



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**PROPUESTA PARA EVALUAR AMENAZAS DE TSUNAMI EN UN  
SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA, UTILIZANDO MODELAMIENTO EN  
TIEMPO CUASI-REAL**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN  
GEOFÍSICA

MATÍAS SIFÓN ANDALRAFT

PROFESOR GUÍA:  
JAIME CAMPOS MUÑOZ  
PROFESOR CO-GUÍA:  
MAURICIO FUENTES SERRANO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SERGIO RUÍZ TAPIA  
SEBASTIÁN RIQUELME MUÑOZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
FONDECYT 1211105

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS,  
MENCIÓN GEOFÍSICA  
POR: MATÍAS SIFÓN ANDALAFT  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: JAIME CAMPOS MUÑOZ

## **PROPUESTA PARA EVALUAR AMENAZAS DE TSUNAMI EN UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA, UTILIZANDO MODELAMIENTO EN TIEMPO CUASI-REAL**

Chile es un país que se encuentra constantemente expuesto a amenazas de tsunami de diverso origen, las que deben ser gestionadas por las autoridades nacionales para mitigar los impactos, con la finalidad última de salvar vidas.

Dado el contexto sismo-tectónico de la región, los tiempos de reacción son de algunos minutos, por lo que el país debe darle un alto nivel de urgencia a esta materia.

En esta tesis se presenta un nuevo desarrollo, para implementar en el Sistema de Alerta Temprana Chileno una estrategia que evalúa amenazas de tsunami modelándolos en tiempo cuasi-real a partir de la solución de la inversión de la fuente, usando la Fase-W; una aproximación lineal de los términos de primer orden de las ecuaciones de aguas someras, se traduce en una evaluación de amenaza de tsunami para Chile sectorizada, realista y fácil de comprender.

Se demuestra que los tiempos en que se obtienen las soluciones cumplen las necesidades del país para la alerta temprana, con evaluaciones listas a ser difundidas antes de 10 minutos del tiempo de origen del terremoto. Además, admite cualquier fuente sísmica para modelar la deformación del fondo marino y posterior tsunami, usando todas las heterogeneidades que la solución de la Fase-W pueda determinar.

Para validar el desarrollo se compararon las series de tiempo con registros reales de tsunami en estaciones de nivel del mar de los eventos de Maule 2010, Pisagua 2014 e Illapel 2015, mostrando resultados consistentes tanto para las amplitudes, las fases y los tiempos de arribo del tsunami.

La propuesta permite hacerse cargo, en el contexto de alerta temprana de tsunamis, de una serie de fuentes sísmicas que en la actualidad Chile no tiene forma de evaluar.

*A Isabel y Agustín,  
Con el afán de dejarles un mundo mejor preparado  
Para coexistir con la naturaleza...*

# Agradecimientos

Definitivamente, en primer lugar quiero agradecer a mi compañera de vida, Bárbara. Gracias por creer en mí y apoyarme en esta singladura que sabíamos no sería fácil. Sin ti, no habría sido posible esto ni todo lo que involucró y significó. Dicen, que este tipo de estudios que se hacen en estas etapas de la vida son mitad del que lo hace y mitad de la familia, creo que la proporción debería inclinarse hacia la familia.

Aunque ellos no lo sepan aun, quiero agradecerles a mis hijos quienes son una motivación en la vida, en todo lo que hago están y estarán presentes. Aun no se dan cuenta la paciencia que me tienen. Muchas muchas muchas gracias.

A la familia, nuclear y extendida, política y apolítica, por estar, por apoyar, por preguntar y por si acaso. A veces es difícil dimensionarlo, pero sé que están ahí y que estarán.

A los marinos que creyeron en mí, sin ellos no estarían escritas estas palabras en esta hoja ni en las siguientes (ni en las anteriores tampoco). Gracias por impulsarme, por ese empujón y apoyo que finalmente se tradujo en estos dos años peculiares para mí y mi familia.

A mis amigos de siempre, seguro que más de una vez les di la lata hablándoles de algunas ecuaciones o temáticas que pueden parecer un poco densas y no del gusto de todos, gracias.

A los amigos que conocí durante el programa. Los de otras ciudades y los de esta, los que fueron mis auxiliares y los que no, los de los almuerzos en la terraza y los que no almorzaban en la terraza, los trabajos juntos y los trabajos individuales... en fin... todas esas cosas que parecen tan cotidianas. Gracias.

A mis profesores guía, co-guía y otros que me ayudaron y apoyaron durante el proceso de este trabajo, gracias por la paciencia y confianza.

A los profesores del DGF, particularmente a quien estuvo fuera de las horas de clases, en los momentos fáciles y los no tanto, gracias por el tiempo y apañe.

A la gente del SHOA que, aunque estando fuera del Servicio, se dieron un espacio para llamar, para preguntar. Gracias por la preocupación y ayuda.

Al proyecto FONDECYT 1211105 por financiar parte de esta investigación.

Finalmente, a mi.... por haberlo dado todo, porque el esfuerzo y sacrificio valió la pena.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Riesgo tsunamigénico</b>	<b>3</b>
2.1. Fuentes generadoras de tsunami	3
2.1.1. Fuentes sísmicas generadoras de tsunami	5
2.1.1.1. Terremotos interplaca de subducción	5
2.1.1.2. Tsunami earthquakes	5
2.1.2. Otras fuentes generadoras de tsunami	6
2.1.3. Determinación de la fuente sísmica	6
2.2. Gestión del riesgo tsunamigénico	7
2.2.1. Alerta temprana	9
2.2.1.1. Nivel internacional	9
2.2.1.2. Nivel nacional	10
2.2.2. Monitoreo y cancelación de la amenaza	11
2.3. El caso Chileno	11
2.3.1. Tsunamis recientes	12
2.3.1.1. Maule 2010	12
2.3.1.2. Pisagua 2014	13
2.3.1.3. Illapel 2015	13
2.3.1.4. Melinka 2016	14
2.3.2. Rol de las autoridades	14
2.3.3. Procedimientos en Chile	15
2.3.3.1. SIPAT	17
2.3.3.2. Evaluación con SIPAT	23
2.3.3.3. Evaluación sin SIPAT	23
2.3.3.4. Tiempos de viaje de tsunami	24
2.3.3.5. Ventajas y desventajas de la metodología actual	25
<b>3. Modelación de tsunami en tiempo cuasi-real</b>	<b>27</b>
3.1. Tratamiento numérico	27
3.1.1. Aproximación mediante diferencias finitas	28
3.1.2. Condición inicial	29
3.1.2.1. Generación Pasiva	30
3.1.2.2. Generación Activa	30
3.1.2.3. Implementación cinemática de la ruptura	30
3.1.3. Condiciones de borde	31
3.1.3.1. Borde Abierto	31

3.1.3.2.	Costa . . . . .	33
3.1.4.	Propagación en coordenadas esféricas . . . . .	34
3.2.	Implementación del modelo numérico . . . . .	35
3.2.1.	Estructura y requerimientos del programa . . . . .	35
3.2.2.	Parámetros de entrada . . . . .	39
3.2.2.1.	Uso del tensor de momento del centroide por Fase-W . . . . .	40
3.2.2.2.	Uso del modelo de fuente finita por Fase-W . . . . .	41
3.2.3.	Modelación de la generación y propagación del tsunami . . . . .	42
3.2.3.1.	Generación . . . . .	42
3.2.3.2.	Propagación . . . . .	43
3.2.4.	Resultados de la modelación . . . . .	44
<b>4.</b>	<b>Implementación del modelo numérico para alerta temprana</b>	<b>49</b>
4.1.	Implementaciones en el código . . . . .	49
4.1.1.	Datos permanentes para la evaluación de amenaza . . . . .	49
4.1.2.	Datos variables para la evaluación de amenaza . . . . .	52
4.1.3.	Obtención de la evaluación de amenaza . . . . .	53
4.1.4.	Resultados de la evaluación de amenaza . . . . .	54
4.1.5.	Otros aspectos de la evaluación de amenaza . . . . .	58
4.1.5.1.	Series de tiempo y horas de arribo . . . . .	58
4.1.5.2.	Escritura de otros archivos en disco . . . . .	61
4.2.	Validación del programa para alerta temprana . . . . .	62
4.2.1.	Resultados de la modelación . . . . .	62
4.2.2.	Pruebas de rendimiento . . . . .	64
4.3.	Condiciones computacionales de la implementación . . . . .	67
<b>5.</b>	<b>Metodología propuesta</b>	<b>69</b>
5.1.	Procedimiento . . . . .	69
5.2.	Versiones predefinidas . . . . .	71
5.2.1.	Versión 1 (fuente puntual en campo cercano) . . . . .	72
5.2.2.	Versión 2 (fuente finita en campo cercano) . . . . .	73
5.2.3.	Versión 3 (fuente finita en campo cercano) . . . . .	76
5.2.4.	Versión 4 (fuente finita en campo lejano) . . . . .	77
5.2.5.	Versión libre . . . . .	79
5.3.	Horas de arribo . . . . .	79
5.4.	Comparación con la metodología vigente en Chile . . . . .	80
<b>6.</b>	<b>Discusión, conclusiones y recomendaciones</b>	<b>82</b>
6.1.	Discusión y Conclusiones . . . . .	82
6.2.	Recomendaciones . . . . .	84
	<b>Bibliografía</b>	<b>86</b>
	<b>Anexo A. Ejemplos de generación, propagación, alturas máximas y series de tiempo del tsunami modeladas</b>	<b>90</b>
A.1.	Deformación del fondo marino . . . . .	90
A.2.	Propagación del tsunami . . . . .	92
A.3.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami . . . . .	94

A.4. Series de tiempo (registros y modelos) . . . . .	96
<b>Anexo B. Ejemplo de los Resultados que entrega el programa</b>	<b>99</b>
B.1. Resultados gráficos . . . . .	100
B.1.1. Evaluación . . . . .	100
B.1.2. Otros . . . . .	101
B.2. Resultados de texto . . . . .	103

# Índice de Tablas

4.1.	Comparación de horas de arribo registradas y modeladas para los tsunami generados por los terremotos indicados (horas en UTC). Valores de $\Delta t$ positivos indican que el tsunami se registró después de la hora de arribo simulada y valores negativos que el primer arribo se registró antes que la hora simulada. . . . .	61
4.2.	Valores utilizados para generar las combinaciones de parámetros en las pruebas de rendimiento. . . . .	65
5.1.	Características y parámetros sugeridos y tiempos de cómputo esperados para cada versión del programa (N/A: No Aplica). . . . .	71
B.1.	Parámetros utilizados para obtener los resultados que se muestran en el Anexo B.	99



# Índice de Ilustraciones

2.1.	Proporciones de la distribución global del origen de los tsunamis conocidos entre 1610 A.C. y 2047 D.C. (NOAA, ITIC y WDS, 2018). . . . .	4
2.2.	Fuentes generadoras de tsunami y su distribución geográfica (NOAA, ITIC y WDS, 2018). . . . .	4
2.3.	Representación de los niveles de urgencia en la toma de acciones tendientes a mitigar los efectos de un tsunami generado por un terremoto en un margen convergente, frente a una determinada costa, como función de la distancia entre la costa y su margen convergente más cercano (nivel 5 es muy urgente y nivel 1 es menos urgente). . . . .	8
2.4.	Esquema gráfico que explica cómo se tomaron las mediciones de distancia entre la costa y la fosa, para generar la figura 2.3. . . . .	9
2.5.	Flujos de inundación y runup observados por Fritz et al. (2011) en estudio posterior al terremoto y tsunami de 2010. . . . .	12
2.6.	Mediciones y resultados de modelos numéricos presentados por Catalán et al. (2015) en relación con el tsunami producido por el terremoto de Pisagua. . . .	13
2.7.	Mediciones de runup y máxima inundación producto del terremoto de Illapel (Aránguiz et al., 2015). a) Área general. b) Área particular. . . . .	14
2.8.	Polígono de campo cercano definido por el SHOA. . . . .	16
2.9.	Bloques de decisión utilizados por el SIPAT. . . . .	18
2.10.	Estados de amenaza de tsunami definidos en el protocolo ONEMI-SHOA-CSN (2019). (a) La zona de Precaución corresponde a los terrenos en la línea de playa hasta al menos 80 metros de ancho; (b) área contenida en la zona costera, a una altura superior a 30 metros sobre el nivel medio del mar (ONEMI, SHOA y FCFM, 2019). . . . .	19
2.11.	Escenarios precalculados en la base de datos del SIPAT. . . . .	19
2.12.	Ejemplo de criterios para la evaluación de amenaza de tsunami extraído de los Manuales y Guías de la COI, Planes y Procedimientos para Amenazas de Tsunami y Manejo de la Emergencia (2017). . . . .	21
2.13.	Resultado de evaluar la amenaza de tsunami a partir del terremoto del Maule (2010) utilizando el SIPAT (captura de pantalla proporcionada por el SNAM). . . . .	22
2.14.	Resultado de evaluar la amenaza de tsunami a partir del terremoto de Illapel (2015) utilizando el SIPAT (captura de pantalla proporcionada por el SNAM). . . . .	22
2.15.	Diagrama de flujo de procedimientos para evaluación de amenaza de tsunami a partir de un terremoto de campo cercano. . . . .	23
2.16.	Tiempos de viaje del frente de ondas del tsunami predichos a partir del terremoto de 1960 (Chile). La estrella indica el punto de origen del cálculo. Las líneas gruesas representan horas y las delgadas corresponden a isocronas cada 30 minutos (Wessel, 2009). . . . .	25

3.1.	Esquema de las variables del sistema de ecuaciones de aguas poco profundas.	27
3.2.	Estructura de carpetas y archivos del programa. . . . .	39
3.3.	Datos necesarios para la implementación del código. . . . .	40
3.4.	Formato de solución del centroide del tensor de momento. . . . .	41
3.5.	Plano de falla generado a partir de la solución del centroide del tensor de momento.	41
3.6.	Distribución de slip a partir de las soluciones de elementos finitos para algunos de los últimos grandes terremotos. . . . .	42
3.7.	Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto del Maule (2010). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia. . . . .	43
3.8.	Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto del Maule (2010), en diferentes instantes de tiempo. . . . .	44
3.9.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo a partir del terremoto del Maule (2010). . . . .	45
3.10.	Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, para diferentes terremotos. . . . .	46
3.11.	Máximas amplitudes de tsunami a partir del terremoto del Maule (2010), modelado para Chile Continental e Insular, con 12 horas de simulación. . . . .	47
3.12.	Máximas amplitudes de tsunami modeladas a partir del terremoto de Tohoku-Oki (Japón, 2011), modelado para todo el océano Pacífico, con 24 horas de simulación. . . . .	48
4.1.	Datos necesarios para la implementación del código. . . . .	51
4.2.	Ejemplos de gráficos generados por el programa <code>check_peval.py</code> para calibrar puntos de evaluación. . . . .	52
4.3.	Histogramas de máximas alturas de tsunami modeladas en los puntos de evaluación, por cada bloque geográfico. . . . .	54
4.4.	Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación del tsunami generado por el terremoto de Illapel (2015). . . . .	55
4.5.	Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010). . . . .	56
4.6.	Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010), utilizando una solución puntual del tensor de momento del centroide, a partir de la fase-w. . . . .	57
4.7.	Niveles de amenaza de tsunami para todo Chile, obtenidos a partir del terremoto del Maule (2010), con 12 horas de simulación. . . . .	58
4.8.	Series de tiempo y primeros arribos a las localidades con ENM (modelo del tsunami post terremoto de Illapel 2015). A la izquierda se presentan las series de tiempo con sus horas de arribo marcadas con puntos rojos y a la derecha las máximas amplitudes de tsunami e isócronas del frente de ondas. . . . .	59
4.9.	Modelo del tsunami post terremoto de Illapel (2015) y sus tiempos de viaje. . . . .	60
4.10.	Ubicación de los puntos de evaluación para el bloque B19 (Juan Fernández) a diferentes resoluciones espaciales. . . . .	63
4.11.	Resultados de la prueba de rendimiento efectuada, utilizando el evento de Illapel (2015) como modelo de prueba. . . . .	66

5.1.	Flujo del procedimiento propuesto para implementar el programa para la evaluación de amenaza de tsunami en un sistema de alerta temprana para Chile, utilizando los parámetros de inversión de la fase-w y modelación de tsunami en tiempo cuasi-real. . . . .	70
5.2.	Gráficos resultantes de la versión 1 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010). . . . .	72
5.3.	Gráficos resultantes de la versión 2 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010). . . . .	74
5.4.	Gráficos resultantes de la versión 2 del programa, modificado para Chile Continental, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010). . . . .	75
5.5.	Gráficos generados por la versión 3 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010). . . . .	76
5.6.	Gráficos generados por la versión 4 del programa para el tsunami generado por el terremoto de Tohoku-Oki, Japón (2011). . . . .	78
5.7.	<i>Standard Output</i> del programa. En la parte final se indican aquellas estaciones que no tuvieron registros de tsunami superior a 3 [cm] y por lo tanto no serán incluidas en el listado de horas de arribo. . . . .	80
A.1.	Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto del Maule (2010). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia. . . . .	90
A.2.	Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Pisagua (2014). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia. . . . .	91
A.3.	Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Illapel (2015). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia. . . . .	91
A.4.	Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Melinka (2016). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia. . . . .	92
A.5.	Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto del Maule (2010), en diferentes instantes de tiempo. . . . .	92
A.6.	Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Pisagua (2014), en diferentes instantes de tiempo. . . . .	93
A.7.	Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Illapel (2015), en diferentes instantes de tiempo. . . . .	93
A.8.	Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Melinka (2016), en diferentes instantes de tiempo. . . . .	94
A.9.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto del Maule (2010). . . . .	94
A.10.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Pisagua (2014). . . . .	95
A.11.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Illapel (2015). . . . .	95

A.12.	Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Melinka (2016). . . . .	96
A.13.	Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto del Maule (2010). . . . .	96
A.14.	Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Pisagua (2014). . . . .	97
A.15.	Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Illapel (2015). . . . .	97
A.16.	Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Melinka (2016). . . . .	98
B.1.	Resultados gráficos relacionados con la evaluación de la amenaza. . . . .	100
B.2.	Máximas amplitudes de tsunami modeladas usando como evento el terremoto de Illapel (2015) y los parámetros indicados en la tabla B.1. . . . .	101
B.3.	Histogramas de máximas alturas de tsunami modeladas en los puntos de evaluación, por cada bloque geográfico. . . . .	102
B.4.	Ejemplo de boletín de evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación, usando como evento el terremoto de Illapel (2015) y los parámetros indicados en la tabla B.1. . . . .	103
B.5.	Ejemplo de boletín con horas de arribo de tsunami obtenidas a partir de la modelación. . . . .	104

# Capítulo 1

## Introducción

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo (Madariaga, 1998), destacando los terremotos de subducción controlados por la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, lo que resulta en la generación de una gran cantidad de tsunamis frente a sus costas (Lomnitz, 2004; Ruiz y Madariaga, 2018), contando entre los históricos el gran terremoto de Valdivia de 1960 y su tsunami asociado (Kanamori, 1977; Barrientos y Ward, 1990; Stein y Michael, 2003; Lomnitz, 2004). En ese sentido, los terremotos que ocurren en territorio chileno, son de los que más tsunamis han producido a nivel mundial, con más de 15 sismos magnitud  $M_W$  iguales o superior a 8, en los últimos años, que han generado tsunamis de los que se tiene evidencia (Riquelme, 2013).

Los tsunamis son ondas gravitatorias de gran tamaño producidas en el océano, como resultado de una perturbación de la columna de agua, cuyo origen más común son los terremotos, pudiendo generarse también a causa de erupciones volcánicas submarinas, deslizamientos submarinos o subaéreos y menos comúnmente por caídas de meteoritos u otros impactos en la superficie oceánica (Riquelme, 2013; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022; Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2021; Intergubernamental Oceanographic Commission, 2019; Ward y Asphaug, 2000). Desde el punto de vista social y económico, todos los tsunamis son potencialmente un riesgo, pudiendo dañar gravemente las costas a las que lleguen debido a la gran cantidad de energía que poseen, causando daños humanos y materiales cuando el riesgo no es gestionado adecuadamente (International Tsunami Information Center, 2022).

Lo anterior motiva el desafío de gestionar las amenazas de tsunami, con el objetivo de mitigar los impactos que estos pueden generar en la población. El caso de Chile es especialmente sensible; la corta distancia entre la costa y la región focal donde se originan la mayoría de los tsunamis, considerando además la velocidad de propagación de estos, implica que el tiempo que puede tardar un tsunami en llegar a la costa es considerablemente menor que en otras zonas del planeta, requiriendo una respuesta rápida, mediante un sistema de alerta temprana debidamente preparado, que proporcione datos e información útil, en tiempo real, para que las autoridades competentes puedan emitir la alerta oportuna y certera a la ciudadanía, respecto de una amenaza de este tipo, una vez ocurrido el terremoto.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, define un sistema de alerta temprana como un “conjunto de capacidades que se necesitan para generar y difundir de forma oportuna y efectiva información destinada a permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por un peligro se preparen a actuar con prontitud y de forma adecuada a fin de reducir la posibilidad de que se produzca un daño o una pérdida”

(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, p. 196). Precisamente con este trabajo se pretende aumentar las capacidades para generar información útil, oportuna y efectiva, a través de una nueva estrategia para evaluar las amenazas de tsunami en Chile producidos por terremotos, utilizando la solución del método de inversión de la fuente sísmica a partir de la fase-W, para modelar tsunamis en tiempo cuasi-real con las metodologías expuesta por Riquelme et al. (2018) y Fuentes et al. (2019) respectivamente, obteniendo resultados que puedan ser entregados a, e interpretados por, las autoridades correspondientes.

Para lograr lo anterior, se debe comprender qué es el riesgo tsunamigénico y cuáles son las medidas aceptadas tanto a nivel nacional como internacional para gestionarlo. En particular, el trabajo se enfoca en la evaluación de la amenaza de tsunami una vez ocurrido un terremoto como parte de la alerta temprana para la gestión del riesgo. Actualmente en Chile opera el Sistema Nacional de Alerta de Maremotos (SNAM) mediante el “Sistema Integrado para la Predicción y Alarma de Tsunamis” (SIPAT), cuyo desarrollo operacional fue descrito por Catalan et al. (2020). Su metodología consiste en una base de datos producida a priori por simulaciones de tsunamis de origen sísmico frente a las costas de Chile, cuya distribución espacial es determinada por diferentes configuraciones de la ruptura sísmica. El sistema consulta la base de datos para ubicar los escenarios pre-modelados con mayores similitudes al evento real en desarrollo y el resultado es un listado simple con niveles de amenaza de tsunami para el país.

El SIPAT es una estrategia que significó un gran avance respecto de la metodología anterior, basada en un único nivel de amenaza de tsunami para todo el país, tomando como parámetros del terremoto solamente epicentro y magnitud. A pesar de ello, operar con una base de datos de eventos precalculados, posee el gran problema de poder recurrir a una cantidad limitada de escenarios. Así, puede ocurrir que algunos terremotos sintéticos puedan tener similitudes con los parámetros del evento en desarrollo y presentar diferencias notables en el tsunami resultante. Actualmente se asume una serie de hipótesis en el proceso, como por ejemplo, que utiliza como uno de los criterios el epicentro, lo que para terremotos grandes no es lo más adecuado.

Algunas de las limitaciones se solucionan mediante la implementación de la metodología descrita por Fuentes et al. (2019), adaptándola para evaluar la amenaza de tsunami utilizando las heterogeneidades de la ruptura a partir de los parámetros de inversión de la fuente usando la fase-W, para modelar en tiempo cuasi-real la propagación del tsunami mediante una aproximación lineal de los términos de primer orden de las ecuaciones de aguas poco profundas y así obtener niveles de amenaza de tsunami para las costas de Chile.

El presente trabajo describe el desarrollo para implementar la estrategia descrita en el párrafo precedente, que permite evaluar amenazas de tsunami para Chile, como consecuencia directa de terremotos.

# Capítulo 2

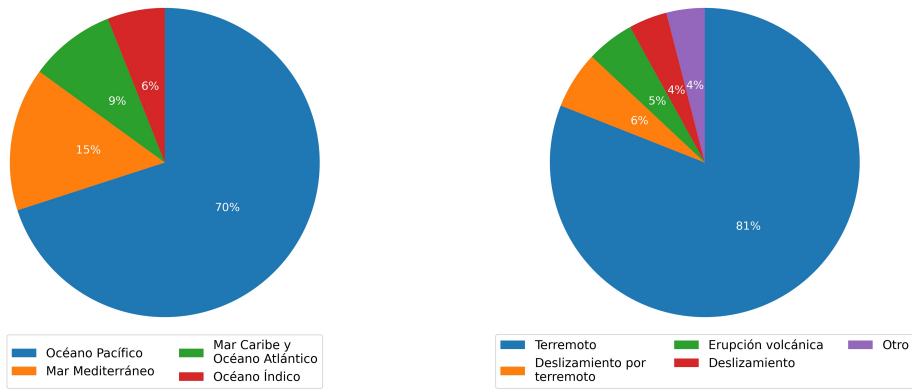
## Riesgo tsunamigénico

Un tsunami es un conjunto de ondas de gravedad que se propagan a través de un cuerpo de agua, debido a una perturbación grande y abrupta de la columna de agua, cuya velocidad depende de la profundidad del lugar por el que se desplace y su dirección de propagación cambia en función de la profundidad. En el océano profundo, la velocidad puede variar entre 500 y 1.000 kilómetros por hora, pero a medida que se acerca a costa su velocidad disminuye mientras que su amplitud aumenta; una ola de tsunami que en aguas profundas tenga una altura de un metro, puede aumentar considerablemente su amplitud al llegar a costa, generando grandes daños en ellas (Intergubernamental Oceanographic Commission, 2019). Si la perturbación ocurre relativamente cerca de alguna costa, un tsunami local puede causar daños a comunidades costeras en cuestión de minutos y si la perturbación es demasiado grande, es probable que el tsunami atraviese cuerpos de agua como el océano pacífico, generando destrucción a miles de kilómetros de su lugar de origen (Bernard, 2022; Contreras y Winckler, 2013).

En términos generales, es posible dividir la ocurrencia de un tsunami en 3 etapas; generación, propagación e inundación. Dados los objetivos del trabajo, el foco estará principalmente en la generación y la propagación del tsunami, considerando como límite entre la propagación y la inundación, el arribo del tsunami a la costa, lo que es parte fundamental del estudio.

### 2.1. Fuentes generadoras de tsunami

Más del 80% de los tsunamis que han ocurrido en el mundo han sido generados por terremotos (Intergubernamental Oceanographic Commission, 2019). Dentro de los sismos que tienen potencial para generar tsunami, denominados “terremotos tsunamigénicos”, los más comunes son aquellos que ocurren en el contacto entre placas en ambientes de subducción. Otras fuentes que pueden generar tsunamis son las erupciones volcánicas submarinas como el caso del volcán Hunga Tonga-Hunga Ha’apai en 2022, deslizamientos submarinos o subaéreos, como el caso de Ayseén en 2007 y menos comúnmente por caídas de meteoritos u otros impactos en la superficie oceánica (Satake, 2007; Riquelme, 2013; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022; Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2021; Intergubernamental Oceanographic Commission, 2019; Carvajal et al., 2022; Ward y Asphaug, 2000). En la figura 2.1 se muestra la distribución global del origen geográfico de los tsunamis conocidos y sus fuentes generadoras entre 1610 A.C. y 2017 D.C. (National Oceanic and Atmospheric Administration/World Data Service, International Tsunami Information Center, 2018).



(a) Fuentes geográficas de tsunami confirmados. (b) Mecanismo de origen de tsunamis confirmados.

Figura 2.1: Proporciones de la distribución global del origen de los tsunamis conocidos entre 1610 A.C. y 2047 D.C. (NOAA, ITIC y WDS, 2018).

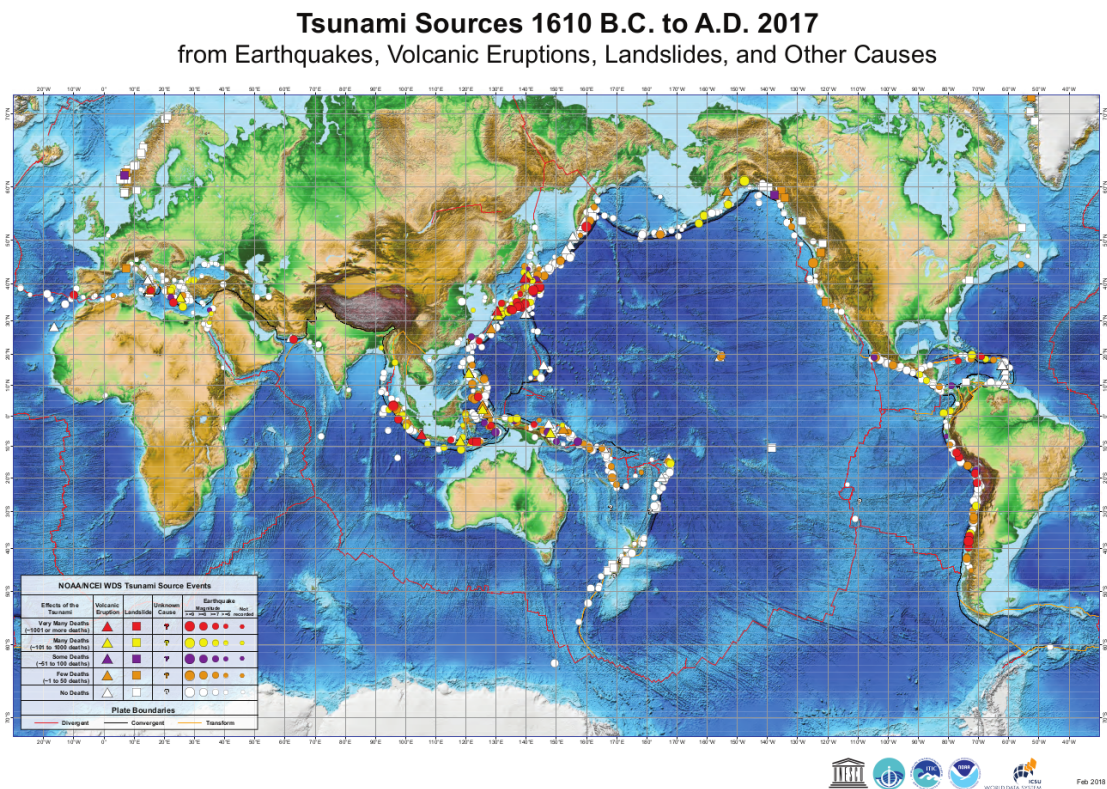


Figura 2.2: Fuentes generadoras de tsunami y su distribución geográfica (NOAA, ITIC y WDS, 2018).

La figura 2.2 muestra un póster generado por la colaboración UNESCO/IOC-NOAA con la distribución geográfica de las fuentes que han generado los tsunamis de los que se tiene información entre 1610 A.C. y 2017 D.C., en la que se observa una concentración en las costas del océano Pacífico, Índico y mar Mediterráneo con una predominancia clara de terremotos



como origen de los tsunamis. Llama la atención Noruega, donde existe una predominancia de tsunamis generados por remociones de masas, así como también la concentración de tsunamis más grandes producto de terremotos y con más muertes causadas, tanto en la costa sureste del océano Pacífico como en la noroeste; principalmente en torno a Chile y Japón.

Luego, para identificar gran parte de los eventos tsunamigénicos, es fundamental una buena caracterización de la fuente sísmica, lo que será discutido más adelante.

### **2.1.1. Fuentes sísmicas generadoras de tsunami**

#### **2.1.1.1. Terremotos interplaca de subducción**

Son aquellos que ocurren en el contacto entre dos placas tectónicas en ambientes de subducción, ambiente donde se generan las condiciones para que se desarrollen los mega-terremotos que ocasionan grandes tsunamis (Intergubernamental Oceanographic Commission, 2019). La sismicidad en Chile entre Arica y la península de Taitao está gobernada principalmente por este tipo de sismos, con mecanismo de falla tipo inversa y a profundidades menores a 60 kilómetros (Madariaga, 1998). Sin embargo, la mayoría ocurren entre los 10 y 40 kilómetros y ejemplos de este tipo son Maule 2010, Iquique 2014 e Illapel 2015 (Centro Sismológico Nacional (CSN), 2022; Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2019).

Cuando ocurre un terremoto de este tipo, el fondo oceánico que está sobre el área de ruptura sufre un alzamiento, mientras que la superficie de la corteza que está sobre la parte más profunda del contacto experimenta subsidencia (Satake y Tanioka, 1999). El primer fenómeno mencionado es la perturbación que puede generar un tsunami.

Para grandes terremotos, la deformación vertical del fondo marino puede ser del orden de algunos metros, mientras que la extensión horizontal del área deformada suele ser de cientos de kilómetros. Las deformaciones que ocurren durante el terremoto se pueden estimar mediante el uso de receptores GNSS, y otros instrumentos, a lo largo de la costa y la precisión con que se determinen sus parámetros dependerá de la cantidad de receptores y el tiempo transcurrido desde el origen del evento.

En Chile, la zona de contacto entre las placas Sudamericana y de Nazca no solo está muy cerca de la costa sino que está directamente bajo ella. Esta característica condiciona, como se discutirá más adelante, el tiempo de respuesta que tiene el país para enfrentar los tsunamis que se generen a partir de estos terremotos.

#### **2.1.1.2. Tsunami earthquakes**

Los *tsunami earthquakes* son terremotos que producen un tsunami de proporciones mucho mayores a lo esperado en comparación con su magnitud de ondas superficiales (Kanamori, 1977). Algunas de las caracterizan de estos terremotos en comparación con aquellos descritos previamente son su larga duración, propagación de ruptura más lenta, gran slip, diferencia considerable entre magnitud de momento ( $M_W$ ) y de ondas superficiales ( $M_S$ ) y ruptura concentrada principalmente en la zona más somera del contacto, entre otras (Kanamori, 1977; Satake y Tanioka, 1999; Satake, 2007; Geersen, 2019; Sallarès y Ranero, 2019; Sallarès et al., 2021).

Si bien estos terremotos son poco frecuentes en comparación con los descritos en los párrafos precedentes, son especialmente peligrosos debido al tsunami desproporcionado que generan en relación con su  $M_S$ , lo que se traduce también en una baja percepción de intensidad del terremoto por parte de la población costera, interpretándolo como uno de bajo riesgo, siendo todo lo contrario.

Ejemplos de este tipo de terremotos son los ocurridos en las Aleutianas 1946, Perú 1960 y 1996, islas Kuril en 1963 y 1975, Nicaragua 1992, Java 1994 y 2006, entre otros (Kanamori, 1977; Geersen, 2019; Sallarès y Ranero, 2019).

### 2.1.2. Otras fuentes generadoras de tsunami

Tal como se muestra en los gráficos de la figura 2.1, aproximadamente un 20% de los tsunamis son generados por un mecanismo diferente al que se produce directamente por el proceso de ruptura de un terremoto tsunamigénico.

Ejemplo de esto es el tsunami de 2007 en Aysén, causado por los deslizamientos subaéreos de las laderas de los fiordos producto de un terremoto  $M_w$  6.2 (Lastras et al., 2013; Naranjo et al., 2009). Sin embargo, no fue el proceso de ruptura del terremoto la causa directa del tsunami.

Yamada et al. (2012), Kawamura et al. (2014) y otros autores describen la relación entre los márgenes activos en las zonas de subducción y la generación de deslizamientos submarinos, evidenciando la posibilidad de que estos fenómenos ocurran y generen un tsunami, mencionando el margen Chileno entre aquellos con historia de deslizamientos submarinos. Ejemplos de estos son el tsunami de 1958 en Alaska en que un terremoto magnitud 7.8 desencadenó una serie de deslizamientos submarinos que, junto a deslizamientos subaéreos, generaron el tsunami con mayor runup registrado (bahía de Lituya) y el de 1918 en Puerto Rico, donde un terremoto magnitud 7.3 provocó deslizamientos submarinos que generaron ondas de tsunami con alturas de hasta 6 metros (National Weather Service, 1999) son dos ejemplos.

Respecto de las erupciones volcánicas, el caso más reciente es el tsunami debido a la erupción del volcán *Hunga Tonga-Hunga Ha'apai* en enero de 2022, en las islas de Tonga, con afectación transoceánica reportándose en las costas del océano Pacífico, Atlántico, Índico y en los mares Mediterráneo y Caribe, con alturas máximas del orden de algunos metros (Carvajal et al., 2022). Adicionalmente, a este evento se le asocia un mecanismo de generación de tsunami relacionado con ondas Lamb<sup>1</sup>, el que aun no se comprende del todo (Range et al., 2022).

Por otro lado Ward y Asphaug (2000) presentan una investigación sobre la generación, propagación y amenaza probabilística de tsunamis por impacto de asteroides en el océano, mientras que Range et al. (2022) presenta un estudio de los efectos del asteroide que impactó lo que se conoce como el cráter Chicxulub, relacionado con la extinción masiva hace  $\sim 66$  Ma, y del gran tsunami generado. En el mismo artículo discute el efecto de las ondas Lamb, a raíz de la explosión generada por el impacto del meteorito, y el tsunami que podría generar en lugares alejados de la zona de impacto.

### 2.1.3. Determinación de la fuente sísmica

En esta tesis se abordará el caso correspondiente a tsunamis producidos por terremotos tsunamigénicos.

Una vez ocurrido un terremoto, existe una serie de entidades dedicadas a caracterizar la fuente sísmica, para lo que existen diversos métodos. En este trabajo se utilizará principalmente la solución obtenida por la metodología de inversión de la fase-w para la obtención de los parámetros del modelo de fuente sísmica del terremoto, dado que ha probado ser un algoritmo confiable y robusto para la determinación del tensor de momento del centroide para terremotos medianos y grandes (Riquelme et al., 2018). En Chile, el Centro Sismológico

---

<sup>1</sup> Ondas atmosféricas de aire de baja presión.

Nacional tiene implementado este algoritmo en tiempo real para terremotos desde magnitud 5 hacia arriba, calculando todos los parámetros del tensor de momento a los 5 minutos desde el tiempo de origen.

A medida que pasa el tiempo las soluciones comienzan a mejorar debido a que las ondas generadas por el terremoto son detectadas por más estaciones y por lo tanto las inversiones cuentan con más datos. Actualmente el CSN efectúa la inversión a los 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 y 30 minutos desde el tiempo de origen (Riquelme et al., 2018). Según lo concluido por Riquelme et al. (2018), este es el método operacional e implementado más rápido y preciso para caracterizar grandes terremotos a la fecha de publicación de ese artículo. También indica que, a pesar de no haber sido utilizado aun para terremotos del tipo *tsunami earthquakes*, este método puede determinar los parámetros del terremoto de manera rápida y precisa para estimar posibles eventos tsunamigénicos.

## 2.2. Gestión del riesgo tsunamigénico

La gestión del riesgo de tsunami abarca diversos aspectos tales como la instrucción, el entrenamiento, la difusión del conocimiento, investigación científica, preparación previa, infraestructura, etc. En esta sección se discutirá en torno a la alerta temprana de la amenaza y su monitoreo, que son algunas de las etapas que involucran directamente a los centros de alerta cuando ocurre un terremoto con potencial tsunamigénico.

Es posible identificar dos categorías de tsunami para la alerta temprana, basado en el tiempo de reacción que tendrá una determinada localidad (país por ejemplo) para tomar las medidas necesarias y gestionar el riesgo. Existen los tsunamis locales, que son aquellos asociados a los terremotos tsunamigénicos generados en zonas muy cercanas a la localidad en cuestión cuyo tiempo de reacción es muy corto y están aquellos que son generados en otras regiones pero que en algún momento podrían alcanzar las costas de la localidad de interés. Para Chile, un ejemplo del primer caso es el terremoto de Illapel, en el que las primeras llegadas del tsunami a la costa nacional se registraron a los pocos minutos de su ocurrencia, a diferencia del terremoto y tsunami de Tohoku-Oki (Japón 2011), en que el tsunami tardó más de 20 horas en llegar a las costas de Chile continental.

Bajo este enfoque, resulta clave y central disponer de una alerta temprana. La figura 2.3 representa los niveles de urgencia que debe darle la autoridad competente, con jurisdicción en una determinada costa, a la toma de acciones tendientes a mitigar el riesgo de tsunami producto de un terremoto ocurrido en el margen convergente más cercano a esta. Los círculos más grandes y más cercanos a tonalidades rojas corresponden a las menores distancias mientras que los más pequeños y de tonalidades azuladas representan distancias mayores. La idea de que las distancias menores estén representadas por círculos grandes se fundamenta en que mientras menor sea la distancia, menor es el tiempo que tardará el tsunami en llegar a la costa y consecuentemente menor es el tiempo de reacción por lo que, es una situación de mayor riesgo y se debe dar una mayor urgencia a la toma de acciones.

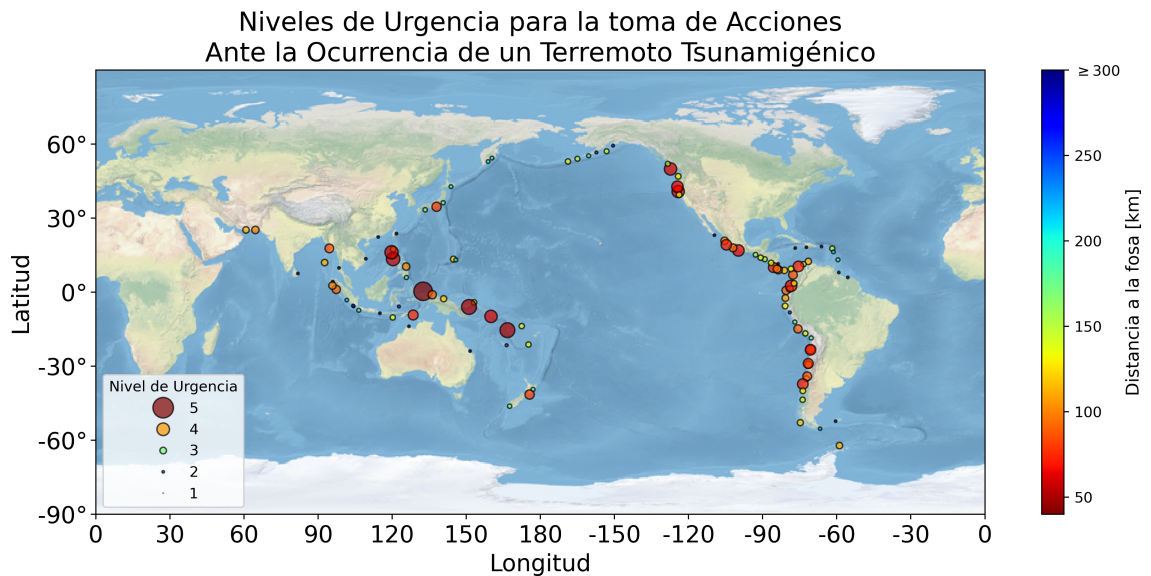


Figura 2.3: Representación de los niveles de urgencia en la toma de acciones tendientes a mitigar los efectos de un tsunami generado por un terremoto en un margen convergente, frente a una determinada costa, como función de la distancia entre la costa y su margen convergente más cercano (nivel 5 es muy urgente y nivel 1 es menos urgente).

La forma en que se midieron las distancia se ejemplifica en el esquema de la figura 2.4. En ella se muestra un perfil desde un punto A, en la placa oceánica, hasta un punto B en la placa continental, en tierra, sin embargo, la distancia utilizada es aquella entre la costa y la fosa, que se representa por la flecha verde y la letra “d” en la figura.

Para el caso de Chile las distancias están entre los 70 y 150 [km], lo que lo deja con un nivel de urgencia entre 4 y 5<sup>2</sup>. Las áreas de mayor urgencia corresponden principalmente a islas en el Pacífico Occidental y se puede ver que países como Japón, Canadá, Perú, Ecuador y aquellos en el Caribe tienen, en general, más tiempo para reaccionar. México tiene una condición similar a Chile, con distancias entre 70 y 160 [km].

<sup>2</sup> Al norte del faro Ráper, Golfo de Penas, la distancia al margen es de unos  $\sim 20$  [km] que sería la menor distancia en el mapa, ergo un nivel de urgencia mucho mayor sin embargo, en la zona donde se presenta esa distancia no hay asentamientos humanos más que la gente que habita el faro.

