

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“MODELADO NUMÉRICO DE TSUNAMI EN EL DISTRITO DE  
CHORRILLOS”**

**Presentada por:**

**JULIO CÉSAR MARTÍNEZ HERRERA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**






**Lima - Perú**

**2023**

## Document Information

<b>Analyzed document</b>	TESIS_MAESTRIA_JMARTINEZ- COPIA.docx (D159729393)
<b>Submitted</b>	2/28/2023 8:52:00 PM
<b>Submitted by</b>	Samuel Ismael Quisca Astocahuana
<b>Submitter email</b>	squiscas@lamolina.edu.pe
<b>Similarity</b>	11%
<b>Analysis address</b>	squiscas.unalm@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/80340868-Universidad-nacional-mayor-de-san-marcos-facultad-de-ciencias-fi...">https://docplayer.es/80340868-Universidad-nacional-mayor-de-san-marcos-facultad-de-ciencias-fi...</a> Fetched: 9/29/2022 3:40:17 PM		<b>19</b>
<b>SA</b>	<b>Tesina Posgrado UNI 2da Especialidad Carlos Palomino Oct 2021 Firmad.pdf</b> Document Tesina Posgrado UNI 2da Especialidad Carlos Palomino Oct 2021 Firmad.pdf (D120378960)		<b>4</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.dhn.mil.pe/cnat/pdf/articulos/Jimenez-El%20Maremoto%20Notable%20de%201746%20Tesis...">https://www.dhn.mil.pe/cnat/pdf/articulos/Jimenez-El%20Maremoto%20Notable%20de%201746%20Tesis...</a> Fetched: 5/7/2021 1:57:37 PM		<b>3</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/articulos/Tesis2013.Nabilt.Moggiano-FCF-UNMSM.pdf">https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/articulos/Tesis2013.Nabilt.Moggiano-FCF-UNMSM.pdf</a> Fetched: 9/2/2022 9:11:29 AM		<b>1</b>
<b>SA</b>	<b>1273-Adriano Ortega, Bruno.pdf</b> Document 1273-Adriano Ortega, Bruno.pdf (D29822372)		<b>1</b>

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN RECURSOS HIDRICOS  
"MODELADO NUMÉRICO DE TSUNAMI EN EL DISTRITO DE CHORRILLOS"  
Presentado por: JULIO CÉSAR MARTÍNEZ HERRERA  
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS  
Lima - Perú 2022  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS  
"MODELADO NUMÉRICO DE TSUNAMI EN EL DISTRITO DE CHORRILLOS"  
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE  
Presentada por: JULIO CÉSAR MARTÍNEZ HERRERA  
Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:  
Dr. Eduardo Chavarri Velarde PRESIDENTE  
Dr. Abel Mejía Marcacuzco MIEMBRO  
Mg. Sc. Miguel Sánchez Delgado MIEMBRO  
Dr. Samuel Quisca Astocahuana ASESOR

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“MODELADO NUMÉRICO DE TSUNAMI EN EL DISTRITO DE  
CHORRILLOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**JULIO CÉSAR MARTÍNEZ HERRERA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde

**PRESIDENTE**

Dr. Samuel Quisca Astocahuana

**ASESOR**

Dr. Hernando Tavera Huarache

**CO-ASESOR**

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

**MIEMBRO**

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado

**MIEMBRO**

## DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

*Mis padres Tomas y Martina, quienes siempre infundieron en mí: respeto, esfuerzo y generosidad. Gracias por brindarme todo su amor, apoyo y consejos que me orientaron a tomar las mejores decisiones. A mi hermano Jorge y hermana Jenny, gracias por apoyarme y ser mi ejemplo. Finalmente, a mi esposa Liliana por su gran amor y a mi hijo Leonardo por ser mi mayor motivación para ser cada día mejor.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:*

*A la Escuela de Postgrado de la UNALM, por mi formación académica y profesional durante los años de enseñanza.*

*Al Dr. Samuel Quisca Astocahuana, asesor de la presente tesis de maestría, por sus orientaciones y consejos.*

*Al Dr. Hernando Tavera, co-asesor de la presente tesis de maestría, por sus orientaciones, consejos y amistad.*

*A cada uno de los docentes de la maestría de Recursos Hídricos por sus conocimientos, experiencias y tiempo dentro y fuera de las aulas de la universidad.*

*Al Instituto Geofísico del Perú, por la formación profesional y laborar en la Dirección de Ciencias de la Tierra Solida, siguiendo la línea de investigación de sismología, donde se viene desarrollando e implementando metodologías para la simulación numérica de tsunamis aplicados a la reducción del riesgo de desastres en nuestro país.*

# ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	ÁREA DE ESTUDIO.....	2
1.2.	OBJETIVO.....	3
1.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4.	JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5.	IMPORTANCIA .....	6
1.6.	HIPÓTESIS.....	6
1.7.	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE TSUNAMIS EN PERÚ.....	7
1.7.1.	Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) .....	7
1.7.2.	Proyecto SIRAD.....	8
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1.	CONCEPTOS GENERALES .....	10
2.1.1.	Tsunami.....	10
2.1.2.	Fuentes generadoras de tsunamis. ....	12
2.1.3.	Clasificación de los tsunamis: .....	14
2.1.3.1.	Clasificación en función de la distancia. ....	14
2.1.3.2.	Clasificación en función de su intensidad .....	15
2.1.4.	Fases de un tsunami.....	16
2.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UN TSUNAMI. ....	18
2.2.1.	Velocidad de propagación (V) .....	18
2.2.2.	Periodo (T) .....	21
2.2.3.	Longitud de onda (L).....	21
2.2.4.	Altura del tsunami (H).....	22
2.2.5.	Run-up.....	23
2.2.6.	Energía de un tsunami .....	23
2.3.	FUERZAS INDUCIDAS POR TSUNAMIS .....	24
2.3.1.	Fuerza hidrostática. ....	25
2.3.2.	Fuerza hidrodinámica o de arrastre. ....	25
2.3.3.	Fuerza boyante o de flotación .....	26
2.3.4.	Fuerza impulsiva .....	27
2.3.5.	Fuerza por el impacto de escombros .....	28
2.3.6.	Cargas gravitacionales adicionales.....	29
2.4.	COMBINACIONES DE CARGA .....	29

III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
3.1.	METODOLOGÍA .....	30
3.2.	DATOS .....	32
3.2.1.	Datos batimétricos.....	32
3.2.2.	Datos topográficos.....	34
3.2.3.	Factor desencadenante: sismos extremos .....	36
3.3.	MODELO NUMÉRICO: TUNAMI-N2 .....	39
3.3.1.	Simulación 1: sismo de magnitud M7.8.....	41
3.3.2.	Simulación 2: sismo de magnitud M8.5.....	44
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1.	GENERACIÓN DE TSUNAMI .....	47
4.1.1.	Simulación 1.....	48
4.1.2.	Simulación 2.....	49
4.2.	ALTURAS MÁXIMAS DE OLAS DE TSUNAMI EN LA LÍNEA DE COSTA.....	49
4.2.1.	Simulación 1.....	50
4.2.2.	Simulación 2.....	50
4.3.	VARIACIÓN DEL MAR DEBIDO AL TSUNAMI.....	51
4.3.1.	Simulación 1.....	52
4.3.1.	Simulación 2.....	54
4.4.	ÁREA DE INUNDACIÓN MÁXIMA POR TSUNAMI.....	56
4.4.1.	Simulación 1.....	56
4.4.2.	Simulación 2.....	57
4.5.	ALTURAS MÁXIMAS DE INUNDACIÓN.....	58
4.5.1.	Simulación 1.....	58
4.5.2.	Simulación 2.....	59
4.6.	VELOCIDADES MÁXIMAS DEL FLUJO DEL TSUNAMI.....	60
4.6.1.	Simulación 1.....	60
4.6.2.	Simulación 2.....	61
4.7.	PELIGROSIDAD POR INUNDACIÓN DE TSUNAMI.....	62
4.7.1.	Simulación 1.....	64
4.7.2.	Simulación 2.....	64
V.	CONCLUSIONES .....	70
VI.	RECOMENDACIONES .....	73
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
VIII.	ANEXO A: MODELO NUMÉRICO TUNAMI-N2 .....	79
IX.	ANEXO B: VALIDACIÓN TSUNAMI 03/10/1974.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación por tipo de ola .....	11
Tabla 2. Diferencia entre las olas producidas por el viento y por tsunami .....	12
Tabla 3. Escala de intensidades de tsunamis .....	15
Tabla 4. Velocidades de propagación de tsunami en función de la profundidad del mar .....	20
Tabla 5. Valores de aceleración (g) teórica para sismo de subducción.....	38
Tabla 6. Simulaciones de probables tsunamis.....	41
Tabla 7. Parámetros sísmicos utilizados para simular el tsunami generado por un sismo de M7.8.	42
Tabla 8. Parámetros sísmicos utilizados para simular el tsunami generado por un sismo de M8.5.	44
Tabla 9. Criterios de evaluación del Peligro por inundación de flujos de agua. ....	63
Tabla 10. Evaluación de las viviendas de Chorrillos afectadas por la inundación para la simulación 2 (M8.5).....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de Estudio.....	3
Figura 2. Eventos históricos a lo largo de la costa del Perú.....	4
Figura 3. Ubicación y geometría de las zonas de asperezas y acoplamiento sísmico.....	5
Figura 4. Esquema del procedimiento seguido para el cálculo de la altura de ola en costa por la fórmula de Yamaguchi.....	7
Figura 5. Carta de inundación del Callao realizada por la Dirección de Hidrografía y Navegación, utilizando la fórmula de Yamaguchi.....	8
Figura 6. Mapa de inundación por tsunami para Lima Metropolitana propuesto por el proyecto SIRAD.....	9
Figura 7. Porcentaje de ocurrencia de tsunamis en el mundo.....	10
Figura 8. Fuentes generadoras de tsunamis.....	12
Figura 9. Proceso geofísico para la ocurrencia de un sismo generador de tsunami.....	13
Figura 10. Propagación y tiempos de arribo de las olas del tsunami de Japón del 11/03/2011.....	15
Figura 11. Ilustración detallada de las fases de un tsunami.....	17
Figura 12. Parámetros físicos de un tsunami: longitud de onda, altura de tsunami y periodo.....	18
Figura 13. Esquema que muestra como la velocidad de propagación del tsunami disminuye a medida que la profundidad del mar decrece.....	19
Figura 14. La curva muestra la proporcionalidad existente entre la profundidad del mar y la velocidad de propagación del tsunami.....	20
Figura 15. Esquema que muestra la formación de un tsunami y características de su longitud de onda.....	22
Figura 16. Esquema de Altura de ola de un tsunami en la línea de costa.....	22
Figura 17. Esquema del Run-up del tsunami.....	23
Figura 18. Tipos de onda, mecanismos de generación y fuerzas restauradoras asociadas a tsunamis.....	24
Figura 19. Distribución de presión triangular que genera la fuerza hidrostática.....	25
Figura 20. Distribución de presión uniforme para la fuerza hidrodinámica.....	26
Figura 21. Fuerza de flotación actuando en la cimentación de una estructura.....	27
Figura 22. Distribución de presión triangular para calcular la fuerza impulsiva.....	28
Figura 23. Daños producidos por el momento de flujo en viviendas con bloques de concreto en el balneario de La Punta, producto del tsunami del 23 de junio del 2001, Arequipa.....	28
Figura 24. Combinaciones de carga asociados con a) el impacto inicial y b) el post-impacto, según Nouri (2007).....	29

Figura 25. Infografía de la metodología aplicada.....	31
Figura 26. Modelo de Elevación Digital, topografía y batimetría para el Perú.....	32
Figura 27. Mapa batimétrico de la zona de estudio.....	33
Figura 28. Mapa topográfico de la zona de estudio. ....	35
Figura 29. Implementación de información catastral al modelo digital de terreno.....	36
Figura 30. Esquema de la zona de subducción.....	37
Figura 31. Mapa de intensidades teóricas para sismo de M7.8.....	38
Figura 32. Mapa de intensidades teóricas para sismo de M8.5.....	39
Figura 33. Representación de grillas anidadas para la simulación numérica. ....	40
Figura 34. Mapa del área de ruptura para un sismo de magnitud M7.8.....	42
Figura 35. Propagación de las olas de tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8 (Escenario 1).....	43
Figura 36. Mapa del área de ruptura para un sismo de magnitud M8.5.....	45
Figura 37. Propagación de las olas de tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5 (Escenario 2).....	46
Figura 38. Esquema de los parámetros obtenidos como resultados.....	47
Figura 39. Deformación vertical del fondo marino para el escenario 1 (M7.8).....	48
Figura 40. Deformación vertical del fondo marino para el escenario 2 (M8.5).....	49
Figura 41. Alturas máximas de olas del tsunami en la costa para la simulación 1 (M7.8).....	50
Figura 42. Alturas máximas de olas del tsunami en la costa para la simulación 2 (M8.5).....	51
Figura 43. Mapa de ubicación geográfica de los mareógrafos sintéticos propuestos.....	52
Figura 44. Mareogramas sintéticos en Playa Agua Dulce para la simulación 1 (M7.8).....	53
Figura 45. Mareogramas sintéticos en La Herradura para la simulación 1 (M7.8).....	53
Figura 46. Mareogramas sintéticos frente al Morro Solar para la simulación 1 (M7.8).....	53
Figura 47. Mareogramas sintéticos en Playa La Chira para la simulación 1 (M7.8).....	53
Figura 48. Mareogramas sintéticos en Playa Villa para la simulación 1 (M7.8).....	54
Figura 49. Mareogramas sintéticos frente al Country Club de Villa para la simulación 1 (M7.8) ..	54
Figura 50. Mareogramas sintéticos en Playa Agua Dulce para la simulación 2 (M8.5).....	55
Figura 51. Mareogramas sintéticos en La Herradura para la simulación 2 (M8.5).....	55
Figura 52. Mareogramas sintéticos frente al Morro Solar para la simulación 2 (M8.5).....	55
Figura 53. Mareogramas sintéticos en Playa La Chira para la simulación 2 (M8.5).....	55
Figura 54. Mareogramas sintéticos en Playa Villa para la simulación 2 (M8.5).....	56
Figura 55. Mareogramas sintéticos frente al Country Club de Villa para la simulación 2 (M8.5) ..	56
Figura 56. Áreas de inundación máxima por tsunami para la simulación 1 (M7.8).....	57
Figura 57. Áreas de inundación máxima por tsunami para la simulación 2 (M8.5).....	58
Figura 58. Altura máxima de inundación para la Simulación 1 (M7.8).....	59
Figura 59. Altura máxima de inundación para la Simulación 2 (M8.5).....	60

Figura 60. Velocidad máxima del flujo del tsunami para la simulación 1 (M7.8).....	61
Figura 61. Velocidad máxima del flujo del tsunami para la simulación 2 (M8.5).....	62
Figura 62. Mapa de peligrosidad para la simulación 1 (M7.8) .....	64
Figura 63. Mapa de peligrosidad para la simulación 2 (M8.5) .....	65
Figura 64. Mapa de peligrosidad para la zona norte de Chorrillos - simulación 2 (M8.5) .....	66
Figura 65. Direcciones de olas para la zona norte de Chorrillos - simulación 2 (M8.5).....	68
Figura 66. Mapa de peligrosidad para la zona sur de Chorrillos - simulación 2 (M8.5).....	67
Figura 67. Direcciones de olas para la zona sur de Chorrillos - simulación 2 (M8.5).....	69

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Modelo Numérico Tunami-N2 .....	79
Anexo B: Validación Tsunami 03/10/1974.....	102

## RESUMEN

Perú se encuentra en una región de interacción de placas tectónicas, subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana, originando numerosos terremotos. Perú ha soportado los efectos de grandes tsunamis, en algunos casos muy grandes y destructivos. El 28 de octubre de 1746 un terremoto de magnitud estimada M8.8, generó un gran tsunami que afectó la costa central del Perú causando destrucción en el puerto del Callao, con olas mayores a 20 metros e inundaciones de aproximadamente 5 kilómetros, las víctimas del terremoto y tsunami llegaron a 4000 personas. En tal escenario, el distrito de Chorrillos, ubicado en el departamento de Lima, se vería severamente afectado. Este estudio tiene por objetivo, definir las características dinámicas del flujo de agua del tsunami generado por un sismo de gran magnitud (M8.5), escenario más probable, empleando el algoritmo TUNAMI-N2, desarrollado por el Centro de Investigación y Control de Desastres de la Universidad de Tohoku, el algoritmo emplea una fuente sísmica homogénea, datos topográficos y batimétricos con resolución espacial de 10 metros. Los principales resultados obtenidos muestran que la inundación se produce 20 minutos después del terremoto y alcanza 1 kilómetro, con alturas superiores a 9 m. Los parámetros hidrodinámicos confirman un alto nivel de peligrosidad, ya que la profundidad de inundación es elevada ( $> 2$  m) y las velocidades de flujo superan 1,5 m/s, lo que significa altos niveles de peligro para las personas. Esta información es de gran importancia para establecer sistemas de alerta temprana y generar escenarios que permitan reducir el riesgo por exposición de las principales áreas urbanas en el distrito de Chorrillos.

**Palabras clave:** tsunami, modelación numérica, inundaciones por tsunami, inundación del litoral de Lima.

## ABSTRACT

Peru is located in a region of tectonic plate interaction, subduction of the Nazca plate beneath the South American plate, causing numerous earthquakes. Peru has endured the effects of large tsunamis, in some cases very large and destructive. On October 28, 1746, an earthquake of estimated magnitude M8.8, generated a large tsunami that affected the central coast of Peru causing destruction in the port of Callao, with waves greater than 20 meters and flooding of approximately 5 kilometers, the victims of the earthquake and tsunami reached 4000 people. In such a scenario, the district of Chorrillos, located in the department of Lima, would be severely affected. This study aims to define the dynamic characteristics of the tsunami water flow generated by a large magnitude earthquake (M8.5), the most probable scenario, using the TUNAMI-N2 algorithm, developed by the Disaster Research and Control Center of Tohoku University, the algorithm uses a homogeneous seismic source, topographic and bathymetric data with a spatial resolution of 10 meters. The main results obtained show that the flooding occurs 20 minutes after the earthquake and reaches 1 kilometer, with heights exceeding 9 m. The hydrodynamic parameters confirm a high level of danger, since the flood depth is high ( $> 2$  m) and the flow velocities exceed 1.5 m/s, which means high levels of danger for people. This information is of great importance to establish early warning systems and generate scenarios to reduce the risk of exposure of the main urban areas in the district of Chorrillos.

**Keywords:** tsunami, numerical modeling, tsunami floods, flooding of the Lima coastline.

## I. INTRODUCCIÓN

El impacto producido por los tsunamis en el mundo, deja en evidencia la necesidad de generar información respecto al comportamiento dinámico de estos en las zonas costeras. En tal sentido, el anticiparse a un probable escenario de tsunami permite proponer medidas de mitigación, desarrollar planes y protocolos de respuesta efectivos para manejar apropiadamente potenciales emergencias y así disminuir el riesgo para las personas, viviendas, colegios, hospitales y estructuras portuarias. Definiendo y conociendo los escenarios de peligro, se puede comprender el riesgo y atenuar el potencial impacto de estos eventos naturales. Se debe considerar que los tsunamis son poco recurrentes; sin embargo, cuando ocurren pueden ser altamente destructivos.

Históricamente, la costa de la región central del Perú ha sido afectada por grandes sismos generadores de tsunamis, en algunos casos pequeños y en otros muy grandes y destructivos. Entre los más importantes están los ocurridos en los años 1555, 1584, 1586, 1609, 1647, 1682, 1687, 1746, 1908, 1940, 1966, 1974, 1996, y 2007. Uno de los tsunamis que afectó gravemente la región central del Perú ocurrió el 28 de octubre de 1746 después de producido un sismo, con epicentro frente a Lima, con magnitud del orden de M8.8 e intensidad X (MM), ambos parámetros estimados. Este sismo destruyó completamente a las ciudades de Lima, Callao y Chancay, media hora después del sismo, un gran tsunami golpeó las costas causando la destrucción absoluta de zonas urbanas y puertos. El Callao recibió el mayor impacto, con una ola del orden de 24 metros y 5 kilómetros de longitud de inundación. Este tsunami destruyó 23 barcos anclados en el puerto, transportando uno de ellos 1.5 km tierra dentro. Según relatos de la época, la primera de las dos olas que golpearon el Callao tuvo más de 20 metros de altura. En total, las víctimas del terremoto y tsunami alcanzaron las 4000 personas (Silgado 1978).

El último evento sísmicos con epicentro frente al departamento de Lima, generador de un tsunami que afecto las costas del distrito de Chorrillos, ocurrió el 03 de octubre de 1974. Hoy, han transcurrido 47 años, el distrito de Chorrillos se ha reconstruido y expandido,

urbanizando zonas costeras próximas al mar, incrementado sus niveles de exposición y vulnerabilidad. Por lo anterior, la presente investigación, caracteriza el peligro potencial de tsunamis, identifica las condiciones de vulnerabilidad física y la evaluación del peligro por inundación de tsunamis. Hoy en día, un evento de esta naturaleza alteraría el orden demográfico, social y económico de la región central del Perú. En tal escenario, el distrito de Chorrillos sería gravemente afectado; por lo tanto, es indispensable conocer, de la mejor manera posible, el peligro que representa un tsunami y su vulnerabilidad, siendo importante gestionar su riesgo y así reducir el impacto del posible desastre.

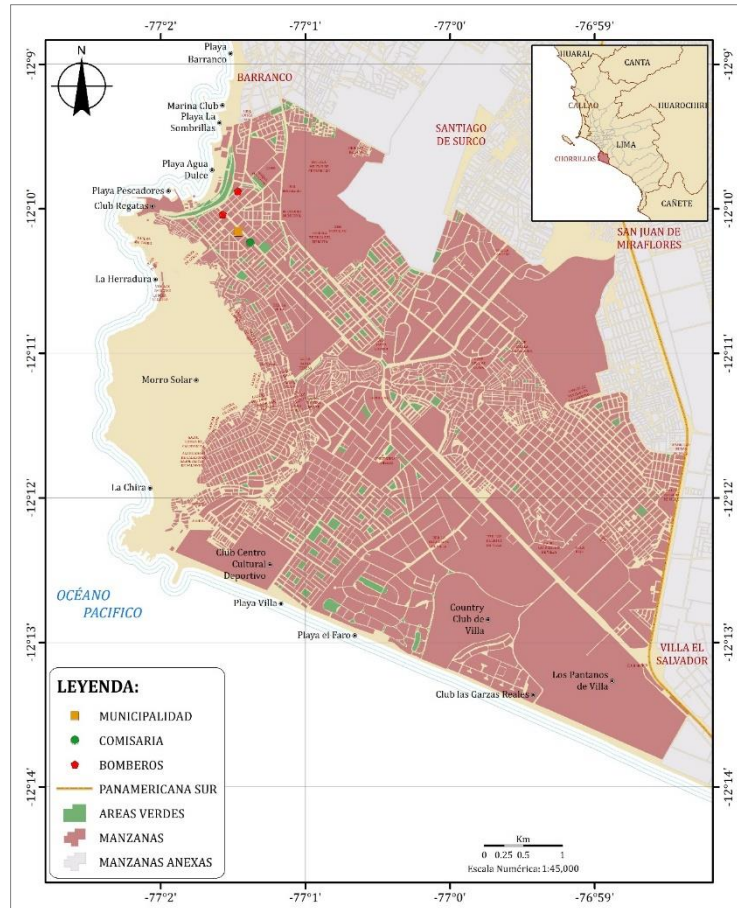
Este estudio propone dos escenarios sísmicos generadores de tsunamis. El primero, hace referencia al sismo de 1974, que tuvo una magnitud de M7.8 y generó un tsunami que causó una inundación de 120 metros en la playa Agua Dulce (Silgado 1978). Este escenario permitirá calibrar el modelo numérico y validar los resultados obtenidos. El segundo escenario hace referencia al sismo probable o esperado para la región central del Perú, con una magnitud estimada de M8.5 y con sus resultados se busca determinar, caracterizar y cartografiar el peligro relacionado a la ocurrencia de un tsunami en el distrito de Chorrillos.

Los resultados del presente estudio, servirán como punto de partida para contribuir a la gestión del riesgo de desastres en el distrito de Chorrillos y así minimizar el impacto de futuros eventos y servir de documento base para posteriores estudios a lo largo del litoral costero.

## **1.1. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio comprende al distrito de Chorrillos; ubicado en el departamento y provincia de Lima, a una distancia aproximada de 20 km al sur de la ciudad de Lima, capital del Perú (Figura 1). Según el censo nacional del año 2017, realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el distrito de Chorrillos tiene una población de 314 000 habitantes, siendo un 49 por ciento mujeres y un 51 por ciento hombres, que se asientan sobre una superficie de 37 km<sup>2</sup>. La densidad poblacional aproximada es 8 798.60 habitantes por km<sup>2</sup>.





**Figura 1. Área de Estudio**

## **1.2. OBJETIVO**

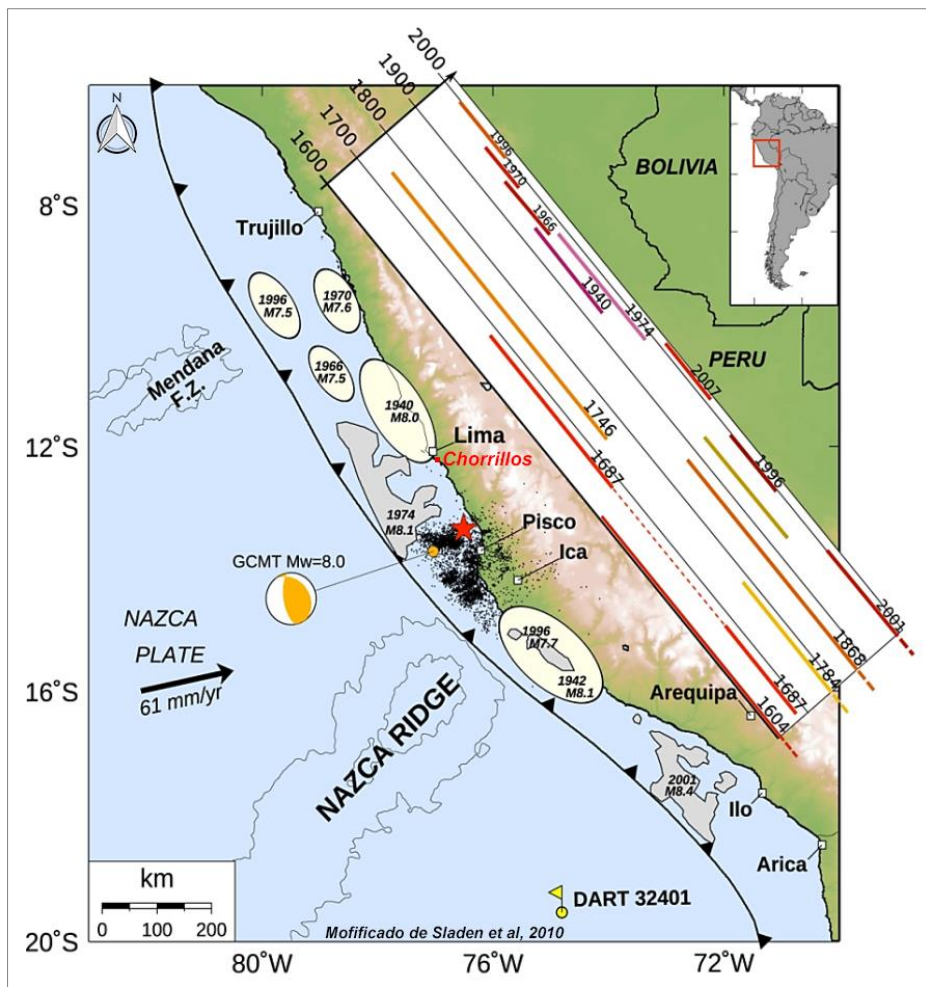
Definir las características dinámicas del flujo de agua del tsunami generado por un sismo de gran magnitud (M8.5), empleando la simulación numérica para conocer los tiempos de arribo, las zonas inundables, alturas y velocidades máxima de inundación en el distrito de Chorrillos. Esta información es de gran importancia para establecer sistemas de alerta temprana y generar escenarios que permitan reducir el riesgo por exposición de las principales áreas urbanas.

## **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema es la pérdida de vidas humanas y materiales como consecuencia de un tsunami producido por sismo. La solución está planteada en la obtención de un mapa de inundación horizontal para la identificación de zonas seguras a partir de los parámetros hidrodinámicos de altura y velocidad de inundación.

Actualmente, estudios geofísicos y geodinámicos confirman que los tsunamis presentan algún grado de ciclicidad, en cuanto a su periodicidad y magnitud, (Nanayama *et al.* 2003; Satake *et al.* 2003; Atwater *et al.* 2003; Cisternas 2005). Según esto, la posibilidad de que un tsunami afecte nuevamente la costa de la región central de Perú es muy latente.

A lo largo de la historia sísmica de Perú, han ocurrido importantes eventos sísmicos que han generado tsunami, los mismos que han causado cuantiosas pérdidas de vidas humanas y materiales (Figura 2), es por esto que un estudio sobre su dinámica es importante para comprender y evaluar los diversos fenómenos que se pueden presentar en el área de estudio. Por otro lado, surge la incógnita de cuál será el comportamiento del tsunami al interactuar con las edificaciones construidas, ya que la expansión urbana sobre el litoral se ha extendido en las últimas décadas.

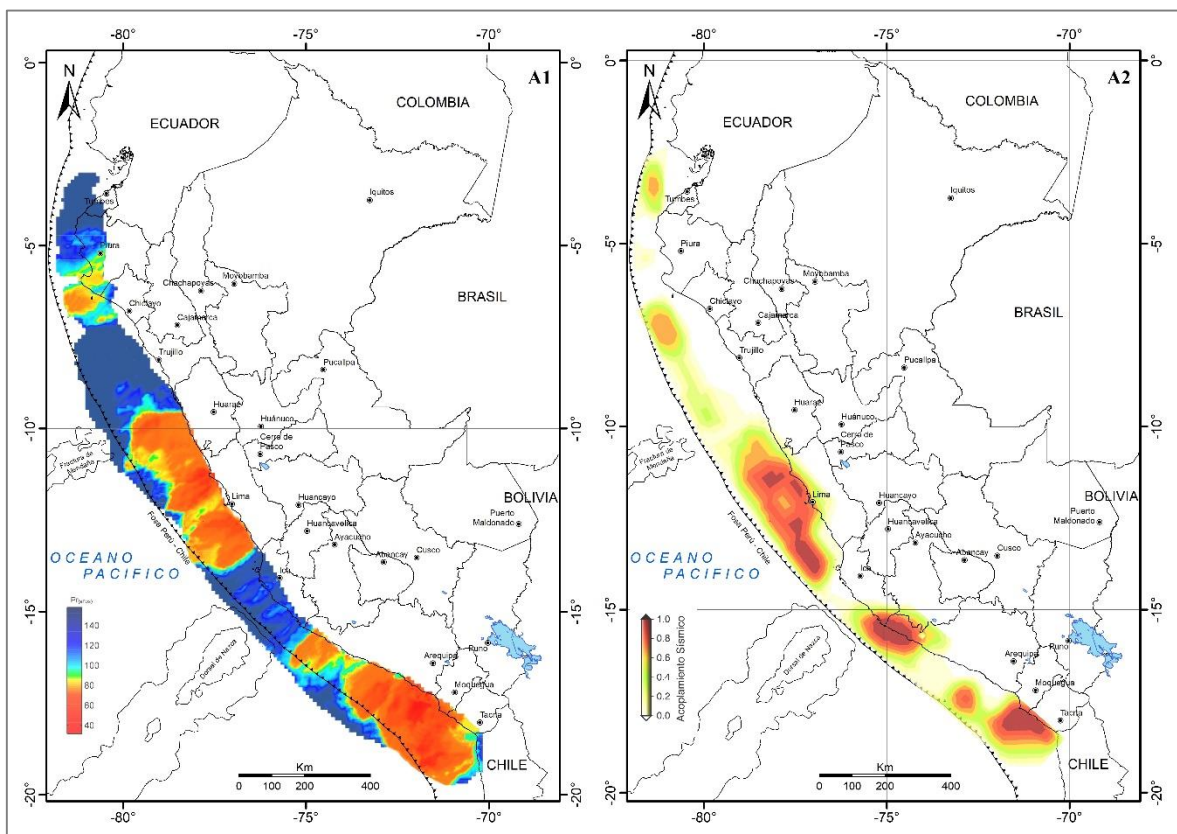


**Figura 2. Eventos históricos a lo largo de la costa del Perú**  
**Fuente: Sladen *et al.* 2010)**

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

Considerando la escala geológica para la ocurrencia de sismos generados de tsunamis, existen pocos registros escritos que permiten caracterizar detalladamente el desarrollo de estos eventos en zonas costeras y portuarias. En este contexto, surge la importancia de generar simulaciones numéricas de tsunamis basadas en registros pasados que serán usadas como indicadores de lo que podría ocurrir en el futuro. Esta información, permitirá extender y comprender el estudio del peligro en la zona costera del distrito de Chorrillos.

Realizar esta investigación en el distrito de Chorrillos, responde a las investigaciones sísmológicas y de GPS realizadas para el Perú, por Condori y Tavera (2011) y Villegas *et al.* (2016). En ambas se logró identificar nuevas áreas de acoplamiento sísmico, zonas de acumulación de energía, frente a la costa de los departamentos de Lima, Arequipa, Moquegua y Tacna, las cuales serían fuentes generadoras de sismos en el futuro (Figura 3).



**Figura 3. Ubicación y geometría de las zonas de asperezas y acoplamiento sísmico, identificadas por Condori y Tavera (2011) - A1 y Villegas (2016) – A2**

En este estudio se realiza la simulación numérica de un tsunami producido por la ocurrencia de un sismo de magnitud M8.5, con posible origen en la zona de acoplamiento sísmico existente en la zona costera frente al departamento de Lima, analizando la dinámica del tsunami en la parte oceánica y continental; Así mismo, se propone la metodología del cálculo de parámetros hidrodinámicos como alturas y velocidades de inundación y su interacción con las edificaciones existentes en el área de estudio.

## **1.5. IMPORTANCIA**

El estudio de la dinámica de tsunamis empleando simulación numérica proporciona información que permite comprender y evaluar los posibles escenarios de peligro que se puedan presentar en el distrito de Chorrillos. Actualmente, los estudios específicos y detallados de zonas urbanas y portuarias son escasos y solo se cuenta con cartas de inundación por tsunami de ciertas zonas costeras.

Esta investigación brinda una herramienta de pronóstico de escenarios de peligro por tsunami, que contribuirá a mejorar las metodologías existentes propuestas en el *“Manual para la Evaluación del Riesgo por Tsunamis”* elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) y *“Lineamientos para el Diseño de Edificaciones para Evacuación Vertical frente a Tsunamis”* del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Por otro lado, los pobladores del distrito de Chorrillos, merecen conocer los peligros a los que se exponen de ocurrir un tsunami. Motivo por el cual este estudio analizará las áreas de incidencia generadas ante un tsunami con el fin de tener un panorama claro para futuras campañas preventivas en torno a la población. Además, este estudio será de gran importancia para posibles proyectos portuarios y proyectos ingenieriles que se podrían desarrollar en un futuro cercano.

## **1.6. HIPÓTESIS**

Mediante la implantación de la simulación numérica, parámetros de fuente sísmica, datos batimétricos y topográficos de alta resolución espacial se puede obtener una adecuada caracterización de las fases de un tsunami (generación, propagación e inundación) para

identificar el peligro que representaría un eventual escenario de tsunami en el distrito de Chorrillos.

## 1.7. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE TSUNAMIS EN PERÚ

### 1.7.1. Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN)

El año de 1997 la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) elaboró uno de los primeros mapas de inundación para las zonas costeras de los distritos del Callao y la Punta, en base a la fórmula de Yamaguchi (Figura 4). Esta fórmula calcula la altura máxima de la ola del tsunami en la línea de costa, también considera la altura oleajes anómalos y el promedio de las pleamares superiores. La altura total de la ola, frente a la línea de costa de la localidad en estudio, es dada por la suma de estos tres parámetros, corregida por la pendiente del terreno.

