

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**PRESENCIA DE RESONANCIA EN LA BAHÍA DE
PISCO, PERÚ DURANTE EL TSUNAMI DEL 15
DE AGOSTO 2007**

Memoria de Título presentada por
CRISTÓBAL EDUARDO MARDONES RIOSECO

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca



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: Presencia de Resonancia en la bahía de Pisco, Perú durante el tsunami del 15 de agosto 2007

Nombre del candidato(a): Cristóbal Eduardo Mardones Rioseco

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Patricio Andrés Catalán Mondaca, 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: 15/10/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/10/2025

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.

CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	2
2.	INTRODUCCIÓN.....	3
3.	ESTADO DEL ARTE.....	6
3.1	Resonancia.....	7
3.2	Análisis espectral.....	9
3.3	Separación fuente-batimetría	10
3.4	Identificación empírica de modos resonantes.....	11
4.	OBJETIVOS	13
	Objetivo General:.....	13
	Objetivos Específicos:	13
5.	METODOLOGÍA	14
5.1	Fuente de datos y procesamiento.....	14
5.2	Identificación de modos resonantes mediante modelación numérica	15
5.3	Comparación espectral e inferencia para el evento de 2007	17
6.	RESULTADOS	18
6.1	Espectro de fondo anual	18
6.2	Configuración de las fuentes sismo-genéticas.....	19
6.3	Resultados de simulaciones numéricas	20
7.	DISCUSIÓN.....	25
7.1	Sensibilidad de la respuesta ante distintas fuentes	25
7.2	Consistencia entre el espectro de fondo y los modos resonantes de la bahía	26
7.3	Comparación con estudios previos (resonancia en el norte de Chile).....	27
8.	CONCLUSIONES.....	29
9.	AGRADECIMIENTOS	31
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	32



1. RESUMEN

La resonancia generada por tsunamis en bahías y puertos puede incrementar de manera significativa los niveles de agua y prolongar las oscilaciones mucho después del paso de las olas iniciales, aumentando así el riesgo para las zonas costeras. En este trabajo se estudió la presencia de este fenómeno en la bahía de Pisco (Perú) durante el tsunami asociado al terremoto del 15 de agosto de 2007 (Mw 8,0), a partir del análisis espectral de registros mareográficos de fondo y de simulaciones numéricas.

A partir de un año completo de datos de la estación mareográfica de Pisco, se calculó el espectro de fondo, identificando siete picos persistentes. Los máximos de energía se ubicaron en períodos de 78,8 y 113,8 minutos, vinculados a oscilaciones de gran escala posiblemente asociadas a la plataforma continental. En el rango de períodos más cortos, se detectaron modos en 24,4 y 29,0 minutos, característicos de oscilaciones internas de la bahía, junto con componentes de menor energía en 17,9, 7,7 y 7,0 minutos. Estos modos fueron reproducidos en simulaciones armónicas, lo que permitió definir su patrón espacial y su relación con la morfología de la bahía y la plataforma adyacente.

Como escenario de modelación de tsunami se utilizó el evento del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú), empleando dos modelos de fuente sísmica propuestos por Adriano et al., (2011) y Jiménez et al., (2021). Ambos generaron patrones espaciales y temporales muy similares, y en los dos casos las frecuencias dominantes coincidieron con las del espectro de fondo.

La coincidencia entre los modos identificados y las frecuencias dominantes de las simulaciones indica que, durante el tsunami del 2007, la bahía de Pisco se comportó como una cavidad resonante, excitando tanto modos locales como regionales. Esto evidencia que la respuesta de la bahía estuvo controlada principalmente por su geometría y batimetría, más que por la configuración particular de la fuente sísmica.



2. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis constituyen una de las amenazas naturales más destructivas para las comunidades costeras, debido a su capacidad para transportar grandes volúmenes de agua en cortos períodos de tiempo y con escasa advertencia. A diferencia de otras amenazas como tormentas o marejadas, los tsunamis pueden generar impactos devastadores incluso en zonas alejadas del epicentro del sismo, como se ha observado en múltiples eventos a lo largo del cinturón de fuego del Pacífico (Rabinovich, 2009). Por esta razón, su estudio y caracterización resultan fundamentales para reducir el riesgo en regiones vulnerables.

El 15 de agosto de 2007, un terremoto de magnitud Mw 8.0 ocurrió frente a la costa de la región de Ica, Perú, generando un tsunami que afectó severamente a la bahía de Pisco y sus alrededores (INDECI, 2008). El evento provocó run-ups de hasta 6 metros, afectando infraestructura portuaria, embarcaciones y zonas residenciales costeras. Si bien la primera ola tuvo un impacto significativo, reportes técnicos y observaciones de campo sugieren que olas posteriores alcanzaron alturas aún mayores, fenómeno comúnmente asociado a procesos resonantes dentro de cuerpos de agua semicerrados (Fritz et al., 2008).

La Figura 2.1 muestra la ubicación de la región de Pisco y el epicentro del terremoto de 2007, destacando su proximidad a ciudades importantes como Ica y Lima. Esta cercanía permite apreciar la exposición directa de la bahía al tren de olas generado por el sismo.

Complementariamente, la Figura 2.2 muestra los niveles de run-up e inundación observados en la bahía de Pisco tras el evento, información recopilada en los reportes oficiales de INDECI. En este mapa se aprecia la extensión de las áreas afectadas, con máximos de inundación en sectores de San Andrés y Paracas, lo que evidencia el impacto significativo del tsunami a escala local.

Este comportamiento ha sido documentado en diversos eventos tsunámicos alrededor del mundo. En Chile, por ejemplo, se observó que las olas más destructivas del tsunami de Maule 2010 y Pisagua 2014 no fueron las primeras en llegar, sino que aquellas generadas decenas de minutos después del arribo inicial, lo cual ha sido atribuido a modos resonantes locales o de plataforma (Catalán et al., 2015). Este tipo de resonancia se produce cuando la frecuencia de las ondas entrantes coincide con los modos naturales de oscilación de una bahía, amplificando su energía de manera sostenida (Rabinovich, 1997).

En este contexto, la resonancia de tsunamis ha cobrado creciente interés en el estudio del peligro costero, ya que permite explicar por qué ciertas zonas reciben olas mucho más intensas que otras durante un mismo evento. Esta amplificación no depende únicamente de la magnitud del terremoto, sino también de factores locales como la forma de la costa, la pendiente de la plataforma continental y la profundidad del fondo marino (Cortés et al., 2017). Comprender estas interacciones permite anticipar zonas de mayor riesgo y diseñar medidas de mitigación más eficientes.





Figura 2.1. Ubicación del epicentro del terremoto de Pisco (15 de agosto de 2007) y ciudades cercanas. Fuente: BBC News.

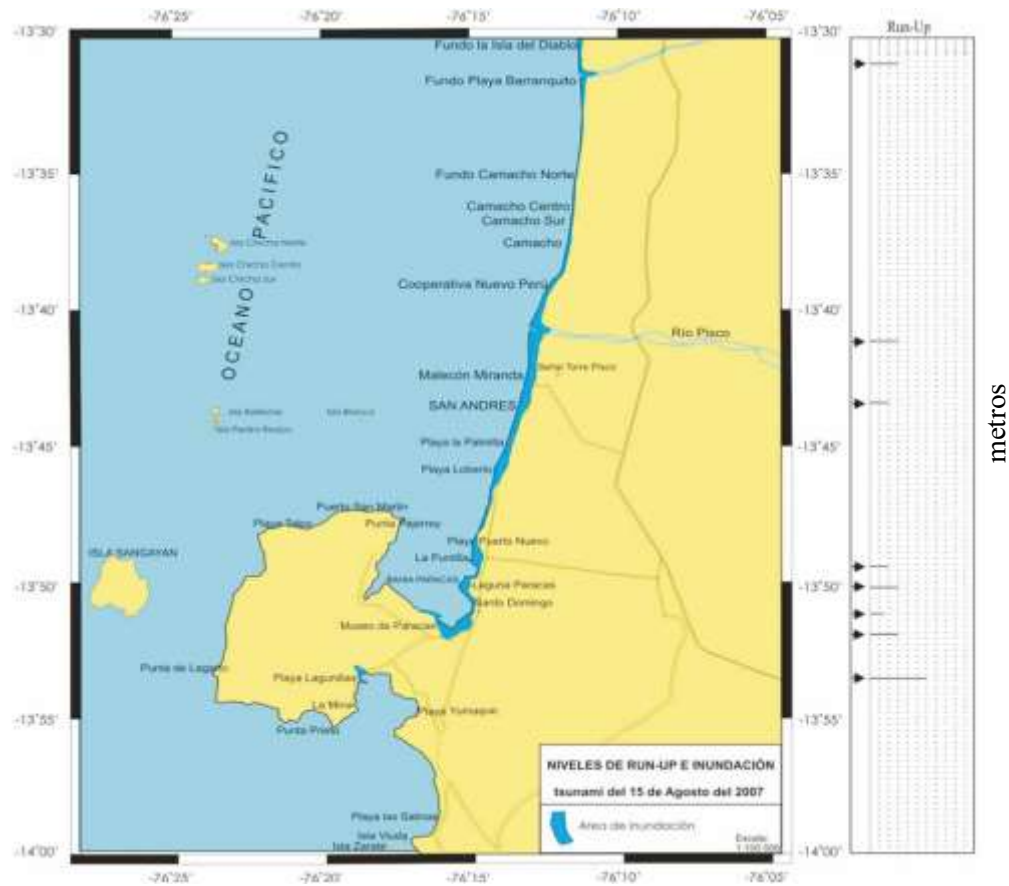


Figura 2.2. Niveles de run-up e inundación observados en la bahía de Pisco tras el tsunami del 15 de agosto de 2007. Fuente: INDECI (2008).