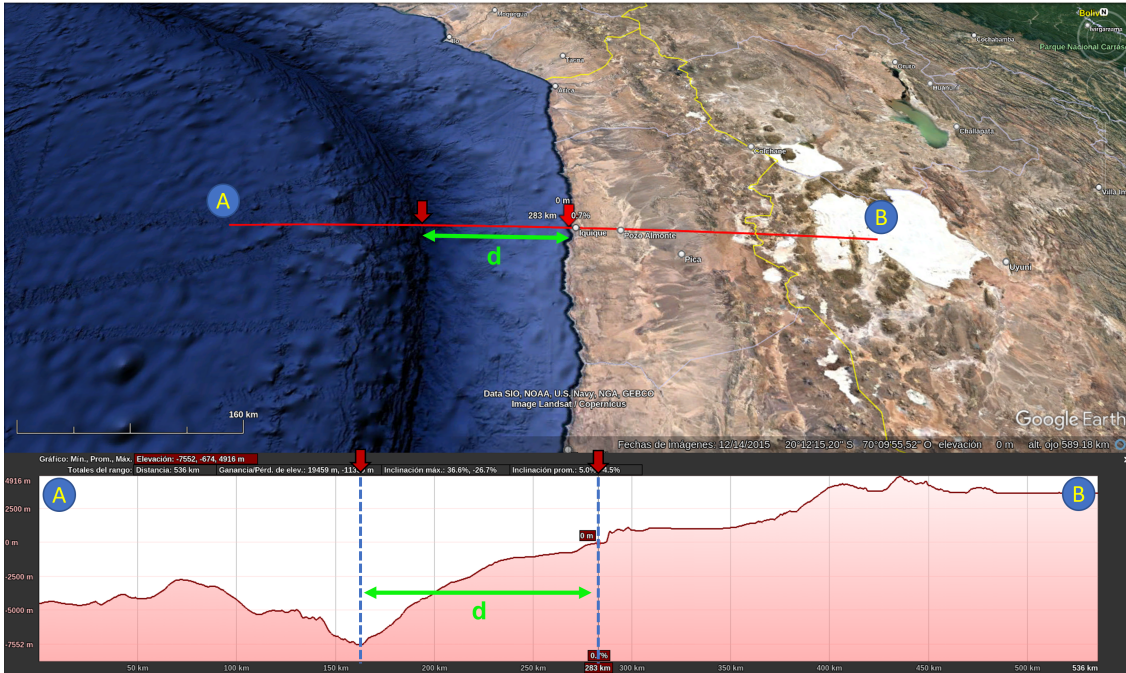


Figura 2.4: Esquema gráfico que explica cómo se tomaron las mediciones de distancia entre la costa y la fosa, para generar la figura 2.3.

## 2.2.1. Alerta temprana

En el contexto de este trabajo, la alerta temprana se refiere a la capacidad de poder informar ciertas características del fenómeno en curso a quienes corresponda, de manera oportuna y certera, para que se puedan tomar medidas que mitiguen los efectos de dicho fenómeno. En este sentido es importante hacer la diferencia entre la alerta temprana de terremotos y la de tsunami; la primera es más compleja y un error en la estimación de los parámetros del terremoto generarán una evaluación errónea de la magnitud del tsunami, siendo factor clave en ambos casos una buena determinación de la fuente sísmica<sup>3</sup> (Kanamori, 2014).

La implementación de la alerta temprana de tsunami requiere la coordinación de una serie de entidades para lograr transmitir información útil que pueda ser empleada para mitigar sus impactos. La UNESCO define para lo anterior los *Tsunami Service Providers* (TSP) que son centros que monitorean la actividad sísmica y emiten avisos de amenaza de tsunami como parte de un Grupo de Coordinación Intergubernamental (ICG por su denominación en inglés) y los *National Tsunami Warning Centers* (NTWC), que operan de manera local y pueden usar los productos generados por los TSP para emitir alertas de tsunami para sus países (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2022).

Así, hay 2 niveles de alerta temprana, uno internacional y otro nacional.

### 2.2.1.1. Nivel internacional

En el contexto de la amenaza de tsunami en la cuenca del pacífico, la UNESCO reconoce 3 TSP; el *Northwest Pacific Tsunami Advisory Center* (NWPTAC), el *Pacific Tsunami Warning Center* (PTWC) y el *Tsunami Advisory Center of the Ministry of National Resources*.

<sup>3</sup> Para los tsunamis aplica solamente en la evaluación de aquellos producidos directamente por terremotos.

En particular, el PTWC es un centro de alerta dependiente de la *National Oceanographic and Atmospheric Agency* (NOAA) de Estados Unidos, que opera las 24 horas durante todo el año y tiene la responsabilidad informar cualquier amenaza de tsunami en para la cuenca del Pacífico. Para lo anterior, publica en su sitio web y envía a los NTWC correspondientes toda la información pertinente tanto de la fuente como de la amenaza de tsunami.

Existen también otros centros que operan a nivel intergubernamental y que son relevantes para la evaluación de amenaza de tsunami, ya sea informando parámetros de terremotos y/o evaluaciones de tsunami. En la siguiente sección se detallarán aquellos que son relevantes para el caso Chileno.

#### **2.2.1.2. Nivel nacional**

Los NTWC son entidades autónomas y cada país decide en quien delega la responsabilidad de evaluar sus amenazas de tsunami. Por ejemplo, en Estados Unidos, el PTWC es quien emite las alertas de tsunami para las costas de ese país que se encuentran en la cuenca del Pacífico, en Japón es la Agencia Meteorológica Japonesa (JMA), mientras que en el caso de Chile, es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), según lo establecido en el Decreto Supremo N°26 de 1966 de la Subsecretaría de Marina (Subsecretaría de Marina, 1966). Cada país tiene su propia estrategia basada en su realidad social, histórica, cultural, económica, etc. En general intentan basarse en estándares internacionales, pero deben acomodarlos a su situación particular, implementando lo que más se ajuste a su realidad. Así, existen países que aplican sus propias metodologías y otros que no poseen las capacidades y replican la información recibida por un centro regional como el PTWC.

En la alerta temprana, existe una fase inicial una vez ocurrido el terremoto, en que cada centro nacional deberá evaluar la amenaza de tsunami a partir de ciertos parámetros del sismo. Esa información experta debe ser comunicada rápidamente a las autoridades para mitigar los efectos del terremoto y también a los centros de alerta de tsunami para que puedan efectuar la evaluación de amenaza tsunamigénica. Una mala evaluación inicial puede ser la causa de grandes pérdidas humanas y/o materiales, de ahí la importancia de utilizar una estrategia adecuada que contemple, además de los aspectos científicos y tecnológicos, el contexto tectónico y su historia de tsunami, lo que implica el uso de varias metodologías para evaluar la amenaza, otorgándole eficacia, redundancia y robustez al sistema.

Más del 80 % de los tsunami han sido causados por terremotos y principalmente aquellos que ocurren a poca profundidad en zonas de subducción activa, por lo que el monitoreo de terremotos es fundamental para tener indicadores tempranos de potenciales tsunamis, especialmente considerando la rapidez de propagación de las ondas sísmicas en comparación con las del tsunami. La rápida caracterización de la fuente sísmica es crítica para una evaluación efectiva y oportuna del potencial tsunamigénico (Intergubernamental Oceanographic Commission, 2017).

Aquellos NTWC que tienen la capacidad para generar pronósticos de tsunami deben considerar las recomendaciones de la Intergubernamental Oceanographic Commission (2017) en su Guía de planes y procedimientos, que contempla:

- Uso de modelos de propagación oceánica, batimetría y topografía de resolución suficiente para calcular amplitudes de tsunami.
- Uso de bases de datos de escenarios premodelados cuando el tiempo de reacción es insuficiente para modelar un tsunami, los que deben ser calculados utilizando una diversidad suficiente de parámetros sísmicos que sean realistas y abarquen un espectro

suficientemente amplio para cubrir todos los casos a los que se puede enfrentar el país.

- Uso de relaciones empíricas para representar la fuente sísmica de la manera más detallada posible, sin perder de vista el tiempo de reacción.
- Uso de parámetros de simulación apropiados (dominio espacial, tiempo total de simulación, paso temporal, resolución espacial, etc).
- Incluir localidades costeras importantes, estaciones de nivel del mar, puntos de control de tsunami para los modelos.
- Proveer amplitudes de tsunami a profundidades apropiadas.
- Aplicar procedimientos estándar de modelación para inferir amplitudes de onda en la costa a partir de amplitudes en el agua.

### 2.2.2. Monitoreo y cancelación de la amenaza

Una vez emitida la información de amenaza de tsunami a partir de la información experta del mecanismo y tamaño de la fuente sísmica, tanto los TPS como los NTWC deben monitorear su evolución mediante la observación del tsunami, para lo que existen redes nacionales e internacionales de boyas y mareógrafos que lo detectan. Con ello, es posible efectuar nuevas evaluaciones mediante diversas estrategias y actualizar el nivel de amenaza a partir de datos del tsunami, a diferencia de la alerta temprana cuya evaluación utiliza pronósticos de tsunami a partir de datos de la fuente sísmica. El monitoreo puede considerar también nuevas realizaciones de pronósticos a partir de modelos de tsunami tanto para predecir la amenaza en sectores donde aun no se ha registrado el arribo del tsunami, como para estimar la evolución del fenómeno en sectores donde ya se observó su llegada.

Finalmente, la cancelación implica un retorno a la normalidad, indicando que ya no existe amenaza de tsunami. Esta puede ser generalizada o parcial y cada país define sus criterios que aseguran esta condición.

## 2.3. El caso Chileno

El contexto sismotectónico de Chile lo hace un país propenso a la amenaza constante de terremotos tsunamigénicos, habiendo registrado en los últimos 15 años cinco terremotos frente a las costas de Chile que han generado tsunamis (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2019). Además, por la cercanía con la región focal que genera tsunamis y la velocidad de propagación de sus ondas, el tiempo que tarda en arribar a las costas más cercanas puede ser inferior a 20 minutos como se registró en los eventos de Maule 2010 ( $M_W$  8.8) y Pisagua 2014 ( $M_W$  8.2) e incluso inferior a 10 minutos como fue el caso de Illapel 2015 ( $M_W$  8.3) (Fritz et al., 2011; Catalán et al., 2015; Aránguiz et al., 2015; Catalan et al., 2020), obligando a las autoridades a considerar un alto nivel de urgencia para este tipo de fenómenos, como se mostró en la figura 2.3. Esto motiva el desafío nacional de contar con un sistema que proporcione datos e información útil en muy poco tiempo para que las autoridades puedan emitir una alerta certera y oportuna a la ciudadanía respecto de una amenaza de este tipo, una vez ocurrido el terremoto, lo que permitirá salvar vidas.

## 2.3.1. Tsunamis recientes

### 2.3.1.1. Maule 2010

El terremoto del Maule ocurrió el 27 de febrero de 2010 con una magnitud final  $M_W$  8.8. El tsunami generado impactó gran parte de las costas de Chile continental e insular. El máximo runup fue registrado en un acantilado costero en Constitución, con una altura de 29 [m] (Fritz et al., 2011). Dada la magnitud del tsunami, las estaciones de nivel del mar frente a la zona de generación fueron destruidas, por lo que no hay registros instrumentales de las mayores variaciones de nivel del mar en la costa, sin embargo, Fritz et al. (2011) propone que las máximas variaciones superaron los 15 [m] sobre el nivel del mar mientras que, en su catálogo de tsunamis, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (2019), indica alturas máximas cercanas a los  $\sim 30$  [m] en caleta Tumbes.

La figura 2.5, extraída de Fritz et al. (2011), muestra con barras de colores el runup (rojo) y los máximos flujos de inundación (azul) estimados a partir de las observaciones efectuadas con posterioridad.

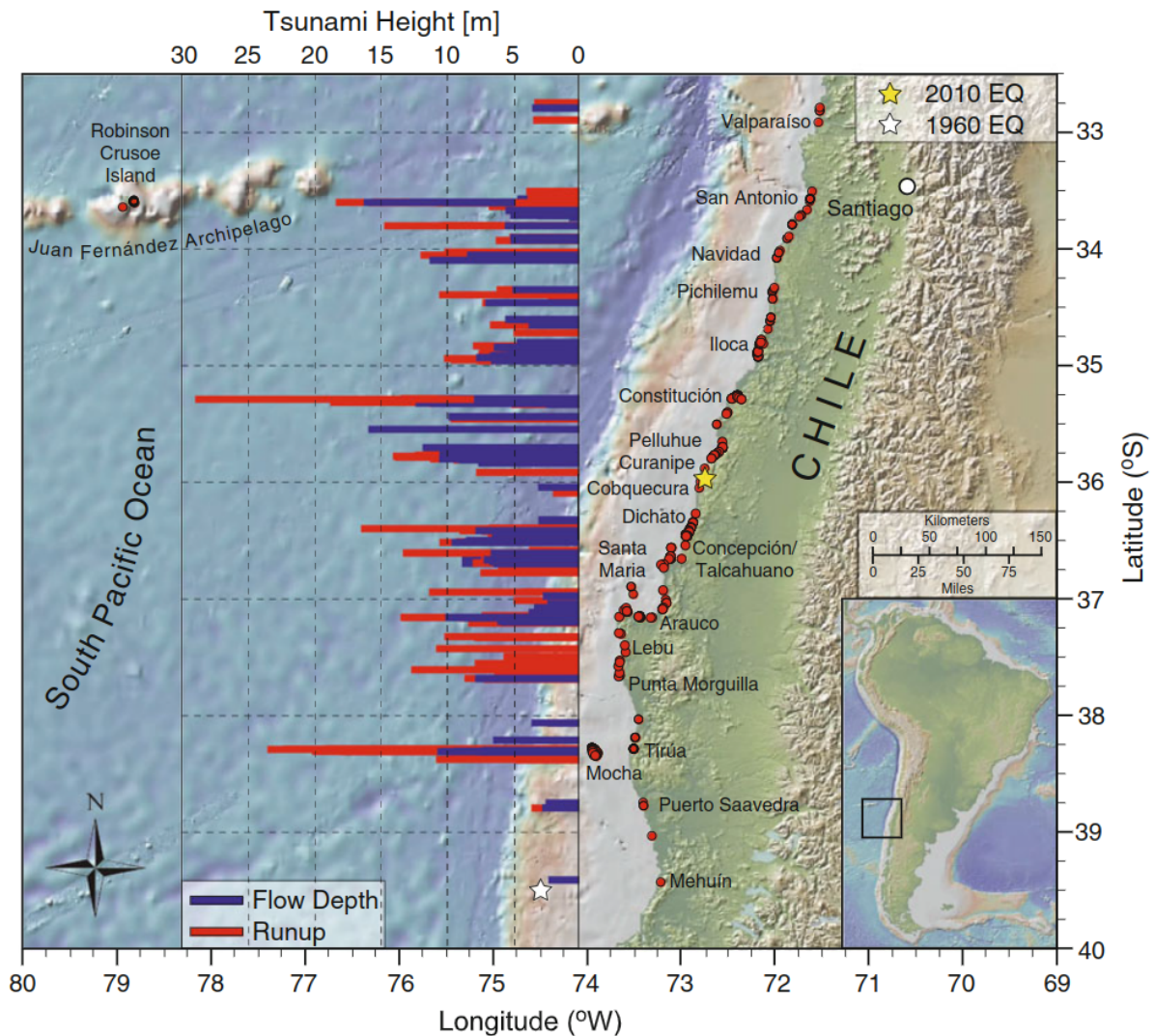


Figura 2.5: Flujos de inundación y runup observados por Fritz et al. (2011) en estudio posterior al terremoto y tsunami de 2010.



### 2.3.1.2. Pisagua 2014

El 01 de abril de 2014 ocurrió un terremoto  $M_W$  8.2 frente a las costas de Pisagua, seguido por una replica de magnitud  $M_W$  7.7. Ambos eventos generaron tsunamis que impactaron la costa norte de Chile y sur de Perú. El evento principal generó un tsunami cuya mayor amplitud registrada instrumentalmente en la costa fue de  $\sim 2.6$  [m] frente al área de ruptura, pasada una hora de ocurrido el terremoto. En aquellos lugares donde el tsunami fue significativo, las mayores amplitudes se registraron entre 1 y 5 horas después de ocurrido el terremoto (Catalán et al., 2015; Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2019).

La figura 2.6, extraída de Catalán et al. (2015), muestra con barras de colores las observaciones de runup y máxima distancia de inundación en la figuras b), c) y e), mientras que en color magenta presenta el runup obtenido a partir de modelaciones numéricas.

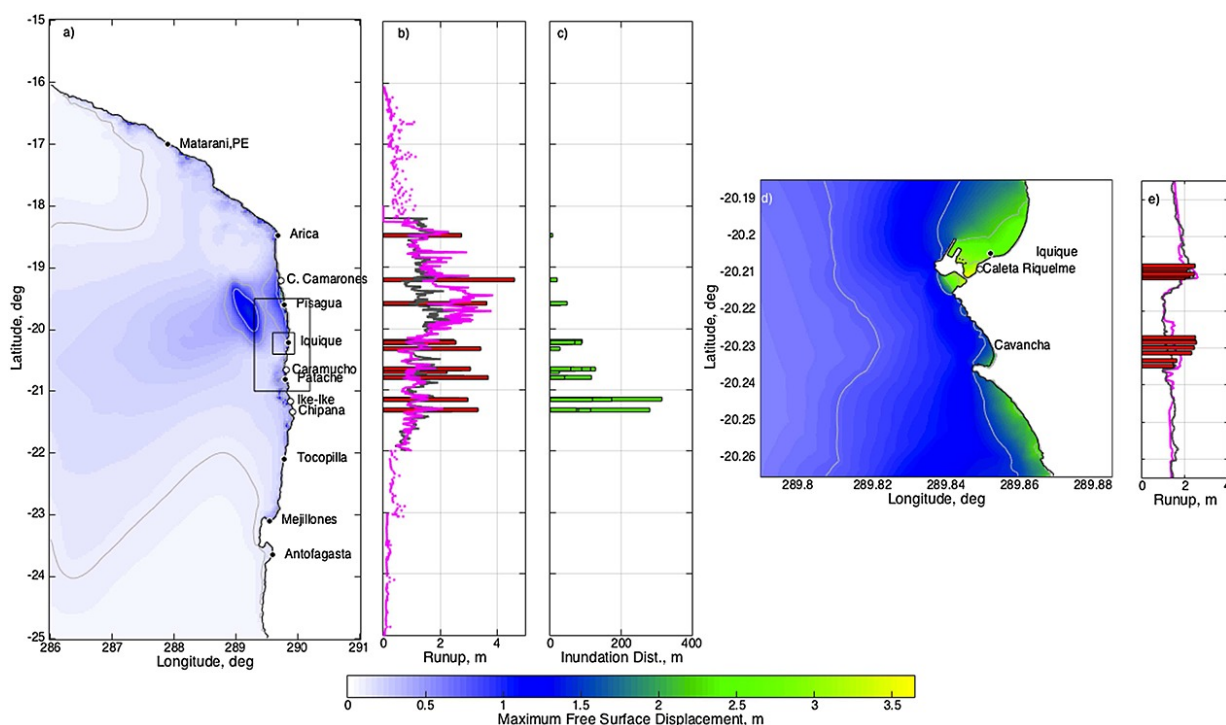


Figura 2.6: Mediciones y resultados de modelos numéricos presentados por Catalán et al. (2015) en relación con el tsunami producido por el terremoto de Pisagua.

### 2.3.1.3. Illapel 2015

El 16 de septiembre de 2015 ocurrió el terremoto de Illapel magnitud  $M_W$  8.3 frente a las costas de la región de Coquimbo, con profundidad hipocentral de 23.3 km (Centro Sismológico Nacional (CSN), 2022), que generó un tsunami con amplitud máxima registrada 4.6 [m] (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2019) y máximo runup de 10.8 [m] en las costas frente a la zona de generación, con tiempos de arribo de solo algunos minutos posteriores a la ocurrencia del terremoto (Aránguiz et al., 2015). Para este evento, el SHOA emitió la alerta de tsunami para Chile 8 minutos después del sismo, mientras que el PTWC emitió una alerta para el pacífico 7 minutos después del sismo (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2015). El primer registro de arribo instrumental de tsunami fue inferior a 15 minutos en la estación de nivel del mar instalada en Pichidangui (la más

cercana a la zona de generación).

Aránguiz et al. (2015) presenta un estudio de campo posterior al evento en el que midieron runup y alturas de inundación en diferentes localidades, algunos de sus resultados se resumen en la figura 2.7.

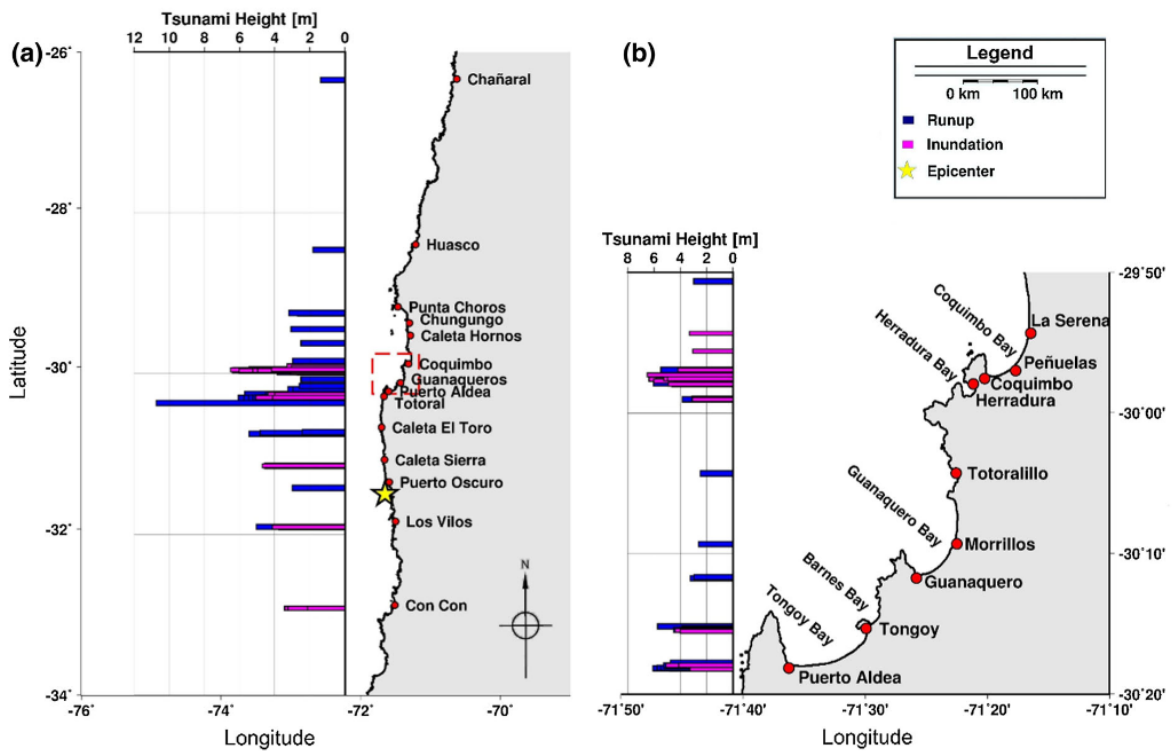


Figura 2.7: Mediciones de runup y máxima inundación producto del terremoto de Illapel (Aránguiz et al., 2015). a) Área general. b) Área particular.

#### 2.3.1.4. Melinka 2016

El terremoto de Melinka (Chiloé) ocurrió el 25 de diciembre de 2016, con magnitud  $M_W$  7.6, al suroeste de la isla de Chiloé con profundidad hipocentral de 34.2 [km] (Xu, 2017; Bravo et al., 2023). Este evento se cree que marcó el comienzo de la reactivación de actividad sísmica en la zona posterior al gran terremoto de 1960 (Ruiz y Madariaga, 2018). El terremoto generó un tsunami menor, cuyas amplitudes máximas no superaron los 50 [cm] (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2019) sin embargo es relevante desde el punto de vista de la alerta temprana ya que fue el primero donde se utilizó para un caso real el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunami (SIPAT), que será detallado más adelante.

#### 2.3.2. Rol de las autoridades

El manejo de información técnica para eventos de sismos y tsunamis en Chile está regulado por el protocolo entre ONEMI, SHOA y FCFM (2019), en el que están detallados los criterios de comunicación, tareas y responsabilidades entre estas 3 instituciones del Estado. Según lo anterior, el Centro Sismológico Nacional (CSN) es el encargado de reportar todo sismo en el territorio nacional cuya magnitud sea igual o superior a 3.7 (en cualquier escala de

magnitud) y particularmente para aquellos con magnitud igual o sobre 6.0, debe entregar los productos de la Fase-W. Al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) le corresponde operar el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) que debe evaluar la información sísmica y de nivel del mar para determinar la posibilidad de ocurrencia de un tsunami que pueda afectar a las costas de Chile, transmitiendo dicha información a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), institución que a contar del 01 de enero de 2023 pasa a llamarse Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED)<sup>4</sup>, autoridades navales y marítimas. Por su parte, ONEMI es quien recopila la información de intensidad de sismos a nivel nacional para transmitirla tanto al SHOA como al CSN. Además, la ONEMI es la responsable de difundir la evaluación de amenaza de tsunami, efectuada por el SHOA, al Sistema Nacional de Protección Civil, entidad que informará a la población y dispondrá la evacuación de las localidades costeras si el evento así lo amerita.

### 2.3.3. Procedimientos en Chile

El protocolo ONEMI, SHOA y FCFM (2019) establece cuáles son los procedimientos y acciones que se deben seguir en caso de un sismo en el territorio nacional, dividiendo el proceso en las fases de recopilación de información, evaluación de amenaza de tsunami, difusión de la amenaza, monitoreo y finalmente cancelación<sup>5</sup>, a continuación se resumen las fases descritas en el protocolo:

- **Recopilación de información:** En caso que ocurra un terremoto con magnitud 6.0 o superior en el territorio nacional, el CSN debe enviar al SHOA el informe preliminar del sismo en no más de 5 minutos desde su origen y no más de 20 minutos para el informe final (para el caso insular los tiempos pueden ser mayores). Asimismo, debe remitir a la ONEMI y al SHOA la información de la Fase-W a los 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 y 60 minutos desde el envío del informe preliminar. El envío de esta información es automática y no es obligación su envío mediante otros medios por lo que el SHOA lo debe considerar como antecedente informativo y no es obligación que lo evalúe. Por su parte, el SHOA recopila la información sísmica (magnitud e hipocentro) de las fuentes oficiales tanto nacionales como internacionales establecidas en el protocolo.
- **Evaluación de la amenaza de tsunami:** Esta fase es de exclusiva responsabilidad del SHOA, teniendo ONEMI una única herramienta para establecer una evacuación preventiva bajo criterios asociados a los reportes de intensidad que recopila dicha Oficina. La evaluación de amenaza de tsunami se basa en el peor escenario entregado por el Sistema Integrado para la Predicción y Alarma de Tsunami (SIPAT), que no necesariamente corresponde a la mayor magnitud ya que considera también la información del epicentro. Una vez que el tsunami es registrado instrumentalmente por Estaciones de Nivel del Mar (ENM), la evaluación puede variar en función de dichas mediciones. Esta evaluación discrimina tres procedimientos; el primero cuando el epicentro está dentro de un polígono de campo cercano, definido como un área en la que el sismo pueda ser perceptible y/o tenga potencial tsunamigénico en el territorio nacional, el segundo para eventos fuera

---

<sup>4</sup> Se utilizarán indistintamente ambos nombres para referirse a la misma institución.

<sup>5</sup> En el protocolo ONEMI, SHOA y FCFM (2019) están cubiertos todos los eventos sísmicos con magnitud 3.9 o superior ocurridos en el territorio nacional, así como también aquellos con potencial tsunamigénico ocurridos fuera del territorio nacional. En el presente escrito solamente se detallan aquellos con potencial tsunamigénico ocurridos en territorio nacional. Para más detalles sobre los otros escenarios referirse la protocolo mencionado

de ese polígono dentro de la cuenca del océano Pacífico, en los que el SHOA deberá homologar la evaluación difundida por el PTWC y el tercer caso para otras regiones del planeta, en la que deberá considerar toda la información de fuentes establecidas en el protocolo para realizar una evaluación. Los eventos que ocurren fuera del polígono de campo cercano son denominados de campo lejano. La figura 2.8 muestra en color rojizo el polígono de campo cercano para el territorio nacional continental, Archipiélago de Juan Fernández, Islas Salas y Gómez y Territorio Chileno Antártico y en amarillo para Isla de Pascua.

- Difusión de la amenaza de tsunami: El SHOA debe difundir a ONEMI, CSN, Autoridades Marítimas y Navales la evaluación de todo sismo de campo cercano magnitud 5.0 o superior y para aquellos de campo lejano todos aquellos magnitud 6.5 o superior. La difusión debe ser efectuada en menos de 5 minutos desde recibida la primera información sísmica de alguna de las fuentes establecidas en el protocolo.
- Monitoreo de la amenaza de tsunami: Durante el monitoreo el SHOA está facultado para emitir nuevas evaluaciones que provengan de mediciones instrumentales de nivel del mar en redes de estaciones nacionales e internacionales, boyas detectoras de tsunami y otros sistemas de detección.
- Cancelación de la amenaza de tsunami: El SHOA es el responsable de determinar la cancelación total (para el país) o parcial (para algún bloque particular) basándose en las mediciones de las ENM, información de Autoridades Marítimas Locales, información entregada por ONEMI y resultados de modelaciones disponibles de amplitudes de tsunami esperadas, mientras que a ONEMI le corresponde la responsabilidad de tomar las acciones para el retorno de la población a la condición normal.

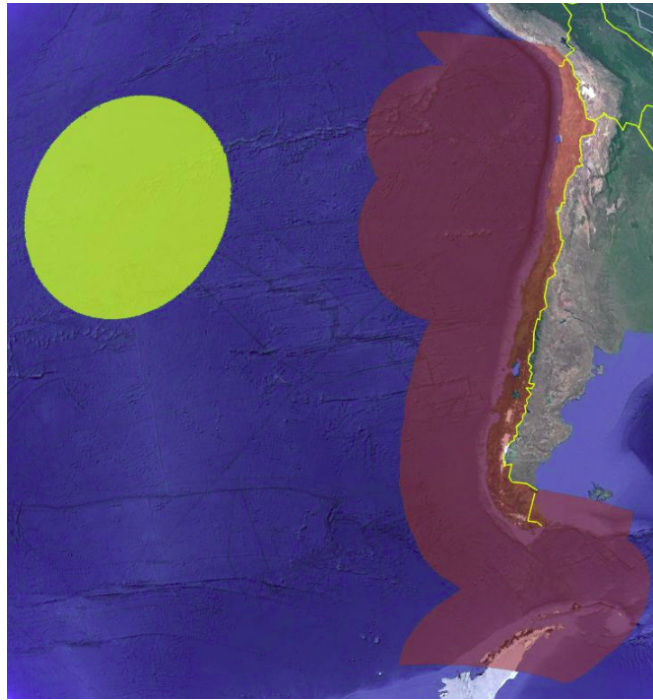


Figura 2.8: Polígono de campo cercano definido por el SHOA.

### 2.3.3.1. SIPAT

Existen diversas estrategias que se pueden adoptar en un Sistema de Soporte de Decisiones (SSD) para evaluar amenazas de tsunami; (i) están las basadas en modelación de tsunamis en tiempo cuasi-real, (ii) las basadas en escenarios de fuentes unitarias de tsunami precalculados y observaciones en tiempo real y (iii) aquellas que usan escenarios precalculados a partir de planos de fuente finita (homogéneas o heterogéneas) y observación sísmica o de tsunami. Las dos primeras suelen ser implementadas en áreas donde la distancia entre la costa y la fuente generadora del tsunami es grande (i.e. el tiempo de arribo del tsunami es grande) mientras que la tercera metodología es más utilizada en países en que la respuesta ante la posible ocurrencia de un tsunami debe ser rápida (Catalan et al., 2020).

Hasta al año 2015, el SHOA tenía un sistema de evaluación de tsunami que dependía de la magnitud y epicentro de un terremoto. Una vez ocurrido el sismo, difundía a la ONEMI un estado de amenaza de tsunami único para todo el país. Producto de lo anterior para el terremoto de Illapel  $M_W 8.3$ , se difundió un estado de Alarma de tsunami para todo Chile (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2015), lo que implicaba la evacuación de todo el borde costero del territorio nacional sin embargo, para la Región de Magallanes y Antártica Chilena, por ejemplo, no hubo tsunami que afectara a la población (Catalan et al., 2020).

El SIPAT es un SSD que fue implementado en el SHOA en mayo de 2016 para evaluar las amenazas de tsunami por terremotos de subducción al interior del polígono de campo cercano (ver figura 2.8), utilizando la tercera de las estrategias mencionadas. Para la evaluación de alerta temprana de la amenaza de tsunami utiliza las primeras informaciones sísmicas disponibles, evaluando rápidamente la necesidad de evacuar a la población de manera sectorizada (ver figura 2.9, extraída de Catalan et al. (2020)). Lo anterior es realizado mediante el uso de una base de datos de escenarios precalculados de eventos sísmicos que producen tsunami. Catalan et al. (2020, p. 5) define para estos efectos un escenario sísmico como “un evento sísmico representativo de un evento probable que ocurra en una cierta ubicación, caracterizada por su epicentro”, siendo estos escenarios los utilizados para la modelación del tsunami.

Los modelos realizados para poblar la base de datos consideran que la superficie libre del mar es idéntica a la deformación del fondo marino, la que es estimada utilizando el modelo de Okada (1985) y la propagación del tsunami es efectuada numéricamente con el programa COMMCOT que resuelve las Ecuaciones Lineales y No Lineales de Aguas Poco Profundas. Los escenarios son generados para Chile continental, Isla de Pascua y en cercanías la placa de Scotia (Catalan et al., 2020). La figura 2.11 muestra la distribución espacial de los epicentros de los escenarios contenidos en la base de datos del SIPAT, así como sus magnitudes  $M_W$ , strike, dip y rake, extraída de Catalan et al. (2020). Para modelar los escenarios se utilizaron grillas rectangulares dependientes del epicentro, con batimetría de GEBCO 2018 y 2014, con 8 horas de simulación y paso temporal de 1 segundo para los escenarios frente al continente, mientras que los otros escenarios cuentan con 22 horas de simulación y un paso temporal de 0.5 segundos (Catalan et al., 2020). Para ingresar un evento a la base de datos del SIPAT se efectúan diversas simulaciones y cada una de ellas tarda alrededor de 24 horas en ejecutarse.

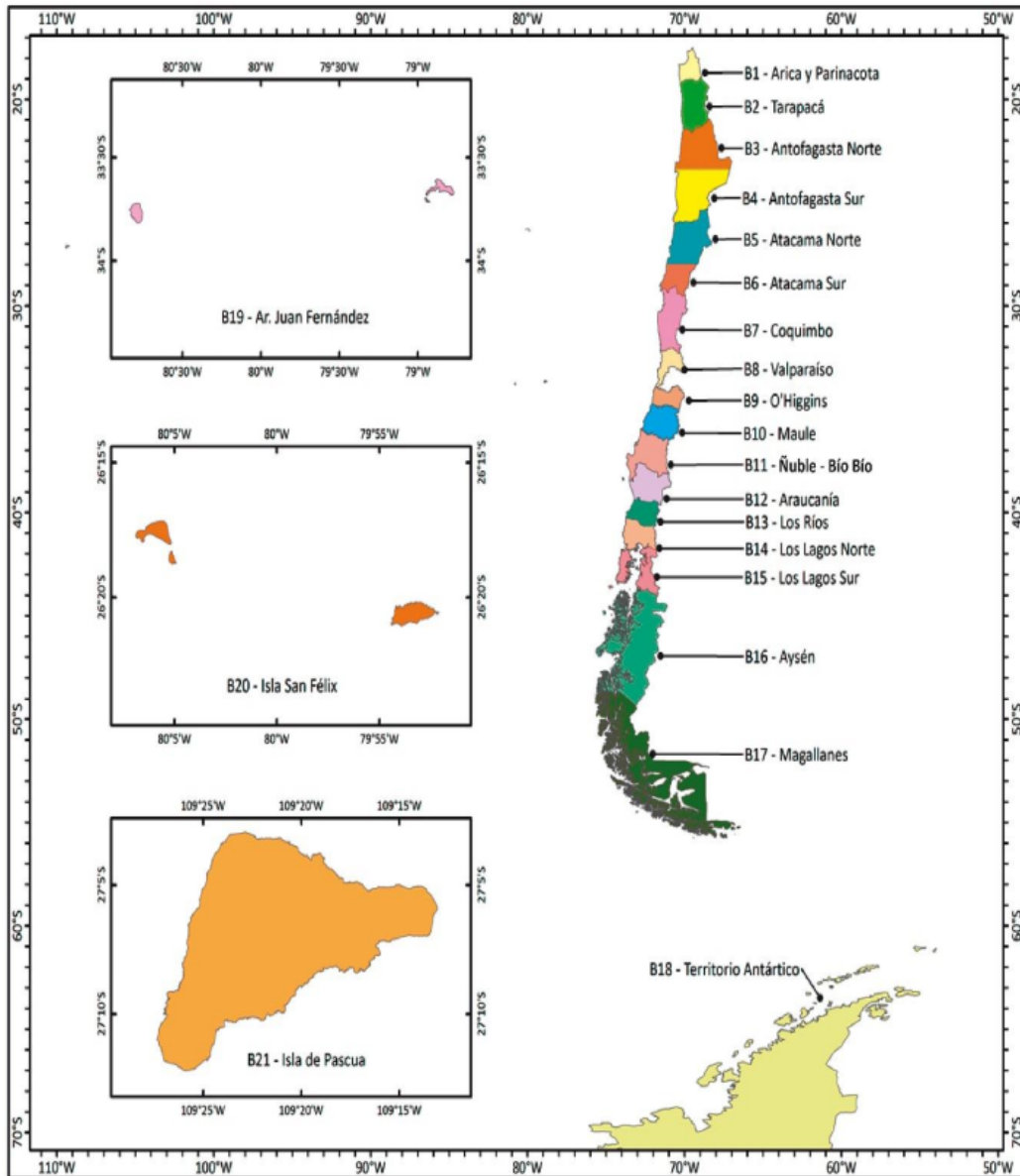


Figura 2.9: Bloques de decisión utilizados por el SIPAT.

La base de datos contiene solamente los parámetros necesarios de los resultados de las modelaciones precalculadas en puntos de pronóstico, lo que permiten estimar el nivel de amenaza de tsunami utilizando los estados Informativo, Precaución, Alerta y Alarma, dividiendo el país en bloques (ver figuras 2.10 y 2.9), definidos en el protocolo ONEMI, SHOA y FCFM (2019). Los puntos de pronóstico son aquellos donde se almacenan las desnivelaciones de la superficie del mar para evaluar los estados de amenaza, contándose con 635 puntos uniformemente distribuidos a lo largo de la costa de Chile (Catalan et al., 2020). La división que se presenta en la figura 2.9 se asemeja a la división político-administrativa del país (i.e. las Regiones), lo que facilita los procesos de evacuación.

ESTADO DE AMENAZA	AMPLITUD ESPERADA	ACCIÓN REQUERIDA	COLOR ASOCIADO
Informativo	< 0,3 [m]	No se requiere acción	Verde
Precaución	0,3 a 1,0 [m]	Evacuar zona de precaución <sup>(a)</sup>	Amarillo
Alerta	1,0 a 3,0 [m]	Evacuar hacia zona segura <sup>(b)</sup>	Naranja
Alarma	≥ 3,0 [m]		Rojo

Figura 2.10: Estados de amenaza de tsunami definidos en el protocolo ONEMI-SHOA-CSN (2019). (a) La zona de Precaución corresponde a los terrenos en la línea de playa hasta al menos 80 metros de ancho; (b) área contenida en la zona costera, a una altura superior a 30 metros sobre el nivel medio del mar (ONEMI, SHOA y FCFM, 2019).

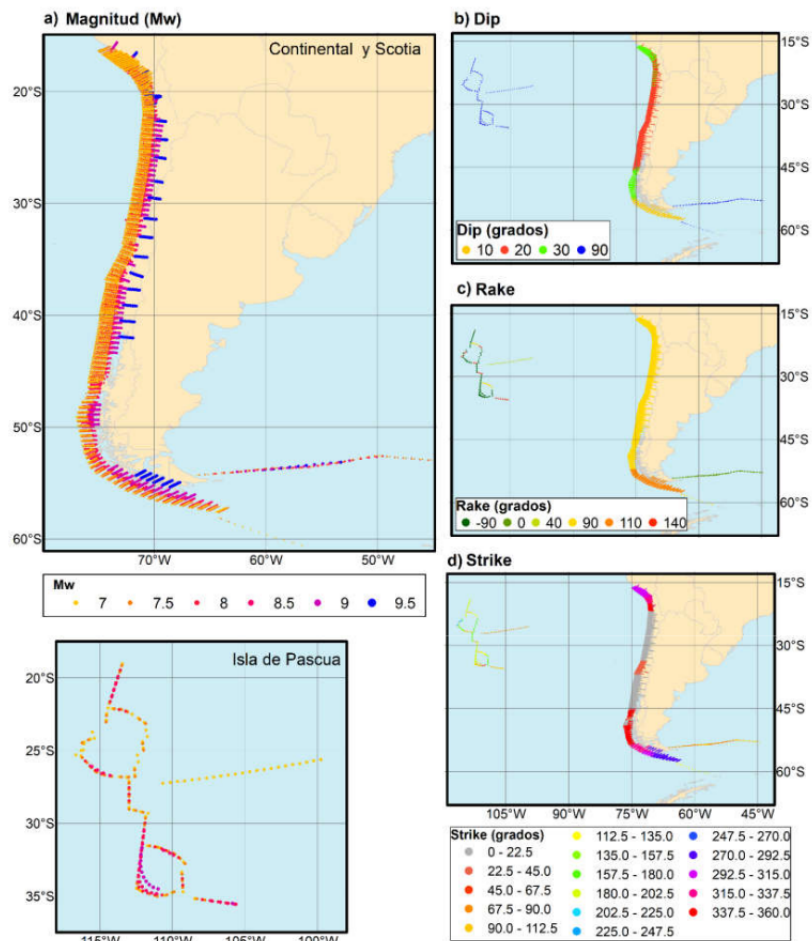


Figura 2.11: Escenarios precalculados en la base de datos del SIPAT.

Esta estrategia posee inevitablemente diferencias entre el escenario modelado y el real. Para minimizar la incertidumbre que esto genera se implementó de un área de incertidumbre

con dimensiones equivalentes al ancho y largo estimado del área de ruptura centrada en el epicentro. Esta área es usada para evaluar los resultados de todos los escenarios precalculados cuyos epicentros se encuentran en su interior, seleccionándolos como posibles candidatos. Por otro lado, para disminuir la incertidumbre que genera el uso de deslizamiento uniforme en los escenarios precomputados, se redondea el valor de la magnitud del evento hacia arriba para seleccionar, dentro del área de incertidumbre, todos aquellos terremotos con una magnitud levemente superior a la estimada. Dado que los eventos precomputados usan magnitudes cada 0.5, lo anterior significa que si el terremoto tiene una magnitud calculada de 8.3, se buscarán aquellos con magnitud 8.5. Luego, el resultado es un conjunto de escenarios candidatos de los que se rescata su nivel de peligro en cada punto de pronóstico, para seleccionar el mayor en cada uno. Con esto, el SIPAT efectúa la evaluación de amenaza de tsunami por cada bloque costero (ver figura 2.9) como el mayor nivel de amenaza de todos los puntos de pronóstico contenido en cada bloque (Catalan et al., 2020).

Respecto a los estados mencionados en la figura 2.11, el protocolo ONEMI-SHOA-CSN define el estado INFORMATIVO como aquel difundido por el SHOA a ONEMI, Autoridades Navales y Marítimas cuando no existe una amenaza de tsunami para el país, pudiendo existir tsunamis instrumentales (i.e. amplitud  $< 0.3$  [m]) que no serán percibidos por la población y que presentan riesgo alguno. El estado PRECAUCIÓN es emitido por el SHOA a los mismos interlocutores cuando existe una amenaza de tsunami que presenta riesgo evidente para la zona de precaución. Finalmente, el protocolo define los estados de ALERTA y ALARMA como aquellos difundidos por el SHOA cuando existe riesgo de un tsunami intermedio y mayor respectivamente, contemplando ambos la misma acción; evacuación hacia área de seguridad (ONEMI, SHOA y FCFM, 2019).