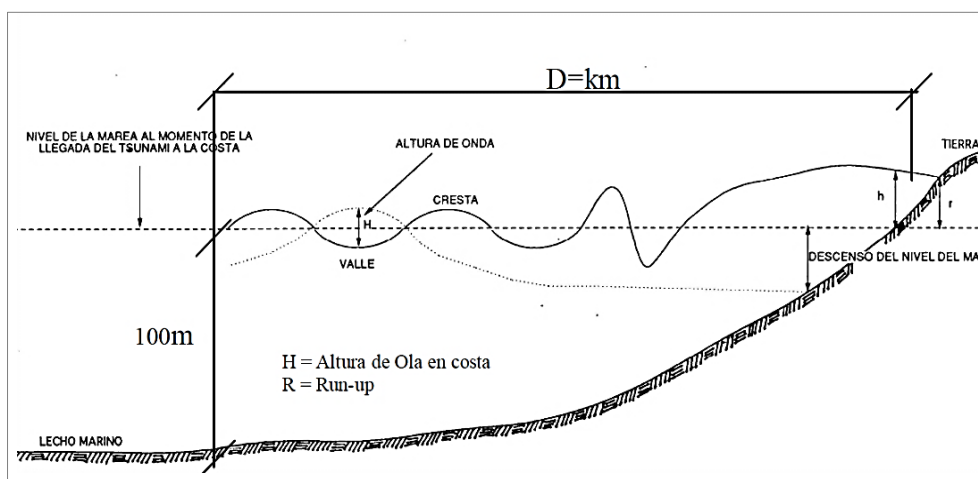


Figura 4. Esquema del procedimiento seguido para el cálculo de la altura de ola en costa por la fórmula de Yamaguchi

Fuente: DHN

La fórmula de Yamaguchi se expresa como:

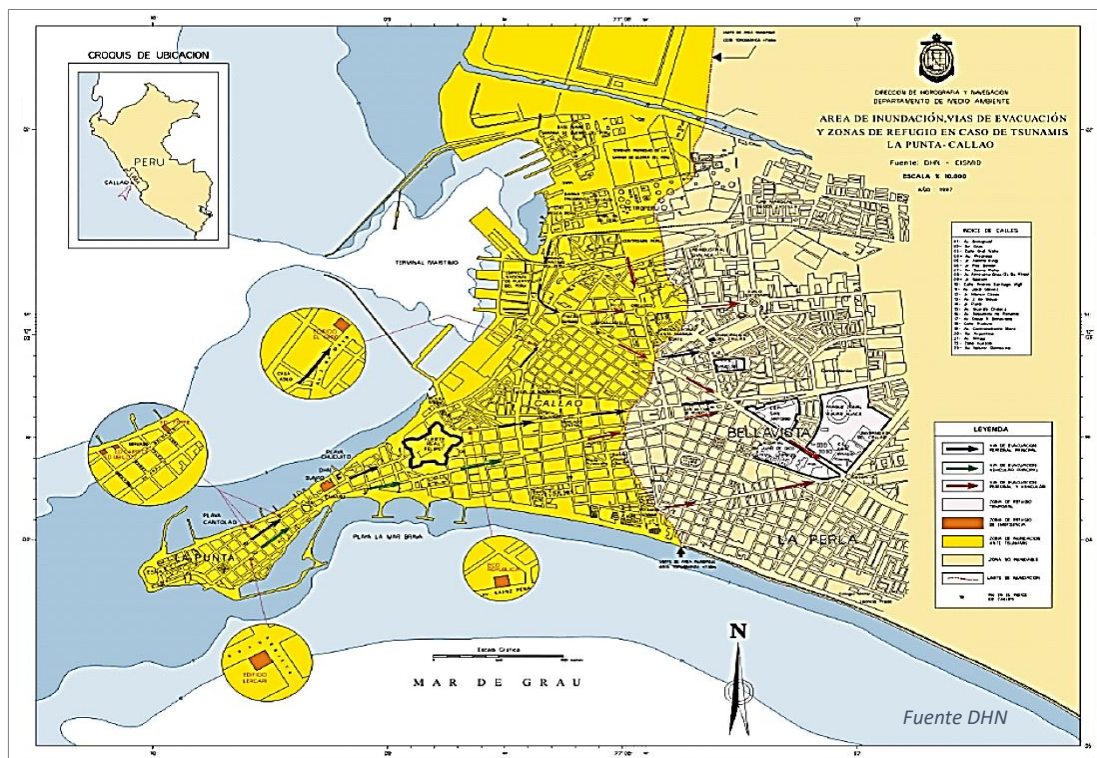
$$h = 12.3 e^{-0.067(D)}$$

Donde:

h = Altura de ola, en la línea costera (m).

D = Distancia desde la costa hasta las isobatas de los 100 m (km).

Utilizando esta metodología se generó el mapa de inundación para el Callao, siendo la cota topográfica de siete metros el valor que determinó la línea de inundación (Figura 5). Este resultado fue una primera aproximación, considerando un escenario ideal en el cual la topografía es homogénea. Sin embargo, en el caso real, la topografía es heterogénea por la presencia de acantilados, cerros y construcciones antrópicas, por lo que la línea de inundación no corresponde a una cota topográfica constante. En este caso debe emplearse un modelado numérico.



**Figura 5. Carta de inundación del Callao realizada por la Dirección de Hidrografía y Navegación, utilizando la fórmula de Yamaguchi**

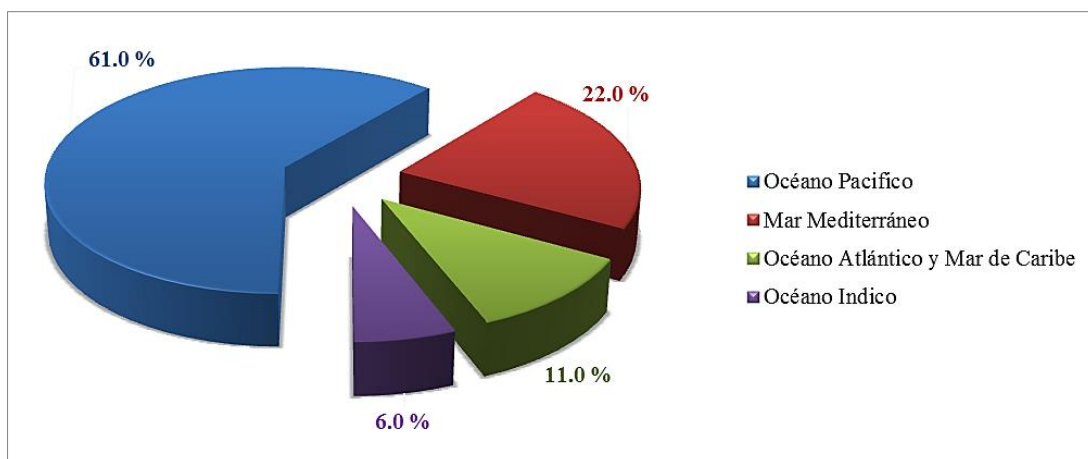
### 1.7.2. Proyecto SIRAD

El estudio SIRAD (Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastre) se desarrolló entre abril del 2010 y febrero del 2011, en el marco del proyecto “Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao” gestionado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Departamento para la Ayuda Humanitaria de la Comunidad Europea (ECHO), Institut de Recherche pour le Développement (IRD) y la ONG italiana Cooperazione Internazionale (COOPI).



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

El borde costero del océano Pacífico tiene el más alto índice de peligro debido a que es parte de la región de mayor actividad sísmica y volcánica conocida como *Cinturón de Fuego del Pacífico*. En tal sentido, el océano Pacífico está estructural, topográfica y sísmicamente condicionado para servir de campo propicio al desfogue de las tensiones geológicas, convirtiéndose así en uno de los sistemas generadores de sismos y tsunamis más activo del planeta (Figura 7).



**Figura 7. Porcentaje de ocurrencia de tsunamis en el mundo**

**Fuente: NOAA (2018)**

### 2.1. CONCEPTOS GENERALES

#### 2.1.1. Tsunami

La palabra “tsunami”, de origen japonés, proviene de dos vocablos: Tsu (puerto) y nami (ola). Literalmente significa grandes olas en el puerto. No causa daños en alta mar, pero es destructivo en las zonas costeras.

El término tsunami se define como una ola o serie de olas que se producen en un volumen de agua al ser impulsada violentamente por una fuerza que la desplaza verticalmente,



originando un tren de ondas largas, con un período que va de varios minutos hasta horas, y que se propagan a gran velocidad en todas direcciones desde el área de origen. Las olas al aproximarse a las costas alcanzan alturas de gran proporción, descargando su energía con gran poder, causando inundación y destrucción en las poblaciones asentadas en la costa (Wiegel 1970; Iida. y Iwasaki. 1983; SHOA 1984; ITSU 1999).

**Tabla 1. Clasificación por tipo de ola**

Tipo de Ola	Mecanismo Físico	Periodo Típico	Región de Actividad
Sonido	Comprensión.	$10^{-2} - 10^{-5}$ s	océano Interior
Ondulaciones Capilares	Tensión superficial.	$< 10^{-2}$ s	Interface Agua - Aire
Ondas de Viento y Oleaje	Gravedad.	1 -25 s	
<b>Tsunami</b>	<b>Gravedad.</b>	<b>10 min – 2 h</b>	
Ondas Internas	Gravedad y densidad estratificada.	2 min – 10 h	Zona de Cambio Brusco de Densidad
Mareas de Tormenta	Gravedad y rotación de la Tierra.	1 – 10 h	Cerca de la Costa
Mareas	Gravedad y rotación de la Tierra.	12 – 24 h	Todo el Oceánico
Ondas Planetarias	Gravedad, rotación de la Tierra y variación de la latitud o de la profundidad del océano.	100 días	

Fuente: Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Los tsunamis son una serie de ondas marinas de periodo largo, originado por perturbaciones del mar debido principalmente a la ocurrencia de sismos que cumplen las características de (i) originarse en el fondo oceánico, (ii) tener profundidad superficial; es decir, menos de 60 km, y (iii) tener magnitud  $\geq M7.0$ . Si un sismo reúne estas tres condiciones, la ocurrencia de un tsunami es muy probable.

Los tsunamis se distinguen de las olas generadas por el viento por su gran periodo, el cual puede ser mayor de una hora y por su longitud entre las crestas que llegan a ser mayores a 100 km. La Tabla 2 muestra las diferencias entre las olas producidas por el viento y por un tsunami.

**Tabla 2. Diferencia entre las olas producidas por el viento y por tsunami**

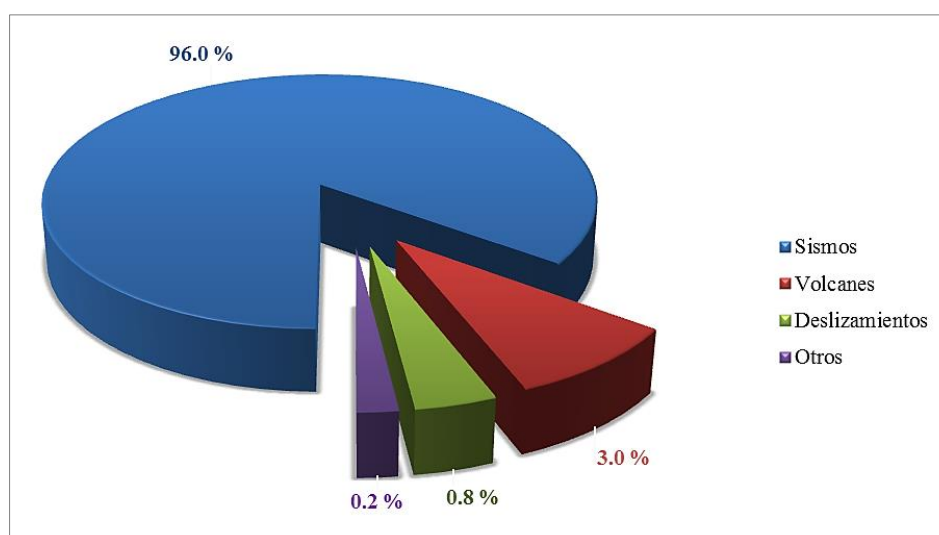
	Olas de Viento	Tsunamis
Velocidad	25-30 km/h	600-900 km/h
Max. longitud de onda en mar abierto	~ 100 m	~ 100.000 m
Max. altura de la onda en mar abierto	~ 12 m	~ 0,1-1,0 m

Fuente: Kaynak *et al.* (2002)

### 2.1.2. Fuentes generadoras de tsunamis.

Los tsunamis pueden ser generados por diversas fuentes (Figura 8), entre ellas se puede citar las siguientes:

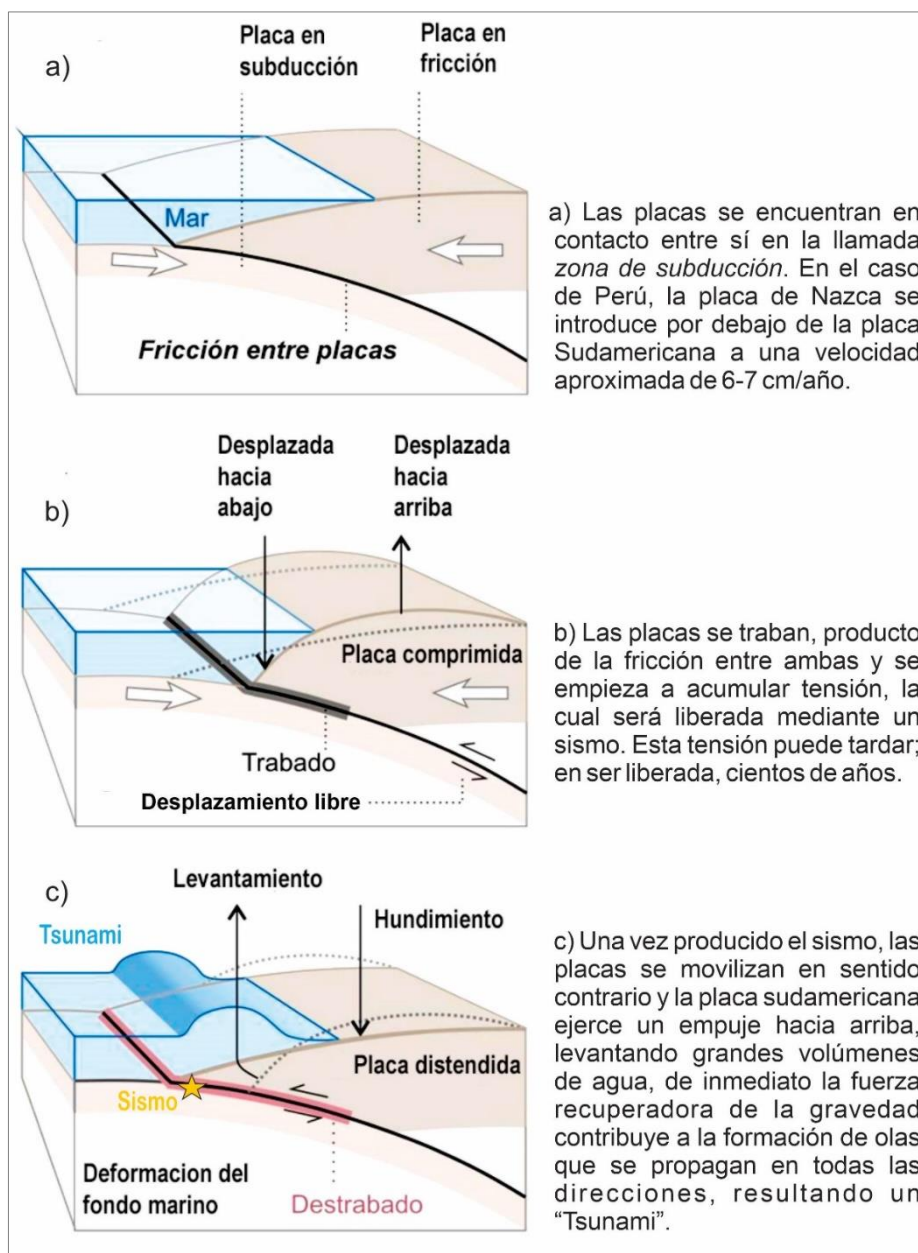
- Sismos de gran magnitud con epicentro en el mar.
- Erupción volcánica en el océano o submarina.
- Deslizamiento de tierra bajo la superficie oceánica.
- Caída de bloques de hielo de un glaciar sobre el mar.
- Por una explosión artificial bajo la superficie oceánica.
- Deslizamiento de grandes masas de sedimentos no consolidados en la costa.
- Condiciones meteorológicas extremas.
- Caída de grandes meteoritos.



**Figura 8. Fuentes generadoras de tsunamis**

Fuente: NOAA (2012)

La fuente principal de generación de tsunamis, es la ocurrencia de sismos de gran magnitud en el fondo marino o muy cerca de él, todos con magnitudes superiores a M7.0 y profundidades hipocentrales menores a 60 km. Estos eventos se producen habitualmente en regiones donde se desarrolla el proceso de subducción de placas tectónicas ocasionando súbitos levantamientos y/o hundimientos de la corteza oceánica (Figura 9). En este proceso, las fracturas que se producen en el fondo del mar generan un empuje hacia arriba, levantando grandes volúmenes de agua, de inmediato la fuerza recuperadora de la gravedad contribuye a la formación de olas que se propagan en todas las direcciones y al llegar a las costas son fuertemente destructivas.



**Figura 9. Proceso geofísico para la ocurrencia de un sismo generador de tsunami**

### **2.1.3. Clasificación de los tsunamis:**

Hay dos maneras de clasificar los tsunamis, la primera considera la distancia desde su origen a la costa y la otra en función de su intensidad.

#### **2.1.3.1. Clasificación en función de la distancia**

Los tsunamis se clasifican en:

**a. Tsunamis locales:**

Si el lugar de origen está muy cerca de la costa o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino) del tsunami. Estos tsunamis tienen, desde su origen, menos de una hora de tiempo de viaje.

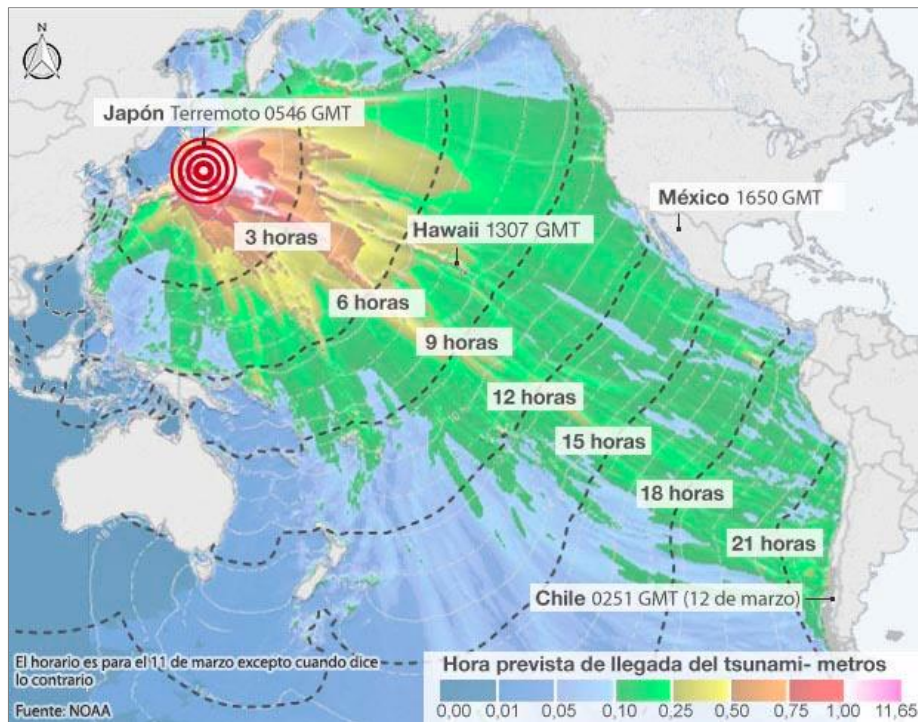
Los tsunamis de origen local son los más peligrosos, debido al poco tiempo con el cual llegan a las costas, y muchas veces no es suficiente para evacuar a la población. En el caso del Perú se estima que las olas llegan en 10-15 minutos.

**b. Tsunamis regionales:**

Si el lugar de origen del tsunami está a distancias mayores a 500 km, lo cual da un tiempo del orden de horas para evacuar a la población. Ejemplo: el tsunami generado por un sismo de Camaná el 23 de junio de 2001 (M8.4) que tardó aproximadamente 2 horas en llegar al puerto del Callao.

**c. Tsunamis lejanos o remotos:**

Si el lugar de origen del tsunami está a distancias mayores a 1000 km, lo cual causa que el tsunami llegue con más de una hora después de haber ocurrido el sismo. Ejemplo: el tsunami generado por un sismo de Japón el 11 de marzo de 2011 (M9.0) que tardó aproximadamente 21 horas en llegar al puerto del Callao (Figura 10).



**Figura 10. Propagación y tiempos de arribo de las olas del tsunami de Japón del 11/03/2011**

### 2.1.3.2. Clasificación en función de su intensidad

Esta clasificación se estableció en 1962 y se conoce como “Escala de Ambraseys”, siendo sus características las siguientes:

**Tabla 3. Escala de intensidades de tsunamis**

	Descripción
I. Muy Ligero	Ola tan débil que sólo es perceptible por los mareógrafos.
II. Ligero	Ola advertida por personas que viven cerca de la playa y están familiarizadas con el mar.
III. Bastante fuerte	Advertido por todos. Inundación de costas con pendiente suave. Pequeños veleros arrastrados a la playa. Pequeños daños en estructuras ligeras situadas cerca de la costa.
IV. Fuerte	Inundación de la playa hasta cierta altura. Ligera erosión de terrenos de relleno. Daños en malecones y diques. Daños en estructuras ligeras próximas a la playa. Pequeños daños en estructuras sólidas de la costa. Grandes veleros y pequeños barcos arrastrados tierra o mar adentro. Detritos flotantes en las costas.

V. Muy fuerte	Inundación general de las playas hasta cierta altura. Daños en muelles y estructuras sólidas próximas a la playa. Destrucción de estructuras ligeras. Gran erosión de tierras cultivadas y erosión de tierras cultivadas y objetos flotantes y animales marinos esparcidos por la costa. Exceptuando los barcos grandes, todos los demás tipos de embarcaciones son arrastrados tierra o mar adentro. Daños en las construcciones portuarias. Personas ahogadas. Ola acompañada de fuerte ruido.
VI. Desastroso	Destrucción completa o parcial de construcciones hasta una cierta distancia de la playa. Inundación de las costas hasta gran altura. Fuertes daños en barcos grandes. Árboles arrancados o rotos. Muchas víctimas.

**Fuente: Ambraseys (1962)**

#### **2.1.4. Fases de un tsunami**

La evolución de las ondas producidas por un tsunami se desarrolla en tres fases: Generación, Propagación e Inundación (Figura 11). Las principales características se detallan a continuación:

**a. Generación:**

La etapa de generación de un tsunami incluye la formación del disturbio inicial de la superficie del océano provocado por la deformación del fondo oceánico. Desde el punto de vista físico, un tsunami es generado por el movimiento súbito del fondo marino debido a un sismo y generalmente, está asociado a ondas de longitud mayor que la profundidad del fondo oceánico.

**b. Propagación:**

Un tsunami puede propagarse a través de grandes distancias, cientos o miles de kilómetros del área de origen, antes de embestir la costa. El disturbio inicial en la superficie del agua engendra una onda de gravedad de gran amplitud que se propaga hacia las costas.

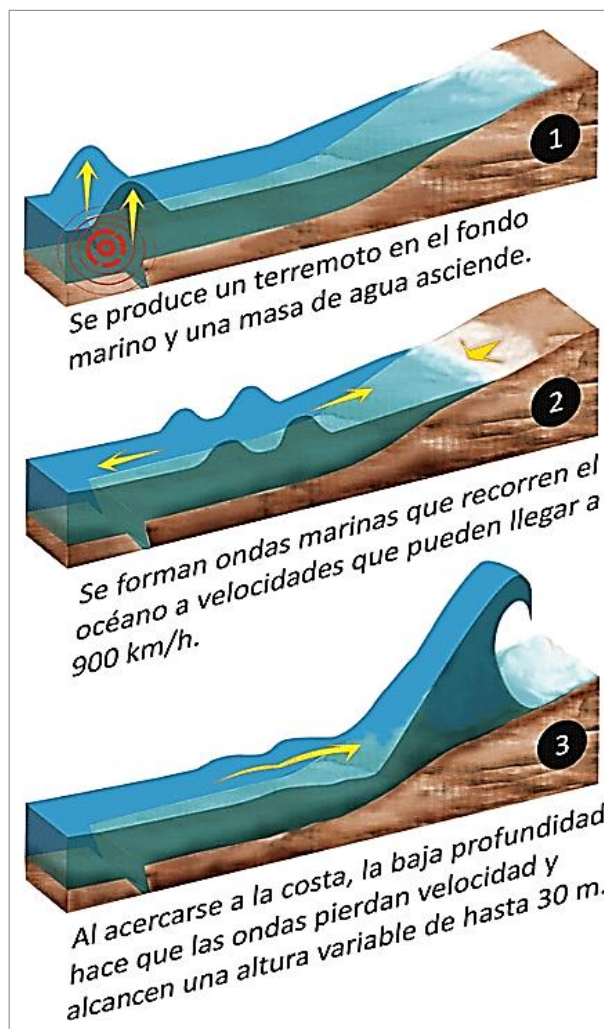
**c. Inundación:**

La altura alcanzada por el tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos tales como: características de las ondas en

mar abierto, batimetría, pendiente del fondo marino, configuración del contorno de la costa, difracción, refracción, reflexión, dispersión y resonancia de las ondas en las distintas formaciones costeras, entre otros.

Estos factores determinan que el arribo del tsunami a la línea costera, sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima de inundación (Run-up), aún a cortas distancias a lo largo de ella.

La estimación del área inundada en zonas costeras, producidas por ondas tsunamigénicas, es de vital importancia para la mitigación de riesgo ante un tsunami.



Las ondas del tsunami pueden alcanzar velocidades de hasta 900 km/h en alta mar, y atravesar un océano en pocas horas. En alta mar, la ola es prácticamente imperceptible, a menudo de menos de 1 m de amplitud; sin embargo, al entrar en aguas costeras poco profundas, el tsunami debe frenar su movimiento y repentinamente crece en altura. Cuando llega a la costa, puede haberse convertido en un muro de agua de más de 10 m de altura capaz de destruir ciudades costeras.

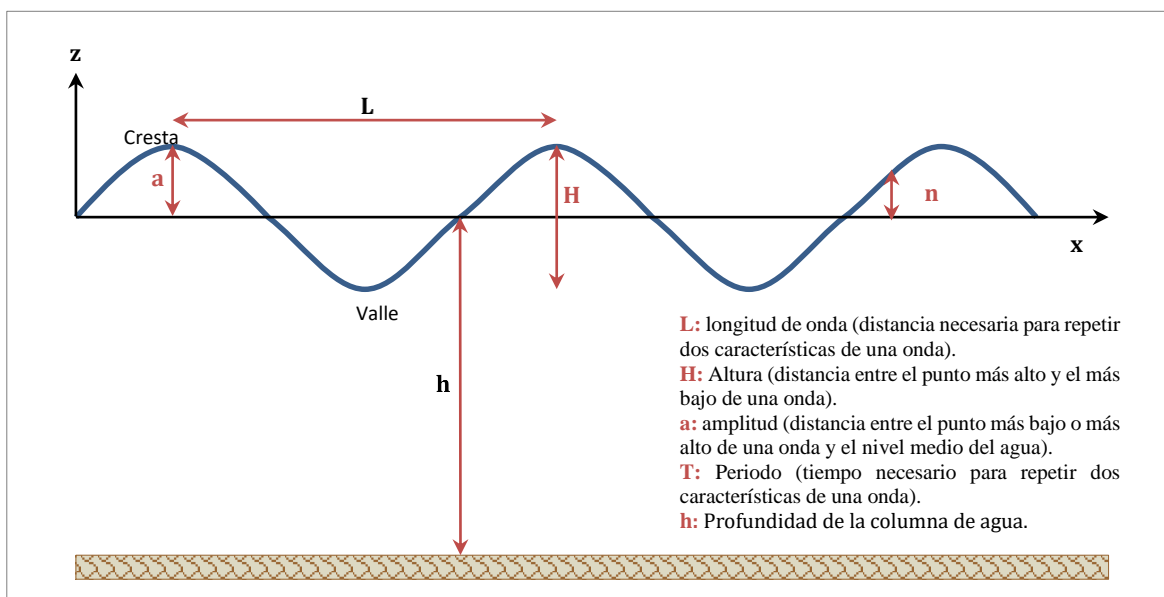
**Figura 11. Ilustración detallada de las fases de un tsunami**

## 2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UN TSUNAMI

El brusco movimiento del agua, desde la profundidad, genera un efecto de "latigazo" hacia la superficie que es capaz de generar olas de magnitud impensable conocidas como tsunami.

En mar abierto, lejos de la costa, es un tren de ondas marinas "olas" de pequeña amplitud, del orden de centímetros a metros, que viajan a una velocidad de aproximadamente 900 km/h en altamar; sin embargo, al llegar a la costa y al encontrarse con una menor profundidad, éstas disminuyen su velocidad, pero aumentan en altura pudiendo causar gran destrucción y numerosas víctimas humanas.

Por tratarse de trenes de ondas marinas, ellas pueden ser caracterizadas por su período, amplitud de onda, longitud de onda y velocidad de propagación (Figura 12).



**Figura 12. Parámetros físicos de un tsunami: longitud de onda, altura de tsunami y período**

### 2.2.1. Velocidad de propagación (V)

La velocidad de propagación del tsunami (para aguas someras), depende únicamente de la profundidad del océano en el cual viaja y puede ser formulado como:

$$V = \sqrt{g * d}$$



Donde:

$V$ : Velocidad de propagación de las olas (m/s).

$g$ : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).

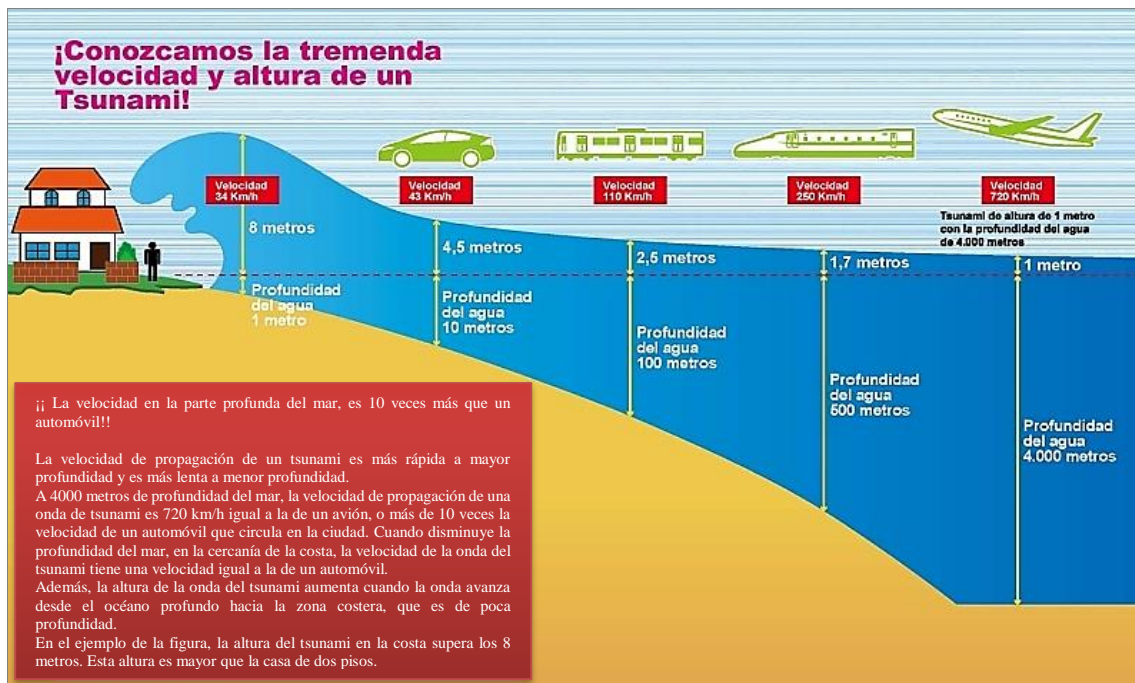
$d$ : Profundidad del océano (m).

En el caso del océano Pacífico, con una profundidad media igual a 4000 m y una aceleración de la gravedad igual a 9.81 m/s<sup>2</sup>, se tendrá una velocidad de:

$$V = \sqrt{9,81 * 4000} = 198 \text{ m/s}$$

Entonces, la velocidad de propagación promedio de un tsunami en el océano Pacífico es de 198 m/s ó 713 km/h, esta velocidad es cercana a la de un avión (Figura 13).

En general, la velocidad del tsunami es mayor en mar profundo que en mar superficial. Si el tsunami viaja en un mar de profundidad variable, la dirección de propagación gira gradualmente hacia la zona de menor profundidad, produciéndose la refracción de ondas.



**Figura 13. Esquema que muestra como la velocidad de propagación del tsunami disminuye a medida que la profundidad del mar decrece**

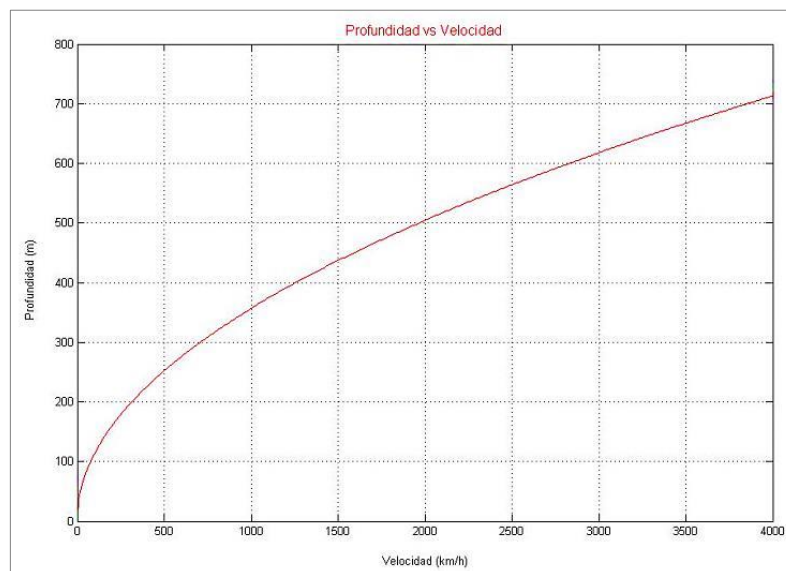
La Tabla 4 presenta las velocidades de propagación del tsunami en metros por segundo y kilómetros por hora para diversos valores de profundidad del fondo oceánico:

**Tabla 4. Velocidades de propagación de tsunami en función de profundidad del mar**

Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/hora)
4000	198,091	713,127
3800	193,075	695,070
3600	187,926	676,532
3400	182,631	657,471
3200	177,178	637,840
3000	171,552	617,586
2800	165,735	596,645
2600	159,706	574,942
2400	153,441	552,386
2200	146,908	528,869
2000	140,071	504,257
1800	132,883	478,380
1600	125,284	451,021

Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/hora)
1400	117,192	421,892
1200	108,499	390,596
1000	99,045	356,564
800	88,589	318,920
600	76,720	276,193
400	62,642	225,511
200	44,294	159,460
100	31,321	112,755
80	28,014	100,851
60	24,261	87,340
40	19,809	71,313
20	14,007	50,426
10	9,904	35,656

La Figura 14, demuestra la relación directa entre el incremento de la profundidad del fondo oceánico y el incremento de la velocidad de propagación del tsunami.