En Perú, y específicamente en la bahía de Pisco, aún existe escasa evidencia técnica sobre el comportamiento resonante durante el evento de 2007. La mayor parte de los estudios se han centrado en la caracterización sísmica o en los efectos físicos observados en superficie (Okal et al., 2006), dejando un vacío respecto a la respuesta espectral del sistema costero. Considerando las similitudes morfológicas con otras bahías donde se ha comprobado la existencia de modos resonantes amplificadores, surge la hipótesis de que la configuración batimétrica de Pisco podría haber generado resonancia, incrementando los efectos destructivos del tsunami.

Esta investigación busca identificar y caracterizar los modos resonantes de la bahía de Pisco asociados al tsunami del 15 de agosto de 2007, mediante una metodología que combina análisis espectral de registros mareográficos y modelación numérica. Así, se pretende aportar al conocimiento del peligro de tsunamis en la costa sur del Perú y contribuir a una mejor planificación del territorio y diseño de estrategias de mitigación.



3. ESTADO DEL ARTE

La región costera de Pisco, situada en el centro-sur de Perú, ha sido históricamente vulnerable a eventos sísmicos de gran magnitud que han generado tsunamis con consecuencias devastadoras. Según un estudio realizado por Okal (2006), se han documentado tsunamis significativos en los años 1687, 1746 y 1868, los cuales estuvieron asociados a altos niveles de destrucción en la zona. A través de un análisis probabilístico basado en la recurrencia histórica de estos eventos, Okal concluye que la bahía de Pisco podría experimentar tsunamis con daños significativos aproximadamente cada 53 años. Además, los eventos más catastróficos, que podrían generar run-ups de hasta 10 metros, tendrían una frecuencia media de 140 años.

Uno de los tsunamis más relevantes de las últimas décadas en esta zona ocurrió el 15 de agosto de 2007, tras un terremoto de magnitud Mw 8.0 frente a la costa de Ica. El evento produjo efectos destructivos en la ciudad de Pisco, con olas que impactaron con fuerza la infraestructura portuaria y zonas habitadas del borde costero (Fritz et al., 2008). Si bien la primera ola tuvo un efecto considerable, se observó que las olas posteriores presentaron alturas incluso mayores, fenómeno que ha sido documentado en otros eventos y que suele estar asociado a la excitación de modos resonantes locales y regionales (Catalán et al., 2015).

La resonancia de tsunamis es un fenómeno que puede amplificar significativamente las oscilaciones en cuerpos de agua semicerrados o con plataformas continentales pronunciadas. Se produce cuando las frecuencias de las ondas entrantes coinciden con los modos naturales de oscilación de la bahía o costa, lo que da lugar a una amplificación sostenida de la señal (Rabinovich, 1997). La importancia de este fenómeno ha sido destacada en estudios recientes de tsunamis como el de Tohoku (Japón) en 2011, el de Maule (Chile) en 2010, y el evento de Pisagua (Chile) en 2014, donde las mayores alturas de ola se registraron minutos después del arribo inicial, atribuyéndose a efectos resonantes tanto locales como de plataforma (Cortés et al., 2017).

En este contexto, se vuelve fundamental estudiar las características batimétricas y geomorfológicas locales, ya que son determinantes en la generación y comportamiento de los modos resonantes. Tal como lo demuestra el trabajo de Cortés (2017) en la costa norte de Chile, en particular en las ciudades de Arica e Iquique, la configuración de la plataforma continental y la pendiente del fondo marino dan origen a distintos tipos de resonancia: modos de bahía (asociados a oscilaciones locales) y modos de plataforma (más amplios, de mayor escala espacial).

Dado que la bahía de Pisco presenta características morfológicas similares a otras zonas costeras resonantes del Pacífico, como su curvatura, profundidad progresiva y conexión directa con una plataforma continental estrecha, resulta plausible pensar que también haya experimentado efectos de resonancia durante el evento de 2007. Sin embargo, hasta la fecha, existe escasa evidencia técnica publicada que evalúe específicamente el



comportamiento resonante de esta bahía durante dicho evento. Este vacío de conocimiento justifica la necesidad de desarrollar un estudio enfocado en analizar si la configuración batimétrica local contribuyó a la amplificación de las olas del tsunami de 2007, lo que permitiría mejorar la caracterización del peligro costero en esta zona.

3.1 Resonancia

La resonancia es un fenómeno fundamental para entender cómo ciertas zonas costeras pueden amplificar la energía de un tsunami, generando olas más grandes y destructivas que las que se observarían sin esta condición. Desde el punto de vista físico, se produce cuando la oscilación forzada generada por el tsunami coincide con los períodos naturales de vibración del sistema costero, generando interferencia constructiva y acumulación progresiva de energía. En términos simples, la bahía o plataforma actúa como un oscilador forzado, es decir, la energía entrante del tsunami no se disipa en una sola oscilación, sino que se va sumando en cada ciclo, lo que resulta en amplitudes crecientes que pueden sostenerse durante largos intervalos de tiempo.

De manera más formal, el período natural de oscilación de una bahía o plataforma puede aproximarse mediante expresiones analíticas simplificadas, que relacionan la geometría y profundidad media del sistema con su respuesta oscilatoria. Un enfoque clásico (Rabinovich, 1997) es estimar el período resonante como:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}} \quad (1)$$

donde L corresponde a la longitud característica de la bahía o del tramo de plataforma, H a la profundidad media, g a la aceleración de gravedad y n al número de modo excitado. Este tipo de formulación muestra que bahías largas y someras tienden a presentar períodos resonantes mayores, en rangos de decenas de minutos, mientras que cuencas pequeñas o profundas concentran su respuesta en períodos cortos. Así, el acoplamiento entre la señal incidente y la geometría local es el que define si la energía del tsunami se amplificará de forma significativa en esa localidad.

El fenómeno de resonancia en zonas costeras no responde exclusivamente a la energía generada por un sismo, sino que es el resultado de una interacción entre la señal del tsunami y la respuesta local del sistema geográfico. En este sentido, se ha reconocido que cada bahía, dependiendo de su forma, profundidad y tamaño, posee un conjunto característico de frecuencias naturales. Si la señal contiene energía en esas frecuencias, es posible que se genere una amplificación local significativa, aumentando el impacto destructivo en la zona.



En estudios recientes desarrollados en la costa chilena, se ha identificado la existencia de dos tipos principales de modos resonantes: los modos de bahía y los modos de plataforma (Bellotti et al., 2012). Los primeros corresponden a oscilaciones confinadas dentro de la propia bahía y se distinguen por períodos relativamente cortos, cuya magnitud depende de las dimensiones y características particulares de cada bahía. Estos modos están fuertemente condicionados por la geometría local, incluyendo la forma del contorno costero, la profundidad media y la presencia de salientes u obstáculos, y suelen manifestarse mediante patrones espaciales con nodos y antinodos bien definidos en escalas reducidas.

Por otro lado, los modos de plataforma corresponden a oscilaciones a mayor escala, en interacción con la plataforma continental. Estos modos presentan períodos más largos, del orden de 30 a 60 minutos o más, y responden a patrones regionales de propagación de ondas largas sobre la topografía submarina. Aunque su amplitud puede ser menor que la de los modos locales, su longitud de onda y energía asociada les permite interactuar con múltiples bahías simultáneamente, generando patrones espaciales complejos de amplificación.

La diferencia entre los modos locales y los modos de plataforma no es únicamente conceptual, sino que tiene efectos observables en registros reales. En el estudio hecho por Catalán en el 2015, centrado en el tsunami de Pisagua 2014, se identificaron frecuencias comunes entre distintas localidades del norte de Chile, lo que sugiere la existencia de un modo resonante de plataforma que afectaba a varias zonas de manera simultánea. Paralelamente, se detectaron frecuencias específicas en cada bahía, asociadas a modos locales, dependientes de la geometría y batimetría particular de cada sitio.

En términos prácticos, el fenómeno de resonancia puede explicar por qué, en muchos eventos de tsunamis las olas más destructivas no corresponden a la primera llegada, sino a oscilaciones posteriores que ocurren minutos después. Este comportamiento ha sido registrado en diversos eventos como el tsunami de Maule 2010 en Chile, el tsunami de Tohoku 2011 en Japón y el evento de Arica 1868, donde relatos históricos coinciden en que las olas más destructivas ocurrieron más de 30 minutos después del sismo (Okal et al., 2006).

La relevancia de la resonancia radica, por tanto, en su capacidad de amplificar selectivamente ciertas frecuencias presentes en el tsunami, condicionando de forma significativa el nivel de peligro costero en cada localidad. Este fenómeno, que depende fuertemente de la batimetría y forma del borde costero, es central para entender cómo una misma señal de tsunami puede tener impactos radicalmente distintos en diferentes puntos de la costa.



3.2 Análisis espectral

El análisis espectral es una herramienta fundamental en el estudio de tsunamis, ya que permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia, revelando con precisión la presencia de posibles fenómenos de resonancia. Al analizar un registro mareográfico mediante transformadas de Fourier, se obtiene el espectro de energía, en el cual los picos indican frecuencias predominantes en la señal. Si esas frecuencias coinciden con los períodos naturales de oscilación de una bahía o plataforma continental, es posible que se esté observando un comportamiento resonante (Rabinovich, 1997).

Uno de los principales aportes del análisis espectral es su capacidad para distinguir entre los distintos mecanismos que controlan la respuesta del nivel del mar. En particular, permite evaluar si la amplificación observada en ciertas frecuencias es consecuencia directa de la fuente tsunamigénica, o si ha sido potenciada por efectos locales, asociados a la batimetría o la morfología de la costa. En ese sentido, el análisis espectral no solo es útil para identificar modos resonantes, sino también para determinar su origen.

