

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**PROPUESTA DE UNA ESTRUCTURA PARA MITIGAR LOS**  
**DAÑOS CAUSADOS POR TSUNAMI EN CHORRILOS**  
**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERA CIVIL**

**PRESENTADA POR**

**Bach. LUZ HERMINIA CHAVEZ MACO**

**Bach. JEAN FRANCO SOLÍS GOMEZ**

**ASESOR:**

**Dr. LOPEZ SILVA MAIQUEL**

**LIMA - PERÚ**

**2021**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a todos mis seres queridos por todo su apoyo incondicional, consejos, cariño y cuidados quienes, en conjunto, han sido el soporte perfecto para nunca decaer y siempre mantenerme firme en cada etapa del proceso del desarrollo de esta tesis, sobre todo a mis padres Francisca Maco y Filomeno Chavez por sus enseñanzas, consejos y cuidados a mis abuelos Herminia Urrutia, Angelica Barahona y mariano maco que en paz descansan por todo su amor, cariño y preocupación.

Luz Herminia Chavez Maco

Esta tesis está dedicada a mis padres y hermanos, quiénes me animaron en este campo de estudio y, durante varios años facilitaron mi investigación compartiendo su hogar y cariño conmigo cuando lo necesité. La fuerza y la fe de no rendirme.

Jean Franco Solis Gomez

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro sincero agradecimiento a nuestra alma mater, por habernos brindado los conocimientos de la maravillosa carrera de ingeniería civil; a nuestros asesores Dr. Carmentes Hernández, Dayma y Dr. López Silva, Maiquel por brindarnos todas las herramientas y consejos para el desarrollo óptimo de esta tesis; además de todas las personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis, entre ellos docentes y familiares.

Luz Herminia Chavez y Jean Franco Solís

## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCION.....	iii
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
1.1. Descripción y formulación del problema general y específico.....	17
1.1.1. Problema general.....	20
1.1.2. Problemas específicos.....	20
1.2. Objetivo general y específico.....	21
1.2.1. Objetivo general.....	21
1.2.2. Objetivo específico.....	21
1.3. Delimitación de la investigación temporal, espacial y temática.....	21
1.3.1. Delimitación espacial.....	21
1.3.2. Delimitación temporal.....	22
1.3.3. Delimitación temática.....	22
1.4. Justificación e importancia.....	23
1.4.1. Justificación.....	23
1.4.2. Importancia.....	24
<b>CAPITULO II: MARCO TEORICO.....</b>	<b>25</b>
2.1. Antecedentes del estudio de investigación.....	25
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	25
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	26
2.2. Bases Teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio.....	27
2.2.1. Tectónica de Placas.....	27
2.2.2. Clasificación de Sismos.....	29
2.2.3. Histórico de Sismos en el Perú.....	30
2.2.4. Tsunami.....	33
2.2.5. Origen de los tsunamis.....	33
2.2.6. Características.....	33
2.2.6.1. Periodo (T).....	34
2.2.6.2. Altura de onda (H).....	34
2.2.6.3. Longitud de onda (L):.....	34
2.2.6.4. Velocidad de propagación (v):.....	34

2.2.7. Impacto del tsunami.....	35
2.2.8. Generación de un tsunami.....	35
2.2.9. Propagación y llegada del tsunami a la costa.....	36
2.2.10. Parámetros hidrodinámicos del Tsunami.....	37
2.2.11. Tipos de tsunamis.....	38
2.2.12. Fases de un tsunami.....	39
2.2.12.1. Generación.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
2.2.12.2. Propagación.....	39
2.2.12.3. Inundación.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
2.2.13. Teoría de olas lineal.....	40
2.2.13.1. Olas cortas.....	40
2.2.13.2. Desplazamiento vertical de la ola.....	40
2.2.13.3. Periodo.....	41
2.2.13.4. Longitud de onda.....	41
2.2.13.5. Velocidad de traslación.....	41
2.2.13.6. Rotura de ola.....	42
2.2.13.7. Energía de ola.....	42
2.2.13.8. Potencia de ola.....	43
2.2.14. Ondas no lineales.....	45
2.2.14.1. Teoría de Stokes.....	46
2.2.14.2. Teoría de la onda solitaria.....	47
2.2.15. Clasificación de las olas.....	47
2.2.15.1. Olas estacionarias.....	48
2.2.15.2. Olas transitorias o progresivas.....	49
2.2.15.3. Olas libres y olas forzadas.....	49
2.2.16. Obras Marítimas Principales.....	50
2.2.16.1. Obras marítimas fijas.....	50
2.2.16.2. Obras marítimas fijas de gravedad.....	50
2.2.17. Obras marítimas fijas estructurales.....	51
2.2.18. Obras marítimas flotantes.....	52
2.2.19. Partes de un dique.....	53
2.2.20. Ecuación de la conservación de la energía del movimiento oscilatorio.....	54
2.2.21. Tipo de diques.....	55
2.2.21.1. Dique vertical.....	55

2.2.21.2. Dique vertical con paramento especial .....	58
2.2.21.3. Dique vertical con manto de protección .....	59
2.2.21.4. Dique Mixto .....	60
2.3. Definición de Términos Básicos .....	63
<b>CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÒTES</b> .....	<b>64</b>
3.1. Hipótesis .....	64
3.1.1. Hipótesis principal .....	64
3.1.2. Hipótesis secundarias .....	64
3.2. Variables .....	64
3.2.1. Definición conceptual de las variables .....	64
3.2.1.1. Variable Independiente .....	64
3.2.1.2. Variable dependiente .....	64
3.3. Operacionalización de Variables .....	65
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGIA DE INVESTIGACION</b> .....	<b>66</b>
4.1. Tipo y nivel .....	66
4.1.1. Tipo .....	66
4.1.2. Nivel .....	66
4.2. Diseño de investigación .....	67
4.3. Población y muestra .....	67
4.3.1. Población .....	67
4.3.2. Muestra .....	67
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	67
4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos .....	67
4.4.2. Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos .....	68
4.5. Procedimientos para la recolección de datos .....	68
4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de información .....	69
<b>CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>70</b>
5.1. Características Batimétricas y meteorológicas .....	70
5.1.1. Temperatura Media de Chorrillos .....	70
5.1.2. Altura de las olas .....	70
5.1.3. Velocidad del Viento .....	71
5.1.4. Batimetría del Perú .....	71
5.2. Modelación del oleaje producto del tsunami .....	72
5.2.1. Cálculo de altura de las olas .....	72

5.2.2. Comportamiento de la ola a través del tiempo.....	73
5.3. Modelamiento en el software IRIC.....	79
5.3.1.Resultados del Software IRIC.....	83
5.3.1.1.Velocidades máximas.....	83
5.3.1.2.Altura Máxima de Inundación.....	84
5.4. Propuesta de la estructura para mitigar la inundación.....	85
5.4.1. Predimensionamiento del contrafuerte.....	85
5.4.3. Perfil 1.....	86
5.4.4. Perfil 2.....	86
5.4.5. Vista Final.....	87
5.4.6. Análisis de factores de seguridad.....	87
5.5. Modelamiento de la estructura.....	91
5.5.1. Modelamiento en el Software SAP2000.....	91
5.5.2. Modelamiento en el Software IRIC.....	98
5.6. Análisis de Resultados.....	99
5.7. Contrastación de hipótesis.....	102
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>104</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>109</b>
ANEXO 1: Cronograma de actividades.....	109
ANEXO 2: Presupuesto de Actividades.....	110
ANEXO 3: Operalización de Variables.....	111
ANEXO 4: Matriz de consistencia.....	112

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Delimitación del área de trabajo .....	21
Figura N° 2: Delimitación del área de trabajo .....	22
Figura N° 3: Las principales placas tectónicas .....	28
Figura N° 4: Características de un temblor .....	29
Figura N° 5: Variables hidrodinámicas relevantes en la inundación .....	38
Figura N°6: Ola Lineal.....	41
Figura N° 7: Energía de las olas en mar abierto en kW/m.....	46
Figura N° 8: Representación esquemática de los tipos de olas.....	49
Figura N° 9: Partes de la sección un dique .....	54
Figura N° 10: Flujo de energía en presencia de la obra .....	55
Figura N° 11: Ejemplo de dique vertical de puerto tarragona .....	57
Figura N° 12: Dique vertical como cámaras disipadoras y resonantes.....	59
Figura N° 13: Dique vertical con manto de protección.....	60
Figura N° 14: Dique vertical con manto de protección en Asturias .....	60
Figura N° 15: Dique Mixto .....	61
Figura N° 16: Dique mixto del puerto Cartagena .....	61
Figura N°17: Temperatura promedio de Chorrillos (2020) .....	70
Figura N°18: Altura promedio de la ola en Chorrillos (2020).....	70
Figura N°19: Velocidad del viento promedio por meses .....	71
Figura N° 20: Rosa de Vientos.....	71
Figura N° 21: Batimetría del Perú.....	72
Figura N° 22: Altura de la ola (m) vs el Tiempo (s) .....	73
Figura N° 23: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 5 .....	74
Figura N° 24 : Altura vs tiempo para una magnitud de grade 6 .....	74
Figura N° 25: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 7 .....	75
Figura N° 26 : Altura vs tiempo para una magnitud de grado 7.5 .....	75
Figura N° 27: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8 .....	76
Figura N° 28: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8.5 .....	76

