligrosidad de arrastre de personas (Mapas 6.1, 6.2 y 6.3)

En estos mapas se representa en colores distintos niveles de peligrosidad del arrastre de personas por los tsunamis. Investigadores como Jonkman et al (2008) han encontrado relaciones entre la peligrosidad de arrastre de personas por tsunami, con el parámetro $(U \cdot h)$ max., donde (U) es la velocidad del flujo de agua multiplicada por la profundidad total del agua (h) , en cada punto en tierra de la costa. En los mapas se muestran los distintos rangos de peligrosidad para este parámetro.

Mapas batimétricos y mallas de propagación de tsunamis (Mapa 1)

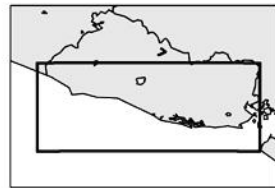
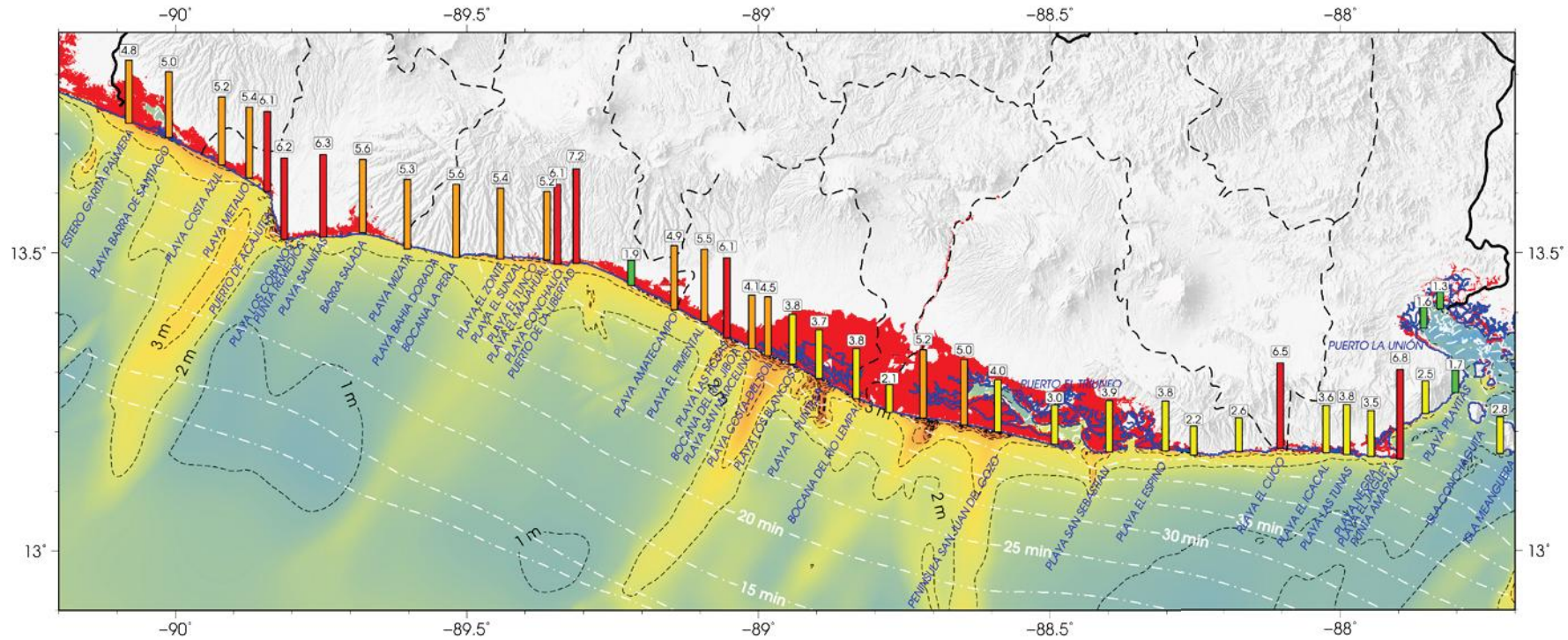


Mapas de localización de fuentes tsunamigénicas lejanas, regionales y locales (Mapa 2)



Mapa de amenaza por tsunami en la costa de El Salvador (Mapa 3)

Elevación máxima de la ola (m), altura de run-up (m), área de inundación estimada y tiempo mínimo de viaje de tsunami (min)
 Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



