



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**Análisis de Sensibilidad de los resultados de alturas en
el Diseño de Infraestructura Costera en Chile ante el
Cambio de Modelo para su Implementación en un
Esquema PTHA**

Memoria de Título presentada por

Italo Alfonso Suazo Massaro

Como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Catalán

Enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de Sensibilidad de los resultados de alturas en el Diseño de Infraestructura Costera en Chile ante el Cambio de Modelo para su Implementación en un Esquema PTHA

Nombre del candidato(a): Ítalo Alfonso Suazo Massaro

Carrera / Grado: Ingeniero Civil

Campus: San Joaquín

Departamento: Ingeniería Civil

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, PATRICIO A. CASTAÑA, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 15 Mayo 26 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16 de mayo del 2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS DE ALTURAS EN EL DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA COSTERA EN CHILE ANTE EL CAMBIO DE MODELO PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UN ESQUEMA PTHA

Italo Suazo M, Patricio Catalán

Universidad Técnica Federico Santa María

1 Resumen

Chile, ubicado en una de las zonas de subducción más activas del mundo, es un país expuesto a constantes amenazas costeras, por lo que requiere de una evaluación probabilística de amenaza de tsunami robusta. Dado el elevado costo computacional que implica simular decenas de miles de escenarios con modelos no lineales de alta fidelidad como Tsunami-HySEA, surge la necesidad de evaluar modelos simplificados y veloces. El presente trabajo tiene por objetivo cuantificar la sensibilidad de los resultados de alturas máximas de inundación al cambiar desde el modelo complejo HySEA hacia el modelo lineal de bajo costo EasyWave, evaluando su viabilidad como herramienta para esquemas PTHA.

Para garantizar una comparación objetiva y rigurosa, la metodología consistió en extraer una muestra representativa de 1.500 escenarios sísmicos desde una base de datos preexistente de HySEA, homologando sus parámetros de entrada para ser simulados en EasyWave. El objetivo de este enfoque radica en la extracción de datos de manera exclusiva en una red de 728 Puntos de Interés costeros. Esta estrategia permitió aislar la respuesta hidrodinámica local y realizar una comparación directa, punto a punto, bajo exactamente las mismas condiciones iniciales de fuente, eliminando variables de incertidumbre externas.

Los resultados demuestran que el desempeño de EasyWave es directamente proporcional a la magnitud, zona geográfica y profundidad del terreno en donde el grado de no linealidad del evento tiene un gran peso sobre la confiabilidad del modelo. Estos errores evidencian la incapacidad de las ecuaciones lineales de aguas someras para resolver fenómenos hidrodinámicos complejos, tales como el asomeramiento, fricción y la resonancia en cuencas semicerradas. A pesar de proponer y aplicar factores de corrección empíricos condicionados por batimetría, el modelo ajustado mantuvo una tasa de fallo crítico inaceptablemente alta para los estándares de protección civil.

Se concluye que, pese a su eficiencia computacional, EasyWave no posee la robustez física necesaria para sustentar de manera confiable un enfoque PTHA en zonas costeras donde la precisión en la estimación del peligro resulta crítica.

2 Introducción

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica y tectónica a nivel mundial, por lo que sus costas son susceptibles a sufrir impactos de tsunamis. Estos fenómenos, aunque sean poco frecuentes, son impredecibles y poseen un impacto devastador, afectando tanto a la población como a las infraestructuras ubicadas en las cercanías de la costa (Behrens, 2021). En este escenario, surge la necesidad de mejorar los parámetros de diseño usados en infraestructuras cercanas a la costa.

Sin embargo, el diseño de infraestructuras resistentes a tsunamis enfrenta diversos desafíos, especialmente en países como Chile. Uno de los principales problemas radica en la incertidumbre asociada al modelo utilizado para simular el impacto de los tsunamis, dado que no existe una evaluación comparativa del error o la sensibilidad de los resultados generados por distintos enfoques, lo que dificulta la toma de decisiones en el diseño y aumenta la variabilidad en las soluciones implementadas. Como consecuencia de estas limitaciones, en Chile no se cuenta con una metodología estandarizada para calcular y caracterizar las fuerzas de tsunami sobre infraestructuras en las costas de Chile.

En este contexto, el estudio considera la disponibilidad de una base de datos de 40.000 escenarios de tsunami simulados con el modelo HySEA, generados por mi profesor guía Patricio Catalán para toda la zona de subducción chilena. Dado el elevado costo computacional que implica utilizar este modelo no lineal para la evaluación probabilística del riesgo de tsunami (PTHA), este trabajo plantea un estudio comparativo de sensibilidad frente al modelo lineal de bajo costo EasyWave. Para ello, se seleccionó una submuestra representativa de 1500 escenarios, los cuales fueron simulados con EasyWave replicando la configuración exacta de los escenarios originales de HySEA, permitiendo así cuantificar las discrepancias y definir factores de corrección que validen el uso eficiente del modelo lineal.

3 Marco Teórico

3.1 Tsunami

El *Diccionario de La Lengua Española (RAE)* define maremoto como una “agitación violenta de las aguas del mar a consecuencia de una sacudida del fondo, que a veces se propaga hasta las costas dando lugar a inundaciones”. Por su parte, la UNESCO (2019), define un tsunami como una “serie de ondas de longitud y período sumamente largos, normalmente generados por perturbaciones asociadas con terremotos que ocurren bajo el fondo oceánico o cerca de él”.

La constante amenaza de tsunami sobre las costas chilenas se debe a la localización geográfica de Chile, debido a que se encuentra frente a una zona de subducción cortical, la cual se caracteriza por la generación de sismos. Los terremotos son la principal causa por la cual se generan tsunamis; dado esto, a medida que aumenta la magnitud o disminuye la profundidad del hipocentro del sismo, la magnitud del tsunami se incrementará y sus efectos serán potenciados por las características batimétricas, la distancia del epicentro a la línea de costa y morfología de la topografía superficial de la zona afectada (Lagos, 2001).

En nuestro país, el riesgo de tsunami cada vez toma mayor importancia debido al continuo crecimiento urbano y rural de localidades costeras, donde la tendencia a urbanizar zonas muy próximas al mar se caracteriza por una planificación deficiente y una total falta de consideración del riesgo que esto representa. El conocimiento detallado de estadísticas de tsunamis ocurridos en Chile es fundamental para cualquier estudio de riesgo costero. Hay que considerar que esto está condicionado por los antecedentes históricos registrados, existiendo información a partir del año 1562 (Lagos, 2001).

3.2 Enfoques de modelos para la simulación numérica de tsunamis

Los modelos numéricos empleados para la simulación de tsunamis se basan en las ecuaciones de aguas someras, las cuales representan la conservación de masa y cantidad de movimiento en flujos donde la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad del agua (Kowalik & Murty, 1993). Estas ecuaciones pueden formularse en dos regímenes distintos: lineal y no lineal, dependiendo del nivel de aproximación aplicado a los términos de advección y fricción.

3.2.1 Ecuaciones de aguas someras lineales (LSWE)

La formulación lineal asume que las perturbaciones del nivel del mar son pequeñas respecto a la profundidad y que las velocidades horizontales son bajas, lo que permite desprestigiar los términos no lineales y obtener un sistema de ecuaciones simplificado. Esta aproximación es apropiada para la propagación de tsunamis en mar abierto, donde las amplitudes son reducidas y la topografía submarina cambia lentamente (Kowalik & Murty, 1993; Kristina et al., 2014). Es por esto que la simplificación lineal ofrece una ventaja computacional significativa y mantiene una precisión aceptable mientras la ola no interactúa con la costa.

3.2.2 Ecuaciones de aguas someras no lineales (NSWE)

La formulación no lineal conserva los términos de advección, permitiendo modelar fenómenos complejos como propagación e inundación costera. A medida que el tsunami se aproxima a la costa, la profundidad disminuye y la amplitud aumenta, de modo que los efectos no lineales adquieren un rol dominante (Harig et al., 2022a). En esta etapa, los términos omitidos en la versión lineal, como la aceleración advectiva y la interacción con la topografía, son esenciales para reproducir la energía que realmente impacta la línea de costa (Kowalik & Murty, 1993).

3.3 Modelo Tsunami-HySEA

El modelo HySEA es una herramienta numérica utilizada para la simulación de tsunamis generados por terremotos. Este modelo es un software escrito en C++, desarrollado por el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga. Su principal característica es su optimización al momento de operar con unidades de procesamiento gráfico (GPU). Esto reduce los tiempos de cálculo, permitiendo entregar resultados en forma rápida y sin perder precisión, comparado con otros softwares más antiguos y de menor tecnología. Por lo que este modelo es una herramienta muy útil para simulaciones en tiempo real y para la planificación de respuestas ante eventos de tsunami (Macías, 2016).

Este software permite utilizar múltiples GPUs, por lo que distribuye la carga de cálculo en varios núcleos, acelerando el proceso de simulación. Esto ha permitido que diversas investigaciones (Macías et al., 2017) puedan validar el correcto funcionamiento del modelo en el estudio de peligros de tsunamis, dado que la ventaja computacional que entregan las tarjetas GPU simula en forma simultánea la propagación e inundación del tsunami mediante la operación de ecuaciones no lineales de aguas someras. Sin embargo, el uso de varias tarjetas puede verse limitado por la comunicación y el tráfico de datos entre las unidades y el procesador, lo que debe considerarse al momento de optimizar el rendimiento del modelo (Migliaro, 2019).