Figura N° 29 :Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8.7 .....	77
Figura N° 30 : Altura vs tiempo para una magnitud de grado 9.0 .....	77
Figura N° 31: Selección del <i>Solver</i> .....	79
Figura N° 32: Método de creación de Grilla – software IRIC .....	79
Figura N° 33: Definición de inicio y final de la grilla .....	80
Figura N° 34 : Grilla completa usada para el cálculo de la inundación.....	80
Figura N° 35: Selección de condiciones de Calculo .....	81
Figura N° 36: Altura de la ola prevista a lo largo del tiempo .....	81
Figura N° 37: Pendiente de la Superficie del agua. ....	82
Figura N° 38: Coeficiente de rugosidad.....	82
Figura N° 39: Condiciones del <i>Inflow</i> .....	83
Figura N° 40: Las velocidades máximas producida por un tsunami.....	83
Figura N° 41: Alturas máxima de inundación.....	84
Figura N° 42: Área máxima alcance de inundación.....	85
Figura N° 43: Vista en 3D del contrafuerte .....	85
Figura N° 44: Vista de perfil del contrafuerte.....	86
Figura N° 45: Vista en planta del contrafuerte.....	86
Figura N° 46: Vista de perfil del contrafuerte con manto de protección .....	87
Figura N° 47: Perfil del muro en el eje de coordenadas .....	87
Figura N° 49: Ingreso y definición de grilla en el programa SAP 2000 .....	91
Figura N° 50: selección del material en el programa SAP 2000.....	91
Figura N° 51: Ingreso y definición del muro de contención en SAP 2000.....	92
Figura N° 52: Ingreso y definición de la zapata en el programa SAP 2000 .....	92
Figura N° 53: Definición anchos y discretización. ....	93
Figura N° 54: Definición de Cargas Actuantes.....	93
Figura N° 54: Definición de Unión,.....	94
Figura N° 55: Adición de carga Hidrodinámica y de Impacto.....	94
Figura N° 56: Definición de carga hidrostática en la cara del Muro. ....	95
Figura N° 57: Definición del primer caso de Análisis. ....	95
Figura N° 58: Definición del segundo caso de Análisis. ....	96
Figura N° 59: Fuerzas Máximas para el primer caso ( ton) .....	96

Figura N° 60: Momentos Máximos para el primer caso (ton.m) .....	97
Figura N° 61: Fuerzas Máximas para el segundo caso (ton) .....	97
Figura N° 62: Momentos Máximos para el segundo caso (ton.m) .....	98
Figura N° 63: Área de Inundación con protección del contrafuerte .....	98
Figura N° 65: Topografía de la zona de estudio. ....	100
Figura N° 66: Vista 3D del contrafuerte .....	101

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla N° 1: Altura de marea según magnitud de cada sismo.....	73
Tabla N° 2: magnitud vs el tiempo (s) .....	78
Tabla N°3: Altura de inundación por diferentes magnitudes de sismos .....	84
Tabla N°4: Coordenadas del muro .....	88
Tabla N° 5: Cronograma de actividades .....	109
Tabla N° 6: Presupuesto .....	110
Tabla N° 7: Operación de variables .....	111
Tabla N° 8: Matriz de consistencia.....	112

## RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo realizar el análisis y evaluación del desempeño de un contrafuerte en mitigación de daños, ubicado en la ciudad de Lima, distrito de Chorrillos. Asimismo, hizo énfasis en la necesidad de contar con un sistema de protección costera y un sistema de evacuación eficiente ante estos eventos que se encarga la municipalidad correspondiente. Se desarrolló esta propuesta mediante el análisis y modelamiento de las condiciones del tsunami, siendo el sismo elegido de estudio de magnitud grado 8 en la escala de Richter, puesto que se estima que la magnitud del sismo que afectará a la ciudad de Lima será de esas características. Se siguió las normativas vigentes nacionales, internacionales E-020, E-030, E-050, E080, E060, E020 e ROM I.O-09 de España. Los softwares que se utilizaron para el presente estudio fueron ARGIS, IRIC, SAP 2000 y AUTOCAD.

Los principales resultados fueron que la magnitud de inundación en la zona de Chorrillos llegó a un área de once kilómetros cuadrados, y una altura de oleaje de 6.7 metros. Siendo estos los datos necesarios para calcular las fuerzas hidráulicas que afectarían a la zona de estudio. Se diseñó un contrafuerte con las siguientes características: altura = 10 m, profundidad = 15 m, espesor = 2 m con una zapata de 15 m de largo con 10 m de ancho. El peso de la estructura es de 828 ton con un  $F'c = 300 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad contra el volteo de 6.65 y un factor de seguridad contra el desplazamiento de 8.866. Según las estimaciones para soportar las cargas producidas, con un factor de seguridad mayor a 1.5 que indica que el diseño es óptimo para un tsunami producido hasta por un sismo de grado 8.5 en la escala de Richter.

**Palabras Clave:** Fuerzas Hidráulicas, Efectos negativos, Factores de seguridad, Obras marítimas

## **ABSTRACT**

This investigation shows the analysis and evaluation of the performance of a damage mitigation buttress, located in the city of Lima, district of Chorrillos. It also emphasized the need to have a coastal protection system and an early warning system as a protection measure against these events.

This proposal was developed through the analysis and modeling of the tsunami conditions, the earthquake chosen being an earthquake of magnitude 8 on the richter scale, since it is estimated that the magnitude of the earthquake that will affect the city of Lima will be one of those features. The regulations in force for the design of the structure were followed, with certain international guidelines, since there is no specialized Peruvian standard in the case. A buttress was designed with the following characteristics: height = 10 m, depth = 15 m, thickness = 2m with a footing 15m long and 10m wide. The weight of the structure is 828 ton with an  $F'c = 300\text{kg} / \text{cm}^2$  with a safety factor against overturning of 6.65 and a factor of safety against displacement of 8.866.

The results showed that the flood magnitude in the Chorrillos area reached an area of eleven square kilometers, and a wave height of 6.7 meters. These being the data necessary to calculate the hydraulic forces that would affect the study area.

With these parameters, a buttress was designed that, according to the estimates and estimated calculations, supports the loads produced, the safety factors greater than 1.5 indicate that the design is optimal for a tsunami produced up to an earthquake of grade 8.5 on the Richter scale. The software used for the present study were ARGUIS, IRIC, SAP 2000 and AUTOCAD.

**Key Words:** Hydraulic Forces, Negative Effects, Safety Factors, Maritime Works

## INTRODUCCION

El presente trabajo de tesis tiene como principal objetivo proponer una estructura que permita mitigar los efectos negativos que produce un tsunami al llegar a las costas, aplicando métodos de modelación hidráulica y estructural. El Perú es una de los países con más eventos sísmicos debido a que se encuentra en el cinturón de fuego del pacifico, donde se presenta la mayoría de los sismos en el mundo. Estos sismos se generan comúnmente en la zona marítima, y esto en consecuencia genera un tsunami, el cual muchas veces puede ser más destructivo que el mismo sismo. La importancia de estudiar este tema en particular radica en las consecuencias negativas que este produce y como se pueden reducir o erradicar.

El capítulo I , se expone y se describe la problemática que tiene el Perú, una zona altamente sísmica y que a lo largo de su historia fue sede de diferentes tsunamis, que dejaron daños tanto materiales como de vidas humanas, este problema se ve reflejado en la zona de estudio, el cual es el distrito de chorrillos, en específico los alrededores a la urbanización la encantada, esto nos obliga a proponer una estructura que mitigue los daños causados por un tsunami en esta zona.

En el capítulo II se abordan los aspectos teóricos relacionados a la propuesta, sus características, las ecuaciones que se usaran para la estimación de fuerzas, las normativas vigentes, etc, asimismo se da un marco histórico de los sismos y tsunamis más importantes en el Perú y lima, y cuáles fueron sus consecuencias, así como sus características más relevantes.

En el capítulo III se define y establece la hipótesis general del presente trabajo de investigación, así como las hipótesis específicas, también se incluye el análisis de las variables tanto dependiente como independiente y Operalización.

El capítulo IV describe la metodología de estudio utilizado, siendo la investigación de tipo aplicada con enfoque mixto (cuantitativo – cualitativo), de nivel descriptivo – explicativo y de diseño no experimental. La población se define como todos los tipos de obras de protección costera y la muestra el contrafuerte diseñado, siguiendo todas las normativas, guías vigentes y aplicables para la investigación.

El capítulo V Se explica los análisis y resultados de la investigación, siendo la caracterización batimétricas y meteorológicas de la zona de estudio, en este caso chorrillos, la modelación del oleaje, tanto el cálculo de altura como la fuerza con la que este llegara a las costas, luego el análisis mediante el software IRIC para la situación del

oleaje del tsunami y sus consecuencias, al final también el análisis mediante el software SAP2000 para el cálculo de la estructura. Finalmente se plantea conclusiones, recomendaciones y referencias.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción y formulación del problema general y específico**

El Perú es uno de los países más sísmicos por encontrarse en el cinturón de fuego del pacífico. Cuando se origina un sismo no solo puede causar fallas estructurales, colapsos en edificios, derrumbes o deslizamientos. Luego de un sismo se puede generar un Tsunami, el cual también puede ocasionar fallas estructurales, colapsos de edificios o viviendas, fallas en suelo ocasionando un gran impacto ambiental.