Existen estrategias levemente diferentes que pueden ser implementadas por los Sistemas de Alerta Temprana por ejemplo, el manual Planes y Procedimientos para Amenazas de Tsunami y Manejo de la Emergencia (Intergubernamental Oceanographic Commission, 2017), se muestra uno en el que existe un estado INFORMATIVO cuando no hay amenaza en costa o se espera que esta se presente en un tiempo superior a 6 horas, un estado de ALERTA relacionado a arribos de tsunami esperados entre 3 y 6 horas (independiente de la altura), un estado de PRECAUCIÓN que presenta una amenaza en menos de 3 horas con alturas de tsunami esperadas entre 0.3 y 1 metro y finalmente un estado de ALARMA asociado a amenazas en menos de 3 horas con alturas de tsunami esperadas sobre 1 metro (ver figura 2.12). El umbral de 3 horas que se menciona fue el tiempo que la Agencia de Manejo de Emergencias del Estado de Hawai determinó como el requerido para evacuar todas sus costas, por lo que en caso de querer implementar algo similar, se debe utilizar un umbral que se adecue a la realidad local. Este enfoque levemente diferente incorpora una componente temporal que debe ir de la mano con la estimación de horas de arribo de tsunami.



TSP Message	Earthquake Parameters	Maximum Tsunami Wave Amplitude Indicated	Threatened Coast	Time left to Initial Wave Arrival	NTWC Alert Level for Threatened Coast	Emergency Response Action
<b>Tsunami Threat</b>	Magnitude 7.1 or greater, undersea or very near the sea, and < 100 km depth	$\geq 1$ m	Sections of coast with forecast amplitudes $\geq 1$ m	< 3 hrs	WARNING	Evacuate xxx zones
				3 to 6 hrs	WATCH	Standby, Prepare to evacuate
				> 6 hrs	INFORMATION	Monitor for subsequent forecasts
		0.3 to 1 m	Sections of coast with forecast amplitudes 0.3 to 1 m	< 3 hrs	ADVISORY	Evacuate beaches and harbours
				3-6 hrs	WATCH	Standby, Prepare to evacuate
				> 6 hrs	INFORMATION	Monitor for subsequent forecasts
		< 0.3 m	None		INFORMATION	Monitor for subsequent forecasts

Figura 2.12: Ejemplo de criterios para la evaluación de amenaza de tsunami extraído de los Manuales y Guías de la COI, Planes y Procedimientos para Amenazas de Tsunami y Manejo de la Emergencia (2017).

Las figuras 2.13 y 2.14 muestran los resultados del SIPAT al utilizar los parámetros de los terremotos del Maule e Illapel respectivamente. Las figuras corresponden a capturas de pantalla de ejercicios que efectuó el SNAM.

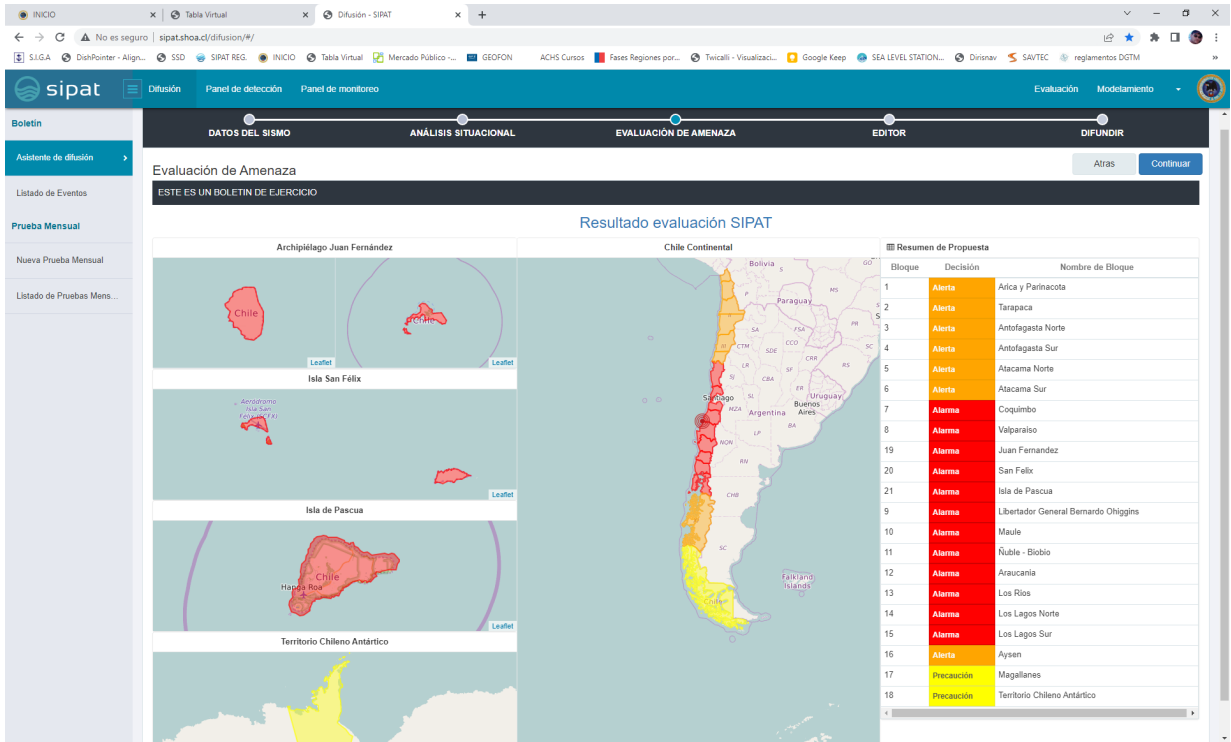


Figura 2.13: Resultado de evaluar la amenaza de tsunami a partir del terremoto del Maule (2010) utilizando el SIPAT (captura de pantalla proporcionada por el SNAM).

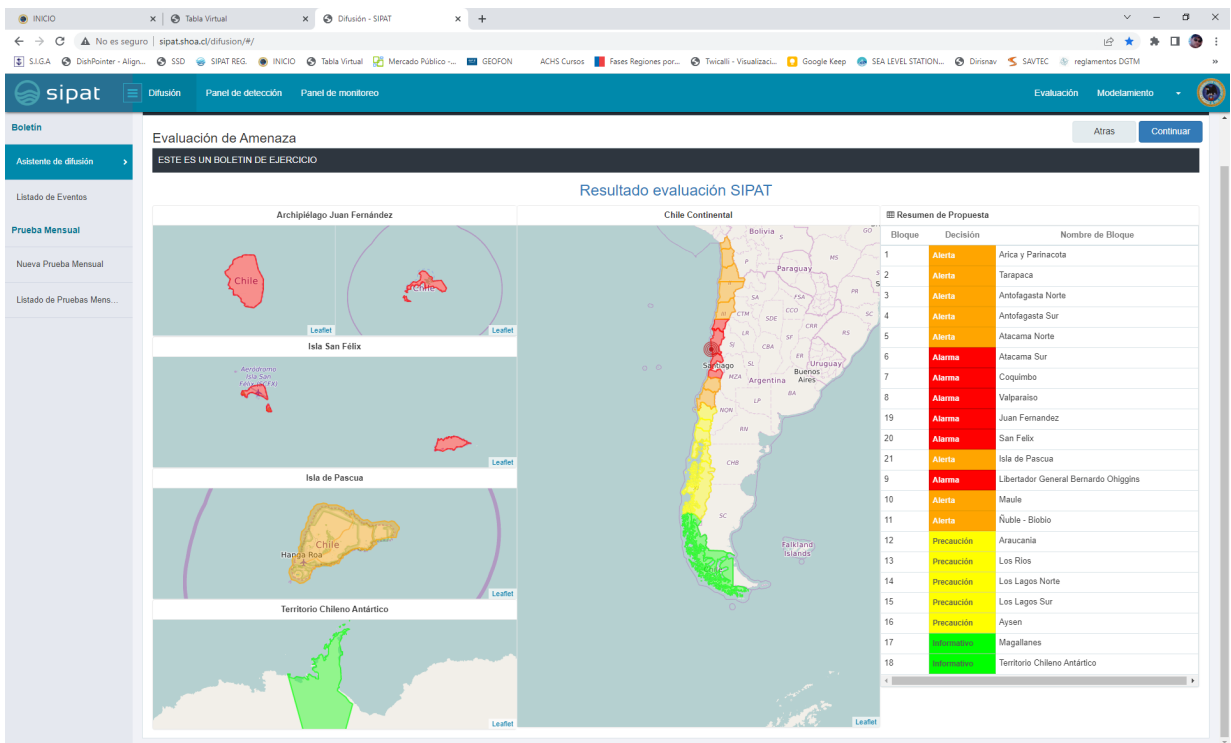


Figura 2.14: Resultado de evaluar la amenaza de tsunami a partir del terremoto de Illapel (2015) utilizando el SIPAT (captura de pantalla proporcionada por el SNAM).

### 2.3.3.2. Evaluación con SIPAT

Para evaluar amenazas de tsunami utilizando el SIPAT es necesario que se cumplan ciertas condiciones. Debe tratarse de un evento cuyo epicentro esté en un área que cuente con escenarios precalculados es decir, terremotos de subducción frente a las costas de Chile para el territorio continental, en la “zona tsunamigénica” y otras áreas que se muestran en la figura 2.11. En caso que ocurra un terremoto que cumpla con ello, su magnitud debe ser mayor o igual a 7.0 para que sea evaluado por SIPAT (de lo contrario no buscará escenarios candidatos).

En la figura 2.15 se muestra el diagrama de flujo que sigue el SNAM cuando ocurre un sismo de campo cercano. La línea roja representa las condiciones para que un evento pueda ser evaluado utilizando el SIPAT. Actualmente, la magnitud utilizada por el SNAM puede provenir de diferentes escalas como magnitud local ( $M_L$ ), magnitud de momento ( $M_W$ ), magnitud de momento a partir de la Fase-W ( $M_{WW}$ ), magnitud de ondas superficiales ( $M_S$ ), etc. y todas serán tratadas de igual manera (ONEMI, SHOA y FCFM, 2019).

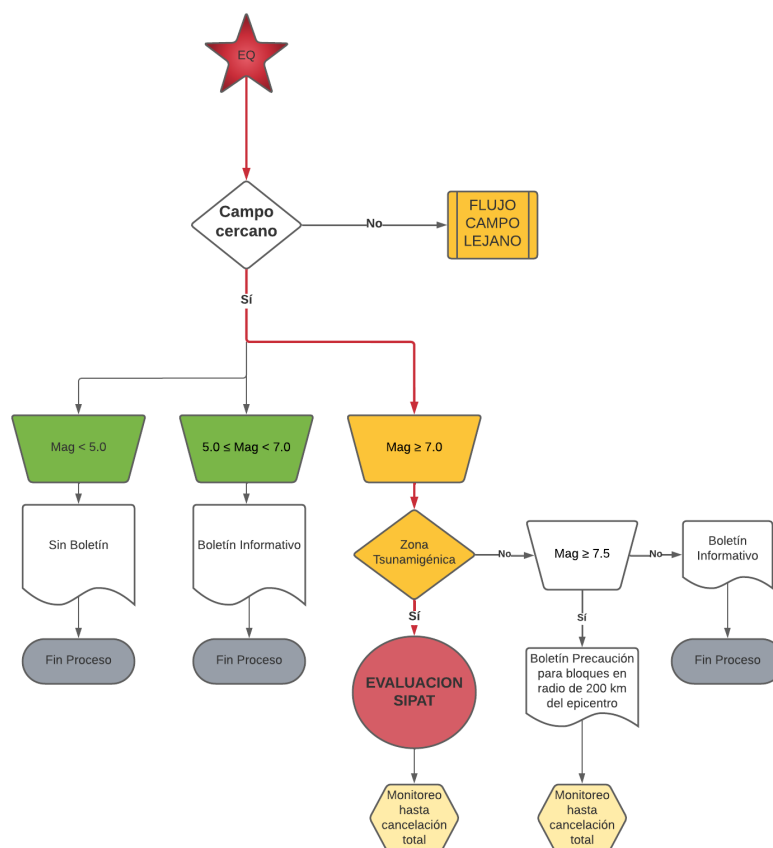


Figura 2.15: Diagrama de flujo de procedimientos para evaluación de amenaza de tsunami a partir de un terremoto de campo cercano.

### 2.3.3.3. Evaluación sin SIPAT

En caso que el epicentro del terremoto no esté dentro de la zona tsunamigénica pero sí dentro del polígono de campo cercano y tenga un magnitud igual o superior a 7.5, el SHOA decretará estado de Precaución para aquellos bloques que tengan alguna parte de

ellos contenida en una circunferencia de 200 [km] de radio centrada en el epicentro. Si su magnitud está entre 7.0 y 7.5 se difundirá un Boletín Informativo, que indica que no hay amenaza de tsunami para el territorio nacional (ver figura 2.15).

Para aquellos terremotos que ocurren fuera del polígono de campo cercano pero dentro de la cuenca del Pacífico, la evaluación que difundirá el SHOA será de acuerdo a lo establecido por el PTWC bajo sus criterios.

#### 2.3.3.4. Tiempos de viaje de tsunami

Otro producto que el SNAM difunde, independiente de la ubicación del terremoto, son las horas esperadas de la primera llegada del tsunami a aquellas localidades que cuentan con una Estación de Nivel del Mar y que se encuentren en un bloque cuyo estado de amenaza es Precaución o superior, lo que hace a través de un boletín similar al de evaluación de amenaza.

El cálculo se hace utilizando el software TTT (Wessel, 2009) que efectúa los cálculos de los primeros arribos basado en la aproximación de velocidad de propagación de ondas en aguas someras para el frente de ondas de tsunami, en que la velocidad está dada por la ecuación 2.1, donde  $g$  es la normal de la aceleración de gravedad como función de la latitud ( $y$ ) y  $d$  es la profundidad del agua (positiva hacia abajo) en la posición  $(x, y)$ . Con esto, es posible conocer las velocidades en todos los puntos de la grilla independiente del evento en curso.

$$v(x, y) = \sqrt{g(y) \cdot d(x, y)} \quad (2.1)$$

El programa utiliza construcciones de círculos de Huygens para integrar los tiempos de viaje desde el epicentro a cada nodo en la grilla, por lo que se deben agregar incrementos del tipo

$$\Delta t(r) = \int_0^r \frac{dx}{v(x)} = \int_0^r s(x) dx \quad (2.2)$$

donde  $s(x)$  representa la lentitud a lo largo del recorrido, lo que permite calcular la integral como una función lineal derivada de las velocidades en la grilla. Los círculos son aproximados por polígonos con hasta 120 nodos. Estas aproximaciones hacen que los cálculos sean extremadamente rápidos, teniendo los resultados de las horas de arribo en algunos segundos, requiriendo solo de un epicentro y las coordenadas de aquellos puntos donde se quiere obtener las horas de arribo.

La precisión del cálculo depende de la resolución de la grilla batimétrica y según Wessel (2009), para centros de alerta se pueden emplear grillas de 2x2 o 5x5 minutos de arco, con lo que se obtienen tiempos de arribo con un margen de error típicamente de hasta 30 minutos.

Dentro de las consideraciones a tener, Wessel (2009) menciona que para Chile existen grandes diferencias en los tiempos de arribo que se calculan con los reportados<sup>6</sup> en la zona de fiordos y Estrecho de Magallanes, debido a que con grillas de 5x5 minutos de arco hay muchos pasos de agua que quedan cerrados, generando caminos completamente diferentes a los reales, observando hasta 10 horas de diferencia, aunque la grilla de 2x2 mostró un comportamiento mucho mejor, las diferencias seguían siendo de algunas horas.

La forma en que el software entrega este producto es un archivo de texto plano con tiempos de viaje desde el origen o con horas y fechas (según le indique el operador) y también se puede generar una imagen como la que se muestra en la figura 2.16 extraída de Wessel (2009).

---

<sup>6</sup> Se usó como caso de estudio el tsunami generado por el terremoto de 1960.

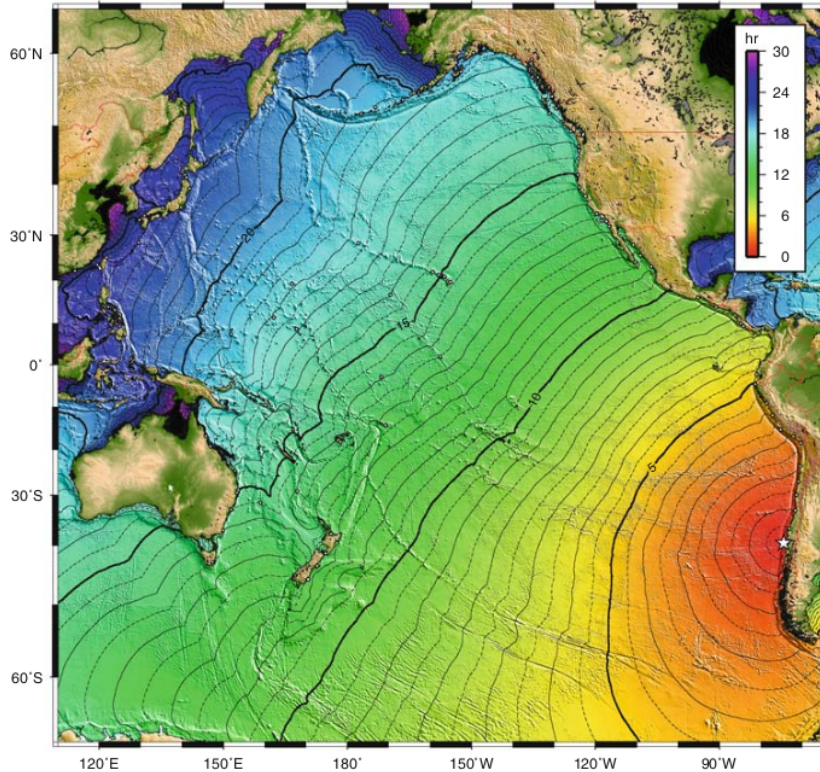


Figura 2.16: Tiempos de viaje del frente de ondas del tsunami predichos a partir del terremoto de 1960 (Chile). La estrella indica el punto de origen del cálculo. Las líneas gruesas representan horas y las delgadas corresponden a isocronas cada 30 minutos (Wessel, 2009).

Esta información es traducida automáticamente por el SNAM en un Boletín que se encuentra regulado en el Protocolo ONEMI-SHOA-CSN.

### 2.3.3.5. Ventajas y desventajas de la metodología actual

La implementación del SIPAT significó una mejora sustancial en la forma en que el SHOA evalúa las amenazas de tsunami a partir de terremotos; de evaluar utilizando una fuente puntual para determinar un único nivel de amenaza para todo el país basándose en la experiencia e historia de eventos anteriores a hacerlo mediante modelación de fuentes finitas precalculadas para entregar un boletín de amenazas sectorizado para el país. Aun así, como todo sistema tiene sus ventajas y desventajas.

A continuación se presentan algunos aspectos a considerar sobre el SIPAT en la evaluación de amenaza de tsunami:

- **Tiempo de respuesta:** Debido a que el SIPAT funciona a través de una base de datos de escenarios pre-calculados, su tiempo de respuesta es muy rápido ya que una vez ocurrido el terremoto no se efectúan cálculos ni modelaciones sino que solamente se buscan los escenarios candidatos y se selecciona el resultado adecuado, bajo los criterios descritos. Su tiempo de respuesta es inferior a 1 minuto desde recibida la información sísmica (Catalan et al., 2020).
- **Modelación de la fuente:** Debido a que su operación se basa en escenarios pre-calculados, se deben asumir algunas características de la fuente como la geometría de las fallas (actualmente se usan rectangulares con distribución de slip homogéneo a lo largo

del plano de falla), lo que genera diferencias en el tsunami producido por el terremoto real y el modelado que está almacenado en la base de datos.

- **Amenaza sectorizada:** SIPAT permitió sectorizar la amenaza de tsunami pasando de contar con un estado de amenaza para todo el país a niveles de amenaza diferenciados para 21 bloques. Esto es algo que se puede homologar para cualquier sistema de evaluación de tsunami y es tremendamente positivo.
- **Simpleza en la operación:** Debido a que no se efectúan modelaciones durante la evaluación, el SIPAT es muy simple de operar, solamente requiere que se ingresen algunos parámetros básicos del terremoto para obtener los niveles de amenaza de tsunami. Lo anterior tiene aspectos positivos y negativos; es bueno debido a que no requiere de capacitaciones muy extensas para operarlo y disminuye la probabilidad de errores en su operación, pero por otro lado se convierte en una especie de caja negra, teniendo poco control y entendimiento sobre el proceso y las soluciones, lo que podría inducir errores en el análisis.
- **Costo computacional:** Es muy alto para generar los escenarios premodelados, pero para la operación del sistema es muy bajo, solo requiere acceso a la base de datos, a diferencia de otros sistemas que requieren modelar la generación y propagación del tsunami.
- **Uso de fuentes generadoras de tsunami:** Para que el SNAME pueda evaluar la amenaza de tsunami utilizando SIPAT es necesario que el epicentro del terremoto se encuentre en un sector que contiene escenarios precalculados, limitando la distribución espacial para evaluación usando modelos físico-matemáticos. Por otro lado, SIPAT no discrimina tipo de magnitud, lo que podría inducir errores por ejemplo, ocasionando una subestimación del evento en casos de terremotos del tipo *tsunami earthquake*.
- **Estimación de horas de arribo:** Cálculos muy rápidos pero con incertidumbres de hasta 30 minutos en los arribos desde Puerto Montt al norte. Hacia el sur la incertidumbre es aun mayor, dependiendo de la resolución de la grilla. Si bien este cálculo se hace solamente para aquellos bloques que tienen un estado de amenaza, los tiempos de arribo no están integrados con los estados de amenaza. El programa aproxima la fuente como una puntual, despreciando los efectos de su tamaño lo que para terremotos grandes y muy grandes puede provocar distorsiones importantes.
- **Geometría de la falla:** Dado que el modelo es pre-cómputado, algunos aspectos de la geometría de la falla son bien conocidos. Por ejemplo el *dip* y el *strike* se pueden obtener a partir del mejor conocimiento que se tenga de la falla geológica asociada a la fuente (por ejemplo la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana). Sin embargo, se limita a aquellos mecanismos y geometrías precomputadas.

# Capítulo 3

## Modelación de tsunami en tiempo cuasi-real

### 3.1. Tratamiento numérico

Existen diversos modelos que permiten explicar la propagación de las ondas de tsunami. En este trabajo se seguirá el desarrollo propuesto por Fuentes (2013) y Fuentes et al. (2019), con un enfoque numérico para aproximar el sistema de *shallow water equations* mediante diferencias finitas.

Fuentes (2013) propone una aproximación lineal a partir de las ecuaciones de aguas poco profundas mediante el sistema de ecuaciones 3.1, cuyas variables se explican en el esquema de la figura 3.1, extraído de Fuentes et al. (2019).

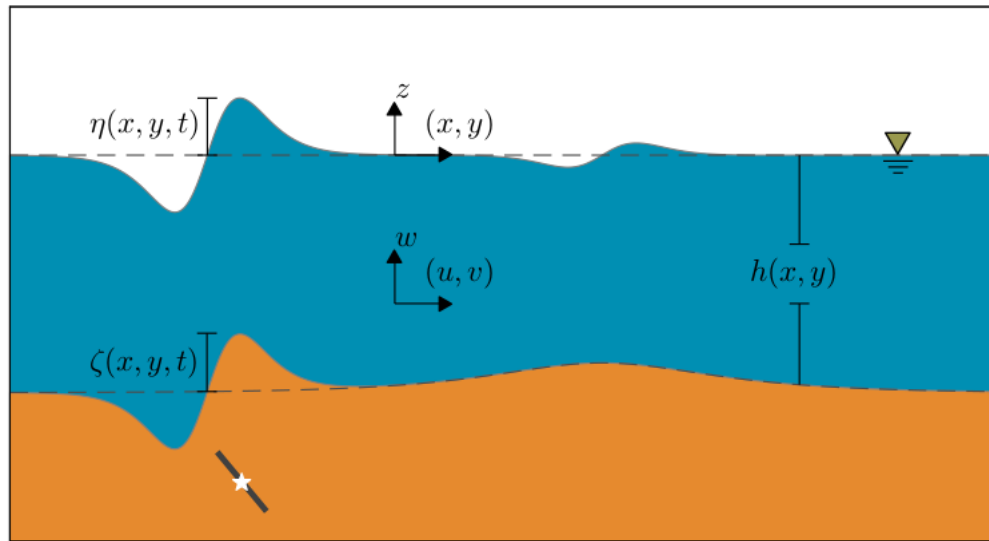


Figura 3.1: Esquema de las variables del sistema de ecuaciones de aguas poco profundas.

$$\begin{aligned}\eta_t + ((\eta + h)u)_x + ((\eta + h)v)_y &= \zeta_t \\ u_t + uu_x + vv_y + g\eta_x &= 0 \\ v_t + uv_x + vv_y + g\eta_y &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$

Si en el sistema de ecuaciones 3.1 se consideran solamente los términos de primer orden, se obtiene el nuevo sistema 3.2.

$$\begin{aligned}\eta_t + (hu)_x + (hv)_y &= \zeta_t \\ u_t + g\eta_x &= 0 \\ v_t + g\eta_y &= 0\end{aligned}\tag{3.2}$$

Lo anterior se puede simplificar eliminando las variables  $u$ ,  $v$  derivando la primera de las ecuaciones con respecto al tiempo y reemplazando la segunda y tercera en la primera, con lo que se puede escribir la EDP de la ecuación 3.3.

$$\eta_{tt} - g((h\eta_x)_x + (h\eta_y)_y) = \zeta_{tt}\tag{3.3}$$

### 3.1.1. Aproximación mediante diferencias finitas

En este trabajo se aproxima la ecuación 3.3 mediante diferencias finitas, discretizando el dominio a partir de una grilla con el origen del eje de coordenadas en su esquina, definiendo por lo tanto  $(x_i, y_j) = (i\Delta x, j\Delta y)$ , con  $i = 0, 1, \dots, n_x$  y  $j = 0, 1, \dots, n_y$ . Con lo anterior, las dimensiones  $D_L$  y  $D_W$  del dominio estarán dadas por  $D_L = n_x\Delta x$  y  $D_W = n_y\Delta y$ . Por simplicidad se considerará  $\Delta x = \Delta y \equiv \Delta s$ .

Para el caso de la variable temporal, la discretización sigue la misma lógica;  $t_k = k\Delta t$ , con  $k = 0, 1, \dots, N_t$ . Luego, el tiempo total estará dado por  $T_t = N_t\Delta t$ .

Implementando las discretizaciones mencionadas en la ecuación 3.3, ésta queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\eta_{i,j}^{k+1} - 2\eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2} = g \frac{K}{\Delta s} + \frac{\zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2}\tag{3.4}$$

con

$$K = (h\eta_x)_{i+\frac{1}{2},j}^k - (h\eta_x)_{i-\frac{1}{2},j}^k + (h\eta_y)_{i,j+\frac{1}{2}}^k - (h\eta_y)_{i,j-\frac{1}{2}}^k$$

Expandiendo algunos términos en  $K$ ,

$$K = h_{i+\frac{1}{2},j} \eta_{x,i+\frac{1}{2},j}^k - h_{i-\frac{1}{2},j} \eta_{x,i-\frac{1}{2},j}^k + h_{i,j+\frac{1}{2}} \eta_{y,i,j+\frac{1}{2}}^k - h_{i,j-\frac{1}{2}} \eta_{y,i,j-\frac{1}{2}}^k$$

Para aproximar los puntos intermedios de batimetría se empleará la siguiente media:

$$p_{i\pm\frac{1}{2}} =: \frac{p_i + p_{i\pm 1}}{2}$$

Reemplazando las diferencias centrales entre puntos intermedios, se puede escribir

$$K = h_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k}{\Delta s} - h_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\eta_{i,j}^k + \eta_{i-1,j}^k}{\Delta s} + h_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j}^k}{\Delta s} - h_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{\eta_{i,j}^k + \eta_{i,j-1}^k}{\Delta s}$$

Por simplicidad y dejando el término  $\frac{1}{\Delta s}$  fuera de  $K$  en la expresión anterior, la ecuación 3.4 se puede reescribir:



$$\eta_{i,j}^{k+1} - 2\eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1} = g \frac{\Delta t^2}{\Delta s^2} K + \zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1} \quad (3.5)$$

Finalmente, si se define la constante asociada a la condición *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL) como  $R =: g(\frac{\Delta t}{\Delta s})^2$  y se utiliza en la ecuación 3.5, se obtiene una expresión que puede ser implementada como un *solver* numérico, en el que no es necesario calcular derivadas de la batimetría y utiliza puntos de grilla intermedios. Si se reorganizan algunos términos y se expande, se puede expresar:

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^{k+1} = & \left[ 2 - R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j} + h_{i,j+\frac{1}{2}} + h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right] \eta_{i,j}^k - \eta_{i,j}^{k-1} + \\ & R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} \eta_{i+1,j}^k + h_{i-\frac{1}{2},j} \eta_{i-1,j}^k + h_{i,j+\frac{1}{2}} \eta_{i,j+1}^k + h_{i,j-\frac{1}{2}} \eta_{i,j-1}^k \right) + \zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Para implementar la ecuación 3.6, basta definir las condiciones iniciales y de borde, con lo que se obtendrá la altura de tsunami para cualquier punto del dominio espacial y en cualquier instante de tiempo<sup>7</sup>.

### 3.1.2. Condición inicial

Para los tsunamis producidos por terremotos tsunamigénicos, considerados en este trabajo, de manera directa, la condición inicial corresponderá a la deformación del fondo marino. En términos de los modelos físico-matemáticos es posible identificar dos casos; la generación pasiva o estática y la generación activa o cinemática. La diferencia entre ambos casos radica en la consideración o no de los efectos temporales en la generación del tsunami a partir de una ruptura sísmica, dado que la velocidad de propagación del tsunami es considerablemente más lenta que la de generación, este último fenómeno se puede considerar como instantáneo en la mayoría de los casos (Kajiura, 1981). Sin embargo, existen algunas ocasiones en que el tiempo de ruptura del terremoto puede jugar un rol importante en la generación del tsunami determinada por el proceso de ruptura sísmica, como por ejemplo para terremotos lentos, o incluso megaterremotos que puedan tener bajas velocidades de ruptura y/o duraciones muy largas (Fuentes et al., 2018).

Hay diversos factores de la ruptura que influyen en la generación del tsunami, por lo que existen diferentes enfoques para modelar esta etapa inicial. Los más sencillos utilizan fallas finitas homogéneas, de geometrías simples y con una deformación instantánea del fondo marino, replicando la misma deformación en la superficie del agua para utilizarla como condición inicial, mientras que soluciones más complejas incorporan ciertas heterogeneidades de la falla como la distribución de *slip*, tiempos y velocidades de ruptura, espesor de la columna de agua, etc.

Para el caso de alerta temprana, una estrategia bastante utilizada es la de contar con una base de datos de escenarios premodelados, asumiendo ciertas hipótesis sobre los parámetros de posibles terremotos con potencial tsunamigénico. En ese sentido, se modelan diversos escenarios con diferentes parámetros predefinidos, imponiendo sesgos como por ejemplo al utilizar deslizamiento uniforme en la falla (Catalan et al., 2020). Si bien existen formas de mitigar los sesgos, con esta metodología siempre existirán diferencias entre el terremoto real que ocurra y el escenario almacenado en la base de datos que más se asemeje.

<sup>7</sup> Nótese que es una solución numérica y no analítica, por lo que para conocer la altura de tsunami en un instante de tiempo, en cualquier punto, se debe conocer la altura en el instante de tiempo anterior.

Otra alternativa es lo presentado por Riquelme et al. (2018), cuya metodología permite determinar los parámetros de la ruptura sísmica considerando sus heterogeneidades en corto tiempo, teniendo dentro de sus resultados la distribución de slip, lo que puede proyectarse a la superficie utilizando el modelo de deformación de Okada (1985). Esta estrategia está basada en la implementación del algoritmo *W-phase*, o fase-W, para calcular el tensor de momento de terremotos medianos y grandes, mejorando las soluciones en el corto tiempo, a medida que el terremoto es registrado en más estaciones.

### 3.1.2.1. Generación Pasiva

Independiente de la consideración o no de las heterogeneidades del proceso, en el caso de la generación pasiva o estática se supone una ruptura instantánea y por lo tanto invariable en el tiempo, en que la deformación de la superficie del agua será idéntica a la del fondo marino (deformación estática, siguiendo por ejemplo el modelo de Okada (1985)). En términos numéricos,  $\zeta \equiv 0$  y  $\eta_{i,j}^0 = \zeta_{i,j}^0$ , además dada la velocidad inicial nula, se impone que  $\eta_t(x, y, 0) = 0$ , lo que se puede expresar en diferencias centrales como:

$$\frac{\eta_{i,j}^1 - \eta_{i,j}^{-1}}{2\Delta s} = 0 \iff \eta_{i,j}^1 = \eta_{i,j}^{-1} \quad (3.7)$$

Si la relación anterior se reemplaza en la ecuación 3.6, se obtiene:

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^1 = & \frac{1}{2} \left[ 2 - R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j} + h_{i,j+\frac{1}{2}} + h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right] \eta_{i,j}^0 + \\ & \frac{R}{2} \left( h_{i+\frac{1}{2},j} \eta_{i+1,j}^0 + h_{i-\frac{1}{2},j} \eta_{i-1,j}^0 + h_{i,j+\frac{1}{2}} \eta_{i,j+1}^0 + h_{i,j-\frac{1}{2}} \eta_{i,j-1}^0 \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

La ecuación anterior permite obtener la altura en cualquier punto del dominio espacial para la iteración temporal  $k = 1$ , dado que se conoce la condición en el tiempo  $k = 0$ , obtenida mediante el conocimiento de la deformación estática del fondo marino.

### 3.1.2.2. Generación Activa

Por otro lado, si se considera una generación cinemática del tsunami, se debe imponer que  $\eta_{i,j}^0 = 0$  y  $\eta_{i,j}^1 = \eta_{i,j}^{-1}$ , luego si se asume que  $\zeta_t(x, y, 0) = 0$ , a partir de la ecuación 3.6 se obtiene que

$$\eta_{i,j}^1 = \frac{1}{2} (\zeta_{i,j}^1 - 2\zeta_{i,j}^0 + \zeta_{i,j}^{-1}) \equiv \zeta_{i,j}^1 - \zeta_{i,j}^0 \quad (3.9)$$

La relación anterior permite iniciar las iteraciones sobre la ecuación 3.6 para modelar la propagación.

### 3.1.2.3. Implementación cinemática de la ruptura

Es posible considerar el término forzante asociado a la duración finita que tiene la ruptura, lo que se puede modelar utilizando los parámetros cinemáticos de la fuente sísmica. Para ello, se denotará  $\zeta_0(\vec{x}, t)$  a la deformación estática, la que se puede obtener mediante el modelo de Okada (1985). Para describir la contribución temporal se pueden utilizar los tiempos de ruptura y *rise-time* ( $t_V$  y  $t_r$  respectivamente). En el caso cinemático, es suficiente con modelar cada punto de la falla (o subfalla) como una liberación de momento, lo que se puede describir con una función triangular, definida como:

$$\mathcal{S}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau \leq 0 \\ 2\tau^2 & \text{si } 0 < \tau \leq \frac{1}{2} \\ 4\tau - 2\tau^2 - 1 & \text{si } \frac{1}{2} < \tau \leq 1 \\ 1 & \text{si } 1 \leq \tau \end{cases} \quad (3.10)$$

La función  $S(\tau)$  representa la integral de una función triangular de duración unitaria. Luego,  $\zeta(\vec{x}, t)$  posee la historia temporal de la liberación de momento en el punto  $\vec{x} = (x, y)$ . Es decir, cada punto  $(x, y)$  tiene una historia temporal que lo lleva desde 0 a su valor final. Si se asume que la deformación estática de la celda  $n$ , de un total  $N_S$ , es  $\zeta_0^n(x, y)$ ; el caso estático corresponderá a la suma de las contribuciones individuales:

$$\zeta_0(x, y) = \sum_{n=1}^{N_S} \zeta_0^n(x, y) \quad (3.11)$$

Por otro lado, si se considera un caso cinemático, se debe realizar la suma ponderada retrasando los tiempos según la función  $S(\tau)$ , lo que se puede expresar como:

$$\zeta(x, y, t_n) = \sum_{n=1}^{N_S} \zeta_0^n(x, y) S\left(\frac{t_n - t_V(x, y)}{t_R(x, y)}\right) \quad (3.12)$$

La cantidad de instantes de tiempo a calcular dependerá de  $\Delta t$  y la duración de la fuente  $T_d$ , dada por

$$T_d \leq \max_{\vec{x} \in \text{falla}} t_V(\vec{x}) + t_r(\vec{x})$$

Se debe tener presente que la ecuación utiliza  $\zeta_{tt}$ , término que se anula cuando la función  $S$  se vuelve constante, es decir  $S(\tau) = 1$ , lo que ocurre para todas las subfallas si  $t > T_d$ .

### 3.1.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde permiten al modelo gestionar dos situaciones que se deben diferenciar; el borde abierto y el límite entre el agua y la tierra, es decir la costa.

#### 3.1.3.1. Borde Abierto

Esta condición se debe aplicar en aquellas zonas donde las ondas deben abandonar el dominio de cálculo, dejando de interactuar con éste. Con la finalidad de evitar reflexiones artificiales, se agrega una región de amortiguamiento inmediatamente después del dominio, en la que las ondas se atenuarán hasta extinguirse. Por simplicidad, se consideró el mismo ancho de la región de amortiguamiento en los 4 bordes del dominio. Para ello se puede definir una función  $\alpha(x, y)$ , tal que:

$$\alpha(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x, y) \in \text{Dominio de cálculo} \\ \gamma_1(x) & \text{si } x \notin \text{Dominio de cálculo} \\ \gamma_2(y) & \text{si } y \notin \text{Dominio de cálculo} \end{cases} \quad (3.13)$$

Por continuidad, las funciones  $\gamma_i$  deben valer cero en el límite del dominio de cálculo y aumentar su valor suavemente hacia sus extremos, para lo que se puede definir  $\gamma_i(\kappa) = C_i \kappa^2$ , con  $\kappa$  una variable local en el dominio de amortiguamiento. Para implementar esto en el

modelo, se debe agregar un término disipativo (destacado en color magenta) a la ecuación 3.3, quedando:

$$\eta_{tt} + \alpha\eta_t - g((h\eta_x)_x + (h\eta_y)_y) = \zeta_{tt} \quad (3.14)$$

Lo que en diferencias finitas se expresaría

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^{k+1} = & \left[ 2 - R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j} + h_{i,j+\frac{1}{2}} + h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right] \eta_{i,j}^k - \eta_{i,j}^{k-1} + \\ & R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} \eta_{i+1,j}^k + h_{i-\frac{1}{2},j} \eta_{i-1,j}^k + h_{i,j+\frac{1}{2}} \eta_{i,j+1}^k + h_{i,j-\frac{1}{2}} \eta_{i,j-1}^k \right) \\ & - \Delta t^2 \alpha_{i,j} \frac{\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k-1}}{2\Delta t} + \zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Como lo anterior incorpora nuevamente el término  $\eta_{i,j}^{k+1}$ , reordenando la ecuación anterior se obtiene la forma final que considera esta condición de borde

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^{k+1} = & \left( \frac{1}{\frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1} \right) \left\{ \left[ 2 - R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j} + h_{i,j+\frac{1}{2}} + h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right] \eta_{i,j}^k - \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} - 1 \right) \eta_{i,j}^{k-1} + \right. \\ & \left. R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} \eta_{i+1,j}^k + h_{i-\frac{1}{2},j} \eta_{i-1,j}^k + h_{i,j+\frac{1}{2}} \eta_{i,j+1}^k + h_{i,j-\frac{1}{2}} \eta_{i,j-1}^k \right) + \zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1} \right\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Por conveniencia, se definirán los siguientes términos, en que los súper-índices de los coeficientes  $B_{i,j}$  se refieren a las celdas *right*, *left*, *up* y *down* respectivamente:

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left[ 2 - R \left( h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j} + h_{i,j+\frac{1}{2}} + h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right] \\ D_{i,j} &= \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} - 1 \right) \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^r &= \left( R h_{i+\frac{1}{2},j} \right) \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^l &= \left( R h_{i-\frac{1}{2},j} \right) \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^u &= \left( R h_{i,j+\frac{1}{2}} \right) \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^d &= \left( R h_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Con dichos coeficientes, la ecuación 3.16 se puede reescribir como

$$\begin{aligned} \eta_{i,j}^{k+1} = & A_{i,j} \eta_{i,j}^k + D_{i,j} \eta_{i,j}^{k-1} + B_{i,j}^r \eta_{i+1,j}^k + B_{i,j}^l \eta_{i-1,j}^k + B_{i,j}^u \eta_{i,j+1}^k + B_{i,j}^d \eta_{i,j-1}^k + \\ & \left( \frac{\alpha_{i,j}\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left( \zeta_{i,j}^{k+1} - 2\zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j}^{k-1} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Esta última expresión corresponde al *solver* de la ecuación 3.6 que considera la condición de borde abierto y que además se puede comenzar a iterar con las expresiones de las condiciones iniciales ya descritas.

### 3.1.3.2. Costa

La condición de borde en costa se debe comportar como un reflector perfecto, lo que se puede representar mediante una condición de Neumann que toma la forma

$$\frac{\partial \eta}{\partial \hat{n}} = \nabla \eta \cdot \hat{n} = 0 \quad (3.19)$$

Con  $\hat{n}$  la normal unitaria exterior al borde. La ecuación 3.19 se puede expresar para coordenadas cartesianas, localmente en cada celda, como

$$\begin{aligned} \eta_x &= 0, & \text{si } \hat{n} &= \pm \hat{i} & \text{(celdas cuyas caras dan al este u oeste)} \\ \eta_y &= 0, & \text{si } \hat{n} &= \pm \hat{j} & \text{(celdas cuyas caras dan al norte o sur)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Para implementar lo anterior, se necesita saber en qué celdas corresponde aplicar esta condición; si se usa como ejemplo la celda  $(i_0, j_0)$ , lo primero es conocer si está en tierra o en agua preguntando si  $h_{i_0, j_0} \leq 0$ <sup>8</sup>. Si se cumple esa condición significa que la celda está en el agua. Notar que se utiliza el operador  $\leq$  por lo que, bajo esta convención, si en una celda de la grilla la profundidad es igual a cero, esa celda será considerada como en el agua. En caso que  $h_{i_0, j_0} < 0$ , la celda estará en tierra, por lo que no es necesario preguntar nada más, dado que en este modelo la propagación solamente se efectúa en el agua. Luego, para aquellas celdas en que  $h_{i_0, j_0} \leq 0$ , se debe conocer la condición de sus vecinos; si sus 4 vecinos están en el agua, no corresponde aplicarle esta condición. Si, estando la celda  $(i_0, j_0)$  en el agua, sus 4 vecinos están en tierra, se asume que corresponde a un cuerpo de agua cerrado (como un lago) y por lo tanto la propagación del tsunami no llegará a calcularse en ella. Finalmente, si tiene entre 1 y 3 vecinos en tierra ( $h_{i_0 \pm 1, j_0 \pm 1} < 0$ ) se asume que es una celda que limita con la costa y por lo tanto en ella si se debe aplicar esta condición de borde.