Las simulaciones realizadas con HySEA requieren datos de entrada similares a los de otros modelos numéricos de simulación de tsunami, incluyendo los parámetros físicos del sismo, la topografía y batimetría del área de estudio, la rugosidad del fondo marino y las condiciones de borde que definen el escenario analizado (Macías et al., 2017). Además, este modelo emplea un enfoque numérico que combina robustez, precisión y eficiencia, permitiendo realizar las tres fases de un tsunami: generación, propagación e inundación costera.

Para la etapa de generación, se basa en el modelo de deformación de fallas de Okada (1985) para poder predecir la deformación inicial del fondo que se transmite instantáneamente a la superficie del mar, generando la ola del tsunami.

3.4 Modelo EasyWave:

El modelo EasyWave es una herramienta computacional rápida, escrita en C++, diseñada para la simulación de tsunamis en tiempo real, principalmente para sistemas de alerta temprana. Su objetivo es proporcionar resultados en minutos después de un sismo, lo que es crucial para tsunamis locales donde el tiempo de reacción es muy corto.

A diferencia de enfoques tradicionales que dependen de enormes bases de datos de escenarios precomputados, EasyWave permite realizar simulaciones en tiempo real con gran eficiencia (Babeyko & German, 2012)

El modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras en su versión lineal, lo cual simplifica los cálculos y permite simular en cuestión de segundos la primera hora de propagación sobre mallas globales o regionales. Dado que trabaja bajo una aproximación lineal, EasyWave no calcula directamente la inundación costera ni run-ups detallados. En su lugar, lleva la simulación hasta el límite de validez del modelo lineal de aguas poco profundas, establecido entre los 20 y 50 metros de profundidad para luego estimar las amplitudes costeras máximas utilizando la ley de Green o relaciones empíricas.

EasyWave produce salidas unidimensionales y bidimensionales: series temporales de altura de ola en puntos de interés, tiempos estimados de llegada y alturas máximas, además de mapas de propagación en formato GRD. Su principal ventaja es la velocidad de cálculo, que permite seguir en tiempo real la evolución de los parámetros de la fuente sísmica, considerados la mayor fuente de incertidumbre en la alerta temprana. Por tanto, EasyWave sacrifica detalle en la modelación costera a cambio de velocidad.

3.5 Estado del arte

En el ámbito de la comparación entre modelos numéricos de simulación de tsunamis, destaca el estudio titulado “Comparison of Tsunami Inundation Models for Central Chile Using TsunAWI, HySEA, and COMCOT” (Harig et al., 2022). Este trabajo evaluó la inundación por tsunamis en tres ciudades del centro de Chile: Coquimbo, Viña del Mar y Valparaíso, utilizando tres modelos numéricos distintos: TsunAWI, Tsunami-HySEA y COMCOT.

Las simulaciones consideraron tres eventos sísmicos representativos: el terremoto del Maule de 2010 (Mw 8.8), el de Coquimbo de 2015 (Mw 8.3) y el evento histórico de Valparaíso de 1730 (Mw 9.1).

Los autores reportaron resultados consistentes en las alturas de ola cerca de la costa, aunque con discrepancias notables en las áreas de inundación debido a la sensibilidad de cada modelo a los parámetros de fricción del fondo. En Valparaíso, por ejemplo, el área de inundación estimada varió cerca del 10 % entre Tsunami-HySEA y COMCOT, mientras que para TsunAWI la diferencia alcanzó 21,6%. En Viña del Mar, las diferencias superaron el 30 %, lo que evidencia el impacto del coeficiente de fricción sobre la extensión del área inundada.

3.6 Definición del problema

A partir de la información recopilada, se puede sintetizar que la amenaza de tsunamis en Chile constituye un riesgo permanente, debido a que se ubica frente a la zona de subducción más activa del mundo. En este contexto, los modelos numéricos se han consolidado como herramientas fundamentales para la simulación de la generación, propagación e impacto de estos fenómenos. Entre ellos, HySEA ha sido ampliamente validado y reconocido por su precisión, al entregar simulaciones robustas de propagación e inundación costera (Macías, 2017). Sin embargo, este modelo presenta altos costos computacionales, lo que limita su aplicabilidad.

En contraste, EasyWave ha sido diseñado como un modelo rápido y eficiente, capaz de entregar resultados en pocos minutos tras un evento sísmico. Estas características lo hacen particularmente adecuado para sistemas de alerta temprana; sin embargo, su aproximación simplificada sacrifica detalle en los resultados entregados (Babeyko & German, 2012).

Actualmente, en Chile no existe una metodología estandarizada que permita evaluar la sensibilidad de los resultados frente al cambio de modelo. Esto genera incertidumbre tanto en el diseño de infraestructuras costeras como en la gestión del riesgo, ya que se desconoce hasta qué punto un modelo más simplificado podría reemplazar a uno complejo sin comprometer significativamente la precisión de los resultados.

De este modo, el problema central de esta investigación radica en la ausencia de un análisis comparativo sistemático que cuantifique el grado de sensibilidad de los resultados al cambiar de un modelo de alto costo computacional, como HySEA, a uno simplificado, como EasyWave. Sin esta evaluación, no es posible determinar si las ventajas en tiempo y recursos de EasyWave justifican su uso en lugar de modelos más robustos como HySEA, ni cuál es el impacto de estas diferencias en la implementación de un esquema de Análisis Probabilístico de Peligro por Tsunami (PTHA).

En consecuencia, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué grado de sensibilidad presentan los resultados de alturas, tiempos de llegada y propagación de tsunamis al cambiar de un modelo de alta precisión (HySEA) a uno de bajo costo computacional (EasyWave)?
- ¿Es posible utilizar 1500 escenarios de la base de datos de simulaciones de HySEA sin comprometer la representatividad de los escenarios sísmicos relevantes?
- ¿Puede EasyWave ser considerado una herramienta confiable para su implementación en un esquema PTHA, en reemplazo o complemento de HySEA?

4 Objetivos

- Objetivo principal:

Comparar la sensibilidad de los resultados de simulaciones en las costas de Chile, entre modelos de alto y bajo costo como HySEA y EasyWave, para ser implementado en un esquema PTHA.

- Objetivos específicos:

OE1: Homologar los parámetros de entrada y escenarios sísmicos de la base de datos de HySEA con los requerimientos de entrada del modelo EasyWave.

OE2: Caracterizar la amenaza de tsunami mediante el modelo EasyWave, evaluando su sensibilidad frente a diferentes fuentes sísmicas.

OE3: Comparar los resultados de cada simulación entre ambos modelos para evaluar la sensibilidad de los resultados al cambio de modelo.

5 Metodología

OE1:

- Propósito: Garantizar la compatibilidad de los datos de entrada entre ambos sistemas, de manera tal que permita desarrollar un proceso automatizado tanto para la conversión masiva de parámetros como para la posterior simulación automatizada de los escenarios transformados.
- Procedimiento:
 1. Identificación y selección de simulaciones: Identificación de la estructura de entrada de ambos modelos y selección de una muestra representativa de 1500 simulaciones de distintas magnitudes sísmicas desde la base de datos de HySEA.
 2. Preparación de parámetros de entrada: Adaptación de los parámetros de las fuentes sísmicas seleccionadas y de las condiciones iniciales al formato específico requerido por EasyWave, incluyendo epicentro, magnitud, profundidad, slip, strike, dip y rake.
 3. Automatización del proceso de simulación: Desarrollar un flujo de trabajo automatizado que permita ejecutar de manera sistemática las simulaciones en EasyWave, utilizando los parámetros previamente convertidos, reduciendo la intervención manual.
- Resultado esperado: Archivos de entrada compatibles para 1500 escenarios, junto con el script de automatización configurado para la ejecución masiva en EasyWave.

OE2:

- Propósito: Modelar la propagación del tsunami mediante el software EasyWave, con el fin de caracterizar la amenaza costera y analizar la respuesta del modelo ante diferentes configuraciones de fuente sísmica.
- Procedimiento:
 1. Simulación numérica: Ejecución de las simulaciones con EasyWave, resolviendo las ecuaciones de aguas someras en su forma lineal para estimar alturas máximas y los mareogramas en puntos de interés costeros.
 2. Procesamiento de resultados: Conversión de las salidas del modelo a formato NetCDF que incluyan mapas de amplitud máxima y series temporales de altura en la zona de estudio.

3. Análisis de sensibilidad: Evaluación conceptual de cómo las variaciones en los parámetros de entrada afectan las alturas de ola, identificando la estabilidad y limitaciones del modelo lineal.
- Resultado esperado: Una caracterización de la amenaza de tsunami para la costa chilena obtenida mediante EasyWave, junto con un análisis de sensibilidad que permita interpretar su comportamiento frente a distintas fuentes sísmicas.

OE3:

- Propósito: Evaluar la consistencia y sensibilidad de los resultados obtenidos con EasyWave respecto a los simulados con Tsunami-HySEA, identificando diferencias atribuibles a la formulación matemática de ambos modelos.
- Procedimiento:
 1. Homogeneización de resultados: Normalización de las salidas de ambos modelos en un formato común (NetCDF), asegurando comparabilidad espacial y temporal.
 2. Comparación cuantitativa: Cálculo de métricas de discrepancia entre ambos modelos (diferencia porcentual de alturas máximas y patrones espaciales de propagación).
 3. Evaluación cualitativa: Interpretación de las diferencias observadas a partir del enfoque físico y numérico de cada modelo.
 4. Síntesis conceptual: Discusión de los resultados en el contexto del análisis probabilístico de peligro de tsunami, considerando la aplicabilidad de EasyWave como alternativa computacional rápida en estudios de amenaza costera.
- Resultado esperado: Un diagnóstico comparativo entre EasyWave y Tsunami-HySEA que permita determinar la magnitud y naturaleza de las diferencias en los resultados de altura de tsunami, su impacto en la estimación de amenaza costera y el ahorro computacional que ofrece el modelo más económico.