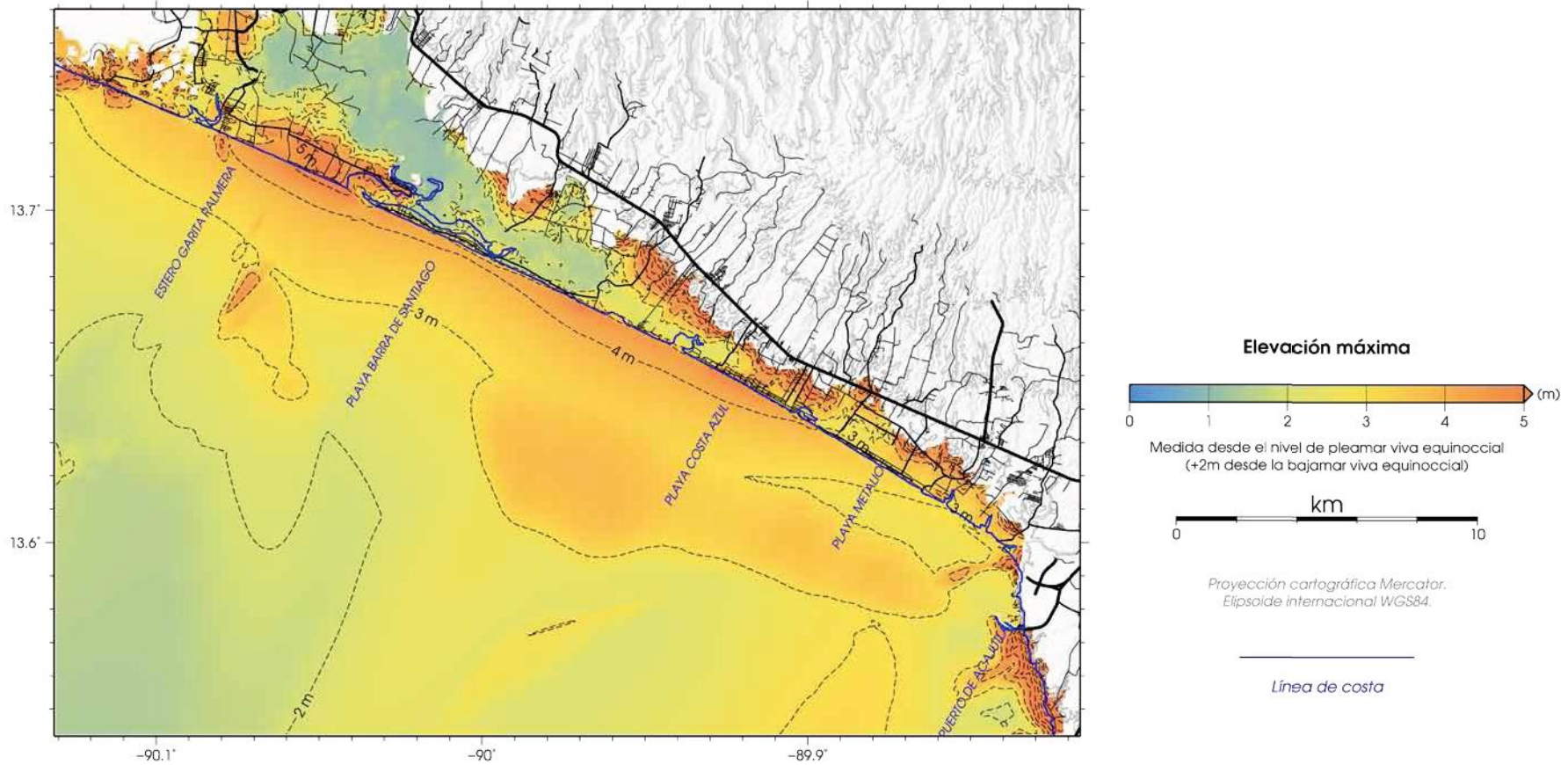
Proyección cartográfica Mercator.
 Elipsolde internacional WGS84.



Mapa de inundación por tsunamis en la planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 4.1)

Elevación máxima de la ola medida desde el nivel de pleamar (m)