En estudios como el de Cortés et al., (2017) se aplicó esta técnica a registros de tsunamis en el norte de Chile, revelando que ciertos períodos aparecían de manera consistente en diferentes eventos en una misma localidad, lo que indica que se trata de modos naturales propios del lugar. Por el contrario, otras frecuencias que variaban entre eventos o localidades fueron interpretadas como el resultado de diferencias en la energía espectral de la fuente, más que de la configuración costera. Esta comparación espectral entre registros de distintas localidades o entre distintos tsunamis permite identificar patrones repetitivos, los cuales son indicativos de resonancia local o de plataforma, dependiendo del caso.

En términos prácticos, uno de los desafíos del análisis espectral en registros de tsunami es que la señal suele estar superpuesta a otras oscilaciones de origen meteorológico o mareal, lo que puede dificultar la interpretación. Por ello, en muchos estudios se compara el espectro del evento tsunámico con un espectro de fondo, obtenido a partir de un periodo sin eventos, para así identificar de forma más clara los picos asociados al tsunami. Esta comparación ha sido clave en trabajos como los de Rabinovich (1997), donde se muestran ejemplos de cómo ciertas frecuencias emergen únicamente durante el paso del tsunami, lo que sugiere que fueron excitadas por el evento y posiblemente amplificadas por resonancia.

Finalmente, el análisis espectral constituye una herramienta útil no solo para interpretar eventos pasados, sino también para construir mapas de amenaza y evaluar la respuesta potencial de distintas localidades ante futuros tsunamis.



3.3 Separación fuente-batimetría

Uno de los desafíos principales al analizar la respuesta espectral de una bahía durante un tsunami es poder distinguir qué parte de la señal registrada proviene de la fuente tsunamigénica y qué parte es atribuible a la respuesta local del entorno costero. Esta distinción es crucial para interpretar correctamente los registros costeros y entender si las oscilaciones observadas son consecuencia directa del mecanismo sísmico, o si han sido amplificadas por la configuración geomorfológica del entorno (Rabinovich, 1997).

Esta separación permite identificar si los picos espectrales observados durante un evento corresponden a una coincidencia entre las frecuencias del tsunami y los modos naturales del sistema, o si simplemente son reflejo de la energía contenida en la fuente. Para ello, se han desarrollado distintos enfoques teóricos y prácticos, siendo uno de los más influyentes el propuesto por Rabinovich, (1997) quien fundamentó un marco de análisis basado en la comparación entre espectros de tsunami y espectros de fondo.

Rabinovich propuso un método que permite aislar el espectro de la fuente a partir del cociente entre el espectro del tsunami observado y el espectro de fondo, bajo el supuesto de que el sistema responde de forma lineal. En este marco, se considera que la señal observada por un mareógrafo costero durante un evento puede descomponerse como:

$$\eta_{obs}(t) = \eta_t(t) + \eta_b(t) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

Donde $\eta_t(t)$ representa la señal del tsunami, $\eta_b(t)$ las oscilaciones de fondo (principalmente meteorológicas), y $\varepsilon(t)$ el ruido instrumental.

Asumiendo que la respuesta del sistema es lineal, se puede modelar la propagación del tsunami como una convolución entre el espectro de la fuente $Z(\omega)$ y una función de transferencia $W(\omega)$, que incluye el efecto de la batimetría y topografía costera:

$$S_t(t) = W(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (3)$$

Rabinovich descompone esta función de transferencia en tres componentes que representan distintos niveles de influencia topográfica:

$$W(\omega) = Y(\omega) \cdot Q(\omega) \cdot P(\omega) \quad (4)$$



donde:

- $Y(\omega)$ representa la transformación en el océano profundo (escala de miles de kilómetros)
- $Q(\omega)$ corresponde a la plataforma continental (escala regional, decenas a cientos de kilómetros)
- $P(\omega)$ captura la resonancia local de bahías o puertos (escala de kilómetros)

Dado que el espectro de fondo también está afectado por las componentes $Q(\omega)$ y $P(\omega)$, pero no por la fuente sísmica, se puede escribir:

$$S_b(\omega) = S_0(\omega) \cdot Q(\omega) \cdot P(\omega) \quad (5)$$

Y por tanto, el cociente entre el espectro del tsunami y el espectro de fondo permite cancelar las componentes batimétricas y obtener una estimación de la forma del espectro de la fuente:

$$\frac{S_t(\omega)}{S_b(\omega)} = \frac{Z(\omega) \cdot Y(\omega)}{S_0(\omega)} \quad (6)$$

Este cociente, denominado relación espectral tsunami/fondo, es útil porque permite comparar registros de diferentes estaciones y, si la fuente es común, el resultado debería ser similar en todos los casos, independientemente de la geometría local.

En la práctica, esto significa que, si dos estaciones costeras muestran un cociente espectral con picos en los mismos períodos, es probable que estos estén relacionados con la fuente, mientras que las diferencias en los espectros individuales se deben a efectos locales. Esta metodología ha sido aplicada en numerosos estudios, y se considera uno de los enfoques más robustos para separar los efectos combinados de la fuente y la batimetría.

3.4 Identificación empírica de modos resonantes

Además de los métodos numéricos tradicionales, la identificación empírica de modos resonantes mediante el análisis comparativo de registros mareográficos ha sido utilizada para caracterizar la respuesta espectral de sistemas costeros. Esta aproximación, aplicada por Catalán et al., (2015) en el estudio del tsunami de Pisagua 2014, permite determinar las



frecuencias dominantes de oscilación en distintas localidades y evaluar si estas corresponden a modos naturales del sistema o a componentes de la señal generadas por la fuente sísmica.

El enfoque consiste en analizar espectros de diferentes eventos ocurridos en una misma estación y comparar su estructura. Si ciertas frecuencias aparecen repetidamente en eventos distintos, aun cuando la fuente cambia en localización, orientación o magnitud, se interpreta que esas frecuencias son características del sitio, es decir, que corresponden a modos resonantes naturales. En contraste, si las frecuencias varían entre eventos en una misma localidad, es más probable que estén asociadas a diferencias en la fuente tsunamigénica.

De forma complementaria, también se pueden comparar espectros generados por un mismo evento, pero registrados en distintas localidades. En este caso, si una frecuencia específica aparece únicamente en una estación y no en las demás, puede atribuirse a un modo local propio de esa bahía o ensenada. Por otro lado, si una misma frecuencia se observa simultáneamente en varias estaciones a lo largo de una franja costera extensa, sugiere la presencia de un modo de plataforma, influenciado por la geometría regional de la costa y la plataforma continental.

En el estudio de Catalán del año 2015, se aplicó esta metodología a registros del tsunami de Pisagua 2014 en múltiples estaciones a lo largo de la costa norte de Chile. Los resultados mostraron que ciertas frecuencias, por ejemplo, aquellas del orden de 20 a 25 minutos, se repetían en localidades como Iquique, Arica y Pisagua, lo que evidenciaba la existencia de un modo de plataforma común. A su vez, otras frecuencias menores, como aquellas del orden de 5 a 10 minutos, aparecían solo en una localidad específica, indicando la presencia de modos locales asociados a la geometría de cada bahía.

Este tipo de análisis también permitió reconocer patrones temporales en la evolución de la señal, como la persistencia de ciertas oscilaciones a lo largo de varias horas, y la aparición tardía de algunas frecuencias que no se manifestaron en la llegada inicial del tsunami. Estos elementos refuerzan la hipótesis de que la resonancia puede actuar como un mecanismo de amplificación secundaria, condicionando la magnitud de las olas en ciertos momentos del evento.

La identificación empírica de modos, junto con el análisis espectral y la modelación numérica, representa una herramienta importante para estudiar bahías que carecen de registros detallados de ciertos eventos. En el caso de Pisco, esta metodología cobra particular relevancia, ya que permite inferir la posible excitación de modos locales y regionales durante el tsunami de 2007, incluso sin disponer del espectro de dicho evento.



4. OBJETIVOS

Objetivo General:

➤ Determinar la existencia de fenómenos de resonancia en la bahía de Pisco, Perú, durante el evento sísmico del año 2007, evaluando su impacto en la amplificación de las ondas de tsunami, para mejorar la comprensión y evaluación del peligro de tsunamis en esta región.

Objetivos Específicos:

➤ Identificar las frecuencias naturales de resonancia en la bahía de Pisco mediante el análisis de datos batimétricos y modelos numéricos, con el fin de establecer los modos propios del sistema.

➤ Analizar la estructura espacial y temporal de los modos resonantes utilizando simulaciones armónicas y registros mareográficos de fondo, evaluando cómo la geometría y profundidad de la bahía influyen en su respuesta.

➤ Validar los modos identificados mediante la comparación entre resultados espectrales y simulaciones numéricas, y a partir de ello inferir la posible excitación de resonancia durante el tsunami del 15 de agosto de 2007.



5. METODOLOGÍA

La presente investigación se estructura en tres etapas metodológicas principales, alineadas con los objetivos específicos definidos en el capítulo anterior. Cada etapa aborda un aspecto clave del problema de estudio, desde la identificación de frecuencias naturales hasta la validación de los modos con apoyo en simulaciones numéricas. La metodología empleada se fundamenta en enfoques previamente desarrollados y aplicados en la literatura científica, especialmente en los trabajos de Rabinovich, (1997), Cortés et al., (2017) y Catalán et al., (2015), que han demostrado ser efectivos para estudiar la resonancia en sistemas costeros mediante el uso de registros mareográficos y análisis espectral.

5.1 Fuente de datos y procesamiento

El análisis se basa en registros de nivel del mar obtenidos desde la estación mareográfica Pisco, Ica_PE, disponible en la base de datos de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC). Esta estación cuenta con mediciones de alta resolución temporal (un minuto), cubriendo un periodo continuo de un año, lo que permite realizar un análisis estadísticamente robusto del comportamiento espectral de la bahía.