**Figura 14. La curva muestra la proporcionalidad existente entre la profundidad del mar y la velocidad de propagación del tsunami**

### **2.2.2. Periodo (T)**

Se define como el tiempo que demora el paso de dos ondas de olas sucesivas por un mismo punto de observación. Por ejemplo, en costa, es la diferencia de tiempo en la llegada de dos olas sucesivas. Para tsunamis de origen cercano, el periodo promedio es de 7 a 30 minutos y para los de origen lejano, entre 30 y 70 minutos aproximadamente. Este parámetro es de suma importancia ya que proporciona información acerca del tiempo que demora la ola en llegar a la costa.

### **2.2.3. Longitud de onda (L)**

Es la distancia que separa dos crestas sucesivas del tsunami. Se estima que la longitud de onda inicial es aproximadamente igual a la dimensión mayor del área dislocada, estimada de las características de los procesos de ruptura. La longitud de la onda, acompañada del periodo del tsunami, proporciona información sobre la fuente del tsunami. Por ejemplo, para tsunamis generados por sismos, el rango de longitud de onda típica es entre 20 a 300 km. Para tsunamis generados por derrumbes, el rango de longitud de la onda es de centenares de metros a decenas de kilómetros. Este parámetro físico está representado por:

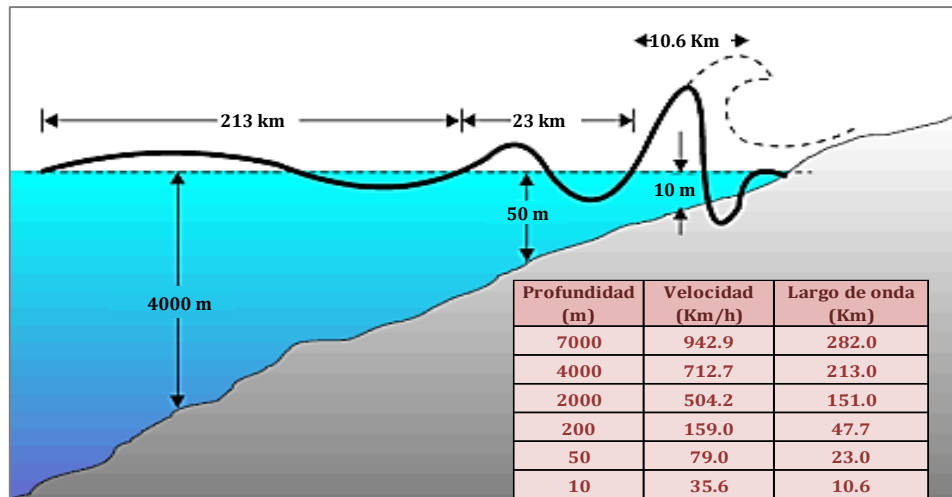
$$L = V * T$$

Donde:

*V*: Velocidad de propagación, en metros.

*T*: Período

Por ejemplo, utilizando un período de 0.25 horas, equivalente a 15 minutos y la velocidad de propagación promedio del océano Pacífico de 713 km/h, la longitud de onda es de 178 km (Figura 15). Evidentemente, debido a su gran longitud onda, el desplazamiento de un tsunami, a esta profundidad, se manifiesta en la superficie oceánica con amplitudes de solo unos pocos centímetros.



**Figura 15. Esquema que muestra la formación de un tsunami y características de su longitud de onda**

#### 2.2.4. Altura del tsunami (H)

La altura del tsunami, es la distancia vertical entre el seno o valle y la cresta del tsunami. Cuando las profundidades son muy grandes, la onda de tsunami puede alcanzar gran velocidad, pero éstas suelen pasar inadvertidas ya que sólo tienen alturas que bordean el metro; sin embargo, al llegar a la costa sufren el fenómeno de refracción disminuyendo su velocidad y longitud de onda, lo que produce el aumento de su altura (Figura 16).



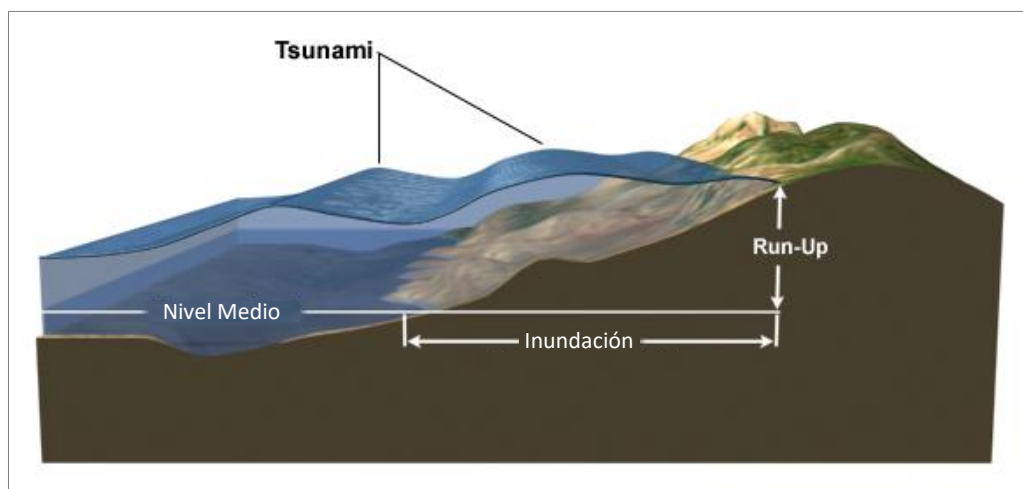
**Figura 16. Esquema de Altura de ola de un tsunami en la línea de costa**

Por ejemplo, para el tsunami del 22 de marzo de 2011 originado por un sismo ocurrido en Honshu (Japon) a las 05:46:23 UTC, las primeras olas del tsunami llegaron a la costa

de Perú después de 21 horas con alturas que fluctuaron entre 15 centímetros y 1.5 metros. En la provincia Constitucional del Callao, las ondas marinas alcanzaron alturas entre 25 y 40 centímetros (Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra).

### 2.2.5. Run-up

Es la altura topográfica máxima que alcanza la ola del tsunami referida al nivel medio del mar. Esto se debe a que el tsunami no se interrumpe en la orilla, sino penetra en tierra avanzando todo lo que las condiciones topográficas le permiten, tal como se observa en la Figura 17.



**Figura 17. Esquema del Run-up del tsunami**

### 2.2.6. Energía de un tsunami

La energía de un tsunami puede ser medida a partir de su longitud de onda; por lo tanto, toda onda tiene un efecto orbital que alcanza una profundidad igual a la mitad de su longitud de onda; tal es así, que el efecto orbital es constante y vigoroso en cualquier parte del fondo marino. Cuando toda la inmensa masa es perturbada, esta trata de recuperar su equilibrio generando una serie de olas con diferente frecuencia. Por lo tanto, debido a que la onda se propaga en toda la columna de agua, desde la superficie hasta el fondo, se puede hacer uso de la teoría lineal de la hidrodinámica para tener una idea del flujo de energía.

$$E = \frac{1}{8} \cdot d \cdot g^{(3/2)} \cdot H^2 \cdot h^{(1/2)}$$

Donde:

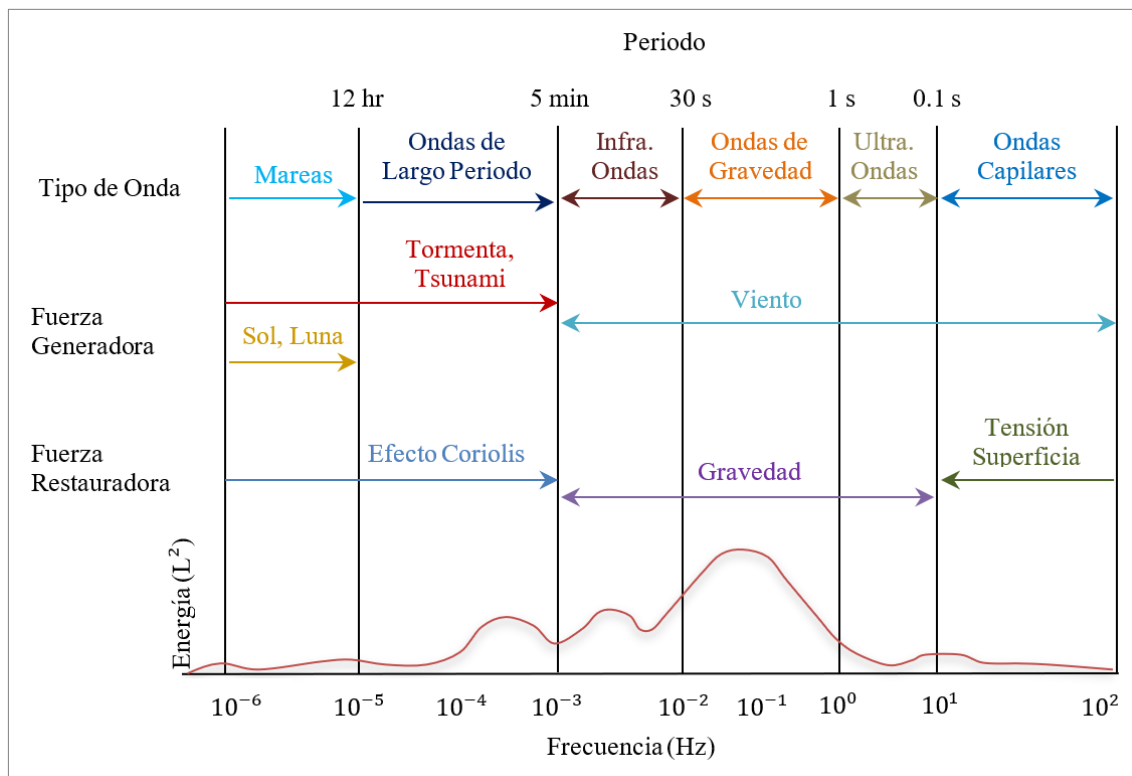
$E$ : Flujo de energía

$d$ : Densidad del fluido

$g$ : Gravedad terrestre (9.81 m/s<sup>2</sup>).

$H$ : Altura de la cresta.

$h$ : Profundidad a la que se produce el sismo.



**Figura 18. Tipos de onda, mecanismos de generación y fuerzas restauradoras asociadas a tsunamis**

### 2.3. FUERZAS INDUCIDAS POR TSUNAMIS

Las olas de un tsunami en su desplazamiento por la costa generan fuerzas que impactan con estructuras existentes; tales como: puertos, autopistas, viviendas, puentes, etc. Estas fuerzas se clasifican en hidrostáticas, hidrodinámicas, por flotación, impulsivas, por impacto y cargas gravitacionales adicionales y todas ellas dependen principalmente de la altura de la inundación, la velocidad y la dirección del flujo.

A continuación, se describe cada una de estas fuerzas.

### 2.3.1. Fuerza hidrostática

La fuerza hidrostática es la fuerza generada por agua en reposo o en movimiento a baja velocidad, la cual actúa perpendicularmente sobre superficies planas. Esta fuerza es generada por un desbalance en la presión producto de la diferencia en los niveles del agua a ambos lados del elemento estructural.

El cálculo de la fuerza hidrostática se basa en una distribución triangular de presión, por lo que su resultante estará ubicada a un tercio de la altura desde la base del triángulo de presión (Figura 19).

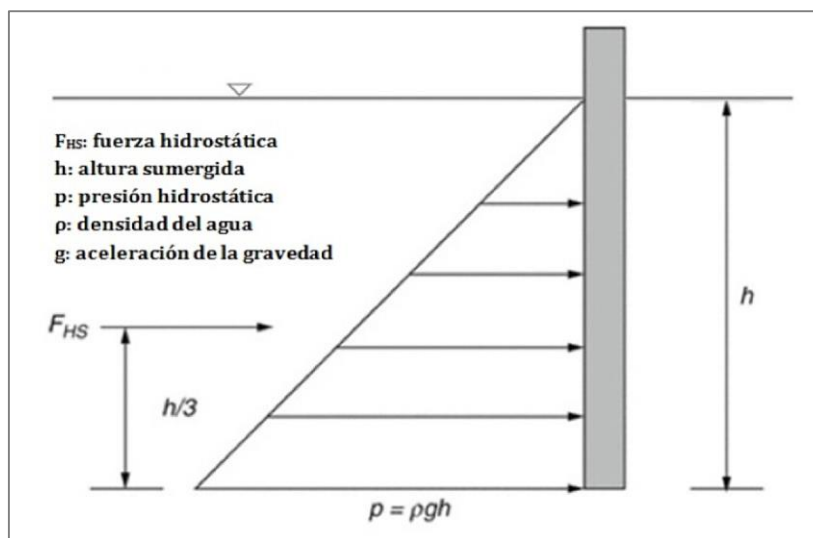


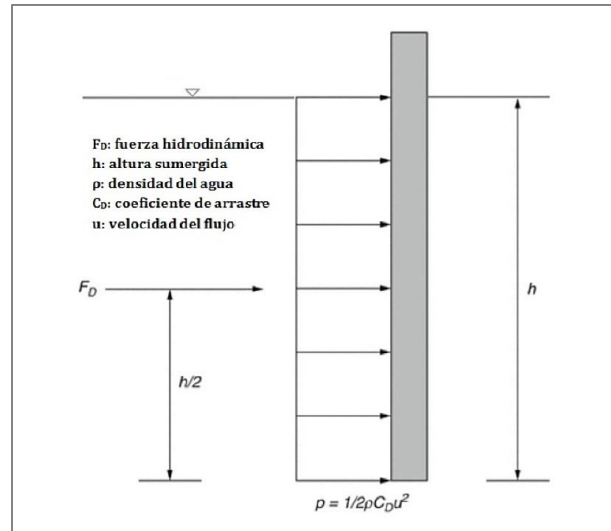
Figura 19. Distribución de presión triangular que genera la fuerza hidrostática

### 2.3.2. Fuerza hidrodinámica o de arrastre

La fuerza hidrodinámica o de arrastre es la fuerza inducida por el flujo de agua que avanza a velocidad moderada o alta alrededor de las estructuras. Esta fuerza es el resultado de las fuerzas laterales causadas por la presión que ejerce la masa de agua en movimiento y la fuerza de fricción generada cuando el agua fluye alrededor de la estructura.

La fuerza hidrodinámica es función de la velocidad de la ola y del coeficiente de arrastre, el cuál varía dependiendo de la forma geométrica del elemento estructural alrededor del

cual ocurre el flujo. Este flujo se asume uniforme, por lo que la presión es constante a lo largo de la altura del flujo y el punto de aplicación de la fuerza resultante se ubica en el centroide del área proyectada (Figura 20).



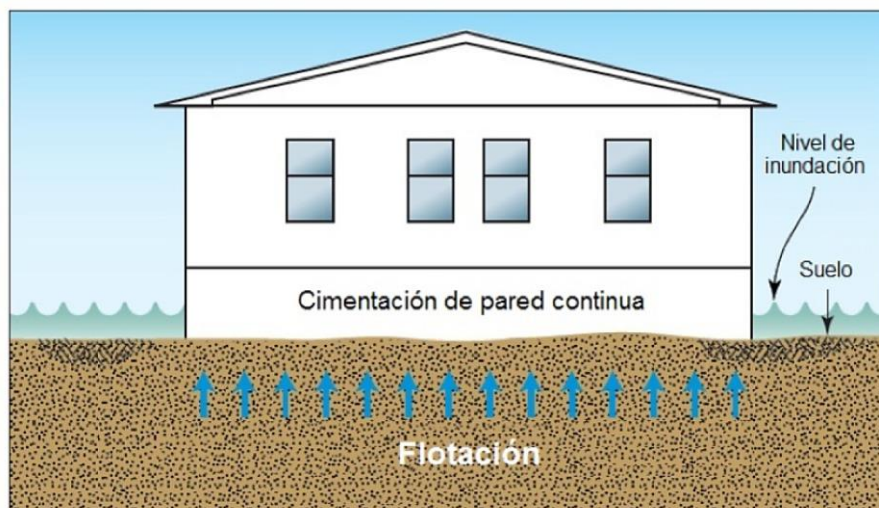
**Figura 20. Distribución de presión uniforme para la fuerza hidrodinámica**

### 2.3.3. Fuerza boyante o de flotación

La fuerza boyante o de flotación es la fuerza vertical que actúa hacia arriba a través del centro de masa de un cuerpo total o parcialmente sumergido. Su magnitud equivale al peso del volumen de agua desplazado por el cuerpo.

Las fuerzas de flotación pueden provocar problemas de estabilidad al reducir la resistencia de la estructura al vuelco y al deslizamiento. Su efecto será notorio especialmente en estructuras que fueron diseñadas únicamente para resistir cargas gravitacionales, así como en losas del piso y cimentaciones de pared continua (Figura 21).



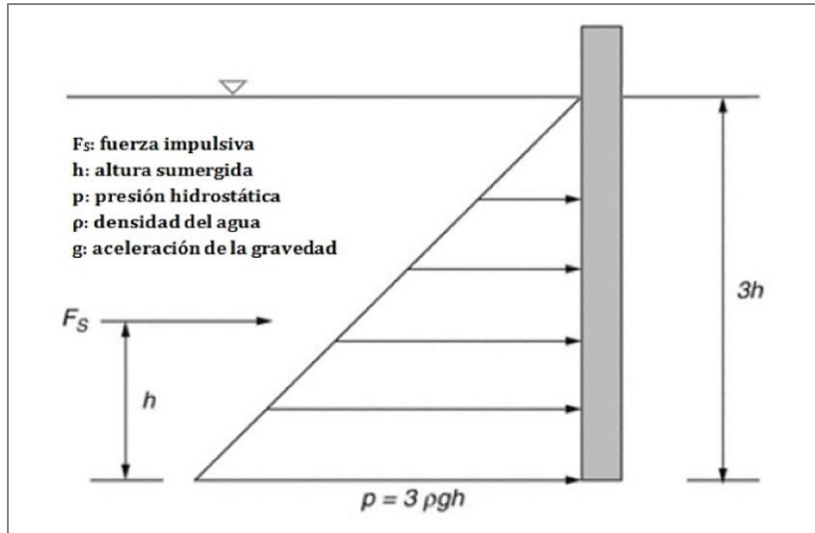


**Figura 21. Fuerza de flotación actuando en la cimentación de una estructura**

### **2.3.4. Fuerza impulsiva**

La fuerza impulsiva es una carga de corta duración generada por el impacto inicial de la ola del tsunami sobre una estructura. La fuerza impulsiva actuará al momento del primer contacto del agua con la estructura, mientras que la fuerza hidrodinámica actuará una vez que haya pasado el impacto.

La magnitud de la fuerza impulsiva depende de la geometría del elemento estructural sometido al impacto y de la velocidad del tsunami. Sin embargo, debido a la falta de experimentos detallados aplicables específicamente a olas de tsunami, el cálculo de la fuerza impulsiva no es exacto. Los autores Dames y Moore (1980) recomiendan su cálculo a partir de una distribución de presión 3 veces mayor que la presión hidrostática, lo cual resulta en una fuerza de magnitud 4.5 veces mayor que la fuerza hidrostática actuando a una distancia  $h$  de la base (Figura 22).



**Figura 22. Distribución de presión triangular para calcular la fuerza impulsiva**

### 2.3.5. Fuerza por el impacto de escombros

Una ola viajando tierra adentro a alta velocidad arrastrará escombros, tales como automóviles, piezas de edificios, madera a la deriva, botes, barcos y contenedores. El impacto de este tipo de objetos sobre una estructura puede inducir fuerzas significativas sobre la misma, provocando daños estructurales e incluso el colapso.

En comparación con las otras fuerzas, la fuerza por impacto de escombros es despreciable al evaluar la fuerza lateral total sobre la estructura, pero toma importancia en el diseño de miembros estructurales individuales sujetos al impacto (Figura 23). Esta fuerza puede modelarse como una carga puntual actuando sobre el elemento estructural.



**Figura 23. Daños producidos por el momento de flujo en viviendas con bloques de concreto en el balneario de La Punta, producto del tsunami del 23 de junio del 2001, Arequipa**

### 2.3.6. Cargas gravitacionales adicionales

El retiro de la inundación puede resultar en la retención de agua en los pisos elevados de la estructura. Esta retención de agua impone un peso adicional sobre los elementos del entrepiso que podría introducir una carga mayor a la utilizada para su diseño.

## 2.4. COMBINACIONES DE CARGA

Dado que las fuerzas mencionadas anteriormente no ocurren de forma simultánea, se ha propuesto distintas combinaciones de carga con el fin de calcular la fuerza total del tsunami que debe resistir la estructura. Un ejemplo es la combinación propuesta por Nouri (2007), en la que separa las fuerzas en dos escenarios: impacto inicial y post-impacto (Figura 24). El impacto inicial considera únicamente la fuerza impulsiva y la fuerza por impacto de escombros; mientras que, el post-impacto incluye las fuerzas hidrostáticas, hidrodinámica y por impacto de escombros, así como la fuerza de flotación. Esta última fuerza no forma parte de la fuerza lateral total, pero sí debe considerarse en el diseño de los elementos del piso.

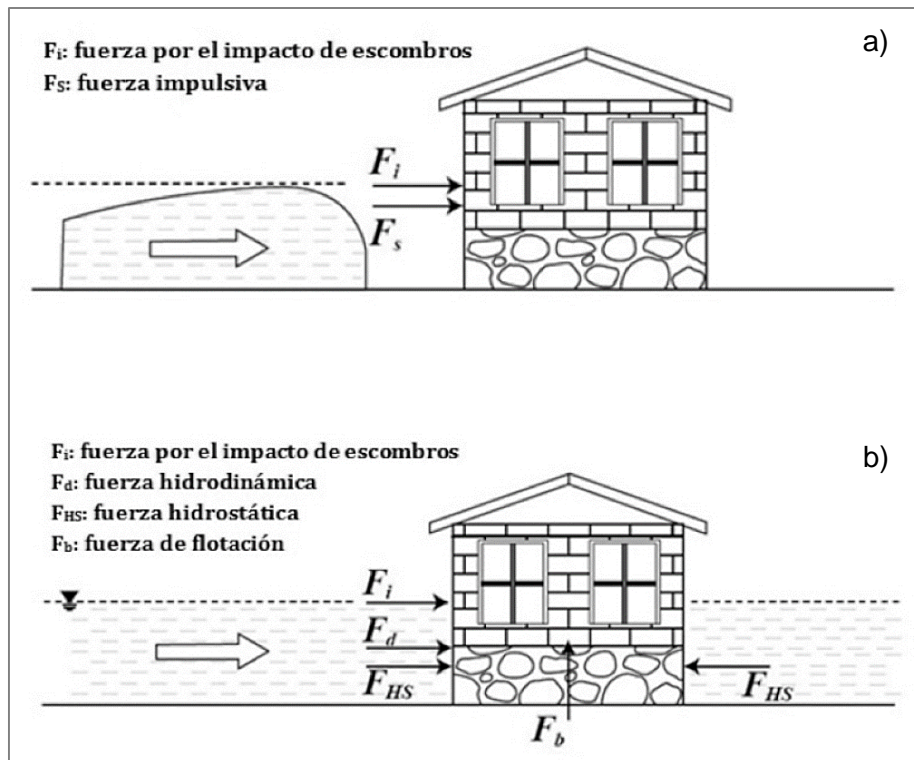


Figura 24. Combinaciones de carga asociados con a) el impacto inicial y b) el post-impacto, según Nouri (2007)

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. METODOLOGÍA

Para realizar la simulación numérica de tsunamis generados por sismos de gran magnitud ( $\geq M7.0$ ) es necesario seguir la siguiente metodología (Figura 25):

- Recolección de datos de campo o de bases de datos disponibles en internet sobre la batimetría del fondo marino y la topografía del terreno. La batimetría permitirá estimar la propagación de las olas desde el área de ruptura generada por el sismo hasta la línea de costa, la topografía permitirá caracterizar la interacción de las olas con la zona costera y como serían afectadas las zonas urbanas.
- Disponer de información técnica sobre las características y parámetros sísmicos del área de ruptura como: magnitud (M), ángulo de rumbo, ángulo de buzamiento, ángulo de deslizamiento, largo (km), ancho (km), longitud de deslizamiento (m) y profundidad (km).
- Análisis cualitativo y cuantitativo de los posibles factores desencadenantes para la generación del tsunami. Basándose en la información histórica de los eventos que afectaron el área de estudio para proponer escenarios sísmicos que podría generar un tsunami en el litoral costero.
- Simulación numérica y generación de escenarios de inundación de flujos de agua provenientes del océano, usando la herramienta informática TUNAMI-N2, que es un modelo matemático bidimensional de simulación hidráulica de tsunamis en sus tres fases: generación sísmica, propagación oceánica e inundación costera.
- Análisis y evaluación de los escenarios que se presentan después de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud como áreas afectadas por el volumen de agua proveniente del océano. Así mismo, las alturas y velocidades de inundación en dichas áreas.
- Disponer de los mapas catastrales de las áreas urbanas y balnearios distribuidas a lo largo del litoral costero que pudieran ser afectadas por los flujos de agua proveniente del océano.

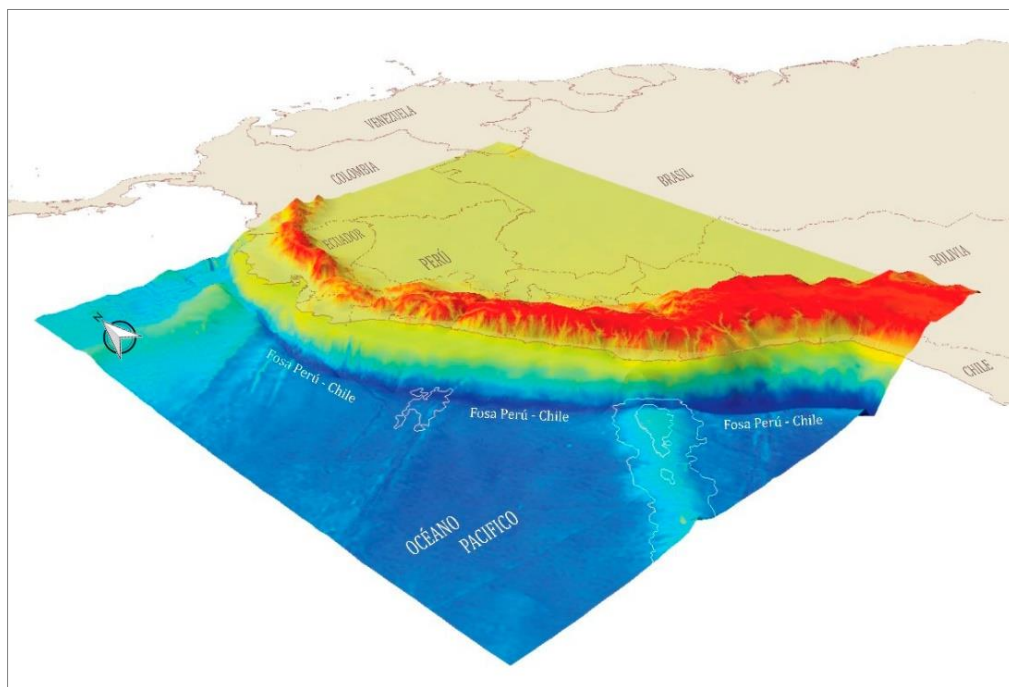
- Construcción de escenarios de peligro en áreas urbanas por inundación de flujos de agua por tsunami.
- Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el presente estudio técnico.



**Figura 25. Infografía de la metodología aplicada**

### 3.2. DATOS

Los datos a ser empleados en el presente estudio son de alta resolución (menor a 10 m), esto con el fin de caracterizar el peligro por tsunami de la manera más precisa posible. En general, los datos empleados son convertidos a un modelo digital de terreno (MDT), el cual contiene un valor de altitud,  $z$ , al que acompañan los valores correspondientes de  $x$  e  $y$ , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial (Figura 26).



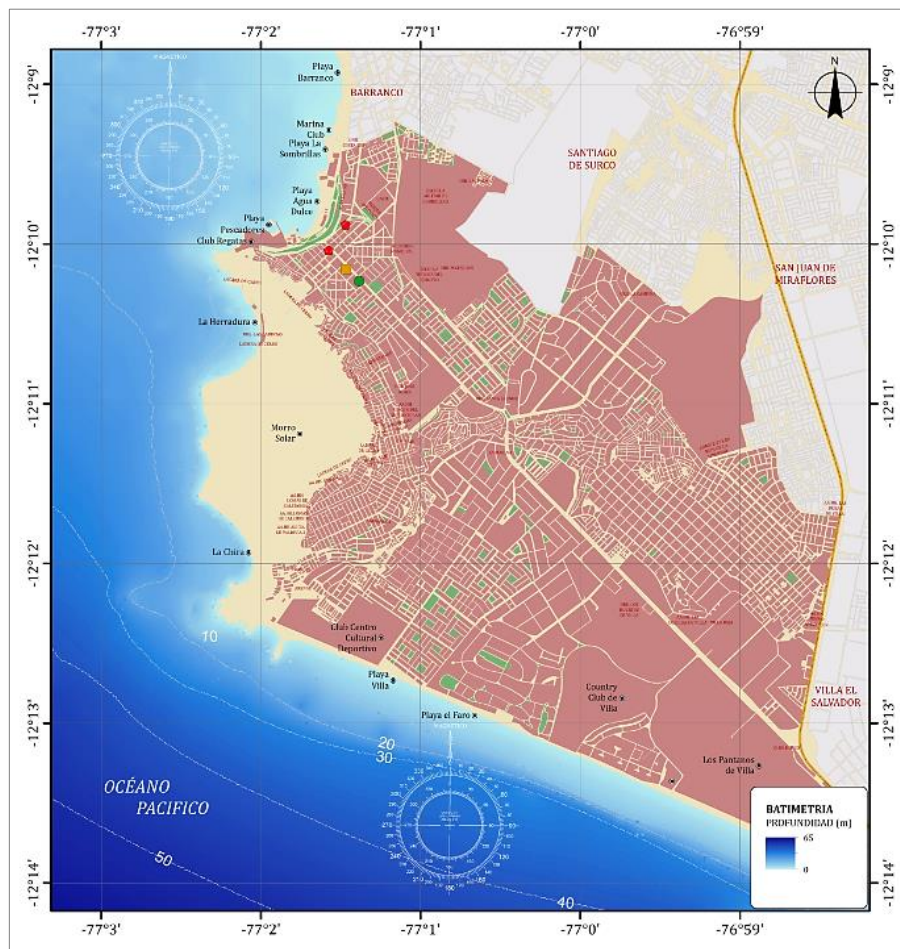
**Figura 26. Modelo de Elevación Digital, topografía y batimetría para el Perú**

#### 3.2.1. Datos batimétricos

Para elaborar el mapa batimétrico del área de estudio se empleó datos de las cartas batimétricas 223, 2233, 2237 y 2238 adquiridas de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN); así como, datos de modelos globales de profundidad marítima, modelo empleado GEBCO. Estos datos fueron convertidos a un modelo digital de terreno (MDT) considerando valores de altitud ( $z$ ), longitud ( $x$ ) y latitud ( $y$ ), expresados en el sistema de proyección geográfica para su referenciación espacial con un sesgo de  $\pm 1$  y  $\pm 1$  metros en su componente vertical y horizontales respectivamente.

Con la base de datos final se ha elaborado la superficie batimétrica del área de estudio con una resolución espacial de cinco metros, suficiente para lograr caracterizar adecuadamente el relieve batimétrico (Figura 27). Según el mapa batimétrico, las playas que se encuentran en el litoral costero del distrito de Chorrillos tienen profundidades menores a los cinco metros; siendo más superficial en la dirección de norte a sur. Asimismo, es notorio que de ocurrir un tsunami frente al distrito de Chorrillos la dirección de las olas tendrá la dirección NO-SE,

Finalmente, los flujos de agua provenientes del mar por un posible sismo de gran magnitud son propagados de manera homogénea por el relieve marítimo del área de estudio teniendo velocidades aproximadas a los 800 km/h, la misma que disminuye proporcionalmente con la disminución de la profundidad, pero generaría el incremento en las alturas de las olas del tsunami a lo largo del litoral costero afectando todas las zonas susceptibles a inundaciones, entre ellas las costas del distrito de Chorrillos.



**Figura 27. Mapa batimétrico de la zona de estudio**

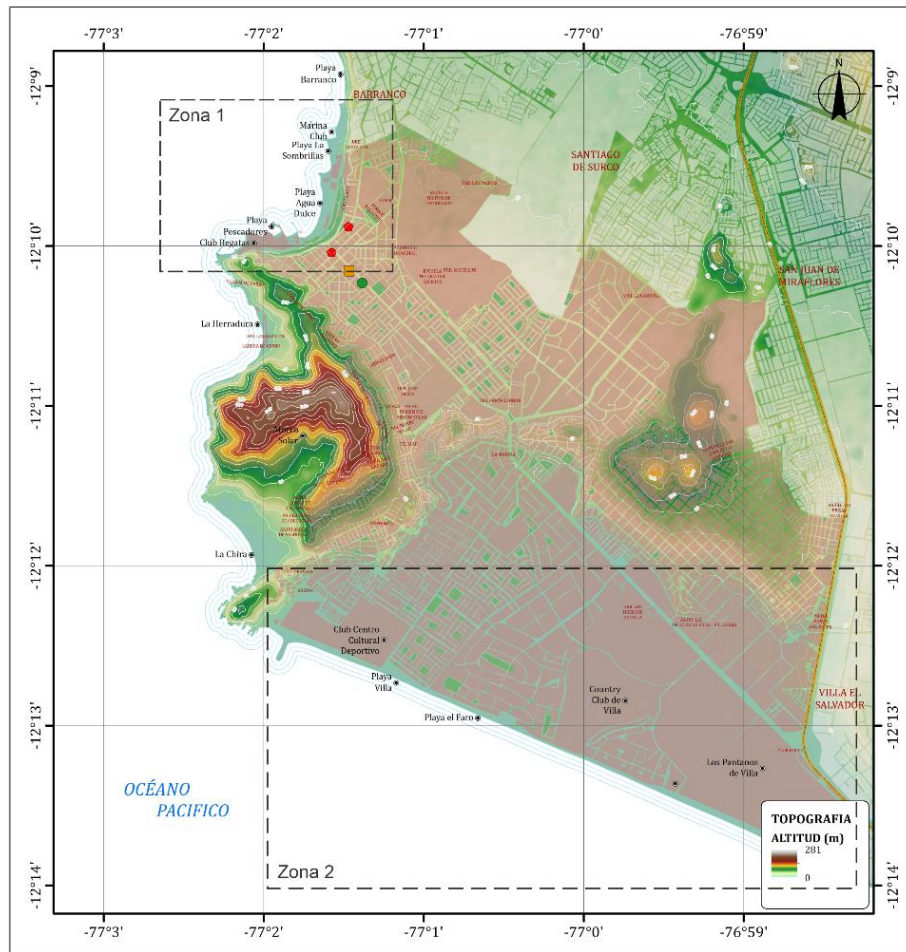
### **3.2.2. Datos topográficos**

Para elaborar el mapa topográfico del área de estudio se empleó el levantamiento topográfico realizado con dron para la costa verde (CENEPRED 2019); Así como, datos de curvas de nivel y puntos geodésicos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), además de datos satelitales de elevación del sensor ALOS PALSAR. Estos datos fueron convertidos a un modelo digital de terreno (MDT) considerando valores de altitud (z), longitud (x) y latitud (y), expresados en el sistema de proyección geográfica para su referenciación espacial con un sesgo de +/- 2 y +/- 3 metros en su componente vertical y horizontales respectivamente.

Con la base de datos final se ha elaborado la superficie topográfica del área de estudio con una resolución espacial de cinco metros, suficiente para lograr caracterizar adecuadamente el relieve topográfico (Figura 28). Según el mapa topográfico, la zona urbana del distrito de Chorrillos se encuentra a una altura promedio de 35 msnm; mientras que, el área de los balnearios se encuentra a una altura del orden de 5 msnm. Asimismo, es notorio que desde la línea de costa hasta llegar un kilómetro de distancia tierra adentro, el desnivel relativo del terreno no supera los 10 metros de altura; Es decir, suficiente para permitir que flujos de agua provenientes del océano puedan circular con altas velocidades, siendo un peligro para las personas que se encuentren en los balnearios y para la zona urbana ubicada en el litoral costero del distrito de Chorrillos.