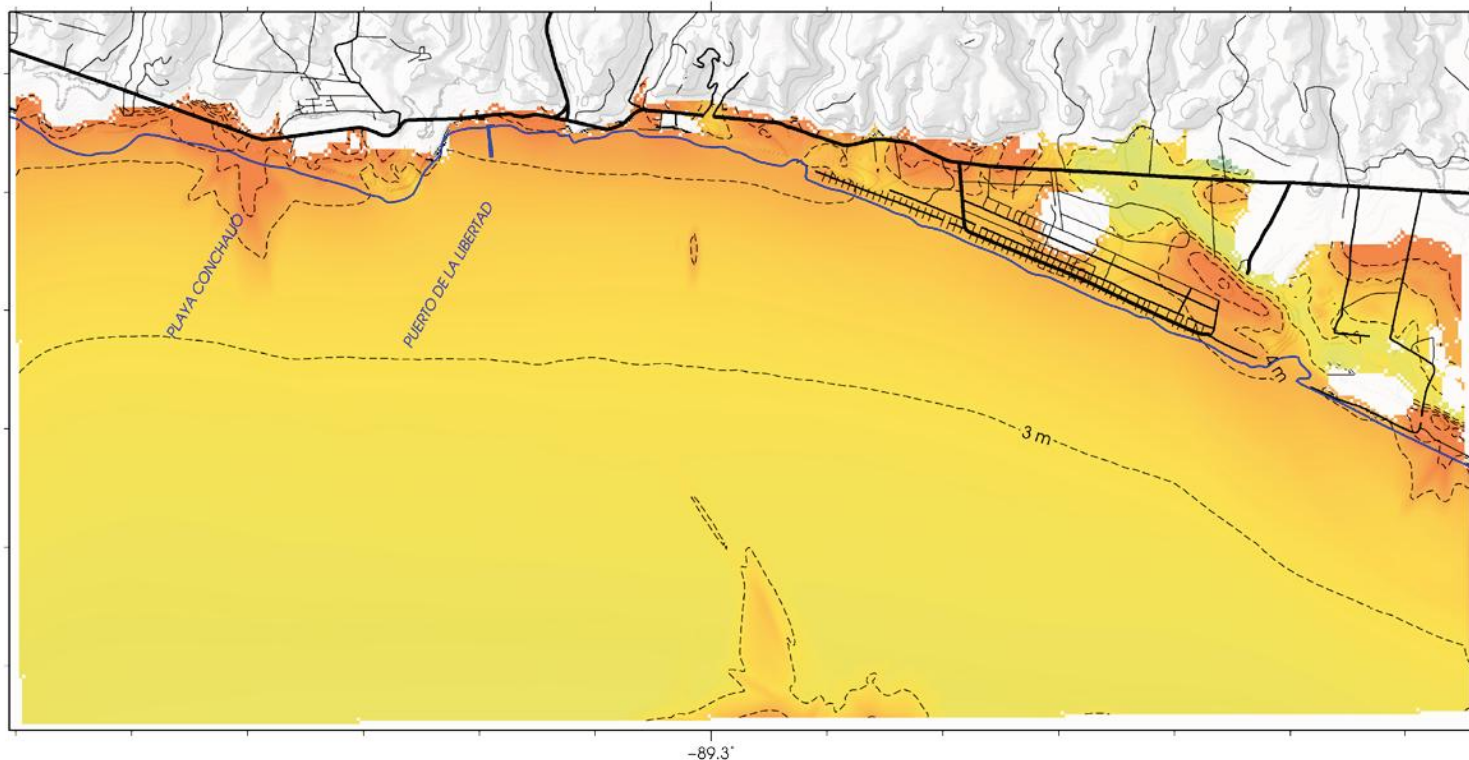
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en La Libertad (Mapa 4.2)

Elevación máxima de la ola medida desde el nivel de pleamar (m)

Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Línea de costa

Elevación máxima



Medida desde el nivel de pleamar viva equinoccial (+2m desde la bajamar viva equinoccial)

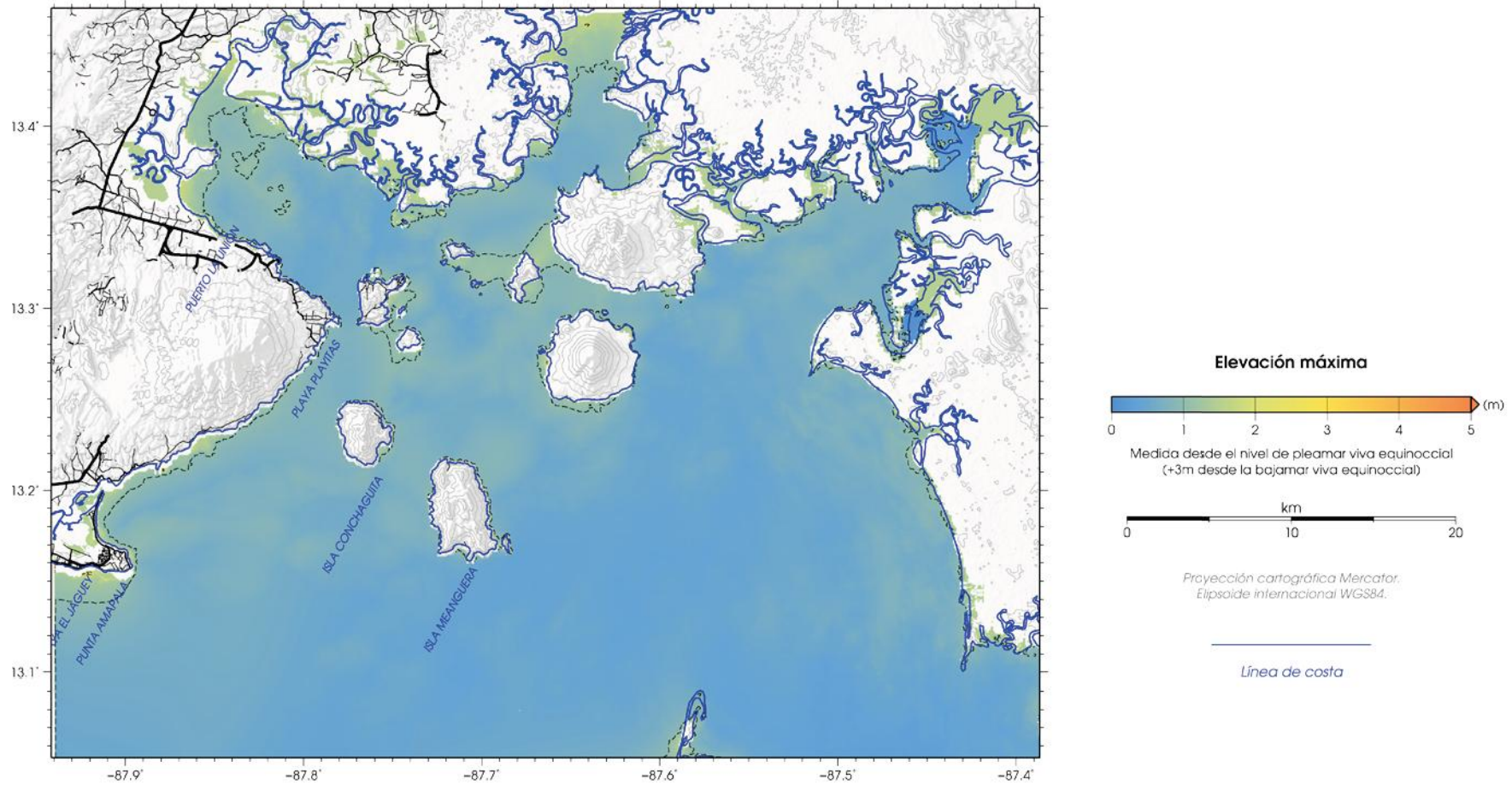
Proyección cartográfica Mercator.
Elipsoide internacional WGS84.