Las costas contienen el hábitat y ecosistemas que proporcionan beneficios y servicios a las comunidades donde se ubican puertos, urbanizaciones, áreas protegidas entre otros.

Perú además de ser conocido por su gran diversidad marina y de puertos siendo un país exportador de diversas especies, no se encuentra preparado para un fenómeno de gran magnitud como un tsunami a comparación de otros países que cuentan con obras de protección costera y plan de mitigación de daños frente a este fenómeno.

Las investigaciones del impacto de este fenómeno durante años han ido avanzando y recolectando datos por lo cual diversos autores recomiendan diferentes tipos de estructuras para cada caso. Además de explicar diferentes técnicas básicas de mitigación que pueden ser aplicadas en diversos proyectos para poder reducir el impacto de tsunami. además de explicar los diversos daños presentados por la presencia del fenómeno tales como los impactos sobre la morfología costera, perdida de servicios básicos y líneas de vida, falla en suelos y entre otros. Para poder encontrar formas de mitigar los daños causados por un tsunami se debe evaluar el riesgo de tsunami en zonas costeras se debe de estudiar las fuentes de generación, fenómenos de propagación e impacto costero para tsunami de campo de carácter histórico o esperable en el área de interés, mediante modelación numérica estimar la máxima inundación, campo de altura y de velocidades debidos a tsunamis desde el origen hasta su proceso de termino. Debido a la complejidad de los procesos de interacción topográfica y batimétrica que experimentan las ondas de tsunami en su propagación hacia la costa, la evaluación del riesgo debe realizarse conociendo en detalle la distribución de sondas del área de interés. Determinar las cargas hidrodinámicas de tsunami para el diseño estructural de distintos elementos de futuras obras marítimas. (Winckler, Reyes y Contreras ,2011).

Atreves de los años la investigación ha ido evolucionando permitiéndonos reconocer los patrones geoespaciales ante la ocurrencia de un tsunami mediante el uso del monitoreo satelital y clasificando la amenaza por el tsunami con la finalidad de proponer acciones de control para mitigar los riesgos este estudio se realizó en la ciudad de Camaná en Arequipa analizando 3 posibles casos, el cual permitió observar cómo se vería afectada la zona frente a este fenómeno. (Armas y Jaramillo ,2020)

Las estructuras como los diques juegan un papel crucial en la prevención de desastres para el control de tsunamis, inundaciones, corrientes de escombros, deslizamientos de tierra y otros fenómenos naturales. Sin embargo, las medidas estructurales por sí solas no pueden prevenir todos los desastres porque no pueden mitigar los daños cuando el peligro excede el nivel que las estructuras están diseñadas para soportar. Este artículo brinda hallazgos; lecciones; y recomendaciones para países en desarrollo en como los daños se pueden reducir al mínimo mediante enfoques de múltiples niveles para la mitigación de desastres que incluyen medidas estructurales y no estructurales y que garantizan la evacuación segura de los residentes. (Ishiwatari y Sagara, 2012).

El Perú está ubicado en una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra la cual es llamada Cinturón de Fuego del Pacífico o también conocido Anillo de Fuego del Pacífico, la cual es la zona donde ocurren la mayor cantidad de sismos y tsunamis, los que son responsables de numerosas pérdidas de vidas y pérdidas materiales que perturbaría el orden económico, demográfico y social de nuestro país. La cronología histórica de los tsunamis registrados da a conocer la constante amenaza en las costas de nuestro país. Silgado (1978) realizó la más importante descripción ordenada de la historia sísmica del Perú. Desde el siglo XVI hasta el siglo XIX, se reportan los sismos sentidos en las ciudades principales, quedando sin registrar sismos importantes que pueden haber ocurrido en regiones remotas. Dorbath et al. (1990) analizaron los grandes sismos históricos, mostrando la existencia de tres zonas diferentes correspondientes a la segmentación del casquete litosférico de Nazca que subduce al casquete Sudamericano. En los últimos 400 años, el centro y sur del país han sido afectados por más de 30 sismos con variable severidad. (Castillejo y Espinoza ,2015)

El autor da a conocer de manera precisa cuales fueron los tsunamis más importantes por región, dividiendo al Perú en 3 zonas, Norte, Sur y Centro Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú. Los sismos de gran magnitud generan frecuentemente tres efectos secundarios importantes: 1) Tsunamis cuando los epicentros del sismo están en el mar, frente a la zona costera; 2) Deslizamientos de tierra y piedras en zonas de mediana a alta pendiente, sea cerca de la costa o en el interior del continente; y 3) Procesos de licuación de suelos en zonas con superficies inestables y con presencia de agua. De estos tres efectos, los tsunamis han resultado ser los de mayor peligro; por lo tanto, es importante conocer su historia en el Perú a fin de lograr tener escenarios reales de lo que podría acontecer si estos mismos peligros se repiten en el futuro. (Tavera ,2014)

Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú. Región Norte: El tsunami mayor fue debido al sismo ocurrido el 20 de noviembre de 1960, magnitud ~6,8 Mw y epicentro ubicado 115 km en dirección Oeste con respecto a la ciudad de Chiclayo (6,72°S - 80,90°O). Después de varias horas de ocurrido el sismo, la zona costera del departamento de Lambayeque fue afectada por un tsunami cuya primera ola alcanzó 9 metros de altura, produciendo daños severos en los puertos de Eten y Pimentel, Caletas de Santa Rosa y San José. Este tsunami logró inundar completamente las islas de Lobos ubicada a unos 16 km frente al puerto de Pimentel. (Tavera ,2014)

Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú. Región Centro: El tsunami de mayor tamaño ocurrió después del sismo del 28 de octubre de 1746, de magnitud ~8,6 Mw y epicentro frente al departamento de Lima. Media hora después de ocurrido el evento sísmico, se generó un gran tsunami que golpeó la costa de la región central del Perú causando la destrucción absoluta del puerto. El Callao fue impactado por olas de 24 metros que inundaron distancias de hasta 5 km. De los 23 barcos anclados en el puerto, 19 fueron hundidos y cuatro trasladados tierra dentro. En total, las víctimas del terremoto y tsunami alcanzaron el número de 4000 personas. En el puerto solo quedaron cascajos y arenas que se depositaron sobre los escombros dejados por el sismo y tsunami. (Tavera ,2014).

El tsunami más importante se presentó después de ocurrido el sismo del 13 de agosto de 1868 con magnitud ~8.8 Mw y epicentro entre las ciudades de Tacna y

Arica. Después de 45 minutos de ocurrido el sismo, llega a la zona costera una primera ola de 12 m de altura que inunda el puerto de Arica. Después de una hora y 45 minutos, se produjo un nuevo movimiento sísmico que generó un tsunami con olas de 16 m de altura. Después de dos horas y 25 minutos del inicio del primer movimiento sísmico, llegó una tercera gran ola de 18 m de altura que varó la corbeta América de 1560 toneladas y al *USS Wateree* de los Estados Unidos a unos 500 m de la playa tierra dentro. Las olas gigantes destruyeron gran parte del litoral peruano y chileno, muriendo en Arica unas 300 personas y en Arequipa otras 30. La altura máxima del tsunami fue de 21 m en Concepción (Chile). El tsunami afectó la zona costera desde Pisco (Perú) hasta Iquique (Chile). Este tsunami produjo inundaciones en California, Hawái, Yokohama, Filipinas, Sydney y días después, ocasionó gran destrucción en las costas de Nueva Zelanda, Australia, Hawái y Samoa. Horas después, en la oscuridad se indica que se percibieron tres oleajes adicionales, pero de menor intensidad. (Tavera, 2014).

Como ya se explicó los tsunamis son extremadamente peligrosos, no solo por su poder destructivo sino por ser tan imprevistos como el mismo sismo. Y ya que estos no se pueden eliminar o disipar antes de su inicio, lo que se proyecta es una estructura tsunami resistente capaz de disminuir el impacto hacia las estructuras ya debilitadas por el sismo que lo precede, con esto no solo se busca menores daños materiales sino también poder salvar más vidas en caso de un siniestro.

En el área de estudio de estructuras para poder mitigar daños causados por los tsunamis tienen mayor enfoque de estudio en Japón, Chile, Colombia entre otros en Perú no existe mucha investigación dirigida a estructuras para poder mitigar los daños causados por tsunami por tal motivo se decidió como zona de estudio en la urbanización la encantada en el distrito de Chorrillos donde no se han centrado investigaciones para poder mitigar los daños causados por el tsunami al encontrarse a orillas del mar colocando a la urbanización la encantada como zona vulnerable.

#### 1.1.1. Problema general

¿Cuál es la óptima propuesta estructural que mitigue los daños causados por un tsunami en la localidad de Chorrillos?

#### 1.1.2. Problemas específicos

a) ¿Cuáles son las características batimétricas y meteorológicas de la zona?

- b) ¿Cuáles son los límites de inundación provocados por un tsunami en chorrillos?
- c) ¿Cuál es la estructura más adecuada para mitigar los daños causados por tsunami en chorrillos?

1.2 Objetivo general y específico

1.2.1. Objetivo general

Realizar una propuesta estructural que mitigue los daños causados por un tsunami en la localidad de chorrillos.

1.2.2. Objetivo específico

- a) Caracterizar el área de estudio en función de la batimetría y meteorología.
- b) Modelar el oleaje del mar ante condiciones de tsunami con el software IRIC.
- c) Proponer la estructura que mitigue un tsunami en la localidad de chorrillos.