Ilustración 1: Esquema de actividades

6 Planificación

Tabla 1: Carta Gantt

	Agosto 2025				Septiembre 2025				Octubre 2025				Noviembre 2025				Dic	
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4		
OE1: Homologar los parámetros de entrada y escenarios sísmicos de la base de datos de HySEA con los requerimientos de entrada del modelo EasyWave	■	■	■	■	■													
A1.1 Identificación y selección de simulaciones	■																	
A1.2 Preparación de parámetros de entrada	■	■	■															
A1.3 Automatización del proceso de simulación			■	■	■													
OE2: Caracterizar la amenaza de tsunami mediante el modelo EasyWave, evaluando su sensibilidad frente a diferentes fuentes sísmicas					■	■	■	■										
A2.1 Simulación numérica					■	■	■											
A2.2 Procesamiento de resultados							■	■	■									
A2.3 Análisis de sensibilidad									■	■								
OE3: Comparar los resultados de cada simulación entre ambos modelos para evaluar la sensibilidad de los resultados al cambio de modelo.													■	■	■	■		
A3.1 Homogeneización de resultados													■	■				
A3.2 Comparación cuantitativa														■	■			
A3.3 Evaluación cualitativa															■			
A3.4 Síntesis conceptual																■		
Escritura de Reportes		■			■				■					■				■
Escritura Tesis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

7 Resultados

La presente sección expone los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas desarrolladas mediante los modelos Tsunami-HySEA y EasyWave.

En una primera etapa, se comparan los valores máximos de altura de ola y los patrones espaciales de propagación de tsunami para cuatro escenarios sísmicos seleccionados, abarcando distintas magnitudes y ubicaciones. El objetivo de esta fase inicial es destacar las diferencias cualitativas y observables entre ambos modelos en términos de amplitud máxima, directividad de la energía y desempeño computacional.

Posteriormente, para llevar a cabo una comparación cuantitativa y un análisis estadístico exhaustivo, la evaluación se amplía a la totalidad de los escenarios simulados. Para ello, la extracción de datos se centró de manera exclusiva en una red de Puntos de Interés (POIs) distribuidos a lo largo de la costa chilena. En total, se seleccionaron 728 puntos válidos, cuyas coordenadas geográficas y profundidades batimétricas fueron mapeadas e interpoladas en las grillas de ambos modelos numéricos.

La utilización de estos POIs resulta fundamental para el desarrollo de esta investigación, ya que permite aislar la respuesta hidrodinámica local, específicamente la altura máxima de ola en zonas costeras de relevancia. Este enfoque metodológico hace posible realizar una comparación directa punto a punto entre las predicciones del modelo simplificado y el modelo complejo de referencia.

7.1 Comparación espacial de alturas máximas

Las ilustraciones de la 2 a la 5 presentan la distribución espacial de las alturas máximas de ola obtenidas con ambos modelos para distintos escenarios sísmicos analizados. Cada figura se compone de tres paneles: el panel izquierdo muestra los resultados de altura de HySEA, el panel central los de EasyWave y el panel derecho la diferencia relativa porcentual entre ambos modelos, calculada a partir del percentil 98 de las alturas máximas. Esta diferencia se define como el cociente entre la diferencia de alturas simuladas por ambos modelos y la altura máxima correspondiente al percentil 98 obtenida con HySEA.

En términos generales, ambos modelos presentan patrones similares de propagación en aguas profundas, exceptuándose en algunos escenarios donde la onda de EasyWave presenta una interrupción y deja de propagarse al norte de la costa chilena. Este comportamiento genera diferencias relativas que alcanzan valores cercanos al 30% en que HySEA supera en magnitud a su contraparte, lo que sugiere posibles limitaciones asociadas a la formulación del modelo más económico.

Asimismo, se identifican diferencias sistemáticas de altura simuladas en zonas cercanas a la costa, predominantemente negativas, lo que indica que EasyWave tiende a sobreestimar las amplitudes máximas respecto a HySEA. Este comportamiento es coherente con las características numéricas de ambos modelos: EasyWave utiliza la formulación lineal de las ecuaciones de aguas someras, omitiendo los términos no lineales de fricción y disipación presentes en HySEA. La ausencia de un mecanismo de disipación de energía permite que la onda conserve mayor amplitud al aproximarse a la costa (Babeyko, 2012; Macías, 2014).

Adicionalmente, al no resolver el proceso de inundación o run-up, EasyWave limita su capacidad para representar con precisión las alturas máximas en la línea de costa.