Mapa de inundación por tsunamis en el Golfo de Fonseca (Mapa 4.3)

Elevación máxima de la ola medida desde el nivel de pleamar (m)

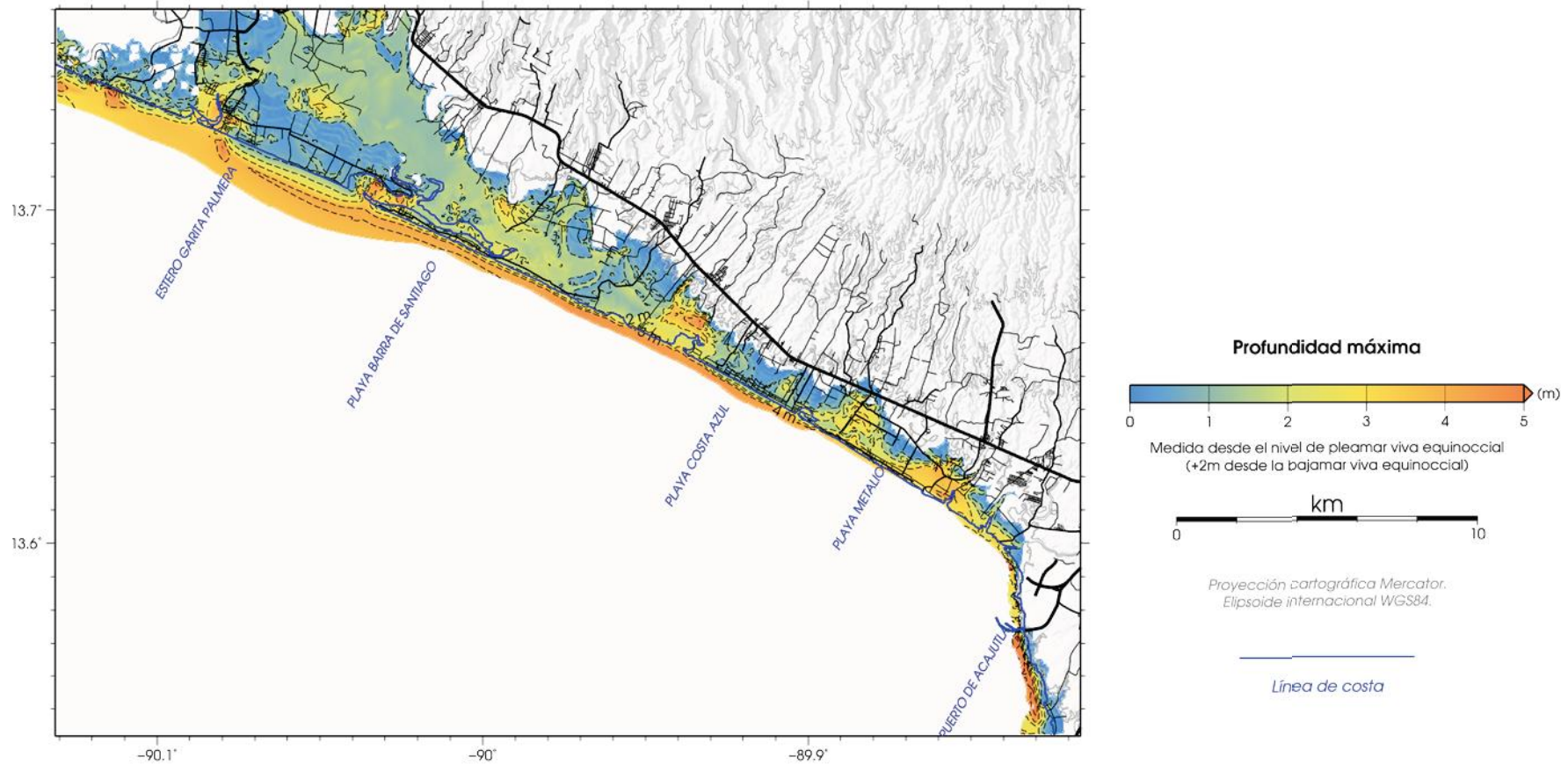
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en la planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 5.1)

Profundidad máxima de inundación medida desde el nivel de pleamar (m)