Los datos fueron procesados utilizando herramientas en Python, iniciando con la limpieza y preprocesamiento de la serie temporal. Se aplicó un filtro de calidad y control de vacíos, descartando tramos incompletos o anómalos, para asegurar que las señales analizadas fueran consistentes y representativas. Posteriormente, se eliminó la componente mareal astronómica mediante la librería UTide, la cual implementa un análisis armónico que ajusta múltiples frecuencias sinusoidales a la señal original. El resultado de este proceso es una señal reconstruida que representa la marea esperada y un residual, que corresponde a las oscilaciones no astronómicas.

El residual obtenido tras eliminar la componente mareal contiene las oscilaciones no periódicas de la señal, entre las cuales pueden encontrarse respuestas asociadas a forzantes externas, como tsunamis o fenómenos resonantes. Esta separación permite aislar con mayor claridad las frecuencias que podrían estar vinculadas a los modos naturales del sistema.

Una vez obtenida la señal residual, se procedió a dividir la serie en ventanas de 27 horas, siguiendo el enfoque utilizado por Catalán et al., (2015) en su estudio del tsunami de Pisagua. Este tamaño de ventana permite capturar oscilaciones de escala infragravitacional y evita que las componentes diurna y semidiurna de la marea dominen el análisis espectral. Cada ventana fue tratada de forma independiente, aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el correspondiente espectro de densidad de potencia (PSD). Este



procedimiento permite observar la distribución de energía en función de la frecuencia y detectar los picos dominantes asociados a posibles modos de resonancia.

Finalmente, se calculó el promedio de todos los espectros generados a lo largo del año, lo que permite construir un espectro de fondo representativo del comportamiento promedio del sistema. Este espectro medio constituye la referencia para identificar las frecuencias naturales de la bahía y contrastarlas posteriormente con los modos obtenidos en simulaciones numéricas.

5.2 Identificación de modos resonantes mediante modelación numérica

Con el objetivo de identificar los modos resonantes característicos de la bahía de Pisco, se utilizó una aproximación numérica basada en el enfoque propuesto por Catalán et al., (2015), el cual analiza la respuesta espectral del sistema costero frente a forzantes armónicos de baja frecuencia. Esta metodología permite determinar, de forma espacial, las frecuencias naturales de oscilación del sistema y describir la distribución de energía asociada a cada modo.

El dominio de simulación incluyó no solo la bahía, sino también parte de la plataforma continental cercana, para representar de forma adecuada la interacción entre los modos locales y los de mayor escala. La batimetría se obtuvo a partir de cartas náuticas y bases de datos globales, y se interpoló para generar una malla más detallada en la zona costera y progresivamente más amplia hacia mar abierto, priorizando la resolución en las áreas de mayor interés.

En el límite oceánico del dominio se aplicaron forzamientos periódicos en forma de oscilaciones armónicas puras, con períodos comprendidos entre 5 y 120 minutos. Este rango fue definido para cubrir tanto los modos locales de bahía, generalmente asociados a períodos más cortos, como los modos de plataforma, que tienden a presentar períodos más largos. Cada simulación se ejecutó hasta alcanzar un régimen estacionario, asegurando que la respuesta obtenida fuera estable y representativa del modo excitado.

Las condiciones de contorno en la costa se establecieron como de pared rígida (no flujo), mientras que en los límites abiertos se empleó una condición de radiación, de manera de permitir la salida de energía no reflejada hacia el exterior del dominio. Estas condiciones fueron seleccionadas siguiendo el esquema de Catalán et al., (2015), buscando minimizar reflexiones artificiales y garantizar que la respuesta observada fuera propia de la interacción entre la onda forzada y la configuración geomorfológica del sistema.



Tabla 5.2. Parámetros sísmicos utilizados para los escenarios de modelación numérica del tsunami del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú), según Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021).

Modelo Multifalla para Camaná (2001)		
Fuente	Adriano et al. (2011)	Jiménez et al. (2021)
Latitud (°S)	16.27	16.2
Longitud (°W)	73.64	73.75
Profundidad [km]	14.15 – 29.60	29
Strike (°)	308	305
Dip (°)	18	18
Rake (°)	63	63
Dimensiones	12 subfallas	21 subfallas
	50 x 50 km c/u	43 x 40 km c/u
Slip máximo [m]	9.96	12.6

Los parámetros de las fuentes sísmicas utilizadas para configurar los escenarios de modelación se obtuvieron de los trabajos de Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021), correspondientes al tsunami del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú). Si bien estos escenarios no corresponden al tsunami de Pisco 2007, su elección se justifica porque permiten forzar la bahía con condiciones sísmicas realistas de la región, generando oscilaciones comparables a las que habrían ocurrido durante un evento mayor en la costa sur del Perú. Estos escenarios incluyeron las configuraciones de fuente propuestas por cada autor, cuyos detalles se presentan en la Tabla 5.2, donde se incluyen la localización, dimensiones, profundidad, mecanismos focales y magnitud de desplazamiento estimados para cada subfalla.

Para cada frecuencia forzada, la amplitud de la oscilación en todos los nodos de la malla fue registrada y procesada para generar mapas de densidad espectral de potencia (PSD), normalizados respecto de la amplitud máxima del dominio. Estos mapas permiten visualizar nodos, antinodos y zonas de máxima energía, facilitando la interpretación de la estructura espacial de cada modo.

La combinación de resultados para todo el rango de frecuencias constituye un catálogo modal del sistema, que describe tanto la localización de las zonas resonantes como la naturaleza (local o de plataforma) de cada patrón.

Esta metodología permite describir con detalle los modos resonantes, aunque sus resultados dependen de la resolución de la batimetría y de la calidad de las condiciones de contorno empleadas. Al usar un forzamiento armónico puro no se incluyen las interacciones



no lineales que tendría un tsunami real, por lo que los patrones obtenidos corresponden a un caso idealizado. Sin embargo, este enfoque permite aislar el efecto de la geometría y constituye una base sólida para inferir cómo la bahía de Pisco pudo responder durante el tsunami del 15 de agosto de 2007, aun en ausencia de registros espectrales directos de ese evento.

5.3 Comparación espectral e inferencia para el evento de 2007

Como parte del análisis metodológico, se consideró un procedimiento de comparación entre las frecuencias dominantes de un evento tsunámico y los modos naturales obtenidos mediante modelación numérica. Este procedimiento sigue el enfoque utilizado por Catalán et al. (2015), quienes aplicaron análisis espectrales a registros de distintos tsunamis para determinar si excitaban modos propios de la costa.

En el caso de la bahía de Pisco, no se contó con el espectro procesado del tsunami del 15 de agosto de 2007. Por esta razón, el procedimiento de comparación se adaptó considerando dos insumos principales: (i) el espectro de fondo calculado a partir de un año completo de registros mareográficos, y (ii) los modos resonantes identificados mediante simulaciones armónicas y escenarios numéricos con fuentes realistas.

El objetivo de este paso metodológico es establecer un marco de referencia que permita, en la etapa de resultados, contrastar las frecuencias dominantes del sistema (derivadas del espectro de fondo y la modelación) con la información disponible del evento de 2007, aun en ausencia de su espectro directo. De este modo, se busca inferir de manera indirecta si el tsunami pudo haber excitado los modos naturales de la bahía.



6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos mareográficos y de las simulaciones numéricas descritas en la metodología. El objetivo es identificar las frecuencias naturales de resonancia de la bahía de Pisco, que luego servirán como base para inferir si pudieron ser excitadas durante el evento del 15 de agosto de 2007.

Primero, se analiza el registro mareográfico de un año completo para estimar el espectro de fondo y reconocer las frecuencias que se mantienen de manera persistente. Luego, se muestran los modos resonantes obtenidos mediante modelación numérica con forzamientos armónicos, considerando un rango de períodos que cubre modos de bahía y de plataforma.

6.1 Espectro de fondo anual

El espectro de fondo permite identificar las frecuencias naturales de oscilación de la bahía de Pisco en ausencia de eventos de tsunami. En la Figura 6.2 se presentan los espectros individuales calculados para cada ventana de 27 horas (gris), junto con el espectro promedio anual (rojo) y los picos energéticos identificados (azul). Los valores de período y densidad espectral correspondientes se resumen en la Tabla 5.2.

El espectro promedio muestra dos picos dominantes en 78,8 y 113,8 minutos, ambos claramente destacados sobre el resto de las frecuencias. La magnitud y persistencia de estos picos sugiere que corresponden a modos de período largo, posiblemente vinculados a oscilaciones de plataforma o a interacciones entre la bahía y la topografía submarina regional.

Además, se observan picos secundarios en el rango de 7 a 30 minutos, que podrían estar asociados a modos locales de bahía. Estos modos, de menor escala espacial, suelen estar determinados por la geometría interna y la batimetría del puerto o ensenada, y en algunos casos pueden superponerse o interactuar con la respuesta de períodos más largos.

La identificación de estas frecuencias naturales constituye un insumo fundamental para el análisis posterior, en el que se evaluará si los modos obtenidos mediante modelación numérica coinciden con estos picos dominantes.