En términos numéricos, se puede ejemplificar usando la misma celda  $(i_0, j_0)$ , cuya celda de la derecha está en tierra y todo el resto en agua. En ese caso se tendría que aplicar que

$$\frac{\eta_{i_0-1, j_0}^k - \eta_{i_0+1, j_0}^k}{2\Delta s} = 0 \iff \eta_{i_0+1, j_0}^k = \eta_{i_0-1, j_0}^k$$

Como no es posible acceder al valor de  $\eta_{i_0+1, j_0}^k$  debido a que se encuentra en tierra, se puede reemplazar por  $\eta_{i_0-1, j_0}^k$ , lo que se interpreta como una reflexión. Siguiendo solamente con ese caso, lo anterior se podría reemplazar en la ecuación 3.18, modificando el término asociado a la celda de la derecha  $B_{i,j}^r$ , quedando

$$\begin{aligned} \eta_{i_0, j_0}^{k+1} &= A_{i_0, j_0} \eta_{i_0, j_0}^k + D_{i_0, j_0} \eta_{i_0, j_0}^{k-1} + B_{i_0, j_0}^r \eta_{i_0-1, j_0}^k + B_{i_0, j_0}^l \eta_{i_0-1, j_0}^k + \\ &B_{i_0, j_0}^u \eta_{i_0, j_0+1}^k + B_{i_0, j_0}^d \eta_{i_0, j_0-1}^k + \left( \frac{\alpha_{i_0, j_0} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left( \zeta_{i_0, j_0}^{k+1} - 2\zeta_{i_0, j_0}^k + \zeta_{i_0, j_0}^{k-1} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Por conveniencia, la ecuación 3.21 se puede reescribir de la siguiente manera, agregando

<sup>8</sup> Dada la forma en que se desarrolló el modelo, la grilla ingresada debe tener valores positivos en el océano y negativos en tierra.

el término que se destaca en color magenta:

$$\begin{aligned} \eta_{i_0, j_0}^{k+1} = & A_{i_0, j_0} \eta_{i_0, j_0}^k + D_{i_0, j_0} \eta_{i_0, j_0}^{k-1} + \mathbf{0} \cdot \eta_{i_0+1, j_0}^k + (B_{i_0, j_0}^l + B_{i_0, j_0}^r) \eta_{i_0-1, j_0}^k + \\ & B_{i_0, j_0}^u \eta_{i_0, j_0+1}^k + B_{i_0, j_0}^d \eta_{i_0, j_0-1}^k + \left( \frac{\alpha_{i_0, j_0} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} (\zeta_{i_0, j_0}^{k+1} - 2\zeta_{i_0, j_0}^k + \zeta_{i_0, j_0}^{k-1}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

De lo anterior se puede decir que cuando el coeficiente de  $\eta_{i_0+1, j_0}^k$  es nulo, se traspassa al coeficiente de  $\eta_{i_0-1, j_0}^k$ , lo que puede implementarse en un código para asignar la condición de borde a todas las celdas que tienen frontera con tierra, las que además pueden estar identificadas y guardadas en una lista previamente, ya que esta condición depende exclusivamente de la grilla, siendo necesario preguntar solamente una vez para cada celda y no en cada iteración temporal.

Es posible etiquetar cada celda fronteriza con 4 variables booleanas que indiquen si cada celda vecina está o no en tierra, para evaluar si se debe aplicar o no la condición. Si se conoce cada celda de frontera (p,q), se puede definir

$$\nu_{p,q}^r = \begin{cases} 1 & \text{si } h_{p+1,q} < 0 \quad (\in \text{Dominio en tierra}) \\ 0 & \text{si } h_{p+1,q} \geq 0 \quad (\notin \text{Dominio en tierra}) \end{cases} \quad (3.23)$$

Con esta nueva definición, la ecuación 3.22 se puede reescribir

$$\begin{aligned} \eta_{p,q}^{k+1} = & A_{p,q} \eta_{p,q}^k + D_{p,q} \eta_{p,q}^{k-1} + (1 - \nu_{p,q}^r) B_{p,q}^r \eta_{p+1,q}^k + (B_{p,q}^l + \nu_{p,q}^r B_{p,q}^r) \eta_{p-1,q}^k + \\ & B_{p,q}^u \eta_{p,q+1}^k + B_{p,q}^d \eta_{p,q-1}^k + \left( \frac{\alpha_{p,q} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} (\zeta_{p,q}^{k+1} - 2\zeta_{p,q}^k + \zeta_{p,q}^{k-1}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Expandiendo la operación para considerar las 4 celdas vecinas en una misma expresión, mediante  $\nu_{p,q}^l$ ,  $\nu_{p,q}^u$  y  $\nu_{p,q}^d$ , se puede escribir una nueva ecuación que considere la condición de borde en costa de manera genérica

$$\begin{aligned} \eta_{p,q}^{k+1} = & A_{p,q} \eta_{p,q}^k + D_{p,q} \eta_{p,q}^{k-1} + \left( \frac{\alpha_{p,q} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} (\zeta_{p,q}^{k+1} - 2\zeta_{p,q}^k + \zeta_{p,q}^{k-1}) \\ & + (1 - \nu_{p,q}^r) [B_{p,q}^r + \nu_{p,q}^l B_{p,q}^l] \eta_{p+1,q}^k + (1 - \nu_{p,q}^l) [B_{p,q}^l + \nu_{p,q}^r B_{p,q}^r] \eta_{p-1,q}^k \\ & + (1 - \nu_{p,q}^u) [B_{p,q}^u + \nu_{p,q}^d B_{p,q}^d] \eta_{p,q+1}^k + (1 - \nu_{p,q}^d) [B_{p,q}^d + \nu_{p,q}^u B_{p,q}^u] \eta_{p,q-1}^k \end{aligned} \quad (3.25)$$

Con las expresiones recientemente presentadas, se cuenta con las herramientas suficientes para modelar la propagación de un tsunami en coordenadas cartesianas, las que se pueden implementar en un lenguaje de programación del tipo matricial como Python, Matlab, C o cualquier otro, con la ventaja de que el estado de cada celda no cambia, permitiendo eliminar sentencias *if-else*.

### 3.1.4. Propagación en coordenadas esféricas

Un tsunami se propaga sobre una superficie esférica y no cartesiana, por lo que a continuación se revisará la transformación a coordenadas esféricas, lo que cobra especial relevancia

en simulaciones transoceánicas, para considerar la curvatura de la Tierra.

La ecuación 3.3 en coordenadas esféricas queda

$$\eta_{tt} - \frac{g}{R_T^2 \cos(\theta)^2} [(h\eta_\lambda)_\lambda + \cos(\theta)(h \cos(\theta)\eta_\theta)] = \zeta_{tt} \quad (3.26)$$

En la expresión anterior  $R_T$  es el radio de la Tierra,  $\lambda$  la longitud y  $\theta$  la latitud. Para discretizar la ecuación 3.26 se sigue la misma estrategia y a partir de la ecuación 3.18 se deben considerar los siguientes coeficientes, con  $R = g \left( \frac{\Delta t}{R_T \Delta s} \frac{180}{\pi} \right)^2$  y  $\Delta s$ ,  $\lambda$  y  $\theta$  en grados:

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left[ 2 - \frac{R}{\cos(\theta_j)^2} (h_{i+\frac{1}{2},j} + h_{i-\frac{1}{2},j}) + \frac{\cos(\theta_{j+\frac{1}{2}})}{\cos(\theta_j)} R h_{i,j+\frac{1}{2}} + \frac{\cos(\theta_{j-\frac{1}{2}})}{\cos(\theta_j)} R h_{i,j-\frac{1}{2}} \right] \\ D_{i,j} &= \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} - 1 \right) \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^r &= \frac{R h_{i+\frac{1}{2},j}}{\cos(\theta_j)^2} \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^l &= \frac{R h_{i-\frac{1}{2},j}}{\cos(\theta_j)^2} \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^u &= \frac{\cos(\theta_{j+\frac{1}{2}}) R h_{i,j+\frac{1}{2}}}{\cos(\theta)} \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \\ B_{i,j}^d &= \frac{\cos(\theta_{j-\frac{1}{2}}) R h_{i,j-\frac{1}{2}}}{\cos(\theta)} \left( \frac{\alpha_{i,j} \Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Para este sistema esférico, las condiciones iniciales y de borde siguen el mismo esquema descrito en el caso cartesiano.

## 3.2. Implementación del modelo numérico

### 3.2.1. Estructura y requerimientos del programa

El programa fue desarrollado con rutinas implementadas en lenguaje Python y C. Para poder ser ejecutado requiere de los siguientes recursos instalados:

- Python 3.8 (con librerías netCDF, matplotlib y cartopy, además de las usuales como numpy y scipy).
- GMT 6.4.
- Compilador de lenguaje C (idealmente icc de Intel con licencia académica, lo que permite optimizar los tiempos de ejecución).

La ejecución principal se realiza desde el script bash `tsun2022.bash`, que maneja el flujo de ejecución y contiene la definición de los parámetros necesarios. Algunos de estos están

relacionados con la implementación del modelo para Alerta Temprana, lo que será discutido más adelante pero, por conveniencia, se presentan todos a continuación.

- **P**: Cantidad máxima de núcleos que utilizará el servidor donde se ejecutará el programa.
- **sim\_time**: Tiempo total de simulación del tsunami en segundos.
- **dt**: Paso temporal para el cálculo de propagación del tsunami, en segundos.
- **centroid\_solution**: Variable booleana que determina si se utilizará solución de centroide (1) o fuente finita (0).
- **plane**: Determinación del plano a utilizar en caso de fuente puntual; plano principal (1), plano auxiliar (2) o fuente finita (0).
- **ffinputfile**: Archivo de fuente finita de entrada en formato USGS.
- **ffoutputfile**: Nombre del archivo de fuente finita de salida que se obtiene al procesar los datos en formato USGS.
- **peval**: Nombre del archivo de texto que contiene los puntos donde se evaluará la amplitud de tsunami para obtener la evaluación de amenaza. El archivo tiene al menos 6 columnas, longitud, latitud, nombre corto del punto, nombre completo, nombre del bloque al que pertenece y número del bloque.
- **stations**: Nombre del archivo de texto con el nombre y las coordenadas geográficas de aquellos puntos para los que se guardarán las series de tiempo completas.
- **gridname**: Nombre del archivo con los datos batimétricos de entrada, con valores positivos en el océano y en formato netCDF4 #18 (GEBCO).
- **Dlon**: Ampliación en longitud (en grados) hacia el Este y Oeste desde los extremos del dominio del cálculo de Okada, para determinar el dominio de cálculo del tsunami.
- **Dlat**: Ampliación en latitud (en grados) hacia el Norte y Sur desde los extremos del dominio del cálculo de Okada, para determinar el dominio de cálculo del tsunami.
- **newgrid**: Nombre del archivo de batimetría en formato netCDF4, obtenido al implementar los límites con los parámetros Dlon y Dlat. Esta grilla define el dominio de cálculo del tsunami.
- **sigma**: Parámetro utilizado para el filtro gaussiano del método *gaussian\_filter* de la librería Scipy, relacionado con la desviación estándar del mismo.
- **truncate**: Parámetro utilizado para el filtro gaussiano del método *gaussian\_filter* de la librería Scipy, relacionado con la desviación estándar a la que se trunca el filtro.
- **flip\_bat**: Parámetro booleano para invertir verticalmente la matriz de datos batimétricos, cambiando el origen del sistema de coordenadas.
- **C0**: Parámetro para definir la pendiente de la capa de amortiguamiento.
- **Lo**: Parámetro que define la extensión de la capa de amortiguamiento en kilómetros.



- **g**: Aceleración de gravedad en  $m/s^2$ .
- **Rt**: Radio terrestre en kilómetros.
- **t0\_fact**: Factor de decaimiento para forzar al tsunami a converger a cero para tiempos de simulación muy grandes.
- **corr\_bat**: Parámetro booleano para determinar si la batimetría se corregirá con la deformación estática o no.
- **save\_okada**: Parámetro booleano para guardar en disco el cálculo de la deformación permanente (guarda un archivo por iteración temporal).
- **save\_damp\_par**: Parámetro booleano para guardar en disco los parámetros de la capa de amortiguamiento.
- **each\_print\_eta**: Indica cada cuantos pasos temporales se desea guardar las matrices  $\eta(t)$  (valor cero indica que no se guardarán).
- **each\_print\_zmax**: Indica cada cuantos pasos temporales se desea guardar el resultado parcial de alturas máximas de tsunami (valor cero indica que no se guardarán).
- **save\_stations**: Parámetro booleano para definir si se guardarán las series de tiempo de los puntos del archivo **stations**.
- **region**: Variable para determinar qué tipo de mapas se deben generar, puede ser **local** para dominios cercanos a Chile o **pacífico** para todo el océano Pacífico.
- **n\_boletin**: Número correlativo del boletín de amenaza de tsunami que se generará.
- **plot\_falla**: Parámetro booleano que indica si se graficará o no la distribución del slip a lo largo del plano de falla.
- **fnt\_boletín**: Indica qué tipo de Boletín se generará, de fuente finita, solución por centroide o con horas de arribo.
- **ttt**: Parámetro booleano que determina si se calcularán las horas de arribo. Para que esto se pueda hacer, deben guardarse las series de tiempo mediante la variable **save\_stations**.

De los parámetros anteriores, algunos varían entre diferentes ejecuciones, mientras que otros pueden ajustarse para calibrar el programa y posteriormente mantenerse fijos. Por ejemplo el radio terrestre, la aceleración de gravedad, los parámetros de la capa de amortiguamiento y nombre de algunos archivos no requieren modificación para diferentes implementaciones. Por otro lado, hay parámetros que si requieren mayor atención dependiendo del evento que se modele y su contexto; el tiempo de simulación, paso temporal y parámetros que definen el dominio de cálculo que además de modificar sus propias características, influyen directamente en el tiempo de cómputo.

Un parámetro que está implícito y tiene especial relevancia es la discretización (o resolución) espacial de la grilla; está implícito debido a que se controla a través de **gridname**, diferentes grillas pueden tener distintas dimensiones y/o resoluciones. La resolución espacial de la grilla condiciona, entre otras cosas, el tiempo que tardará en ejecutarse el modelo y también el máximo valor del paso temporal que se puede utilizar, lo que está supeditado

a la condición CFL, cuya expresión está dada por la ecuación 3.28, en la que  $g$  representa la aceleración de gravedad,  $h_{max}$  la profundidad máxima del dominio de cálculo y el resto de los parámetros sigue la convención ya descrita. Una condición necesaria para asegurar la estabilidad numérica del modelo es que  $CFL < 1$  y por lo tanto, el mayor valor de  $\Delta t$  que se puede implementar estará dado por la ecuación 3.29. Aun así, es recomendable usar un  $dt$  que genere un valor de  $CFL$  no muy cercano a 1 por ejemplo 0.8.

$$CFL = \frac{\sqrt{2gh_{max}}\Delta t}{R_T\Delta s \cos\left(|\theta_{max}| - \frac{\Delta s}{2}\right)} \quad (3.28)$$

$$\Delta t_{max} = 1 \frac{R_T\Delta s \cos\left(|\theta_{max}| - \frac{\Delta s}{2}\right)}{\sqrt{2gh_{max}}} \quad (3.29)$$

En la rutina principal del programa, se ejecuta primero el código `ffm_proc.py` que procesa el archivo del plano de falla y define el dominio de cálculo, cortando los archivos necesarios a esa extensión; la batimetría que definirá el dominio de cálculo particular y también aquellos puntos del archivo `peval.txt` que se encuentran dentro del dominio. En caso de utilizarse la solución del centroide del tensor de momento de la fase-W, antes del script `ffm_proc.py`, se ejecuta la función `centroid_solution.py` que procesa la solución para generar un plano de falla como se describirá más adelante. Posteriormente se ejecuta el código `tsun2D_DFS.py` que procesa el archivo de batimetría extrayendo los valores de profundidad (positivos en el océano), los suaviza con un filtro gaussiano, calcula los gradientes horizontales y verticales y genera la capa de amortiguamiento. Luego se ejecuta la rutina `tsun2021.c`, que realiza los cálculos de deformación del fondo marino, perturbación de la columna de agua y propagación del tsunami, utilizando el modelo descrito previamente en este capítulo, y es la que genera las salidas de la modelación (amplitudes máximas, matrices de  $\eta(t)$ , parámetros de la capa de amortiguamiento, etc). Finalmente se ejecuta una última rutina de Python, denominada `get_eval.py` que efectúa la evaluación de amenaza de tsunami, generando los archivos de texto y gráficos de salida, lo que será discutido más adelante.

La estructura general y orden de jerarquía de carpetas y archivos del programa se muestra en la figura 3.2, en la que por conveniencia gráfica se han ocultado algunos archivos de la carpeta `permadata/`, que contiene datos que requiere el código y que no varían entre ejecuciones. En `pytsun/` se encuentran todos los códigos no principales desarrollados en lenguaje Python y la carpeta `output/` es donde se guardan automáticamente todas las salidas del código, la que es eliminada y creada al principio de cada ejecución. Para evitar perder la información entre ejecuciones, en la carpeta `evento/` se crea una copia del contenido de la carpeta `output/` con un nombre que depende de la fecha y hora de la ejecución, lo que no se borrará de manera automática.

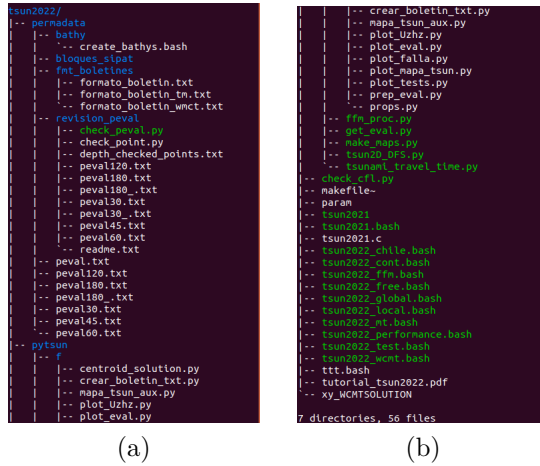


Figura 3.2: Estructura de carpetas y archivos del programa.

Dos programas adicionales que se incluyen son `check_peval.py` en la carpeta `revision/` y `check_cfl.py`, los que serán explicados más adelante.

### 3.2.2. Parámetros de entrada

El programa requiere algunos datos que son permanentes en escalas de tiempo en que se desarrollan los tsunamis; algunos de ellos permiten su modelación y otros la evaluación de la amenaza en costa. A continuación se discutirá sobre aquellos relacionados con la fase de modelación.

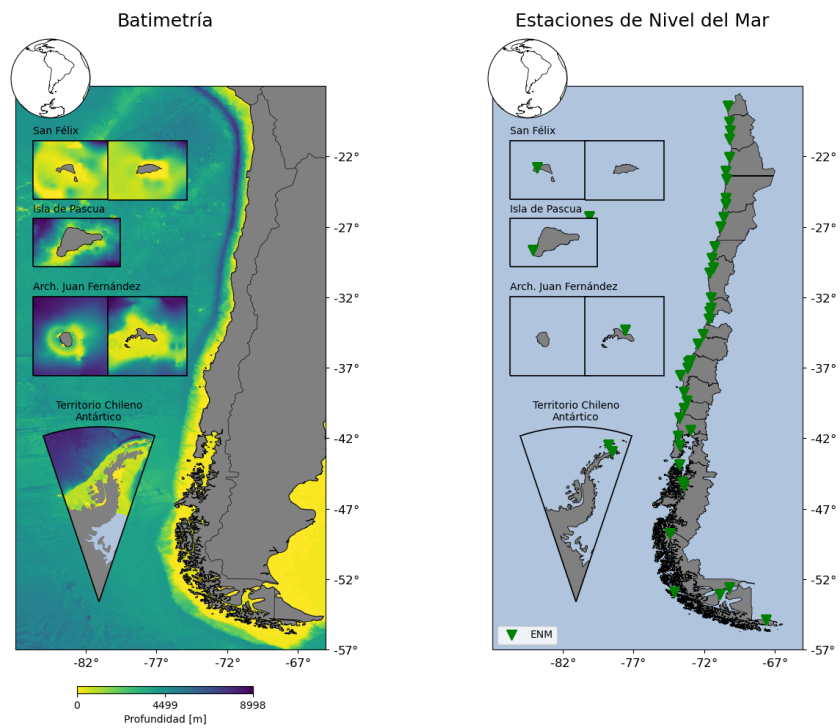
Para la generación y propagación del tsunami, se requiere la batimetría del dominio de cálculo, para lo que se utiliza un archivo genérico en formato netCDF extraído de GEBCO (GEBCO Compilation Group, 2022), con límites tales que se conecte de manera continua todo el territorio Chileno continental, insular y antártico. En la figura 3.3.a se puede ver el detalle en cercanías de costa. Si bien la imagen no muestra la conexión entre las áreas representadas, el archivo incluye y conecta todas esas áreas. La resolución espacial del modelo está dada por este archivo y el dominio de cálculo del tsunami normalmente será una porción de esta grilla general.

Debido a la forma en que se programó el modelo, las ecuaciones siguen la convención de índices de matrices, por lo que el subíndice  $i$  va en la dirección  $x$  y  $j$  en dirección  $y$ . En notación matricial  $(i, j)$  representa la entrada de una matriz por lo que  $i$  son las filas (dirección  $y$ ) y  $j$  las columnas (dirección  $x$ ). Además, el origen de coordenadas en notación matricial se localiza en la esquina superior izquierda y esto último puede diferir del sistema de coordenadas de índices en grillas y si fuera este el caso, se debe invertir los índices de las ecuaciones y también el orden de las filas en la batimetría, lo que se puede hacer con el parámetro `flip_bat`. Para este programa los valores de profundidad en el océano deben ser positivos.

Otro input es un listado de puntos con coordenadas geográficas para que en ellos el programa guarde las series de tiempo en un archivo de texto. Si bien los puntos pueden ser determinados arbitrariamente, para este caso se consideró la ubicación de las Estaciones de Nivel del Mar instaladas actualmente en Chile (ver figura 3.3.b), las que son operadas y mantenidas por el SHOA y cuyos datos están disponibles en el sitio web de monitoreo de nivel del mar de la UNESCO (Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 2022), lo que permite comparar tanto las series de tiempo observadas con

modeladas, como los cálculos de horas de arribo del tsunami para esas localidades.

En el contexto de la información que no es permanente, se requiere un archivo asociado al evento sísmico que permita modelar la deformación del fondo marino que perturbará la columna de agua generando el tsunami; el Centro Sismológico Nacional obtiene diferentes soluciones para los parámetros de un terremoto. En términos de la Fase-w, a contar de los primeros 5 minutos las soluciones están asociadas al centroide del tensor de momento, caracterizado por su hipocentro, fecha y hora de ocurrencia, duración y las 6 componentes del tensor de momento  $M_{rr}$ ,  $M_{tt}$ ,  $M_{pp}$ ,  $M_{rt}$ ,  $M_{rp}$  y  $M_{tp}$  (i.e. fuente puntual). Posteriormente, a contar de los 10 minutos de ocurrido el terremoto, las soluciones corresponden a modelos de elementos finitos con información de la cantidad de segmentos en que se divide el plano de falla y para cada uno de estos, los parámetros de cada subfalla que compone cada segmento (i.e. planos de falla de fuente finita).



(a) Batimetría.

(b) Ubicación Estaciones de Nivel del Mar en Chile.

Figura 3.3: Datos necesarios para la implementación del código.

Para la evaluación de la amenaza de tsunami en costa se requieren diversos datos que son discutidos más adelante.

### 3.2.2.1. Uso del tensor de momento del centroide por Fase-W

A partir de las componentes del tensor de momento, se pueden obtener los 3 ángulos característicos de un plano de falla (strike, dip y rake) y mediante las leyes de escala estimar sus dimensiones mientras que la distribución de slip se estima utilizando el momento sísmico. Con lo anterior es posible escribir un archivo de texto que tenga el mismo formato que las soluciones finales publicadas por el USGS para los planos de fallas y utilizarlo como input del programa.

Estas soluciones son entregadas por el CSN a contar de los 5 minutos del tiempo de

origen y se actualizan prácticamente cada 1 minuto hasta obtener la solución que representa una fuente finita (Riquelme et al., 2018). El formato de estas soluciones se muestra en la imagen 3.4. Se debe evaluar si se selecciona el plano principal o el auxiliar para modelar el tsunami, ya que los resultados serán diferentes. En la figura 3.5 se presentan las distribuciones obtenidas al utilizar el plano principal y el auxiliar, considerando una fuente elíptica con una distribución de slip que depende de la distancia de cada subfalla al centroide. Una posibilidad para disminuir sesgos y mantener una política conservadora es modelar un tsunami con ambas soluciones y seleccionar el escenario idóneo.

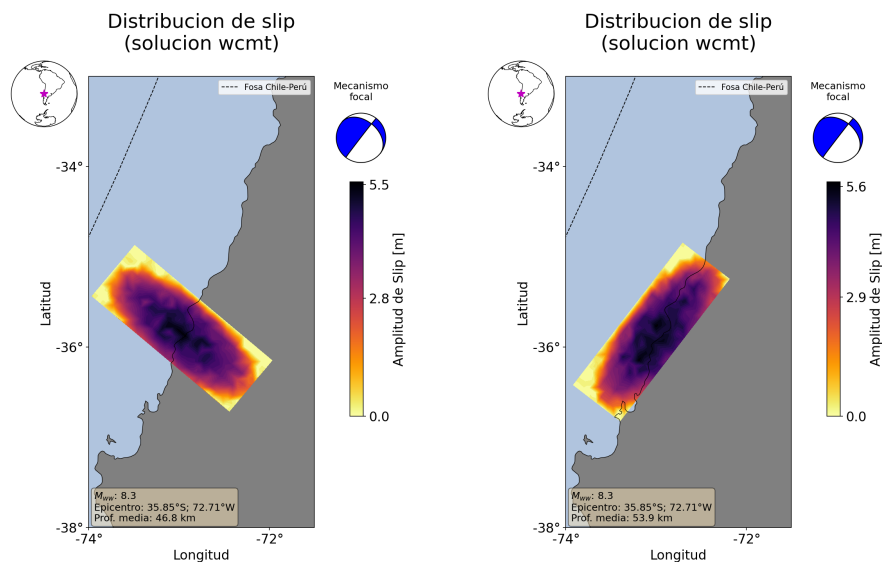
```

PDEW 2010 2 27 6 34 15.60 -35.8500 -72.7100 44.8 0.0 8.3 NEAR COAST OF CENTRAL CH
event name: 201002270634A
time shift: 63.0000
half duration: 63.0000
latitude: -35.8800
longitude: -72.2850
depth: 23.5000
Mrr: 1.885519e+19
Mtt: -1.445338e+20
Mpp: 1.256786e+20
Mrt: 7.569720e+19
Mrp: 2.314565e+20
Mtp: 5.629969e+19

```

Figura 3.4: Formato de solución del centroide del tensor de momento.

En el caso que se muestra en la figura 3.5, debido al contexto tectónico, el plano auxiliar es el que mejor representa el fenómeno debido a la orientación de la falla y por lo tanto para modelar el tsunami se podría utilizar directamente este plano sin embargo, no todos los terremotos ocurren bajo estas condiciones y de manera preliminar (y teórica) no es posible saber cuál es el plano adecuado ya que ambos son soluciones de la inversión.



(a) Plano principal.

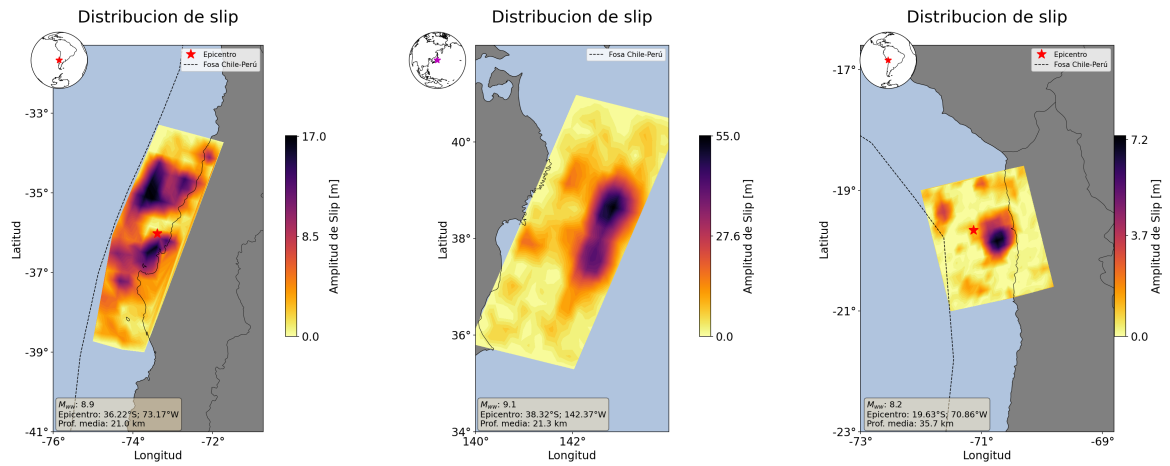
(b) Plano auxiliar.

Figura 3.5: Plano de falla generado a partir de la solución del centroide del tensor de momento.

### 3.2.2.2. Uso del modelo de fuente finita por Fase-W

A los pocos minutos del tiempo de origen el CSN comienza a generar soluciones de fuentes finitas representada por planos de falla (discretización espacial, límites geográficos, epicentro)

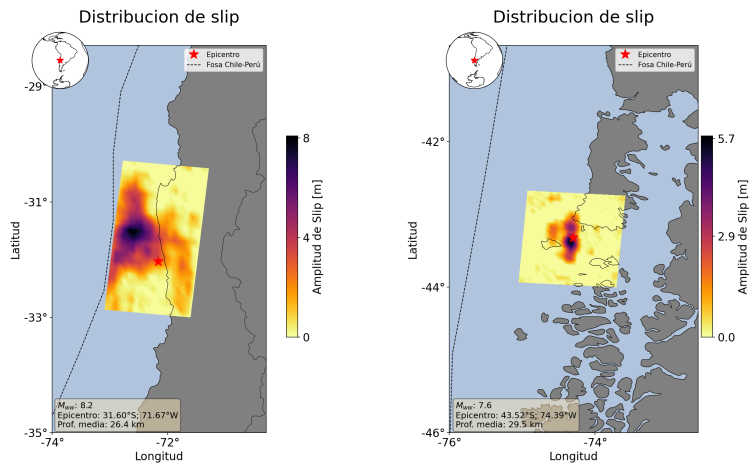
y el detalle de los parámetros de cada subfalla (latitud, longitud, profundidad, slip, rake, strike, dip, tiempo de ruptura, rise time,  $M_0$ ). En la figura 3.6 se presentan las distribuciones de slip de algunos terremotos importantes ocurridos en el último tiempo, graficados a partir de los archivos que contienen los parámetros de la inversión, publicados en el repositorio web del USGS.



(a) Maule, Chile (2010).

(b) Tohoku-Oki, Japón (2011).

(c) Iquique, Chile (2014).



(d) Illapel, Chile (2015).

(e) Melinka, Chile (2016).

Figura 3.6: Distribución de slip a partir de las soluciones de elementos finitos para algunos de los últimos grandes terremotos.

### 3.2.3. Modelación de la generación y propagación del tsunami

#### 3.2.3.1. Generación

A partir de la distribución de slip y sus parámetros asociados se estima la deformación del fondo marino utilizando el modelo de Okada (1985), para lo que se suaviza la batimetría para determinar las derivadas espaciales y posteriormente se calcula la contribución de cada subfalla a la deformación del fondo marino, obteniendo la deformación final (caso estático). Para ahorrar tiempo de cálculo se aplican dos condiciones que definen un dominio espacial

particular para la deformación; el primero corresponde a aquellos puntos que están muy lejos de los extremos del plano de falla y el segundo a puntos donde la deformación total es muy pequeña. A partir de estos límites hacia el exterior se asume deformación nula. Los umbrales implementados que definen estos límites son: puntos a distancias mayores a 150 [km] del borde del plano y deformaciones menores a 0.00001 [m].

Luego haciendo uso del *rise time*, tiempo de ruptura y una función fuente temporal<sup>9</sup>, se calculan las contribuciones que ocurren en cada iteración temporal, con lo que se obtiene la deformación cinemática del fondo marino. Finalmente se aplica un taper para asegurar la continuidad entre el dominio de la deformación y el de modelación del tsunami.

Esta deformación cinemática es la que se utiliza como fuente generadora del tsunami. En la figura 3.7 se muestran la temporalidad de la deformación de la superficie terrestre a partir de los parámetros estimados para el terremoto del Maule (2010) (en las figuras A.2, A.3 y A.4 del Anexo B, se presenta la misma idea para los terremotos de Pisagua (2014), Illapel (2015) y Melinka (2016)), en la que valores positivos indican alzamiento del terreno y valores negativos subsidencia. Una vez efectuado este cálculo, se corrige la batimetría con la deformación estática para que la propagación del tsunami se efectúe con el fondo marino en su estado deformado.

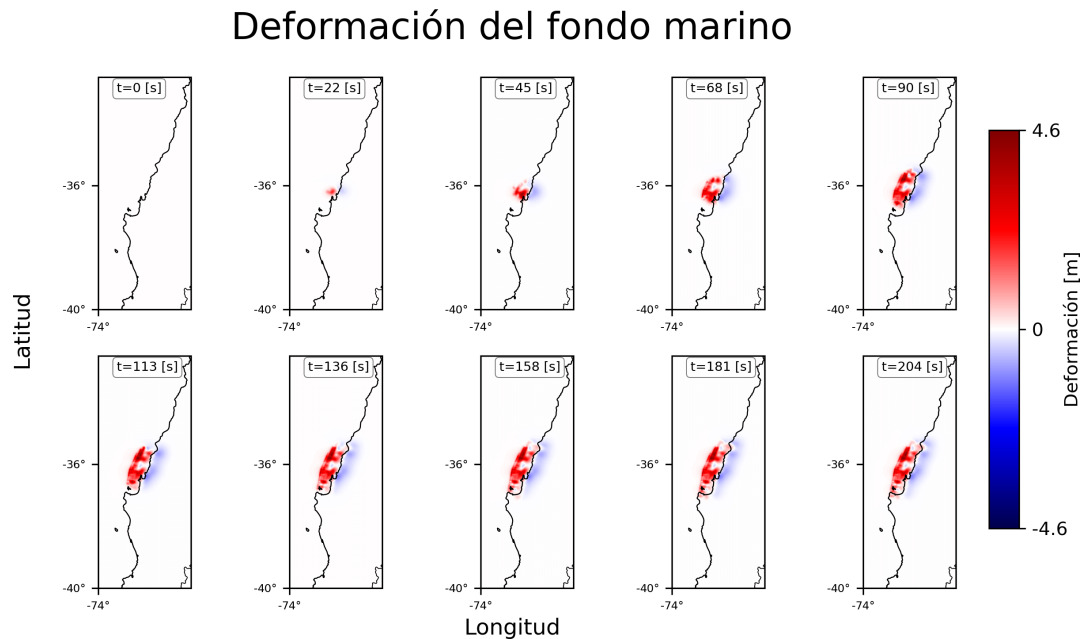


Figura 3.7: Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto del Maule (2010). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia.

### 3.2.3.2. Propagación

Para propagar el tsunami, basta implementar el solver numérico ya descrito, entregándole un archivo con los parámetros del terremoto. La figura 3.8 muestra la fase de propagación para el terremoto del Maule (y siguiendo la misma idea anterior, en las figuras A.6, A.7 y A.8 se muestra la fase de propagación para los otros 3 eventos). Los límites geográficos

<sup>9</sup> La función fuente temporal implementada corresponde a la integral de un triángulo.

corresponden al dominio de cálculo definido para modelar el tsunami, lo que es arbitrario y será discutido más adelante. En la figura se puede observar cómo el tren de ondas de tsunami se propaga desde la fuente, interactúa con la costa pero no con los bordes exteriores, que es lo que se esperaba con las condiciones de borde descritas previamente.

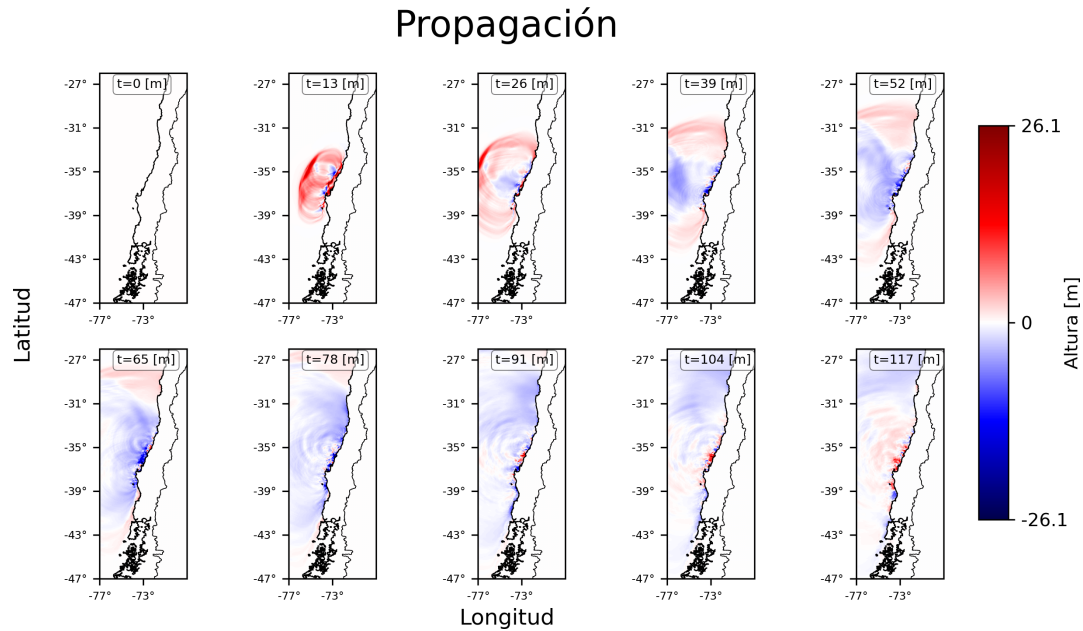


Figura 3.8: Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto del Maule (2010), en diferentes instantes de tiempo.

Uno de los aspectos implícitos de la propagación, es que al almacenar series de tiempo de altura de tsunami, se pueden extraer los tiempos de viaje y por lo tanto las horas de los primeros arribos del tsunami en dichos puntos. Para lo anterior, basta definir un umbral de altura mínima de tsunami e identificar en la serie el instante de tiempo en que se supera por primera vez dicho umbral.

### 3.2.4. Resultados de la modelación

Dado que el programa no incluye la fase de inundación, se revisarán a continuación dos resultados finales (en términos de la modelación del tsunami, la implementación para alerta temprana se discute en el siguiente capítulo); el primero corresponde al comportamiento de las máximas amplitudes de tsunami. La figura 3.9 muestra la variación en el tiempo de las máximas amplitudes modeladas para el terremoto del Maule (en las figuras A.10, A.11 y A.12 se presentan los casos de otros 3 tsunamis). El segundo resultado corresponde a las series de tiempo en celdas de la grilla que representan los puntos geográficos donde hay ENM. Para la modelación de terremotos que ocurrieron en el último tiempo, como los que se han mostrado, es posible comparar series de tiempo modeladas con los registros de las ENM, lo que se muestra en la figura 3.10. Para efectuar esta comparación, se descargaron los datos de nivel del mar del sitio de estaciones de monitoreo del nivel del mar de la UNESCO (Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 2022), a los que se les restó su promedio para llevarlos al nivel medio del mar y posteriormente se removió la marea.



## Máximas amplitudes

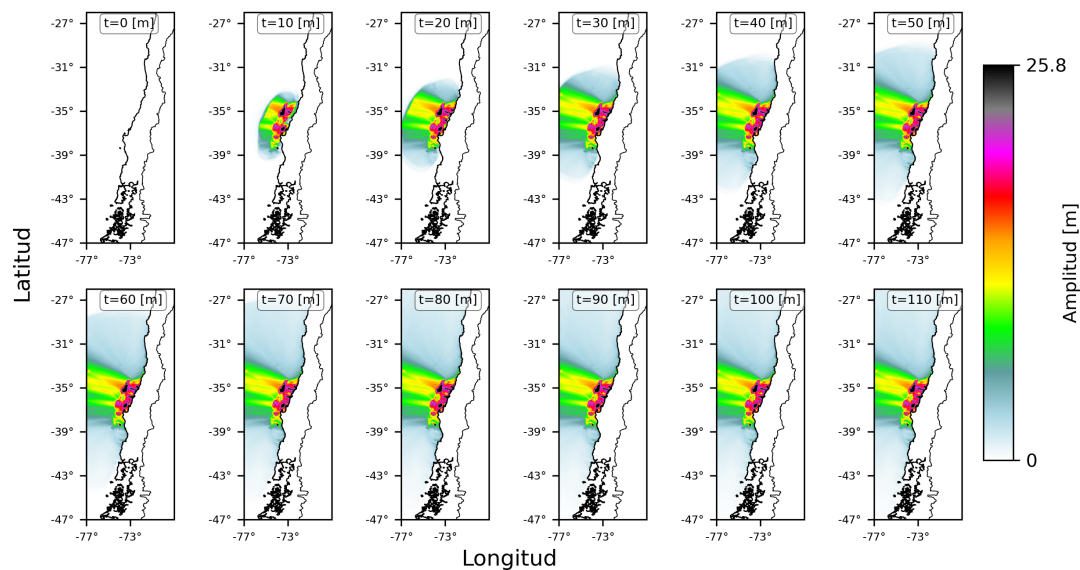


Figura 3.9: Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo a partir del terremoto del Maule (2010).

El año 2010 la cantidad de estaciones instaladas, así como su tasa de muestreo, era considerablemente menor a lo que existe al momento de escribir esta tesis, por lo que para el tsunami producido por el terremoto del Maule, solamente se presentan 3 estaciones para comparar. Para el tsunami de 2014 se presentan las 5 más cercanas a la zona de generación y se puede observar que en la estación “iqui” existe un período en que no hay datos (representado como una línea recta) y una particularidad para lo que se presenta respecto al tsunami de 2015 es que la estación “coqu”, que en sus registros muestra líneas rectas en los valles de las primeras ondas, lo que es indicativo de que los sensores quedaron en seco es decir, el nivel del mar bajó tanto que durante algunos instantes no tuvieron agua sobre o bajo ellos para medir<sup>10</sup>. Para el evento de 2016, se presentan sólo dos estaciones debido a que el tsunami solo fue registrado en ellas.

Para estos cuatro casos, se observa que existe un buen ajuste entre las observaciones y el modelo. Las alturas de tsunami modeladas son consistentes con los registros reales y las fases concuerdan en general. Si bien existen diferencias, una similitud notable es la primera onda; en esta se observa en general una buena relación entre las formas de onda y sus tiempos de arribo. Es importante considerar que estos resultados fueron obtenidos en menos de 2 minutos.

<sup>10</sup> Existen sensores de presión que miden la presión que la columna de agua ejerce sobre ellos y sensores de radar que miden la distancia entre éste y la superficie del agua que tienen debajo. Contar con estos dos métodos independientes otorga redundancia al sistema.

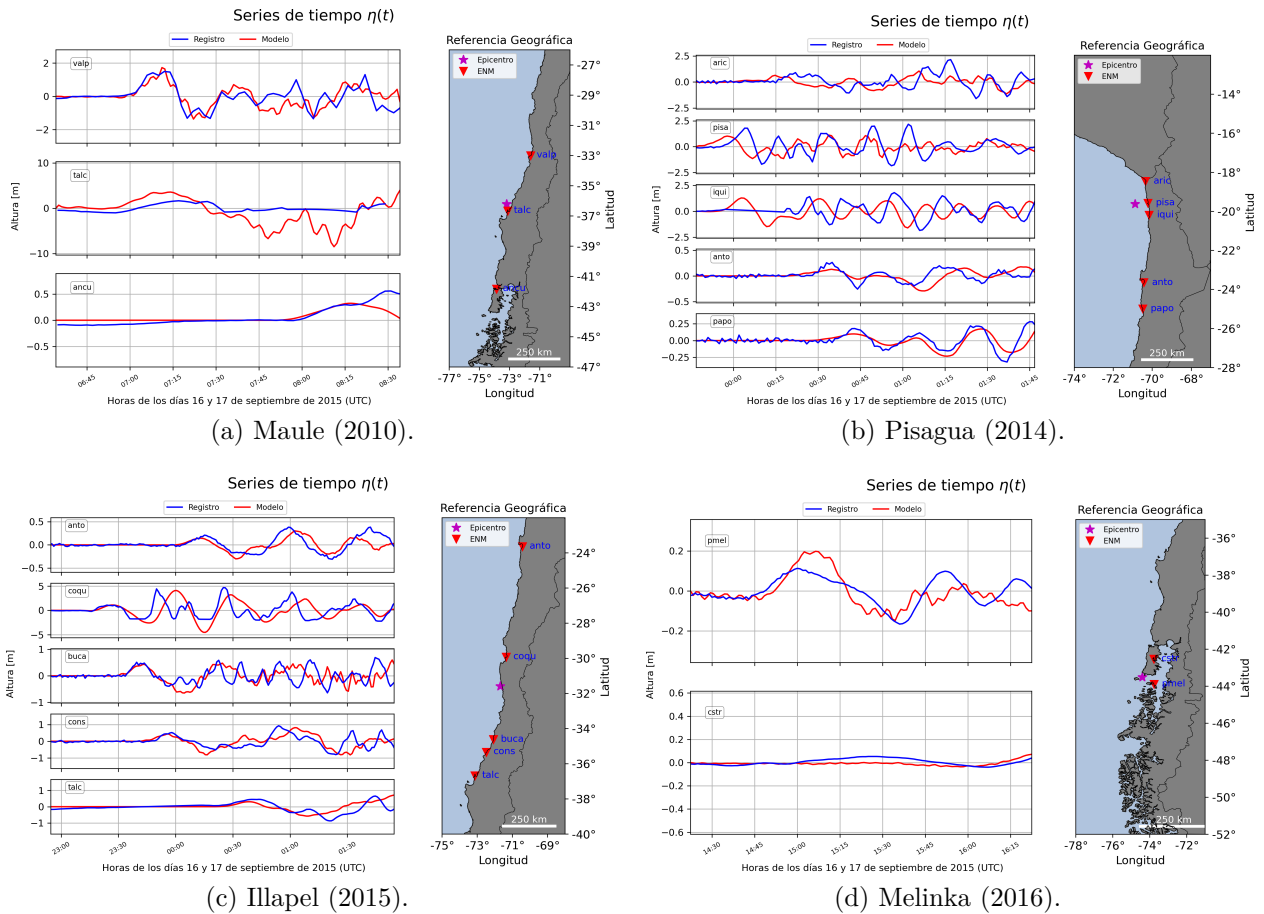


Figura 3.10: Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, para diferentes terremotos.