Finalmente, los flujos de agua provenientes del mar generados por un posible sismo de gran magnitud, son canalizados por las zonas de poca altura a lo largo del litoral costero afectando todas las zonas susceptibles a inundaciones, entre ellas las costas del distrito de Chorrillos.

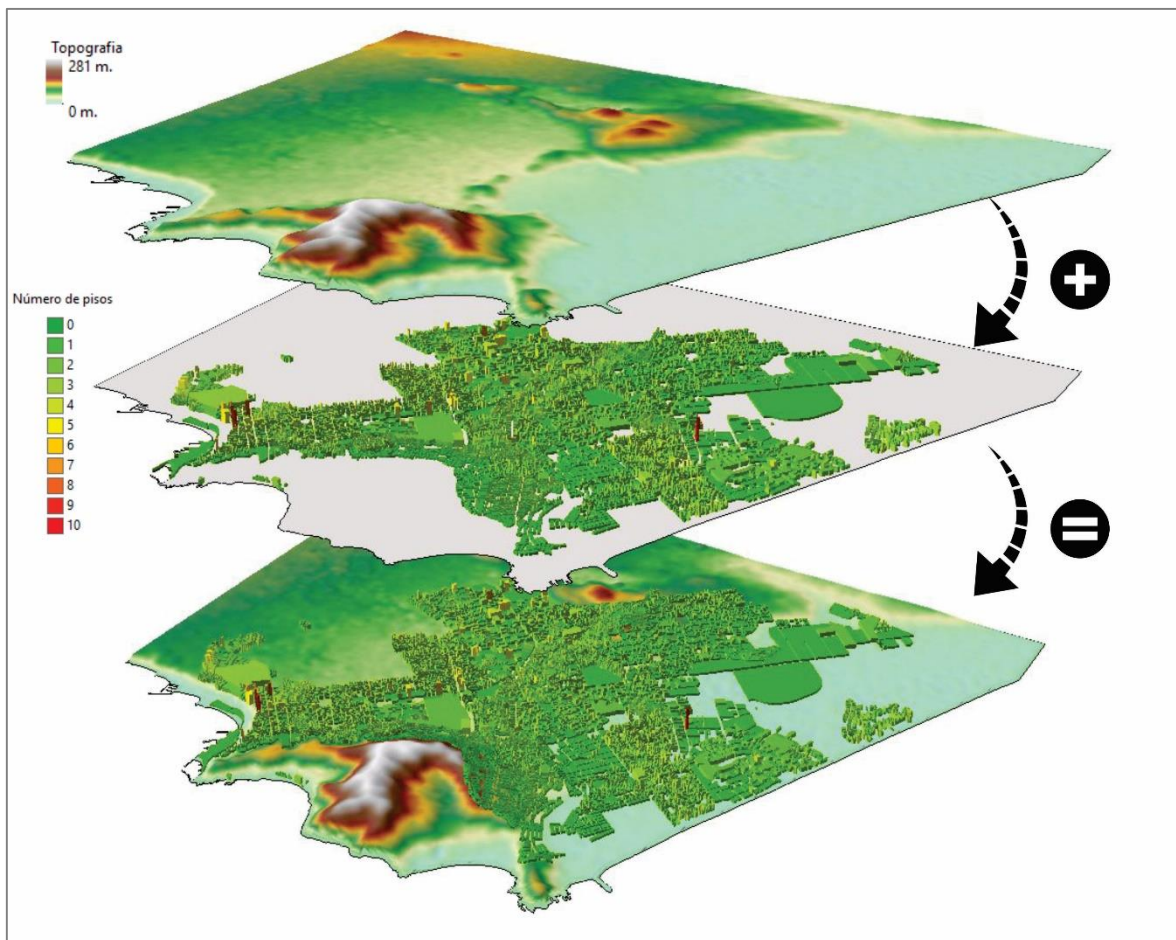




**Figura 28. Mapa topográfico de la zona de estudio**

Para realizar el análisis del impacto del tsunami sobre las edificaciones que se encuentren dentro del área de inundación, se empleó datos de alta resolución espacial. La zona 1 del distrito de Chorrillos (Figura 28) contaba con datos topográficos tomados con dron estos datos tienen una resolución de 1 metro, logrando visualizar claramente las edificaciones. La zona 2 del distrito de Chorrillos (Figura 28) solo contaba con datos de curvas de nivel, no se apreciaba las edificaciones, motivo por el cual se empleó la base de datos catastrales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), teniendo información del número de pisos y alturas de las edificaciones comprendidos en el área de estudio. Esta información permitió generar un campo de alturas para representar los edificios como si fueran cotas topográficas, esta información se añadió al modelo digital de terreno existente, generando un pseudo modelo digital de superficie para el distrito de Chorrillos. Para verificar la información obtenida se realizó la comparación con los datos tomados con el dron y se obtuvo una similitud del orden del 94 por ciento de representatividad. Finalmente, esta información fue procesada bajo el Sistema de Información Geográfica (SIG) a fin de

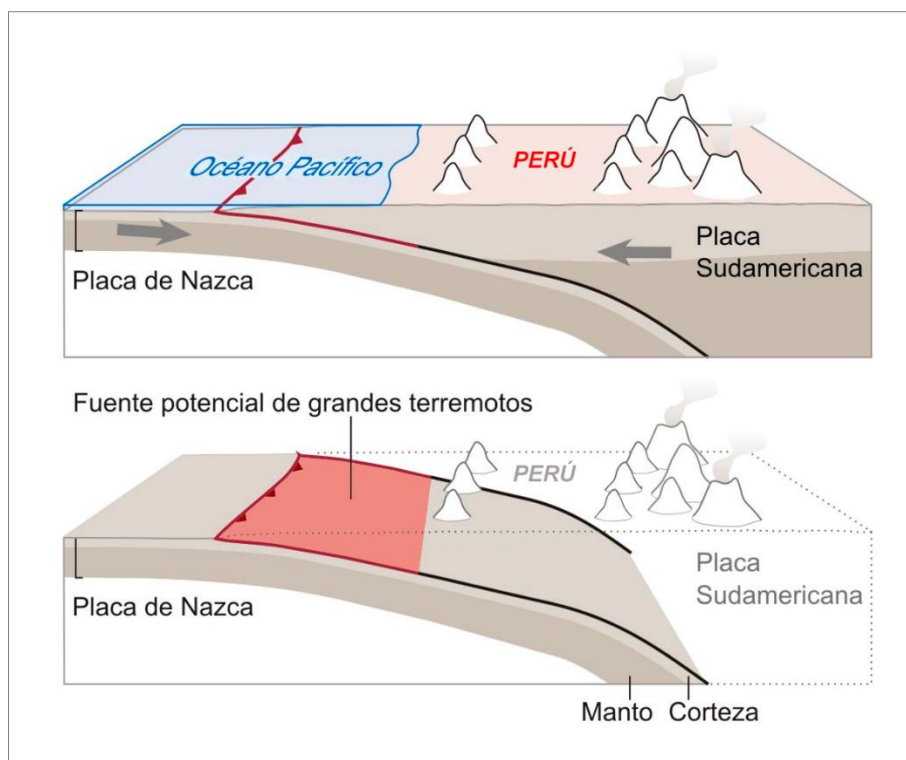
disponer de una base de datos de mejor calidad y resolución espacial de dos metros (Figura 29).



**Figura 29. Implementación de información catastral al modelo digital de terreno**

### 3.2.3. Factor desencadenante: sismos extremos

Para realizar las simulaciones numéricas de posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de un tsunami, es necesario evaluar el factor desencadenante. En el presente estudio solo se considera la generación de un tsunami por la ocurrencia de un sismo de gran magnitud (mayor a M7.0) con profundidad menor a los 60 km y con epicentro en la zona de subducción, fuente potencial de grandes terremotos (Figura 30). Un sismo de estas características generaría altos niveles de deformación del fondo marino, el mismo que sería trasladado al nivel medio del mar generando las olas que al llegar a costa formarían el tsunami.



**Figura 30. Esquema de la zona de subducción**

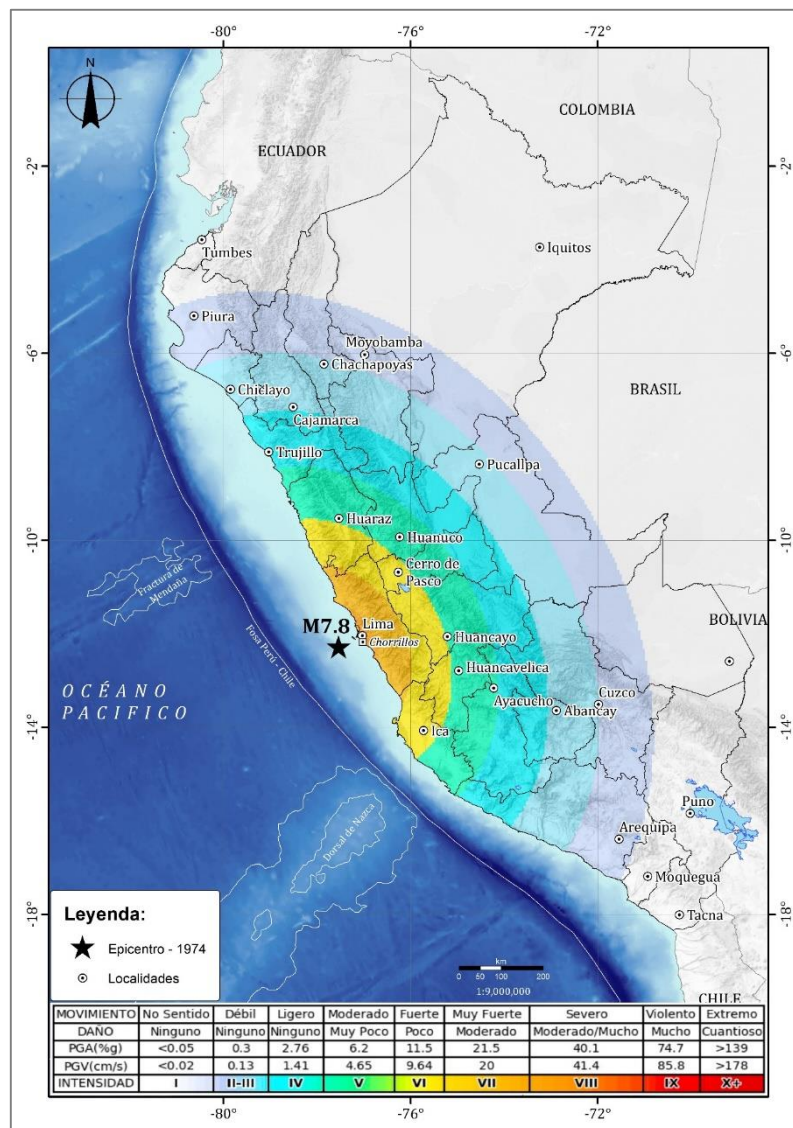
Desde el punto de vista sísmico, el distrito de Chorrillos está expuesto a elevados niveles de sacudimiento del suelo, afectando a diversas áreas urbanas. Por ejemplo, el sismo del 2007 con epicentro a 60 km al oeste de la localidad costera de Pisco habría producido en la ciudad de Ica aceleraciones del suelo del orden de 0.45g, suficiente como para haber provocado el colapso del Santuario del Señor de Luren y miles de viviendas. Este mismo sismo produjo en el distrito de Chorrillos aceleraciones del orden de 0.10 g, suficiente para generar daños en viviendas deterioradas. Es sabido, que la zona costera de la región central del Perú, frente al departamento de Lima, viene acumulando energía desde el año 1746 y podría dar origen a un sismo con magnitud del orden de M8.5. Según Pullido *et al* (2015) generaría aceleraciones, en el distrito de Chorrillos, valores de 0.7 g.

Para estimar los posibles niveles de sacudimiento del suelo en el distrito de Chorrillos, se ha considerado dos escenarios sísmicos con magnitudes de M7.8 y M8.5. Con relación a las distancias epicentro/ciudad, esta sería de 60km (epicentro – Chorrillos), tal como se muestra en la Tabla 5 y en las Figuras 31 y 32. Para el primer escenario, sismo de magnitud M7.8, la aceleración crítica esperada sería de 0.4g en la ciudad de Chorrillos. Para el segundo escenario, sismo de magnitud M8.5, se generaría una aceleración del

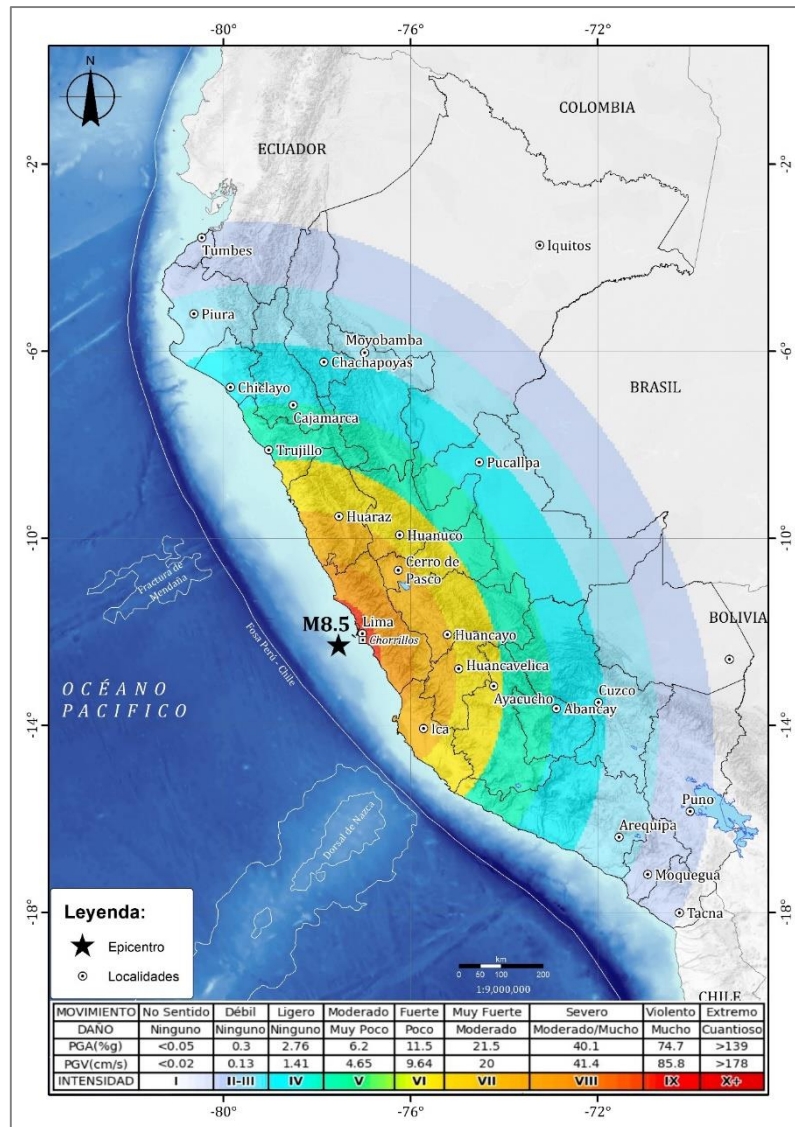
suelo de 0.65g en la ciudad de Chorrillos. De ocurrir cualquiera de estos sismos, se esperarían daños estructurales en las edificaciones, debido a que su comportamiento dinámico sería afectado por el sacudimiento del suelo, siendo influenciado por la antigüedad de sus estructuras, el tipo de material de construcción y el tipo de suelo sobre el que fue construida.

**Tabla 5. Valores de aceleración (g) teórica para sismo de subducción**

<i>SISMO DE SUBDUCCIÓN (Interface)</i>			
<i>Ciudad</i>	<i>Distancia (km) epicentro</i>	<i>Aceleración (g) M7.8</i>	<i>Aceleración (g) M8.5</i>
Chorrillos	60	0.4	0.65



**Figura 31. Mapa de intensidades teóricas para sismo de M7.8**



**Figura 32. Mapa de intensidades teóricas para sismo de M8.5**

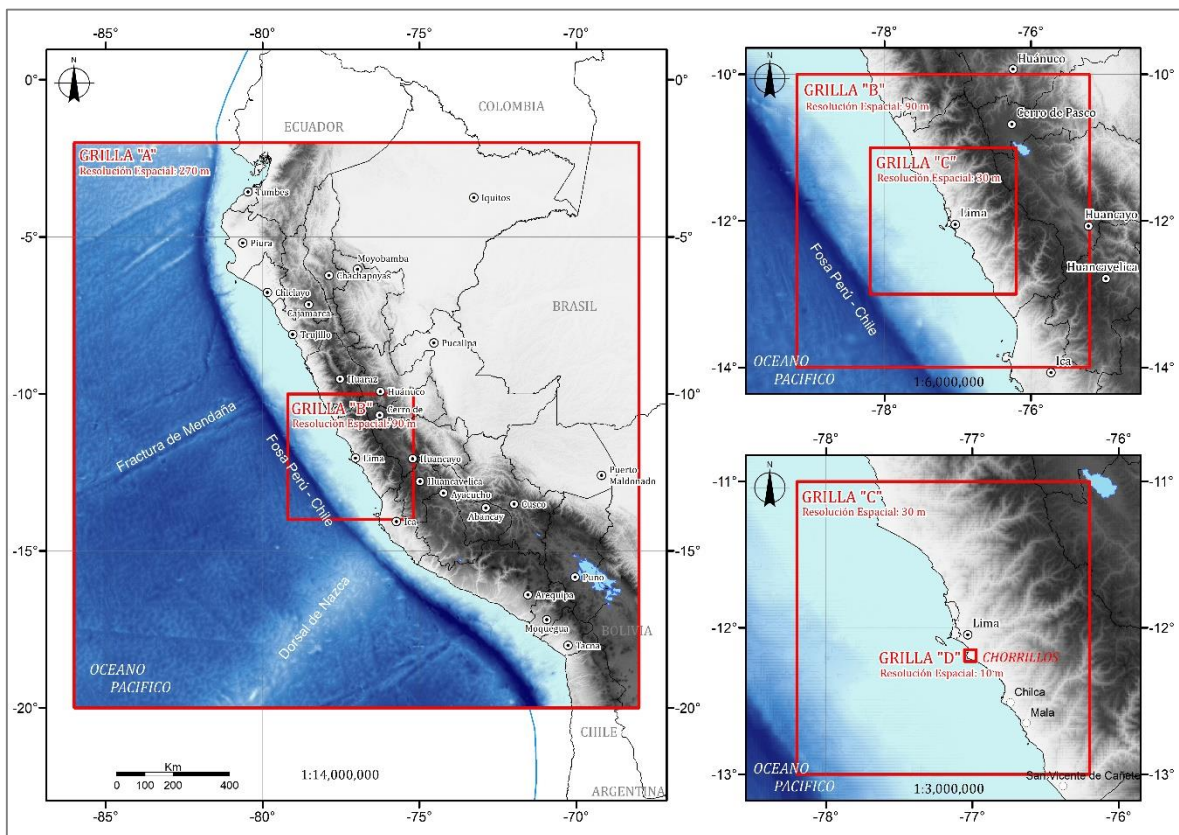
### 3.3. MODELO NUMÉRICO: TUNAMI-N2

Para realizar la modelización numérica de tsunamis de origen cercano, se empleó el modelo numérico TUNAMI-N2, creado y desarrollado por el Dr. Fumihiko Imamura del Centro de Control e Investigación de Desastres de la Universidad de Tohoku, Japón. La descripción y códigos fuente de este modelo se encuentran en “Manuales y Guías N° 35 IOC/UNESCO”. Este modelo numérico es una herramienta computacional muy utilizada para los estudios de generación, propagación e inundación de tsunamis.

El modelo numérico TSUNAMI-N2, escrito en FORTRAN 77, consta de las ecuaciones de movimiento no lineales para aguas someras, integradas verticalmente y la ecuación de

continuidad, sin el término de efecto Coriolis. Además, incluye un algoritmo de fricción de fondo construido al interior del modelo. La ecuación de continuidad y las ecuaciones de movimiento se discretizan en un esquema de diferencias finitas centrales denominado “salto de rana”. El dominio de integración se discretiza mediante un conjunto de grillas anidadas de diferente resolución espacial, siendo la más detallada la del área de estudio. Las grillas representan regiones del área de ruptura en las que se va trasladando la solución de la simulación numérica (Goto *et al.* 1997), traslado que debe cumplir con resoluciones espaciales de celdas que se tripliquen cuando se pasa de una celda exterior a otra interior (Figura 33). Mayores detalles del modelo numérico en el Anexo A.

Actualmente, el modelo numérico TSUNAMI-N2, es empleado por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN) para elaborar las cartas de inundación, también se ha utilizado para otros estudios realizados a nivel mundial, como los tsunamis de Sumatra 2004, Chile 2010 y Japón 2011, estos resultados validan su alta correlación entre los valores calculados y observados.



**Figura 33. Representación de grillas anidadas para la simulación numérica**

Para realizar la modelización numérica de un escenario probable de tsunami generado por un sismo extremo, se considera los parámetros sísmicos y el modelo digital del terreno (batimetría y topografía). Los resultados obtenidos permiten elaborar los mapas de áreas de inundación máxima, altura del volumen de agua, velocidades del flujo de agua y tiempos de llegada.

El análisis de los posibles escenarios sísmicos conlleva a realizar dos simulaciones numéricas para el probable tsunami, ambos descritos en la Tabla 6.

**Tabla 6. Simulaciones de probables tsunamis**

	<b>Factor Desencadenante</b>	<b>Zona Afectada</b>	<b>Aplicación</b>
Simulación 1	Sismo M7.8	Chorrillos	Validación
Simulación 2	Sismo M8.5	Chorrillos	GRD

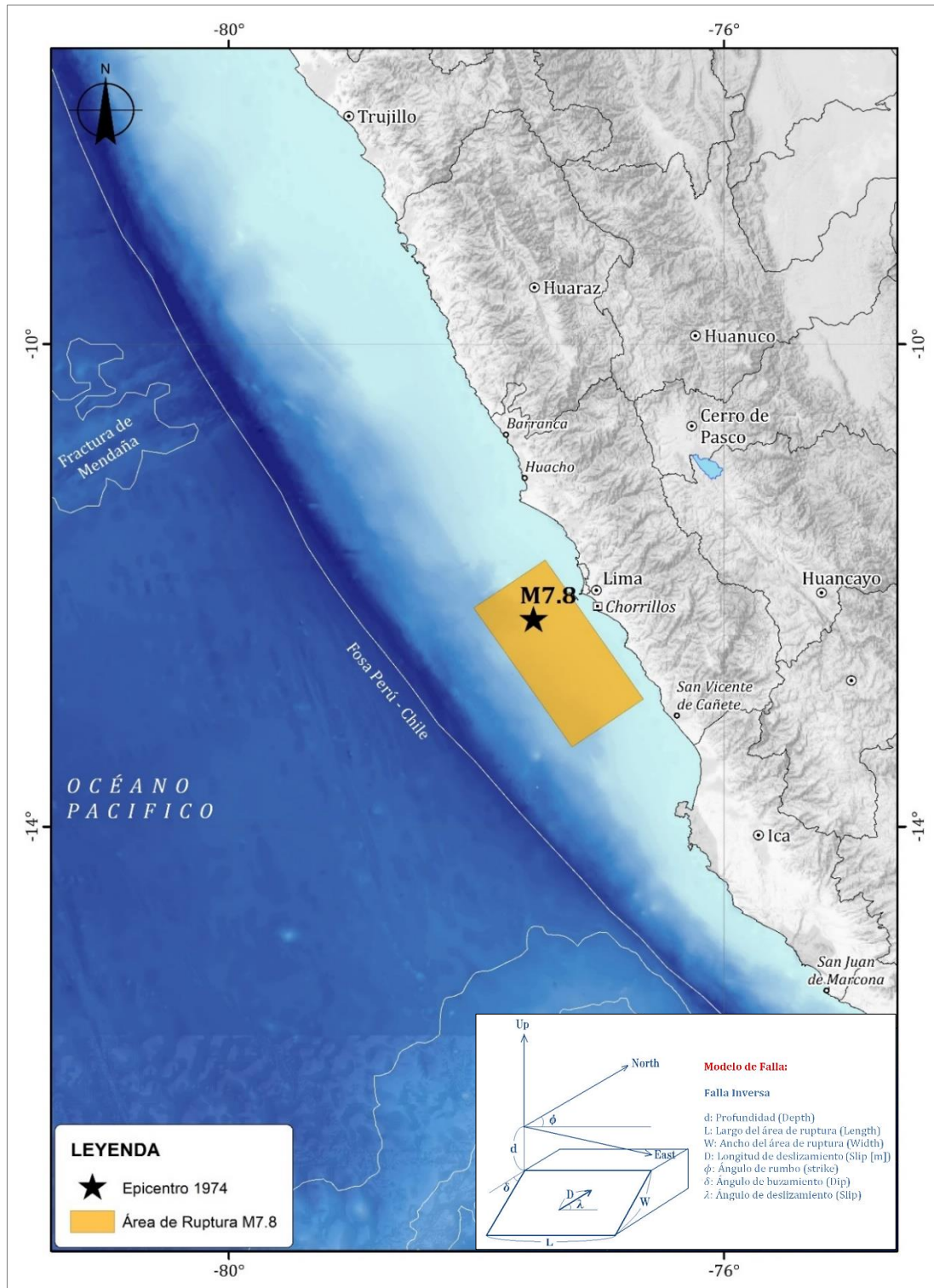
### **3.3.1. Simulación 1: sismo de magnitud m7.8**

En el caso de un tsunami generado por la ocurrencia de un sismo de magnitud M7.8 con origen en el proceso de subducción, epicentro a 60 km al O del distrito de Chorrillos y foco a una profundidad de 30 km, se considera un área de ruptura del sismo de aproximadamente 130 km de largo por 65 km de ancho; Además de una longitud de desplazamiento de 2.5 metros (valores obtenidos empleando las leyes de escalamiento de Papazachos 2004). Así mismo, el área de ruptura tendría un azimut del orden de los 320 grados, un ángulo de buzamiento de 20 grados y un ángulo de deslizamiento de 90 grados. En la Figura 34 se muestra la extensión del área de ruptura para el escenario 1 y en la Tabla 7 las condiciones iniciales consideradas en el modelo numérico del tsunami.

En la Figura 35 se muestra el peligro por tsunami en el océano Pacífico para el escenario 1, siendo las zonas costeras de color rojo las más afectadas con alturas de olas mayores a 1.5 metros. Las zonas de color amarillo tendrían olas del orden de 0.5 a 1.5 y las zonas verdes, alturas menores a los 0.5 metros. Estos valores son mostrados con mayor detalle en el siguiente capítulo de la tesis. Además se observa como las olas viajan por todo el océano Pacífico y las líneas de color negro, representan los intervalos de tiempos de arribo de las olas del tsunami.

**Tabla 7. Parámetros sísmicos utilizados para simular el tsunami generado por un sismo de M7.8**

Magnitud	Profundidad (km)	Largo (km)	Ancho (km)	Longitud de Deslizamiento (m)	Angulo de Rumbo	Angulo de Buzamiento	Angulo de Deslizamiento
M7.8	25.0	130.0	65.0	2.5	325°	17°	90°



**Figura 34. Mapa del área de ruptura para un sismo de magnitud M7.8**



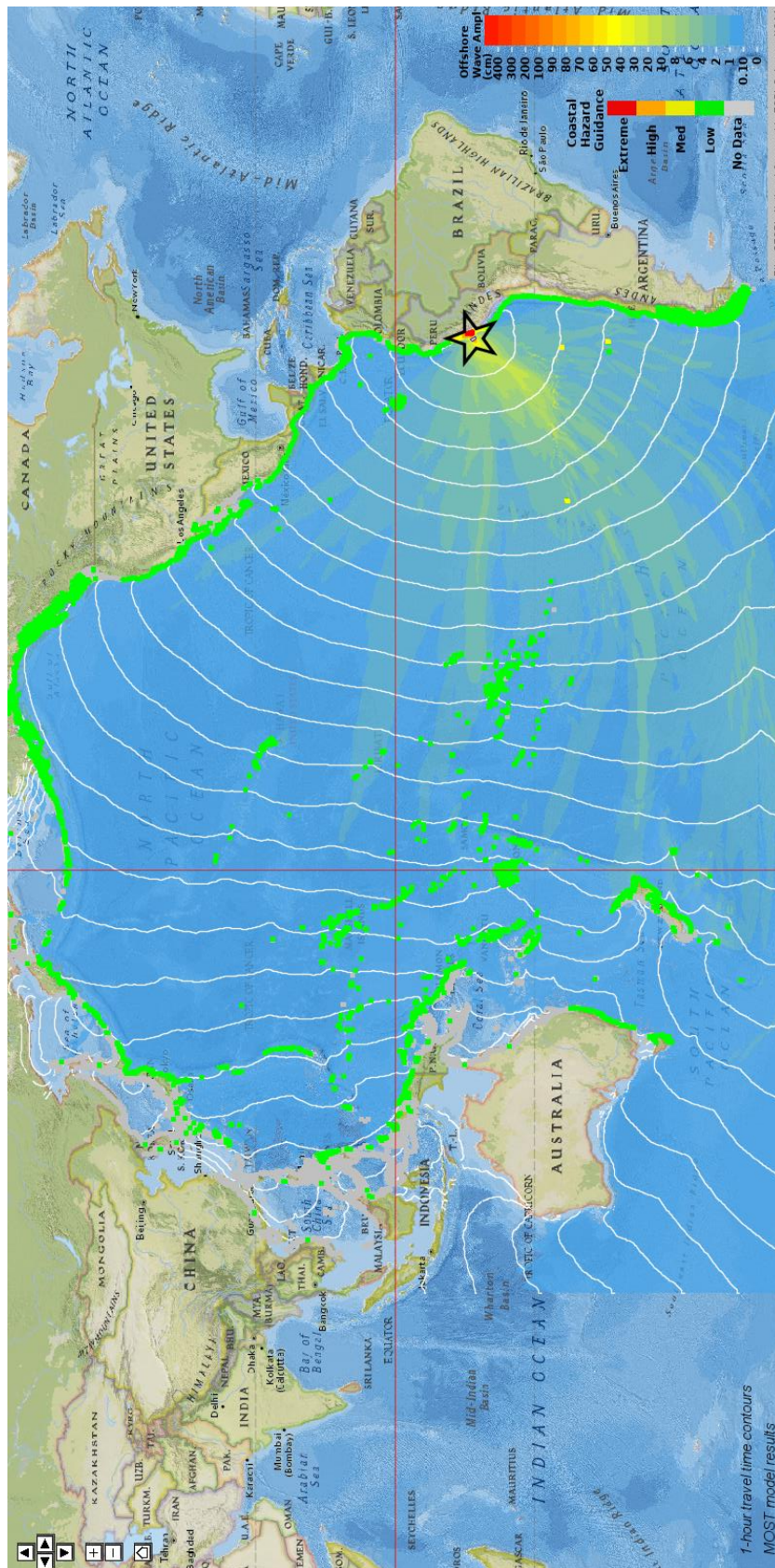


Figura 35. Propagación de las olas de tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8 (Escenario 1)

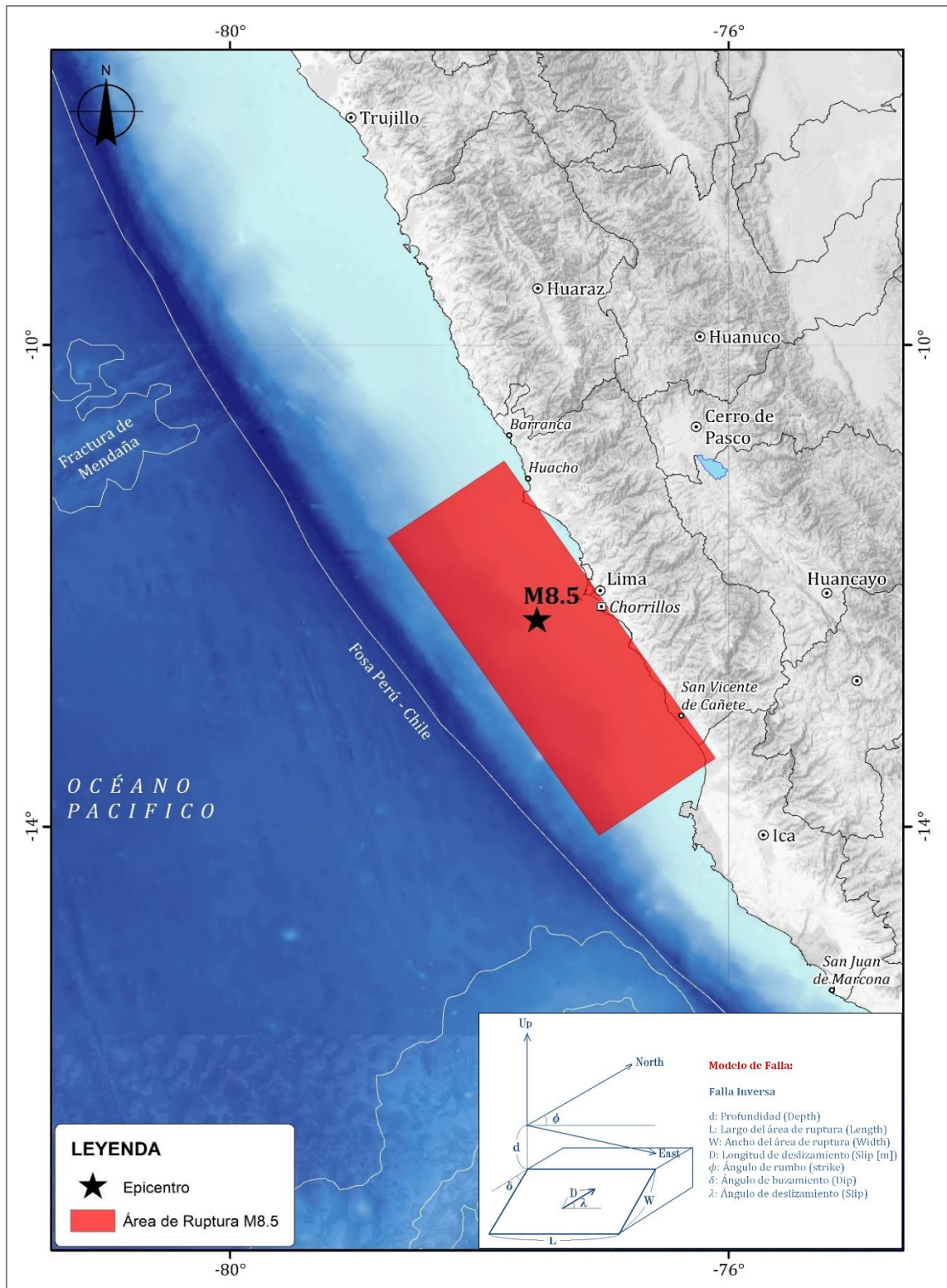
### 3.3.2. Simulación 2: sismo de magnitud m8.5

En el caso de un tsunami generado por la ocurrencia de un sismo de magnitud M8.5 con origen en el proceso de subducción, epicentro a 60 km al O del distrito de Chorrillos y foco a una profundidad de 30 km, se considera un área de ruptura del sismo de aproximadamente 320 km de largo por 110 km de ancho; Además de una longitud de desplazamiento de 6 metros (valores obtenidos empleando las leyes de escalamiento de Papazachos 2004). Así mismo, el área de ruptura tendría un azimut del orden de los 320 grados, un ángulo de buzamiento de 20 grados y un ángulo de deslizamiento de 90 grados. En la Figura 36 se muestra la extensión del área de ruptura para el escenario 2 y en la Tabla 8, las condiciones iniciales consideradas en el modelo numérico del tsunami.