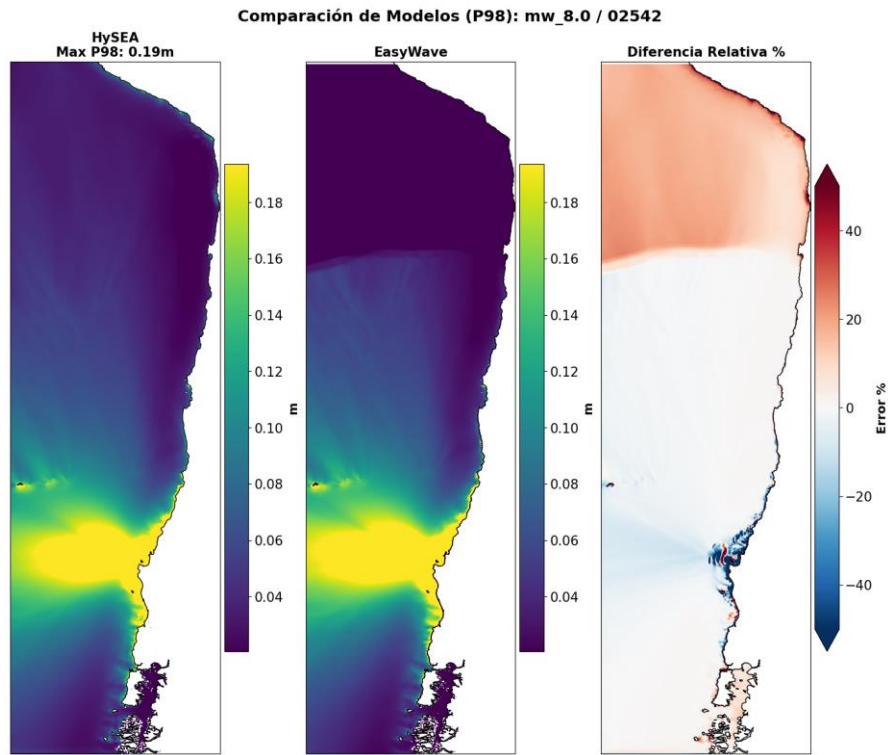


Ilustración 2: Comparación de modelos para el escenario Mw 8.0 / 02542

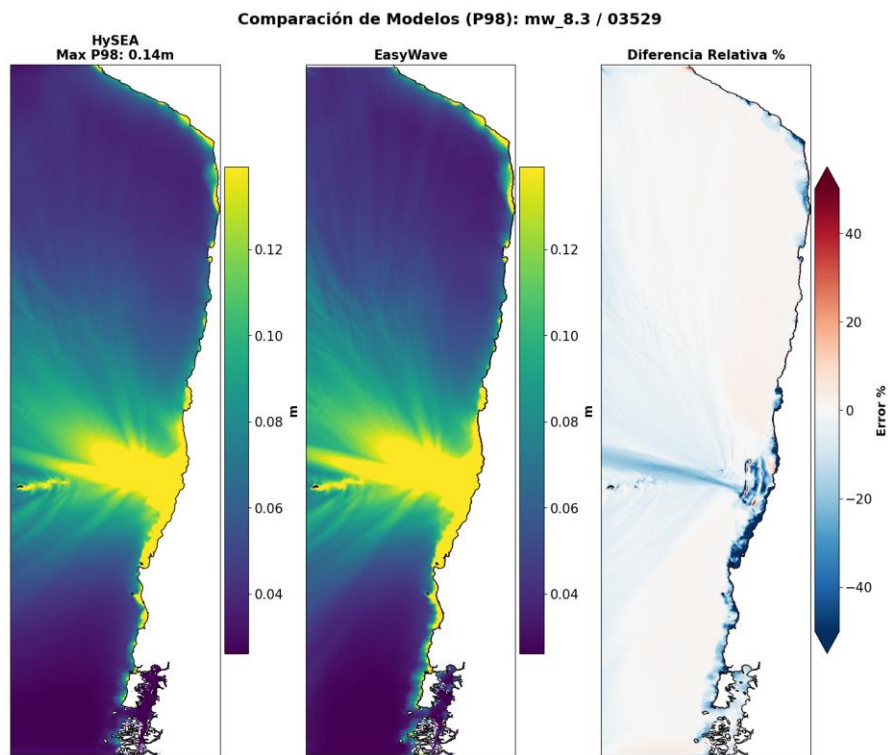


Ilustración 3: Comparación de modelos para el escenario Mw 8.3 / 03529

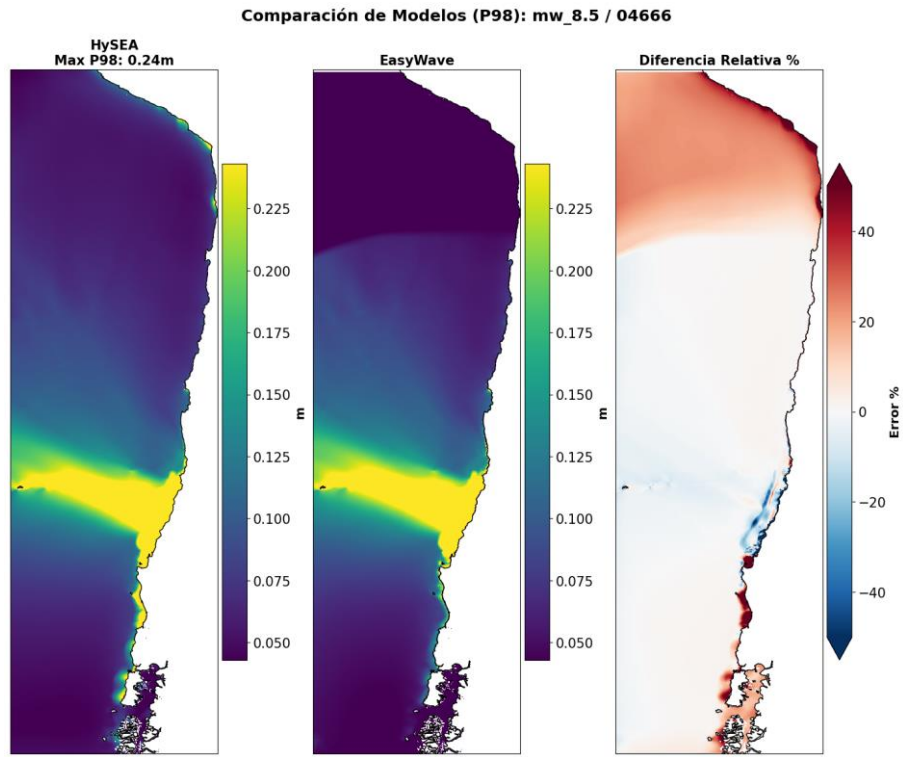


Ilustración 4: Comparación de modelos para el escenario Mw 8.5 / 04666

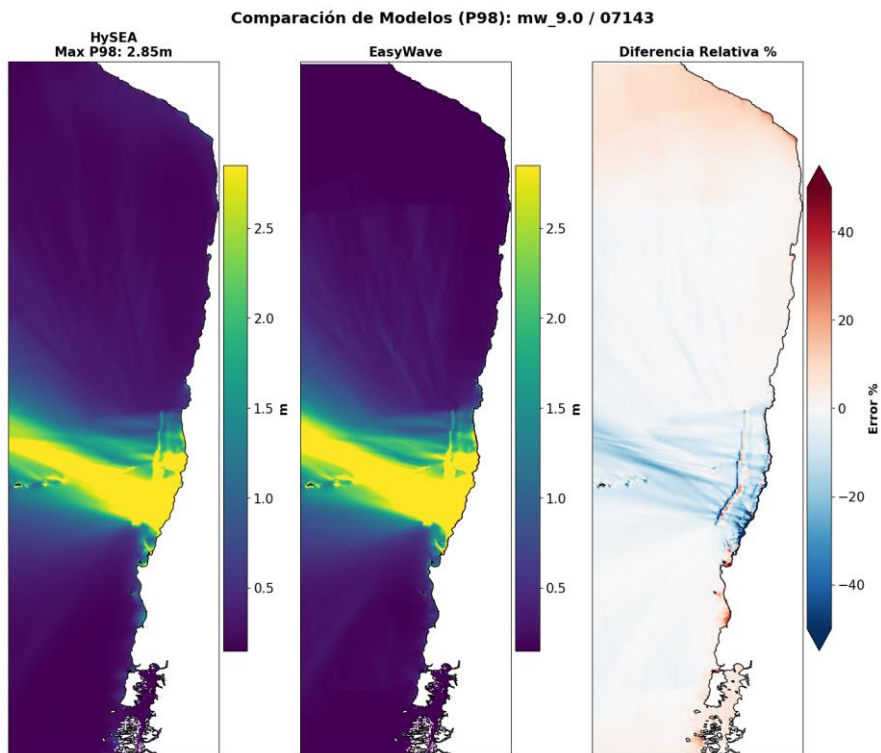


Ilustración 5: Comparación de modelos para el escenario Mw 9.0 / 07143

7.2 Comparación cuantitativa de alturas máximas

La Tabla 2 presenta un resumen estadístico de las 1500 simulaciones de tsunamis realizadas, agrupadas por magnitud de momento. Su objetivo es comparar el desempeño del modelo simplificado frente al modelo complejo de referencia, centrándose en la altura máxima de ola alcanzada. La tabla detalla la magnitud del evento, el promedio de alturas máximas obtenidas por ambos modelos, el valor de altura máxima absoluta registrada por HySEA para cada magnitud y la diferencia relativa porcentual. Esta última métrica fue normalizada considerando el escenario más desfavorable de cada grupo, según la siguiente expresión:

$$Error\% = \frac{\bar{H}_{HySEA} - \bar{H}_{Easywave}}{H_{maxHySEA}} \quad (1)$$

Donde:

- \bar{H}_{HySEA} y $\bar{H}_{Easywave}$ son los promedios de altura máxima para la magnitud dada.
- $H_{maxHySEA}$ es la altura máxima absoluta registrado por HySEA para cada magnitud

Tabla 2: Comparación de alturas máximas simuladas por los modelos Tsunami-HySEA y EasyWave para las 1500 simulaciones

Magnitud (Mw)	Promedio HySEA (m)	Promedio EasyWave (m)	Altura máxima HySEA (m)	Diferencia Relativa (%)
7.5	1.12	0.75	2.72	13.60
7.6	1.30	0.86	3.17	13.72
7.7	1.68	1.01	3.69	18.04
7.8	1.94	1.35	4.42	13.36
7.9	2.51	1.67	6.58	12.82
8.0	3.17	2.19	7.76	12.73
8.3	5.15	3.47	8.92	18.82
8.4	5.66	3.80	12.00	15.57
8.5	7.11	4.82	14.98	15.32
8.6	7.98	5.70	15.10	15.10
8.7	9.32	6.35	19.39	15.29
8.8	11.87	8.14	20.65	18.08
8.9	14.97	10.54	21.84	20.30
9.0	18.61	12.71	28.47	20.73
9.1	24.33	17.42	42.66	16.18
9.2	29.83	21.66	45.35	18.03
9.3	38.27	28.61	47.60	20.30
9.4	46.36	37.00	54.51	17.18

El análisis de los resultados revela que, en el 100% de las magnitudes evaluadas, la diferencia relativa es positiva, lo que indica que los promedios de altura de HySEA son superiores a los de EasyWave. Este comportamiento confirma la tendencia del modelo lineal al subestimar la amplitud de la ola, tal como se mencionó en secciones anteriores.

Asimismo, se observa una correlación directa entre el error y la magnitud del evento sísmico. A medida que aumenta la magnitud del sismo, las discrepancias entre ambos modelos se incrementan. Este comportamiento se explica porque, en escenarios de mayor energía, caracterizados por amplitudes y velocidades de propagación más elevadas, los efectos no lineales, tales como la fricción de fondo, adquieren un rol dominante en la respuesta hidrodinámica. La ausencia de estos términos en la formulación matemática de EasyWave provoca que sus predicciones se alejen en mayor medida de la solución proporcionada por HySEA, especialmente en eventos de gran magnitud.

7.3 Análisis de sensibilidad en función de la magnitud

La Ilustración 6 presenta la evolución del error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo medio (BIAS) de EasyWave en función de la magnitud del evento sísmico. El objetivo de este análisis es evaluar cómo varía la precisión y exactitud del modelo simplificado, a medida que aumenta la energía del sismo.

Para garantizar la robustez de los resultados, el análisis omitió zonas sin datos y se centró exclusivamente en los puntos de interés válidos a lo largo de la costa, comparando punto a punto las estimaciones de EasyWave frente a los resultados de referencia de HySEA.

El cálculo para cada escenario individual se realizó de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{EasyWave,i} - H_{HySEA,i})^2} \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{EasyWave,i} - H_{HySEA,i}) \quad (3)$$

N representa el número total de puntos costeros válidos analizados por escenario y H corresponde a la altura máxima de la ola registrada en el punto i.

Finalmente, para construir las curvas de tendencia del gráfico, los valores resultantes de cada escenario individual fueron promediados y agrupados según su magnitud.