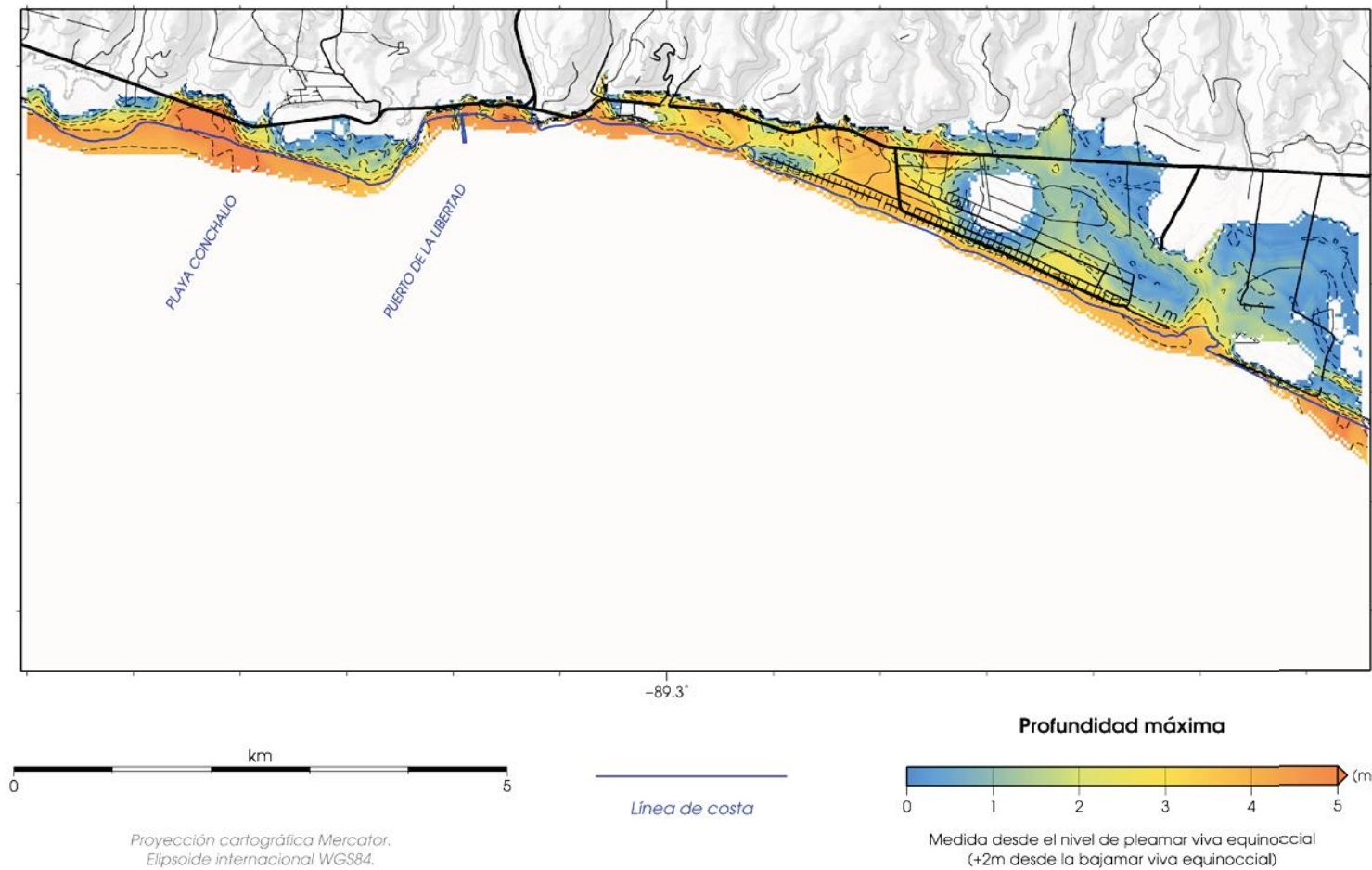
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en La Libertad (Mapa 5.2)

Profundidad máxima de inundación medida desde el nivel de pleamar (m)