En la Figura 37 se muestra el peligro por tsunami en el océano Pacífico para el escenario 2, siendo las zonas costeras de color rojo las más afectadas con alturas de olas mayores a 1.5 metros, las zonas de color amarillo tendrían olas del orden de 0.5 a 1.5 y las zonas verdes tendrían alturas menores a los 0.5 metros. Estos valores son mostrados con mayor detalle en el siguiente capítulo de la tesis. Además se observa como las olas viajan por todo el océano Pacífico y las líneas de color negro, representan los intervalos de tiempos de arribo de las olas del tsunami.

**Tabla 8. Parámetros sísmicos utilizados para simular el tsunami generado por un sismo de M8.5**

Magnitud	Profundidad (km)	Largo (km)	Ancho (km)	Longitud de Deslizamiento (m)	Angulo de Rumbo	Angulo de Buzamiento	Angulo de Deslizamiento
M8.5	30.0	310.0	110.0	6.0	325°	20°	90°



**Figura 36. Mapa del área de ruptura para un sismo de magnitud M8.5**

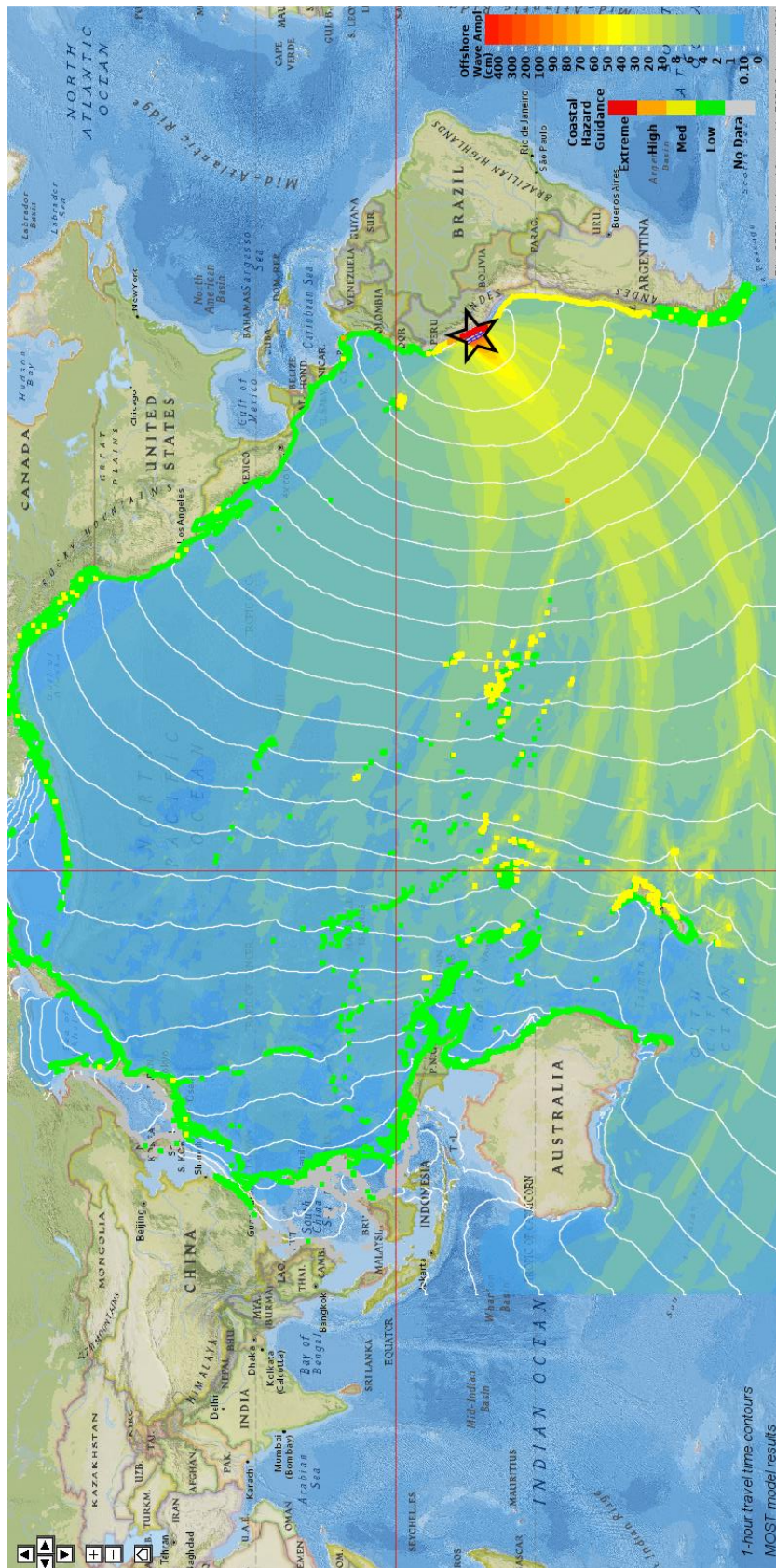
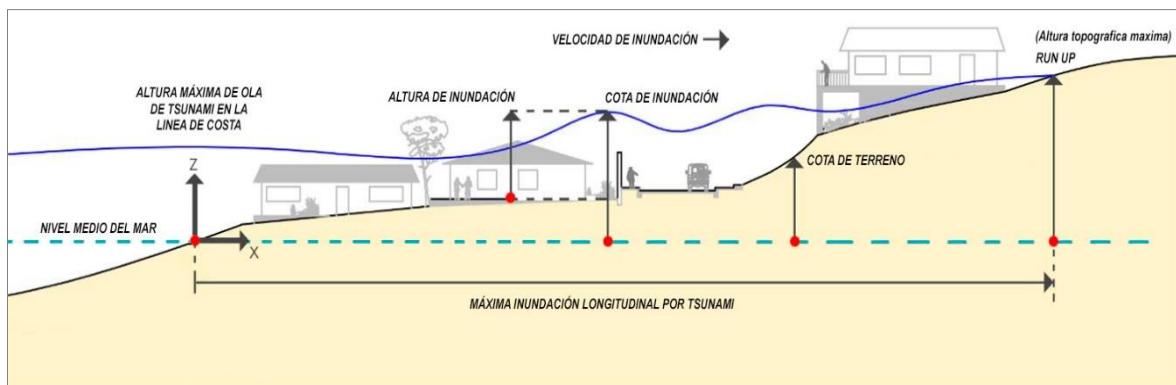


Figura 37. Propagación de las olas de tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5 (Escenario 2)

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación numérica permite conocer las características físicas de los flujos de agua de un tsunami, obteniendo información sobre la generación del tsunami, las alturas máximas de olas en la línea de costa, mareogramas sintéticos que mostraran la dinámica de las olas del tsunami, zonas inundables, alturas máximas, velocidad del flujo de agua que afectarían áreas urbanas y balnearios (Figura 38). Estos resultados permitirán proponer el mapa de peligrosidad para el distrito de Chorrillos.



**Figura 38. Esquema de los parámetros obtenidos como resultados**

Así mismo, la validación de los resultados obtenidos para la simulación 2 (M8.5), se realizó comparando los registros mareográficos del tsunami registrado en las estaciones de La Punta (Callao) y San Juan de Marcona (Ica) con los registros mareográficos sintéticos obtenidos de la simulación 1 (M7.8), los cuales presentan un alto nivel de correlación, quedando validada la simulación 2, por similitud en la metodología empleada (Anexo B).

### 4.1. GENERACIÓN DE TSUNAMI

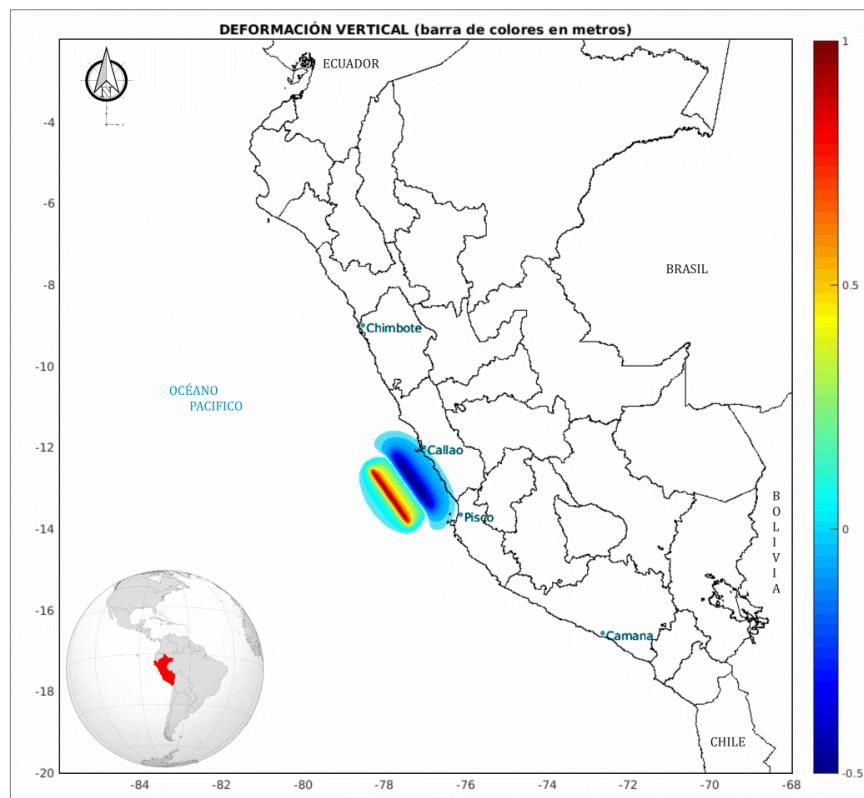
Los tsunamis se originan debido a una deformación del fondo oceánico ocasionada en su gran mayoría por sismos de gran magnitud. Para obtener el campo de deformación se aplica la teoría de Okada (1992), aplicada para una fuente sísmica rectangular finita homogénea en un medio lineal, semi-infinito e isotrópico. Debido a que el fluido es incompresible, se asume

que la deformación de la superficie del océano es instantánea y similar a la deformación del fondo marino.

Para evaluar el peligro por tsunami en el distrito de Chorrillos se proponen dos simulaciones de tsunami de campo cercano, con fuentes sísmicas ubicadas frente al área de estudio. La simulación 1, representa al tsunami ocurrido el 03 de octubre de 1974, generado por un sismo de magnitud M7.8 y la simulación 2, representa al tsunami más probable de la región central del Perú, generado por un sismo de magnitud M8.5, con una ruptura de aproximadamente 350 km de longitud, situada entre las costas de Huacho al Norte y Pisco al sur.

#### 4.1.1. Simulación 1

Para la simulación 1, sismo de magnitud M7.8, se estiman deformaciones del fondo marino del orden de 1 metro, produciendo el retiro del mar en las localidades costera que se encuentran entre Huacho y Paracas (Figura 39). Así mismo, estos valores concuerdan con datos históricos y relatos recopilados post tsunami de 1974 (Silgado 1978).



**Figura 39. Deformación vertical del fondo marino para el escenario 1 (M7.8)**

#### 4.1.2. Simulación 2

Para la simulación 2, se considera un sismo de magnitud M8.5, se estiman deformaciones del fondo marino del orden de 3 metros, produciendo el retiro del mar en las localidades costera que se encuentran entre Chimbote y San Juan de Marcona (Figura 40).

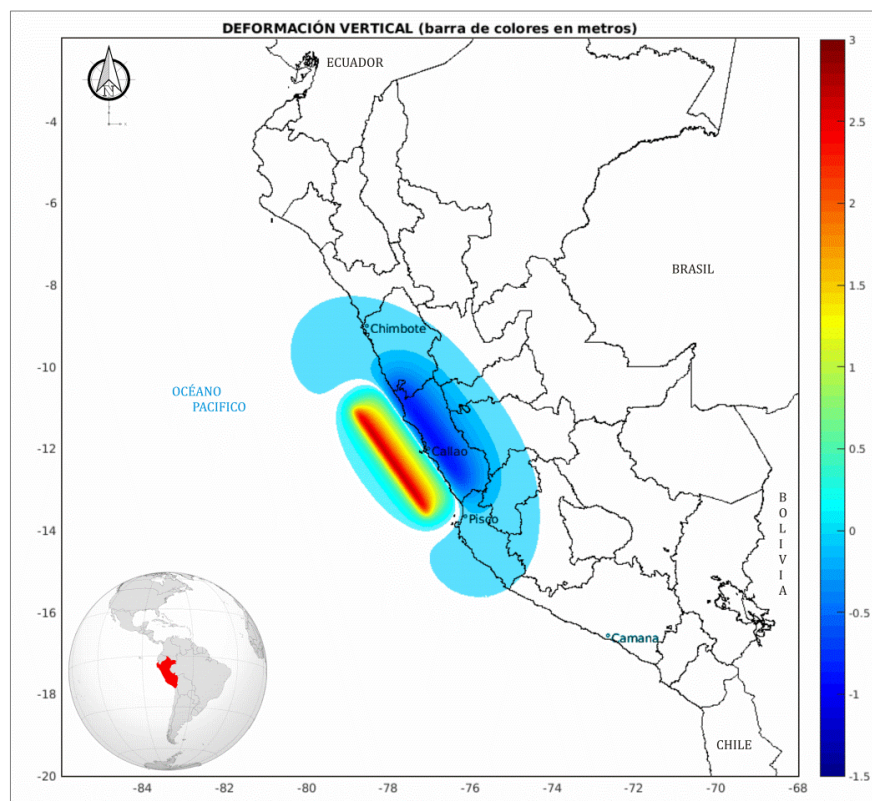


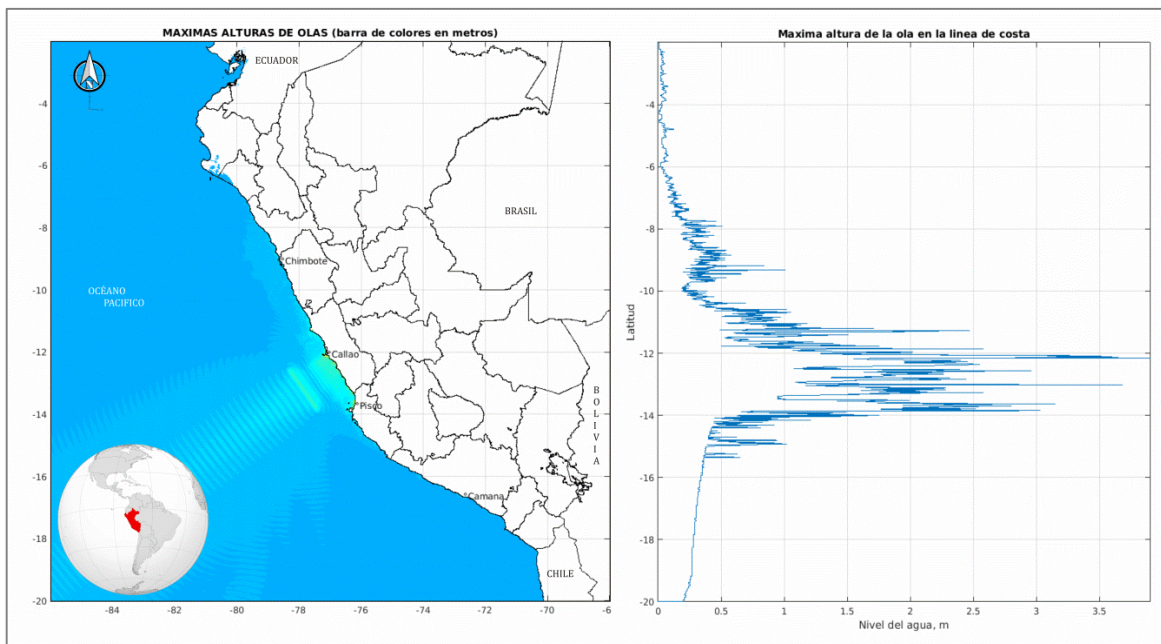
Figura 40. Deformación vertical del fondo marino para el escenario 2 (M8.5)

#### 4.2. ALTURAS MÁXIMAS DE OLAS DE TSUNAMI EN LA LÍNEA DE COSTA

La estimación de las alturas máximas de olas de tsunami en la línea de costa, son la segunda aproximación para dimensionar los escenarios de peligro por tsunami en el distrito de Chorrillos. Así mismo, las alturas estimadas no representan la máxima cota de inundación en el terreno (Run-up); generalmente, las alturas de un tsunami en el borde costero, se atenúan al inundar superficie seca; sin embargo, en zonas costeras con acantilados, si puede coincidir la altura máxima de olas con el Run-up.

### 4.2.1. Simulación 1

Para la simulación 1, sismo de magnitud M7.8, se estima en las costas del departamento de Lima, alturas máximas de olas de tsunami del orden de 3.5 - 4 metros. Las alturas estimadas muestran que debería de alertarse a las localidades costeras que se encuentren entre Huarney y San Juan de Marcona (Figura 41). Así mismo, estos valores concuerdan con reportes históricos y datos tomados en campo post tsunami de 1974 (Silgado 1978).

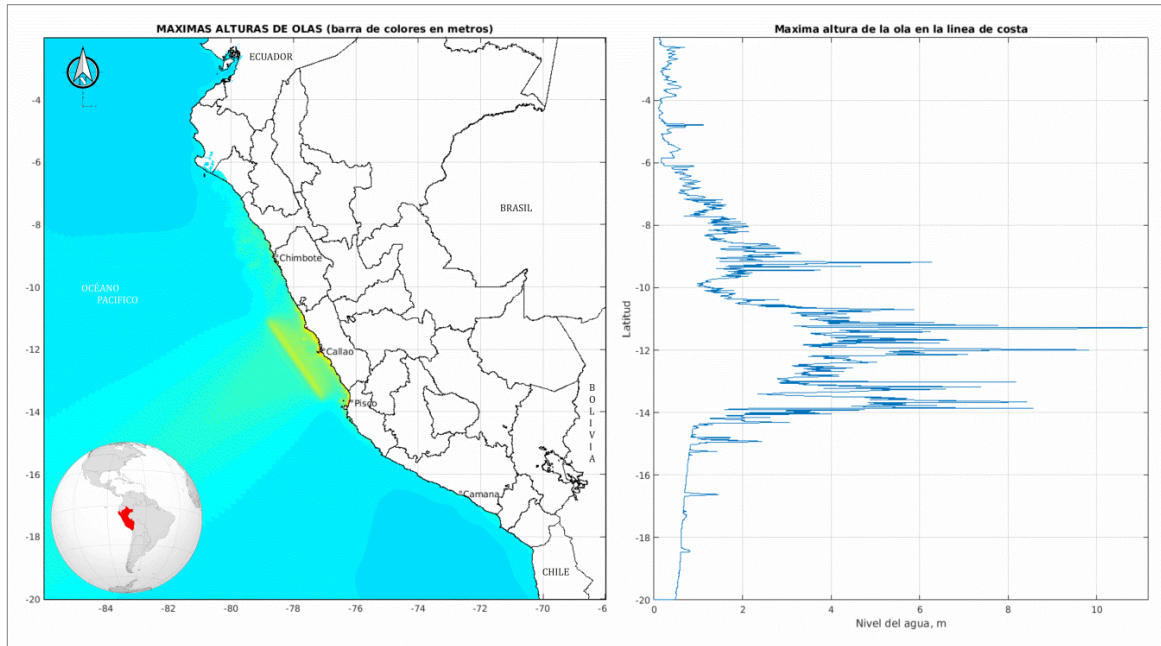


**Figura 41. Alturas máximas de olas del tsunami en la costa para la simulación 1 (M7.8)**

### 4.2.2. Simulación 2

Para la simulación 2, se considera un sismo de magnitud M8.5, con epicentro frente a las costas del departamento de Lima, siendo las alturas máximas de olas de tsunami del orden de 10 - 11 metros. De acuerdo a este escenario la alerta debería de darse para las localidades costeras que se encuentren entre Paita y Camaná (Figura 42).

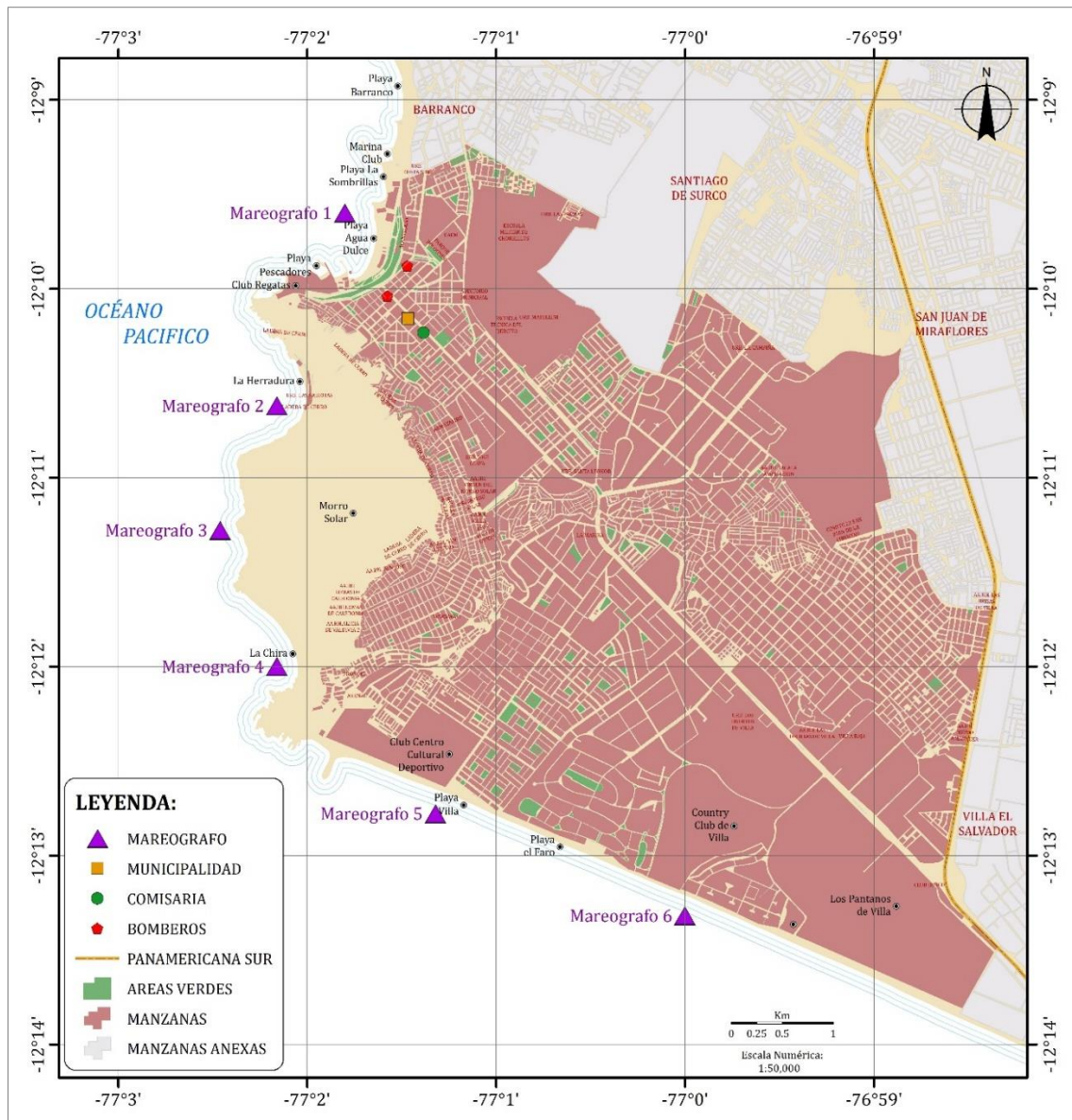




**Figura 42. Alturas máximas de olas del tsunami en la costa para la simulación 2 (M8.5)**

### **4.3. VARIACIÓN DEL MAR DEBIDO AL TSUNAMI**

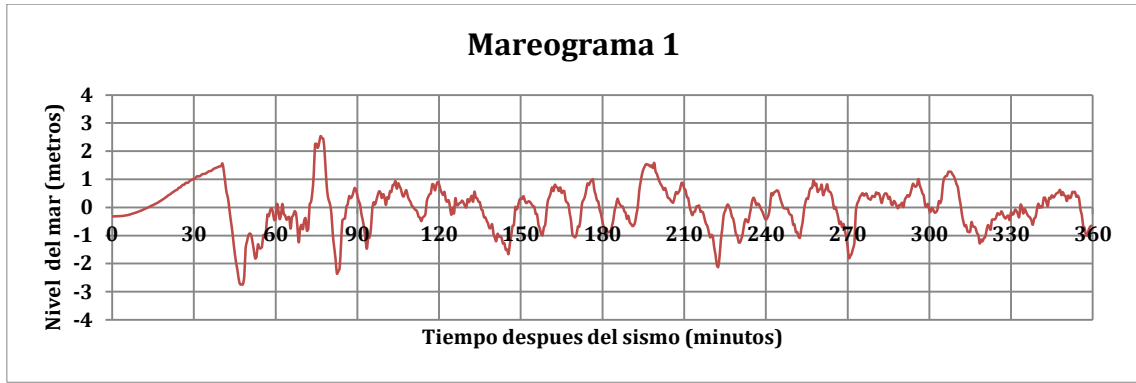
Para evaluar el comportamiento dinámico del nivel del mar en cada simulación se emplearon 6 mareógrafos sintéticos (Figura 43); el mareógrafo 1 se ubica frente a la Playa Agua Dulce ( $S12.16^{\circ}$ - $O77.03^{\circ}$ ), el mareógrafo 2 frente a la Herradura ( $S12.17^{\circ}$ - $O77.04^{\circ}$ ), el mareógrafo 3 frente al Morro Solar ( $S12.18^{\circ}$ - $O77.04^{\circ}$ ), el mareógrafo 4 frente a la playa La Chira ( $S12.12^{\circ}$ - $O77.03^{\circ}$ ), el mareógrafo 5 frente a Playa Villa ( $S12.21^{\circ}$ - $O77.02^{\circ}$ ) y el mareógrafo 6 frente del Country Club de Villa ( $S12.22^{\circ}$ - $O77.00^{\circ}$ ). Los mareogramas obtenidos permitirán determinar el número de olas de tsunami y el tiempo de arribo de las olas a las costas del distrito de Chorrillos.



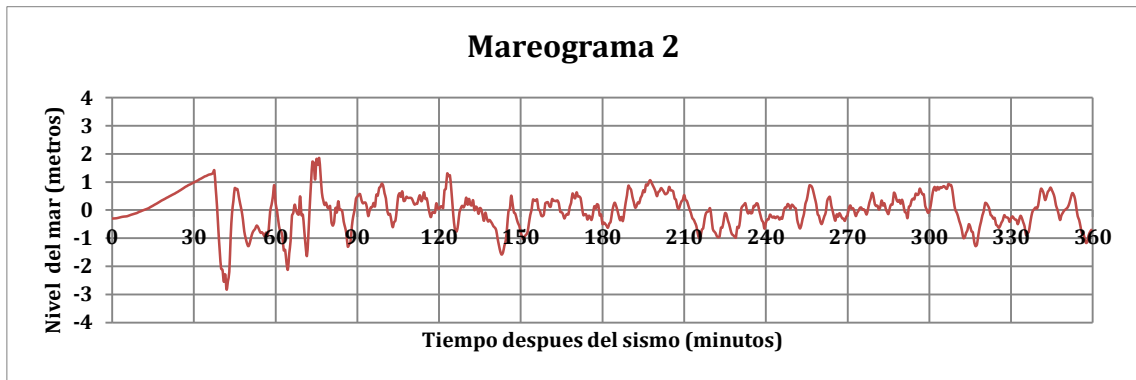
**Figura 43. Mapa de ubicación geográfica de los mareógrafos sintéticos utilizados en las simulaciones**

### 4.3.1. Simulación 1

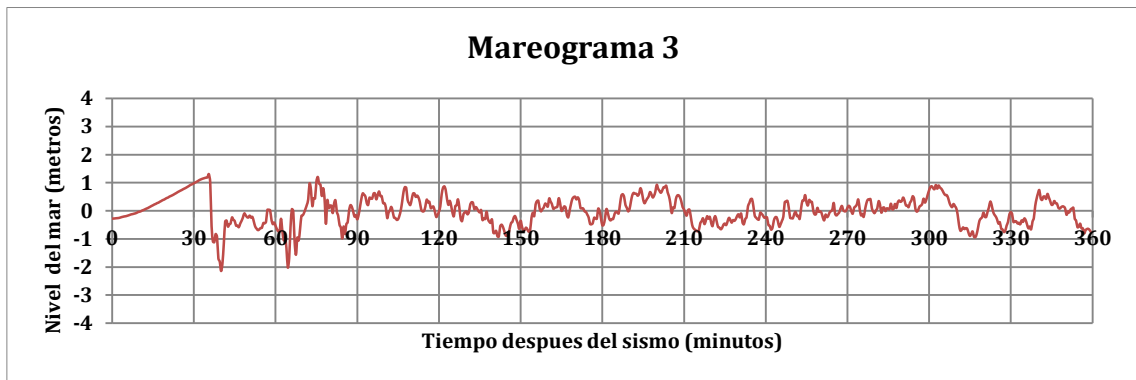
Según la simulación 1 (sismo de magnitud M7.8) el distrito de Chorrillos sería afectado por el impacto de 3 olas del tsunami. La primera ola llegaría a la línea de costa en un tiempo de 20 a 22 minutos con una altura superior a 1.5 metros y que se incrementaría a medida que ingresa a la costa. Así mismo, se observa que la ola con mayor altura, superior a los 2 metros, llegaría a los 75 minutos después de ocurrido el sismo. Finalmente, luego de 6 horas se aprecia que el nivel del mar recobra paulatinamente sus valores normales (Figuras 44 a 49).



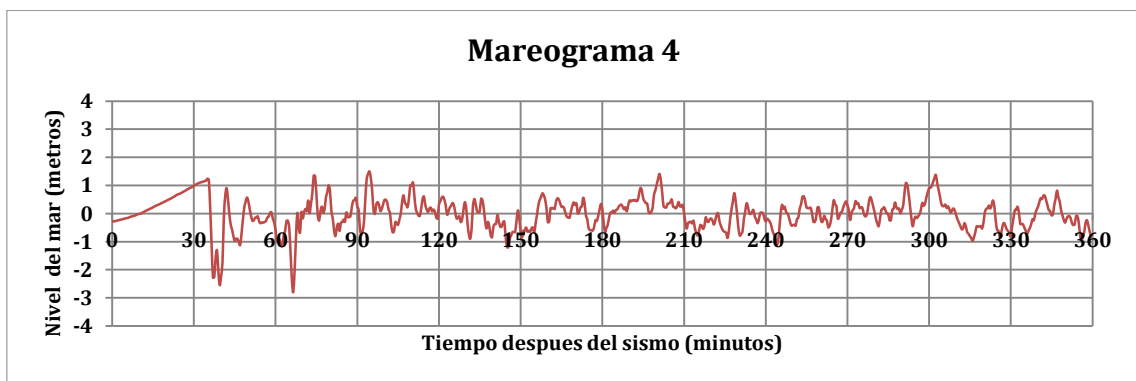
**Figura 44. Mareogramas sintéticos en Playa Agua Dulce para la simulación 1 (M7.8)**



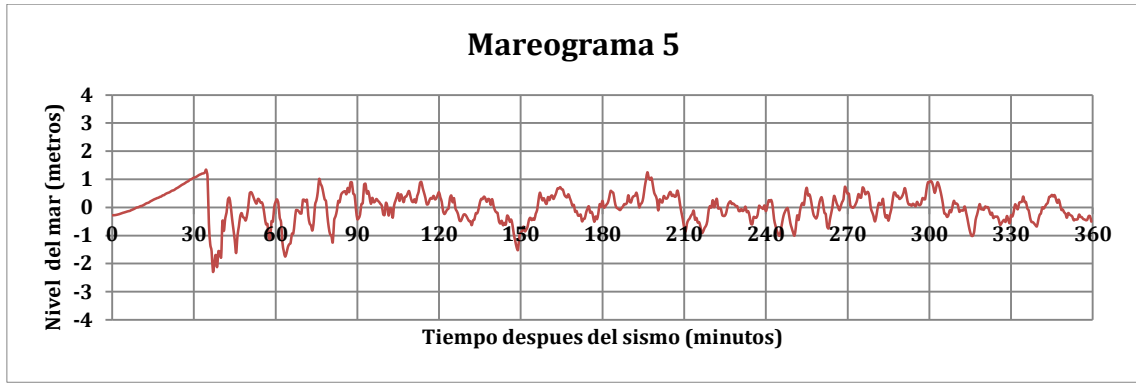
**Figura 45. Mareogramas sintéticos en La Herradura para la simulación 1 (M7.8)**



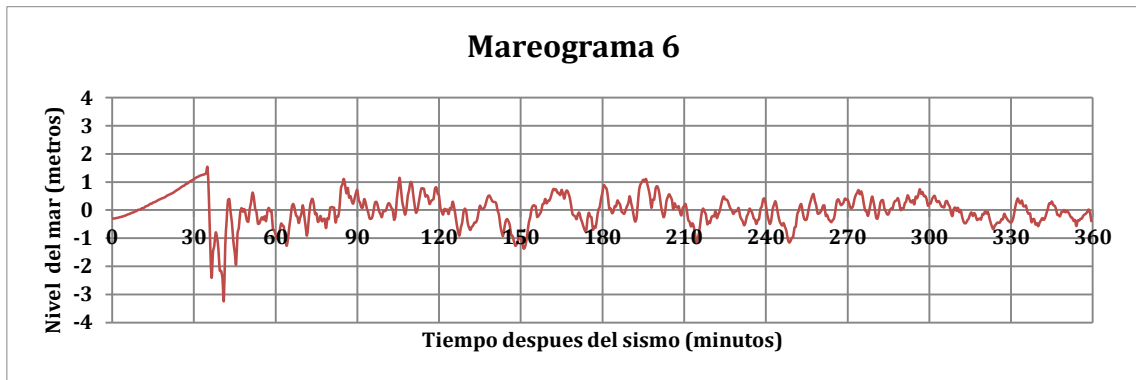
**Figura 46. Mareogramas sintéticos frente al Morro Solar para la simulación 1 (M7.8)**



**Figura 47. Mareogramas sintéticos en Playa La Chira para la simulación 1 (M7.8)**



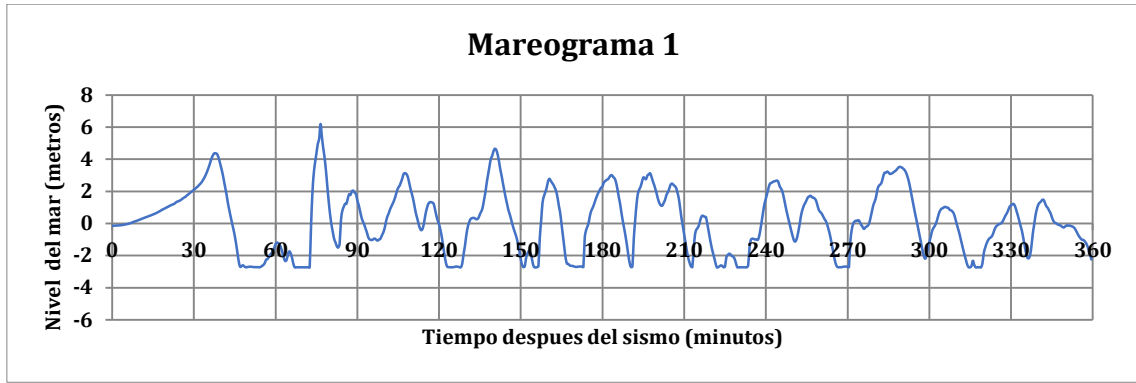
**Figura 48. Mareogramas sintéticos en Playa Villa para la simulación 1 (M7.8)**



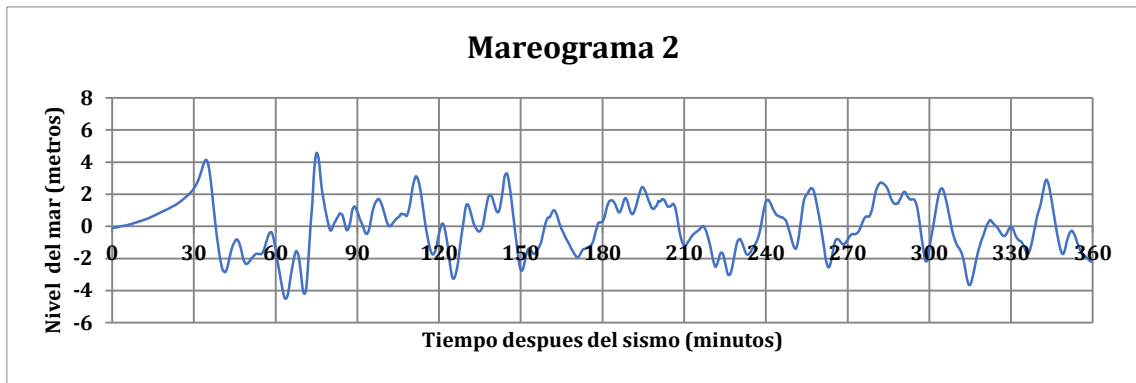
**Figura 49. Mareogramas sintéticos frente al Country Club de Villa para la simulación 1 (M7.8)**

#### **4.3.1. Simulación 2**

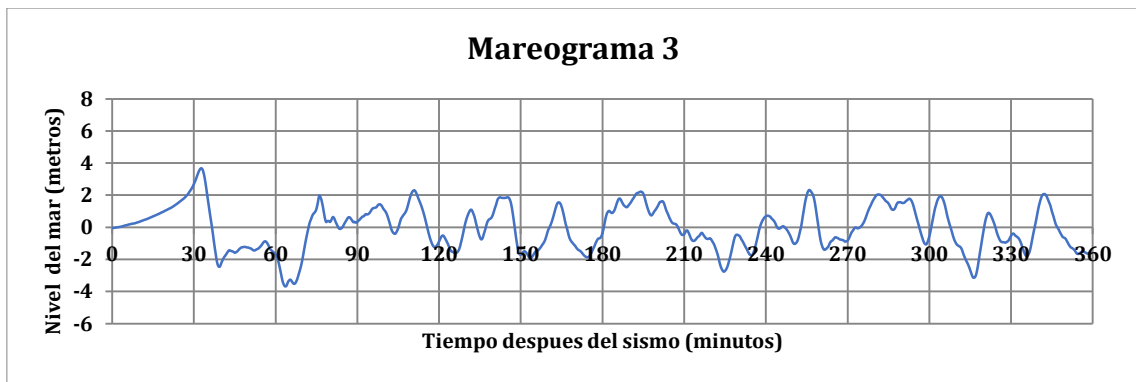
Según la simulación 2 (sismo de magnitud M8.5) el distrito de Chorrillos sería afectado por el impacto de 13 olas del tsunami. La primera ola llegaría a la línea de costa en un tiempo de 18 a 20 minutos con una altura superior a los 4 metros, llegando a incrementarse a medida que ingresa a la costa. Así mismo, se observa que la ola con mayor altura, superior a los 6 metros, llegaría a los 70 minutos después de ocurrido el sismo. Finalmente, luego de 6 horas se aprecia que el nivel del mar recobra paulatinamente sus valores normales (Figuras 50 a 55).