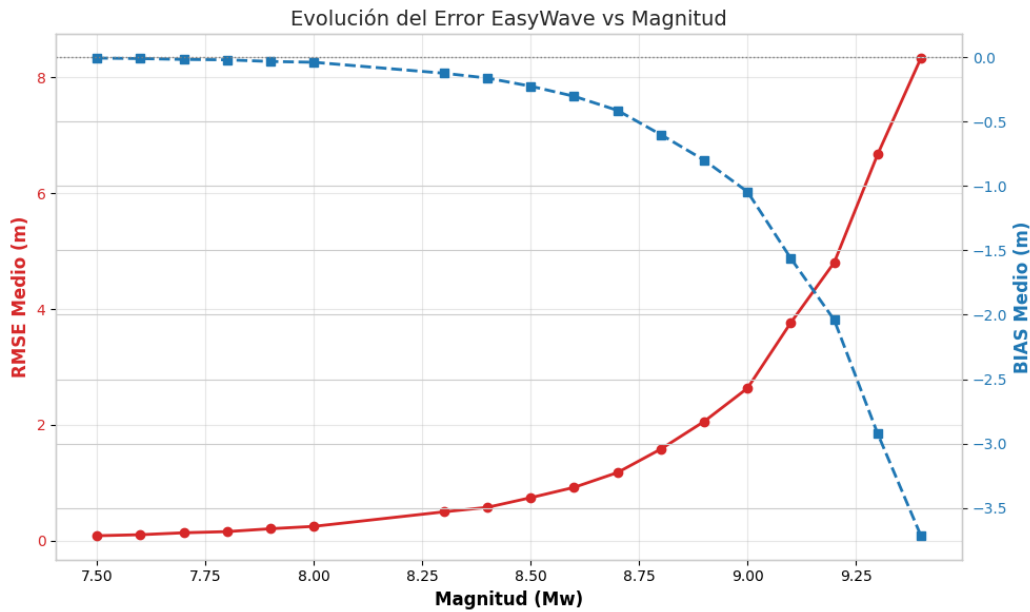


Ilustración 6: Evolución del RMSE y BIAS medio de EasyWave vs la Magnitud

Los resultados de la ilustración anterior revelan que el desempeño de EasyWave es dependiente de la energía del evento sísmico, observando una progresión continua en su precisión.

Para sismos con magnitudes inferiores a 8.0, el modelo demuestra una alta precisión y validez lineal. En este rango, el RMSE se mantiene por debajo de 0.25 m, y el BIAS es prácticamente despreciable. Debido a que las amplitudes de onda generadas son relativamente pequeñas, las hipótesis de las ecuaciones lineales de aguas someras se cumplen adecuadamente. La pérdida de energía por fricción de fondo es mínima, permitiendo que EasyWave replique con alta exactitud los resultados del modelo no lineal de referencia.

Sin embargo, a medida que la magnitud aumenta hacia el rango entre 8.3 y 8.6, se observa el inicio de una desviación, en la cual el RMSE escala progresivamente desde 0.50 m hasta acercarse a la unidad, mientras que el BIAS comienza a mostrar una clara tendencia a la subestimación. Este deterioro ocurre porque, al aumentar la magnitud, el volumen de agua desplazado y la velocidad de la onda crecen, haciendo que los efectos no lineales en aguas costeras comiencen a tener mayor relevancia matemática, fenómenos que la arquitectura lineal de EasyWave no está diseñada para resolver.

Esta limitación se vuelve crítica en eventos extremos de magnitud igual o superior a 8.7, donde los resultados evidencian un déficit severo en la capacidad predictiva de las alturas máximas por parte del modelo simplificado. En este régimen, el RMSE crece de forma exponencial, alcanzando errores significativos de hasta 8.35 metros en el escenario de magnitud 9.4. Simultáneamente, el BIAS negativo alcanza valores de hasta -3.60 metros, lo que confirma una subestimación peligrosa de la amenaza real. Durante estos eventos extremos, las olas sufren transformaciones drásticas al interactuar con la batimetría costera. La ausencia de los términos de fricción de fondo y advección en EasyWave provoca que el modelo no logre representar adecuadamente la física del run-up y la ruptura de olas de gran magnitud.

La Ilustración 7 presenta un diagrama de dispersión global que correlaciona las alturas máximas de ola estimadas por EasyWave frente a los valores de referencia calculados por HySEA para los cerca de 1.500 escenarios simulados. El objetivo de este gráfico es visualizar el grado de concordancia general entre ambos modelos y evaluar la magnitud de las desviaciones respecto a una equivalencia ideal, ilustrada mediante la línea diagonal punteada.

Los datos graficados, corresponden a los puntos de interés costeros máximos y válidos, excluyendo anomalías numéricas o zonas sin información. Por lo que, cada punto representa un escenario sísmico particular, categorizado por un gradiente de color según su magnitud.

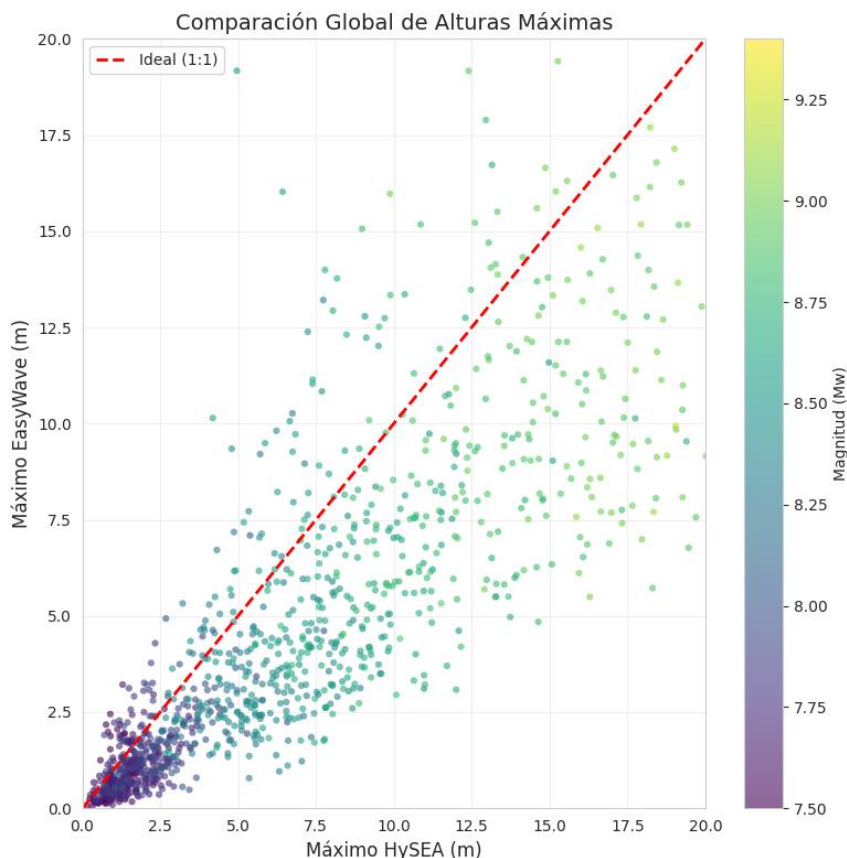


Ilustración 7: Dispersión global de alturas máximas de EasyWave frente a HySEA

De la ilustración anterior se observa que, en la zona cercana al origen del gráfico, los datos muestran una baja dispersión y una fuerte adherencia a la recta ideal. Esto demuestra que, para eventos de menor energía, las simplificaciones del modelo lineal son altamente válidas y su precisión es comparable a la del modelo de referencia. Sin embargo, a medida que nos desplazamos hacia valores mayores en el eje X, se produce una severa apertura en la nube de puntos. La dispersión aumenta drásticamente y los datos se alejan cada vez más hacia abajo de la línea de referencia. En los escenarios más extremos, mientras HySEA proyecta valores que superan los 15 o 20 metros, EasyWave entrega predicciones que apenas representan una fracción de dicha altura.

Al igual que ocurre con la Ilustración 6, este efecto representa una limitación del modelo. A medida que la ola crece en tamaño y energía, procesos no lineales se vuelven factores principales del comportamiento de la onda en la costa. Al carecer de estas variables matemáticas, EasyWave es incapaz de representar la ola en la misma proporción que HySEA, lo que genera ese déficit vertical tan pronunciado en el gráfico para los mega-sismos.

7.4 Análisis de sensibilidad en función de la profundidad

La Ilustración 8 presenta la distribución estadística del sesgo (BIAS) de EasyWave en función de la profundidad batimétrica local de los puntos de interés. El objetivo de este gráfico es mostrar, mediante un diagrama de caja, la sensibilidad topográfica del modelo simplificado y determinar sus límites de funcionamiento a medida que la onda del tsunami interactúa con el fondo marino.

Para este análisis, los datos fueron categorizados en siete rangos de profundidad, desde aguas someras, hasta un océano profundo mayor a 1000 metros. Esta representación permite examinar no solo el valor central de la desviación, sino también la dispersión e incertidumbre de las predicciones en distintos escenarios batimétricos.

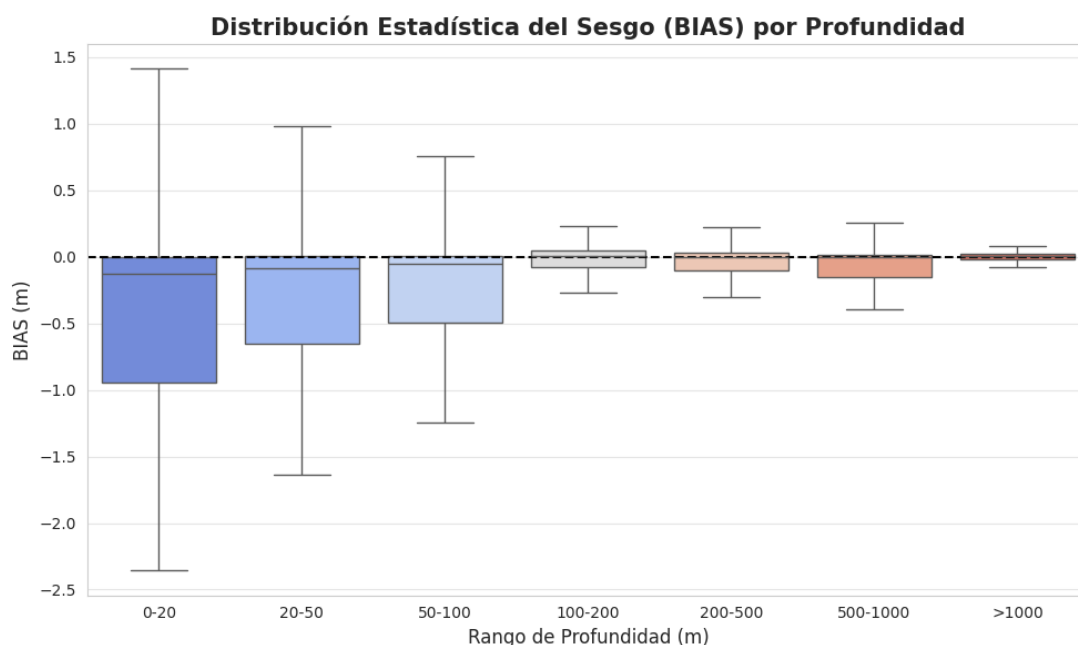


Ilustración 8: Diagrama de caja del sesgo (BIAS) de EasyWave en función de la profundidad