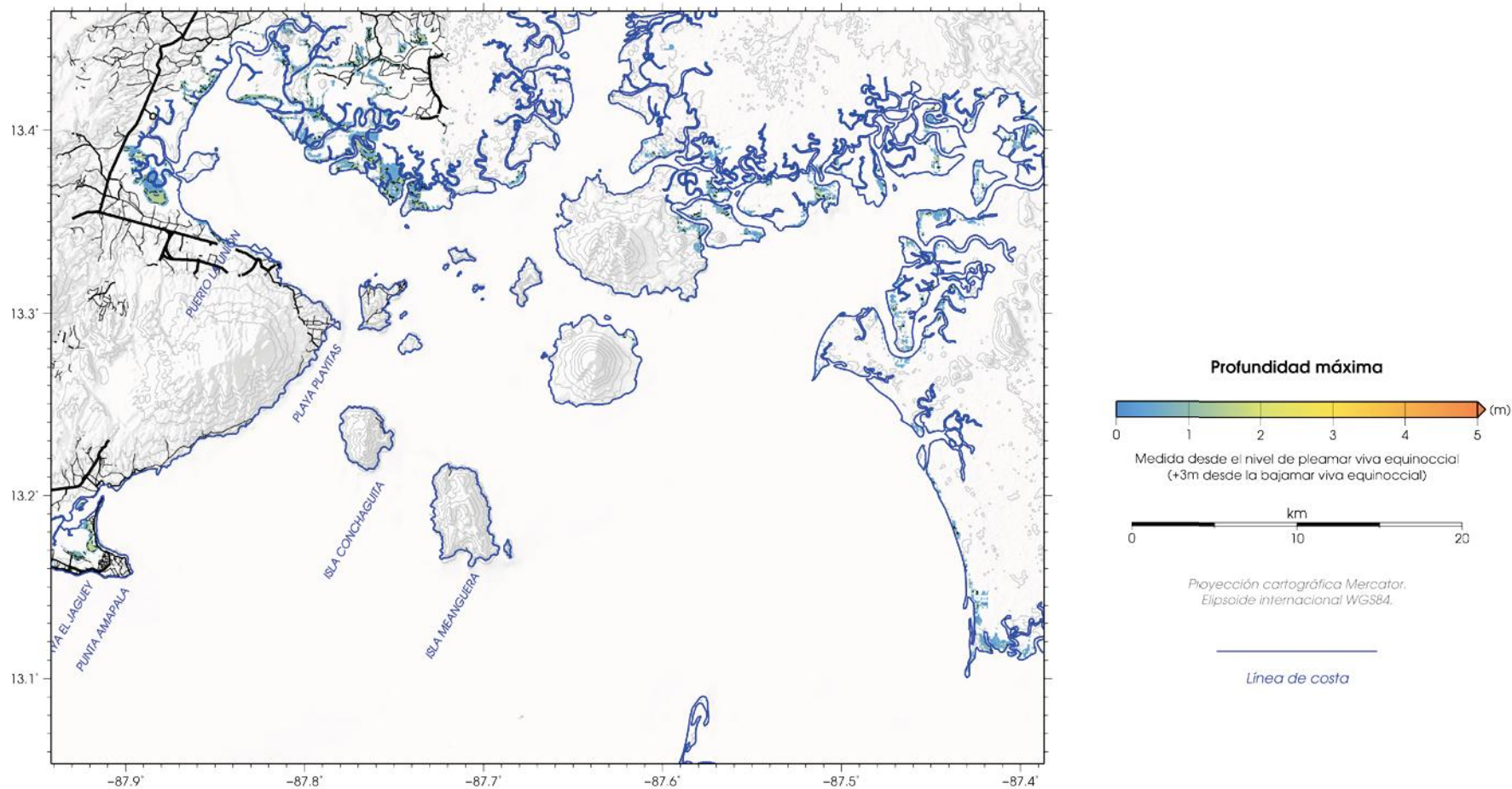
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en el Golfo de Fonseca (Mapa 5.3)

Profundidad máxima de inundación medida desde el nivel de pleamar (m)

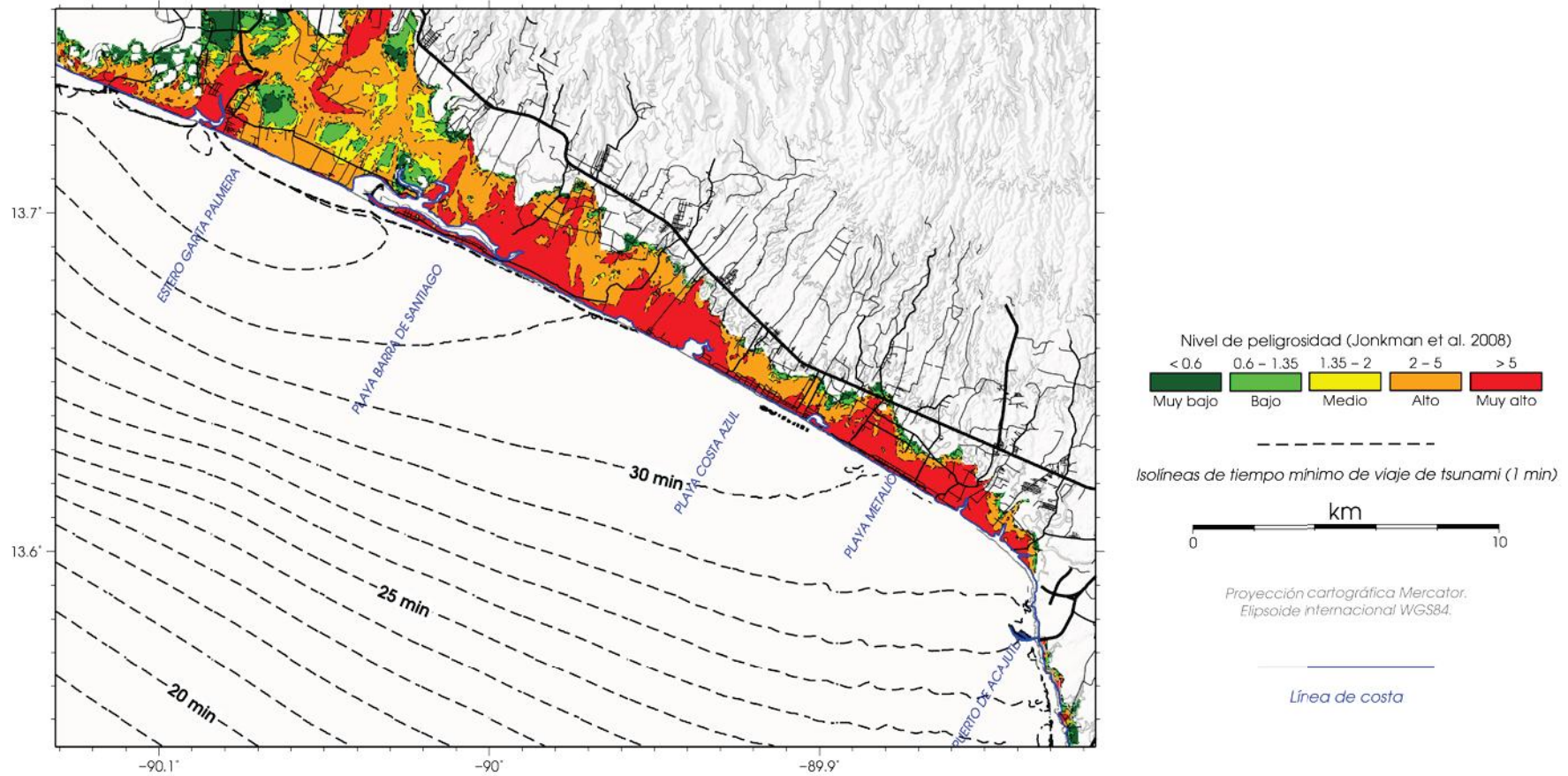
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en la planicie costera occidental y Acajutla (Mapa 6.1)