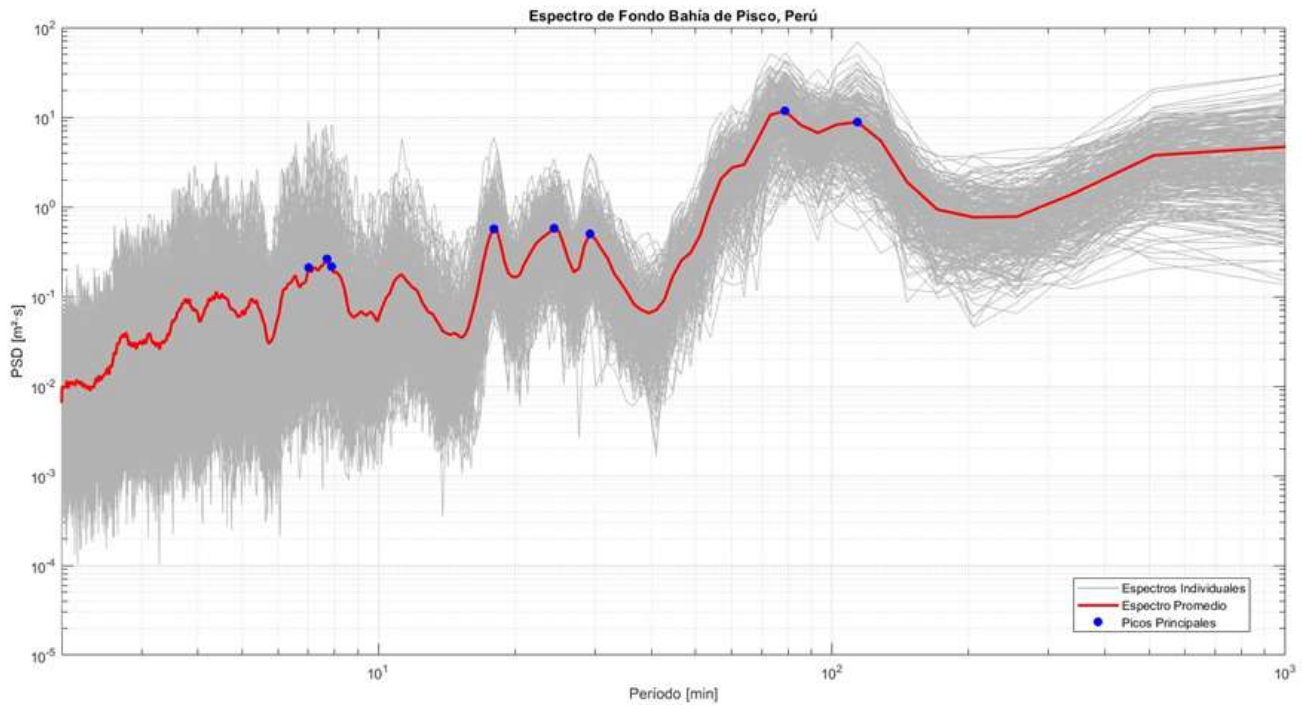


Figura 6.2. Espectros de densidad de potencia calculados para 365 ventanas de 27 horas (gris) y espectro promedio anual (rojo) en la bahía de Pisco. Los picos dominantes se indican en azul.

Tabla 6.2. Principales picos de energía identificados en el espectro de fondo anual de la bahía de Pisco.

Periodo [min]	Energía (PSD)
78.8	11.76
113.8	8.84
24.4	0.58
18.0	0.57
29.3	0.50
7.7	0.26
7.9	0.22
7.0	0.21

6.2 Configuración de las fuentes sismo-genéticas

Con el objetivo de evaluar la influencia de la fuente sísmica en la respuesta modal de la bahía de Pisco, se implementaron dos configuraciones de ruptura basadas en estudios



previos del tsunami del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú). La primera corresponde a la fuente propuesta por Adriano et al., (2011) y la segunda a la de Jiménez et al., (2021). Ambas caracterizaciones se fundamentan en datos de campo, registros sísmicos y mareográficos, describiendo la ubicación, dimensiones, profundidad y mecanismo focal de cada subfalla considerada.

Si bien estos modelos no corresponden al evento de 2007, fueron utilizados como forzantes en las simulaciones armónicas para identificar modos resonantes del sistema, bajo un escenario sísmico realista y de gran magnitud en la región.

Los parámetros sismogénicos de cada configuración (ubicación, dimensiones, profundidad, mecanismo focal y deslizamiento), ya presentados en la Metodología (Tabla 5.2), sirvieron como condición inicial para las simulaciones numéricas. La Figura 6.3 presenta la ubicación y extensión de las dos configuraciones de fuente en el dominio de modelación: (a) escenario basado en Adriano et al., (2011), y (b) escenario basado en Jiménez et al., (2021).

6.3 Resultados de simulaciones numéricas

A partir de los dos escenarios de fuente descritos en la sección 5.2, correspondientes a las configuraciones propuestas por Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021) para el tsunami de Camaná 2001, se realizaron simulaciones numéricas con el fin de analizar la respuesta de la bahía de Pisco bajo condiciones sísmicas realistas.

La Figura 6.4a muestra los resultados para el escenario Adriano, donde se observan máximos de amplitud en la zona costera inmediata a la bahía y en sectores al sur de la península de Paracas. Las amplitudes disminuyen progresivamente hacia mar abierto, manteniendo valores reducidos en áreas más alejadas de la fuente.

La Figura 6.4b corresponde al escenario Jiménez, en el que las amplitudes más elevadas se concentran principalmente frente a la bahía de Pisco. Al sur de la península de Paracas, los valores son menores que en el escenario Adriano, mientras que hacia el norte de la bahía las amplitudes se mantienen relativamente altas.



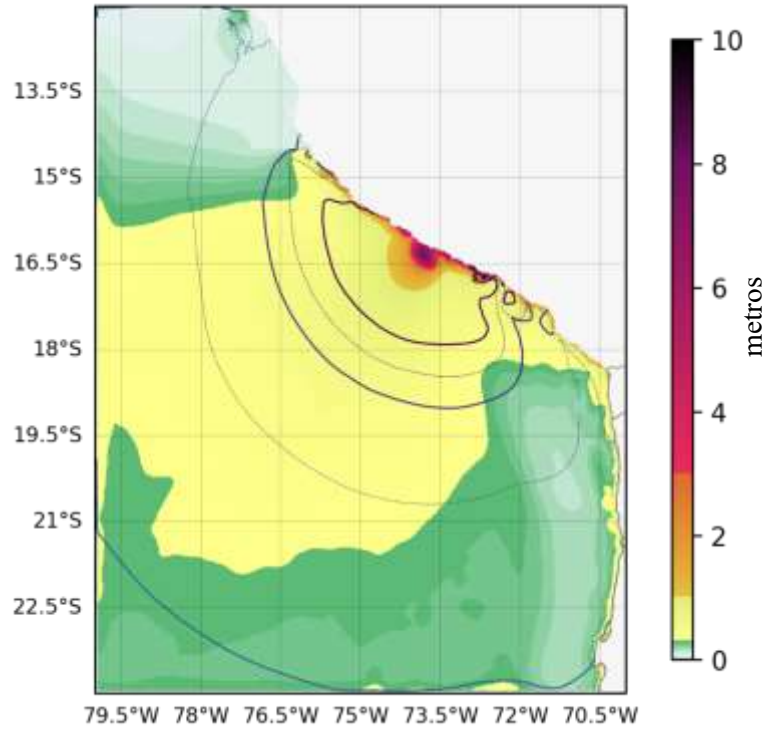


Figura 6.3a. Configuración de la fuente sísmica propuesta por Adriano et al. (2011) para el tsunami del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú).