Hasta el momento sólo se han mostrado ejemplos de modelaciones para un área geográfica muy cercana a la zona de generación, que es una de las implementaciones de las que se discutirá en el próximo capítulo. Sin embargo, el programa no posee límites geográficos ni temporales para su ejecución. En la figura 3.11 se presenta el resultado de las amplitudes máximas obtenidas a partir de una modelación del tsunami generado por el terremoto del Maule, utilizando un área que abarca todo el territorio Chileno Continental e Insular, con 12 horas de simulación, resolución espacial de 60 segundos de arco y paso temporal de 2 segundos, tardando aproximadamente 12 minutos en ejecutarse.

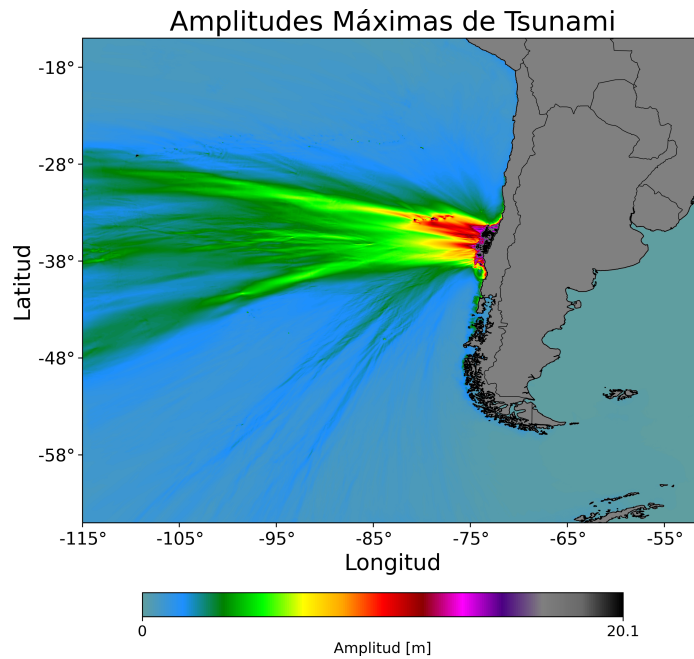


Figura 3.11: Máximas amplitudes de tsunami a partir del terremoto del Maule (2010), modelado para Chile Continental e Insular, con 12 horas de simulación.

Siguiendo con la idea anterior, también se pueden efectuar modelaciones para escalas aun más grandes. En la figura 3.12 se muestran las amplitudes máximas obtenidas para el tsunami generado por el terremoto de Tohoku-Oki (Japón, 2011) a partir de los parámetros de la fuente representados por la distribución de slip en la figura 3.6.b, para el océano Pacífico, con resolución espacial de 120 segundos de arco y paso temporal de 3.5 segundos. Como es de esperar, esta modelación tarda más tiempo que las anteriores en ejecutarse, estando aun por debajo de los 20 minutos.

### Amplitudes máximas de tsunami

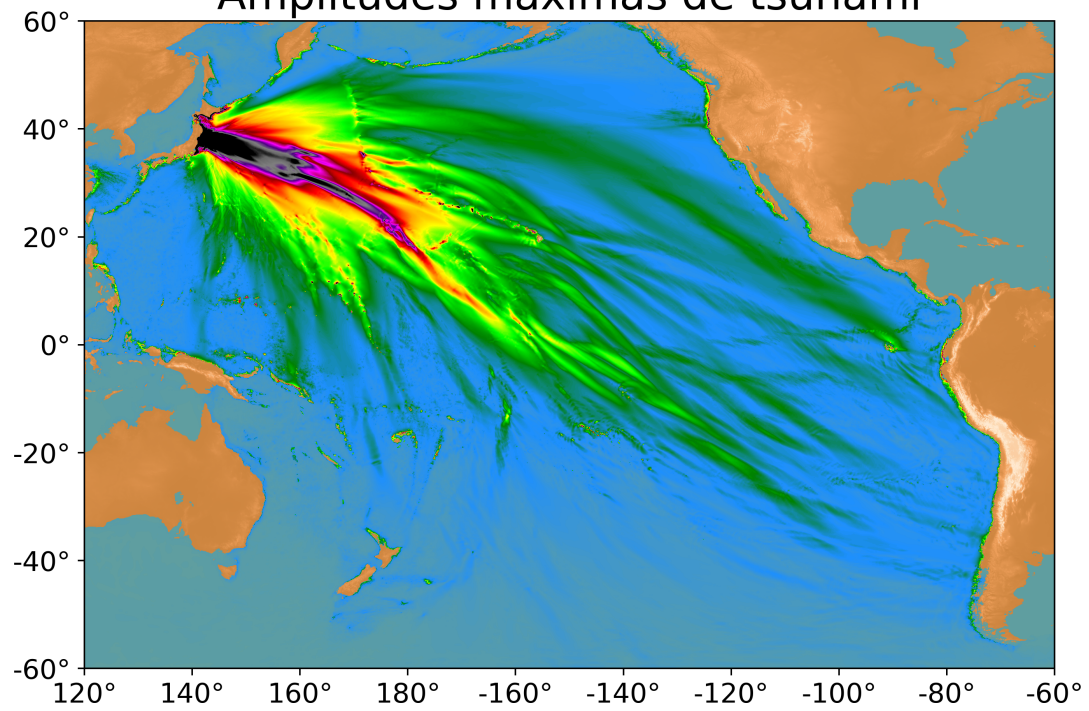


Figura 3.12: Máximas amplitudes de tsunami modeladas a partir del terremoto de Tohoku-Oki (Japón, 2011), modelado para todo el océano Pacífico, con 24 horas de simulación.

# Capítulo 4

## Implementación del modelo numérico para alerta temprana

El objetivo de esta tesis es proponer una metodología de evaluación de amenaza de tsunami para las costas de Chile en tiempo cuasi-real, para lo que es necesario que los resultados de la modelación se traduzcan en una evaluación de amenaza de tsunami.

Se consideraron los aspectos descritos en el capítulo 2 sobre el riesgo tsunamigénico, usando características de la metodología vigente que son compatibles y útiles, con lo que junto al desarrollo que se detallará, se cumple con los estándares internacionales con un sistema adecuado a la realidad Chilena que permitirá robustecer el Sistema, aportando con una nueva metodología, independiente de la vigente.

### 4.1. Implementaciones en el código

Uno de los aspectos fundamentales que se tomó de la metodología vigente, que fue implementado en conjunto con el SIPAT, es la evaluación segmentada por bloques cuyos límites se basan en la división político administrativa del país (ver figura 2.9), así como también los niveles de amenaza, umbrales y colores asociados (ver tabla 2.10), debido a que son aspectos estandarizados, conocidos por las entidades que participan del proceso de gestión de la amenaza, que facilitan los procesos de evacuación y gestión del riesgo a nivel regional, por lo que el resultado final usará las mismas convenciones y en un formato muy similar, pero con un proceso de evaluación que considera aspectos más complejos y realistas del fenómeno.

Debido a que en esta metodología se propone modelar en tiempo cuasi-real el tsunami, el tiempo de cómputo es un factor clave en el proceso. Se pueden definir algunos parámetros que son permanentes y forman parte del tiempo base de ejecución del programa, como los bloques que usa el SNAM para seccionar la evaluación de amenaza para el país y otros que son variables y condicionan el tiempo de cómputo, como el tamaño de la grilla y el tiempo de simulación.

#### 4.1.1. Datos permanentes para la evaluación de amenaza

Para evaluar la amenaza de tsunami se utilizó tanto la estructura de bloques como los niveles descritos en el protocolo entre ONEMI, SHOA y CSN, que obedecen a estándares internacionales ajustados a la realidad nacional.

Para la determinación de los niveles de amenaza de cada bloque se crearon puntos a lo largo de la costa nacional en los que se evalúa la máxima de altura del modelo. Cada punto está

asociado a un bloque, por lo que para determinar el nivel de amenaza de uno en particular, basta observar la máxima altura de tsunami en los puntos de ese bloque. Se utiliza el máximo valor de altura modelado, siguiendo los criterios conservadores en que se considera el peor escenario realista.

Para seleccionar los puntos de evaluación en la costa, en principio se utilizó un criterio de equidistancia, creando puntos de evaluación cada 10 [km] a lo largo de toda la costa. Posteriormente se filtró manualmente eliminando los que no fueran útiles (como aquellos al interior de fiordos y canales inhabitados) y modificando los necesarios, corroborando que su posición en la grilla sea la adecuada. Posteriormente se incorporaron los puntos que representan la ubicación de las Estaciones de Nivel del Mar y se realizó una nueva revisión manual enfocada en estos. Especial atención se tuvo con aquellos en el territorio insular, mientras que para el caso del Territorio Chileno Antártico se fijaron en la península antártica, lugar con mayor cantidad de bases Chilenas.

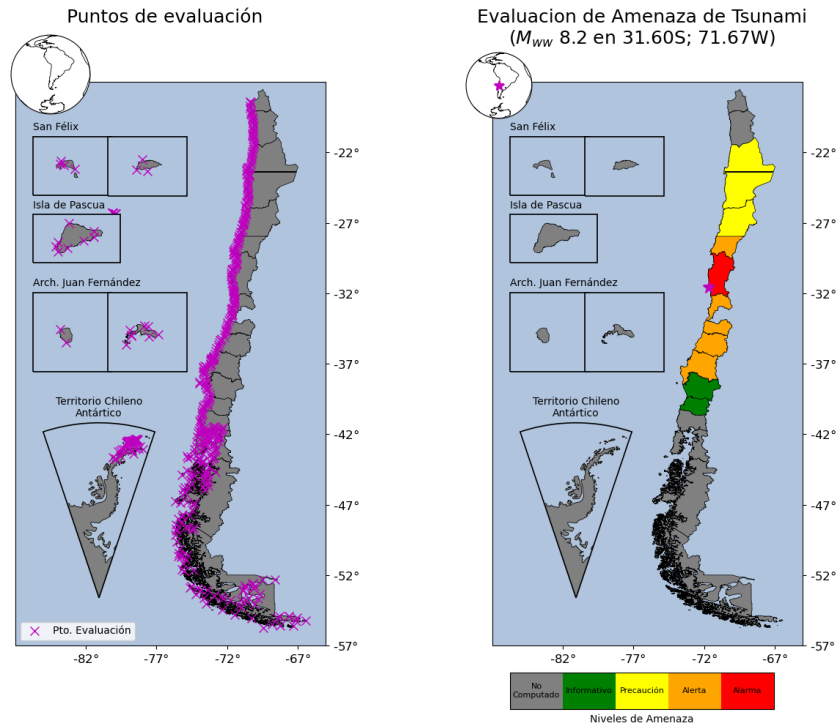
Para asegurar los resultados, se crearon listados con puntos asociados a, y calibrados para, las diferentes resoluciones de batimetría utilizadas en diferentes implementaciones (que serán discutidas más adelante). El listado general está compuesto por 642 puntos, donde están consideradas las 46 ENM vigentes y operativas al momento de desarrollar el presente trabajo, luego para cada resolución, la cantidad total de puntos puede variar levemente.

Si bien los puntos de evaluación admiten modificaciones, es un dato que se puede considerar como invariable en el tiempo. Para identificarlos se crearon archivos de texto denominados `pevalXX.txt`, con `XX` la resolución de la grilla en segundos de arco. Este archivo ingresa en los inputs del ejecutable `.bash` y contienen el nombre de cada punto, sus coordenadas geográficas y el bloque geográfico asociado. En la figura 4.1 se muestra tanto la distribución espacial de los puntos de evaluación como los bloques y estados de amenaza para un caso de estudio (tsunami post terremoto de Illapel 2015).

El listado de puntos de evaluación debe estar bien calibrado, ya que es un factor clave en la evaluación de la amenaza. Lo ideal es que los puntos siempre se encuentren sobre una celda del dominio de cálculo en que se aplique la condición de borde en costa y con valores de profundidad cercanos a cero, que es donde se obtienen las mayores alturas de tsunami.

Dada la importancia de la ubicación de los puntos en la grilla, se ha incorporado un programa sencillo, denominado `check_peval.py` para calibrar los puntos de evaluación, en lenguaje Python, lo que permite a futuro crear puntos nuevos o modificar los existentes, ayudando a que su implementación sea óptima.

El código `check_peval.py` posee 4 opciones para la revisión de los puntos de evaluación; una semi-automática, dos manuales y una cuarta de visualización de los puntos en un bloque específico. La primera función revisa que todos los puntos estén ubicados en mar y si encuentra puntos en tierra busca, en una vecindad de tamaño definido por el usuario, algún punto en el océano y si lo encuentra lo modifica, de lo contrario imprime un mensaje en la pantalla para que sea corregido, mostrando en un gráfico su ubicación. La segunda modalidad permite revisar aquellos puntos que se encuentren a profundidades superiores a un umbral ingresado como parámetro mientras que, la tercera opción mostrará la posición de cada punto asociado a las ENM. La 4 alternativa permite seleccionar un bloque para generar un gráfico simple que muestre la ubicación de todos los puntos de evaluación contenidos en ese bloque. En las 3 primeras opciones el programa despliega un gráfico en el que muestra la ubicación de un punto e indica su profundidad en la grilla.



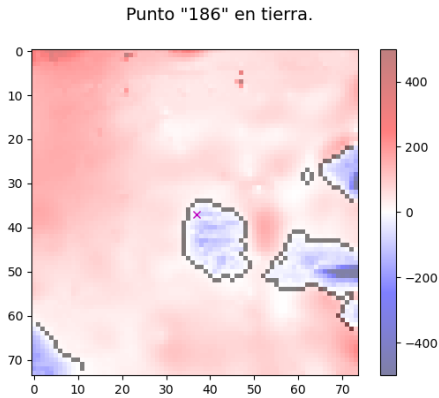
(a) Ubicación puntos donde se evaluará amenaza de tsunami en costa.

(b) Formato de evaluación de amenaza de tsunami con niveles en colores por bloque, como caso de estudio, para el tsunami de 2015.

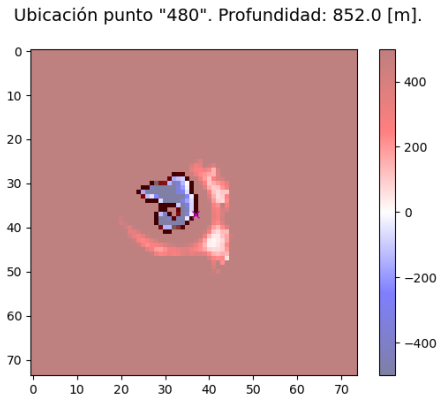
Figura 4.1: Datos necesarios para la implementación del código.

El programa está alojado dentro de una carpeta denominada `revision_peval` al interior de la carpeta `permadata` y en ella se encuentran los archivos necesarios para la ejecución. Con este programa se calibraron los archivos que se usaron en el desarrollo del trabajo y una de las ventajas que posee es que utiliza los mismos algoritmos para el procesamiento de cada punto en el programa principal.

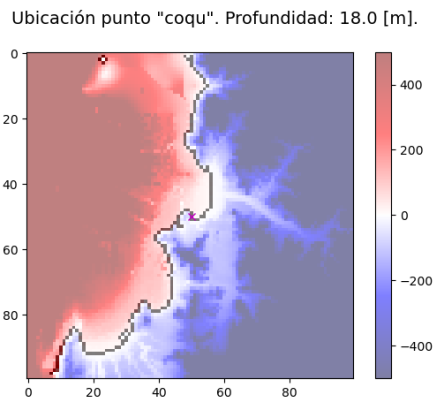
Los gráficos de la figura 4.2 muestran el despliegue que genera cada función del programa. Para la primera función (figura 4.2.a) se muestra un punto en tierra. La segunda función (figura 4.2.b) mostrará un punto a una profundidad superior a un umbral definido por el usuario y la tercera muestra la posición de los puntos asociados a cada ENM, indicando su profundidad (figura 4.2.c). En todos los casos se resalta la línea de costa, usando el mismo algoritmo que el programa para modelar tsunamis (i.e. donde se aplica la condición de borde en costa). La paleta de colores muestra las profundidades cercanas a costa (en metros) con valores positivos hacia abajo y negativos hacia arriba. El punto de interés se marca con una cruz color magenta. Los ejes  $x$  e  $y$  usan celdas y por lo tanto se puede identificar cuántas celdas en la grilla (o equivalentemente cuántas veces la resolución de la grilla) debe moverse un punto para quedar en una mejor posición.



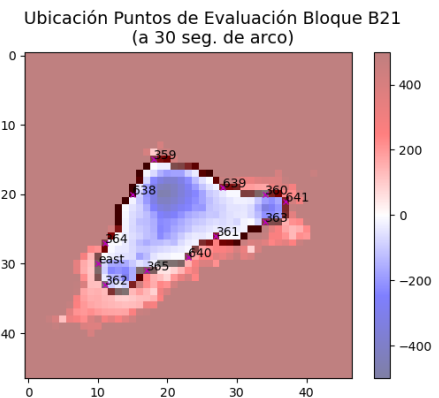
(a) Gráfico desplegado por la función 1 del programa `check_peval.py`.



(b) Gráfico desplegado por la función 2 del programa `check_peval.py`.



(c) Gráfico desplegado por la función 3 del programa `check_peval.py`.



(d) Gráfico desplegado por la función 4 del programa `check_peval.py`.

Figura 4.2: Ejemplos de gráficos generados por el programa `check_peval.py` para calibrar puntos de evaluación.

#### 4.1.2. Datos variables para la evaluación de amenaza

Aquellos aspectos que condicionan el tiempo de ejecución del programa son el tiempo de simulación y la cantidad de puntos en la grilla (considerando un mismo evento, ya que para diferentes planos de falla, por ejemplo, el tiempo de cálculo de la deformación del fondo marino podría variar). El primero de ellos es bastante directo, es parte de los parámetros que se ingresa al programa mientras que, la cantidad de puntos dependerá de la resolución espacial y extensión del dominio, que a su vez dependerá del plano de falla más lo que se agregue hacia las 4 direcciones.

La resolución espacial está dada por el archivo de batimetría a través del parámetro `grid-name`. Como el desarrollo fue efectuado utilizando batimetría de GEBCO, la mejor resolución que se puede implementar corresponde a 15 segundos de arco, pudiendo solamente disminuir la resolución. Si por ejemplo, se disminuye a la mitad (30 segundos de arco), la cantidad de puntos se reduce a un cuarto para una misma área geográfica.

El otro aspecto que condiciona la cantidad de puntos en la grilla es la extensión geográfica del dominio de cálculo. Este parámetro también se ingresa en el programa a través de



las variables  $D_{lon}$  y  $D_{lat}$ . Para determinar la mejor extensión se debe considerar no solamente la cantidad final de puntos, sino que debe ir acompañado del tiempo de simulación considerando la velocidad de propagación del tsunami; no tiene sentido simular una hora de propagación para todo Chile, ya que las ondas sólo alcanzarán a propagarse por algunos cientos de kilómetros.

Al dejar estos parámetros libres se puede buscar la mejor combinación para obtener una evaluación óptima que abarque un área adecuada y permita resultados en tiempos útiles. Lo anterior se puede repetir tantas veces como sea necesario, modificando los parámetros, hasta obtener los niveles de amenaza de tsunami para todo el país.

### 4.1.3. Obtención de la evaluación de amenaza

Independiente de los parámetros para cada ejecución del modelo, la estrategia para obtener la evaluación es la misma. Teniendo los límites geográficos del dominio de cálculo, se identifican aquellos puntos de evaluación contenidos en éste para rescatar las alturas de tsunami únicamente en aquellos que aporten información (potencialmente) no nula, para lo que se genera una nueva versión del archivo `peval` que contiene solo los puntos al interior de la grilla y se agregan dos columnas al archivo con la posición de cada punto en ella (con índices de matrices). Esta información es usada posteriormente por lo que escribirla en un archivo evita tener que volver a calcularla.

Finalizada la modelación, se cuenta con las máximas alturas en cada punto de evaluación y por lo tanto con las máximas alturas para cada bloque. Luego, haciendo uso de los criterios detallados en la figura 2.10 se etiqueta cada bloque con un nivel de amenaza y color, para generar un gráfico (ver figura 4.1.b). Aquellos bloques que se encuentran en color gris corresponden a los que aun no han sido modelados debido a la extensión del dominio de cálculo. Si se efectúa una modelación para todo el territorio nacional con suficiente tiempo de simulación, se obtiene la evaluación para todo el país.

Para observar el comportamiento de las máximas alturas al interior de cada bloque, se incorporó la generación de histogramas que muestran cuántos puntos de evaluación se ubican en cada nivel de amenaza (no computado, informativo, precaución, alerta o amenaza). En la figura 4.3 se muestra un ejemplo a partir de la modelación para el tsunami generado por el terremoto de Illapel, que produce la evaluación de amenaza que se muestra en la figura 4.4.

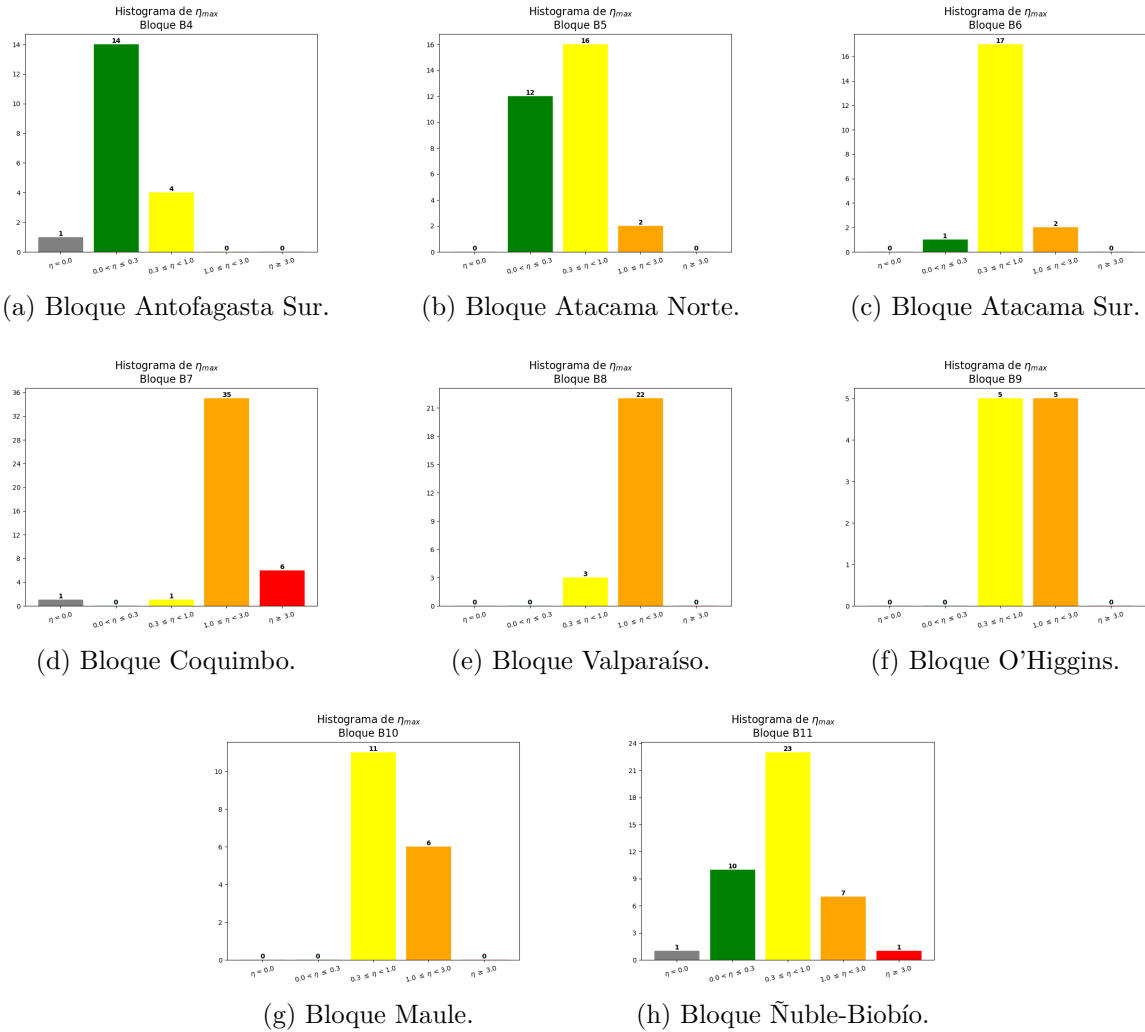


Figura 4.3: Histogramas de máximas alturas de tsunami modeladas en los puntos de evaluación, por cada bloque geográfico.

#### 4.1.4. Resultados de la evaluación de amenaza

Para obtener la evaluación se ejecuta la rutina de python `get_eval.py` que genera 4 archivos; uno de texto que contiene la información de un Boletín de Amenaza de Tsunami y 3 figuras; una con la evaluación de la amenaza, otra que muestra la distribución del slip a lo largo del plano de falla y una última con las amplitudes máximas de tsunami.

El Boletín que se crea sigue en líneas generales el formato establecido en el Protocolo ONEMI-SHOA-CSN, que contiene información relacionada al evento, un texto que justifica la evaluación de amenaza, posteriormente los estados de amenaza por bloques, información de la fuente sísmica y finalmente algunos aspectos generales a tener presente. Los boletines deben variar en función del tipo de evaluación que se está ejecutando por ejemplo, una evaluación realizada a partir de modelación de tsunami con la solución puntual de la fase-W, debería tener un texto de evaluación diferente a aquella que se hace utilizando un plano de falla de una fuente finita.

Evaluación de Amenaza de Tsunami  
( $M_{ww}$  8.2 en 31.60S; 71.67W)

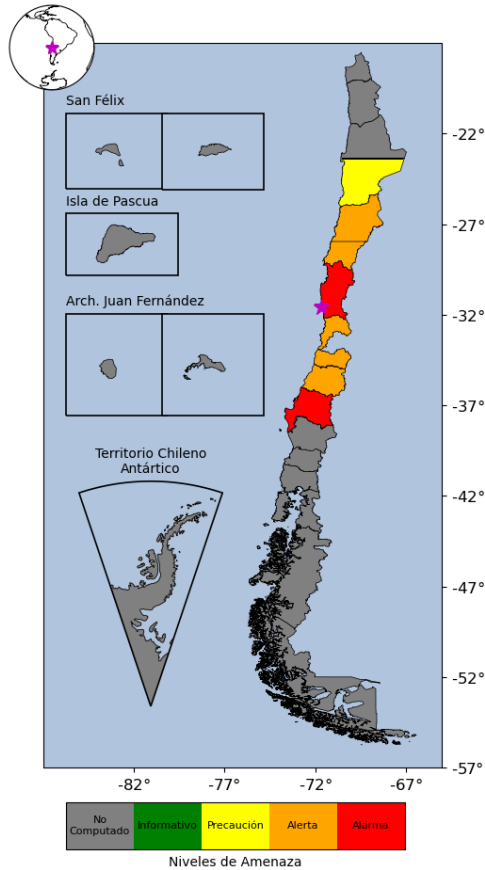


Figura 4.4: Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación del tsunami generado por el terremoto de Illapel (2015).

Con esta metodología es posible mantener los boletines con el mismo formato que se usa actualmente en el SNAM, debiendo agregar solamente el concepto “N/C” para indicar aquellos bloques que no han sido considerados en la modelación aun. Para crear los boletines se incluyeron formatos en la carpeta `permadata` que son leídos y modificados en aquellos aspectos necesarios, por lo que si se quiere modificar estructuralmente el Boletín, se debe modificar el archivo de formato y revisar la función `crear_boletin_txt.py`.

De las figuras que se crean, la primera es la más relevante ya que contiene los estados de amenaza siguiendo la nomenclatura de colores descrita. Un ejemplo se muestra en la figura 4.5, cuyo título indica que corresponde a una evaluación para aun evento con  $M_{ww}$  calculada a partir de los parámetros de inversión de la fase-w es 8.9 y se incluye además el epicentro con coordenadas geográficas, que también se muestra en los mapas con una estrella color magenta. Este producto se genera automáticamente y debe ser leído en conjunto con el Boletín de Amenaza asociado.

Evaluación de Amenaza de Tsunami  
( $M_{ww}$  8.9 en 36.22S; 73.17W)

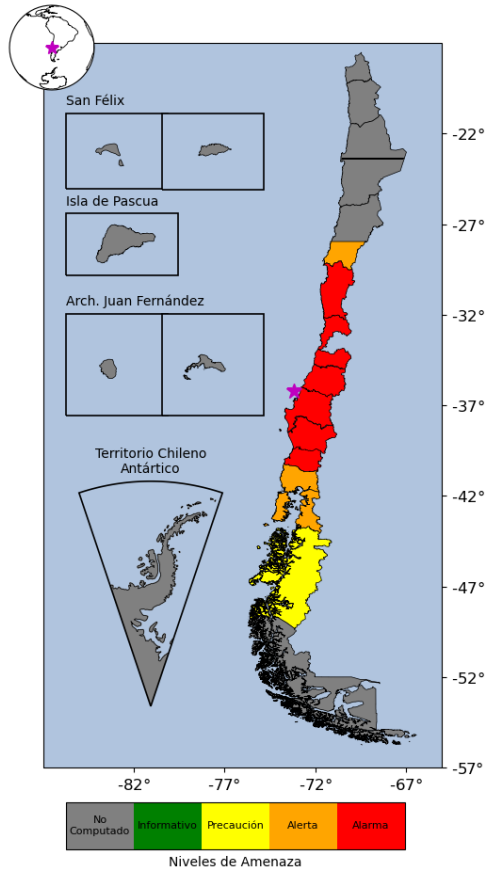


Figura 4.5: Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010).

Una particularidad que se implementó para marcar una diferencia, es que cuando se efectúe una modelación que utilice como input la solución del centroide (i.e. fuente puntual), el mapa tendrá el gráfico representativo del tensor de momento (la “pelota de playa”), en lugar de la estrella como indicativo del epicentro en el mapa principal, para reforzar la idea de que la modelación fue efectuada utilizando una solución puntual. Lo anterior se muestra en el ejemplo de la figura 4.6.

Como se detalló en el capítulo previo, a partir de la solución del centroide se calcula un plano de falla que posee una distribución de slip con forma elíptica y amplitud dependiente de la distancia al centroide (ver figura 3.5.b), por lo que es esperable encontrar diferencias que pueden ser significativas entre esta solución de niveles de amenaza con aquellas calculadas a partir de planos de falla.

Evaluación de Amenaza de Tsunami  
( $M_{ww}$  8.3 en 35.85S; 72.71W)

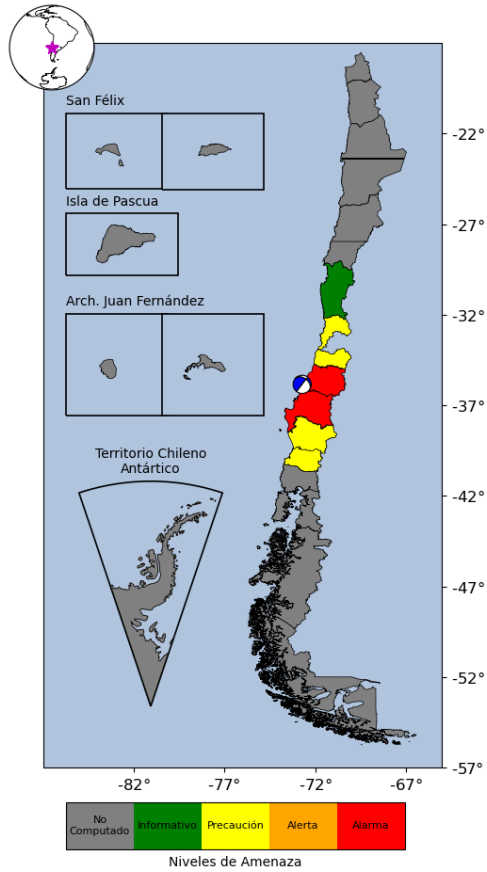


Figura 4.6: Evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010), utilizando una solución puntual del tensor de momento del centroide, a partir de la fase-w.

Si se efectúa una modelación de un tsunami suficientemente grande en un dominio que incluya todo el territorio nacional, con tiempo de simulación suficiente, se obtendrá un mapa en que no habrán bloques en color gris como el que se muestra en la figura 4.7.

### Evaluación de Amenaza de Tsunami ( $M_{ww}$ 8.9 en 36.22S; 73.17W)

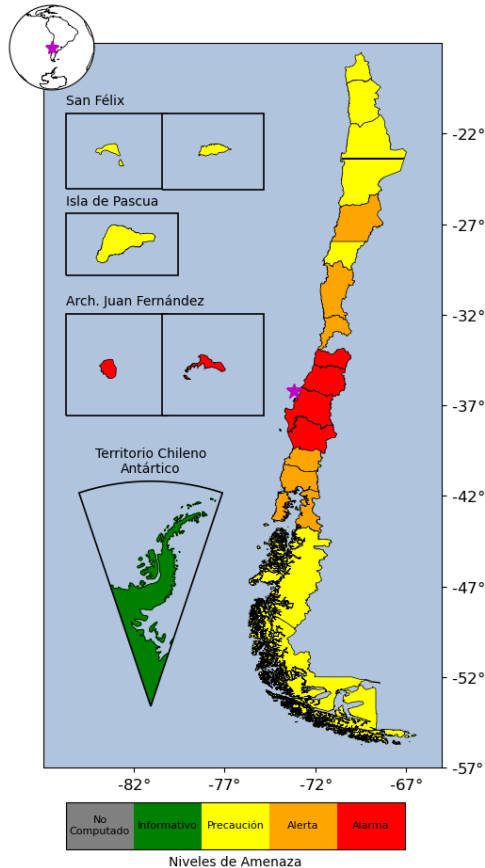


Figura 4.7: Niveles de amenaza de tsunami para todo Chile, obtenidos a partir del terremoto del Maule (2010), con 12 horas de simulación.

Las otras dos imágenes que se pueden generar<sup>11</sup> son útiles para la interpretación de la amenaza. La primera consiste en un mapa con una proyección en superficie de la distribución de slip utilizada para modelar la deformación del fondo marino (ver figura 3.6). La última figura corresponde al mapa que muestra las amplitudes máximas de tsunami en el dominio de cálculo (ver figuras 3.11 y 3.12). Estas últimas permiten observar cómo se comportan las máximas alturas en el dominio de cálculo, así como también ver claramente, en un mapa, el dominio modelado.

## 4.1.5. Otros aspectos de la evaluación de amenaza

### 4.1.5.1. Series de tiempo y horas de arribo

En el apartado anterior se discutieron aquellos aspectos directamente relacionados con la evaluación de amenaza de tsunami. Otro punto relevante en la gestión del riesgo es la comunicación de la estimación de los tiempos de arribo, para que las autoridades puedan tomar las medidas oportunamente. A partir de la modelación con la metodología descrita es posible estimar las horas de arribo del frente de ondas del tsunami a diferentes localidades. Actualmente el SHOA entrega en un boletín las horas estimadas de arribo para aquellas

<sup>11</sup> El programa considera variables booleanas que permiten desactivar la generación de estas figuras si se estima que no es necesario.

localidades que cuentan con Estaciones de Nivel del Mar, siempre que se encuentren en bloques que tengan algún nivel de amenaza es decir, precaución, alerta o alarma.

La figura 4.8 muestra a la izquierda las series de tiempo que se obtuvieron al modelar el tsunami post terremoto de Illapel (2015) para aquellos puntos que se asocian a una ENM, al interior del dominio de cálculo. Dicha figura representa una modelación para un área muy acotada y con un tiempo de simulación de 6 horas. Análogamente, es posible efectuarlo con modelaciones a otras escalas, como lo muestra la figura 4.9, que corresponde al mismo tsunami, en un dominio de cálculo mayor y con 12 horas de simulación. Estos mapas permiten por ejemplo, identificar el tiempo mínimo de modelación para cubrir una determinada extensión sin embargo, las máximas amplitudes no necesariamente se dan con las primeras llegadas y por lo tanto se debe modelar tiempos mayores.

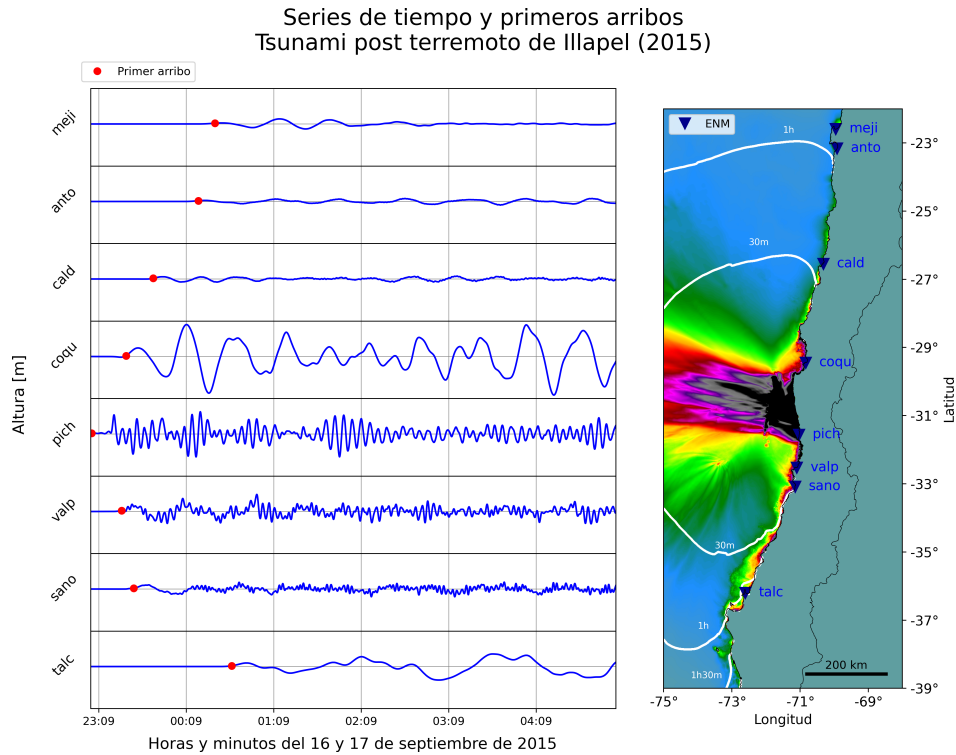


Figura 4.8: Series de tiempo y primeros arribos a las localidades con ENM (modelo del tsunami post terremoto de Illapel 2015). A la izquierda se presentan las series de tiempo con sus horas de arribo marcadas con puntos rojos y a la derecha las máximas amplitudes de tsunami e isócronas del frente de ondas.

En la figura 4.8 se usó la misma escala para las diferentes series de tiempo (tanto en el eje  $x$  como en el  $y$ ). Las Estaciones están ordenadas de Norte a Sur, por lo que se puede observar el patrón de viaje del frente de ondas (representado por los primeros arribos) y también la variación de alturas de tsunami en función de la distancia al origen (La estación “coqu”, ubicada en Coquimbo, registró alturas cercanas a los 5 metros).

## Modelo del tsunami post terremoto de Illapel (2015) y sus tiempos de viaje

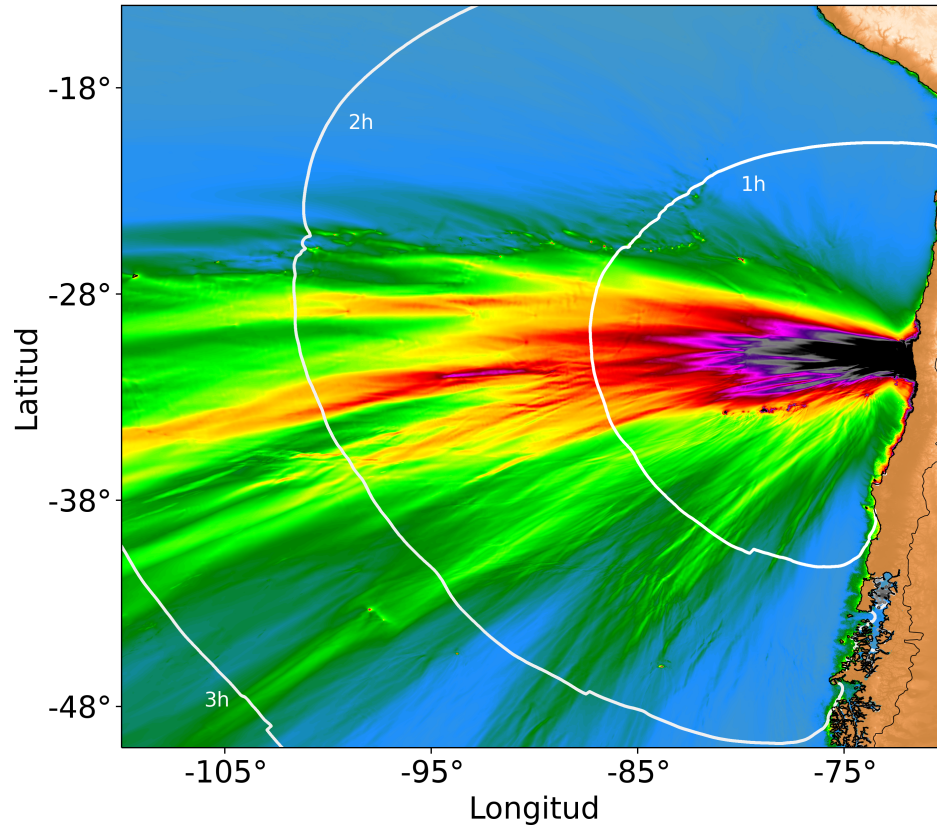


Figura 4.9: Modelo del tsunami post terremoto de Illapel (2015) y sus tiempos de viaje.

exit

Al efectuar los cálculos de horas de arribo con las simulaciones y compararlas con los registros de las Estaciones de Nivel del Mar para los tsunamis generados por los terremotos del Maule (2010), Pisagua (2014) e Illapel (2015), la máxima diferencia fue de 10 minutos para el modelo de Illapel, en la estación ubicada en Juan Fernández (el tsunami se registró 10 minutos después de lo que indicó el modelo). Para los cálculos de horas de arribo se utilizó una grilla de 30 segundos de arco. El promedio de las diferencias observadas es de  $\sim 2 \pm 4.1$  minutos. El detalle de las comparaciones se presenta en la tabla 4.1 que consideró todas las ENM que tienen datos suficientes para observar las horas de arribo. En este contexto diferencias positivas implican que el tsunami se registró antes de lo pronosticado mediante el modelo y valores negativos lo contrario.

Para determinar las horas de arribo de los registros se descargaron las series de tiempo desde el repositorio web de UNESCO (Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 2022). El tratamiento de las señales consistió únicamente en la remoción del promedio para centrar las alturas en torno a cero y posteriormente se restó la marea con un filtro polinomial, quedando el registro del tsunami y ruido (de amplitudes mucho menores que el tsunami). Para el caso de las series modeladas simplemente se buscó el tiempo en que se manifiesta el tsunami en ella.