El análisis de los resultados revela que, en profundidades superiores a los 1000 metros, EasyWave presenta una precisión excepcional. En esta zona de aguas profundas, la desviación media es prácticamente nula, registrando una mediana de 0.004 m y un rango intercuartílico sumamente acotado. Físicamente, este comportamiento indica que en mar abierto la amplitud de la onda es minúscula en comparación con la columna de agua. Bajo estas condiciones, las ecuaciones lineales de aguas someras resultan bien precisas, dado que las velocidades de flujo son bajas y la interacción con el lecho marino es inexistente, permitiendo que el modelo simplificado replique fielmente la propagación de ola calculada por HySEA.

Sin embargo, a medida que la onda transita hacia menores profundidades, el desempeño del modelo experimenta una degradación progresiva. Si bien en rangos intermedios la mediana de los errores se mantiene cercana a cero, el BIAS medio comienza a aumentar de forma negativa y la dispersión de los datos aumenta moderadamente, evidenciando que la onda empieza a verse afectada por la fricción del fondo oceánico. Esta pérdida de capacidad predictiva se intensifica drásticamente al ingresar a batimetrías menores de 50 metros, volviéndose crítica en el rango de 0 a 20 metros.

En esta zona de aguas someras, los efectos no lineales se maximizan, provocando que el sesgo medio negativo se dispare hasta alcanzar valores superiores a un metro. Esto evidencia una subestimación severa y sistemática de la altura de la ola por parte del modelo lineal, atribuible a su incapacidad física para resolver fenómenos no lineales con la misma eficacia que HySEA, justo en la zona costera donde el peligro de inundación es mayor.

7.5 Análisis de sensibilidad en función de la zona geográfica

Las siguientes ilustraciones y la respectiva tabla presentan la distribución espacial del sesgo medio (BIAS) calculado para los puntos de interés, segmentando el dominio de estudio en tres grandes macrozonas geográficas: Norte, Centro y Sur.

El valor asignado a cada punto corresponde al promedio de las diferencias de altura registradas a lo largo de las simulaciones para cada magnitud. Para facilitar la interpretación de estos datos, los mapas emplean una escala de colores, en donde las tonalidades rojas indican que el modelo simplificado sobreestima la altura de la ola, mientras que las tonalidades azules evidencian una subestimación. Esta representación permite identificar cómo la topografía submarina y la morfología costera específica de cada región influyen en el desempeño del modelo lineal.

Al analizar la distribución de los datos, particularmente en la macrozona Centro, destaca la presencia de un grupo aislado respecto a la línea costera continental, ubicado en torno a las coordenadas 33.5° S y 79.2° W. Estos puntos corresponden al Archipiélago de Juan Fernández. Observar el comportamiento del modelo en estos territorios insulares, en contraste con las variaciones a lo largo de las costas continentales del Norte y del Sur, proporciona una visión integral sobre los límites físicos de la aproximación lineal de EasyWave.

Tabla 3: Sesgo medio espacial por magnitud, segmentando por macrozonas

Magnitud (Mw)	Bias Norte (m)	Bias Centro (m)	Bias Juan Fdez. (m)	Bias Sur (m)
7.5	-0.009	-0.015	-0.015	0.005
7.6	-0.011	-0.018	-0.009	-0.001
7.7	-0.017	-0.030	-0.016	0.000
7.8	-0.021	-0.034	-0.022	0.000
7.9	-0.033	-0.052	-0.027	-0.006
8.0	-0.038	-0.065	-0.048	-0.002
8.3	-0.153	-0.191	-0.056	-0.024
8.4	-0.176	-0.258	-0.065	-0.044
8.5	-0.268	-0.309	-0.068	-0.091
8.6	-0.410	-0.433	-0.095	-0.080
8.7	-0.491	-0.604	-0.114	-0.154
8.8	-0.563	-0.930	-0.140	-0.307
8.9	-1.208	-0.914	-0.152	-0.360
9.0	-1.060	-1.552	-0.249	-0.547
9.1	-1.608	-2.582	-0.409	-0.602
9.2	-3.097	-2.549	-0.415	-0.807
9.3	-4.297	-4.385	-0.603	-0.674
9.4	-4.880	-5.351	-0.842	-1.494