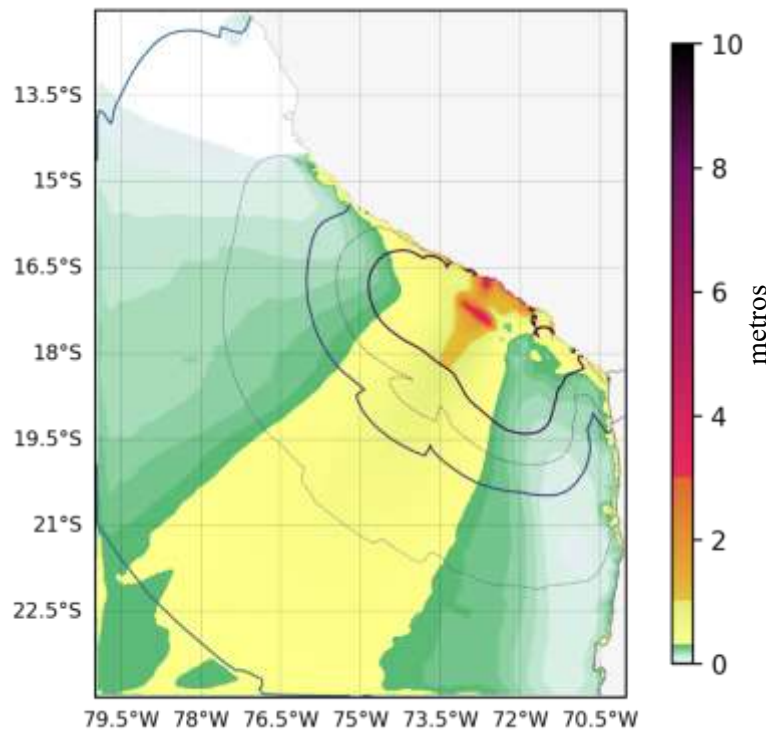
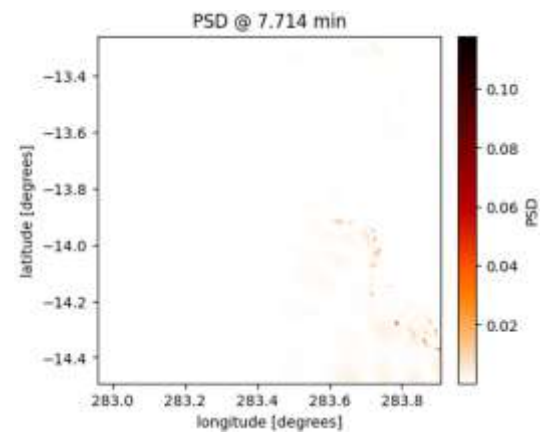
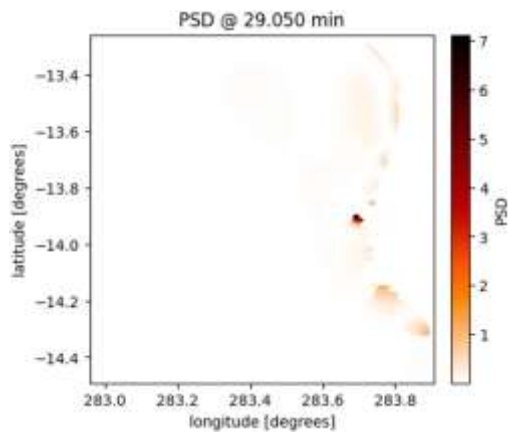
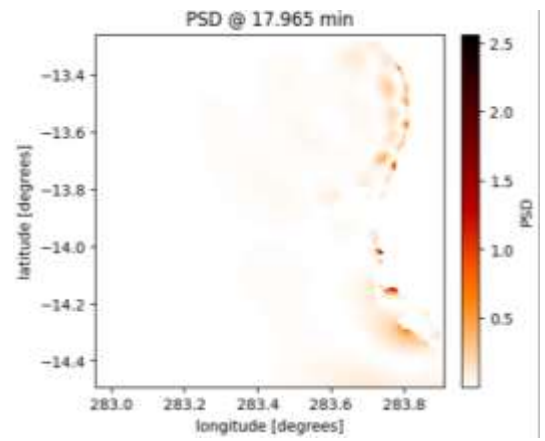
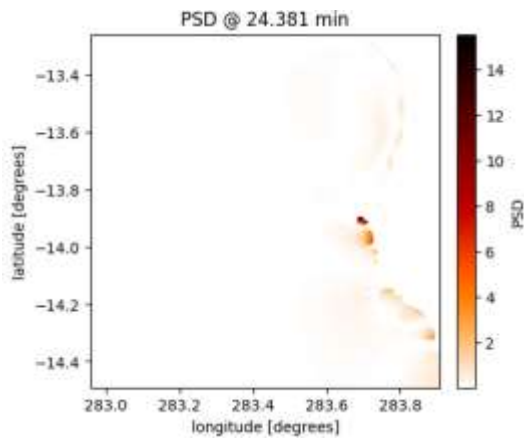
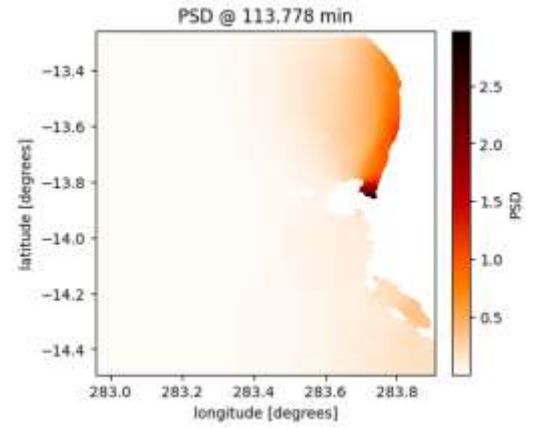
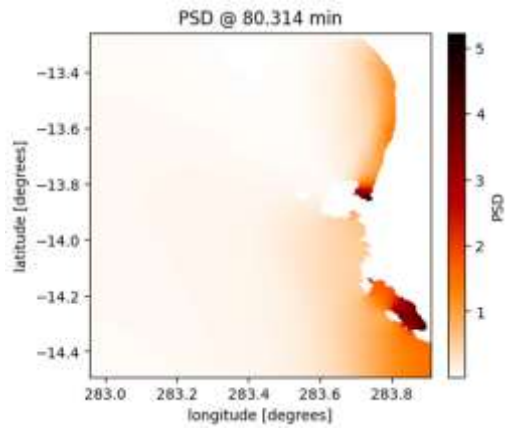


Figura 6.3b. Configuración de la fuente sísmica propuesta por Jiménez et al. (2021) para el tsunami del 23 de junio de 2001 (Camaná, Perú).



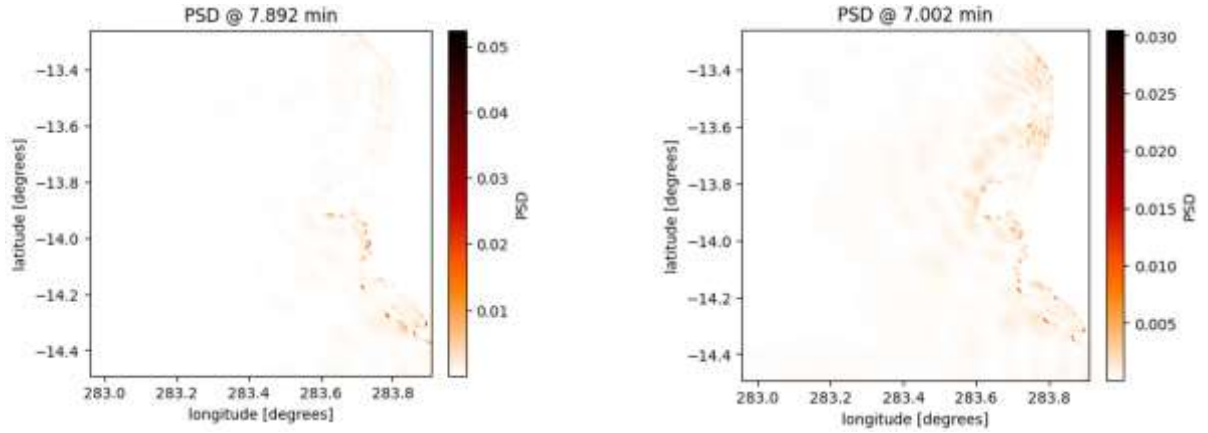
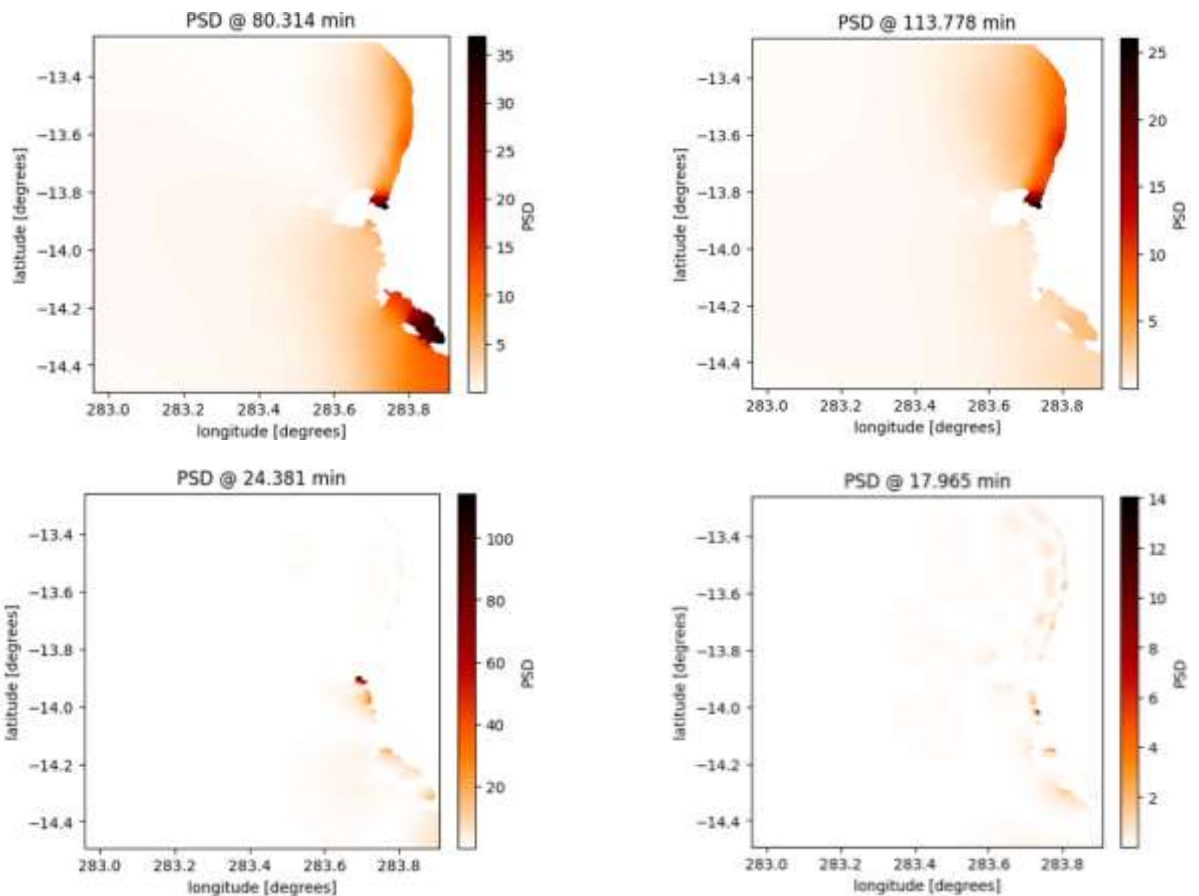


Figura 6.4a. Amplitud máxima simulada para el escenario Adriano (Adriano et al., 2011). Los colores representan la elevación máxima alcanzada por la superficie libre en cada punto del dominio durante la simulación.