Tabla 4.1: Comparación de horas de arribo registradas y modeladas para los tsunamis generados por los terremotos indicados (horas en UTC). Valores de  $\Delta t$  positivos indican que el tsunami se registró después de la hora de arribo simulada y valores negativos que el primer arribo se registró antes que la hora simulada.

Estación	Terremoto	Hora registrada	Hora modelada	$\Delta t$ [min]
Talcahuano	Maule	2010-feb-27 06:35	2010-Feb-27 06:35	0
Valparaíso	Maule	2010-feb-27 06:40 <sup>a</sup>	2010-Feb-27 06:36	4
Ancud	Maule	2010-feb-27 07:57	2010-Feb-27 07:54	3
Arica	Pisagua	2014-abr-01 23:49	2014-abr-01 23:47	2
Pisagua	Pisagua	2014-abr-01 23:52	2014-abr-01 23:48	4
Iquique	Pisagua	2014-abr-01 23:53	2014-abr-01 23:47	6
Patache	Pisagua	2014-abr-02 00:05	2014-abr-02 00:03	2
Mejillones	Pisagua	2014-abr-02 00:10	2014-abr-02 00:18	-8
Antofagasta	Pisagua	2014-abr-02 00:28	2014-abr-02 00:22	6
Paposo	Pisagua	2014-abr-02 00:31	2014-abr-02 00:33	-2
Coquimbo	Illapel	2015-sep-16 23:10	2015-Sep-16 23:09	1
Huasco	Illapel	2015-sep-16 23:21	2015-Sep-16 23:13	8
San Antonio	Illapel	2015-sep-16 23:24	2015-Sep-16 23:19	5
Caldera	Illapel	2015-sep-16 23:26	2015-Sep-16 23:30	-4
Bucalemu	Illapel	2015-sep-16 23:30	2015-Sep-16 23:30	0
Constitución	Illapel	2015-sep-16 23:46	2015-Sep-16 23:44	2
Juan Fernández	Illapel	2015-sep-16 23:47	2015-sep-16 23:37	10
Taltal	Illapel	2015-sep-16 23:50	2015-Sep-16 23:50	0
Antofagasta	Illapel	2015-sep-17 00:04	2015-Sep-17 00:01	3
Talcahuano	Illapel	2015-sep-16 00:22	2015-Sep-17 00:25	-3

<sup>a</sup> A la hora indicada se presenta una anomalía, aunque el tsunami se observa claramente a contar de las 06:54 hrs.

Al incorporar los cálculos de horas de arribo en la ejecución del programa se observaron aumentos de los tiempos de ejecución inferiores a 5 segundos tanto para dominios de cálculo acotados como en modelaciones para todo Chile (incluido territorio insular y antártico), por lo que el aumento en los tiempos de cómputo producto de la incorporación del cálculo de horas de arribo es despreciable respecto a los tiempos totales.

#### 4.1.5.2. Escritura de otros archivos en disco

Con lo que se ha descrito el programa se encuentra en condiciones de ser utilizado para efectuar evaluaciones de amenaza de tsunami a partir de las soluciones de la fase-w entregando una evaluación segmentada por bloques, con simbología conocida, estandarizada y además con la posibilidad de entregar una buena estimación de las horas de arribo. Lo anterior se puede hacer para diversos dominios geográficos, grillas batimétricas y tiempos de simulación.

Existen otras informaciones que son relevantes para hacer seguimientos y revisiones a las modelaciones y sus resultados, para lo que el programa genera archivos de texto con datos

de los parámetros de la modelación:

- **parameters.dat**: Contiene la información relevante de los parámetros de utilizados al interior del programa. Estos datos se van generando en diferentes instancias y por lo tanto su escritura se concreta en diversas etapas de la ejecución. Incluye la cantidad de puntos del plano de falla, tiempo de simulación, coordenadas del epicentro, tamaño de la discretización del dominio de cálculo, coordenadas de los extremos y extensiones de los dominios de cálculo.
- **tsun2022.log**: Almacena el *standard output* de la simulación. Este archivo contiene toda la información que el programa imprime en la terminal donde se ejecuta. Por ejemplo, el tiempo total de ejecución, la información de estaciones que se encuentren en tierra, aquellas que no presentan alturas significativas para el cómputo de horas de arribo, así como cualquier error que se presente durante la ejecución, entre otras informaciones de utilidad. El nombre de este archivo puede variar levemente dependiendo del área que se modele (local, todo Chile, océano Pacífico), manteniéndose siempre como el único con extensión `.log`.
- **tsun2022.txt**: Es una copia del archivo `.bash` que se ejecutó; contiene todos los parámetros de entrada y al igual que el caso anterior, su nombre varía para indicar la versión utilizada.
- **otros**: archivos `h.dat`, `hx.dat` y `hy.dat` (grilla batimétrica y las derivadas espaciales asociadas), `output_stations.txt` y `stations.txt` que almacenan las series de tiempo con las alturas de tsunami e información de localización en la grilla de las ENM utilizadas, `parameters.tsun` corresponde a un arreglo con la solución de la inversión concatenada (no por planos de falla como el original, sino que de manera ininterrumpida), `peval_ready.dat` agrupa la información de todos los puntos de evaluación utilizados (nombre, coordenadas, bloque de evaluación y altura máxima modelada) y `zmax.dat` es un arreglo que contiene las máximas alturas de tsunami modeladas para cada punto en la grilla.

Adicionalmente se le puede indicar al programa, mediante variables booleanas, que guarde las matrices de alturas máximas y/o alturas en función del tiempo cada cierto número de iteraciones, así como también parámetros de la capa de amortiguamiento y otros de calibración. Estos no son obligatorios y su creación agrega tiempo de cómputo significativo. Se recomienda su uso para ejecuciones que no sean en tiempo cuasi-real como por ejemplo, para calibrar el sistema, hacer pruebas o estudios a posteriori.

## 4.2. Validación del programa para alerta temprana

### 4.2.1. Resultados de la modelación

En las figuras A.13, A.14, A.15 y A.16 se presentan las series de tiempo modeladas y registradas por las Estaciones de Nivel del Mar para diferentes eventos. En ellas se observa un buen ajuste en amplitud y fase en la primera llegada luego, existen diferencias que no influyen de manera sustancial para alerta temprana, ya que lo más relevante es la máxima altura y el primer tiempo de arribo. Ambos parámetros son consistentes entre observaciones y modelos. Los gráficos que se muestran en las figuras indicadas presentan prácticamente

todos los registros instrumentales (con ENM) de alturas de tsunami en Chile. Para obtener esos resultados fue fundamental la localización en la grilla del punto que mejor representa la ubicación real de cada ENM aunque dada la cantidad y distribución de puntos de evaluación por bloque, el resultado de la evaluación de amenaza es independiente de la correcta ubicación de estos puntos en particular, siendo más importante la calibración de todos los puntos.

Un aspecto relevante que se observó en algunos casos fue que, para los mismos parámetros de modelación, al disminuir la resolución de la grilla batimétrica también lo hacía el nivel de amenaza de tsunami para un bloque determinado. Un ejemplo de esto se observó al modelar el tsunami post terremoto del Maule; el bloque de Juan Fernández (número 19) obtiene un nivel de amenaza de Alarma si se usa una grilla de 30 y 45 segundos de arco mientras que, para una resolución de 60 segundos de arco, el nivel de amenaza disminuye a Alerta. Al observar en detalle los valores de los puntos de evaluación, en las modelaciones con mejor resolución existe un punto (el 334 en los gráficos de la figura 4.10) cuya máxima altura supera el umbral 3.0 [m] y cataloga el bloque con nivel de Alarma. Ese punto se encuentra en una bahía que va perdiendo su forma al pasar de una resolución de 30 a 45 y a 60 segundos de arco, lo que es extrapolable tanto para resoluciones mayores y menores.

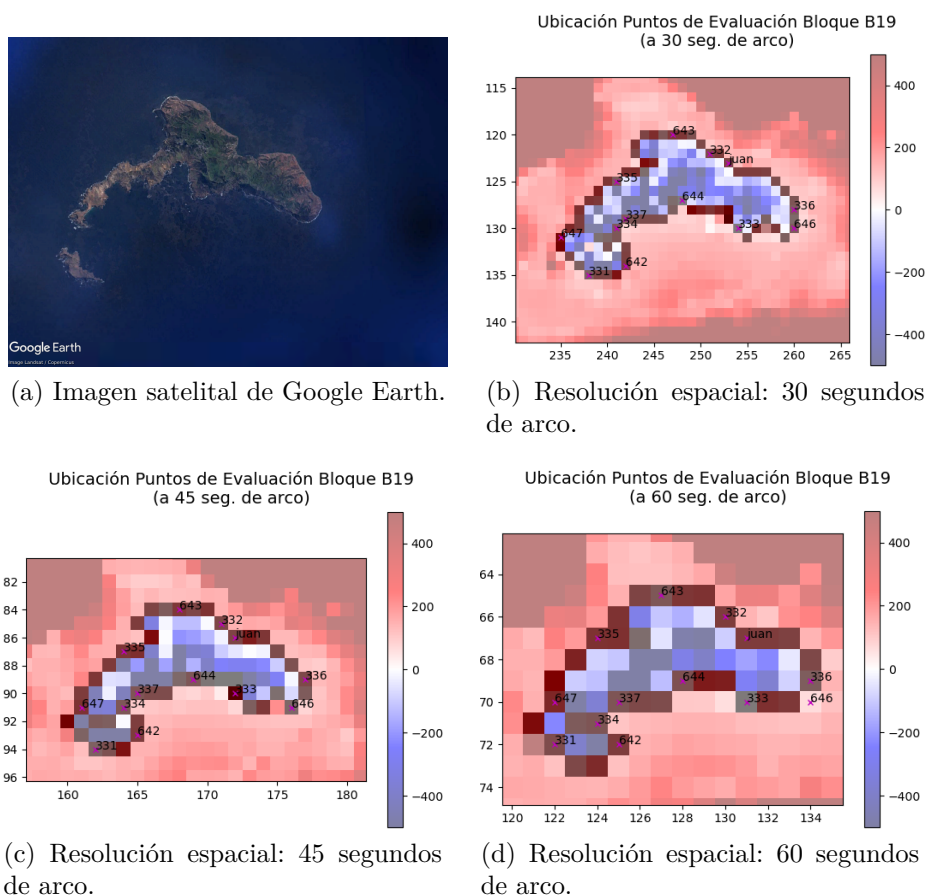


Figura 4.10: Ubicación de los puntos de evaluación para el bloque B19 (Juan Fernández) a diferentes resoluciones espaciales.

Los gráficos de la figura 4.10 pretenden ilustrar la situación anterior. En ellos se presentan con tonalidades rojas las de profundidad en el océano (valores positivos en la paleta de colores) y azules las alturas sobre el terreno (valores negativos en la paleta de colores). Las cruces de color magenta son los puntos de evaluación en el área y se muestra también su identificador

en el archivo `peval.txt` (se observa que ahí está contenida la ENM de Juan Fernández por ejemplo). Estos gráficos se pueden obtener con la función `check_peval.py` directamente para observar la ubicación de los puntos de evaluación de cualquier bloque.

En la figura mencionada se muestra parte del bloque 19 que corresponde al archipiélago Juan Fernández, particularmente las islas Robinson Crusoe y Santa Clara que están separadas por un cuerpo de agua como se observa en la figura 4.10.a que corresponde a una imagen satelital de Google Earth cuya resolución es cercana a los 15 [m] ( $\sim 0.5$  segundos de arco) (Google Earth Pro, 2022) sin embargo, al disminuir la resolución dicho paso de agua se cierra (ver figuras 4.10.b, 4.10.c y 4.10.d).

Este mismo efecto se puede observar en otros sectores como por ejemplo, para resoluciones superiores a 45 segundos de arco, el canal Chacao se cierra, lo mismo pasa en diferentes partes del estrecho de Magallanes y otros canales y fiordos de la zona sur en que, una disminución de la resolución espacial se traduce en modificaciones sustanciales de la geomorfología.

## 4.2.2. Pruebas de rendimiento

Para que esta metodología pueda ser implementada en un sistema de alerta temprana, sus tiempos de cómputo deben ser acordes a lo que el país requiere es decir, evaluaciones consistentes en pocos minutos. Ya se comentó que los resultados son confiables y a continuación se mostrará que además se pueden obtener en tiempos adecuados para satisfacer el nivel de urgencia que el país tiene.

Existen tres parámetros que definen el tiempo que tardará en ejecutarse un modelo como este; la cantidad de puntos en la grilla, el tiempo de simulación y el paso temporal sin embargo, es poco práctico hablar de cantidad de puntos en la grilla, siendo más conveniente identificar la extensión en latitud, longitud y resolución de la grilla; parámetros sobre los que se tiene control en cada ejecución y que condicionan el número total de puntos. Además, de la resolución se obtiene el paso temporal, que debe asegurar la condición CFL. De esta forma se controlan 2 de los 3 parámetros que determinan el tiempo de ejecución. El tiempo de simulación es un valor de entrada y por lo tanto se puede considerar directamente.

Para poder estimar tiempos de cómputo del programa, es suficiente probar combinaciones de resolución de la grilla, extensión en latitud y longitud y tiempo de simulación. Para el caso de la extensión se consideró como base el área definida para el cálculo de la deformación del fondo marino más  $1.5^\circ$  de latitud y longitud en las cuatro direcciones cardinales. A partir de esos límites se puede extender una cantidad arbitraria hacia cada dirección.

Se diseñó una prueba de rendimiento que considera diferentes combinaciones de valores de los parámetros mencionados y cada una de ellas se ejecutó 3 veces para observar la estabilidad de las mediciones, calculando el tiempo total de cada combinación como el promedio de las 3 y en aquellos casos que la desviación estándar superó el 10 % del tiempo de cómputo, se repitió la prueba (para ese set de valores), hasta obtener una desviación menor al porcentaje indicado<sup>12</sup>.

El objetivo de esta prueba es obtener de manera empírica las mejores combinaciones de parámetros que permitan generar resultados confiables y útiles en tiempos de cómputo suficientes, considerando el nivel de urgencia y por lo tanto una ejecución rápida, que no necesariamente abarque todo Chile sino que aquellas zonas que serían las primeras afectadas por el tsunami, debido a que para zonas más alejadas o para eventos que ocurran lejos de las costas de Chile, se cuenta con mayor tiempo de reacción.

---

<sup>12</sup> En total solamente fue necesario repetir 8 de las 270 pruebas.

Los valores seleccionados para generar las combinaciones se presentan en la tabla 4.2. Las grillas que se consideraron fueron aquellas con las que se espera obtener los mejores resultados en términos de niveles de amenaza. Los diferenciales de latitud son iguales para Norte y Sur, ( $1^\circ$  de latitud, se refiere a  $1^\circ$  hacia el Norte y la misma cantidad hacia el Sur). El caso Este-Oeste es diferente debido a que aumentar el dominio de cálculo hacia el Este solamente aporta área en tierra en la mayoría de los casos, por lo que para todas las pruebas se consideró un valor de  $0.5^\circ$  en esa dirección. Para el Oeste se usaron 3 valores;  $0.5^\circ$  para modelar solamente la costa continental,  $6^\circ$  que permite incluir las islas del archipiélago Juan Fernández y finalmente  $8^\circ$  que incluye las islas Desventuradas<sup>13</sup>, considerando un terremoto que ocurre en la zona de subducción frente a Chile Continental. Los valores para los tiempos de simulación se escalaron de manera análoga que el diferencial de latitud, aunque vale la pena mencionar que no tiene sentido utilizar la máxima extensión en latitud con 1 hora de simulación, ya que la propagación no alcanzará las zonas más extremas del dominio de cálculo (la figura 4.8 justifica esta idea), por lo que no es suficiente observar los tiempos de cómputo sino que la interpretación de las combinaciones que generen los tiempos requeridos es vital.

Tabla 4.2: Valores utilizados para generar las combinaciones de parámetros en las pruebas de rendimiento.

Parámetro	Valores
Resolución de la grilla <sup>a</sup>	15 ; 30 ; 45 seg. de arco
Diferencial de Latitud	$\pm 1^\circ$ ; $\pm 2^\circ$ ; $\pm 4^\circ$ ; $\pm 6^\circ$ ; $\pm 8^\circ$
Diferencial de Longitud	$\pm 0.5^\circ$ ; $[-6^\circ, 0.5^\circ]$ ; $[-8^\circ, 0.5^\circ]$
Tiempo de simulación	2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8 horas

<sup>a</sup> Los valores de  $\Delta t$  están asociados a la resolución de la grilla. Con los valores implementados la condición CFL está asegurada hasta la latitud  $64^\circ\text{S}$ , lo que incluye las 2 ENM instaladas en el Territorio Chileno Antártico.

La síntesis de los resultados de las pruebas de rendimiento se muestran en la figura 4.11. En los 4 gráficos el eje de las abscisas representa el tiempo de ejecución del modelo (en segundos) para una combinación específica de parámetros<sup>14</sup>. Adicionalmente los colores simbolizan los tiempos de simulación empleados, según lo descrito en la leyenda donde también se indica la simbología de los umbrales de tiempos de ejecución.

Cada gráfico muestra el comportamiento de las combinaciones de parámetros en función de uno de ellos. El de la esquina superior izquierda representa la cantidad de puntos en la grilla; si bien este gráfico no es tan práctico, posee información muy valiosa al observar cómo escalan los tiempos en función la cantidad de puntos para cada tiempo de simulación. En dicho gráfico se observa que existe una serie de combinaciones que permiten obtener resultados en menos de 2 minutos, mientras que unas pocas sobrepasa los 15 minutos.

El gráfico de la esquina inferior izquierda representa el comportamiento en función de la resolución de la grilla (en segundos de arco). A partir de esta comparación se observa claramente que todas las combinaciones que utilizan grillas de 45 segundos de arco están

<sup>13</sup> Para que tenga sentido utilizar los últimos dos valores de diferencial de longitud, la extensión en Norte-Sur debe cubrir las latitudes de los territorios insulares indicados y los tiempos de simulación deben ser suficientes para que el tsunami se propague hasta esas distancias.

<sup>14</sup> El tiempo de ejecución se mide desde que comienza la ejecución de este programa y no desde el tiempo de origen del terremoto

bajo (o muy cerca de) los 2 minutos, mientras que todas las combinaciones que usan grillas de 15 segundos están por sobre ese umbral. De manera esperable, la resolución de 30 segundos permite obtener tiempos intermedios que van desde menos de 1 minuto hasta  $\sim 5$  minutos.

Los dos gráficos de la derecha representan la variación en Latitud (superior) y Longitud (inferior), siguiendo la lógica descrita anteriormente. Para ambos parámetros existen tiempos de ejecución en todo el rango, por lo que estos, junto al tiempo de simulación, son más versátiles que la resolución espacial. Para este test se utilizó el terremoto de Illapel (2015) como modelo; terremotos más pequeños disminuirán los tiempos de cómputo y eventos mayores los aumentarán. Bajo las mismas condiciones se observaron variaciones inferiores a 5 segundos al modelar otros eventos.

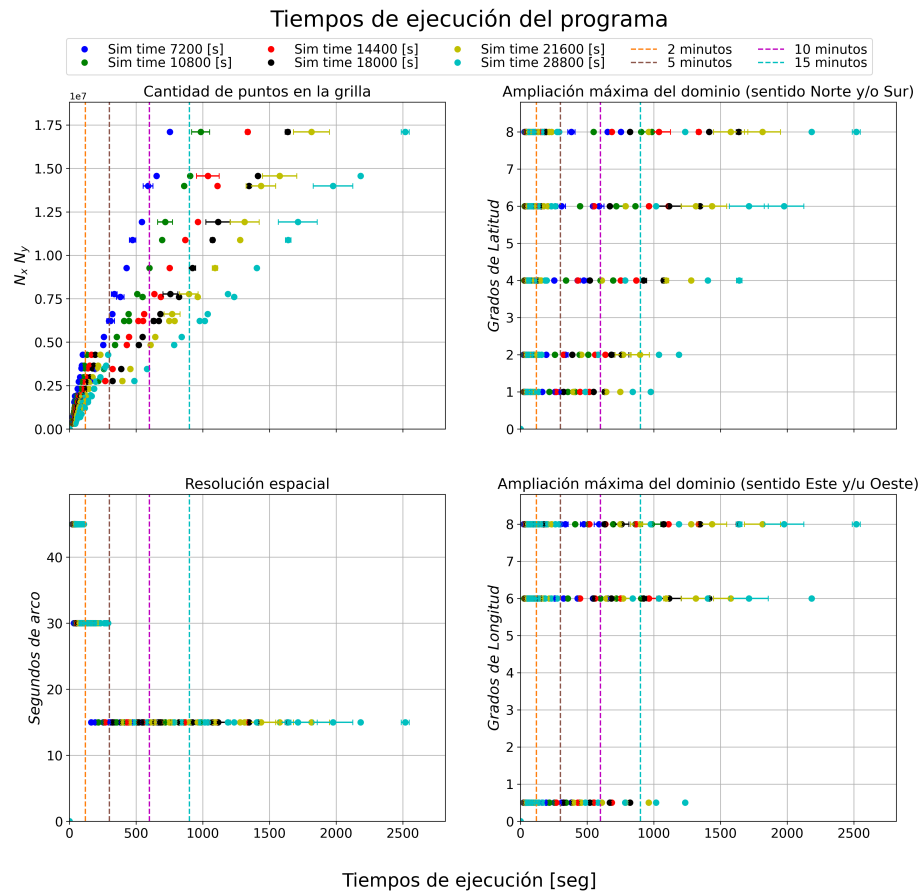


Figura 4.11: Resultados de la prueba de rendimiento efectuada, utilizando el evento de Illapel (2015) como modelo de prueba.

El test de rendimiento que se programó se incluye en la carpeta del programa, lo que permite rehacerla si se quieren probar nuevas combinaciones o si se instala en un servidor diferente. También permite identificar, a partir de uno o más criterios, las combinaciones de parámetros que obtienen ciertos resultados. Por ejemplo es posible identificar todas aquellas combinaciones de parámetros que generan resultados en menos de 2 minutos, o todas aquellas que usaron una cierta resolución, o tiempos de simulación y también combinaciones como por ejemplo, las que demoraron menos de 5 minutos utilizando una grilla a 15 segundos de arco y menos de  $6^\circ$  de latitud hacia el Norte y Sur, etc. Se incluye también una función para rehacer aquellas pruebas cuyo resultado (i.e. tiempo de cómputo) tenga una desviación

estándar mayor al 10 %.

Todos los resultados de las pruebas se almacenaron en una carpeta y para cada combinación se guardan las evaluaciones (gráficas y de texto), el archivo `zmax.dat` y un archivo de texto con los parámetros utilizados.

El test de rendimiento se compone de los siguientes códigos (ejecutables):

- **`run_performance_test.bash`**: Ejecuta el código `performance.py` usando como input los valores de los parámetros detallados en la tabla 4.2.
- **`redo_performance_test.bash`**: Ejecuta el código `performance_redo_test.py` que permite repetir pruebas determinadas con la combinación de parámetros escrita en un archivo denominado `performance_redo_tests.txt`.

Adicionalmente, se incluye el archivo `performance_class.py`, que es un código de python con una clase para procesar toda la información de la prueba de rendimiento, mediante la generación de gráficos y filtros, así como también verificar qué pruebas deben ser repetidas, con base en el cociente entre la desviación estándar y el tiempo de ejecución, escribiendo directamente el archivo `redo_performance_tests.txt`.

En caso que se quieran generar nuevas pruebas y modificar los valores de los parámetros, esto se puede hacer directamente en el archivo de texto `performance_parameters.txt`.

### 4.3. Condiciones computacionales de la implementación

Para desarrollar la implementación de la metodología orientada hacia un sistema de alerta temprana se utilizó un Servidor marca Dell Inc., cuyas principales características son:

- **Servidor:**

- Marca: Dell Inc.
- Modelo: PowerEdge R640

- **Procesadores:**

- 2 Procesadores Intel(R) Xeon(R) Gold 6254 CPU
- 18 núcleos, 36 Subprocesos (36 núcleos, 72 subprocesos en total)
- Frecuencia básica del procesador: 3,10 GHz
- Frecuencia turbo máxima: 4,00 GHz
- Caché: 24,75 MB

- **Memoria:**

- 256 GBytes
- DDR4 Synchronous Registered (Buffered), 3200 MHz

- **Almacenamiento:**

- Raid: 5

- Tarjeta Raid: PERC H840
- Disco: 480 GB SSD 6.0bps

- **Sistema Operativo:**

- CentOS stream 8

- **Compiladores:**

- Intel OneAPI (icc, icpc, ifort)
- GNU version 8.5.0 (gcc, g++, gfortran)

Todos los resultados del presente trabajo fueron obtenidos con ese servidor y todos los códigos de Python fueron probados utilizando la versión 3.8. En caso que se instale el programa en un servidor diferente, se deberían ejecutar nuevas pruebas de rendimiento para evaluar su desempeño.



# Capítulo 5

## Metodología propuesta

### 5.1. Procedimiento

Para implementar este programa en un sistema de alerta temprana para terremotos tsunamigénicos es necesario definir ciertos criterios para la ejecución, por lo que se propone un flujo que contiene diferentes versiones para evaluar la amenaza de tsunami, dependiendo de las características del evento y la disponibilidad de soluciones de la Fase-W.

Para aquellos eventos que sean catalogados como de campo lejano, se deberá ejecutar una primera evaluación con la información disponible que exista e ir actualizándola hasta contar con la solución final del evento, luego de la cual se debería ejecutar una vez más el programa, para posteriormente pasar a una fase de monitoreo, que debe estar siempre presente, desde el inicio del evento hasta la cancelación total.

Para aquellos terremotos que ocurran frente a las costas de Chile el flujo es más dinámico debido al nivel de urgencia asociado. A partir de la solución más reciente de la inversión de la fase-w, se debe verificar si es que corresponde a una del Tensor de Momento del Centroide o de fuente finita; para el primer caso, se ejecutará una versión del programa que tiene implementada esa solución como input, con un dominio de cálculo acotado, y una vez emitida la evaluación, se deberá esperar la siguiente solución de la inversión, lo que se repite hasta recibir la solución final, tiempo en el que se puede actualizar la evaluación en función de nuevas soluciones o mejoras a partir de la misma solución (ya sea aumentando el tiempo de simulación, el dominio de cálculo o ambas). Al recibir la solución final se evaluará la amenaza para todo el país. Posteriormente se debe continuar con el monitoreo hasta la cancelación total.

El flujo recién descrito se presenta de manera gráfica en la figura 5.1.

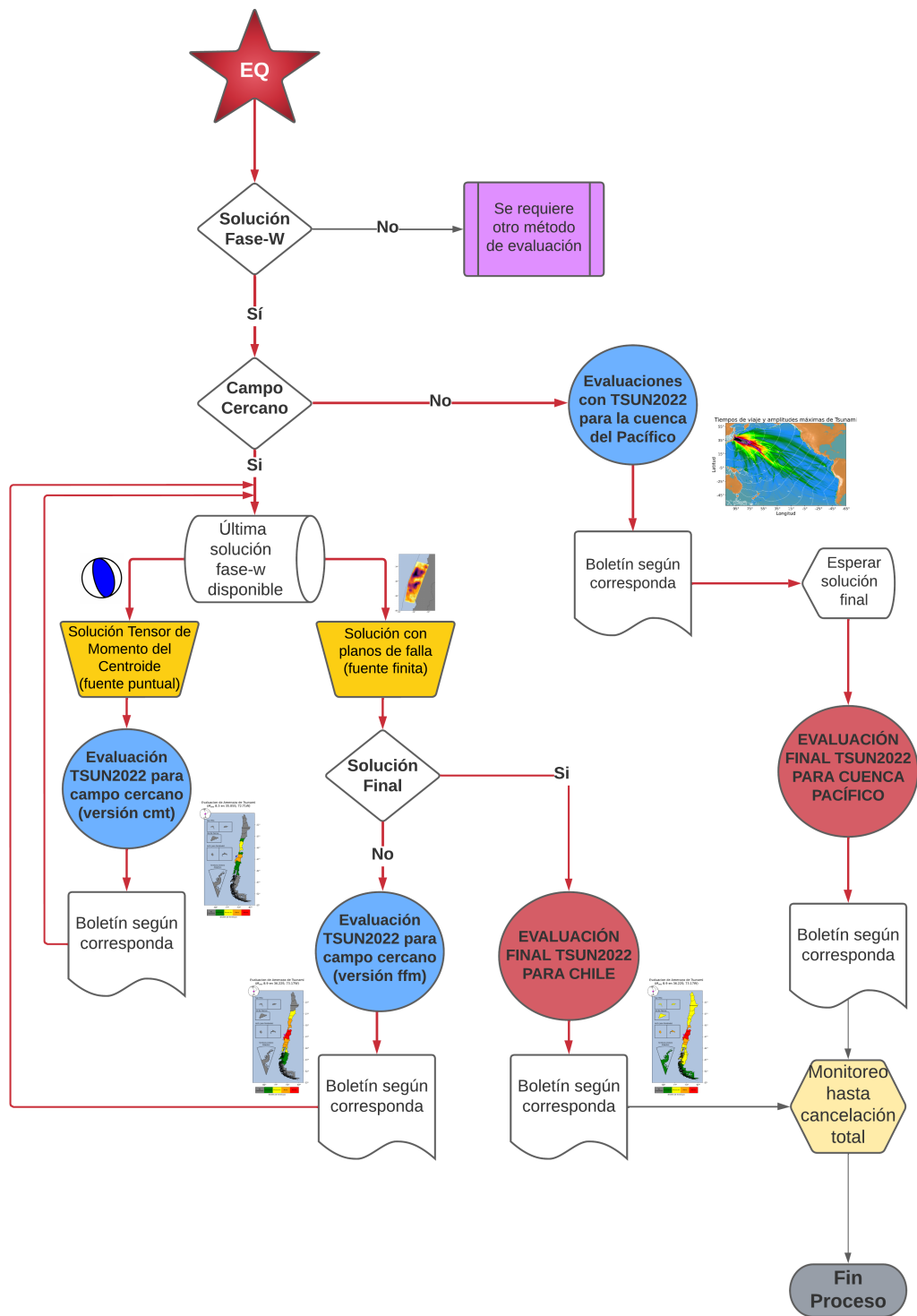


Figura 5.1: Flujo del procedimiento propuesto para implementar el programa para la evaluación de amenaza de tsunamis en un sistema de alerta temprana para Chile, utilizando los parámetros de inversión de la fase-w y modelación de tsunamis en tiempo cuasi-real.

## 5.2. Versiones predefinidas

De lo anterior se desprende que deben existir versiones predefinidas, en las que cambian algunos parámetros para considerar distintos escenarios, lo que permite hacer una evaluación en una determinada situación, ejecutando una versión particular sin la necesidad de modificar inputs en el código. Estas versiones aseguran ciertos resultados y disminuyen la probabilidad de errores al no requerir intervención previo a la ejecución. Lo anterior en ningún caso implica rigidez ni obliga a que solamente se puedan ejecutar esas combinaciones de parámetros, pudiendo éstos ser modificados para mejorar el rendimiento de la evaluación en cualquier aspecto. En la tabla 5.1 se establecen las características y parámetros para las versiones predefinidas del programa.

Tabla 5.1: Características y parámetros sugeridos y tiempos de cómputo esperados para cada versión del programa (N/A: No Aplica).

Característica	Versión 1	Versión 2	Versión 3	Versión 4
Origen	Cercano	Cercano	Cercano	Lejano
Tipo de Fuente	Puntual	Finita	Finita	Finita
Resolución espacial <sup>a</sup>	30	30	60	120
$\Delta$ temporal <sup>b</sup>	1.0 [seg]	1.0 [seg]	2.0 [seg]	3.5 [seg]
$\Delta$ latitud <sup>c</sup>	$[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$	$[-7.0^\circ, 7.0^\circ]$	N/A <sup>d</sup>	N/A <sup>e</sup>
$\Delta$ longitud <sup>f</sup>	$[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$	$[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$	N/A <sup>d</sup>	N/A <sup>e</sup>
Tiempo simulación	3 [hr]	4 [hr]	12 [hr]	24 [hr]
Tiempo cómputo <sup>g</sup>	< 45 [seg]	< 90 [seg]	< 12 [min]	< 20 [min]

<sup>a</sup> En segundos de arco

<sup>b</sup> Los valores de  $\Delta t$  están en función de la condición CFL.

<sup>c</sup> Extensión del dominio de cálculo a partir de extremos Sur y Norte del dominio de Okada.

<sup>d</sup> Dominio de cálculo corresponde a todo el territorio Chileno, incluido el Insular y Antártico.

<sup>e</sup> Dominio de cálculo corresponde a toda la cuenca del Pacífico.

<sup>f</sup> Extensión del dominio de cálculo a partir de extremos Oeste y Este del dominio de Okada.

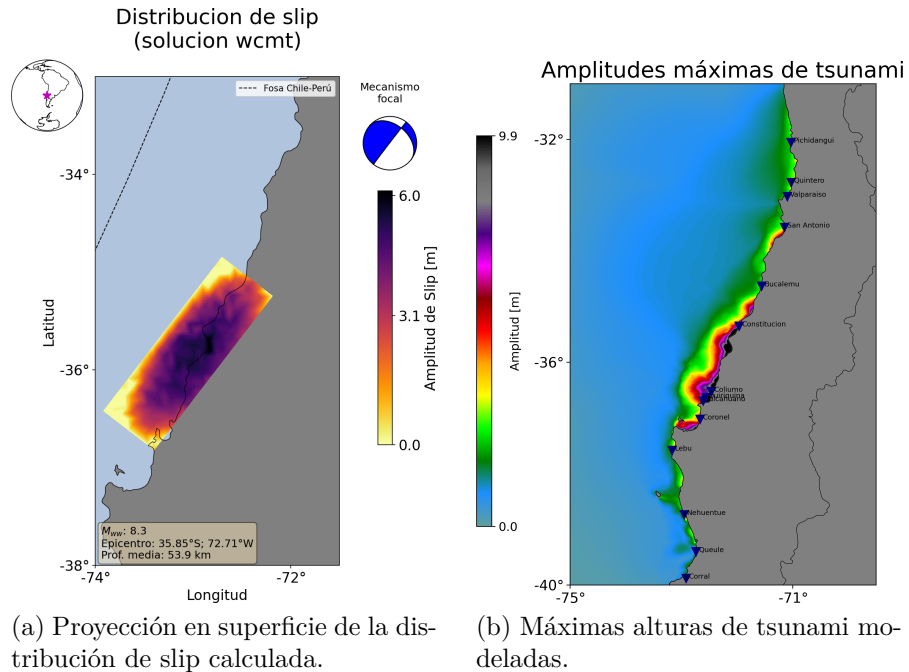
<sup>g</sup> Tiempo de cómputo esperado utilizando el servidor descrito en el capítulo anterior.

Para las versiones 3 y 4 los parámetros fueron determinados de forma tal que se logre obtener una evaluación para todo Chile, con tiempo de simulación suficiente para que el tsunami modelado arribe a todos los puntos de evaluación con más de un periodo. Para estas versiones el tiempo de cómputo no es primordial debido a que el tiempo de reacción es mayor; para la versión 4, se debe a que el origen del tsunami es lejano, mientras que la versión 3 está pensada para ser ejecutada con la solución final de la inversión de la fuente, por lo que ya se ejecutaron evaluaciones con las primeras soluciones.

En el caso de las versiones 1 y 2 se utilizaron los resultados de las pruebas de desempeño (ver figura 4.11), buscando las mejores combinaciones de parámetros que entreguen evaluaciones útiles en tiempos adecuados.

La filosofía de estas dos versiones es que sean rápidas para emitir una evaluación acertada en tiempos adecuados y que puedan ser rápidamente actualizadas. Son las que cumplen en sentido de urgencia del país ante la ocurrencia de un terremoto con potencial tsunamigénico frente a las costas de Chile.

## 5.2.1. Versión 1 (fuente puntual en campo cercano)



Evaluacion de Amenaza de Tsunami ( $M_{ww}$  8.3 en 35.85S; 72.71W)

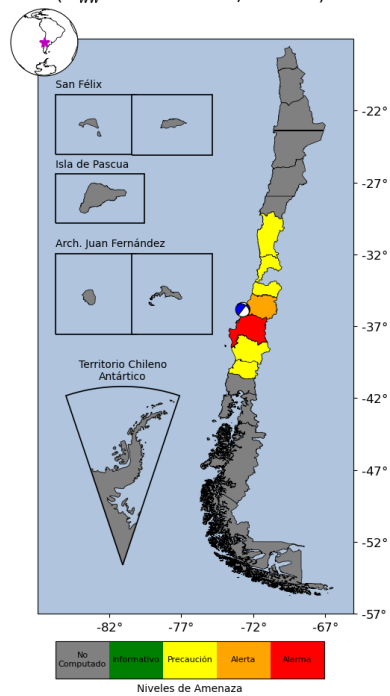


Figura 5.2: Gráficos resultantes de la versión 1 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010).

Para modelos puntuales de la fuente sísmica, las evaluaciones de amenaza de tsunami deben ser rápidas y para un área acotada, debido a que son las primeras disponibles y se

actualizan en poco tiempo pudiendo tener variaciones importantes respecto de soluciones futuras. Estas evaluaciones deben permitir a las autoridades tomar las primeras acciones para las áreas que podrían ser afectadas a los pocos minutos de ocurrido el terremoto.

Los parámetros seleccionados permiten obtener estimaciones de la amenaza en menos de 45 segundos. Si bien es posible obtener las horas de arribo de esta solución, se sugiere esperar a una de fuente finita ya que las primeras acciones para localidades frente a la zona de origen deben tomarse de inmediato, independiente de la hora estimada de llegada del tsunami y el cálculo de estas con las soluciones de fuente puntual induce un error.

Esta versión genera la evaluación rápidamente para los bloques frente a la zona de generación, como se muestra en la figura 5.2.c. Se debe tener en cuenta que la solución de fuente puntual es un modelo diferente a la de fuente finita (ver figura 5.2.a), por lo que una comparación directa de los resultados (i.e. estados de amenaza) no es apropiado. Al momento de ejecutarla, se debe considerar que se está usando la mejor información disponible y se está dando cumplimiento al nivel de urgencia existente.

Para ejecutar esta versión se debe usar el siguiente comando:

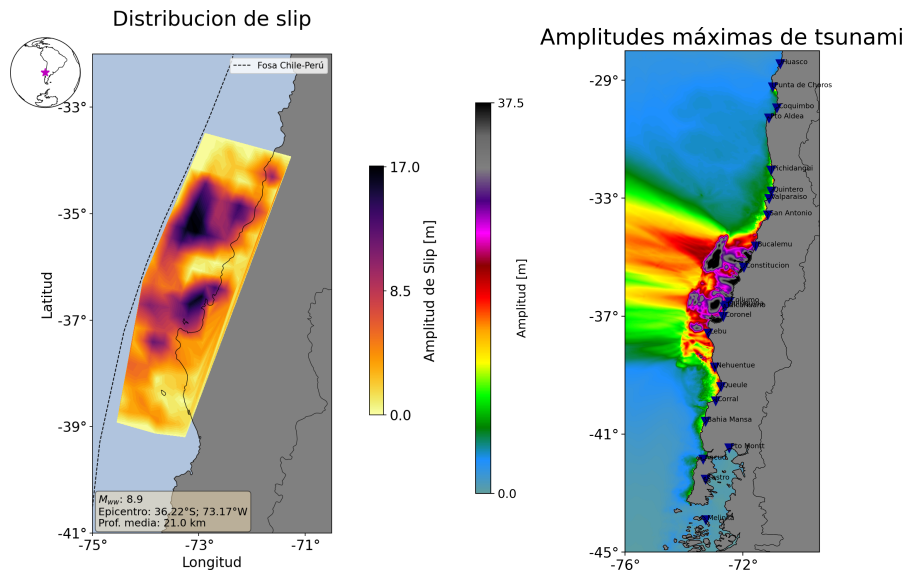
```
bash tsun2022_mt.bash | tee tsun2022_mt.log
```

### 5.2.2. Versión 2 (fuente finita en campo cercano)

Esta es una versión más robusta que la anterior ya que utiliza una fuente finita. Aun así, las primeras soluciones deben computarse de manera rápida para poder actualizar oportunamente estados de amenaza para localidades en cercanías de la zona de generación del tsunami. Incluso, esta podría llegar a ser la primera evaluación si las condiciones lo permiten, reafirmando la necesidad de rapidez.

Los parámetros seleccionados permiten obtener una evaluación en menos de 90 segundos, para un área más extensa que la anterior, logrando cubrir las zonas afectadas durante la primera hora de ocurrido el evento (ver figura 5.3.c). En esta situación se recomienda calcular las horas de arribo, considerando que su cálculo no agrega más de 2 segundos al tiempo total de ejecución

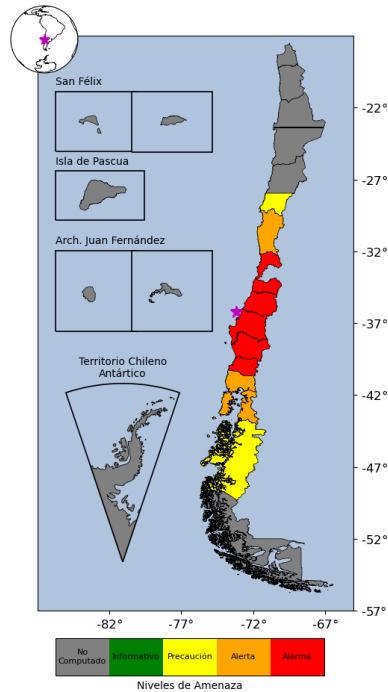
Una variante interesante de esta versión es una simulación para Chile Continental, islas Desventuradas y Archipiélago Juan Fernández, que genera resultados en  $\sim 12.5$  minutos, con resolución de 30 segundos de arco y 12 horas de simulación. Esta alternativa es muy potente ya que utiliza una extensión geográfica que, al no incluir isla de Pascua ni el Territorio Chileno Antártico, permite resultados para todo Chile Continental y algunas islas, por lo que si esto se emplea con la solución final de la fuente sísmica, la siguiente versión podría utilizarse solamente para resolver los estados de amenaza de isla de Pascua y el Territorio Chileno Antártico. Para facilitar el uso de esta variante se creó un archivo ejecutable similar a los anteriores que se denomina `tsun2022_cont.bash` y el resultado que se obtuvo con los parámetros del terremoto del Maule se muestran en la figura 5.4.c.



(a) Proyección en superficie de la distribución de slip calculada.

(b) Máximas alturas de tsunami modeladas.

Evaluación de Amenaza de Tsunami  
( $M_{ww}$  8.9 en 36.22S; 73.17W)

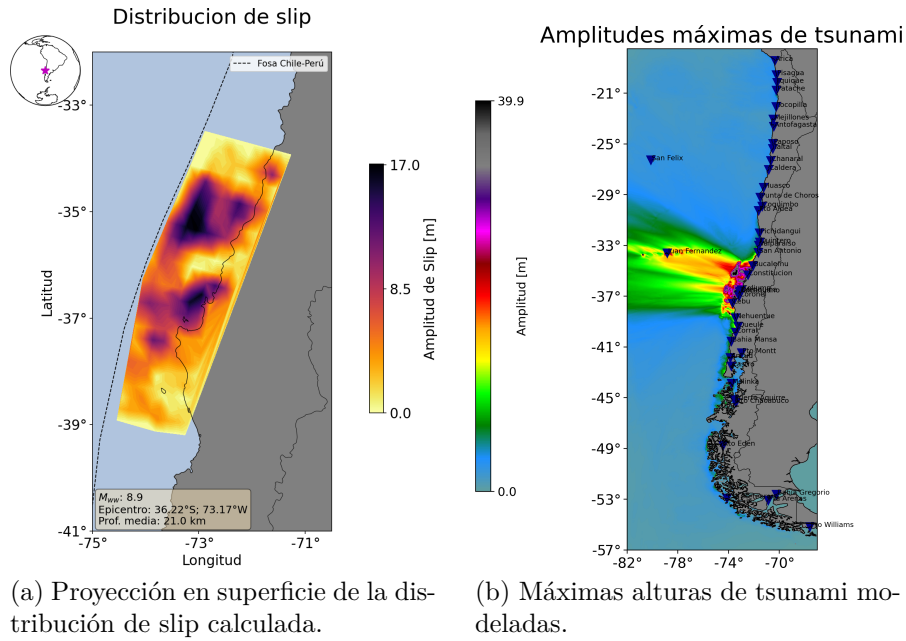


(c) Evaluación de la amenaza de tsunami.