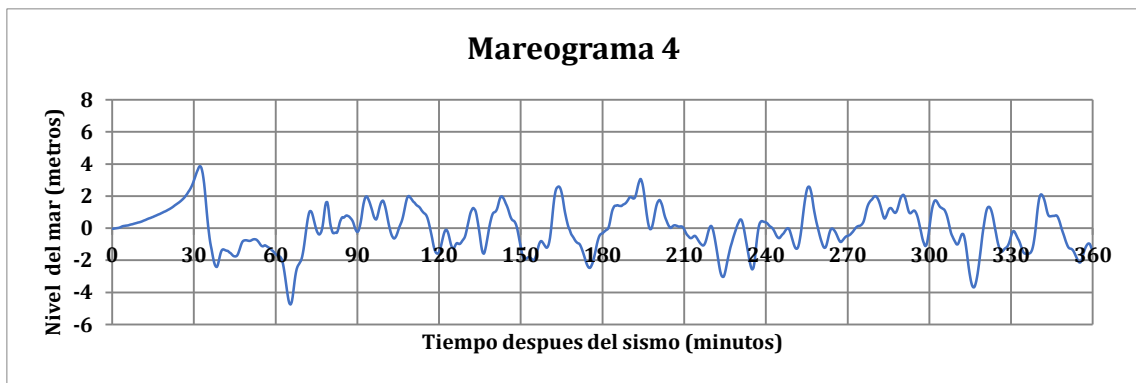
**Figura 50. Mareogramas sintéticos en Playa Agua Dulce para la simulación 2 (M8.5)**



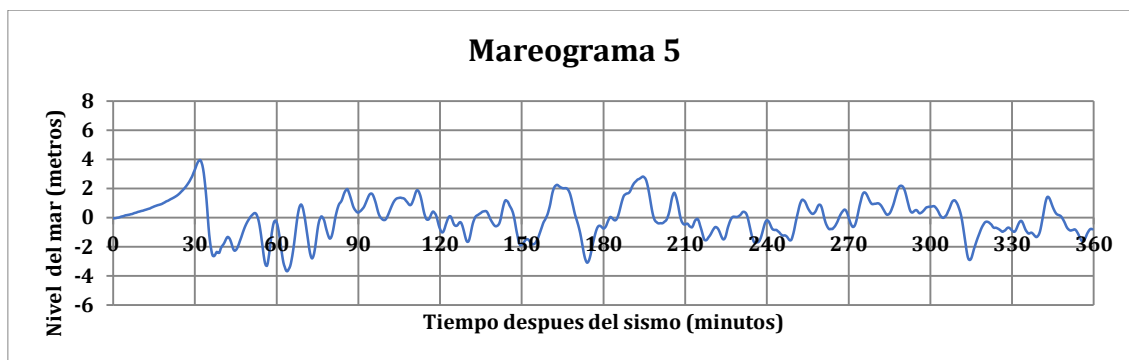
**Figura 51. Mareogramas sintéticos en La Herradura para la simulación 2 (M8.5)**



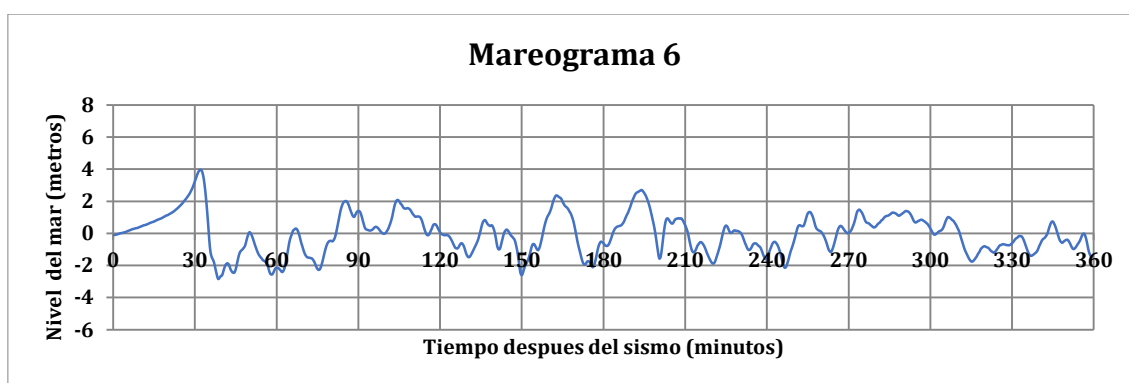
**Figura 52. Mareogramas sintéticos frente al Morro Solar para la simulación 2 (M8.5)**



**Figura 53. Mareogramas sintéticos en Playa La Chira para la simulación 2 (M8.5)**



**Figura 54. Mareogramas sintéticos en Playa Villa para la simulación 2 (M8.5)**



**Figura 55. Mareogramas sintéticos frente al Country Club de Villa para la simulación 2 (M8.5)**

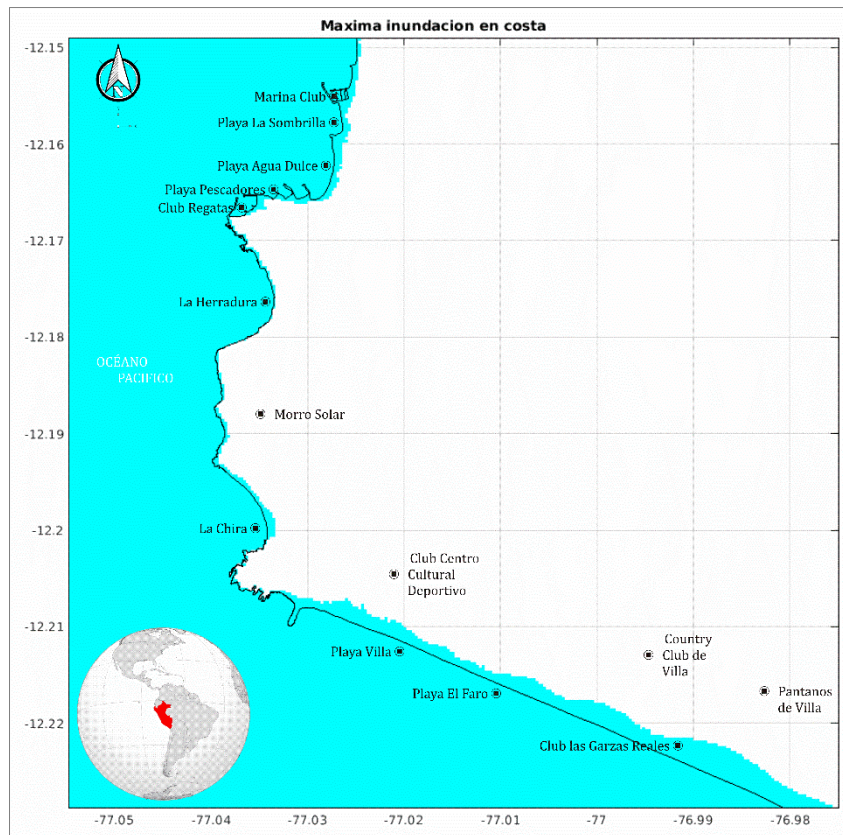
#### **4.4. ÁREA DE INUNDACIÓN MÁXIMA POR TSUNAMI**

La estimación del área de inundación máxima de tsunami en la costa, es la cuarta aproximación para dimensionar el peligro por tsunami en el distrito de Chorrillos. Para cada escenario sísmico, se realizó el análisis de la zona de inundación máxima de tsunami registrada en un periodo de 6 horas a intervalos de un minuto.

##### **4.4.1. Simulación 1**

Para la simulación 1 (sismo de magnitud M7.8) se calcularon distancias de inundación del orden de 120 metros en la playa Agua Dulce, 100 metros en las playas La sombrilla y Pescadores, 90 metros en la Chira y 200 metros en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los pantanos de Villa alcanzando distancias de inundación del orden de los 400 metros. Finalmente, los clubes

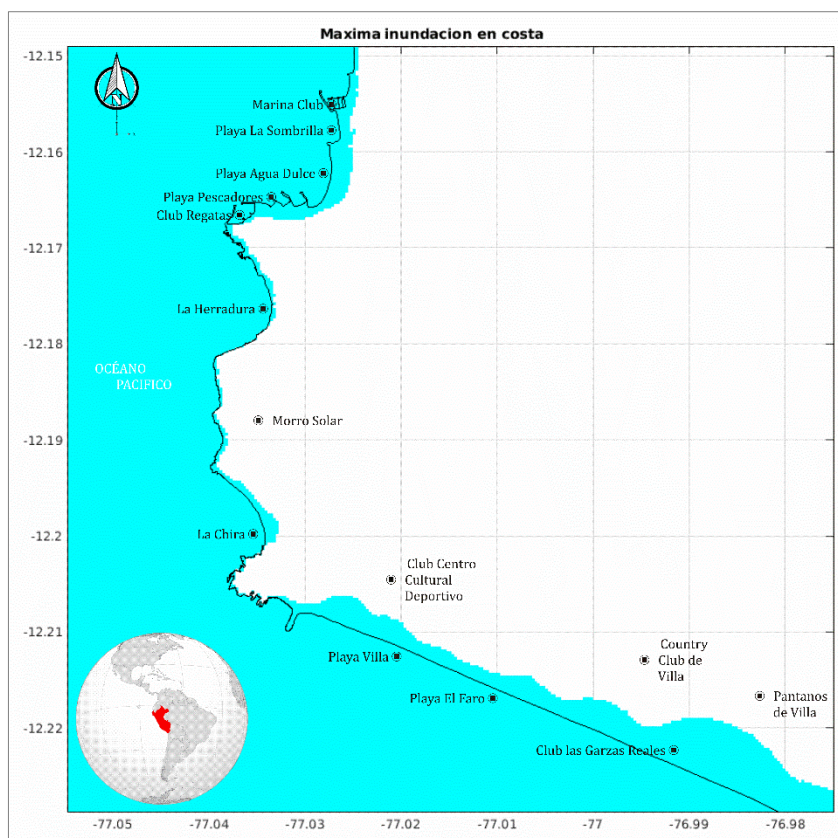
de la Marina y Regatas serian afectados por la inundación que alcanzaría unos 100 metros de distancia (Figura 56).



**Figura 56. Áreas de inundación máxima por tsunami para la simulación 1 (M7.8)**

#### **4.4.2. Simulación 2**

Para la simulación 2 (sismo de magnitud M8.5) se calcularon distancias de inundación del orden de 260 metros en la playa Agua Dulce, 180 metros en las playas La sombrilla y Pescadores, 160 metros en la Chira y 280 metros en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los pantanos de Villa alcanzando distancias de inundación del orden de los 750 metros. Finalmente, los clubes de la Marina y Regatas serian afectados por la inundación que alcanzaría unos 150 metros de distancia (Figura 57).



**Figura 57. Áreas de inundación máxima por tsunami para la simulación 2 (M8.5)**

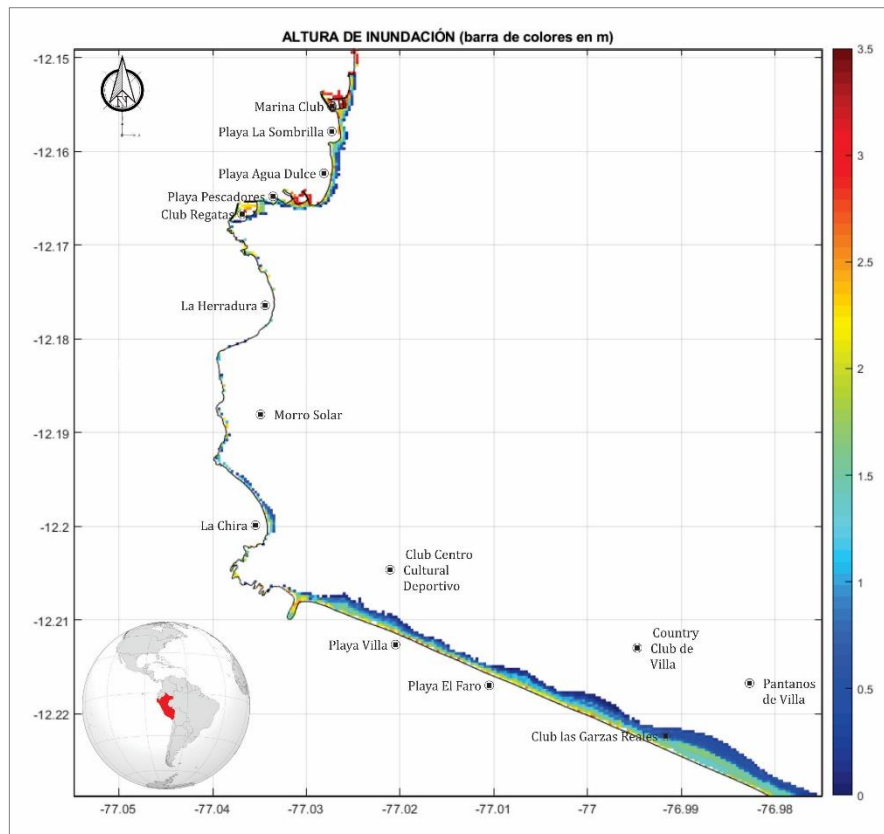
#### **4.5. ALTURAS MÁXIMAS DE INUNDACIÓN**

Ante un escenario de tsunami, las diferentes alturas del flujo de agua que discurrirán por el litoral costero del distrito de Chorrillos fueron calculadas para un periodo de tiempo de 6 horas después de haberse producido el sismo. La estimación de las máximas alturas del tsunami en la costa, son la quinta aproximación para dimensionar los escenarios de peligro.

##### **4.5.1. Simulación 1**

Para la simulación 1 (sismo de magnitud M7.8) las alturas máximas de inundación son de 1.5 metros en la playa Agua Dulce, 1.2 metros en las playas La sombrilla y Pescadores, 1.5 metros en la Chira y 2 metros en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los pantanos de Villa alcanzando el flujo de agua 1.6 metros. Finalmente, los clubes de la Marina y Regatas serian afectados por alturas de inundación del orden de 1-1.5 metros (Figura 58).

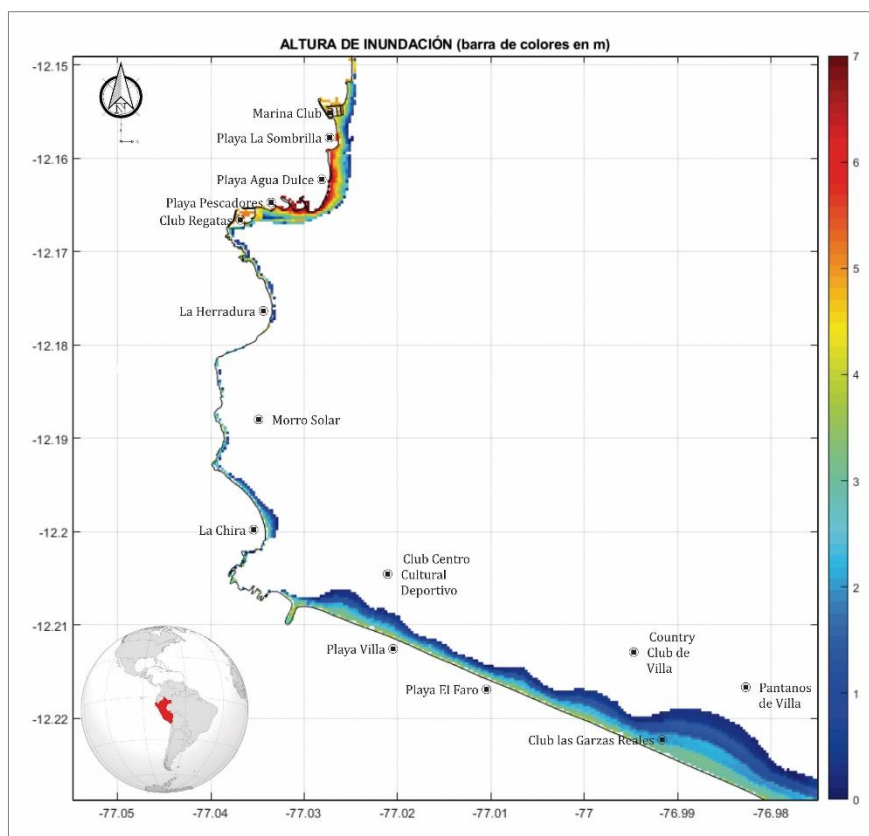




**Figura 58. Altura máxima de inundación para la Simulación 1 (M7.8)**

#### 4.5.2. Simulación 2

Para la simulación 2 (sismo de magnitud M8.5) las alturas máximas de inundación son de 6 metros en la playa Agua Dulce, 5 metros en las playas La sombrilla y Pescadores, 3 metros en la Chira y 4 metros en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los pantanos de Villa alcanzando alturas de inundación de 3 metros. Finalmente, los clubes de la Marina y Regatas serian afectados por alturas de inundación del orden de 4 - 5 metros (Figura 59).



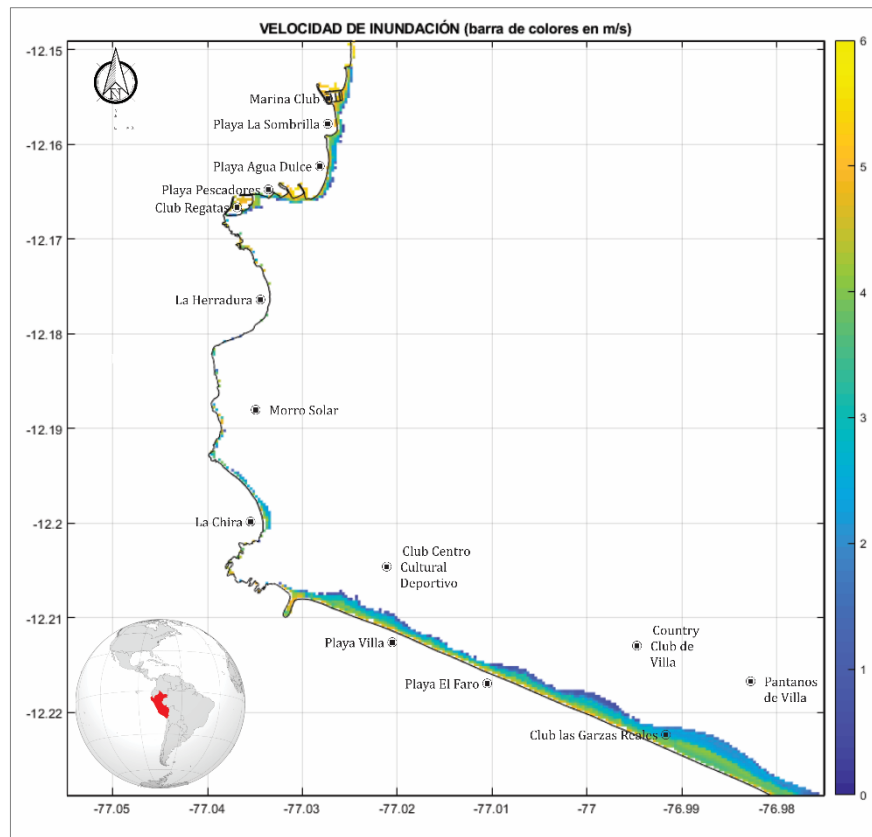
**Figura 59. Altura máxima de inundación para la Simulación 2 (M8.5)**

#### **4.6. VELOCIDADES MÁXIMAS DEL FLUJO DEL TSUNAMI**

Conocer la velocidad del flujo de agua proveniente del mar, después de un sismo de gran magnitud, es vital para estimar la fuerza con la cual el flujo puede acarrear materiales sueltos a lo largo de su propagación por el litoral costero. Por lo tanto, conocer este parámetro es de gran importancia para una mejor evaluación del peligro al cual se encuentran expuestas las áreas urbanas y la población.

##### **4.6.1. Simulación 1**

Para la simulación 1 (sismo de magnitud M7.8) las velocidades máximas de inundación son de 5 m/s en la playa Agua Dulce, 6 m/s en las playas La sombrilla y Pescadores, 4 m/s en la Chira y 5 m/s en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los Pantanos de Villa, alcanzando velocidades de inundación de 4 m/s. Finalmente, los clubes de la Marina y Regatas serian afectados por flujos de agua con velocidades del orden de 5 - 6 m/s (Figura 60).

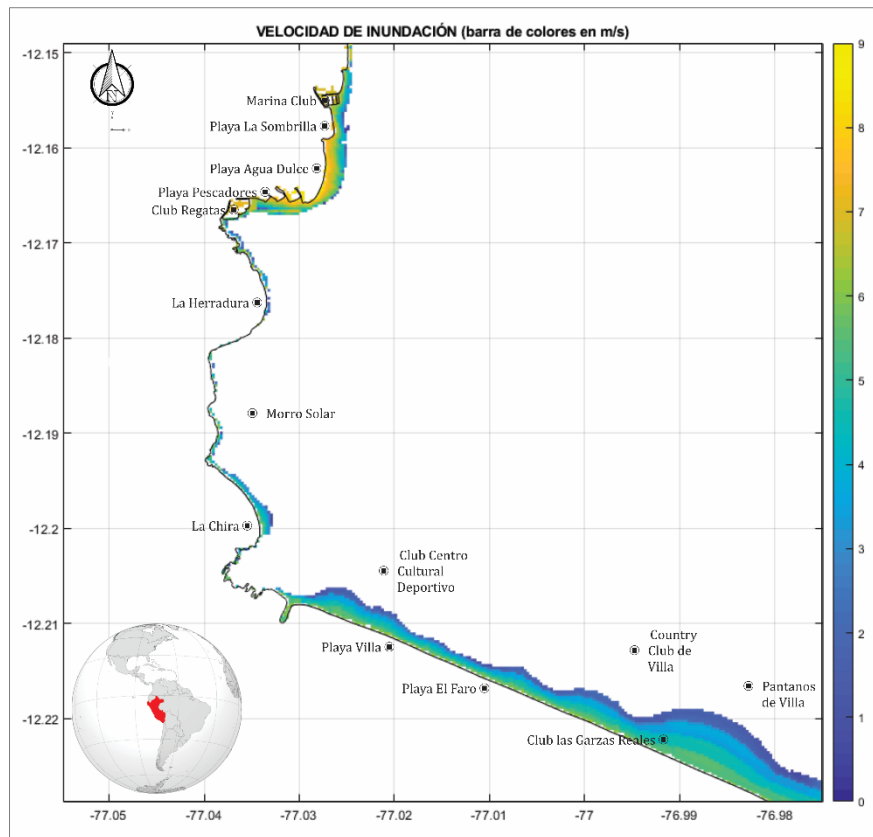


**Figura 60. Velocidad máxima del flujo del tsunami para la simulación 1 (M7.8)**

#### 4.6.2. Simulación 2

Para la simulación 2 (sismo de magnitud M8.5) las velocidades máximas de inundación son de 9 m/s en la playa Agua Dulce, 8 m/s en las playas La sombrilla y Pescadores, 5 m/s en la Chira y 6 m/s en las playas Villa y El Faro. Así mismo, se observó el ingreso de las olas del tsunami por la zona de los Pantanos de Villa alcanzando velocidades de inundación de 6 m/s. Finalmente, los clubes de la Marina y Regatas serian afectados por flujos con velocidades del orden de 8 - 9 m/s (Figura 61).

Las velocidades de corriente en las áreas de inundación son peligrosas para la vida de las personas, a excepción de los sectores cercanos a los límites máximos de inundación (*Run-up*).



**Figura 61. Velocidad máxima del flujo del tsunami para la simulación 2 (M8.5)**

#### 4.7. PELIGROSIDAD POR INUNDACIÓN DE TSUNAMI

Para el presente análisis se considera como peligro a la inundación del flujo de agua del mar que se genera por un tsunami a consecuencia de la ocurrencia de un sismo extremo (factor desencadenante). El flujo del agua será cuantificado en base a la altura de inundación sobre la superficie y la velocidad del flujo de agua, ambos parámetros dependientes de la topografía o morfología del litoral costero del distrito de Chorrillos, así como de la pendiente del terreno y el coeficiente de rugosidad del terreno. De acuerdo a la evaluación del peligro, los elementos expuestos a los flujos de agua son las áreas urbanas y balnearios ubicados en el litoral costero.

En el escenario descrito, los niveles del peligro por inundación de flujos de agua quedan establecidos en cuatro (4) niveles (Tabla 9):

- **Peligro Muy Alto:** Se considera las áreas que serán inundadas por flujos de agua con alturas igual o mayor a 1.5 metros que se desplazan a velocidades mayores a 1.5 m/s.

- **Peligro Alto:** Se considera las áreas que serán inundadas por flujos de agua con alturas entre 0.5 y 1.5 metros que se desplazan a velocidades entre 0.5 y 1.5 m/s.
- **Peligro Medio:** Se considera las áreas que serán inundadas por flujos de agua con alturas entre 0.2 a 0.5 metros que se desplazan a velocidades entre 0.2 a 0.5 m/s.
- **Peligro Bajo:** Se considera las áreas que serán inundadas por flujos de agua con alturas menores a 0.2 metros que se desplazan a velocidades menores a 0.2 m/s.

**Tabla 9. Criterios de evaluación del Peligro por inundación de flujos de agua**

Nivel del Peligro	Altura (m)	Velocidad (m/s)
Muy Alto	$h \geq 1.5$	$v \geq 1.5$
Alto	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq v < 1.5$
Medio	$0.2 \geq h < 0.5$	$0.2 \geq v < 0.5$
Bajo	$h < 0.2$	$v < 0.2$

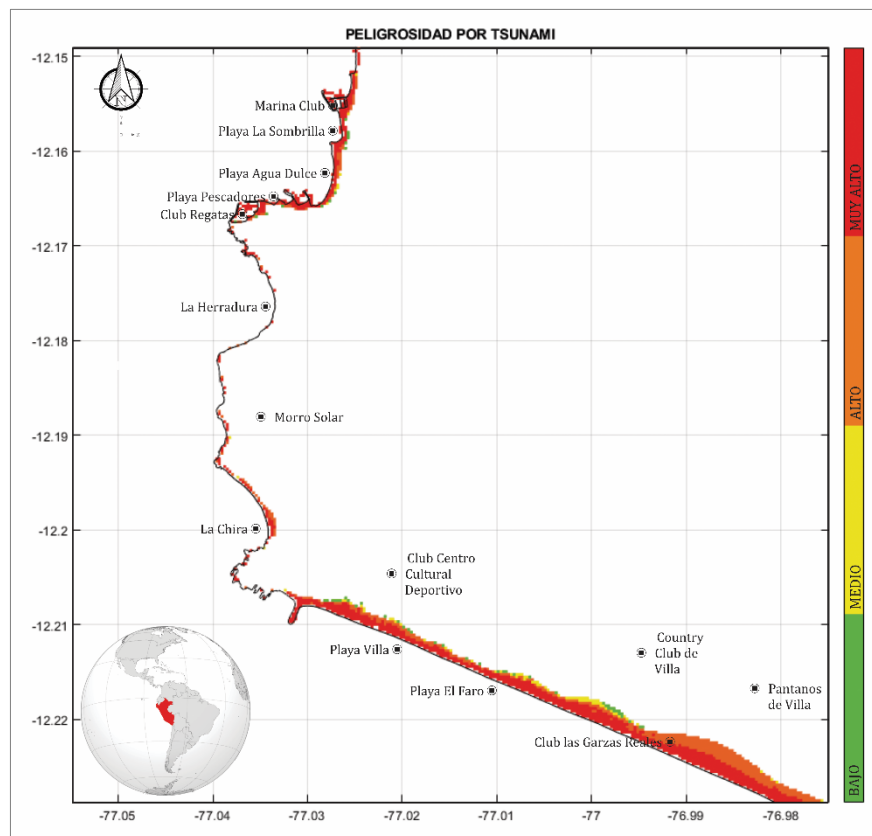
La descripción de los niveles de peligro considera los siguientes elementos:

- ***Peligro Muy Alto:*** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas serían afectadas físicamente fuera y dentro de sus viviendas. Incluso algunas podrían perder la vida por golpes recibidos al ser movilizado por el flujo de agua. Las viviendas presentarían daños graves como el colapso de sus paredes, rotura de ventanas y hasta el colapso si no reúnen las condiciones físicas apropiadas para soportar la velocidad del flujo del agua.
- ***Peligro Alto:*** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas serían afectadas físicamente fuera de sus viviendas con la posibilidad de perder la vida por golpes recibidos al ser movilizados por el flujo de agua. Las viviendas presentarían daños graves como el colapso de algunas paredes si no reúnen las condiciones físicas apropiadas para soportar la velocidad del flujo del agua.
- ***Peligro Medio:*** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas podrían ser afectadas físicamente fuera de sus viviendas por golpes o caídas recibidos al ser movilizados por el flujo de agua. Las pérdidas materiales estarían asociadas a objetos que puedan caer dentro y fuera de las viviendas.

- **Peligro Bajo:** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas no serían afectadas y las pérdidas materiales serían menores.

#### 4.7.1. Simulación 1

Para la simulación 1 (sismo de magnitud M7.8) el distrito de Chorrillos presenta un peligro Muy Alto en los balnearios de las playas Agua Dulce, La Sombrilla, Pescadores, Villa y El Faro. El peligro disminuye de Oeste a Este, en medida que sea mayor la distancia a la línea costa (Figura 62). El Muelle de Pescadores y el terminal pesquero de Chorrillos se encuentra en la zona de peligro Muy Alto.

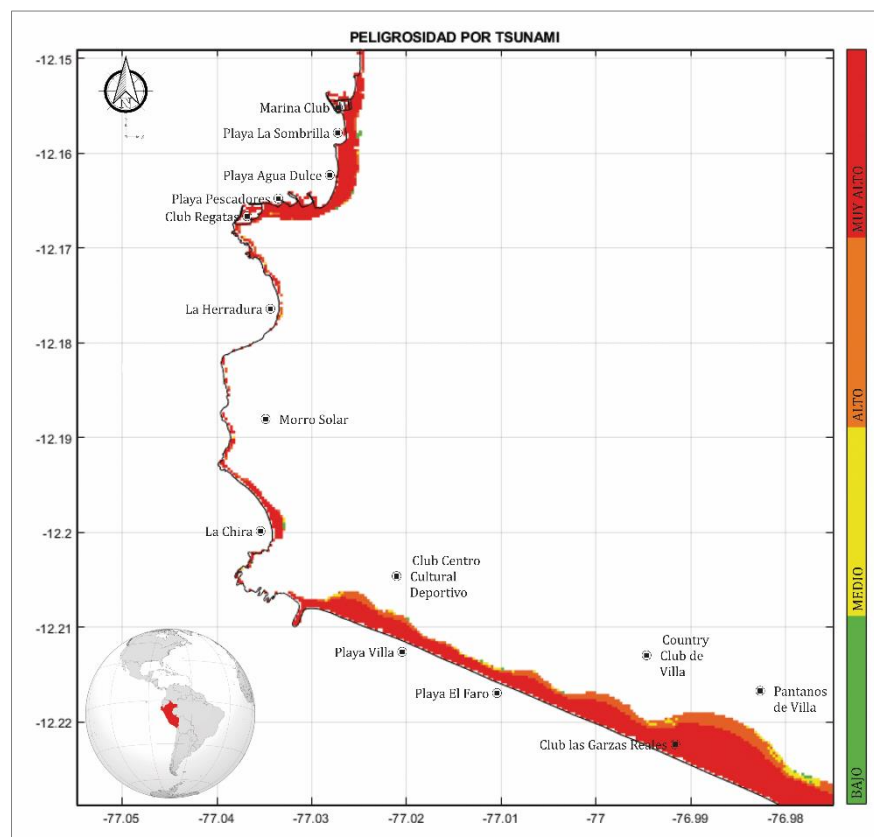


**Figura 62. Mapa de peligrosidad para la simulación 1 (M7.8)**

#### 4.7.2. Simulación 2

Para la simulación 2 (sismo de magnitud M8.5) el distrito de Chorrillos presenta un peligro Muy Alto en los balnearios de las playas Agua Dulce, La Sombrilla, Pescadores, Villa y El Faro. El peligro disminuye de Oeste a Este, en medida que sea mayor la

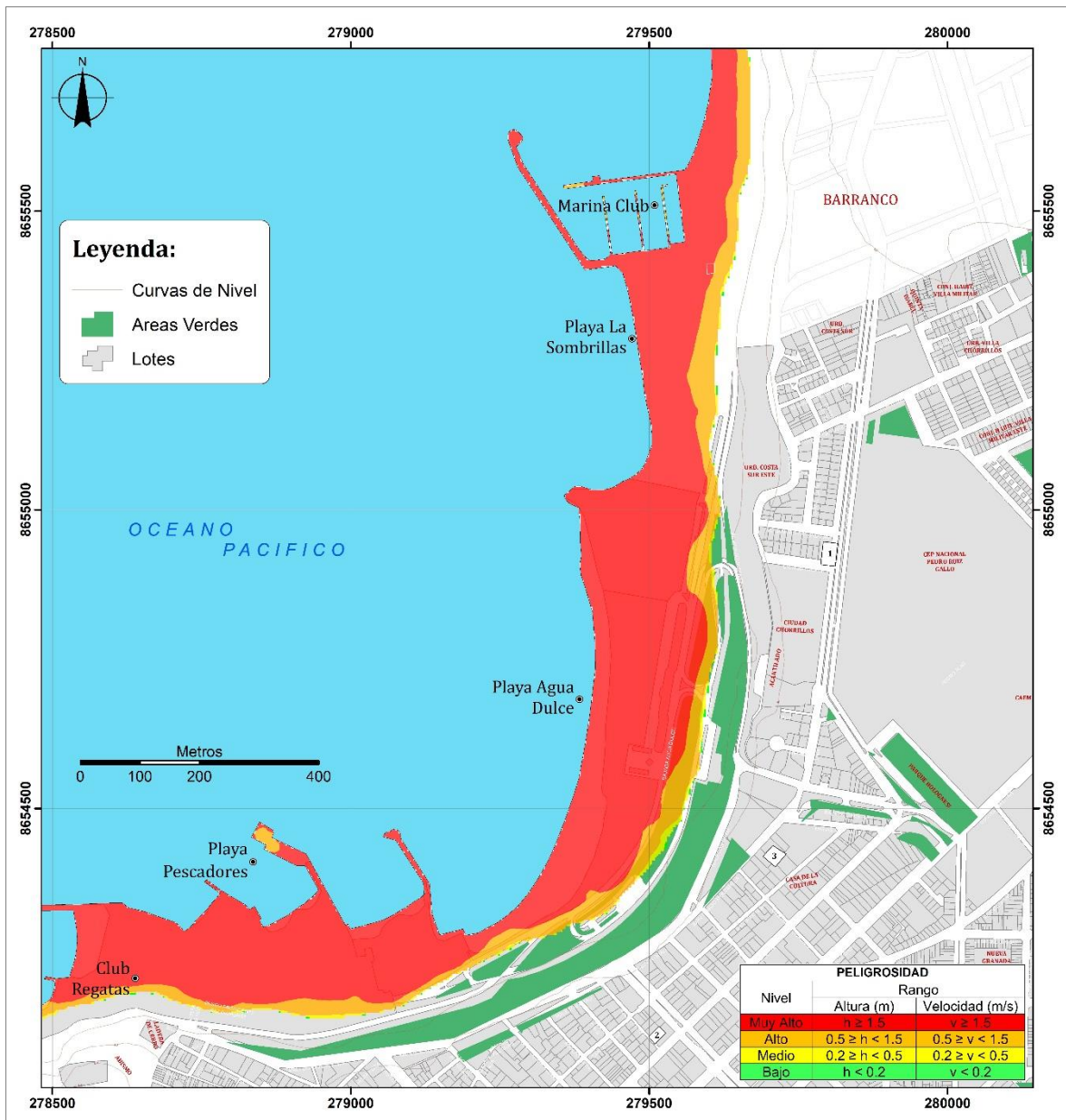
distancia a la línea costa (Figura 63). Con los datos recolectados de los establecimientos de salud del Ministerio de Salud, se observa que la posta de salud de Defensores de Lima - Chorrillos se encuentra en la zona de peligro Alto. Además, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de La Chira, el Muelle de Pescadores y el terminal pesquero de Chorrillos se encuentra en la zona de peligro Muy Alto.