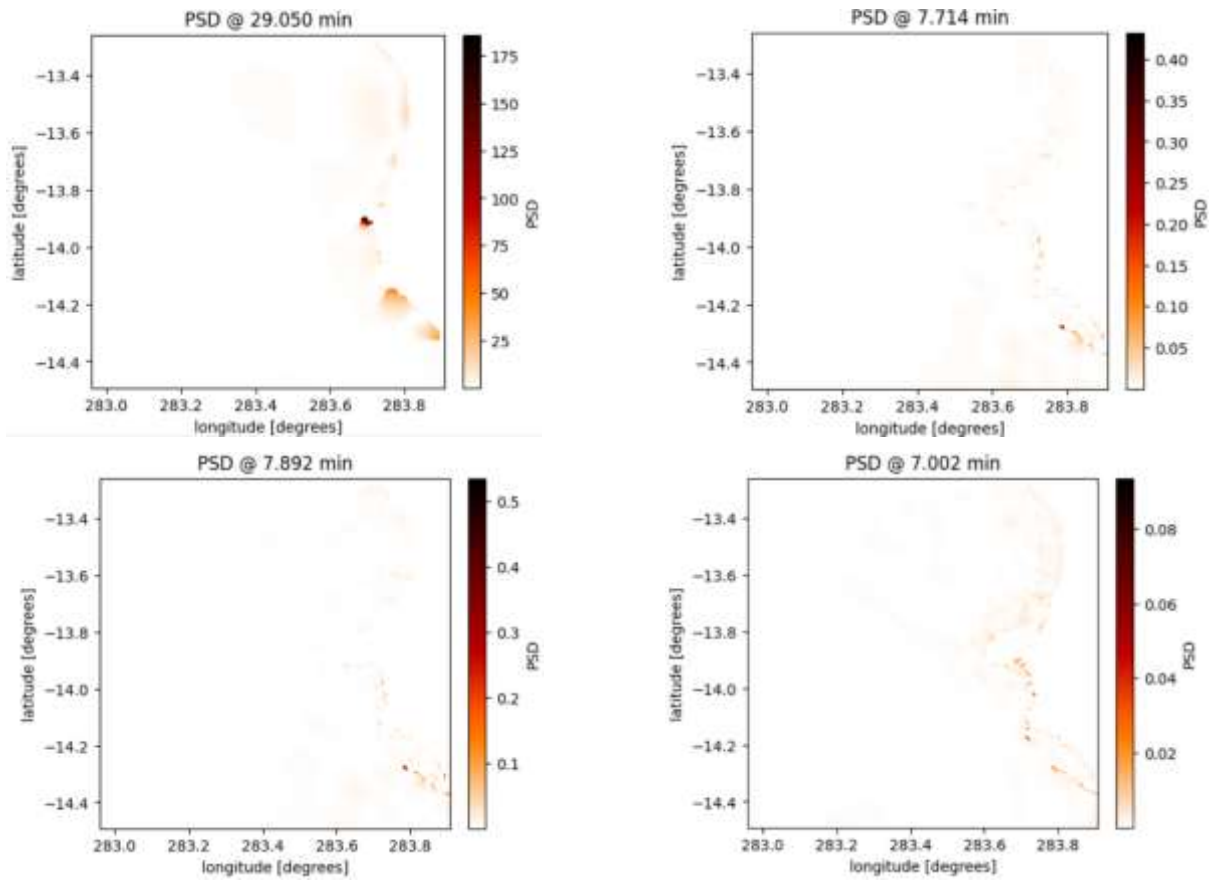


Figura 6.4b. Amplitud máxima simulada para el escenario Jiménez (Jiménez et al., 2021). Los colores representan la elevación máxima alcanzada por la superficie libre en cada punto del dominio durante la simulación.

7. DISCUSIÓN

La finalidad de este capítulo es analizar en detalle los resultados obtenidos sobre la resonancia de tsunami en la bahía de Pisco durante el evento del 15 de agosto de 2007. En los apartados previos se presentaron simulaciones numéricas forzadas con dos configuraciones distintas de fuente sísmica, escenarios Adriano y Jiménez, correspondientes al tsunami de Camaná 2001, así como la comparación de sus resultados con los modos resonantes característicos de la bahía. Ahora, se discutirá la sensibilidad de la respuesta ante distintas fuentes, la consistencia entre los espectros de tsunami y los modos resonantes teóricos, y finalmente la comparación con estudios previos relevantes.

7.1 Sensibilidad de la respuesta ante distintas fuentes

Las simulaciones realizadas con las configuraciones de Adriano y Jiménez muestran que la respuesta de la bahía de Pisco presenta patrones espaciales y temporales muy similares. En ambos casos, las amplitudes máximas se concentran en sectores próximos a la costa y la distribución de nodos y antinodos es prácticamente coincidente, manteniendo las frecuencias dominantes en el mismo rango. Este comportamiento se observa tanto en el interior de la bahía como en áreas adyacentes, lo que indica que la geometría costera y la batimetría circundante ejercen un control predominante sobre la forma en que la energía se distribuye y persiste en el tiempo.

La comparación directa entre escenarios revela que la configuración de la fuente tiene un efecto limitado sobre el patrón general de resonancia. A pesar de las diferencias en extensión y ubicación de la ruptura (Figuras 6.3a y 6.3b), la energía se canaliza de forma similar hacia las frecuencias propias del sistema, generando respuestas espaciales comparables (Figuras 6.4a y 6.4b). Esto sugiere que, mientras el contenido espectral de la onda incidente contenga energía en las frecuencias resonantes, el detalle de la distribución de slip de la fuente tiene un impacto secundario en la respuesta local.

Las diferencias detectadas se limitan a variaciones locales de amplitud, como ligeros incrementos en el extremo sur de la bahía para el escenario Adriano o pequeñas disminuciones en sectores puntuales para el escenario Jiménez. Estos matices podrían relacionarse con la forma en que cada configuración distribuye la energía inicial en mar abierto; sin embargo, su efecto global es reducido, ya que en ambos casos las mismas zonas experimentan las mayores amplificaciones y los períodos dominantes permanecen constantes.

Este resultado es coherente con lo reportado por Cortés et al., (2017) y Catalán et al., (2015), quienes señalan que, cuando la onda incidente coincide espectralmente con los modos



naturales de un sistema costero, la forma específica de la fuente sísmica influye poco en la magnitud y patrón de la respuesta. La morfología y batimetría actúan como un filtro natural, seleccionando las frecuencias que se amplifican y su intensidad.

En síntesis, la comparación confirma que la resonancia en la bahía de Pisco se mantiene estable frente a cambios en la fuente para escenarios de gran magnitud. Las frecuencias observadas y los patrones espaciales se comportan como propiedades inherentes del sistema, más que como respuestas específicas a una configuración de ruptura en particular.

7.2 Consistencia entre el espectro de fondo y los modos resonantes de la bahía

El análisis del espectro de fondo obtenido a partir del registro anual de la estación mareográfica de Pisco permite identificar las frecuencias naturales de oscilación de la bahía y de la plataforma continental adyacente en condiciones sin forzamientos extremos. Este espectro constituye la referencia frente a la cual se evalúa la respuesta de la bahía durante un tsunami, ya que refleja los modos propios del sistema determinados por su geometría y batimetría. En el espectro promedio (Figura 6.2) se identifican siete picos principales (Tabla 6.2). Los de mayor energía corresponden a períodos de 78,8 min y 113,8 min (energías normalizadas de 11,76 y 8,84, respectivamente), asociados probablemente a modos de gran escala vinculados a la plataforma continental. En períodos más cortos, destacan los picos en 24,4 min y 29,0 min, que pueden corresponder al modo fundamental longitudinal de la bahía y a un modo transversal u armónico de orden superior.

La modelación numérica con forzamientos armónicos permitió asociar estos períodos a patrones espaciales específicos de oscilación. Para el modo de ~24–29 min, la distribución espacial presenta un nodo de amplitud en la boca de la bahía y un antinodo hacia el sector interior, patrón característico de una oscilación longitudinal. En otros modos, asociados a períodos distintos, se observan máximos de amplitud distribuidos transversalmente o combinaciones de nodos y antinodos que reflejan interacciones más complejas con la batimetría y la plataforma adyacente.

Aunque no se contó con un espectro procesado del tsunami del 15 de agosto de 2007, la coincidencia entre los picos identificados en el espectro de fondo (78,8; 113,8; 24,4; 29,0; 18 y 7–8 minutos) y los modos reproducidos en las simulaciones numéricas permite inferir que estas frecuencias corresponden a resonancias inherentes de la bahía de Pisco. Esta consistencia metodológica, reforzada por los reportes de campo (Fritz et al., 2008; INDECI, 2008), que documentaron la ocurrencia de olas posteriores más altas que la inicial, sugiere



que durante el evento de 2007 se pudieron haber excitado tanto modos regionales como locales.

La presencia simultánea de modos locales y regionales confirma que tanto la bahía como la plataforma continental contribuyeron a la respuesta espectral observada. La coincidencia entre los picos del espectro del tsunami, los del espectro de fondo y los modos obtenidos por modelación respalda la interpretación de que la bahía de Pisco actuó como una cavidad resonante durante el evento de 2007. Este comportamiento es consistente con lo documentado en otros estudios, donde las frecuencias naturales determinadas por la morfología local dominan la respuesta frente a tsunamis siempre que la energía incidente contenga estas componentes.

7.3 Comparación con estudios previos (resonancia en el norte de Chile)

Los resultados obtenidos en este análisis encuentran un contexto relevante al compararlos con estudios previos sobre tsunamis y resonancia en la costa del Pacífico sudamericano. Una comparación particularmente relevante es con el tsunami de Pisagua (norte de Chile) de 2014, un evento de magnitud similar ($M_w \sim 8$) que ha sido bien documentado instrumentalmente (Catalán et al., 2015). A primera vista, existen similitudes significativas entre ambos casos: en Pisagua 2014, se observaron oscilaciones sostenidas del nivel del mar con picos espectrales bien definidos que evidencian resonancia; los intervalos de período dominantes reportados son comparables con los que caracterizan a Pisco según el espectro de fondo y los modos obtenidos por modelación numérica.

En su investigación, Catalán reporta que el tsunami de Pisagua exhibió máximos espectrales alrededor de ~ 16 – 27 minutos en varios puertos (como Iquique, Patache, Arica), atribuidos a modos locales y de borde, así como picos comunes en períodos más largos (~ 50 – 60 minutos) asociados a resonancias a escala de plataforma continental. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los encontrados para Pisco (espectro de fondo y modelación numérica) —picos en decenas de minutos—, lo que sugiere que los procesos resonantes en tsunamis tienden a ocurrir en bandas de frecuencia similares cuando las dimensiones geomorfológicas (bahías, plataforma) son comparables. Por ejemplo, el modo principal de ~ 54 minutos observado en Pisagua 2014 (especialmente notable en Iquique/Patache) corresponde a la longitud de la plataforma amplia del norte de Chile, mientras que en Pisco la plataforma más angosta reduce la prominencia relativa de esa banda de períodos largos. En cambio, las resonancias de período intermedio–corto dominadas por la bahía (20–30 min) emergen como rasgo principal en Pisco (de acuerdo con el espectro de fondo y la modelación), en línea con lo observado en puertos chilenos donde la presencia de bahías o ensenadas controla la respuesta (Catalán et al., 2015).