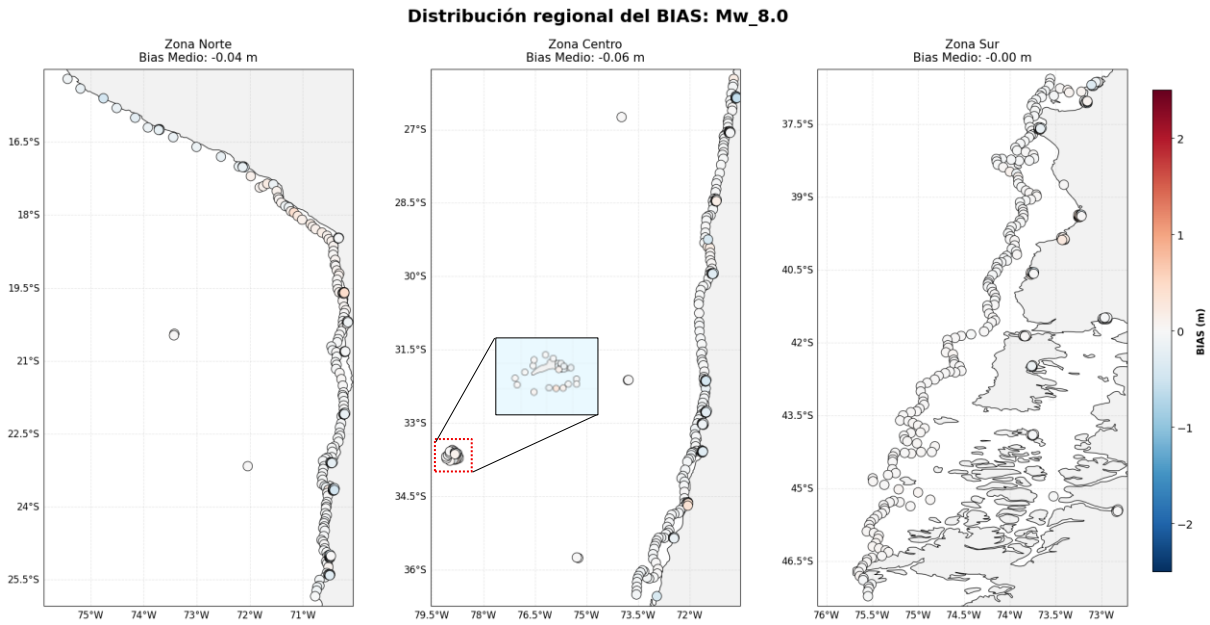


Ilustración 9: Distribución regional de sesgo para magnitud 8.0

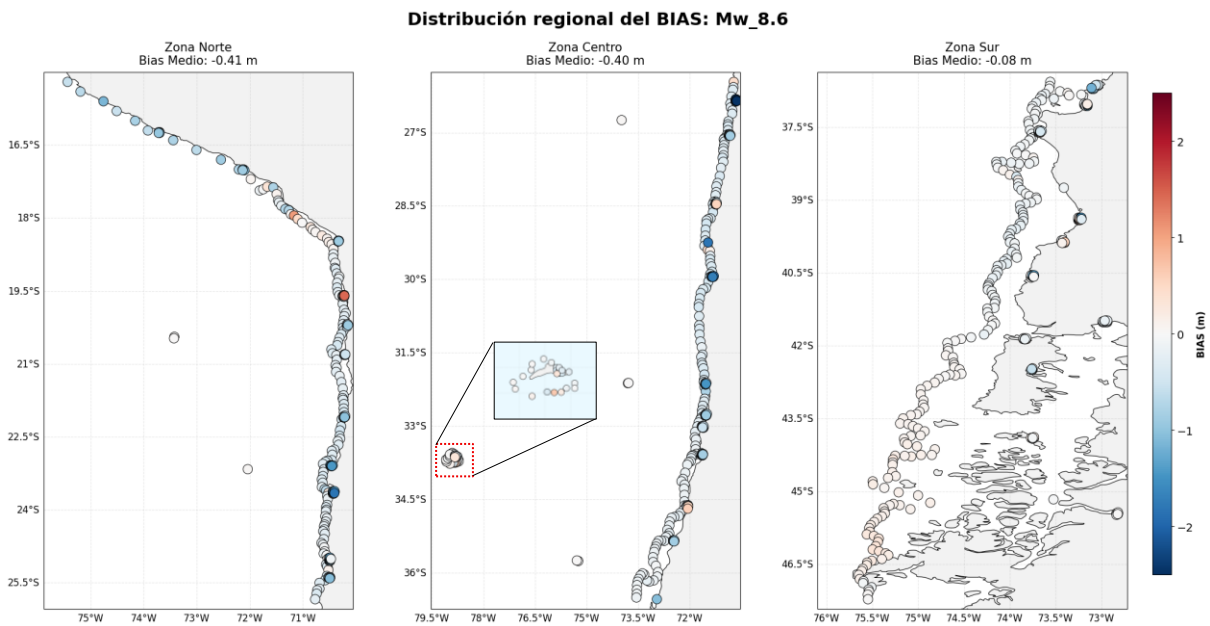


Ilustración 10: Distribución regional de sesgo para magnitud 8.6

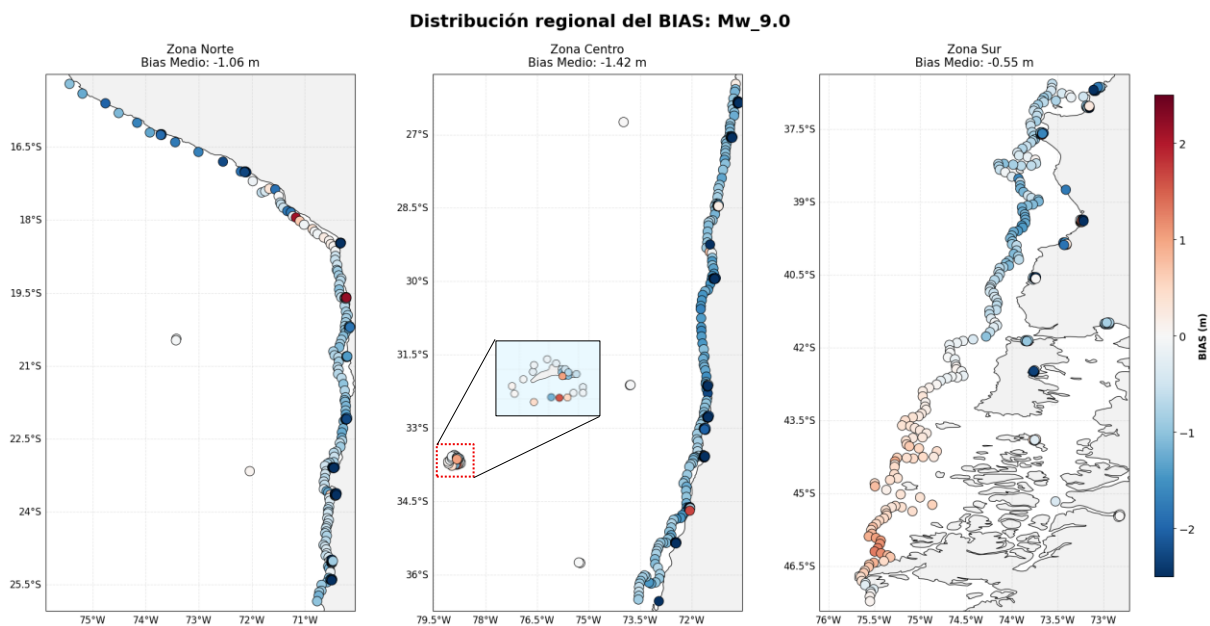


Ilustración 11: Distribución regional de sesgo para magnitud 9.0

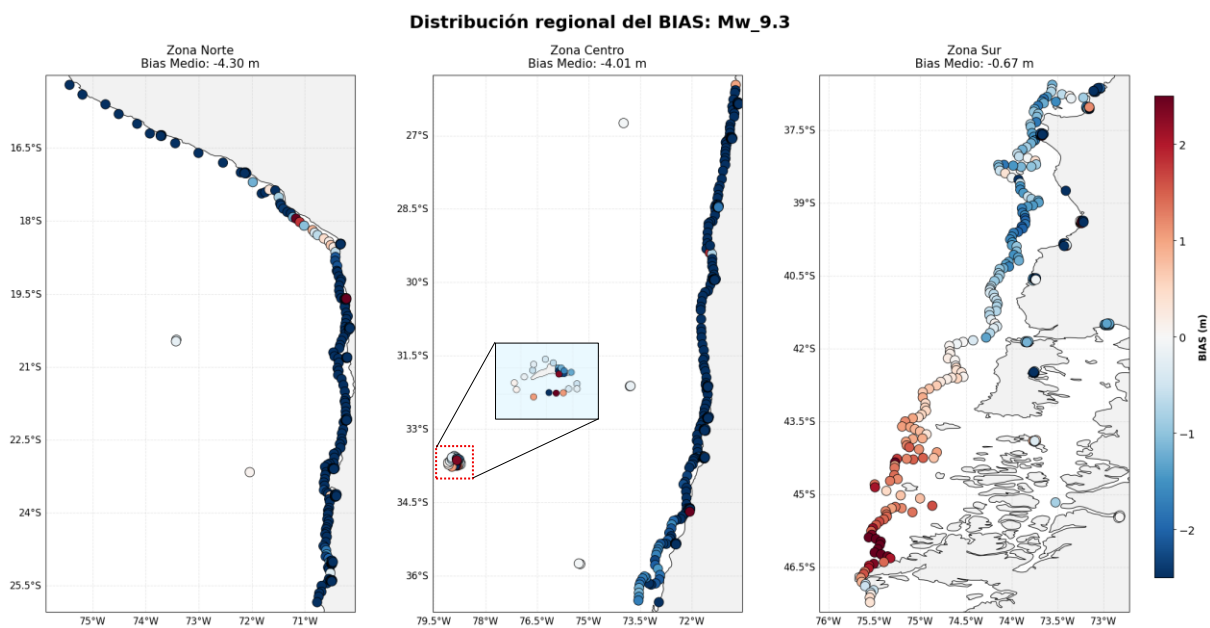


Ilustración 12: Distribución regional de sesgo para magnitud 9.3

Los resultados estadísticos detallados en la Tabla 3 exponen el sesgo medio espacial de las simulaciones, segmentando en las macrozonas Norte, Centro y Sur. Si bien la progresión numérica del error sugiere ciertas tendencias, el análisis integrado con las representaciones espaciales de las Ilustración 9 a Ilustración 12, revela que la dependencia topográfica del modelo simplificado es mucho más compleja y deficiente de lo que indican los promedios globales.

La vulnerabilidad estructural del modelo es evidente en las macrozonas Centro y Norte. En estas áreas, el sesgo medio alcanza niveles críticos de subestimación, promediando -5.35 m en la zona central para eventos extremos. Al observar los mapas de distribución, esta tendencia se manifiesta de manera homogénea a lo largo de la costa expuesta. Físicamente, esto responde a la presencia de un proceso altamente no lineal que la formulación matemática de EasyWave es incapaz de reproducir, provocando que la altura de la ola no logre amplificarse correctamente antes de llegar a la costa.

Por otro lado, la evaluación de los resultados en la macrozona Sur y en el territorio insular requiere especial cautela estadística. Aunque la Tabla 3 muestra valores de sesgo medio considerablemente menores para estas zonas, sugiriendo una aparente atenuación del error, las ilustraciones demuestran que esta métrica es el resultado de un efecto de compensación matemática o cancelación espacial. En la zona Sur, los mapas del escenario Mw 9.3 revelan una fuerte subestimación en la costa oceánica expuesta, que coexiste con una severa sobreestimación en las aguas interiores. Al promediar la región completa, los extremos positivos y negativos se anulan entre sí, ocultando la incapacidad de EasyWave para modelar la resonancia hidrodinámica y la disipación en topografías complejas.

Este mismo fenómeno de cancelación espacial explica los resultados obtenidos en el Archipiélago de Juan Fernández. La visualización de los puntos de interés insulares muestra la formación de fuertes dipolos de error, alternando drásticas sobreestimaciones y subestimaciones en torno a la isla. En consecuencia, el modelo simplificado no mantiene su validez predictiva en territorios insulares; los resultados visuales confirman que EasyWave compromete la estimación del peligro, independientemente de que el error promedio de la zona tienda a cero debido a la cancelación espacial.

7.6 Análisis de enfoque PTHA y propuesta de ajuste

En el contexto de la Evaluación Probabilística de Amenaza de Tsunami (PTHA), un modelo numérico, además de poseer alta eficiencia computacional, también debe ser seguro para la toma de decisiones. Para evaluar esta seguridad, se analizó la tasa de fallo crítico y de falsa alarma; estos porcentajes indican cuándo el modelo simplificado subestimarán una alerta de evacuación cuando el modelo de referencia sí la emitió, y cuándo EasyWave determinará que hay que evacuar cuando HySEA no lo hace, considerando un umbral crítico de 1 metro.