1.3 Delimitación de la investigación temporal, espacial y temática

1.3.1. Delimitación espacial

La recolección de información será en la zona costera del distrito de chorrillos, delimitado entre el centro deportivo de lima y el club las garzas, a la cual denominaremos zona de influencia, ubicada en la Provincia y Departamento de Lima. En la figura 1. Se delimita la zona de estudio.

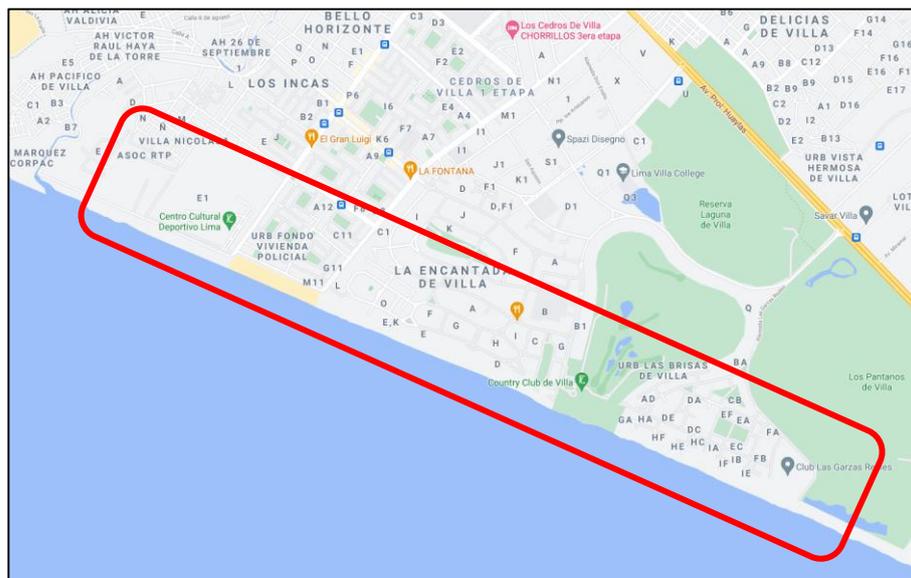


Figura N° 1: Delimitación del área de trabajo

Fuente: Extraído de Google Maps

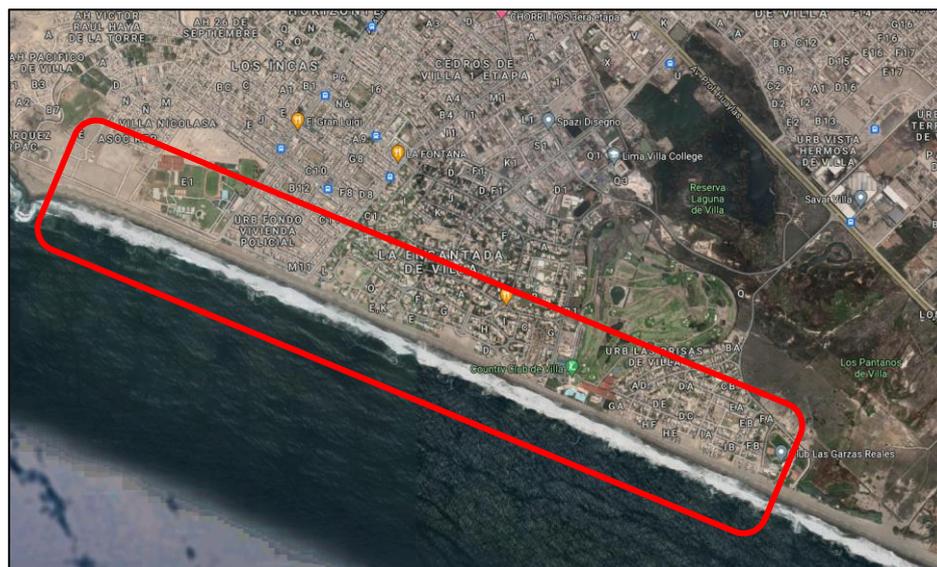


Figura N° 2: Delimitación del área de trabajo

Fuente: Extraído de Google Maps

### 1.3.2. Delimitación temporal

El periodo que comprendió nuestra investigación, fue el periodo de Junio – diciembre 2021, por lo que las técnicas de recolección de datos e información fueron realizadas desde gabinete, mediante sitios web confiables y oficiales, artículos de divulgación científica, documentos oficiales de expedientes técnicos. En el anexo 1 se encuentra el cronograma.

### 1.3.3. Delimitación temática

Esta investigación se centró en diseñar una estructura en forma de defensa contra el fenómeno natural del tsunami, lo que se busca con el diseño de esta estructura es mitigar el impacto del fenómeno en mención en la zona de influencia que se encuentra ubicado a 51 metros aproximadamente de las orillas del mar de la playa el faro en el distrito de chorrillos.

Para la simulación del tsunami se utilizará el programa IRIC, lo que nos permitirá obtener las fuerzas de empuje y velocidad del mar.

Con la información obtenida de los programas en mención y la información proporcionada por SENAMHI (velocidad del viento, direcciones, humedad, etc.), se recopilará la información necesaria para la modelación del contrafuerte en el programa de SAP 2000 donde se podrá divisar el comportamiento de la estructura con la aplicación de las fuerzas y así poder

diseñar un contrafuerte resistente a un tsunami lo que nos permitirá mitigar los efectos destructivos del fenómeno en la urbanización en mención .

#### 1.4 Justificación e importancia

##### 1.4.1. Justificación

Justificación Práctica:

La investigación se enfoca en evaluar la implementación de una estructura que mitigue los daños causados por el tsunami, esto permite tomar mejores medidas preventivas ante estos sucesos.

La presente investigación busca encontrar y diseñar una estructura de protección costera para poder mitigar los daños causados por el tsunami a través del diseño de un contrafuerte para poder prevenir el colapso de los edificios y/o viviendas aledañas lo que podría ser contraproducente para los habitantes de la zona de influencia causando pérdidas de vidas humanas y sus pertenencias al encontrarse a las orillas del mar permitiendo poder evacuar sus viviendas y dirigirse a una zona segura.

Además de producir el colapso de las estructuras también genera daños sobre la morfología costera, pérdida de servicios básicos, líneas de vida, falla en suelos entre otros.

Al término de la presente investigación se entregará un informe detallando el diseño de una estructura de protección costera para mitigar los daños causados por un tsunami a la municipalidad de chorrillos.

Justificación Social:

La realización de este estudio se justifica en salvaguardar la vida de 2500 familias aproximadamente y/o habitantes en la zona de influencia , encontradas a las orillas del mar ya que al vivir en las orillas de la playa y no contar con algún elemento de defensa o alerta de este fenómeno lo convierte en un lugar vulnerable ante el fenómeno del tsunami debido a que puede causar grandes daños en las viviendas produciendo así el colapso de ellas causando la muerte de los habitantes al no poder evacuar a tiempo.

El diseño de una estructura de protección costera busca mejorar, proteger la zona de estudio frente a este fenómeno a la vez mejorar la parte ambiental

de la zona al no permitir que las olas del mar lleven los desperdicios a la zona de las viviendas.

Las playas de chorrillos son muy conocidas por estar en condiciones deplorables debido a la poca seguridad que tienen.

Las estructuras de protección costera cumplen diferentes funciones aparte de la de resguardar zonas frente a estos fenómenos o amenazas de grandes olas, también se puede utilizar como estructura divisoria o para aislar la zona de estudio lo que nos permitiría restringir el acceso a la playa ubicada en la zona de estudio permitiendo evitar la contaminación del mar y de la playa.

#### 1.4.2. Importancia

El propósito de este estudio es mitigar los daños en casas y/o edificios en la zona de influencia, causado por la fuerza de empuje del agua por el fenómeno del tsunami que provoca no solo la destrucción de edificios y/o casas sino también pérdida de vidas humanas debido al colapso de viviendas.

Lo que se busca con este diseño es proteger la zona de influencia de la fuerza de empuje del tsunami para así poder resguardar las viviendas y familias que habitan en el lugar en mención ubicadas a las orillas del mar.

Se busca contribuir a la investigación sobre la mitigación de daños causados por tsunami mediante el diseño de una estructura de protección costera ya que en el Perú es un tema poco estudiado debido a la complejidad del fenómeno.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1. Antecedentes del estudio de investigación

#### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

Ishiwatari y Sagara (2012) en su artículo *Structural Measures against Tsunamis* publicado en la revista online *The World Bank*, explica como las estructuras como los diques juegan un papel crucial en la prevención de desastres para el control de tsunamis, inundaciones, corrientes de escombros, deslizamientos de tierra y otros fenómenos naturales. Sin embargo, las medidas estructurales por sí solas no pueden prevenir todos los desastres porque no pueden mitigar los daños cuando el peligro excede el nivel que las estructuras están diseñadas para soportar. Este artículo brinda hallazgos; lecciones; y recomendaciones para países en desarrollo en como los daños se pueden reducir al mínimo mediante enfoques de múltiples niveles para la mitigación de desastres que incluyen medidas estructurales y no estructurales y que garantizan la evacuación segura de los residentes.