**Figura 63. Mapa de peligrosidad para la simulación 2 (M8.5)**

Además, para la simulación 2, se considera el modelo digital de elevación (incluyendo la altura de las edificaciones) y se evalúa el número de viviendas que no serían superadas por el nivel de inundación. La Figura 64, muestra el mapa de peligrosidad de la zona 1 de Chorrillos y en ella se observa que la zona urbana no sería afectada por la inundación generada; Sin embargo, es necesario elaborar un plan de evacuación para las visitantes de las playas Sombrillas y Agua Dulce, así como para los trabajadores del Terminal pesquero de Chorrillos. La Figura 65, muestra el mapa de peligrosidad de la zona 2 de Chorrillos y en ella se observa que algunas viviendas podrían ser utilizadas para la evacuación vertical previa evaluación estructural de la edificación. Así mismo, se identifica 168 viviendas que

se encuentran expuestas a un peligro muy alto; 382 a un peligro alto; 240 a un peligro medio y 128 a un peligro bajo (Tabla 10).



**Figura 64. Mapa de peligrosidad para la zona norte de Chorrillos - simulación 2 (M8.5)**



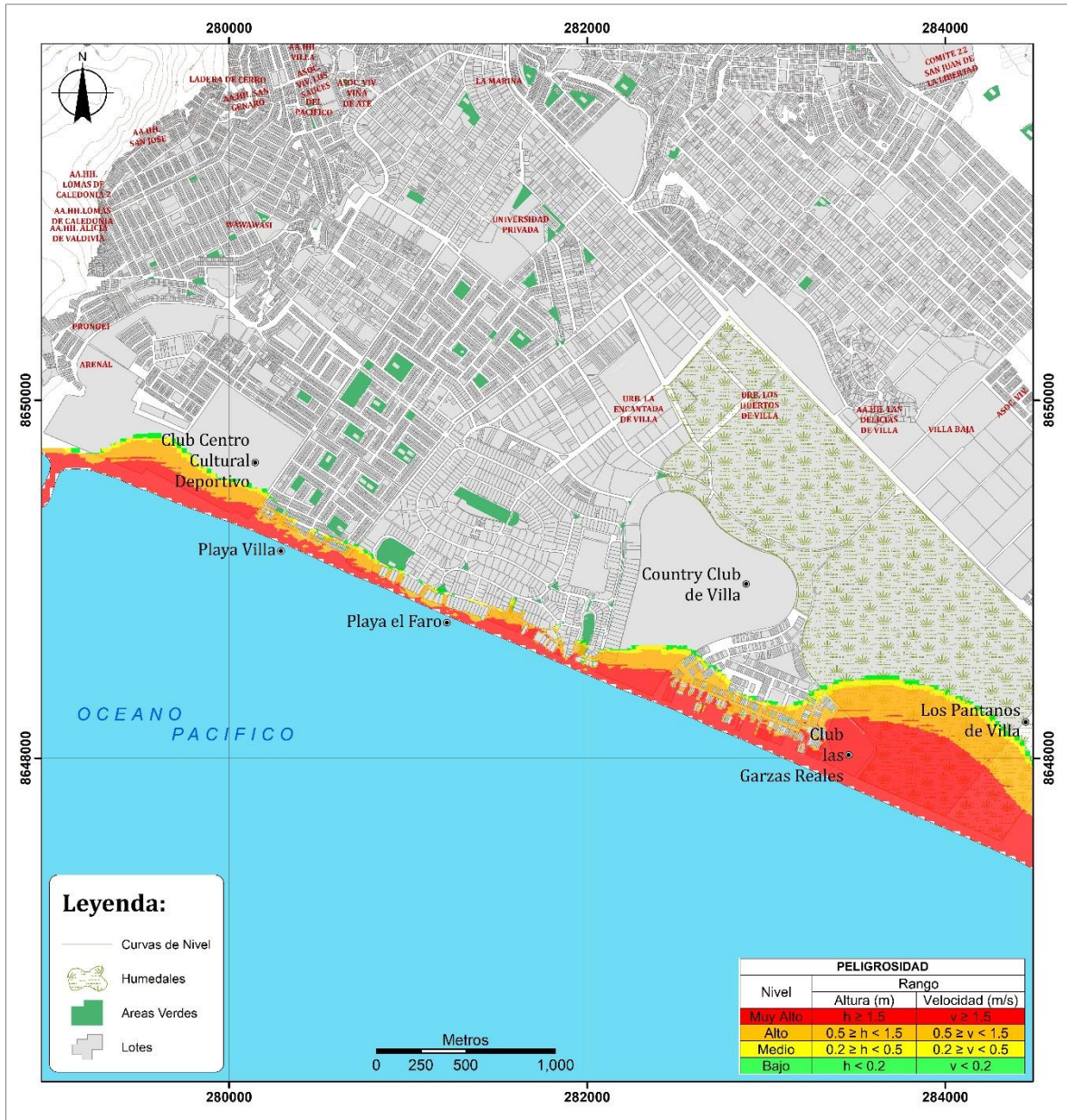


Figura 65. Mapa de peligrosidad para la zona sur de Chorrillos - simulación 2 (M8.5)

Tabla 10. Evaluación de las viviendas de Chorrillos afectadas por la inundación para la simulación 2 (M8.5)

	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO	Total de lotes
Distrito de Chorrillos	128	240	382	168	918

Las Figuras 66 y 67 muestran el campo promedio de las direcciones del flujo de agua que genera la inundación por tsunami. Esta información, junto con los valores máximos de altura y velocidad de inundación contribuyen al cálculo de las fuerzas hidrodinámicas para el análisis estructural de las viviendas o proyectos portuarios que se encuentran dentro del área

de inundación por tsunami. Además, los parámetros mencionados abren la posibilidad de calcular e identificar zonas de erosión, que afecten la cimentación de las viviendas afectadas por el tsunami.

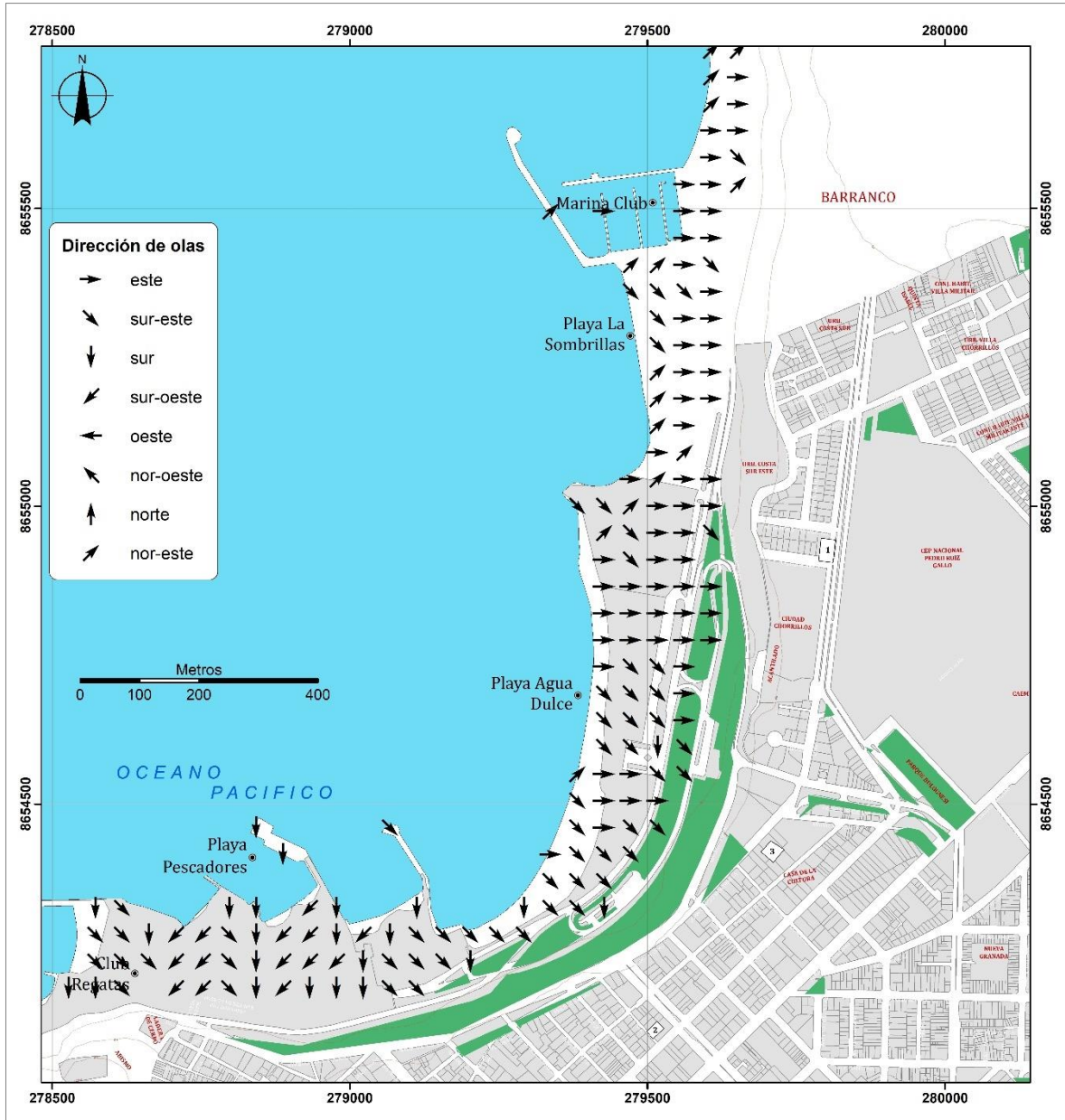


Figura 66. Direcciones de olas para la zona norte de Chorrillos - Simulación 2 (M8.5)

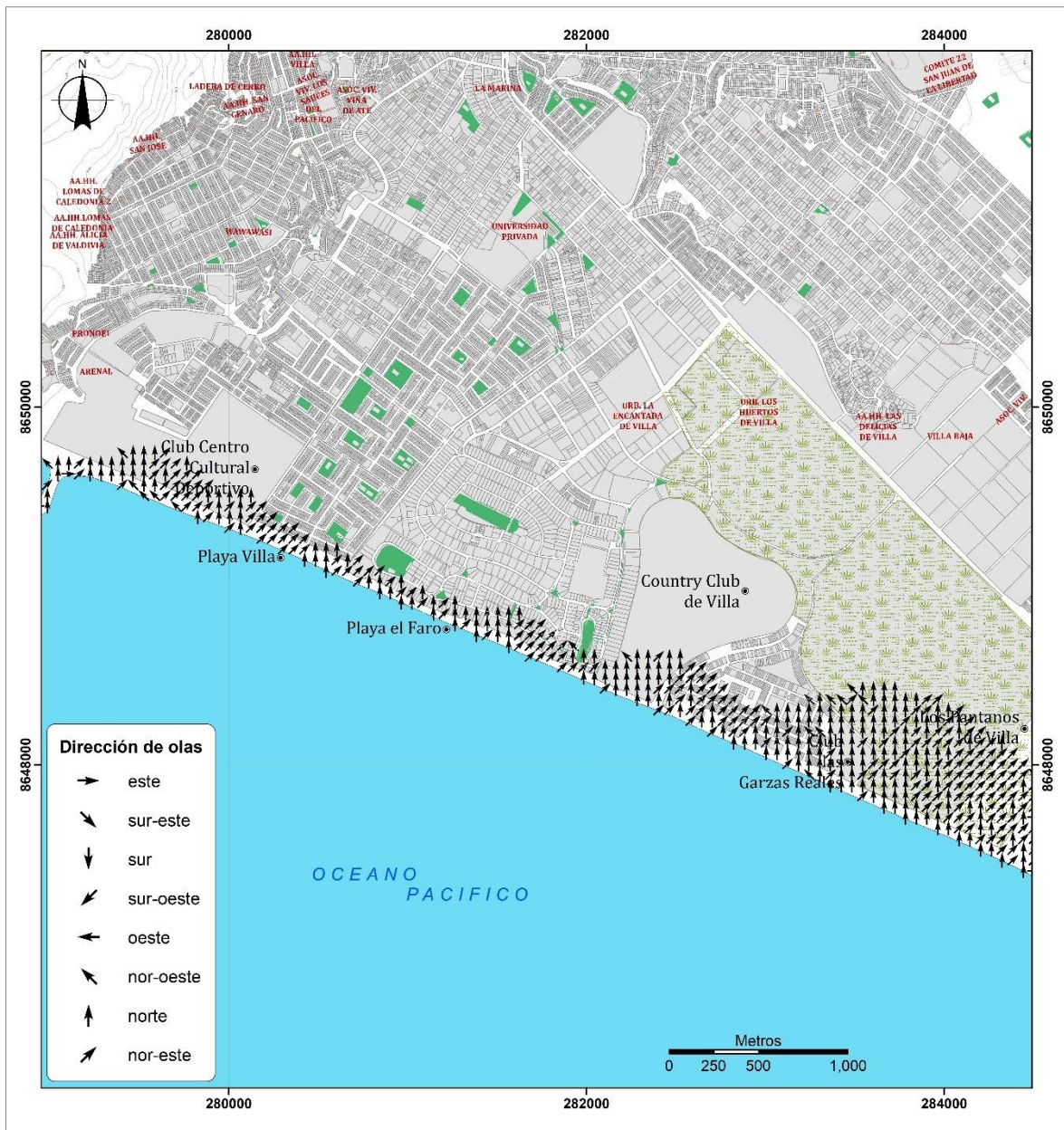


Figura 67. Direcciones de olas para la zona sur de Chorrillos - Simulación 2 (M8.5)

## V. CONCLUSIONES

- Considerando los escenarios sísmicos propuestos, se estima que las aceleraciones teóricas del suelo del distrito de Chorrillos serían de 0.4g y 0.65g para sismos de magnitudes M7.8 y M8.5 respectivamente.
- Los escenarios sísmicos propuestos para el distrito de Chorrillos, permiten comprender y evaluar el peligro por inundación de tsunami al que estaría expuesta la población y las viviendas que se encuentren dentro del área de inundación. El Escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8, como el ocurrido el 03 de octubre de 1974 y que afectó gravemente el borde costero de los departamentos de Ica, Lima y Ancash. El escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, como el ocurrido probablemente en 1746 y que afectaría gravemente el borde costero de los departamentos de Ica, Lima, Ancash, Arequipa, La Libertad y Lambayeque.
- Para el escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8, el área de inundación considera al distrito de Chorrillos; Así como, balnearios y playas, siendo las distancias de inundación del orden de 120, 100, 90 y 200 metros en las Agua Dulce, La Sombrillas, La Chira y El Faro respectivamente. Para el escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, el área de inundación afectaría al distrito de Chorrillos, Así mismo, como balnearios y playas, siendo las distancias de inundación del orden de 260, 180, 160 y 280 metros en las Agua Dulce, La Sombrillas, La Chira y El Faro respectivamente.
- Para el escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8, la altura máxima de inundación afectaría el área urbana del distrito de Chorrillos; Así como, balnearios y playas. Las alturas máximas de inundación serían del orden de 1.5, 1.2, y 2 metros en las playas Agua Dulce, La Sombrillas y El Faro respectivamente. Para el escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, la altura máxima de inundación afectaría el área urbana del distrito de Chorrillos; Así como, balnearios

y playas. Las alturas máximas de inundación serán del orden de 6, 5, y 4 metros en las playas Agua Dulce, La Sombrillas y El Faro respectivamente.

- Para el escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8, la velocidad máxima de inundación afectaría el área urbana del distrito de Chorrillos; Así como a la zona de balnearios y playas, siendo las velocidades máximas de inundación serían del orden de 5, 6 y 5 metros por segundo en las playas Agua Dulce, Las Sombrillas y El Faro respectivamente. Para el escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, la velocidad máxima de inundación afectaría el área urbana del distrito de Chorrillos; Así como, a la zona de balnearios y playas. Las velocidades máximas de inundación serán del orden de 9, 8 y 6 metros por segundo en las playas Agua Dulce, Las Sombrillas y El Faro respectivamente.
- Para el escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8, el tiempo de arribo de la primera ola del tsunami sería de del orden de 20 – 22 minutos luego de ocurrido el sismo y se estima que las olas afectarían el litoral costero por más de 4 horas. Para el escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, el tiempo de arribo de la primera ola del tsunami sería de del orden de 18 – 20 minutos luego de ocurrido el sismo y se estima que las olas afectarían el litoral costero por más de 6 horas. Estos tiempos de arribo deben ser considerados para la evacuación de las personas que se encuentren cercanas al litoral costero; Así como, para implementar protocolos de seguridad, tanto en el terminal portuario de Chorrillos como en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Chira.
- El peligro de tsunami por altura de inundación es alto ( $> 2$  m) en todo el borde costero de Chorrillos. En tanto, las velocidades del flujo de agua superan los 1,5 m/s, lo que se traduce en altos niveles de peligrosidad para las personas. Para el escenario 1, tsunami generado por un sismo de magnitud M7.8 y el escenario 2, tsunami generado por un sismo de magnitud M8.5, el distrito de Chorrillos presenta un peligro Muy Alto en los balnearios de las playas Agua Dulce, La Sombrilla, Pescadores, Villa y El Faro. El nivel de peligro disminuye de Oeste a Este, en medida que sea mayor la distancia a la línea costa.

- El campo promedio de las direcciones del flujo de agua, junto con los valores máximos de altura y velocidad de inundación contribuyen al cálculo de las fuerzas hidrodinámicas para el análisis estructural de las viviendas o proyectos portuarios que se encuentran dentro del área de inundación por tsunami. Además, los parámetros mencionados abren la posibilidad de calcular e identificar zonas de erosión, que afecten la cimentación de las viviendas afectadas por el tsunami.
- Esta investigación brinda una herramienta de pronóstico de escenarios de peligro por tsunami, que contribuirá a las metodologías existentes propuestas en el “*Manual para la Evaluación del Riesgo por Tsunamis*” elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) y “*Lineamientos para el Diseño de Edificaciones para Evacuación Vertical frente a Tsunamis*” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Los parámetros obtenidos empleando la simulación numérica como: los tiempos de arribo, las zonas inundables, alturas y velocidades máxima de inundación y dirección del flujo de agua en el distrito de Chorrillos son de gran importancia para establecer sistemas de alerta temprana y generar escenarios que permitan reducir el riesgo por exposición de las principales áreas urbanas y de la población.

## VI. RECOMENDACIONES

- Considerando que el borde occidental de la región central del Perú no es ajeno a la ocurrencia de grandes sismos, se recomienda conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud, el mismo que podría generar un tsunami y afectar las principales ciudades costeras del Perú.
- Para realizar la simulación numérica de tsunami y obtener resultados óptimos se necesita datos batimétricos y topográficos de resolución espacial mínima de diez metros para poder delimitar adecuadamente las áreas de inundación por tsunami.
- Tener conocimientos sólidos sobre parámetros sísmicos a considerarse en los modelos de fuentes sísmicas generadoras de tsunamis. Emplear información histórica e instrumental para poder definir parámetros como: magnitud, profundidad, largo, ancho, longitud de deslizamiento, ángulo de rumbo, ángulo de buzamiento y ángulo de deslizamiento que serán el punto de partida de la simulación numérica.
- Se recomienda emplear el sistema operativo Linux, para una mayor rapidez en el procesamiento de datos y tiempo de compilación del modelo numérico TUNAMI-N2.
- Para una correcta gestión del riesgo ante tsunamis, es necesario considerar escenarios similares a los presentados en Chile y el Japón después de ocurridos los terremotos del 2010 y 2011 respectivamente. En Japón, sobre zonas planas con topografía cercana al nivel medio del mar el tsunami avanzó hasta cuatro km en superficie y en otras zonas, la altura del volumen de agua sobrepasó los 45 metros. Las altas velocidades de propagación del tsunami en tierra, facilitaron el traslado de contenedores, buques y yates para dejarlos encallados a varias centenas de metros tierra adentro o sobre los techos de las casas que soportaron al terremoto y tsunami.

- Si vive cerca de playas y percibe un sismo lo suficientemente fuerte como para agrietar paredes, o que le impida mantenerse en pie, es probable que dentro de los próximos minutos se genere un tsunami. Además, observa que el mar se repliega, se recomienda alejarse a un lugar seguro en altura. En Perú frecuentemente, los tsunamis se presentan primero con un recogimiento del mar, el que deja visible grandes extensiones del fondo marino y en pocos minutos el tsunami llegará con una gran velocidad y altura.
- Si las autoridades competentes dan la alerta de la proximidad de un tsunami, se debe buscar refugio en alturas superiores a 10 metros. Si en el lugar en que vives no hay cerca suficiente altura, los pisos altos de un edificio pueden ser una evacuación alternativa.
- Un tsunami puede tener hasta 10 o más olas destructivas en un lapso de hasta 12 horas; procura, tener a la mano frazadas o abrigo y una radio. No vuelvas a los lugares potencialmente amenazados hasta que una autoridad responsable indique que el peligro ha terminado.
- Los efectos del tsunami en estructuras y personas dependerán de la cercanía de ambos a la zona costera, si el índice de población y la precariedad de las construcciones es elevado, el desastre se incrementará en pérdidas de vidas y económicas.
- Finalmente, recomendar que los escenarios de sismo y tsunamis analizados y discutidos en esta investigación, sean considerados en todas las acciones de gestión de riesgo de desastre que se desee realizar ante la posible ocurrencia de estos peligros.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, B., Koshimura, S., 2012. Source Inversion and Inundation Modeling Technologies for Tsunami Hazard Assessment, Case Study: 2001 Peru Tsunami. The International Symposium for CISMID 25<sup>th</sup> Anniversary. Paper No. TS-4-1.

Atwater, B.; Cisternas, M.; Salgado, I.; Machuca, G.; Lagos, M.; Eipert, A. Y Shishikura, M. 2003. Incubation of Chile's 1960 Earthquake. Eos Transaction AGU, 84(46), Fall Meet. Suppl., 2003, Abstract G22E-01.

Carpio J. & Tavera H. 2002. Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú, basado en el Catálogo de Gusiakov. Instituto Geofísico del Perú.

Chlieh M., Perfettini H., Tavera H., 2011. Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, Journal of Geophysical Research, Vol. 116.

Cisternas, M. 2005. Suelos enterrados revelan la prehistoria sísmica del Sur de Chile durante los dos últimos milenios. Revista de Geografía Norte Grande, N° 33, p. 19-31.

Condori, C. Y Tavera H. 2011. Áreas Probables de Ruptura Sísmica en el Borde Occidental del Perú, a partir de la Variación del Parámetro "B", Instituto Geofísico del Perú.

Dirección de Hidrografía y Navegación. 2007. Informe Post-Tsunami (15 de agosto de 2007). Lima.

Dorbath L., Cisternas A. & Dorbath C. 1990, Assessment of the size and great Historical Earthquakes in Peru, Bulletin of the Seismological Society of América, Vol.80, N° 3,551 - 576p.

Goto Y Ogawa, 1992. Numerical Method of Tsunami simulation with the leapfrog scheme. Tohoku University.

Guardia P. Y Tavera H., 2011. Determinación de la Superficie de Acoplamiento Sísmico Interplaca en el Borde Occidental del Perú. Instituto Geofísico del Perú.

Gusiakov, V., K., 2001. Basics Pacific tsunamis catalog and database, 47 BC-2000 AD: results of the first stage of the project. Proceedings of the International Tsunami Symposium, August 7-9, 2001, Seattle, USA, PMEL/NOAA, pp 263-272.

Gusiakov, V., K., 2005. Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. Marine Geology. 215, 3-9.

Imamura F. 2006. Tsunami Modelling Manual. Tsunami Engineering School of Civil Engineering, Asian Inst. Tech. and Disaster Control Research Center, Tohoku University.

Iida K., Doak C., Cox & Pararas - Carayannis G. 1967, Preliminary Catalog of Tsunamis Occurring in the Pacific Ocean. University of Hawaii, Honolulu, 274p.

Iida, K., Iwasaki, T. 1983, Tsunamis their science and engineering. Tokyo, Japan. Terra Scientific Publishing Company.

ITSU 1999: Master Plan. Tsunami Warning System in the Pacific. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. Second Edition, 32 p

IUGG/IOC 1997. Time Project IOC Manuals and Guides No. 35. Numerical method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. París, UNESCO. 101 p.

Iwasaki, T. y Mano, A. 1979. Two-dimensional numerical computation of tsunami run-ups in the Eulerian description. Twenty-sixth Conference on Coastal Engineering, Tokyo, p. 70-74.

Jarvis A., Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006. Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Koshimura S. 2009. Tunami-Code Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami. Disaster Control Research Center School of Engineering, Tohoku University.

Kulikov, E., Rabinovich, A., Thomson, R. 2005. Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards* vol. 35, p. 185-209.

Mansinha, L., Smylie, E. 1971. The displacement field of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 61, No 5, pp. 1433-1440.

Martínez J, 2014, Dinámica y modelado numérico de un tsunami en el terminal portuario del Callao y zonas adyacentes. UNMSM.

Nanayama, F.; Satake, K.; Furukawa, R.; Shimokawa, K.; Atwater, B.; Shigeno, K. Y Yamaki, S. 2003. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, N° 424, p. 660-663.

Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A. Dixon, T. 1998. Space geodetic observations of Nazca-South America Convergence. *Science*, 279, 358-362.

Okal, E., Dengler, L. 2002. Field Survey of the Camaná, Perú Tsunami of 23 June 2001. *Seismological Research Letters*, vol. 73, number 6, p. 907-920.

Ortega, E., Jiménez, C., 2008. *Revista de Tsunamis*. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Web: [www.dhn.mil.pe](http://www.dhn.mil.pe)

Papazachos, B., 2004. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, p. 1482-1489.

Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Yamazaki, F. 2015. Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Megaeathquakes: Application to Lima, Central Peru. BSSA, Vol. 105, doi:10.1785/0120140098

Satake, K. y Tanioka, Y. 2003. The July 1998 Papua New Guinea earthquake: Mechanism and quantification of unusual tsunami generation. Pure and Applied Geophysics, 160(10-11), p. 2087- 2118.

Silgado, E. 1978. Historia de los Sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Boletín N° 3. Instituto de Geología y Minería. Lima, Perú.

Smith, W., Sandwell, D. 2006. (ETOPO2v2) 2-minute Gridded Global Relief Data. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/06mgg01.html>

Talandier J., 1993. French Polynesia Tsunami Warning Center (CPPT). Natural Hazards and Earth System Sciences 7, p. 237256.

Tavera H. 2006, Catalogue of Focal Mechanisms of Peruvian Earthquakes 1993 Instituto Geofísico del Perú, volume especial n°6 p 89-102

Tavera H. y Bernal I., 2005, Distribución especial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú. Instituto Geofísico del Perú.

Villegas, J. *et al.* 2016. Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth.

Wiegel, R. Tsunamis. In Wiegel, R. 1970 ed. Earthquake engineering. Ed. Prentice-Hall, USA, p.253-306.

## VIII. ANEXO A: MODELO NUMÉRICO TUNAMI-N2

Este anexo tiene como objetivo proporcionar las bases matemáticas del algoritmo TUNAMI-N2 para su mejor comprensión.

### 1. TEORÍA DE AGUAS POCO PROFUNDAS.

#### 1.1. TEORÍA DE AGUAS POCO PROFUNDAS EN 2-D

##### 1.1.1. Ecuaciones gobernantes

Se considera un fluido incompresible de densidad  $\rho$  con la ecuación de continuidad (1) y las ecuaciones de Euler (2) y (3) en 2 dimensiones que describen cómo la velocidad y la presión de un fluido en movimiento están relacionadas. Aquí, se desprecia los efectos de la viscosidad del fluido que se incluyen en las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

Se tiene dos variables independientes en las ecuaciones de Euler, las coordenadas X y Z de dominio horizontal y vertical respectivamente. Hay tres variables dependientes, la presión  $p$ , y dos componentes del vector de velocidad, la componente  $u$  es en la dirección x, y  $w$  es la componente en la dirección z.  $F_x$  y  $F_z$  son los términos de fuerzas externas. En general, las fuerzas dominantes para la dinámica de las olas del océano son la gravedad que da lugar a la gradiente de presión, la flotabilidad, las mareas, la fuerza de Coriolis, que resulta del

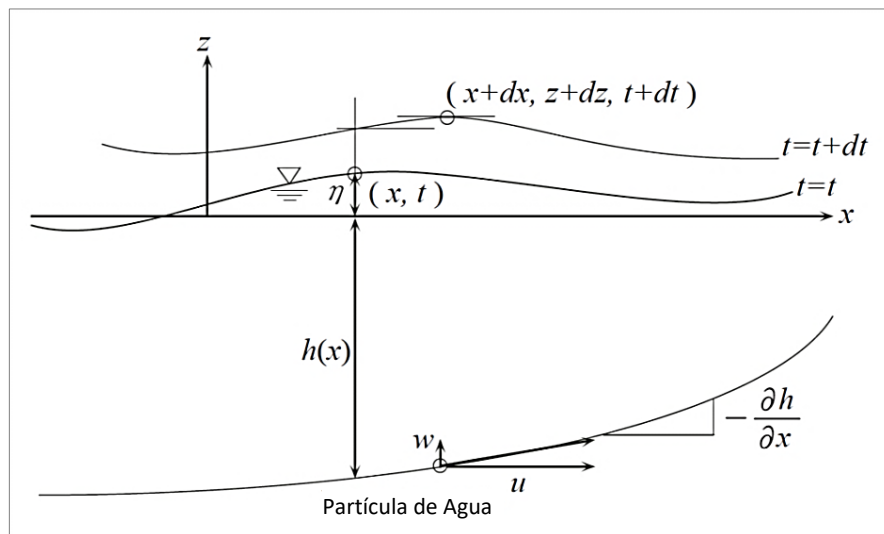
movimiento de rotación de la tierra, y la fricción con la fuerza del viento. Por simplicidad, se considera sólo la gravedad  $F_z = -g$ .

### 1.1.2. Condiciones de contorno

Teniendo en cuenta el sistema de coordenadas mostrado en la Figura 1, las ecuaciones anteriores deben satisfacer las siguientes condiciones de contorno:

- (i) Presión atmosférica en la superficie libre es cero.
- (ii) Partícula de agua en la superficie o parte límite inferior libre en el momento  $t$  debe permanecer en cada límite en el momento  $t + \delta t$ .

Desde el punto de vista cinemático, estas condiciones de contorno son llamadas "derivadas de Lagrange de las partículas de agua en la superficie libre ( $z = \eta(x, t)$ ) y en el fondo inclinado ( $z = -h(x)$ ) debería ser cero".



**Figura 1. Sistema de Coordenadas para una partícula de agua**

1. Límite de superficie libre ( $z = \eta$ )

(a) condición de contorno dinámico

$$p = 0 \quad (4)$$

(b) la condición de contorno cinemático

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = w \quad (5)$$

2. Límite inferior ( $z = -h$ )

(a) condición de contorno cinemático

$$\frac{w}{u} = -\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{dh}{dx} \quad (6)$$

Derivando las ecuaciones (5) y (6) mediante el uso de la derivada de Lagrange para una partícula de agua en la superficie ( $F = z - \eta = 0$  y  $F = z + h = 0$ ).

La derivada de Lagrange se define por la fórmula (7).

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (7)$$

### 1.1.3. Aproximación en aguas poco profundas

Se asume que la aceleración vertical de la partícula de agua es insignificante en comparación con la aceleración de la gravedad. La derivada de Lagrange de la velocidad vertical  $w$  conduce a la ecuación (8).

$$\left| \frac{Dw}{Dt} \right| = \left| \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right| \ll g \quad (8)$$

Este supuesto reduce la ecuación (3) a una forma sencilla;

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (9)$$

La integral de la ecuación (9) en  $z$  con la condición de contorno de superficie libre conduce a la descripción de la presión hidrostática.

$$p = \rho g(\eta - z) \quad (10)$$

Entonces, la ecuación (2) incluyendo  $\partial p/\partial x$  se puede volver a escribirse como la ecuación (11).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (11)$$

#### 1.1.4. Integración de las ecuaciones gobernantes

El conjunto de ecuaciones de (1) a (11) son las ecuaciones gobernantes en 2-D para la teoría de aguas poco profundas que hay que resolver con las condiciones de contorno anteriores. Suponiendo que la velocidad horizontal no es una función de la profundidad, se integra las ecuaciones gobernantes sobre la profundidad del agua para obtener ecuaciones de onda de aguas poco profundas.