Figura 5.3: Gráficos resultantes de la versión 2 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010).

Para ejecutar estas versiones los comandos respectivos son:

```
bash tsun2022_ffm.bash | tee tsun2022_ffm.log
bash tsun2022_cont.bash | tee tsun2022_cont.log
```



Evaluacion de Amenaza de Tsunami  
( $M_{ww}$  8.9 en 36.22S; 73.17W)

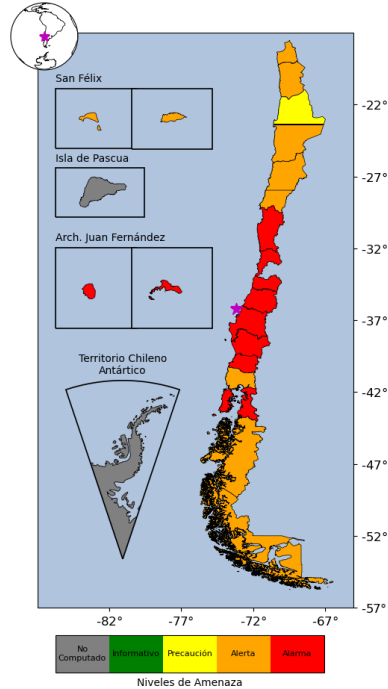


Figura 5.4: Gráficos resultantes de la versión 2 del programa, modificado para Chile Continental, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010).

### 5.2.3. Versión 3 (fuente finita en campo cercano)

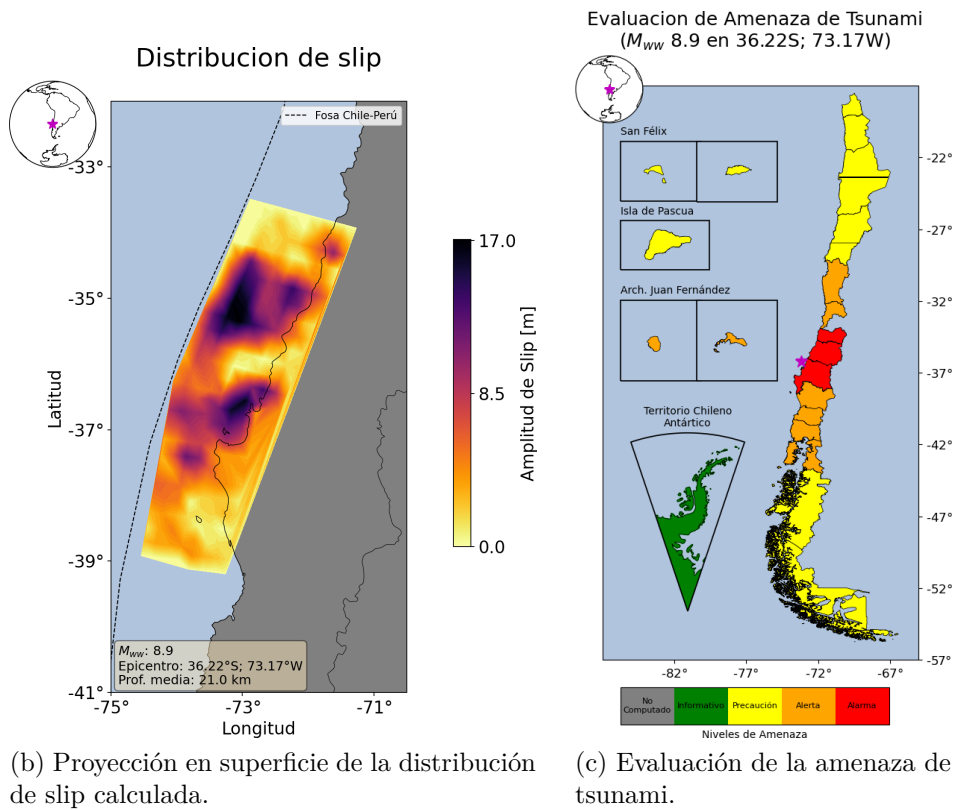
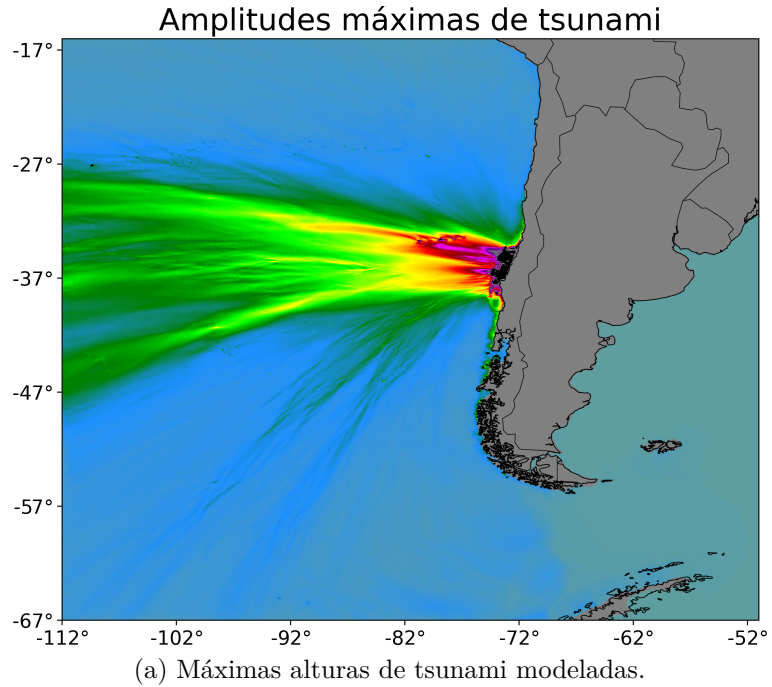


Figura 5.5: Gráficos generados por la versión 3 del programa, para el tsunami generado por el terremoto del Maule (2010).

Esta versión está pensada para que se utilice como evaluación final, lo que no significa que deba ser la última es decir, si se cuenta con una solución estable de la fase-w y la evaluación de



amenaza para el área costera frente a la zona de generación está difundida, se puede utilizar esta versión para obtener la evaluación para todo Chile y posteriormente, con la solución final, volver a ejecutarla. El criterio usado para determinar los parámetros no tiene relación con las pruebas de rendimiento, sino que con lograr una evaluación para todo Chile, incluido el territorio Continental, Insular y Antártico, lo que implica que su dominio de cálculo no depende de la localización del evento, por lo que se evaluó el tiempo de simulación y la resolución de la grilla.

El tiempo de cómputo esperado para esta versión es inferior a 12 minutos. Se sugiere que se haya ejecutado al menos una vez la versión 2 antes de implementar esta, con lo que la evaluación para todo Chile estaría disponible antes de 30 minutos desde el tiempo de origen, con las primeras zonas afectadas por el tsunami ya informadas a partir de la evaluación con la versión anterior.

Al disminuir la resolución, se observa que algunos bloques disminuyen sus niveles de amenaza para el territorio continental (ver figuras 5.5.c y 5.4.c), por lo que si ya se cuenta con una evaluación previa, con mejor resolución y misma solución de la fuente, se debería mantener el estado obtenido a mejor resolución. Es por esto que se sugiere emplear la versión 2 alternativa, en que se modela el tsunami usando una resolución de 30 segundos de arco. Luego, bastaría incorporar en los estados de Isla de Pascua y Territorio Chileno Antártico, además de verificar si algún bloque aumenta su estado en esa nueva simulación producto del aumento del tiempo de simulación.

Los resultados de implementar esta versión para el terremoto del Maule se muestran en los gráficos de la figura 5.5, en la que se observa la disminución de algunos estados de amenaza respecto a la evaluación de la figura 5.4.c.

Para ejecutar esta versión se debe usar el siguiente comando:

```
bash tsun2022_chile.bash | tee tsun2022_chile.log
```

#### **5.2.4. Versión 4 (fuente finita en campo lejano)**

Esta versión corresponde a aquellos eventos en que la zona de generación es lejana (por ejemplo frente a México, Alaska o en la costa Oeste del océano Pacífico) cuando el tiempo de reacción es considerablemente mayor y no existe el nivel de urgencia; no es necesario efectuar modelaciones en pocos minutos y con poca información, pudiendo esperar una solución de la fuente sísmica robusta, que hayan sido calculadas con una buena cantidad de datos (i.e. cantidad de estaciones sismológicas).

Esta versión está pensada para modelar la evaluación de amenaza para Chile utilizando una fuente finita y permite obtener la evaluación en un tiempo inferior a 20 minutos, con las horas de arribo incluidas desde la primera ejecución. En los gráficos de la figura 5.6 se presentan los resultados al utilizar los parámetros del terremoto de Tohoku-Oki, Japón (2011).

Para esta versión el dominio de cálculo es fijo por lo que para determinar los mejores parámetros se probaron diferentes resoluciones y tiempos de simulación. Una resolución más baja permite obtener resultados en menos de 10 minutos sin embargo, se observó una evidente subestimación de los estados de amenaza en el territorio insular por lo que, considerando el tiempo de reacción disponible, se definió como mejor alternativa una resolución con más detalle, que tarda más, pero representa de mejor manera la amenaza de tsunami, logrando los resultados en tiempos más que suficientes para que la autoridades puedan tomar medidas para mitigar los efectos del tsunami.

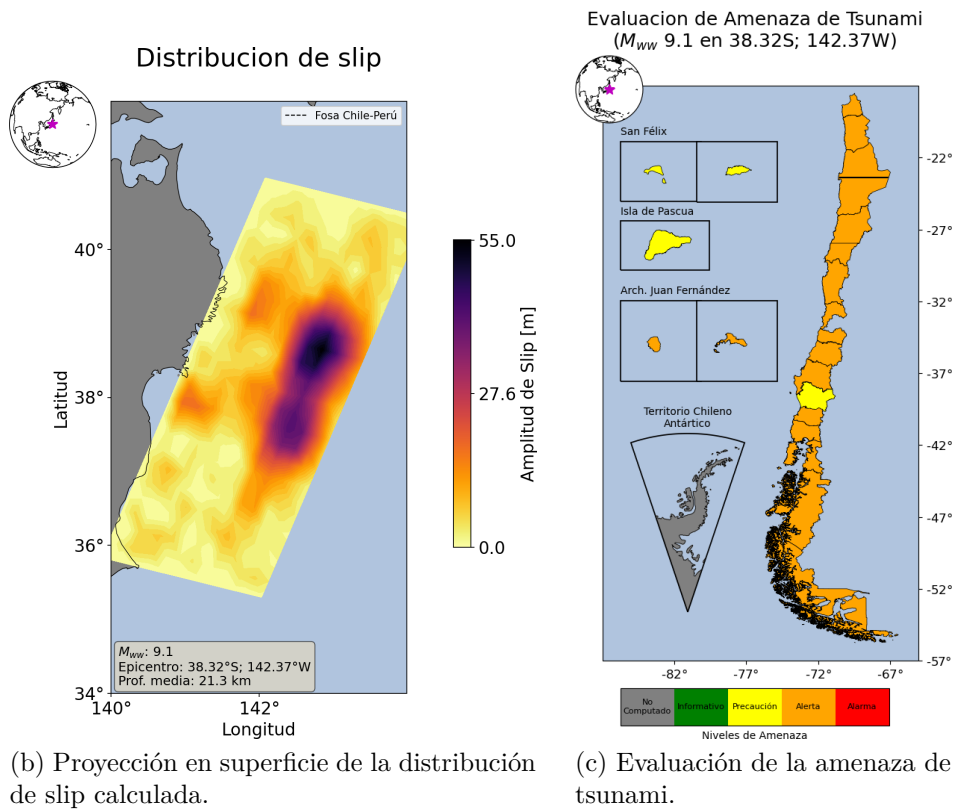
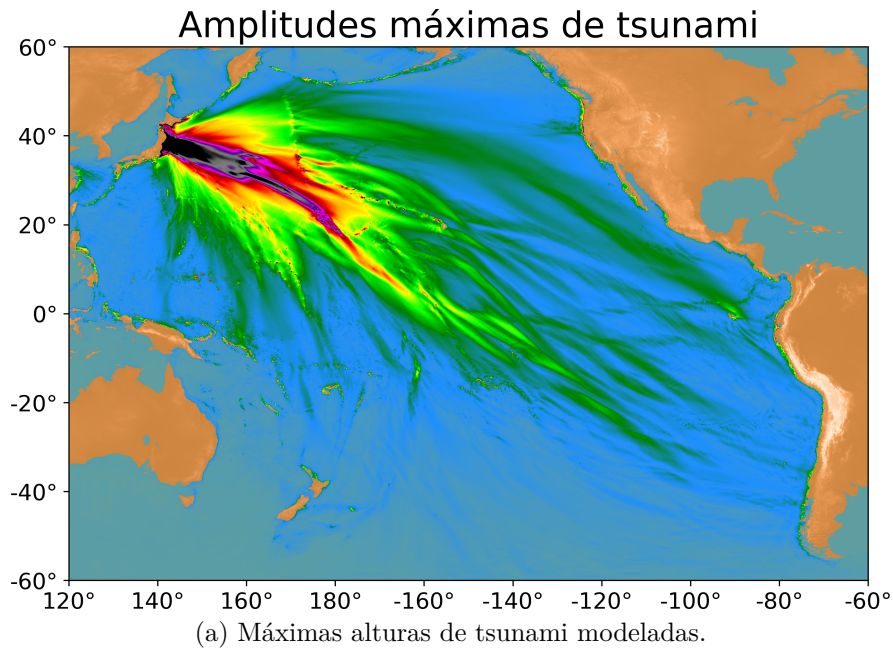


Figura 5.6: Gráficos generados por la versión 4 del programa para el tsunami generado por el terremoto de Tohoku-Oki, Japón (2011).

Para ejecutar esta versión se debe usar el siguiente comando:

```
bash tsun2022_global.bash | tee tsun2022_global.log
```

### 5.2.5. Versión libre

Las versiones descritas están diseñadas para que un centro de alerta pueda efectuar evaluaciones sin necesidad de hacer modificaciones al programa, lo que cobra especial relevancia en las versiones 1 y 2, permitiendo modelaciones más rápidas, con menor probabilidad de errores y asegurando el resultado esperado (i.e. extensión de la evaluación, calidad y tiempo de cómputo).

En algunos casos las versiones descritas pueden no ser lo más eficiente por ejemplo, si un terremoto ocurre en el extremo Norte del país, gran parte del cálculo que se haga hacia el Norte de la fuente no contribuirá a la evaluación de amenaza para Chile por lo que una extensión asimétrica del dominio de cálculo en sentido Norte-Sur sería más eficiente. Del mismo modo, la versión 4 está pensada para terremotos que ocurran en una parte distante del océano Pacífico pero podría ocurrir un terremoto frente a las costas de Centro América y no tendría sentido utilizar todo el océano Pacífico para modelar ese tsunami de campo lejano. Luego, es importante contar con una versión extra del programa en que un usuario pueda ingresar de manera sencilla los parámetros, sin la necesidad de modificar el código.

Los parámetros que se deben entregar al programa son el tiempo de simulación (en segundos), el valor de  $\Delta t$  en segundos, el nombre del archivo de batimetría, la extensión en latitud y longitud (dos valores cada uno separados por una coma, el primero negativo y el segundo positivo, ambos en grados decimal) y finalmente si se desea incluir el cálculo de horas de arribo o no como variable *booleana* (1=Si, 0=No). Se debe tener especial cuidado con el  $\Delta t$  seleccionado, ya que un valor alto inducirá inestabilidades numéricas y uno bajo aumentará el tiempo de cómputo. Se incluyó un código que sugiere valores de  $\Delta t$ , denominado `check_cfl.py`<sup>15</sup> para facilitar esta decisión. Esta versión libre se ha denominado `tsun2022_free.bash`.

Un ejemplo de ejecución de esta versión para simular 6 horas de tsunami, con un  $\Delta t = 1.5$  segundos en una grilla de 60 seg. de arco de resolución con la grilla para Chile (la otra alternativa es la grilla global), con ampliación del dominio de cálculo de  $\pm 0.5^\circ$  de longitud hacia ambas direcciones,  $6.0^\circ$  y  $0.5^\circ$  de latitud hacia el Sur y el Norte respectivamente y que no calcule horas de arribo, requiere el siguiente comando:

```
bash tsun2022_free.bash 21600 1.5 60 CHILE -0.5,0.5 -6.0,0.5 0 | tee tsun2022_free.log
```

Esta versión debe ser utilizada con un archivo de fuente finita y según la combinación de parámetros que se entreguen los tiempos de cómputo variarán considerablemente.

## 5.3. Horas de arribo

El cálculo de horas de arribo agrega menos de 2 segundos al tiempo total de cálculo y puede ser incorporando en cualquier versión. Su precisión dependerá de la resolución de la grilla y la solución de la fuente sísmica. Para la zona de fiordos y canales en el sur de Chile, existe una mayor incertidumbre.

Si se efectúa más de un cálculo de horas de arribo se deberá privilegiar primero el que se haya efectuado con mejor resolución espacial y entre fuente puntual y finita, ésta última.

La hora se calcula para todas las localidades con Estaciones de Nivel del Mar y corresponde al instante en que la estación registra por primera vez (en el modelo) una altura igual o

---

<sup>15</sup> El código `check_cfl.py` se debe ejecutar desde la terminal de comandos y luego seguir las instrucciones.

superior a 0.03 [m], por lo que en esta implementación es posible que hayan localidades que estén con estado de amenaza Informativo y que si se indique una hora de arribo. Luego, aquellas estaciones que no registren alturas superiores a 3 [cm] y que se encuentren al interior del dominio de cálculo, no aparecerán en el listado. A modo de refuerzo de esta última idea, en la terminal de Linux donde se ejecute el programa se imprime en pantalla un texto que indica que para una determinada estación no se registró un arribo superior al umbral definido (i.e. salida estándar, ver figura 5.7).

```
(py38) [matias@owl tsun2022_2]$ bash tsun2022_free.bash 3000 1 30 CHILE -0.5,0.5 -8.0,0.5 1 | tee tsun2022_free.log
cdo sellonlatbox: Processed 51609600 values from 1 variable over 1 timestep [0.14s 220MB].
*****
data: [ './outfile.nc: Title: The GEBCO_2022 Grid - a continuous terrain model for oceans and land at 15 arc-', './outfile.nc: Command: Fri Jan 06 09:38:32 2023: cdo sellonlatbox, -73.5,-67.5,-30.0,-16.5 ../permadata/bathy/CHILE30.nc ../outfile.nc', 'Thu Sep 29 09:37:50 2022: ncks -d lon,,2 -d lat,,2 CHILE15.nc CHILE30.nc', 'Thu Sep 29 09:37:36 2022: cdo sellonlatbox,-15,-51,-68,-12 GLOBAL15.nc CHILE15.nc', 'grdmath GLOBAL15.nc -1 MUL = GLOBAL15.nc', './outfile.nc: Remark: ', './outfile.nc: Gridline node registration used', './outfile.nc: Grid file format: nf (# 18) GMT netCDF format (float) (COARDS-compliant) [DEFAULT] ', './outfile.nc: x_min: -73.4979166667 x_max: -67.50625 x_inc: 0.008333333333333 name: longitude [degrees east] n x: 720', './outfile.nc: y_min: -29.9979166667 y_max: -16.50625 y_inc: 0.008333333333333 name: latitude [degrees north] ny: 16 20', './outfile.nc: z_min: -8627 z_max: 10923 name: Elevation relative to sea level [m]', './outfile.nc: scale_factor: 1 ad d_offset: 0']
*****
Comenzando a modelar el tsunami
Iniciando lectura de parametros
Parametros leidos correctamente
Funcion intt_ffm_params
ffms params inicializados correctamente
Creando variables en memoria
x,y,hx,hy,hx,y,uz listos
cdl, hdl, CA,A,D,Bxp,Bxm,Byp,Bym,eta0,eta1,eta,zmax,byu,byd,bxr,bxl,ab,bs,bc,nu_u,nu_d,nu_r,nu_l creados en memoria
Inicia Okada
Okada listo
Inicia damping layer
Lanza los threads de damping layer
damping layer inicializada correctamente
Inicia solver spherical
solver spherical completado
Escribir zmax en disco
zmax escrito en disco correctamente
Limpiando...
Terminado
Boletin con evaluacion de amenaza de tsunami creado
Mapas de evaluacion creados
Tiempo de ejecucion: 30 segundos
calculando horas de arribo
No se registra arribo superior a 0.03 [m] para estacion "cald"
No se registra arribo superior a 0.03 [m] para estacion "chnr"
No se registra arribo superior a 0.03 [m] para estacion "coqu"
No se registra arribo superior a 0.03 [m] para estacion "huas"
No se registra arribo superior a 0.03 [m] para estacion "chor"
Boletin con horas de arribo creado
Copiando resultados en la carpeta eventos con el nombre: 202301060839
Proceso finalizado :D
```

Figura 5.7: *Standard Output* del programa. En la parte final se indican aquellas estaciones que no tuvieron registros de tsunamis superior a 3 [cm] y por lo tanto no serán incluidas en el listado de horas de arribo.

## 5.4. Comparación con la metodología vigente en Chile

Considerando todo lo expuesto y usando como base las características descritas para el actual sistema en operación en Chile, a continuación se exponen algunas de la metodología propuesta.

- **Tiempo de respuesta:** Se pueden obtener tiempos de respuesta inferiores a 90 segundos para la zona que será afectada en primera instancia y para el resto del país en algunos minutos. Estos tiempos son suficientes para que las autoridades en Chile puedan tomar las acciones necesarias de manera oportuna, satisfaciendo la necesidad de urgencia propia del país.
- **Modelación de la fuente:** Se utiliza la solución de la inversión de la fase-W. En primera instancia las soluciones corresponden a fuentes puntuales, extendidas mediante leyes de escala para generar fuentes finitas con una forma y distribución de slip predeterminada (similar a lo que usa actualmente SIPAT). Luego, a los pocos minutos se cuenta con soluciones que representan el evento real en desarrollo como una fuente finita, con todas las heterogeneidades descritas.

- **Amenaza sectorizada:** Dado que esta característica es independiente de la estrategia de modelación y que se ajusta muy bien a la realidad Chilena, se implementó en el programa utilizando la misma división geográfica del país que utiliza la metodología actual; 21 bloques que se asemejan mucho a la división político-administrativa del país.
- **Simpleza en la operación:** Si bien la operación del programa puede no ser tan simple ya que requiere de conocimientos de Bash, Python y C, además del proceso que se está modelando y su estrategia, la implementación de las versiones predefinidas permite que sea muy simple, requiriendo sólo del comando que ejecuta la versión idónea. La versión libre es más compleja pero dado que solamente requiere de pocos parámetros relativamente sencillos, tampoco se visualiza como un programa complicado de operar. Si se quiere obtener el mejor rendimiento si será necesario entender y conocer en detalle el programa.
- **Costo computacional:** Se requiere un servidor con al menos las características detalladas en el capítulo anterior o similar. De lo contrario los tiempos de ejecución podrían no ser suficientes para obtener las evaluaciones a tiempo para la toma de decisiones, por lo que el costo computacional es altísimo.
- **Uso de fuentes generadoras de tsunami:** Esta estrategia admite toda fuente sísmica con solución de inversión través de fase-w. No hay limitación de ubicación, tipo de terremoto, etc. Esta metodología no se hace cargo de orígenes diferentes a terremotos (por el momento).
- **Estimación de horas de arribo:** El cálculo de horas de arribo demostró ser suficientemente rápido y preciso. Dado que se usa una grilla con mejor resolución que en otros programas, la estimación tiene una muy buena precisión. Además, considera la distribución espacial de la fuente, lo que cobra especial relevancia en terremotos cercanos a Chile.
- **Geometría de la falla:** Es obtenida mediante la inversión y por lo tanto la precisión de sus parámetros dependerá del tiempo desde el origen (i.e. cantidad de estaciones sísmológicas que registren el paso de ondas sísmicas). Las primeras soluciones, que generan las primeras evaluaciones, probablemente no tengan bien constreñidos los parámetros aunque a los pocos minutos ya se cuenta con información suficiente como para que la estimación del tsunami sea robusta.
- **Versatilidad:** Debido a la forma en que se implementó, se pueden usar versiones predefinidas que no requieren modificación o una versión libre en que el operador puede ajustar los parámetros del modelo para obtener resultados óptimos.

# Capítulo 6

## Discusión, conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Discusión y Conclusiones

Chile está permanentemente expuesto a las amenazas de tsunami, ya sean generados por terremotos frente a sus costas, en alguna otra parte del océano Pacífico o por otras causas como erupciones volcánicas y deslizamientos de masas, lo que obliga al país a contar con un Sistema de Alerta Temprana robusto, eficaz y confiable para enfrentar estas situaciones, siendo vital considerar la realidad nacional (contexto sismotectónico, geografía, historia, distribución demográfica, capacidades científicas, tecnológicas y económicas entre varios otros).

La figura 2.3 muestra niveles de urgencia para reaccionar ante terremotos que generen tsunamis, de manera directa en márgenes convergentes; para las otras fuentes generadoras se requieren análisis de otras naturalezas que escapen al alcance de este trabajo, las que definitivamente deben ser abordadas.

Si se relacionan las figuras 2.2 y 2.3, se puede dimensionar la situación en la que se encuentra Chile; un país con larga historia de tsunamis, principalmente generados por terremotos, donde además la zona de generación está muy cerca de costa dejando tiempos de reacción muy bajos lo que, entre otros motivos, se traduce en una zona del planeta donde estos eventos han causado muchas muertes, debiendo asignar un nivel de urgencia y prioridad muy alta para gestionar el riesgo, lo que necesariamente implica que debemos entender estos fenómenos.

Chile tiene, en general, menor tiempo de reacción que países como Japón en que se han registrado grandes tsunamis como el de 2011, haciéndonos un país con condiciones únicas, en que el tiempo de reacción de la autoridades para gestionar la amenaza es de algunos minutos, por lo que requiere soluciones particulares que se adecúen a esa realidad; difícilmente se puede replicar exitosamente una estrategia importada desde otro país de manera directa.

A nivel internacional existe una serie de recomendaciones y sugerencias para abordar las amenazas de tsunami. En ellas se identifican diversas estrategias y criterios que permiten guiar y estandarizar la operación de los Centros de Alerta de Tsunami, sin perder de vista que considerar la realidad nacional de cada país es fundamental.

En Chile, desde el punto de vista de la gestión del riesgo de tsunami, se utiliza una división geográfica muy similar a la político-administrativa, usando bloques cuya extensión está basada en las regiones del país, facilitando el proceso. Para definir el nivel de amenaza se utiliza un código de estados y colores asociados, siguiendo las recomendaciones internacionales.

La estrategia de evaluación actual en Chile, consiste en una base de datos de escenarios

pre-modelados, cuya respuesta es muy rápida pero asume una serie de hipótesis de la fuente sísmica, generando sesgos y fuentes de incertidumbre mitigados parcialmente, perseverando las diferencias naturales entre un escenario sintético creado a priori con homogeneidades y los parámetros heterogéneos de la fuente sísmica real; una base de datos de simulaciones pre-computados, inevitablemente posee una cantidad finita de escenarios con una distribución geográfica y variabilidad limitada en los parámetros de la fuente, dejando fuera de su alcance una serie de eventos posibles y riesgosos para la población, por lo que se requiere una estrategia complementaria.

El trabajo desarrollado por Fuentes et al. (2019) presenta una alternativa viable para ser implementada en un sistema de alerta temprana; una aproximación de diferencias finitas para modelar la generación y propagación de un tsunami a partir de los términos de primer orden de las ecuaciones de aguas poco profundas, resulta en un *solver* numérico que se puede implementar en un lenguaje computacional para obtener de manera muy rápida diferentes parámetros asociados al tsunami generado por una fuente sísmica. Algunos de los resultados que se pueden obtener directamente son las máximas amplitudes, series de tiempo y horas de arribo.

La solución de la inversión de la fuente sísmica mediante la Fase-W está implementada en el Centro Sismológico Nacional siguiendo lo descrito por Riquelme et al. (2018); a partir de los 5 minutos del tiempo de origen del terremoto se comienzan a calcular las soluciones, siendo las primeras de fuente puntual para luego pasar a fuentes finitas. Ambos casos pueden ser implementados en el modelo de Fuentes et al. (2019).

El modelo se adaptó usando más de 600 puntos en la costa de Chile en los que se analiza la altura máxima de tsunami modelada. Para identificar el nivel de amenaza se mantuvo la división en bloques y criterios vigentes, traduciendo el resultado en una evaluación de amenaza de tsunami para Chile de manera gráfica y escrita, con formatos conocidos, facilitando su implementación.

Para validar el modelo se compararon registros de tsunami en estaciones de nivel del mar con series de tiempo obtenidas con el modelo, logrando una gran similitud tanto en fase como amplitud. El cálculo de horas de arribo para escalas nacionales resultó ser de gran precisión y se implementó de tal forma que puede ser obtenido a partir de cualquier modelación. Para la zona de fiordos y canales las horas de arribo presentan ciertas dificultades relacionadas, entre otros, con la resolución espacial.

Dadas las características del país y la filosofía del modelo, el tiempo de ejecución, factor fundamental en la gestión del riesgo de tsunami en Chile, puede variar considerablemente en función del tiempo de simulación, la extensión del dominio de cálculo y la resolución espacial.

Contar con versiones con parámetros predefinidos que cumplen ciertas expectativas disminuye la probabilidad de errores y facilita el proceso de evaluación. Si se quiere un proceso más eficiente, se debe emplear la versión libre que da flexibilidad y autonomía al proceso.

Se observó en algunos casos una disminución del nivel de amenaza únicamente producto de una disminución de la resolución espacial, lo que se debe a la pérdida de detalle de la morfología del fondo marino y costa (i.e. profundidades), factores que afectan directamente la altura del tsunami. Este fenómeno no debería sorprender, ni tampoco mermar la calidad ni confiabilidad de la estrategia sino que más bien abre una serie de preguntas como por ejemplo ¿qué pasaría si se utilizara una grilla con nivel de detalle mucho mayor? ¿aumentaría el nivel de amenaza de algunos bloques respecto a la resolución propuesta? ¿es suficiente que solamente un punto sobrepase un umbral para que el bloque completo quede catalogado con el nivel de amenaza de ese rango? y ¿es necesario contar con un estado de Alerta y Alarma,

siendo que ambos implican la misma acción en la gestión del riesgo?.

Lo anterior confirma la necesidad de contar con más de una estrategia de evaluación, no solo para darle redundancia al sistema sino que también robustez; tener la posibilidad de comparar resultados a partir de metodologías completamente independientes es sumamente valioso.

El programa puede funcionar con una fuente puntual, que para terremotos grandes no es una buena representación de la fuente sin embargo, se estará usando la mejor información disponible en ese instante, sabiendo que posteriormente se tendrán soluciones más robustas que representan mejor el fenómeno, las que permitirán actualizar los niveles de amenaza.

Durante las pruebas se observó que en algunos casos, al simular grandes tiempos de propagación, luego de más de 10 horas de registro en un punto en la costa, las alturas de tsunami comenzaban a oscilar aumentando su amplitud, lo que no obedece a la física del fenómeno sino que a un artefacto numérico, por lo que se incorporó un parámetro de atenuación para mitigar ese efecto y forzar las series a converger a cero en el largo plazo.

En las zonas de fiordos y canales se observaron algunas anomalías al modelar el tsunami; para ciertas resoluciones espaciales, existen pasos de agua que quedan cerrados, lo que se puede traducir en diversos artefactos. Lo más evidente es el cálculo de horas de arribo ya que el tsunami tendrá que seguir un camino más largo que el real para llegar a un determinado punto. También existe la posibilidad de que, en caso que un plano de falla deforme verticalmente un cuerpo de agua que quede cerrado por efectos de la resolución espacial, el tsunami quedaría “atrapado” aumentando su amplitud de manera irreal.

Artefactos como los descritos pueden estar presentes y es necesario tenerlos en cuenta para calibrar los parámetros del modelo. La interpretación de los resultados debe tener una lógica de acuerdo a la física del problema.

La metodología propuesta evalúa amenazas de tsunami generados directamente por terremotos tsunamigénicos, cumpliendo con las recomendaciones de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, sin limitaciones de la fuente sísmica, usando todas las heterogeneidades que se puedan obtener de la solución de la inversión, con resultados confiables y en tiempos que cumplen las necesidades y urgencias del país lo que, de ser implementado, contribuirá al Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis en Chile, haciéndolo más robusto y preciso, aportando a la gestión del riesgo de manera contundente, cuyo fin último es salvar vidas.

De ser implementado, Chile pasaría de contar con una estrategia con base en escenarios precomputados de terremotos de subducción principalmente, a una de modelación de tsunamis en tiempo cuasi-real que puede evaluar cualquier terremoto, sea este de subducción, tsunami earthquakes, outer-rise, strike-slip, etc.

## 6.2. Recomendaciones

La propuesta evalúa amenazas de tsunamis generados por sismos de manera directa, por lo que se hace necesario incorporar en Chile metodologías que permitan evaluar amenazas de tsunamis generados por deslizamientos submarinos, subaéreos, volcanes y todas las fuentes diferentes a los terremotos. Esto es algo que se mantiene pendiente y no debe quedar fuera de las discusiones.

La metodología del programa requiere un plano de falla de terremoto con formato específico sin embargo, su gran ventaja es la rapidez en la modelación de la propagación del tsunami por lo que, a futuro se podría implementar otro tipo de perturbación de la columna de agua



que represente la deformación inicial para simular de la misma forma la propagación y por lo tanto la evaluación; los resultados serían igualmente consistentes siempre que la propagación del tsunami pueda ser explicada con las ecuaciones de aguas poco profundas.

En la evaluación, una alternativa era utilizar todos los puntos en costa usando como base la información de aquellas celdas donde se aplica la condición de borde y no solo una cantidad acotada de estos, pero sería mucho más costoso computacionalmente; por un lado habría muchos puntos que no tendrían una utilidad real (por ejemplo en los fiordos donde la línea de costa posee una extensión de miles de kilómetros para áreas relativamente pequeñas), además de tener que evaluar dónde se encuentra cada punto para asociarlo a los bloques mientras que, dada la invariabilidad de la costa a pequeñas escalas temporales, es más adecuado tener un listado de puntos útiles y asociados a los bloques de manera previa y permanente.

Es conveniente revisar si los criterios de los estados de amenaza actuales se ajustan de la mejor forma posible a la realidad nacional en términos de la gestión del riesgo. ¿Mejora la gestión contar con un estado de Alerta y otro de Alarma? ¿sería útil considerar la temporalidad en los estados, como el caso que se presentó en la figura 2.12?

La propuesta no vincula los resultados para una secuencia de ejecuciones durante el desarrollo de un mismo evento. En una versión futura, una mejora considerable sería la vinculación de los resultados usando criterios como la de mantener el nivel más alarmista para un bloque entre las diferentes ejecuciones, lo que podría solucionar algunos de los problemas planteado en los párrafos anteriores.

Se recomienda que esta propuesta sea presentada al SHOA para que se evalúe su implementación en el Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis en Chile, lo que debiese considerar la revisión del protocolo para efectuar las modificaciones necesarias.

Ningún sistema es perfecto y existen muchas formas de abordar estas situaciones por lo que la robustez y redundancia siempre deben estar presentes en los sistemas de alerta.

Hay mucho que aprender y comprender. Es necesario continuar con estudios e investigaciones relacionadas con estas temáticas que finalmente tienden a una mejor gestión del riesgo y por lo tanto a salvar vidas.

# Bibliografía

- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Yagi, Y., . . . Rojas, C. (2015). The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2), 333–348. doi: 10.1007/s00024-015-1225-4
- Barrientos, S., y Ward, S. (1990). The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation. *Geophysical Journal International*, 103(3), 589–598. doi: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb05673.x
- Bernard, E. (2022). *The Tsunami Story*. [http://www.tsunami.noaa.gov/tsunami\\_story.html](http://www.tsunami.noaa.gov/tsunami_story.html). (visitada: 18.04.2022)
- Bravo, F., Peyrat, S., Delgado, F., Fuentes, M., Derode, B., Perez, A., y Campos, J. (2023, 3). Fully joint inversion of the 2016 mw7.6 chiloé earthquake. *Geophysical Journal International*, 232, 2001-2016. doi: 10.1093/gji/ggac411
- Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A., y Garreaud, R. (2022). Worldwide Signature of the 2022 Tonga Volcanic Tsunami. *Geophysical Research Letters*, 49(6). doi: 10.1029/2022gl098153
- Catalán, P., Aránguiz, R., González, G., Tomita, T., Cienfuegos, R., González, J., . . . Gubler, A. (2015). The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2918–2925. doi: 10.1002/2015GL063333
- Catalan, P., Gubler, A., Cañas, J., Zuñiga, C., Zelaya, C., Pizarro, L., . . . Cienfuegos, R. (2020). Design and operational implementation of the integrated tsunami forecast and warning system in Chile (SIPAT). *Coastal Engineering Journal*, 62(3), 373–388. doi: 10.1080/21664250.2020.1727402
- Centro Sismológico Nacional (CSN). (2022). *Grandes terremotos en Chile, Centro Sismológico Nacional*. <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/>. (visitada: 19.04.2022)
- Contreras, M., y Winckler, P. (2013). Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y Proyectos*, 6–19. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132013000200001>
- Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). (2022). *Sea level station monitoring facility*. (Accedida a través de <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org> en 30-03-2022 en VLIZ) doi: 10.14284/482
- Fritz, H., Petroff, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., . . . Synolakis, C. (2011, 11). Field survey of the 27 february 2010 chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 1989-2010. doi: 10.1007/S00024-011-0283-5

- Fuentes, M. (2013). *Estudio teorico del runup de tsunami en una batimetría simple con aplicación a la subducción chilena*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Depositada en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113116>.
- Fuentes, M., Arriola, S., Riquelme, S., y Delouis, B. (2019). Speeding up tsunami forecasting to boost tsunami warning in Chile. , 1297–1304.
- Fuentes, M., Riquelme, S., Ruiz, J., y Campos, J. (2018). Implications on 1+1 D tsunami runup modeling due to time features of the earthquake source. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1393–1404. doi: 10.1007/s00024-018-1804-2
- GEBCO Compilation Group. (2022). *GEBCO 2022 Grid*. doi: 10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c
- Geersen, J. (2019). Sediment-starved trenches and rough subducting plates are conducive to tsunami earthquakes. *Tectonophysics*, 762(November 2018), 28–44. doi: 10.1016/j.tecto.2019.04.024
- Google Earth Pro. (2022). *Islas Robinson Crusoe y Santa Clara, Archipiélago Juan Fernández, Chile. Imagen Landsat/Copernicus*. (V 7.3.6.9285 (64-bit))
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Glosario IPCC Cambio climático 2014 - Impactos, adaptación y vulnerabilidad. *Cambio climático 2014 - Impactos, adaptación y vulnerabilidad*, 179–200.
- Intergubernamental Oceanographic Comission. (2017). *Manuals and Guides 76. Plans and Procedures for Tsunami Warningg and Emergency Mangment*.
- Intergubernamental Oceanographic Comission. (2019). *Glosario De Tsunamis de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental* (Vol. 85).
- International Tsunami Information Center. (2022). *International Tsunami Information Center, About Tsunamis*. [http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=1004&Itemid=1004](http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=1004&Itemid=1004). (visitada : 14.04.2022)
- Kajiura, K. (1981). *Tsunami Energy in Relation To Parameters of the Earthquake Fault Model*. (Vol. 56).
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20). doi: {<https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>}
- Kanamori, H. (2014). Falling in love with waves. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 1-6. doi: 10.1146/annurev-earth-121713-012705
- Kawamura, K., Laberg, J. S., y Kanamatsu, T. (2014, 3). *Potential tsunamigenic submarine landslides in active margins* (Vol. 356). Elsevier. doi: 10.1016/j.margeo.2014.03.007
- Lastras, G., Amblas, D., Calafat, A. M., Canals, M., Frigola, J., Hermanns, R. L., ... Rayo, X. (2013, 8). Landslides cause tsunami waves: Insights from aysén fjord, chile. *Eos*, 94, 297-298. doi: 10.1002/2013EO340002
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 75, 368–378.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*(10), 221–258.

- Naranjo, J., Arenas, M., Clavero, J., y Muñoz, O. (2009). Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aisén (45°25'S), Chile. *Andean Geology*, 36, 137-145. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-71062009000100011>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022). *What is a tsunami?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/tsunami.html>. (visitada: 14.04.2022)
- National Oceanic and Atmospheric Administration/World Data Service, International Tsunami Information Center. (2018). *Tsunami Sources 1610 B.C. to A.D. 2017, from Earthquakes, Volcanic Eruptions, Landslides, and Other Causes*. [http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_contentview=articleid=1672Itemid=1075](http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_contentview=articleid=1672Itemid=1075). (visitada : 19.04.2022)
- National Weather Service. (1999). *Tsunami generation: Landslides*. <https://www.weather.gov/jetstream>. (visitada: 28.12.2022)
- Okada, Y. (1985). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin - Seismological Society of America*, 82(2), 1018–1040.
- ONEMI, SHOA y FCFM. (2019). *Protocolo Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y Centro Sismológico Nacional de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para Eventos de Sismo y Tsunami en las Costas de Chile*. Santiago, Chile.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2022). *Global Tsunami Early Warning and Mitigation Programme*. <https://ioc.unesco.org/our-work/global-tsunami-early-warning-and-mitigation-programme>. (visitada: 12.04.2022)
- Range, M. M., Arbic, B. K., Johnson, B. C., Moore, T. C., Titov, V., Adcroft, A. J., ... Wang, H. (2022, 10). The chicxulub impact produced a powerful global tsunami. *AGU Advances*, 3. doi: 10.1029/2021AV000627
- Riquelme, S. (2013). *Desarrollo de un sistema de alerta temprana basado en la fase-W y modelamiento de tsunamis*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Gofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Depositada en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113921>.
- Riquelme, S., Bravo, F., Barrientos, S., Medina, M., Campos, J., y Cisternas, A. (2018). W -phase real-time implementation and network expansion from 2012 to 2017: The experience in Chile. *Seismological Research Letters*, 89(6), 2237–2248. doi: 10.1785/0220180146
- Ruiz, S., y Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37–56. doi: 10.1016/j.tecto.2018.01.015
- Sallarès, V., y Ranero, C. R. (2019). Upper-plate rigidity determines depth-varying rupture behaviour of megathrust earthquakes. *Nature*, 576(7785), 96–101. doi: 10.1038/s41586-019-1784-0
- Sallarès, V., Prada, M., Riquelme, S., Meléndez, A., Calahorrano, A., Grevemeyer, I., y Ranero, C. R. (2021). Large slip, long duration, and moderate shaking of the nicaragua 1992 tsunami earthquake caused by low near-trench rock rigidity. *Sci. Adv*, 7.
- Satake, K. (2007). *Tsunamis* (Vol. 4.17). Elsevier B.V. doi: 10.1016/B978-044452748-6.00078

- Satake, K., y Tanioka, Y. (1999). Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones. *Seismogenic and Tsunamigenic Processes in Shallow Subduction Zones*, 154, 467–483. doi: 10.1007/978-3-0348-8679-6\_5
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. (2015). *Informe Preliminar Evento de Illapel, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile*.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. (2019). *Registro de los principales tsunamis que han afectado a la costa de Chile*. [http://www.shoa.cl/s3/servicios/tsunami/data/tsunamis\\_historico.pdf](http://www.shoa.cl/s3/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf). Valparaíso. (visitada : 04.03.2022)
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. (2021). *Instrucciones generales sobre el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada*. <https://shoabucket.s3.amazonaws.com/shoa.cl/documentos/publicaciones/3014.pdf>. (visitada: 19.03.2022)
- Stein, S., y Michael, W. (2003). *An introduction to seismology earthquakes, and Earth structure*. Blackwell Publishing.
- Subsecretaría de Marina. (1966). *Decreto Supremo N°26 - Designa al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada como Representante Oficial de Chile ante el Sistema Internacional de Alarma de Tsunami del Pacífico y crea un Sistema Nacional de Alarma de Maremotos* (Vol. 26).
- Ward, S. N., y Asphaug, E. (2000, 5). Asteroid impact tsunamis: A probabilistic hazard assessment. *Icarus*, 145, 64-78. doi: 10.1006/ICAR.1999.6336
- Wessel, P. (2009). Analysis of observed and predicted tsunami travel times for the Pacific and Indian Oceans. *Pure and Applied Geophysics*, 166(1-2), 301–324. doi: 10.1007/s00024-008-0437-2
- Xu, W. (2017). Finite-fault slip model of the 2016 m w 7.5 chiloé earthquake, southern chile, estimated from sentinel-1 data. *Geophysical Research Letters*, 44, 4774-4780. doi: 10.1002/2017GL073560
- Yamada, Y., Kawamura, K., Ikehara, K., Ogawa, Y., Urgeles, R., Mosher, D., . . . Strasser, M. (2012). *Submarine mass movements and their consequences*. Springer. doi: 10.1007/978-94-007-2162-3

# Anexo A

## Ejemplos de generación, propagación, alturas máximas y series de tiempo del tsunami modeladas

### A.1. Deformación del fondo marino

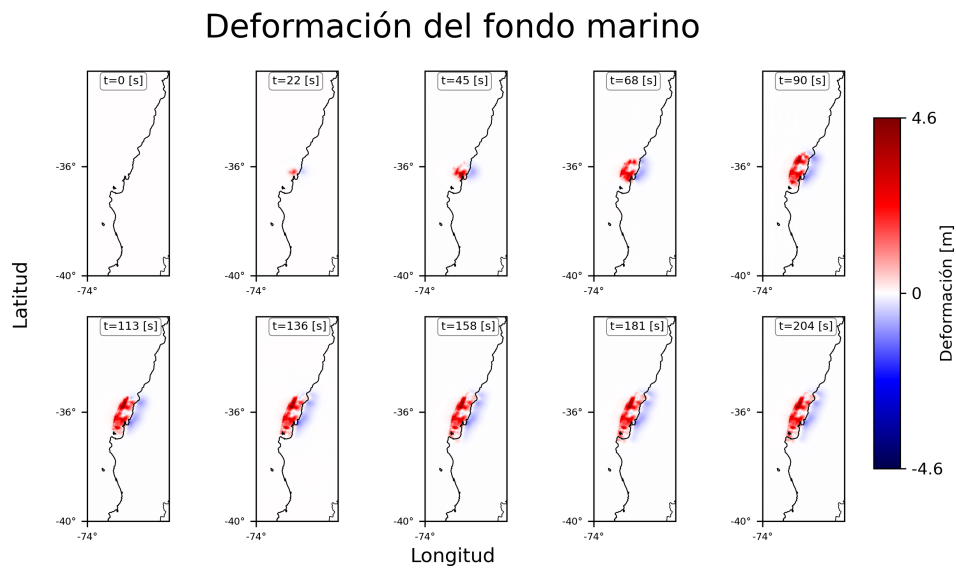


Figura A.1: Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto del Maule (2010). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia.