Park (2015) en su tesis para optar como Doctor en Filosofía en la Universidad Estatal de Colorado "*Understanding and mitigating tsunami risk for coastal structures and communities*" tiene objeto proporcionar información clave para comprender y mitigar mejor el riesgo causado por los terremotos y tsunamis, por lo que es posible mitigar el peligro para una comunidad con solo varios refugios de evacuación verticales. Es capaz de proporcionar un marco para una evacuación vertical. Plan y para la mitigación del riesgo de colapso y fatalidades de estructuras y una comunidad basada en una cantidad limitada de información, todo estos mediante el uso de métodos numéricos.

Sáenz (2017) Es una tesis para optar el grado de ingeniero en gestión de riesgos y emergencias titulado "Propuestas de acciones de reducción de riesgos frente a un tsunami en el malecón de Atacames a partir de un análisis de riesgo integral" en la Universidad internacional de ecuador, ecuador. El objetivo principal es desarrollar una propuesta que contenga lineamientos estratégicos de reducción de riesgos frente a un potencial tsunami para el malecón de Atacames a partir de un análisis de riesgo integral aplicado en

el malecón de Atacames .Los principales resultados fueron investigar la vulnerabilidades del malecón de Atacames donde se buscó medidas correctivas estructurales y no estructurales ,lineamientos estratégicos de tipo estructural y no estructural para la reducción de riesgos , que disminuyan las vulnerabilidades existentes en el malecón de Atacames frente a sismos y tsunamis. Concluye que Atacames no cuenta con un parámetro de seguridad como lo dictamina la ley, además los Moradores carecen de capacitaciones sobre cómo reaccionar y actuar ante cualquier evento natural o antrópico.

#### 2.1.2. Antecedentes Nacionales

Herrera (2014) Es su tesis para optar el grado de ingeniero mecánico de fluidos “Dinámica y modelado numérico de un tsunami en el terminal portuario del callao y zonas adyacentes “en la universidad nacional mayor de san marcos, Perú. El objetivo principal es Obtener el mapa de inundación horizontal para el Terminal Portuario del Callao, ante un eventual tsunami producido por un sismo de magnitud 8.5 Mw, empleando el modelo numérico TUNAMI-N2, utilizado y validado mundialmente. Los resultados principales obtenidos del mapa de inundaciones elaborado con el software TUNAMI-N2 y a través de la imagen satelital del distrito del Callao y la línea de inundación máxima para un tsunami generado por un sismo de magnitud 8.5 Mw. Observándose que en el Terminal Portuario del Callao la inundación horizontal llegará a 1.4 km y en el cauce del rio Rímac se observa la presencia de un menisco el cual alcanza una longitud de inundación de 2.1 km, desde la línea de costa, esta longitud máxima de inundación en el cauce del rio Rímac nos indica un probable punto de embalse producido por materiales arrastrados por el tren de olas del tsunami. Concluye De acuerdo a los resultados obtenidos en el modelado numérico para un posible tsunami generado por un sismo de magnitud 8,5 Mw, el Terminal Portuario del Callao seria gravemente afectado por olas de hasta 8 metros de altura, que arribarían a la zona costera en un tiempo de 18 minutos aproximadamente, logrando una inundación longitudinal de 1,5 km con una velocidad de desplazamiento de 36 km/hora, en la Tabla 8.2 se aprecia una comparación de los resultados obtenidos para el Terminal Portuario, el río Rímac y la Base Naval.

Castillejo y Espinoza (2015) en su tesis para optar el grado de ingeniero Civil “Simulación de Tsunami para la generación de inundación y daño en el distrito de Ancón” en la universidad Ricardo Palma, Perú, tiene como objeto la generación de mapas de inundación y daño, con el fin de evaluar la vulnerabilidad y el riesgo en el distrito de Ancon, modelando dos magnitudes, de 8.2 Mw y 8.5 Mw, de esto se concluye que la ola del primer escenario llegara en 16 minutos y del segundo escenario llegara en 18 minutos, y que la altura de la ola será de 7 metros para el primer caso y 11.30 metros para el segundo caso.

Jimenez (2015) en sus tesis para optar por el grado académico de magister en Física con mención en geofísica “El maremoto notable de 1746” en la universidad Nacional Mayor de San Marcos, tiene como objetivo principal obtener un modelo que explique los efectos reportados sobre el sismo del 28 de octubre de 1746 y elaborar mapas de inundación a base de dicho modelo, de esto se concluye las zonas de mayor inundación e impacto por maremoto son: Ventanilla (14 m de altura de ola, 3 km de máxima inundación horizontal), Callao Puerto (10m de altura de ola, 1.5 km de inundación), Villa – Chorrillos (14 m de altura de ola, 2.6 km de inundación) y Lurín (15 m de altura de ola, 3.3 km de inundación). La zona de menor inundación está comprendida entre Punta Hermosa y Pucusana

## 2.2. Bases Teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

### 2.2.1. Tectónica de Placas

En 1885 y basándose en la distribución de floras fósiles y de sedimentos de origen glacial, el geólogo suizo Suess propuso la existencia de un supercontinente que incluía India, África y Madagascar, posteriormente añadiendo a Australia y a Sudamérica. A este supercontinente le denominó Gondwana.

Según Brendan; Damián; Gutiérrez y Fernández (2008), la Tierra consta de una capa externa rígida, la litosfera, de entre 100 y 150 kilómetros de espesor; debajo hallamos la astenosfera, una capa más caliente, plástica (deformable), que forma parte del manto. A la manera de una cáscara de huevo resquebrajada, la litosfera se halla dividida en unos 20 fragmentos, o

placas, que se desplazan alrededor del globo a velocidades inferiores a 10 centímetros al año.

Según el Servicio Geológico Mexicano (2017) la corteza terrestre está fragmentada en Placas Tectónicas, las cuales se desplazan pasivamente gracias a las corrientes de convección. Existen zonas donde las corrientes ascienden y otras en donde las corrientes descienden, siendo el propio peso de la masa hundida el que arrastra tras de sí al resto de la placa

Las principales Placas Tectónicas son: africana, Antártica, Arábica, Caribe, Cocos, Euroasiática, filipina, Indo australiana, norteamericana, Sudamericana y del Pacífico; otras menos grandes serian Nazca, Juan de Fuca y la escocesa; existen, además, placas muy pequeñas llamadas microplacas como la Rivera, entre muchas otras y pueden estar situadas dentro de las principales o éstas pueden a su vez subdividirse, pero no todas están aún identificadas.

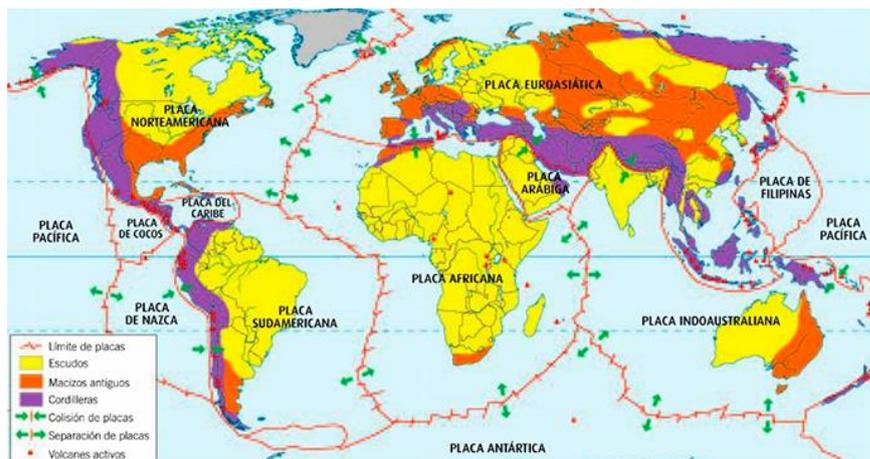


Figura N° 3: Las principales placas tectónicas

Fuente: Granados K. (2015)

Los temblores se originan por movimiento, fricción y deformación de las placas tectónicas. El primero provee energía, el último la almacena, y la fricción es un precursor importante en el proceso. Dado que un sismo es el efecto de una perturbación que ocurre ya sea en la superficie o en el interior de la Tierra, al lugar donde se origina la perturbación se le conoce como fuente sísmica, foco o hipocentro (Espindola y Pérez, 2018)

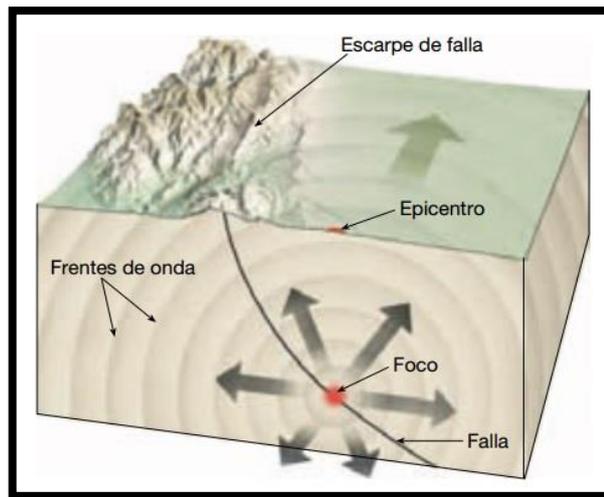


Figura N° 4: Características de un temblor

Fuente: Tarbuck y Lutgens (2001)

### 2.2.2. Clasificación de Sismos.

Según Moreno (1998) en general es posible clasificar los sismos en tres clases: Tectónicos, Volcánicos y Plutónicos.