Nivel de peligrosidad de arrastre de personas (profundidad total * velocidad de flujo; m2/s)

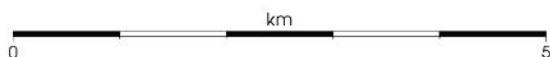
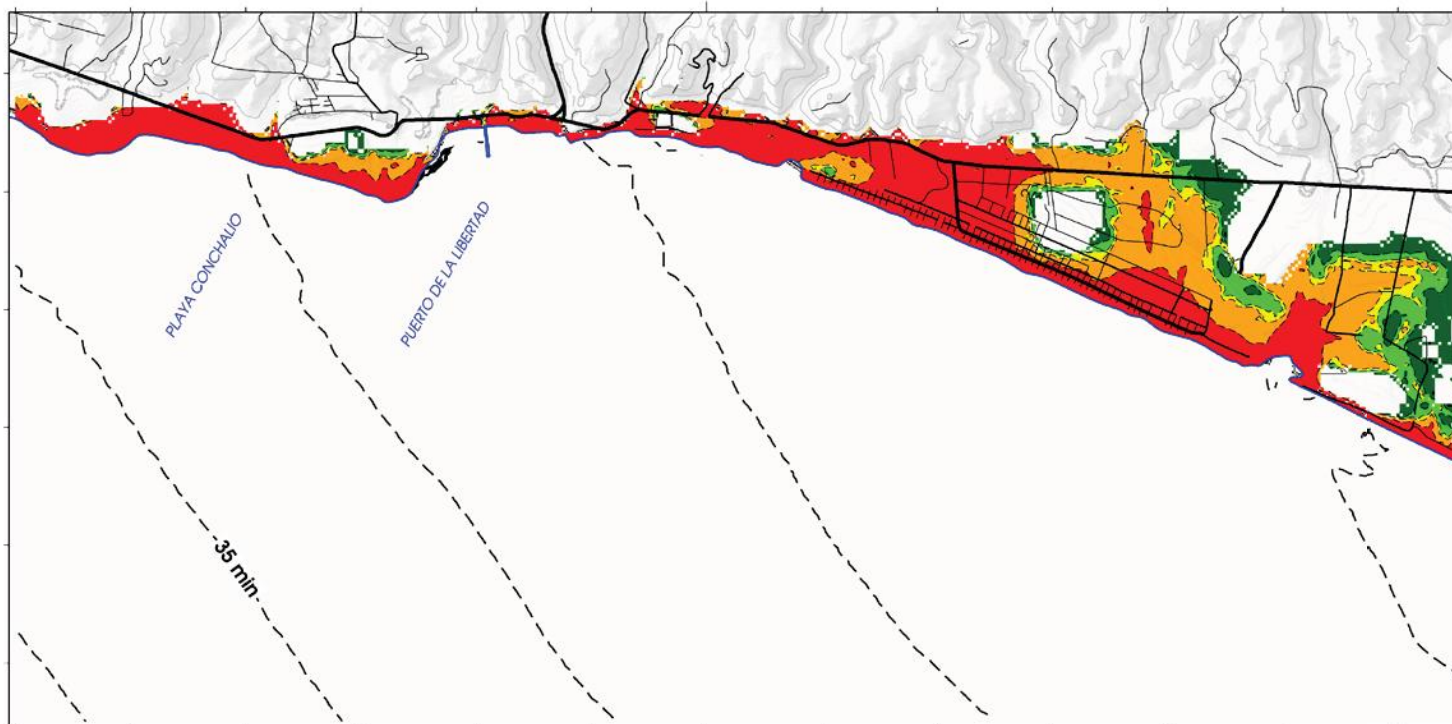
Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Mapa de inundación por tsunamis en La Libertad (Mapa 6.2)

Nivel de peligrosidad de arrastre de personas (profundidad total * velocidad de flujo; m2/s)

Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Proyección cartográfica Mercator.
Elipsoide internacional WGS84.