### Deformación del fondo marino

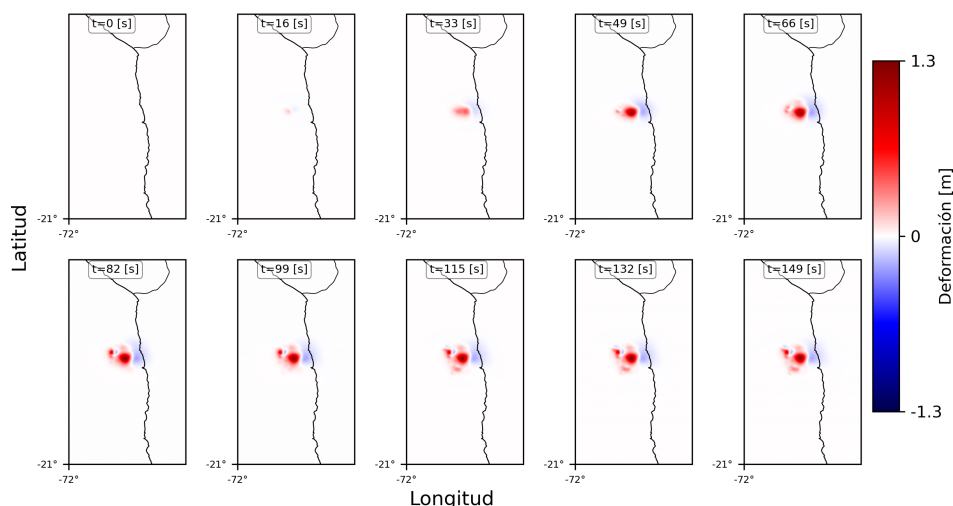


Figura A.2: Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Pisagua (2014). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia.

### Deformación del fondo marino

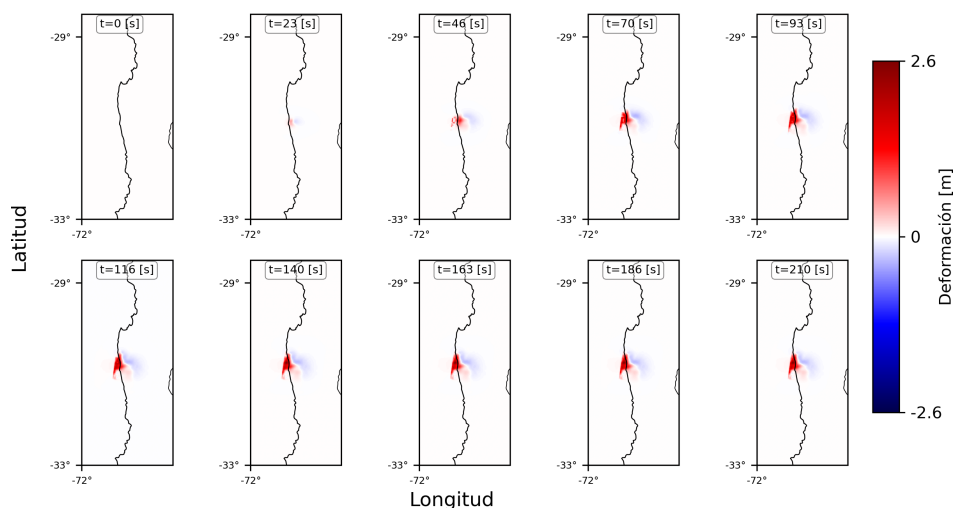


Figura A.3: Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Illapel (2015). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia.

## Deformación del fondo marino

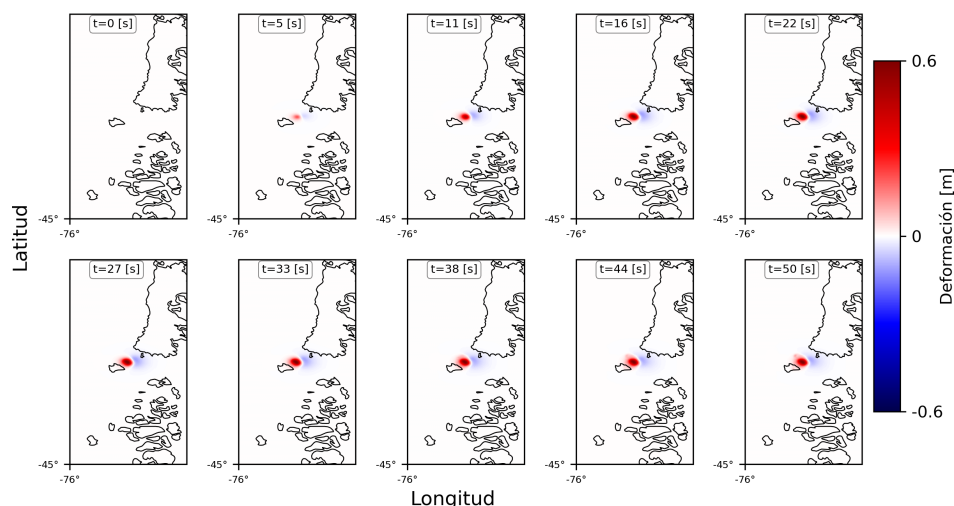


Figura A.4: Deformación cinemática del fondo marino calculada a partir de la solución de falla finita disponible en el repositorio web del USGS para el terremoto de Melinka (2016). Valores positivos (en rojo) indican alzamiento y negativos (en azul) subsidencia.

## A.2. Propagación del tsunami

### Propagación

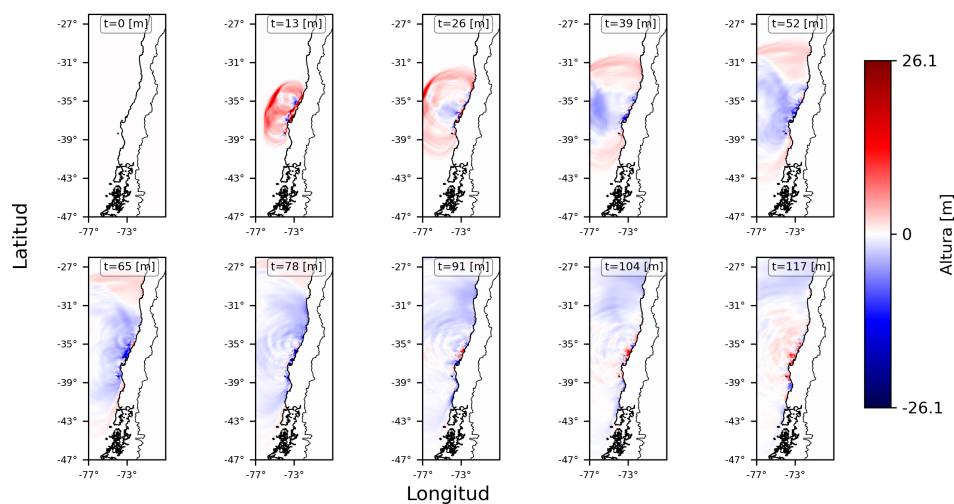


Figura A.5: Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto del Maule (2010), en diferentes instantes de tiempo.



### Propagación

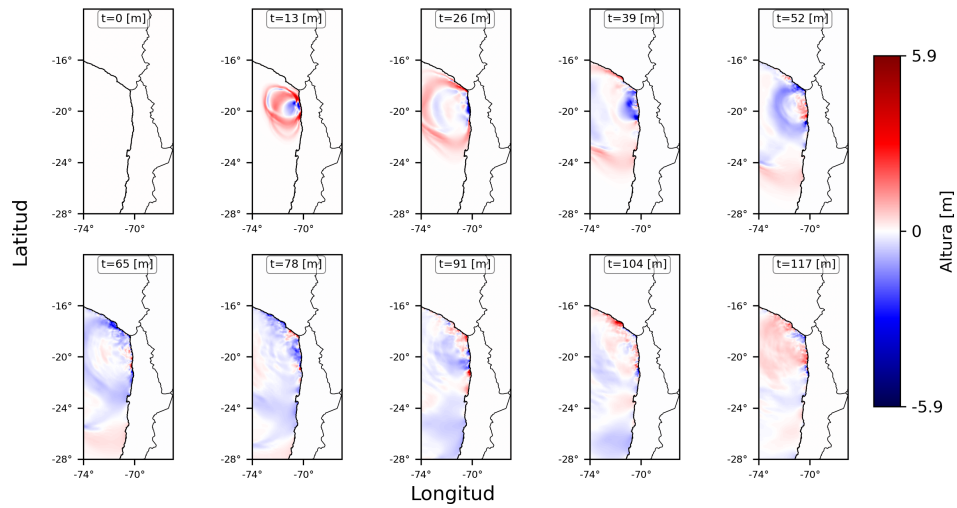


Figura A.6: Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Pisagua (2014), en diferentes instantes de tiempo..

### Propagación

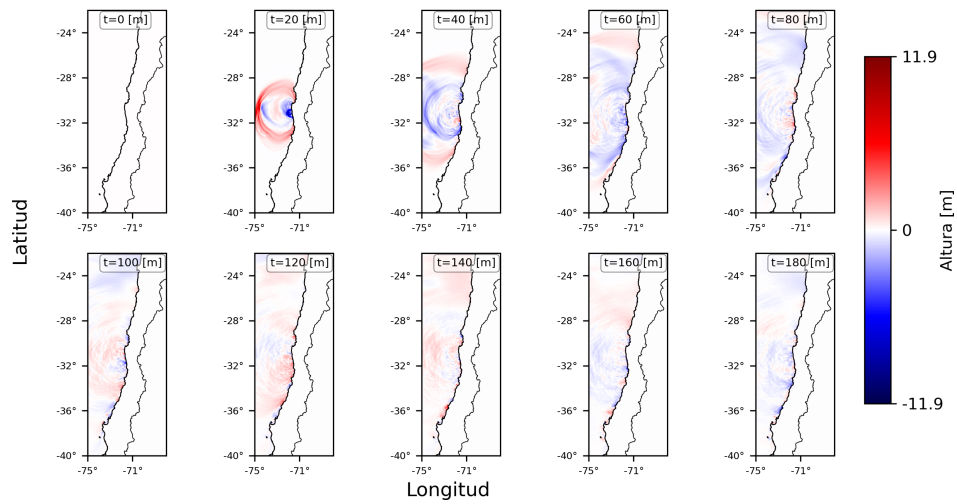


Figura A.7: Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Illapel (2015), en diferentes instantes de tiempo..

### Propagación

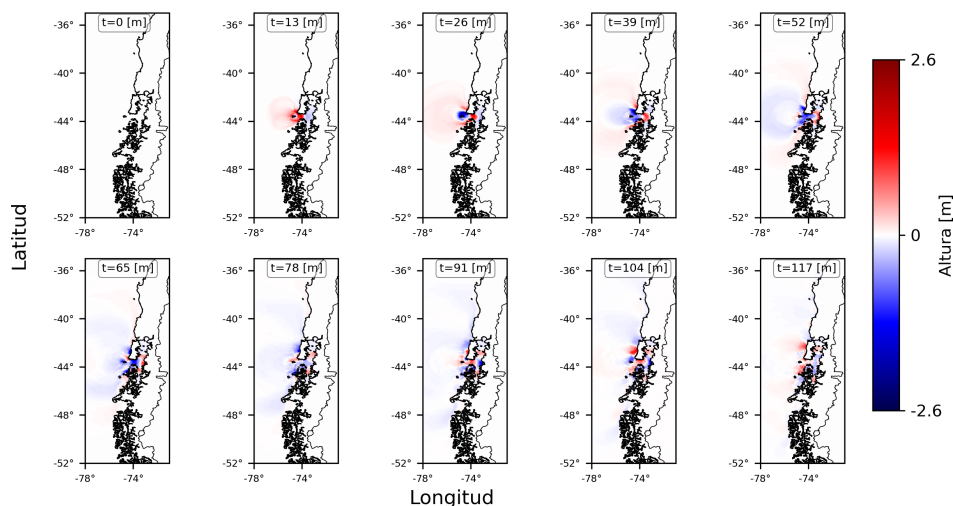


Figura A.8: Propagación del tsunami modelado a partir del terremoto de Melinka (2016), en diferentes instantes de tiempo.

## A.3. Evolución de las máximas amplitudes de tsunami

### Máximas amplitudes

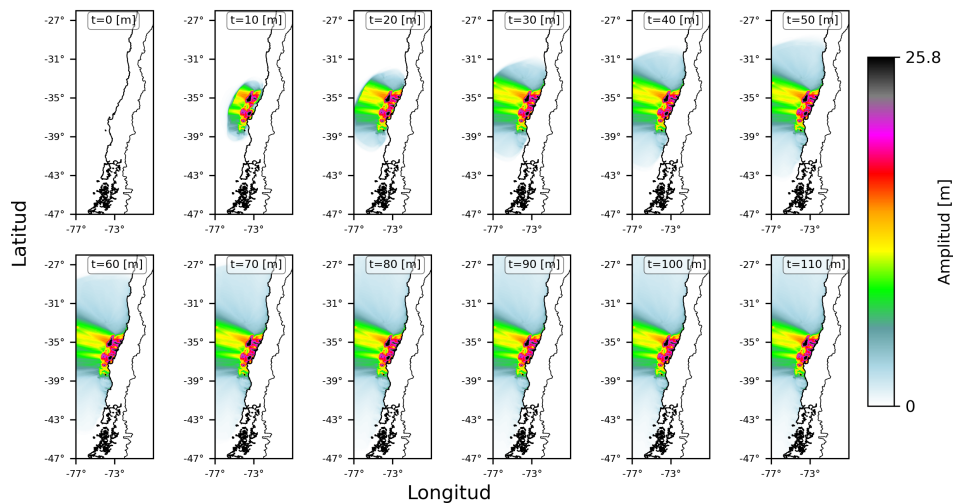


Figura A.9: Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto del Maule (2010).

### Máximas amplitudes

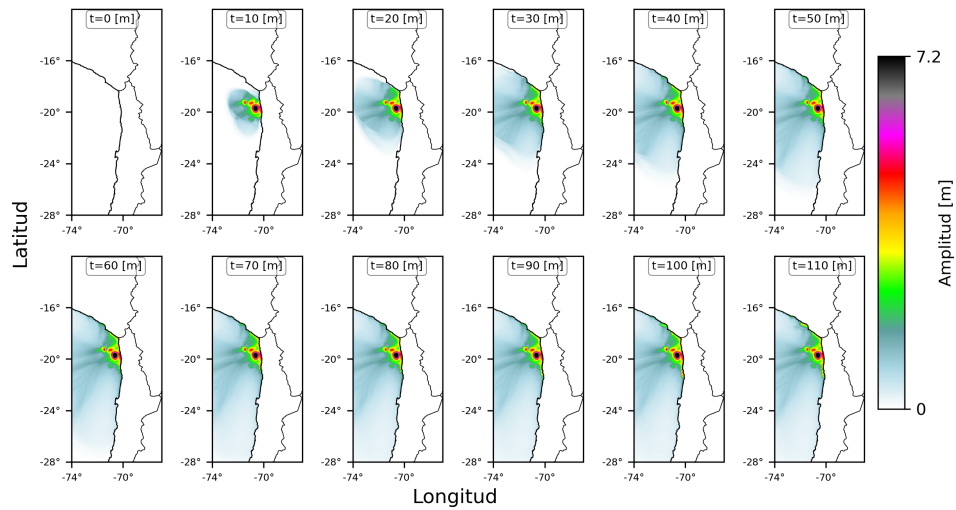


Figura A.10: Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Pisagua (2014).

### Máximas amplitudes

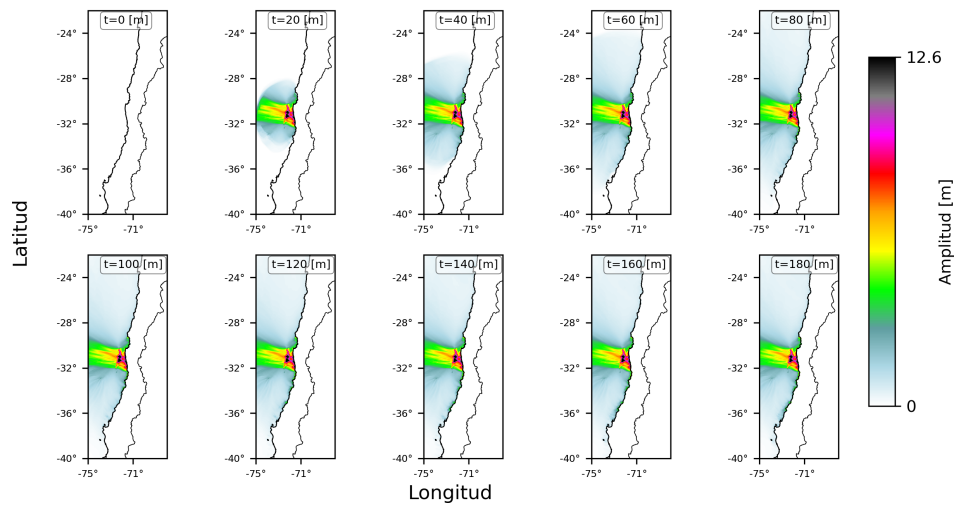


Figura A.11: Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Illapel (2015).

## Máximas amplitudes

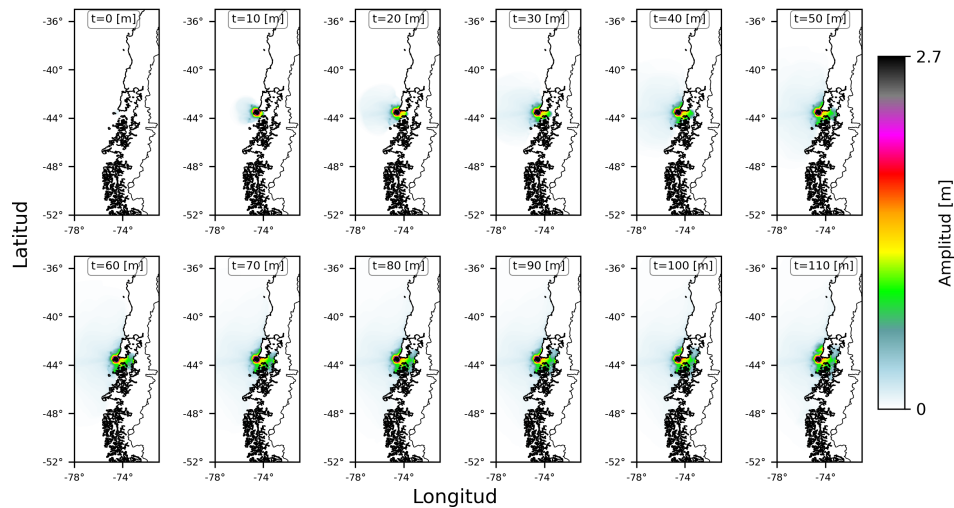


Figura A.12: Evolución de las máximas amplitudes de tsunami para el modelo generado a partir del terremoto de Melinka (2016).

## A.4. Series de tiempo (registros y modelos)

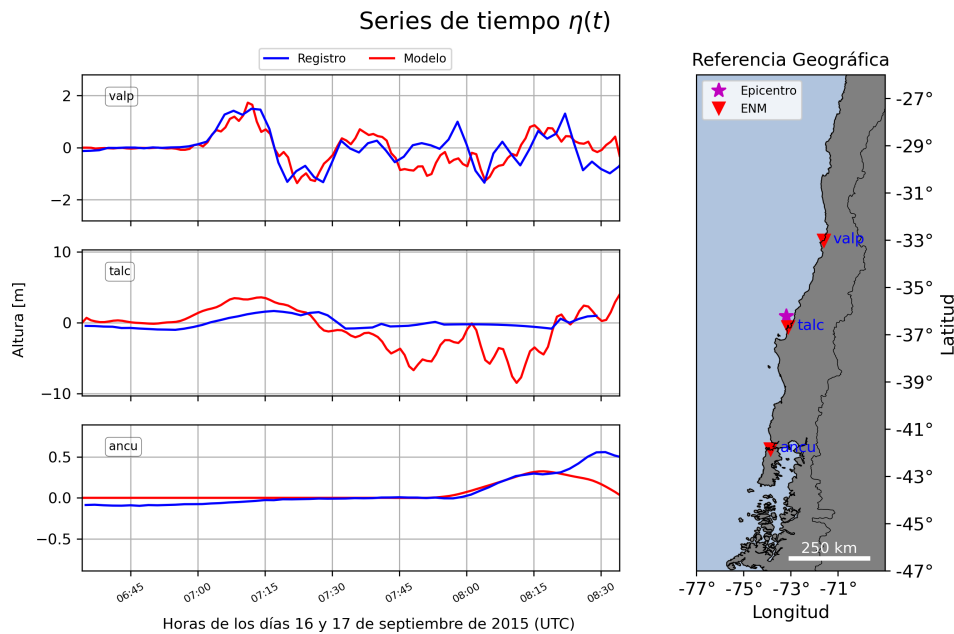


Figura A.13: Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto del Maule (2010).

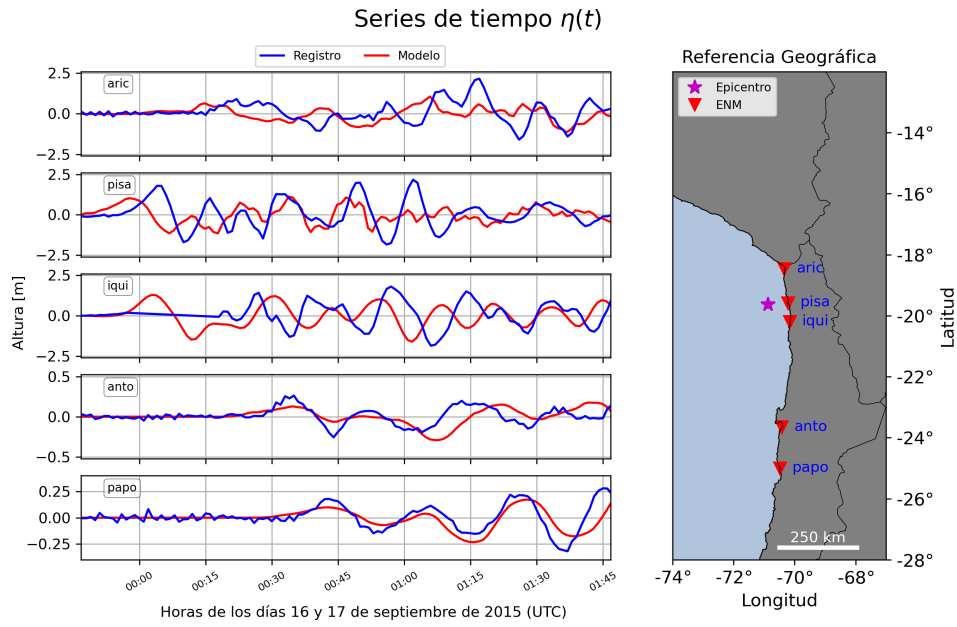


Figura A.14: Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Pisagua (2014).

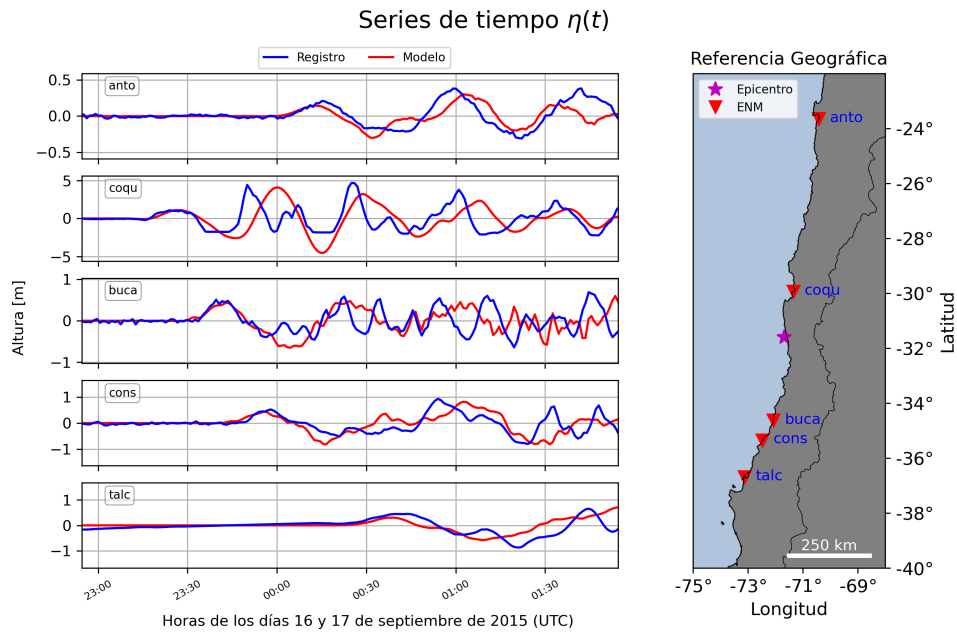


Figura A.15: Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Illapel (2015).

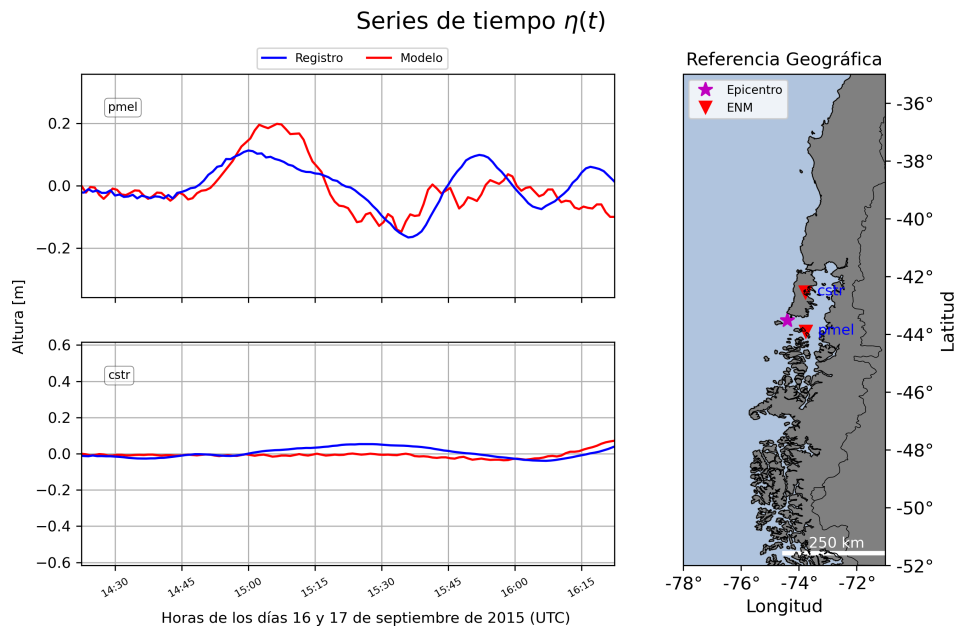


Figura A.16: Comparación entre series de tiempo modeladas y registros de tsunami en ENM, posterior al terremoto de Melinka (2016).

# Anexo B

## Ejemplo de los Resultados que entrega el programa

Los resultados que entrega el programa al modelar el tsunami post-terremoto de Illapel (2015), con los parámetros que se muestran en la tabla B.1, son los siguientes<sup>16</sup>:

Tabla B.1: Parámetros utilizados para obtener los resultados que se muestran en el Anexo B.

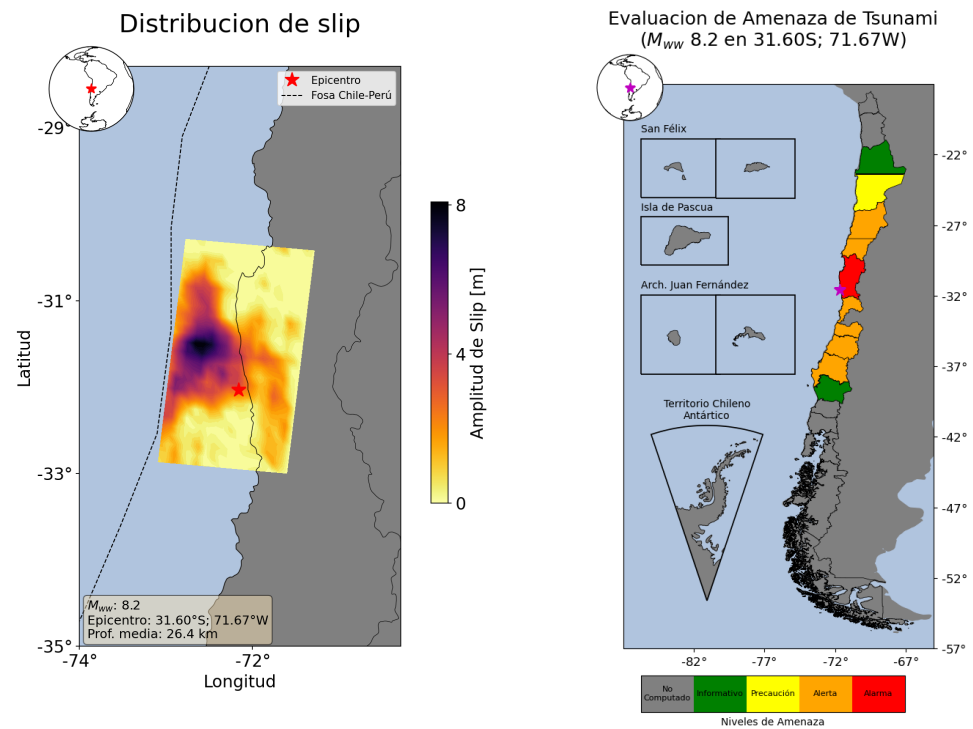
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Resolución de la grilla	30 seg. de arco
$\Delta t$	1.0 [seg]
Tiempo de simulación	4 [hr]
Extensión del dominio en Longitud	$\pm 0.5^\circ$
Extensión del dominio en Latitud	$\pm 5.0^\circ$
Cálculo horas de arribo	SI

---

<sup>16</sup> El programa tardó 70 segundos en ejecutarse.

## B.1. Resultados gráficos

### B.1.1. Evaluación



(a) Distribución de slip de la solución de la Fase-W.

(b) Evaluación de amenaza de tsunami.

Figura B.1: Resultados gráficos relacionados con la evaluación de la amenaza.



## B.1.2. Otros

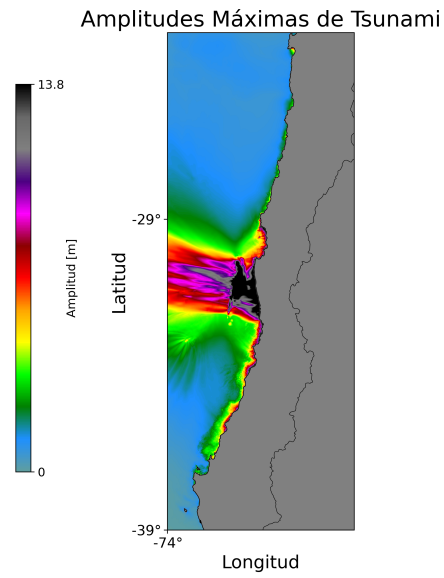
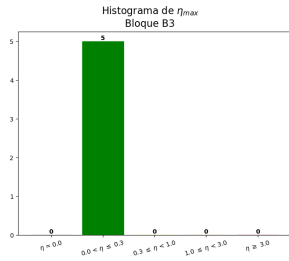
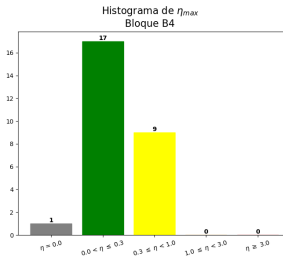


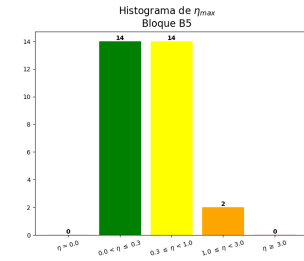
Figura B.2: Máximas amplitudes de tsunami modeladas usando como evento el terremoto de Illapel (2015) y los parámetros indicados en la tabla B.1.



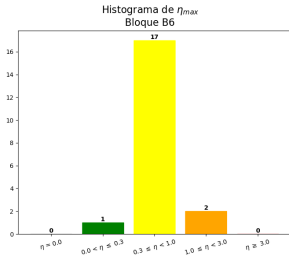
(a) Bloque Antofagasta Norte.



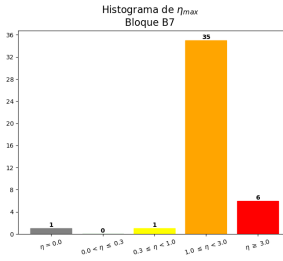
(b) Bloque Antofagasta Sur.



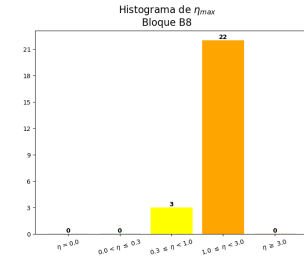
(c) Bloque Atacama Norte.



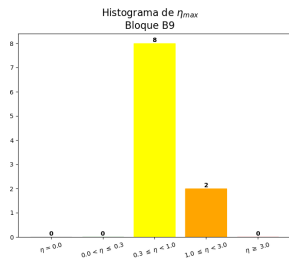
(d) Bloque Atacama Sur.



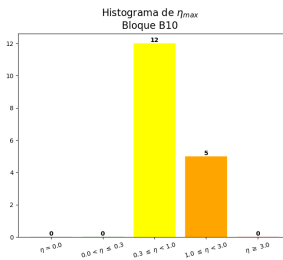
(e) Bloque Coquimbo.



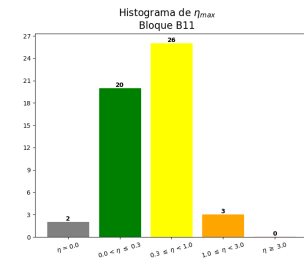
(f) Bloque Valparaíso.



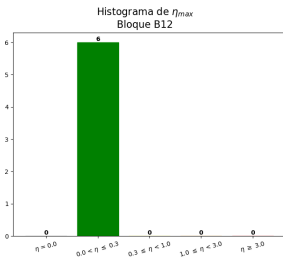
(g) Bloque O'Higgins.



(h) Bloque Maule.



(i) Bloque Ñuble-Biobío.



(j) Bloque Araucanía.

Figura B.3: Histogramas de máximas alturas de tsunami modeladas en los puntos de evaluación, por cada bloque geográfico.

## B.2. Resultados de texto

```
BOLETIN DE EJEMPLO
BOLETIN NR X
EVENTO XX/XX/XXXX 00:00
MAGNITUD 8.2, XX KM AL XX DE XXXX
HORA RECEPCION INFORMACION XX/XX/XXXX XX:XX
EVALUACION:
BASADO EN LOS PARAMETROS DEL PRELIMINARES DEL SISMO Y LA EVALUACION DE LA
AMENAZA DE TSUNAMI EFECTUADA MEDIANTE MODELACION DE LA FUENTE SISMICA,
SE ESTABLECEN LOS SIGUIENTES ESTADOS PARA EL TERRITORIO NACIONAL:

ARICA Y PARINACOTA      N/C
TARAPACA                 N/C
ANTOFAGASTA NORTE      Informativo
ANTOFAGASTA SUR         Precaucion
ATACAMA NORTE           Alerta
ATACAMA SUR             Alerta
COQUIMBO                Alerta
VALPARAISO              Informativo
ARCH. JUAN FERNANDEZ    N/C
ISLA SAN FELIX          N/C
ISLA DE PASCUA         N/C
O'HIGGINS              N/C
MAULE                   N/C
NUBLE - BIO BIO        N/C
ARAUCANIA              N/C
LOS RIOS                N/C
LOS LAGOS NORTE        N/C
LOS LAGOS SUR          Alerta
AYSEN                  Alerta
MAGALLANES             Alerta

HORA LOCAL: 00:00
MAGNITUD: 8.2
FUENTE: CSN (M-PHASE)
LATITUD: -31.5952
LONGITUD: -71.6728
REFERENCIA GEOGRAFICA: XX KM AL XX DE XXXX

SE DEBE TENER PRESENTE QUE:

SI ONEMI HA DECRETADO EVACUACION PREVENTIVA, ESTA SE MANTENDRA HASTA QUE
SEA CANCELADA POR ONEMI.
EL PROCESO DE MODELACION Y ANALISIS SE EFECTUO CON UNA SOLUCION PRELIMINAR
DE LA FASE-W.
ESTADO DE ALARMA ESTA ASOCIADO A UN TSUNAMI MAYOR.
ESTADO DE ALERTA ESTA ASOCIADO A UN TSUNAMI INTERMEDIO.
ESTADO DE PRECAUCION ESTA ASOCIADO A UN TSUNAMI MENOR.
ESTADO DE INFORMATIVO ESTA ASOCIADO A UNA CONDICION SIN AMENAZA DE
TSUNAMI.
ESTADO N/C (NO COMPUTADO) ESTA ASOCIADO A UN BLOQUE QUE AUN NO HA SIDO
MODELADO Y SU NIVEL DE AMENAZA SERA INFORMADO EN UN BOLETIN POSTERIOR.
UN TSUNAMI SE MANIFIESTA POR HORAS.
NORMALMENTE LA PRIMERA ONDA NO ES LA MAS DESTRUCTIVA.
EN BAHIAS CERRADAS LOS EFECTOS DEL TSUNAMI SE VAN A VER AMPLIFICADOS.
UN TSUNAMI LLEGARA A LAS COSTAS CERCANAS AL EPICENTRO POCOS MINUTOS
DESPUES DEL SISMO.
EN PUERTOS, CALETAS, ESTUARIOS Y RIOS SE PUEDEN MANIFESTAR FUERTES
```

Figura B.4: Ejemplo de boletín de evaluación de amenaza de tsunami obtenida a partir de la modelación, usando como evento el terremoto de Illapel (2015) y los parámetros indicados en la tabla B.1.

BOLETIN DE EJERCICIO  
BOLETIN HORAS DE ARRIBO  
EVENTO XX/XX/20XX XX:XX  
MAGNITUD X.X, XX KM AL XX DE XXXX  
HORA RECEPCION INFORMACION: XX/XX/20XX XX:XX

EVALUACION:  
DE ACUERDO A LA AMENAZA DE TSUNAMI ESTABLECIDA POR LOS ESTADOS INFORMADOS  
EN BOLETIN ANTERIOR, LAS HORAS ESTIMADAS DE ARRIBO SERIAN LAS SIGUIENTES (UTC).  
NO SE INCLUYEN LOCALIDADES CON ESTADO INFORMATIVO O N/C:

Pichdangui	2015-Sep-16 22:54
Quintero	2015-Sep-16 23:04
Cogulmo	2015-Sep-16 23:11
Valparaiso	2015-Sep-16 23:12
Punta de Choros	2015-Sep-16 23:17
San Antonio	2015-Sep-16 23:19
Huasco	2015-Sep-16 23:20
Bucalemu	2015-Sep-16 23:30
Caldera	2015-Sep-16 23:35
Constitucion	2015-Sep-16 23:45
Chanaral	2015-Sep-16 23:46
Paposo	2015-Sep-16 23:50
Taltal	2015-Sep-16 23:51
Lebu	2015-Sep-17 00:01
Antofagasta	2015-Sep-17 00:03
Coronel	2015-Sep-17 00:13
Quiriquina	2015-Sep-17 00:14
Mejillones	2015-Sep-17 00:15
Colluno	2015-Sep-17 00:18
Talcahuano	2015-Sep-17 00:27
Nehuentue	2015-Sep-17 01:52

DATOS DEL SISMO:  
UN SISMO HA OCURRIDO CON LOS SIGUIENTES PARAMETROS PRELIMINARES

HORA LOCAL: XX:XX  
MAGNITUD: XX  
FUENTE: XX  
LATITUD: XX  
LONGITUD: XX  
REFERENCIA GEOGRAFICA: XX

SE DEBE TENER PRESENTE QUE:

SI ONEMI HA DECRETADO EVACUACION PREVENTIVA, ESTA SE MANTENDRA HASTA QUE SEA CANCELADA POR ONEMI.  
EL PROCESO DE MODELACION Y ANALISIS SE EFECTUA MEDIANTE MODELACION DE LA FUENTE SISMICA EN TIEMPO CUASI-REAL A PARTIR DE LA FASE-W.  
ESTADO DE ALERTA ESTA ASOCIADO A UN TSUNAMI MAYOR.  
ESTADO DE PRECAUCION ESTA ASOCIADO A UN TSUNAMI MENOR.  
ESTADO DE INFORMATIVO ESTA ASOCIADO A UNA CONDICION SIN AMENAZA DE TSUNAMI.  
ESTADO N/C (NO COMPUTADO) ESTA ASOCIADO A UN BLOQUE QUE AUN NO HA SIDO MODELADO Y SU NIVEL DE AMENAZA SERA INFORMADO EN UN BOLETIN POSTERIOR.  
UN TSUNAMI SE MANIFIESTA POR HORAS.  
NORMALMENTE LA PRIMERA ONDA NO ES LA MAS DESTRUCTIVA.  
EN BAHIAS CERRADAS LOS EFECTOS DEL TSUNAMI SE VAN A VER AMPLIFICADOS.  
UN TSUNAMI LLEGARA A LAS COSTAS CERCANAS AL EPICENTRO POCOS MINUTOS DESPUES DEL SISMO.  
EN PUERTOS, CALETAS, ESTUARIOS Y RIOS SE PUEDEN MANIFESTAR FUERTES CORRIENTES.

Figura B.5: Ejemplo de boletín con horas de arribo de tsunami obtenidas a partir de la modelación.