- Tectónicos: Cuando los sismos implican una deformación de la corteza terrestre en forma de pliegues o fracturas se llaman tectónicos o de carácter estructural (del griego Tekto= Construir) son éstos los de mayor interés por cuanto la energía liberada es extraordinariamente mayor que la de los otros dos tipos y en general poseen características de terremoto, su origen está asociado a la constante deformación de la corteza terrestre, estudio que puede complementarse con el análisis de las teorías "tectónica de placas" y de "rebote elástico".
- Volcánicos Son aquellos que tienen como causa inmediata el volcanismo, siendo producidos por fuerzas provenientes de fracturas, explosiones o fallas dentro del cono del volcán que son resultado de la presión o la contracción de la lava a grandes profundidades, en general están circunscritos a la falda del volcán o regiones circunvecinas, conservan en general características de temblor, su energía total es pequeña ocasionando daños apreciables solo en las inmediaciones del volcán.
- Plutónicos Son aquellos que tienen origen a profundidades muy grandes, se caracterizan por la gran cantidad de energía que liberan y porque se

sienten en una gran extensión sin causar mayores daños en la superficie, debido a que las ondas llegan ya muy amortiguadas.

- Según Máxima (2020). Los sismos se miden en base a una escala doble, que registra por un lado intensidad y por otra magnitud. Dichas escalas son:

De intensidad. Miden la fuerza del temblor en base a los estragos causados. Existen la escala Mercalli (de 12 puntos), la Medvédev-Sponheuer-Kárnik (de 12 puntos) y la escala Shindo (de 7 puntos).

De magnitud. Miden la cantidad de energía del temblor en base a sus reverberaciones. Existen la escala de Richter (de 7 puntos) y la escala sismológica de magnitud de momento.

### 2.2.3. Histórico de Sismos en el Perú

Según Alayo L. (2007) “Cronología Histórica de los terremotos más destructivos en el Perú “menciona los sismos más destructivos que ha sufrido el Perú a lo largo de su historia, y principalmente a partir de los años 1900.

- Lima, 9-III-1904: con derrumbes en las viviendas, siendo sus efectos sentidos en Casma, Trujillo, Huánuco, Pisco, Ica y Ayacucho.
- Caravelí, 6-VIII-1913: con averías en edificios públicos y viviendas.
- Apurímac, 4-XI-1913; provoca la destrucción de varios caseríos de la provincia de Aymaraes.
- Lima, 11-II-1926: con efectos en Chosica, Cañete, Chiclayo e Ica;
- Carabaya, 9-IV-1928: ocasionando el desprendimiento de enormes masas de hielo y aluviones.
- Chachapoyas, 14-V-1928: destrucción de la ciudad de Chachapoyas y en varias ciudades interandinas del norte del Perú.
- Lima, 24-V-1940: con una intensidad aproximada de 8 grados en escala de Mercalli. Dejo un saldo de 179 muertos y 3,500 heridos.
- El 38% de las viviendas resultaron afectadas y los daños se prolongaron al Callao, Chancay, Huacho y Lurín. También fue percibido en Trujillo, Piura, el Callejón de Huaylas, Cajamarca, Chota, Hualgayoc, Huancavelica, Oxapampa, Cuzco y Puno

- Cuzco, 18-IX-1941: con daños en iglesias, capillas, edificios públicos y viviendas.
- Ica y Arequipa, 24-VIII-1942: fallecen 30 personas y se desploman las viviendas. Su intensidad fue de 4 grados en la escala de Mercalli.
- Pisco, 29-IX-1942: destruyó la ciudad y el puerto.
- Pallasca y Pomabamba, en Ancash, 20-XI-1946; provocó la muerte de 1,936 personas con un área de percepción de 450,000Km<sup>2</sup>.
- Arequipa, Moquegua y Tacna, 11 -V-1948, y Cañete, 28-V-1948: hubo pérdidas materiales notables.
- Cuzco, 21-V-1950: destrucción de más de la mitad de las viviendas y una intensidad de 7 grados en la escala de Mercalli.
- Ica, 9-XII-1950: ocasiona averías de consideración con la muerte de cuatro personas.
- Tumbes y Piura, 12-XII-1953: derrumbe de viviendas por sismo de 8 grados de intensidad en la escala de Mercalli.
- Arequipa, 15-I-19587: desprendimiento de piedras y destrucción de viviendas humildes.
- Arequipa, 26-VII-1958: rompimiento de tuberías, con epicentro en la frontera Perú-Bolivia.
- Tumbes a Chiclayo, 7-II-1959: ligeros deterioros en algunas casas.
- Ayacucho, 24-XII-1959: destrucción de 250 viviendas con inhabilitación de vías terrestres.
- Arequipa, 13-I-1960: destrucción de algunas construcciones de sillar con inhabilitación de carreteras a causa de un sismo de 9 grados en la escala de Mercalli.
- Lima y provincias sureñas de Lima, 15-I-1960: derrumbe de casas de construcción precaria.
- Cordillera Negra, 24-IX-1963: daños en las construcciones rurales, con deslizamientos y averías en los canales de irrigación.
- Lima; 17-X-1966: sismo con intensidad de 8 grados de la escala de Mercalli, sus efectos se sintieron entre Lima y Supe, dejando un saldo de 100 muertos.

- San Martín, 19-VI-1968: deslizamientos con daños en las viviendas de adobe.
- Ancash, 31-V-1970: muerte de 50,000 personas, 20,000 desaparecidos y 150,000 heridos a causa de la avalancha que siguió al terremoto y sepultó al pueblo de Yungay. De acuerdo con una evaluación de los daños 60,000 viviendas necesitaban reconstruirse quedó inhabilitado el alcantarillado de 18 ciudades; hubo destrucción de 6,730 aulas; reducción de capacidad de energía eléctrica de Ancash y la Libertad a un 10% por los daños causados en la Central Hidroeléctrica de Huallanca; daño de capacidad de irrigación de 110 mil ha. interrupción del 77% de los caminos entre la Libertad y Ancash y del 40% de los existentes entre Chancay y Cajatambo.
- Lima, 3-X-1974: muerte de 78 personas y un alto costo material.
- Arequipa, 16-II-1979: alcanza una intensidad de 6,2 grados de la escala de Richter.
- Lima, 18-IV-1993: movimiento sísmico de 5,8 grados en la escala de Richter sacude la capital.
- Nazca, 12-XI-1996: terremoto de 7,7 grados en la escala de Richter provoca la muerte de 17 personas; 1,500 heridos y 100,000 damnificados. La ciudad quedó destruida.
- Región sur, 3-IV-1999: conocido como el “terremoto de Arequipa”, llega a los 6 grados en la escala de Richter;
- Chuschi, Ayacucho, 31-X-1999: alcanza los 4 grados en la escala de
- Richter.
- Moquegua, 23-VI-2001: terremoto de 7 grados en la escala de Richter; afecta al 80% de la población, ocasionando el derrumbe de algunos poblados, del 90% de las viviendas. La ciudad quedó incomunicada y las líneas telefónicas y viviendas fueron seriamente dañadas, en ciudades aledañas, como Arequipa y Tacna, murieron más de 70 personas. Además, un fuerte tsunami arrasó la localidad de Camaná. La onda sísmica fue sentida en Lima y también, con menor intensidad, en Tumbes, Talara Sullana y Piura.

- El terremoto del 15-VIII-2007 es obviamente calificable como desastroso porque trajo al piso elevados porcentajes de las edificaciones de las ciudades de Chincha, Pisco, Ica, Tambo de Mora, Leoncio Prado y otros centros poblados de Ica, Lima, Apurímac y Ayacucho, que afectaron rudamente a más de 35,000 familias “damnificadas” (que implica la destrucción de sus viviendas), según el Instituto Nacional.

#### 2.2.4. Tsunami

Tsunami es una palabra de origen japonés que proviene de dos vocablos: Tsu (puerto) y nami (ola) significa grandes olas en el puerto. No causa daños en alta mar, pero es destructivo en las costas.

La palabra Tsunami es conocida comúnmente entre la población con el nombre de Maremoto. Los Tsunamis son una serie de ondas marinas de gran tamaño generadas por una perturbación en el océano, al ocurrir principalmente un movimiento sísmico superficial (< 60 km de profundidad) bajo el fondo marino y de magnitud mayor a 6. 5° en la escala de Richter. (Marina de guerra del Perú, 2001).

#### 2.2.5. Origen de los tsunamis

Según Marina de guerra del Perú (2001) los tsunamis pueden ser originados por:

- Un terremoto submarino
- Una erupción volcánica submarina
- Desplazamientos de sedimentos submarinos.
- Desplazamientos de tierras costeras que se hundan con el agua.
- El impacto de meteoritos.
- Factores antropogénicos, cuando es causado por el hombre, por ejemplo. Explosiones de bombas atómicas, detonadas en los atolones del océano pacífico.

#### 2.2.6. Características

Marina de guerra del Perú (2001), en mar abierto lejos de la costa, es un tren de olas de pequeña altura (del orden de centímetros a metros), que viajan a gran velocidad (casi a 800 kilómetros por hora) sin embargo, al llegar a costa y al haber menor profundidad, éstas disminuyen su velocidad, pero aumentan en altura pudiendo causar gran destrucción y numerosas víctimas.

Por tratarse de trenes de ondas marinas, se pueden caracterizar por su período, altura de onda, longitud de onda y velocidad de propagación, que son atributos comunes a ellas.