La integración de la ecuación de continuidad (1) sobre la profundidad nos da:

$$\int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + w(x, \eta, t) - w(x, -h, t) = 0 \quad (12)$$

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno cinemáticas sobre la superficie libre y la condición del límite inferior, la integral de la ecuación de continuidad se puede describir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz &= \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + w(x, \eta, t) - w(x, -h, t) \\ &= \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \left( -u \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

La integral de Leibniz se utiliza para integrar el primer término del lado derecho de la ecuación (13). La expresión general de la integral Leibniz es:



$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} Q(x, y) dy = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial}{\partial x} Q(x, y) dy + Q(x, \beta(x)) \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} - Q(x, \alpha(x)) \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \quad (14)$$

Por lo tanto, la ecuación (13) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz &= \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \left( -u \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u_{(z=\eta)} \frac{\partial \eta}{\partial x} - u_{(z=-h)} \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \left( -u \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (15) \end{aligned}$$

Además, cuando se define el flujo de descarga  $M$  y velocidad media  $\bar{u}$  se tiene:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (16)$$

La expresión final es:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

Deduciendo la expresión integral de la ecuación de movimiento se obtuvo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{h + \eta} \right) + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

## 1.2. EXPRESIÓN 2-D DE LA TEORÍA DE AGUAS POCO PROFUNDAS

### 1.2.1. Ecuación de continuidad

En primer lugar, se consideró la integración de la ecuación de continuidad (19) desde la parte inferior a la superficie del agua.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Como se indica anteriormente, se aplica la integral de Leibniz para obtener:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}(\eta + h)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(\eta + h)}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

O

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (22)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (23)$$

### 1.2.2. Ecuación de movimiento (ecuación de Navier-Stokes)

En segundo lugar, se considera las ecuaciones de Navier-Stokes del movimiento en 3 dimensiones:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (25)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (26)$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática  $\nu = \mu/\rho$ . Estas ecuaciones se diferencian de las ecuaciones de Euler, la fuerza viscosa se incluye en cada uno de las componentes de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Como se mencionó anteriormente, se supone que la aceleración vertical de partículas de agua es muy pequeña en comparación con la aceleración de la gravedad. Por lo tanto, las ecuaciones (27) y (28) se pueden aplicar para volver a escribir las ecuaciones (26) a (29).

$$\left| \frac{Dw}{Dt} \right| \ll g \quad (27)$$

$$\nabla^2 w \approx 0 \quad (28)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (29)$$

Teniendo en cuenta la condición de contorno dinámica en la superficie libre ( $p = 0$ ) en ( $z = \eta$ ), se obtiene la presión hidrostática a partir de la ecuación (29):

$$p = \rho g(\eta - z) \quad (30)$$

A continuación, se modifica la forma de la parte izquierda de la ecuación (24):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - u \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - u \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \end{aligned}$$

Entonces, se obtiene la forma modificada de las ecuaciones (24):

$$\text{Dirección } x: \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (31)$$

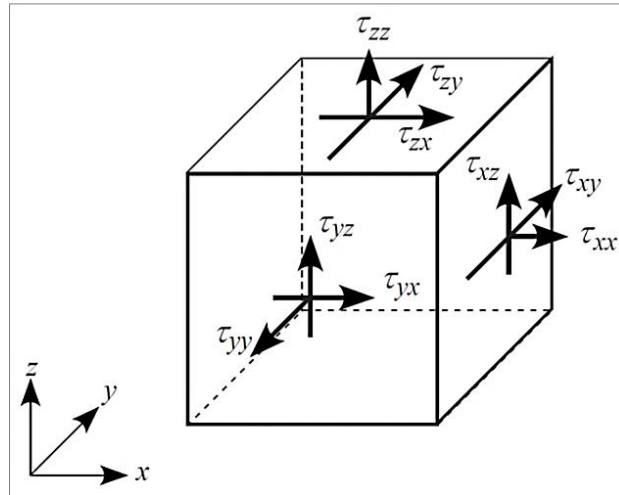
Y también para la ecuación (25).

$$\text{Dirección } y: \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (32)$$

Para integrar las ecuaciones (31) y (32), se sigue el mismo procedimiento considerado en (2.1.4). La integración de la ecuación (31) sobre la profundidad se convierte en:

$$\begin{aligned}
& \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u^2}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial uv}{\partial y} dz + w_{(x,y,\eta,t)} - u_{(x,y,\eta,t)} - w_{(x,y,-h,t)} - u_{(x,y,-h,t)} \\
&= -\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dz + \nu \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) dz \\
&= -\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \quad (33)
\end{aligned}$$

Donde  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$  son tensores de tensión para el fluido mostrado en la Figura 2.



**Figura 2. Definición de los tensores de tensión**

Aplicando la integral de Leibniz de la ecuación (14) y la condición dinámica de contorno en la superficie, se obtiene la forma modificada de la ecuación (33).

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz \\
& - u_{(x,y,\eta,t)} \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial y} - w_{(x,y,\eta,t)} \right\} \\
& - u_{(x,y,-h,t)} \left\{ u_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial x} + v_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial y} - w_{(x,y,-h,t)} \right\}
\end{aligned}$$

$$= -g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \quad (34)$$

Además, las condiciones de contorno cinemáticas sobre la superficie libre y el fondo se pueden aplicar como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial y} = w_{(x,y,\eta,t)} \quad (35)$$

$$-u_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial x} - v_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial y} = w_{(x,y,-h,t)} \quad (36)$$

Aplicando estas dos condiciones de contorno, la ecuación (34) se convierte en:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz \\ &= -g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (37)$$

Además, mediante la introducción de los factores de corrección de impulso se obtiene:

$$\beta_{xx} = \frac{1}{\bar{u}\bar{v}(\eta + h)} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz \quad (38)$$

$$\beta_{xy} = \frac{1}{\bar{u}\bar{v}(\eta + h)} \int_{-h}^{\eta} uv dz \quad (39)$$

La ecuación (37) se puede volver a escribir como:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}(h + \eta)}{\partial t} + \frac{\partial [\beta_{xx}(\eta + h)\bar{u}^2]}{\partial x} + \frac{\partial [\beta_{xy}(\eta + h)\bar{u}\bar{v}]}{\partial y} \\ &= -g(\eta + h) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (40)$$

Teniendo en cuenta que el factor de corrección  $\beta$  es considerado como 1 en situación práctica. Entonces, la ecuación (40) se simplifica a:

$$\frac{\partial \bar{u}(h + \eta)}{\partial t} + \frac{\partial [(\eta + h)\bar{u}^2]}{\partial x} + \frac{\partial [(\eta + h)\bar{u}\bar{v}]}{\partial y}$$

$$= -g(\eta + h) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \quad (41)$$

O, mediante el uso de flujo de descarga:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h)$$

La ecuación (41) se puede expresar como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \quad (42)$$

Donde  $D$  es la profundidad total de agua  $D = \eta + h$

Considerando el lado derecho de la ecuación (42) y asumiendo que:

- (i)  $\tau_{xx}$  y  $\tau_{yx}$  no dependen de  $z$  y son relativamente más pequeña que la tensión de cizallamiento inferior.
- (ii) la presión sobre la superficie libre  $\tau_{(x,y,\eta,t)} = 0$

Obteniendo:

$$\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz = \frac{\eta + h}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{\partial \tau_{zx(x,y,-h,t)}}{\rho} = -\frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (43)$$

Donde  $\tau_{bx} = \tau_{zx|z=-h}$

Por último, la ecuación de momento en la dirección  $x$  es:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (44)$$

También siguiendo el mismo procedimiento, la ecuación de momento en dirección  $y$  se expresa como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (45)$$

Donde  $\tau_{by} = \tau_{zy}|_{z=-h}$

Por último, la forma integrada de la teoría de aguas poco profundas es:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (46)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (47)$$

### 1.2.3. Término de fricción inferior

Para el uso práctico en el modelado numérico, a partir de una analogía con el flujo uniforme, los términos fricción con el fondo  $\tau_{bx}/\rho$  y  $\tau_{by}/\rho$  se expresan generalmente como:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (48)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (49)$$

Donde,  $n$  es el llamado coeficiente de rugosidad de Manning, que se elige de acuerdo con el estado del material de fondo, teniendo valores como los mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Valores del coeficiente de fricción de fondo  $n$  (Linsley y Franzini, 1979)**

Material del Canal	$n$
Cemento puro, metal lizo	0.010
Mampostería	0.017
Tierra lisa	0.018
Canal natural en buen estado	0.025
Canal natural con piedra y maleza	0.035
Canal natural muy rugoso	0.060

#### 1.2.4. Expresión final de la teoría de aguas poco profundas

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (50)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (51)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (52)$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h)$$

## 2. MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

### 2.1. EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

La diferencia finita es una expresión discreta de la aproximación de las ecuaciones diferenciales y se utiliza ampliamente para el análisis numérico, en la resolución de ecuaciones diferenciales. Por ejemplo, considere una ecuación diferencial ordinaria,



$$f'(x) = \frac{df(x)}{dx} = f(x) + a \quad (55)$$

Para resolver numéricamente la ecuación anterior, es necesario aproximar el operador diferencial a un operador de diferencia del tipo:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (56)$$

Entonces, la ecuación (56) es:

$$f(x+h) = f(x) + h(f(x) + a) \quad (57)$$

La ecuación (57) se llama una ecuación en diferencias finitas. Resolviendo esta ecuación da una solución aproximada de la ecuación diferencial.

En el método de las diferencias finitas, se considera tres formas principales de diferencias: hacia delante, hacia atrás y central.

La diferencia hacia adelante es una expresión de la forma:

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (58)$$

La diferencia hacia atrás surge cuando  $h$  se sustituye por  $-h$ .

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \quad (59)$$

Además, la diferencia central está dada por:

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x+h/2) - f(x-h/2)}{h} \quad (60)$$

o

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (61)$$

Para determinar el error entre la solución aproximada y la solución verdadera, lo que se hace es volver a escribir la ecuación diferencial de un operador diferencial a un operador de

diferencia. Este error se denomina “error de discretización” o “error de truncamiento”. Por ejemplo, si se considera la aproximación del siguiente operador diferencial:

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \quad (62)$$

El método de diferencias finitas basado en la serie de Taylor sería expresado de la siguiente manera:

$$M(x + \Delta x, t) = M(x, t) + \Delta x \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{3} \frac{\partial^3 M(x, t)}{\partial x^3} + \dots \quad (63)$$

Donde  $\Delta x$  es el tamaño de la grilla. A partir de la ecuación (63), se obtiene la ecuación de diferencia hacia adelante definida como:

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} = \frac{M(x + \Delta x, t) - M(x, t)}{\Delta x} - O(\Delta x) \quad (64)$$

Aquí, se define la diferencia entre la derivada parcial y su representación de diferencias finitas, dado por el error de truncamiento que tiene el orden de  $\Delta x$  o  $O\Delta x$ .

Por otra parte, si  $\Delta x$  es reemplazado por  $\Delta x/2$  y  $-\Delta x/2$ , la expansión de Taylor anterior se puede volver a escribir como las ecuaciones (65) y (66) para proporcionar (67), que es la diferencia central con el segundo orden de error de truncamiento:

$$M\left(x + \frac{\Delta x}{2}, t\right) = M(x, t) + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} + \frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2}{2} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^3}{3} \frac{\partial^3 M(x, t)}{\partial x^3} + \dots \quad (65)$$

$$M\left(x - \frac{\Delta x}{2}, t\right) = M(x, t) + \left(-\frac{\Delta x}{2}\right) \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} + \frac{\left(-\frac{\Delta x}{2}\right)^2}{2} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\left(-\frac{\Delta x}{2}\right)^3}{3} \frac{\partial^3 M(x, t)}{\partial x^3} + \dots \quad (66)$$

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} = \frac{M\left(x + \frac{\Delta x}{2}, t\right) - M\left(x - \frac{\Delta x}{2}, t\right)}{\Delta x} - O(\Delta x^2) \quad (67)$$

La ecuación de diferencias finitas (67) tiene un error de segundo orden; mientras que, la ecuación (64) tiene el de primer orden. Lo que es interesante, es que las expresiones de las diferencias finitas (64) y (67) son similares, pero el orden de error es diferente.

## 2.2. ESQUEMA ESCALONADO DE SALTO DE RANA

En el modelado numérico de tsunamis, es común utilizar el esquema escalonado de salto de rana con discretización de las ecuaciones que la gobiernan. Un sistema de grillas permite configurar variables en el espacio de dominio. En general, las variables escalares como  $\eta$  o  $h$  se encuentran en el centro de una grilla como variable de vector de  $M$  o  $N$ , tal como se muestra en la Figura 3. Por otra parte, el esquema de salto de rana emplea la diferencia finita central con un error de truncamiento de segunda orden. Las ventajas y desventajas del esquema de salto de rana escalonada son:

- (i) es simple pero con un error de segundo orden.
- (ii) fácil de configurar las condiciones de contorno.
- (iii) muy estable y sin error disipativo.
- (iv) la existencia de dispersión de error.

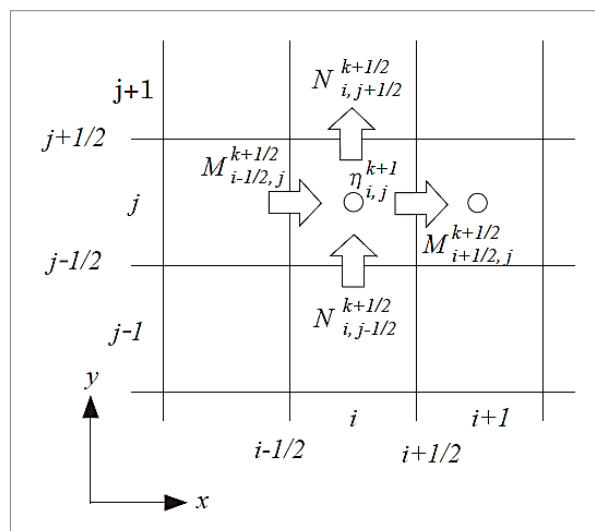


Figura 3. La geometría espacial del sistema de salto de rana escalonada

En primer lugar, se consideró para describir el esquema numérico las ecuaciones en 1-D lineales de onda para aguas poco profundas (68) y (69). La Figura 4 describe el esquema de salto de rana escalonada para este problema.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (68)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (69)$$

Mediante el uso de diferencias centrales, el primer término de la ecuación (68) es discretizada en la ecuación (70) para obtener el nivel de agua en  $t = t + \Delta t$  mediante el uso del nivel de agua en  $t = t$ .

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (\eta_i^{k+1} - \eta_i^k) \quad (70)$$

Donde:

$$\eta(x, t) = \eta(i\Delta x, k\Delta t) = \eta_i^k \quad (71)$$

$$M(x, t) = M[(i + 1/2)\Delta x, (k + 1/2)\Delta t] = M_{i+1/2}^{k+1/2} \quad (72)$$

El sufijo  $i$  es la posición de grilla espacial [ $x = i(\Delta x)$ ], y  $k$  la posición de grilla en el dominio del tiempo [ $t = k(\Delta t)$ ].  $\Delta x$  y  $\Delta t$  son la diferencia en el espacio y el tiempo de la grilla, respectivamente. Además, por la diferencia central del segundo término de la ecuación (68) se puede escribir la solución de la siguiente manera:

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i-1/2}^{k+1/2}) \quad (73)$$

De la misma manera, la ecuación (69) se discretiza como:

$$\frac{1}{\Delta t} (M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i+1/2}^{k-1/2}) + g \frac{D_{i+1}^k + D_i^k}{2} \frac{1}{\Delta x} (\eta_{i+1}^k - \eta_i^k) = 0 \quad (74)$$

Donde:

$$D_i^k = \eta_i^k + h_i$$

Por último, las ecuaciones en diferencias finitas para resolver las ecuaciones (68) y (69) se describen como:

$$\eta_i^{k+1} = \eta_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i-1/2}^{k+1/2}) \quad (75)$$

$$M_{i+1/2}^{k+1/2} = M_{i+1/2}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i+1}^k + D_i^k) \Delta t}{2 \Delta x} (\eta_{i+1}^k + \eta_i^k) \quad (76)$$

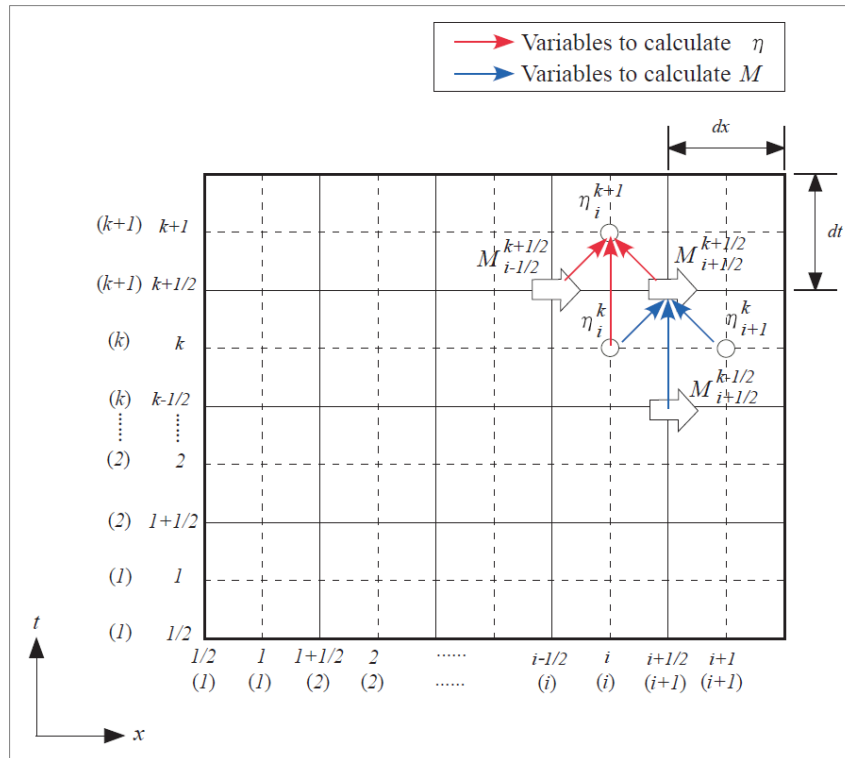


Figura 4: Esquema de salto de rana escalonada en x-t de dominio

### 2.3. EXPRESIÓN 2-D DEL TÉRMINO LINEAL

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) + \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \quad (77)$$

Para:  $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$

$$M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = M_{i+1/2,j}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i+1,j}^k + D_{i,j}^k) \Delta t}{2 \Delta x} (\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k) \quad (78)$$

$$\text{Para: } \frac{\partial M}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$N_{i,j+1/2}^{k+1/2} = N_{i,j+1/2}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i,j+1}^k + D_{i,j}^k) \Delta t}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k) \quad (79)$$

$$\text{Para: } \frac{\partial N}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

## 2.4. ESQUEMA NUMÉRICO DE LOS TÉRMINOS NO LINEALES

Como se ha descrito anteriormente, el esquema numérico de los términos lineales es muy simples; sin embargo, estos son un poco más complicados de discretizar. En primer lugar, se considera que el esquema de salto de rana escalonada en su término de convección por el esquema upwind. Utilizando el esquema upwind se obtiene  $f(x, t)$ ,  $f(x - \Delta x, t)$  y  $f((x + \Delta t)$  para calcular  $f(x, t + \Delta t)$ , de acuerdo con la dirección del flujo.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right)}_{(1)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right)}_{(2)} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (80)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right)}_{(3)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right)}_{(4)} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (81)$$

$$(1) = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{11} \frac{(M_{i+3/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{(M_{i+1/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{31} \frac{(M_{i-1/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right\} \quad (82)$$

$$(2) = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \nu_{11} \frac{(MN)_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}} + \nu_{21} \frac{(MN)_{i+1/2,j}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \nu_{31} \frac{(MN)_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}} \right\} \quad (83)$$

$$(3) = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{12} \frac{(MN)_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{22} \frac{(MN)_{i,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{32} \frac{(MN)_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}} \right\} \quad (84)$$

$$(4) = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \nu_{12} \frac{(N_{i,j+3/2}^{k-1/2})^2}{D_{i,j+3/2}^{k-1/2}} + \nu_{22} \frac{(N_{i,j+1/2}^{k-1/2})^2}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \nu_{32} \frac{(N_{i,j-1/2}^{k-1/2})^2}{D_{i,j-1/2}^{k-1/2}} \right\} \quad (85)$$

Donde:

$$(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{Si } M_{i+1/2, j}^{k-1/2} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{Si } M_{i+1/2, j}^{k-1/2} \leq 0 \end{cases} \quad (86)$$

$$(v_{11}, v_{21}, v_{31}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{Si } N_{i+1/2, j}^{k-1/2} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{Si } N_{i+1/2, j}^{k-1/2} \leq 0 \end{cases} \quad (87)$$

$$(\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{Si } M_{i, j+1/2}^{k-1/2} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{Si } M_{i, j+1/2}^{k-1/2} \leq 0 \end{cases} \quad (88)$$

$$(v_{12}, v_{22}, v_{32}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{Si } N_{i, j+1/2}^{k-1/2} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{Si } N_{i, j+1/2}^{k-1/2} \leq 0 \end{cases} \quad (89)$$

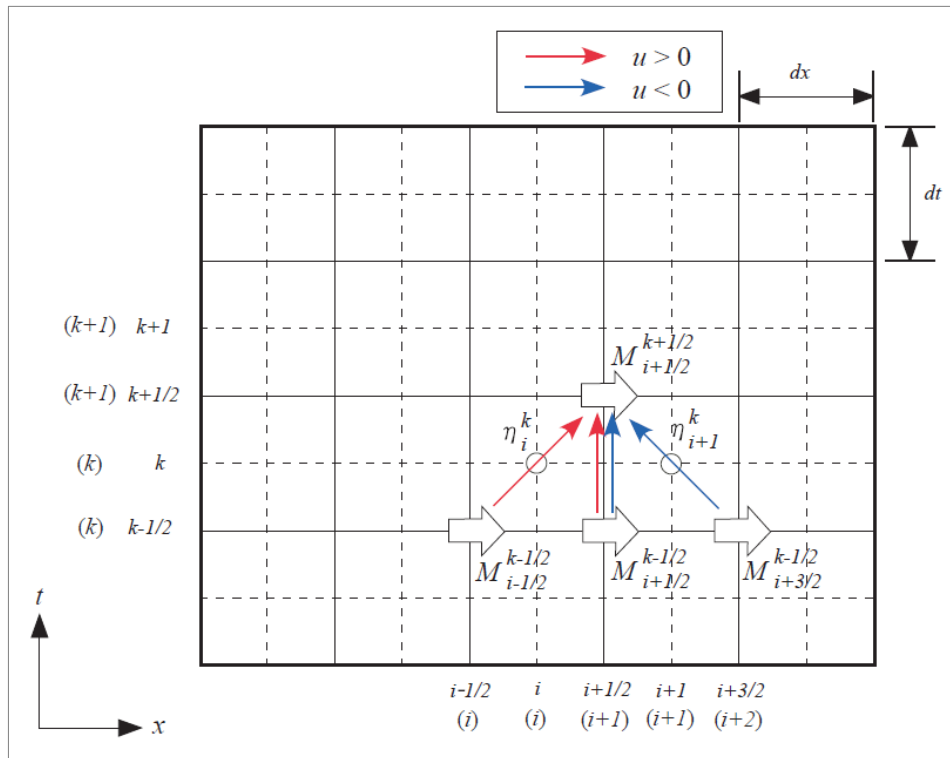


Figura 5. Geometría del esquema upwind

## 2.5. ESQUEMA NUMÉRICO DEL TÉRMINO DE FRICCIÓN DE FONDO

A continuación se describen los términos de fricción de fondo definidas previamente con las ecuaciones (48) y (49), y en este caso se procede a discretizar por el esquema implícito para mantener la estabilidad numérica:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (90)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (91)$$

Para simplificar, se considera la siguiente ecuación de dinámica 1-D:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| = 0 \quad (92)$$

El esquema implícito para la ecuación (92) es:

$$\frac{M^{k+1} - M^k}{\Delta t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} \frac{M^{k+1} + M^k}{2} |M| = 0 \quad (93)$$

Obteniendo:

$$M^{k+1} \left( 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{D^{7/3}} |M| \right) = M^k \left( 1 - \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{D^{7/3}} |M| \right) - gD \Delta t \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (94)$$

Entonces:

$$M^{k+1} = \frac{M^k \left( 1 - \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{D^{7/3}} |M| \right)}{\left( 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{D^{7/3}} |M| \right)} - \frac{gD \Delta t \frac{\partial \eta}{\partial x}}{\left( 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{D^{7/3}} |M| \right)} \quad (95)$$



## 2.6. RESUMEN.

En los esquemas numéricos de código TUNAMI para las ecuaciones de aguas poco profundas se resumen de la siguiente manera:

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left( N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2} \right) \quad (96)$$

$$\begin{aligned} M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = & \frac{1}{1 + \mu_{i+1/2,j}^{k-1/2}} \left[ \left( 1 - \mu_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right) M_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right. \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \lambda_{11} \frac{\left( M_{i+3/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{\left( M_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{31} \frac{\left( M_{i-1/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right\} \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \nu_{11} \frac{\left( MN \right)_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}} + \nu_{21} \frac{\left( MN \right)_{i+1/2,j}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \nu_{31} \frac{\left( MN \right)_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}} \right\} \\ & \left. - g D_{i+1/2,j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k \right) \right] \quad (97) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{i,j+1/2}^{k+1/2} = & \frac{1}{1 + \gamma_{i,j+1/2}^{k-1/2}} \left[ \left( 1 - \gamma_{i,j+1/2}^{k-1/2} \right) N_{i,j+1/2}^{k-1/2} \right. \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \lambda_{12} \frac{\left( MN \right)_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{22} \frac{\left( MN \right)_{i,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{32} \frac{\left( MN \right)_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}} \right\} \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \nu_{12} \frac{\left( N_{i,j+3/2}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i,j+3/2}^{k-1/2}} + \nu_{22} \frac{\left( N_{i,j+1/2}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \nu_{32} \frac{\left( N_{i,j-1/2}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i,j-1/2}^{k-1/2}} \right\} \\ & \left. - g D_{i,j+1/2}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} \left( \eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k \right) \right] \quad (98) \end{aligned}$$

Donde:

$$\mu_{i+1/2,j}^{k-1/2} = \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{\left( D_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right)^{7/3}} \sqrt{\left( M_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right)^2 + \left( N_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right)^2} \quad (99)$$

$$\gamma_{i,j+1/2}^{k-1/2} = \frac{\Delta t}{2} \frac{gn^2}{(D_{i,j+1/2}^{k-1/2})^{7/3}} \sqrt{(M_{i,j+1/2}^{k-1/2})^2 + (N_{i,j+1/2}^{k-1/2})^2} \quad (100)$$

$$D_{i+1/2,j}^k = \underbrace{\frac{\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k}{2}}_{\text{Nivel de Agua}} + \underbrace{\frac{h_{i+1,j} + h_{i,j}}{2}}_{\text{Profundidad de Agua}} \quad (101)$$

$$D_{i,j+1/2}^k = \frac{\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j}^k}{2} + \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j}}{2} \quad (102)$$

$$D_{i+1/2,j}^{k-1/2} = \frac{\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i+1,j}^{k-1} + \eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1}}{4} + \frac{h_{i+1,j} + h_{i,j}}{2} \quad (103)$$

$$D_{i,j+1/2}^{k-1/2} = \frac{\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j+1}^{k-1} + \eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1}}{4} + \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j}}{2} \quad (104)$$

### 3. CONDICIONES DE CONTORNO

#### 3.1. CONDICIONES DE CONTORNO ABIERTO: PARA COSTA AFUERA

En el esquema de salto de rana escalonado, las variables a lo largo de la frontera no se pueden calcular; Por lo tanto, es necesario utilizar una aproximación sencilla para obtener los valores límite de  $\eta$  asumiendo la relación de la altura de las olas  $\eta$  y la velocidad  $u$  de la progresiva de onda (sinusoidal) en aguas poco profundas a una profundidad constante.

$$u = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \quad (105)$$

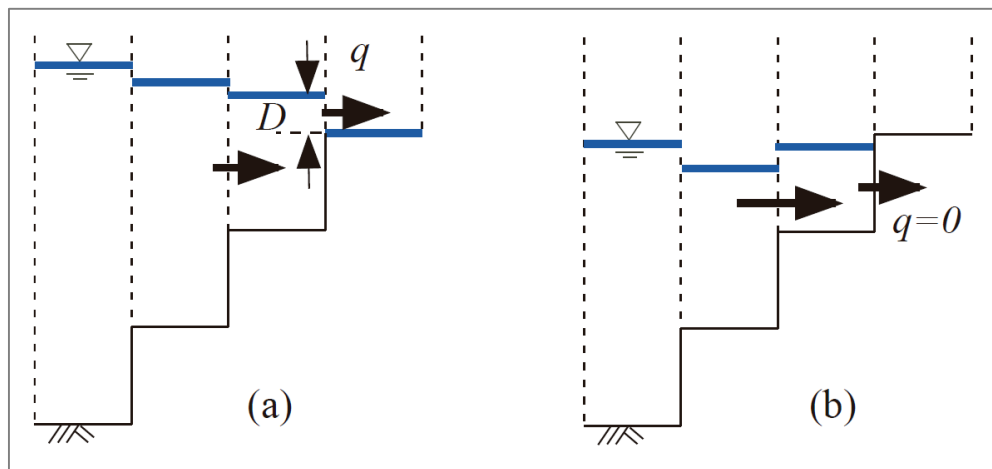
#### 3.2. CONDICIÓN DE FRONTERA MÓVIL: PARA FRENTE DE OLA

En el modelado del tsunami el run-up en un terreno considera si la grilla se encuentra seca o sumergida, lo cual debe ser juzgado por la siguiente condición:

$$D = \begin{cases} h + \eta > 0 & \text{Celda sumergida.} \\ h + \eta \leq 0 & \text{Celda seca.} \end{cases}$$

El frente de onda se debe ubicar entre la grilla seca y sumergida. Si la altura del suelo en la cuadrícula seca es más baja que el nivel del agua en la parte sumergida, la descarga de agua a través del límite entre las dos grillas es calculado. Hay varias maneras de las condiciones de frontera en movimientos aproximados. En el esquema de salto de rana escalonada, puntos de la cuadrícula se encuentran como alternativa para la velocidad y el nivel del agua el supuesto de que el nivel del agua ya se computa como una célula computacional. Si el nivel de agua es mayor que el segundo, el agua puede fluir en la célula hacia la tierra. La Figura 6 explica la manera de estimar la velocidad de flujo de entrada o de descarga.

El punto aquí es cómo debe calcularse la descarga de agua. Aquí, utilizamos el camino propuesto por Imamura (1995), que evalúa la descarga de agua mediante la aplicación directa de la ecuación de movimiento para mantener la profundidad total de la cuadrícula de cero seco. En esta aproximación, la profundidad  $D$  total en el punto de descarga computacional está dada por la diferencia entre el nivel del suelo en la primera cuadrícula seco y el nivel del agua en la cuadrícula vecina.

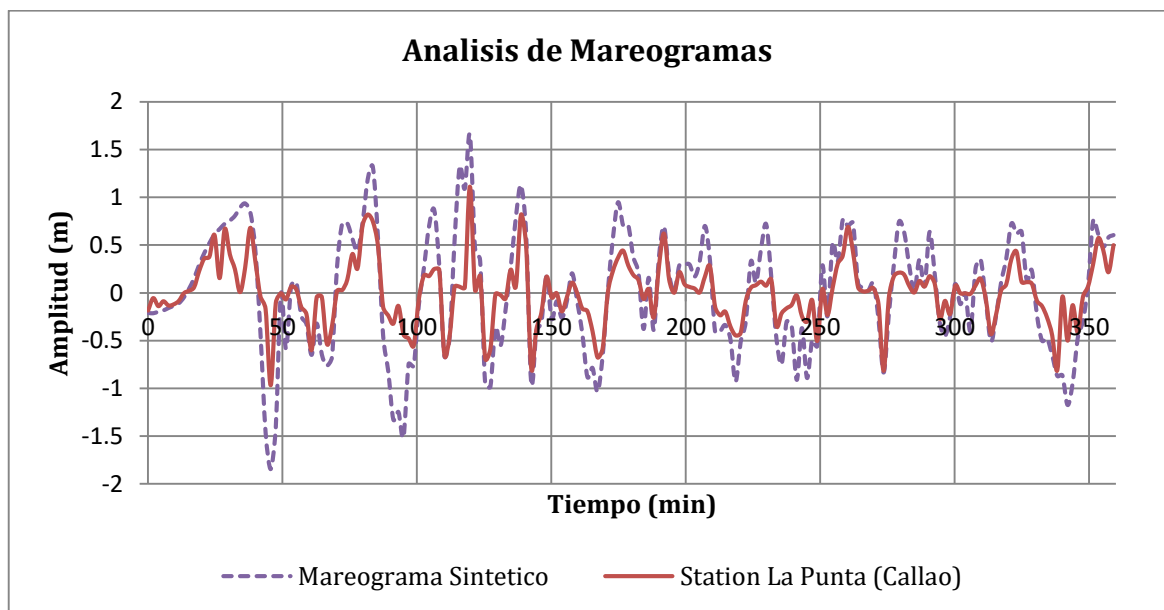


**Figura 6. Condición de frontera en el frente de onda en un terreno**

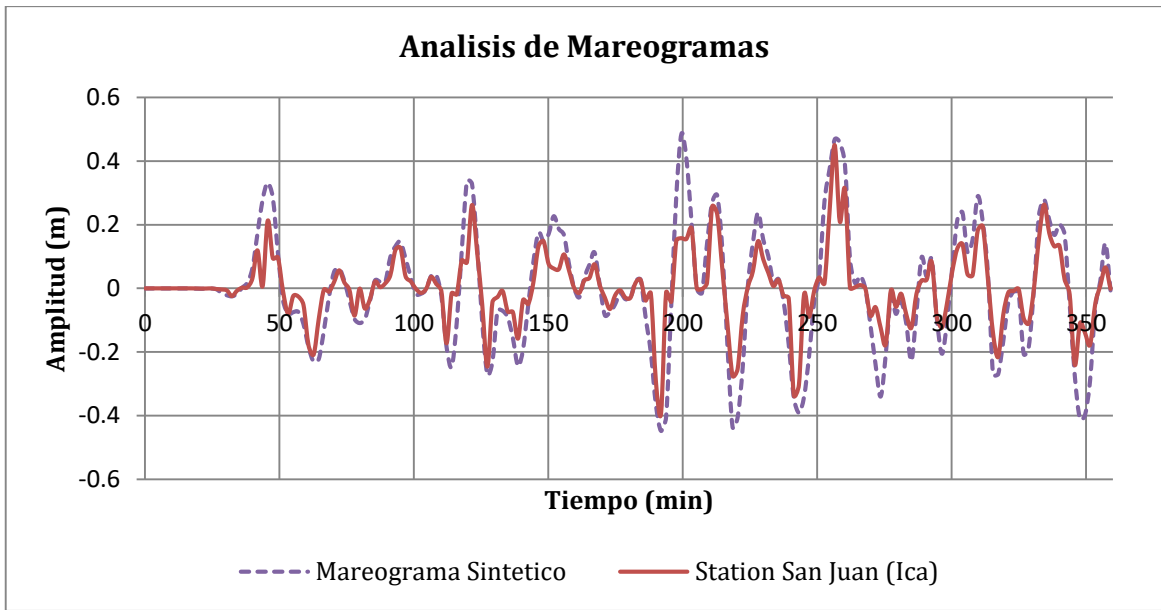
## IX. ANEXO B: VALIDACIÓN TSUNAMI 03/10/1974

Los mareógrafos que registraron el tsunami del 03 de octubre de 1974 fueron: La Punta (Callao-Perú) y San Juan de Marcona (Ica-Perú), para ambos registros se realizó un pre-proceso de filtrado para eliminar la influencia de las mareas y así poder realizar la comparación con los mareogramas sintéticos obtenidos con el modelo TUNAMI-N2.

En las Figuras 1 y 2, se aprecia las comparaciones realizadas, las líneas de color rojo representan los mareogramas sintéticos obtenidos como resultado del modelo numérico TUNAMI-N2 y las líneas de color morado son las señales reales registradas en cada estación mareográfica.



**Figura 1. Mareogramas reales y sintéticos - Estación La Punta (Callao-Perú)**



**Figura 2. Mareogramas reales y sintéticos - Estación San Juan de Marcona (Ica-Perú)**