Línea de costa

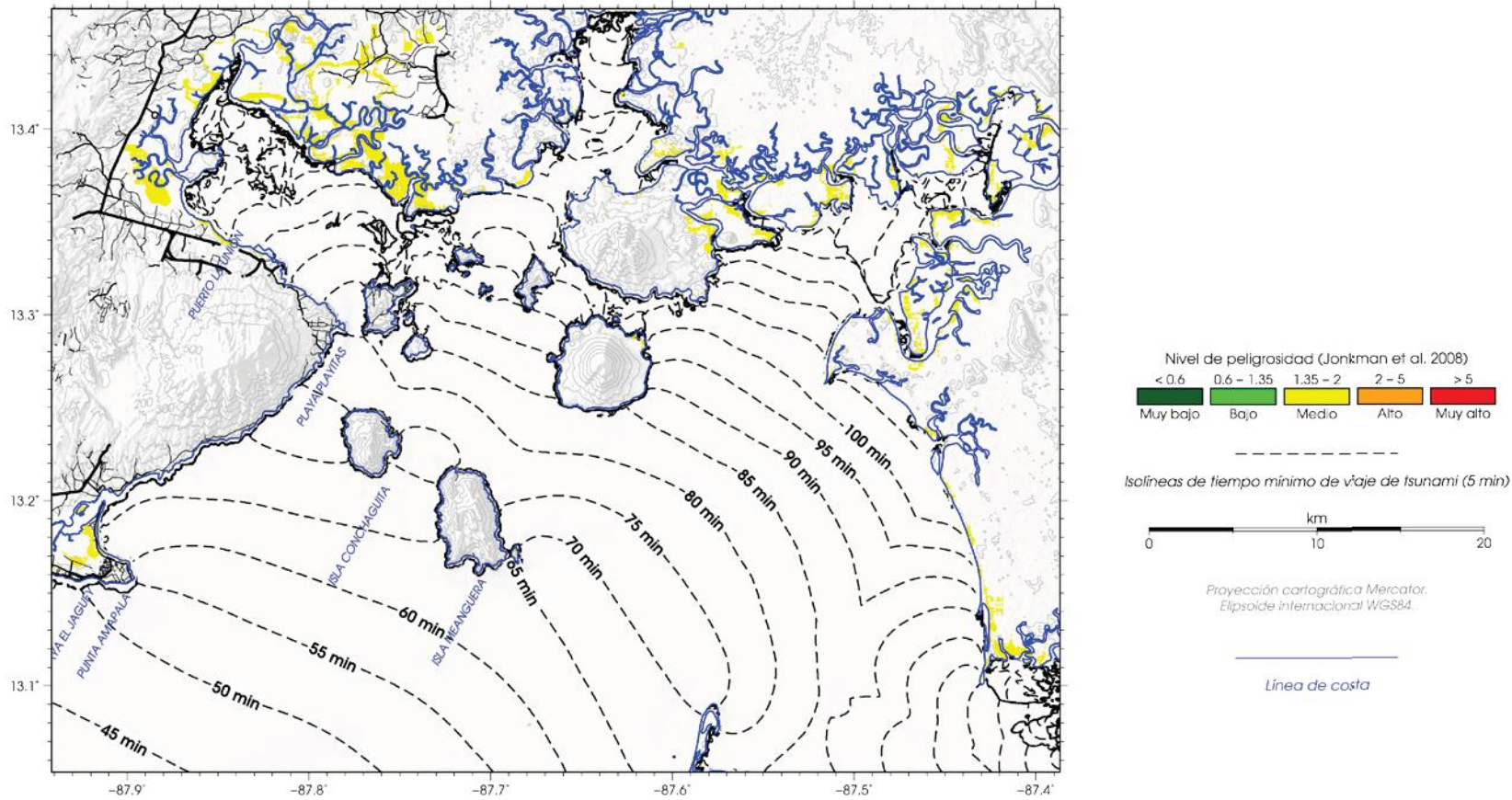
Isolneas de tiempo mínimo de viaje de tsunami (1 min)



Mapa de inundación por tsunamis en el Golfo de Fonseca (Mapa 6.3)

Nivel de peligrosidad de arrastre de personas (profundidad total * velocidad de flujo; m2/s)

Mapa agregado que combina los peores escenarios de fuentes lejanas, regionales y locales



Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales



Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Kilómetro 5 1/2 Carretera a Santa Tecla, Calle y Colonia Las Mercedes,
Edificio MARN (anexo al edificio ISTA) No. 2, San Salvador. EL Salvador. Centro América.
Tel: (503) 2132-6276, Correo electrónico: medioambiente@marn.gob.sv