#### 2.2.6.1. Periodo (T)

Marina de guerra del Perú (2001) define como el tiempo que transcurre entre el paso de dos ondas sucesivas por un mismo punto de observación. Para tsunamis de origen cercano, el período es de unos 7 a 30 minutos; y para los de origen lejano, entre 30 a 70 minutos.

#### 2.2.6.2. Altura de onda (H)

Marina de guerra del Perú (2001) define como la distancia vertical entre el seno o valle y la cresta, mientras el tsunami se dirige a tierra.

#### 2.2.6.3. Longitud de onda (L)

Centro nacional de alerta de tsunami (2001) es la distancia que separa a dos crestas sucesivas. Se estima que la longitud de onda inicial es aproximadamente igual a la dimensión mayor del área dislocada.

#### 2.2.6.4. Velocidad de propagación (v)

Centro nacional de alerta de tsunami (2001) La velocidad de propagación del tsunami es igual a:

$$V = \text{s.q.r.t.}(g \cdot h)$$

Donde:

v: velocidad en m/s

g: aceleración de la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ), constante

h: profundidad del océano en metros

Puede observarse que la velocidad de propagación del tsunami es función solamente de la profundidad del sector del océano por el cual viaja. Por ejemplo, un tsunami que atraviesa una parte del océano donde la profundidad es de 4,000 m., tendrá una velocidad de 200 m/seg. o 720 Km/H. Si asumimos como profundidad promedio del océano Pacífico la mitad de la profundidad máxima que es 11,022 m., es decir, 5,511 m., el tsunami viajaría a 837 Km/H; velocidad similar a la de un avión jet. Como la velocidad del tsunami es mayor en un mar profundo que en un mar superficial, cuando el tsunami viaja en un

mar de profundidad variable, la dirección de propagación gira gradualmente hacia la zona menos profundidad. Este fenómeno se denomina «Refracción de ondas», y en su tratamiento se aplica la Ley de Snell, de la Óptica.

#### 2.2.7. Impacto del tsunami

Marina de guerra del Perú (2001) El Centro de Alerta de Tsunamis en el Pacífico (PTWC) con sede en Hawái es el centro operativo del Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis. Su función principal consiste en difundir alertas oportunas sobre todos los sismos tsunami génicos que se produzcan en la cuenca del Pacífico. En el Perú el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, está a cargo de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) cuya sede se encuentra en el Callao. Al generarse un Tsunami se produce una disminución o aumento súbito del nivel mar, (antes de la llegada de la primera ola ó entre dos crestas), por lo que la línea de costa retrocede a veces en más de un kilómetro. En tal sentido, la DHN administra una red de 10 estaciones mareográficas que envían datos en tiempo real, asimismo adquirió el Sistema TREMORS (*Tsunami Risk Evaluation Through Seismic Moment from a Real-time System*) de captación de sismos de origen lejano, a fin de reforzar su capacidad de alerta. Al recibir un mensaje de alerta, la DHN lo retransmite al Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Instituto Geofísico del Perú (IGP), Empresa Nacional de Puertos (ENAPU) y la Dirección de Telemática (DIRTEL) siendo este último el encargado de comunicar a todas las Capitanías de Puerto, Dependencias y Unidades Navales asentadas en el litoral.

#### 2.2.8. Generación de un tsunami

Según Sánchez Francesc (2004) El termino tsunami es de origen japonés, y se refiere a las olas gigantes generadas en el mar por la interacción de un tercer el elemento aparte de las corrientes marinas y la fuerza del viento. Por otro lado, entendemos el termino de maremoto, tanto por el terremoto o movimiento sísmico en el fondo del mar, como sobre todo por las olas generadas como consecuencia del movimiento sísmico.

Principalmente los tsunamis son provocados por terremotos que tienen su epicentro en las profundidades del mar. Sin embargo, no sólo los

movimientos sísmicos pueden provocar un tsunami, los volcanes, el impacto de grandes meteoritos o incluso “las armas nucleares”, pueden ser también el antecedente.

Cómo exponemos esta pequeña aproximación para dar algunas respuestas a la reciente catástrofe en el Sudeste Asiático, vamos a ceñirnos a la modalidad que –según los hechos- parece ser la causante de la tragedia, es decir, la del tsunami provocado por un gran temblor de tierra.

En el momento en que se produce un movimiento sísmico, se produce un impacto o rotura en el lecho marino, resquebrajando así el lecho en al menos dos grandes planchas de rocas sedimentarias. Estas roturas para que se produzca el tsunami deben de superponer verticalmente una plancha de rocas sedimentarias encima de otra. Es en ese momento en el que el agua ocupa el nuevo espacio dejado libre por la cordillera marina fracturada. El desplazamiento a la posición inicial de ésta verdadera montaña en las profundidades del mar, empuja el agua hacia la superficie.

El agua desplazada hacia la superficie puede alcanzar unas velocidades de 500 – 800 km/h. Es ésta misma agua la que ya en la superficie provoca las olas gigantes conocidas como tsunamis. La velocidad de estas olas pese a que -cómo es lógico- desciende durante su recorrido, puede alcanzar fácilmente los centenares de km/h a su llegada a la costa. El frente de agua empujado hacia la costa puede penetrar sin problemas cientos de metros e incluso kilómetros hacia el interior.

Los movimientos sísmicos en el fondo del mar, como en tierra firme, suelen ser debidos a las colisiones y a las separaciones de las placas tectónicas. En el caso de los movimientos sísmicos y posteriores.

#### 2.2.9. Propagación y llegada del tsunami a la costa

Según Espinoza (2017) Los tsunamis son una serie de ondas de gran longitud generadas por un desplazamiento abrupto de una gran masa de agua. Debido a que poseen una gran longitud de onda, también poseen grandes períodos de 5 minutos o más. Es por las características antes mencionadas que los tsunamis se comportan como ondas en aguas someras y por lo tanto se ven afectados por el fondo marino y la geomorfología costera en general sufriendo cambios en términos de altura, velocidad,

cambios de dirección. Dado que los tsunamis se comportan como ondas en aguas someras, la celeridad del mismo puede ser aproximada mediante la expresión: (Espinoza ,2017, pp28)

$$c = \sqrt{g \cdot h}$$

Donde  $g$  corresponde a la aceleración de gravedad y  $h$  es la profundidad a la cual se está estimando la celeridad de la onda. Si se considera que la profundidad promedio del fondo marino en el océano pacífico es aproximadamente 4 km y la aceleración de gravedad en la tierra es de 9.81 m/s<sup>2</sup>, la celeridad del tsunami en el océano pacífico sería del orden de 713 km/h; para tener una idea un avión comercial viaja aproximadamente a 700 km/h en velocidad crucero. (Espinoza ,2017, pp28)

Como se aprecia en la ecuación de celeridad de la onda, ésta es directamente proporcional a la profundidad, cuando la onda se acerca hacia aguas someras (menor profundidad) pierde velocidad lo cual implica una disminución de la energía cinética, para compensar dicha disminución el tsunami crece en altura y por consiguiente aumenta la energía potencial del mismo. A si mismo los conceptos de refracción, difracción, asomeramiento y reflexión comienzan a tener sentido puesto que la onda va “sintiendo” el fondo marino. A continuación, se definen cada uno de los conceptos recién nombrados. (Espinoza ,2017, pp28)

Reflexión: Este fenómeno ocurre cuando la onda choca contra un obstáculo y se refleja con el mismo ángulo de incidencia. Refracción: Cambio de dirección de la onda debido a la batimetría.

Difracción: Dispersión de energía debido a obstáculos, apareciendo pequeños sistemas de ondas. (Espinoza ,2017, pp28)

Asomeramiento: También conocido como *Shoaling*, corresponde al aumento de altura de la onda a medida que se acerca a la costa. (Espinoza ,2017, pp28)

Los conceptos antes definidos son importantes puesto que de ellos dependerá en gran medida como el tsunami llegará a la costa, en términos de velocidad, altura de inundación, tiempo de arribo, etc. (Espinoza ,2017, pp28)

#### 2.2.10. Parámetros hidrodinámicos del Tsunami

Una vez que la onda llega a aguas someras y pasa por todos o algunos de los procesos físicos mencionados en el párrafo anterior, comienza la inundación de la zona costera. Es por esto que se deben tener en consideración ciertos conceptos claves para entender el proceso de inundación de la costa, la Figura muestra algunas variables hidrodinámicas relevantes en la inundación y luego se definen ciertos conceptos de interés para esta investigación.

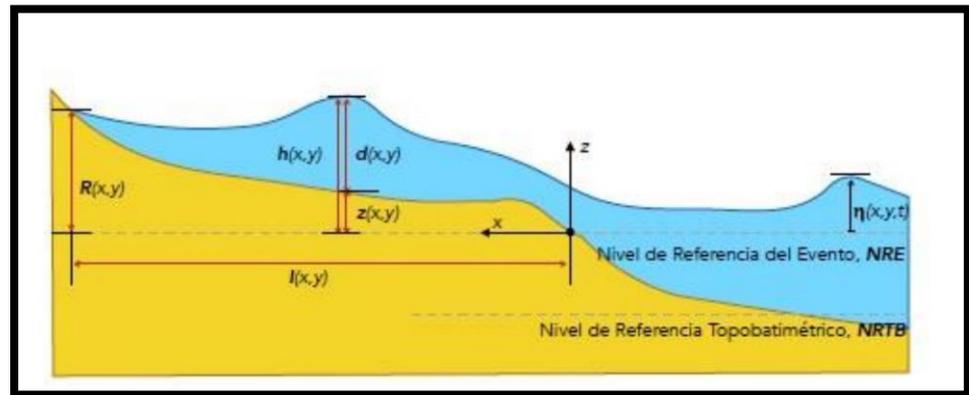


Figura N° 5: Variables hidrodinámicas relevantes en la inundación

Fuente: Satures, 2015

Altura de Inundación,  $h(x,y)$ : Espinoza (2017) Elevación alcanzada por el agua del mar en el lado tierra medida respecto a un Datum dado por el nivel de referencia del evento (NRE) en una distancia de inundación específica. La altura de inundación es la suma de la profundidad de inundación y la cota de elevación del terreno local.