Una diferencia importante entre ambos escenarios es la influencia de la morfología costera en la distribución de la energía del tsunami. En el evento de Pisagua 2014, la costa norte de Chile se caracteriza por ser relativamente rectilínea y abierta, sin grandes eventualidades geográficas que canalicen la energía de las olas. Catalán et al. (2015) señalan que, bajo esas condiciones, el tsunami produjo runups e inundaciones moderadas y repartidas a lo largo de la costa, y gran parte de la energía se disipó sin focalizarse en puntos específicos

En cambio, para Pisco, las simulaciones forzadas con las configuraciones sísmicas de Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021) representan un escenario donde el terremoto ocurre adyacente a la península de Paracas, una prominente estructura que divide la línea de costa y forma bahías a ambos lados (la bahía de Pisco al norte y la bahía de Paracas/Independencia al sur). Esta configuración actúa como foco natural de resonancia y amplificación, tal como lo evidencian los estudios de campo de Fritz et al., (2008), que documentaron runups de 5–10 m en la Laguna Grande (al interior de la bahía de Independencia).

La ciudad de Pisco, al norte de la península, si bien sufrió inundación, presenta una exposición modulada por el obstáculo natural de Paracas, que desvía una fracción relevante de la energía hacia las bahías adyacentes. Esta canalización de energía por la morfología local contrasta con el caso de Pisagua 2014, donde ninguna península concentró la energía de manera equivalente. En términos funcionales, Paracas opera como un filtro direccional, con oscilaciones intensas en la bahía de Independencia, localizada inmediatamente al sur de la península, y una respuesta resonante significativa en Pisco asociada a períodos intermedios, con crecimiento temporal influido por reflexiones y refracciones alrededor del promontorio.

Catalán et al., (2015) señalan una diferencia importante al hablar sobre el tsunami de Pisagua 2014. Aunque tuvo una magnitud alta, no causó grandes daños porque no hubo estructuras geográficas que concentraran la energía del tsunami. Esto es bastante diferente de lo que ocurrió en Pisco 2007, donde la península de Paracas actuó como un “foco” de resonancia, intensificando la energía en las bahías cercanas. Al final, aunque los mecanismos de resonancia son los mismos en ambos casos (interferencia de modos estacionarios, excitación de frecuencias naturales), los efectos locales fueron muy distintos, dependiendo de la forma y características de la costa en cada lugar.



8. CONCLUSIONES

El análisis desarrollado en esta memoria permitió caracterizar la presencia de fenómenos de resonancia en la bahía de Pisco, combinando datos mareográficos, modelación numérica y análisis espectral. Los resultados obtenidos aportan evidencia clara de que la respuesta del sistema costero estuvo fuertemente influenciada por sus modos naturales de oscilación, los cuales condicionan la manera en que se amplifica la energía entrante.

El espectro de fondo calculado a partir del registro anual de la estación mareográfica de Pisco mostró un conjunto bien definido de picos persistentes, con máximos de energía en períodos de 78,8 y 113,8 minutos, asociados a oscilaciones de gran escala probablemente vinculadas a la plataforma continental. En el rango de períodos más cortos se identificaron modos en torno a 24,4 y 29,0 minutos, característicos de oscilaciones internas de la bahía condicionadas por su morfología semicerrada y la profundidad media. También se observaron picos de menor energía en 17,9, 7,7 y 7,0 minutos, que podrían estar relacionados con resonancias locales o interacciones con estructuras batimétricas cercanas.

La modelación numérica con forzamientos armónicos, utilizando como escenarios las configuraciones sísmicas propuestas por Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021) para el evento de Camaná 2001, reprodujo estos modos y permitió caracterizar su patrón espacial, confirmando que la geometría de la bahía y su conexión con la plataforma adyacente actúan como un filtro que selecciona y amplifica determinadas frecuencias. Estos patrones coincidieron con los valores obtenidos en el análisis espectral del registro anual, validando la consistencia entre ambas aproximaciones.

Aunque no se logró calcular el espectro del tsunami de 2007, la coincidencia entre los modos identificados y los reportes de campo, que señalan runups elevados y olas posteriores más intensas que la primera, permiten inferir que la bahía actuó como cavidad resonante durante el evento.

La comparación entre las simulaciones de Adriano et al. (2011) y Jiménez et al. (2021) mostró patrones espaciales y temporales muy similares, con amplitudes máximas, así como una distribución de nodos y antinodos, y frecuencias dominantes prácticamente idénticas. Esto sugiere que, para este tipo de evento, la configuración de la fuente tiene un impacto limitado en la respuesta resonante, y que el comportamiento observado está dominado por las características morfológicas y batimétricas del sistema.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la bahía de Pisco presenta una respuesta resonante robusta, amplificando de manera sostenida las frecuencias coincidentes con sus modos naturales y contribuyendo a las alturas extremas registradas en sectores específicos. De esta forma, se cumplió con el objetivo general y los objetivos específicos planteados, demostrando que la identificación de modos propios y su contraste con la

evidencia de campo constituye una herramienta clave para comprender y predecir el comportamiento de sistemas costeros frente a tsunamis.

Este tipo de análisis adquiere especial relevancia para la gestión del riesgo costero, ya que permite anticipar qué zonas podrían experimentar amplificaciones significativas durante futuros tsunamis. La metodología aplicada en este trabajo podría extenderse a otras bahías y puertos del litoral peruano y sudamericano, incorporando en el futuro efectos no lineales o escenarios con diferentes condiciones de marea, lo que contribuiría a una evaluación más completa del peligro y a la implementación de medidas de mitigación más eficaces.



9. AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a mi familia por haber creído siempre en mí y confiar en que lograría todo lo que me propusiera, incluso en esos momentos en que ni yo mismo lo creía posible. Gracias a mis papás por intentar entenderme siempre, por preocuparse de que nunca me faltara nada y de que tuviera las mejores condiciones para crecer de la mejor manera posible. Soy plenamente consciente del sacrificio que todo eso implicó.

A mi hermana Elizabeth, a Andrés y a Valentina, gracias por el rol tan importante que tuvieron en mi educación y en mi formación como profesional, por abrirme las puertas de su hogar durante mis años universitarios y por hacerme sentir siempre bienvenido y cómodo. Les estaré agradecido de por vida.

También a las amistades que me regaló la universidad. A mis primeras amigas, Stefi y Maca, que, aunque la distancia haya hecho que compartamos menos en los últimos años, siempre las llevo en el corazón. A Coni, Gonzalo y Josefa, que fueron un gran apoyo y lograron que estos años fueran mucho más llevaderos. Gracias por las risas, la complicidad y por estar ahí en todo momento. Hicimos un muy buen team,

A Gustavo, que llegó a mi vida a mitad de carrera, pero se siente como si siempre hubiera estado aquí. Gracias por escucharme, acompañarme, distraerme, darme ánimo y traerme de vuelta a tierra cuando mi cabeza anda por todos lados. Te amo.

A mi Lucky, que me acompañó desde temprano hasta muy tarde mientras estudiaba o hacía trabajos, sobre todo en pandemia. Ahora me ves cerrar esta etapa desde el cielo. No hay día en que no te extrañe.

Y, por último, que este cierre de etapa sea un recordatorio para mí mismo de que soy capaz de todo, pese a todo.



10. BIBLIOGRAFÍA

- Adriano, B., Koshimura, S., & Fujii, Y. (2011). Validation of tsunami inundation modelling for the June 23, 2001 Peru earthquake. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 45.
- Bellotti, G., Briganti, R., & Beltrami, G. M. (2012). The combined role of bay and shelf modes in tsunami amplification along the coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(8).
<https://doi.org/10.1029/2012JC008061>
- Catalán, P. A., Aránguiz, R., González, G., Tomita, T., Cienfuegos, R., González, J., Shrivastava, M. N., Kumagai, K., Mokrani, C., Cortés, P., & Gubler, A. (2015). The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling. *Geophysical Research Letters*, 42(8).
<https://doi.org/10.1002/2015GL063333>
- Cortés, P., Catalán, P. A., Aránguiz, R., & Bellotti, G. (2017). Tsunami and shelf resonance on the northern Chile coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(9).
<https://doi.org/10.1002/2017JC012922>
- Fritz, H. M., Kalligeris, N., Borrero, J. C., Broncano, P., & Ortega, E. (2008). The 15 August 2007 Peru tsunami runup observations and modeling. *Geophysical Research Letters*, 35(10).
<https://doi.org/10.1029/2008GL033494>
- INDECI. (2008). *Compendio Estadístico de Prevención y Atención de Desastres 2007 DESASTRES 2007 - SISMO DEL 15 DE AGOSTO*.
- Jiménez, C., Carbonel, C., & Villegas-Lanza, J. C. (2021). Seismic Source of the Earthquake of Camana Peru 2001 (Mw 8.2) from Joint Inversion of Geodetic and Tsunami Data. *Pure and Applied Geophysics*, 178(12). <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02616-8>
- Okal, E. A., Borrero, J. C., & Synolakis, C. E. (2006). Evaluation of tsunami risk from regional earthquakes at Pisco, Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5).
<https://doi.org/10.1785/0120050158>
- Rabinovich. (2009). Handbook of coastal and ocean engineering. In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1142/6914>
- Rabinovich, A. B. (1997). Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C6).
<https://doi.org/10.1029/97JC00479>