Tabla 4: Tasa de fallo crítico, falsa alarma y propuesta de ajuste para cada magnitud y zona

Magnitud	Zona	Tasa de Fallo Crítico	Tasa Falsa Alarma	Factor aplicado	Tasa de Fallo Crítico con ajuste %	Tasa Falsa Alarma con ajuste %
7.5	Norte	93.48	0.25	1.47	82.61	0.40
	Centro	98.31	0.01	1.63	79.66	0.19
	Sur	73.33	0.16	1.17	73.33	0.22
8.0	Norte	69.19	1.04	1.16	64.93	1.38
	Centro	67.92	0.06	1.29	59.25	0.40
	Sur	48.39	1.86	1.00	48.39	1.86
8.6	Norte	60.87	2.57	1.34	56.7	3.95
	Centro	70.64	0.25	1.63	57.64	2.61
	Sur	55.32	2.41	1.09	53.9	3.45
9.0	Norte	50.86	6.42	1.15	48.24	8.05
	Centro	54.72	1.75	1.77	33.54	21.68
	Sur	27.11	10.44	1.28	21.81	17.35
9.3	Norte	39.49	21.54	1.20	38.55	27.77
	Centro	27.53	4.73	1.79	24.32	53.85
	Sur	21.82	1.00	1.19	21.34	27.23

Los resultados mostrados en la Tabla 4 del modelo base revelan un riesgo inaceptable para la gestión de emergencias, particularmente en las costas continentales. Para magnitudes moderadas, la tasa de fallo crítico en la macrozona Centro superó el umbral del 90%, lo que en la práctica significa que EasyWave es ciego al peligro en esas condiciones. Incluso frente a eventos de gran magnitud, la tasa de fallo en el Norte y Centro osciló peligrosamente entre el 27% y el 55%. Esto significa que el modelo en su estado original presentó un desempeño deficiente, con una tasa de fallo crítico elevada.

Para corregir esto, se desarrolló una propuesta de ajuste, el cual consiste factores de multiplicación regionalizados. Para esto se consideraron distintos filtros físicos y batimétricos. La base de esta estrategia radicó en la restricción batimétrica, dado que como se evidenció en los análisis espaciales, EasyWave presenta un desempeño aceptable en aguas profundas, pero su capacidad predictiva colapsa drásticamente al ingresar a la costa. Por consiguiente, los factores de corrección se calibraron y aplicaron de manera exclusiva en aquellos puntos de interés con profundidades menores o iguales a 50 metros. Aplicar un factor de amplificación generalizado a todo el dominio habría corrompido artificialmente las estimaciones en aguas profundas, disparando de manera injustificada la tasa de falsas alarmas. Adicionalmente, el cálculo de estos amplificadores se restringió mediante filtros de calidad de datos para garantizar la robustez estadística de la mediana en cada zona. Se descartaron perturbaciones reales menores a 5 centímetros, entendiéndolas como ruido de fondo irrelevante para el análisis, y se impuso un techo físico de ola de 20 metros para descartar anomalías o inestabilidades numéricas extremas que pudiesen sesgar el ajuste.

A pesar de los filtros implementados para poder aplicar la corrección batimétrica óptima, los resultados revelan que la propuesta logró reducir solo parcialmente las tasas de fallo crítico. El modelo EasyWave ajustado mantiene una tasa de fallo crítico inaceptablemente alta para los estándares de la protección civil. Al observar el comportamiento en escenarios críticos, como el evento magnitud 9.0 en la macrozona Centro, el factor de amplificación superior a 1.7 logra reducir el error base, pero el sistema continúa arrojando un 33.5% de falsos negativos. Esto significa que, aun con el mejor ajuste empírico posible, el modelo sigue siendo ciego y omite la alerta en uno de cada tres tsunamis severos y va empeorando a medida que la magnitud del sismo disminuye.

Este déficit numérico persistente demuestra que la aproximación de las Ecuaciones Lineales de Aguas Someras no se limita a subestimar la magnitud del evento de forma proporcional, sino que pierde información hidrodinámica vital sobre la amenaza que no puede ser recuperada mediante simples multiplicadores escalares. La literatura científica establece que existen fenómenos costeros inherentemente complejos que alteran la energía de la onda de formas tan dinámicas que un ajuste lineal resulta teórica y matemáticamente insuficiente. Entre estos procesos destacan: el asomeramiento, etapa en la cual la teoría lineal asume erróneamente un crecimiento continuo de la ola y omite los efectos no lineales de disipación y rotura al acercarse a la costa (Synolakis et al., 2008) y la resonancia costera en cuencas semicerradas, donde el uso de ecuaciones linealizadas resulta inapropiado, ya que, al ignorar fenómenos disipativos no lineales como la fricción de fondo, el modelo genera concentraciones irreales de energía (Bellotti, 2007).

8 Conclusiones

A partir del análisis realizado en esta investigación, se establece que el error del modelo simplificado EasyWave no obedece a una dispersión aleatoria, sino que es estrictamente proporcional al grado de no-linealidad que experimenta el tsunami en su propagación. Esta limitación se acentúa significativamente en zonas de menor profundidad, ya que el aumento del sesgo predictivo y de la dispersión de los datos en cotas inferiores a los 50 metros de profundidad encuentra su justificación física en el fenómeno de asomeramiento.

Al ingresar a la zona continental y disminuir drásticamente la profundidad, la onda disminuye su velocidad y compensa esta pérdida concentrando su energía, lo que fuerza un incremento abrupto en la altura de la columna de agua. Este proceso intensifica la fricción con el lecho marino e induce fenómenos de advección, los cuales están regidos por términos matemáticos no lineales. Al carecer de estos términos físicos en sus ecuaciones, EasyWave no logra calcular la amplificación real de la ola al interactuar con pendientes costeras pronunciadas, resultando en promedios y medianas significativamente sesgados hacia errores negativos en la línea de costa.

En consecuencia, la evidencia estadística e hidrodinámica recopilada a lo largo de este estudio es determinante. Dado que EasyWave carece de la robustez física y matemática necesaria para resolver los procesos críticos de transformación de la onda en aguas someras, se descarta categóricamente su uso como una herramienta segura e idónea para sustentar un enfoque de Evaluación Probabilística de Amenaza de Tsunami (PTHA). La investigación demuestra, en definitiva, que la innegable ventaja de la eficiencia y velocidad computacional del modelo no puede compensar ni justificar la omisión de la física no lineal cuando la precisión en la estimación del peligro compromete directamente la toma de decisiones y la protección de zonas costeras pobladas.

9 Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, por brindarme su apoyo incondicional, tanto emocional como económico, a lo largo de todo este proceso universitario. A mis hermanos por su constante preocupación de saber como me iba en los ramos semestre a semestre. A mis amigos, que siempre estuvieron a mi lado tanto en los momentos buenos como malos, convirtiéndose en mi vía de escape frente al estrés y los momentos difíciles.

Un agradecimiento muy especial a mi profesor guía, Patricio Catalán. Desde aquella primera clase, logró demostrarme que la ingeniería hidráulica podía ser tan fascinante e increíble como la ingeniería estructural. Quiero agradecerle sinceramente por su orientación y sobre todo, por la tremenda paciencia que me tuvo durante todo el desarrollo de esta investigación.

10 Referencias

- Babeyko, A., & German, G. (n.d.). EasyWave: About for EasyWave.
- Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado-Gálvez, M. A., Sørensen, M., Abadie, S., Aguirre-Ayerbe, I., Aniel-Quiroga, I., Babeyko, A., Baiguera, M., Basili, R., Belliazzi, S., Grezio, A., Johnson, K., Murphy, S., Paris, R., Rafliana, I., De Risi, R., ... Vyhmeister, E. (2021). Probabilistic Tsunami Hazard and Risk Analysis: A Review of Research Gaps. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 9). <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>
- Bellotti, G. (2007). Transient response of harbours to long waves under resonance conditions. *Coastal Engineering*, 54(9), 680–693. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.02.002>
- Francisco Javier Migliaro Gajardo. (2019). Performance assessment of the Tsunami-HySEA model for NTHMP tsunami currents benchmarking. Laboratory data. *Coastal Engineering*, 158, 103667.
- Harig, S., Zamora, N., Gubler, A., & Rakowsky, N. (2022a). Systematic Comparison of Tsunami Simulations on the Chilean Coast Based on Different Numerical Approaches. *GeoHazards*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/geohazards3020018>
- Harig, S., Zamora, N., Gubler, A., & Rakowsky, N. (2022b). Systematic Comparison of Tsunami Simulations on the Chilean Coast Based on Different Numerical Approaches. *GeoHazards*, 3(2), 345–370. <https://doi.org/10.3390/geohazards3020018>
- Kowalik, Z., & Murty, T. S. (1993). Numerical Modeling of Ocean Dynamics. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1142/1970>
- Kristina, W., Bokhove, O., & Van Groesen, E. (2014). Effective coastal boundary conditions for tsunami wave run-up over sloping bathymetry. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21(5), 987–1005. <https://doi.org/10.5194/NPG-21-987-2014>
- Lagos, M. (2001). Tsunamis de Origen Cercano a las Costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27.
- Macías, J., Castro, M. J., Manuel González-Vida, J., De La Asunción, M., & Ortega, S. (2014). HySEA: An operational GPU-based model for Tsunami Early Warning Systems. *Geophysical Research Abstracts*, 16.
- Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C., & González-Vida, J. M. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8). <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1583-1>
- Macías, J., Mercado, A., González-Vida, J. M., Ortega, S., & Castro, M. J. (2016). Comparison and Computational Performance of Tsunami-HySEA and MOST Models for LANTEX 2013 Scenario: Impact Assessment on Puerto Rico Coasts. *Pure and Applied Geophysics* 2016 173:12, 173(12), 3973–3997. <https://doi.org/10.1007/S00024-016-1387-8>
- Maremoto | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. (n.d.). Retrieved September 8, 2025, from <https://dle.rae.es/maremoto>
- Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kânoğlu, U., & González, F. I. (2008). Validation and Verification of Tsunami Numerical Models. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*, 2197–2228. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0057-6_11
- Tsunami glossary, 2019 - UNESCO Biblioteca Digital. (n.d.). Retrieved December 18, 2025, from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226>