Profundidad de Inundación,  $d(x,y)$ : También llamada profundidad de flujo, es la profundidad del agua del tsunami sobre la cota del terreno medido en un sitio específico.

Run-up,  $R(x,y)$ : Diferencia entre la cota de terreno en el punto de máxima inundación horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia del tsunami NRE.

Tiempo de arribo del tsunami: Tiempo de llegada del primer tren de ondas a un determinado sitio. Corresponde al tiempo transcurrido entre el inicio del sismo y el comienzo de la desnivelación  $\eta(x,y,t)$  descontando la marea.

#### 2.2.11. Tipos de tsunamis

Los tsunamis se clasifican en:

De origen cercano:

- Se generan cerca a las costas.
- Existe la probabilidad de ocasionar destrucción al llegar a la costa.
- La primera ola llega en 60 minutos o en menos de eso.

De origen lejano o transoceánico:

- Se generan a más de 1000km.
- La primera ola llega entre las 5 a 24 horas de producirse el sismo.

Según Ortega y Tacilla (2005), los tsunamis de origen local son los más peligrosos, según los estudios de nuestras costas, la primera ola puede llegar entre 10 a 60 minutos de producido el sismo, dependiendo de la ubicación del epicentro. Estos datos son muy importantes para planificar la evacuación, porque es el tiempo que se tiene para evacuar a la población de la zona inundable.

#### 2.2.12. Fases de un tsunami

La evolución de las ondas del tsunami generadas por un terremoto se desarrollan en tres etapas: Generación, propagación e inundación como se desarrolla a continuación: (Castillejo y Espinoza ,2015).

##### 2.2.12.1. 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 al terremoto, generalmente están asociados a ondas de longitud mayor que la profundidad (Castillejo y Espinoza ,2015).

##### 2.2.12.2. Propagación

Un tsunami puede propagarse a través de grandes distancias antes de embestir la costa a cientos o miles de kilómetros del punto de origen del terremoto. El disturbio inicial en la superficie del agua engendra una onda de gravedad de gran amplitud que se propaga hacia las costas. (Castillejo y Espinoza ,2015).

##### 2.2.12.3. 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, atrapamiento de las ondas en las distintas formaciones costeras, entre otros. (Castillejo y Espinoza ,2015).

### 2.2.13. Teoría de olas lineal

#### 2.2.13.1. Olas cortas

Son aquellas en las que la velocidad  $\bar{c}$  es independiente de la profundidad del mar  $h$ , pero dependiente de la propia longitud de onda  $\lambda$ . Ondas de este estilo son las olas de viento, es decir, las olas corrientes que estamos acostumbrados a observar sobre la superficie marina. En el estudio de la teoría de ondas lineal haremos consideraciones sobre su desplazamiento vertical, período, longitud, velocidad de traslación, rotura, energía de las olas, etc.

#### 2.2.13.2. Desplazamiento vertical de la ola

La oscilación de la superficie libre, o desplazamiento vertical de la ola, en un sistema de coordenadas  $(x, y)$ , obedece a la ecuación:

$$y = \frac{H}{2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi t}{T} \right)$$

Cuyo esquema y parámetros que intervienen, se representan en la siguiente figura.

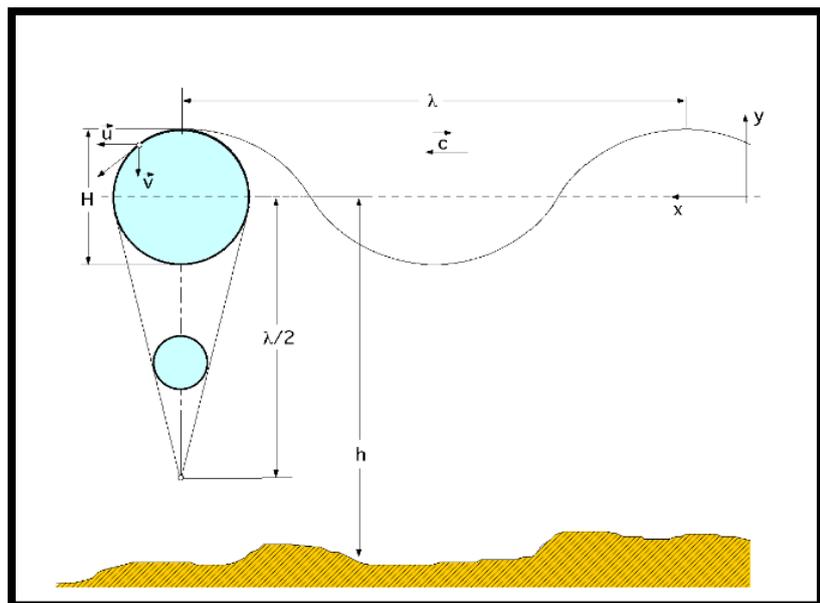


Figura N°6: Ola Lineal

Fuente: Fernandez diez P. (2014)

### 2.2.13.3.Periodo

El periodo T de las olas es el tiempo transcurrido para que por un punto pasen dos crestas o dos valles de un mismo tren de olas.

El periodo de la ola sinusoidal es:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda} T \cdot h \left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Si el agua tiene suficiente profundidad  $h > \frac{\lambda}{2}$  el periodo es  $T = \frac{\lambda}{c}$ ; en las olas cortas se determina inmediatamente una vez conocidos  $\lambda$  y  $\bar{c}$ , en la forma:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}; T = \frac{2\pi c}{g}$$

A título indicativo, dadas las longitudes de ola más comunes, se puede decir que el periodo de las olas cortas superficiales varía desde un segundo a una decena de segundos.

En las olas largas, el periodo T no se da explícitamente, porque  $\lambda$  no se conoce a priori.

### 2.2.13.4.Longitud de onda

La longitud de onda de las olas viene dada por la expresión

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Para las olas superficiales de viento, olas  $h > \frac{\lambda}{2}$ , se cumple:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

### 2.2.13.5.Velocidad de traslación

La velocidad de traslación  $\bar{c}$  de la onda, (celeridad), permite diferenciar las ondas de las largas y obedece a la ecuación:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

En aguas profundas  $h > \frac{\lambda}{2}$ , por lo que esta ecuación se transforma en:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = f(\lambda); \lambda = \frac{gT^2}{2\pi}; C = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}; T = \frac{2\pi C}{G} = \frac{\lambda}{C}$$

#### 2.2.13.6. Rotura de ola

Los componentes de la velocidad (u, v) del movimiento circular (tangencial) de las partículas de agua en la ola son de la forma:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y+h)\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y+h)\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

Siendo x la coordenada horizontal en la dirección de propagación de la ola, y la coordenada vertical.

Las ecuaciones anteriores se transforman en:

En aguas profundas:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

En aguas poco profundas:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{2} \frac{y+H}{h} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

La ola rompe cuando la componente horizontal de la velocidad de las partículas de agua se iguala a la celeridad (u=c) proceso que va acompañado de una importante pérdida de energía, la condición de rotura implica, para H la altura de la ola al romper, que:

$$\begin{aligned} \sqrt{g \cdot h} &= \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right) = [x = 0; t = 0; H = HT] \\ &= \frac{HT}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \end{aligned}$$

#### 2.2.13.7. Energía de ola

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial; en las olas regulares, los valores de la longitud de onda  $\lambda$  y período T, permanecen constantes. La energía de una onda regular es suma de la energía potencial  $E_p$  y la cinética  $E_c$ .

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho \cdot g \cdot \lambda \cdot b \cdot H^2}{8}$$

En la que:  $\rho$  es la densidad del agua en  $\text{kg/m}^3$  H es la altura de la ola, distancia entre la cresta y el valle b es la ancho de la cresta o longitud del frente de ondas.

En aguas profundas:

$$\begin{aligned} E = E_p = E_c &= \frac{\rho \cdot g \cdot \lambda \cdot b \cdot H^2}{16} = \left[ \lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} T h \frac{2\pi h}{\lambda} \right] \\ &= \frac{\rho \cdot g^2 \cdot T^2 \cdot b \cdot H^2}{32\pi} T \cdot h \frac{2\pi h}{\lambda} = \left[ T \cdot h \frac{2\pi h}{\lambda} \cong 1 \right] \\ &= 9797.2b \cdot T^2 \cdot H^2 \text{ w/seg} \end{aligned}$$

Puesto que la energía de las olas depende del cuadrado de su altura H es evidente que la disminución de esta altura con la profundidad importante en el estudio de la distribución de la energía de las olas en profundidad. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debida a la transferencia de su energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el aprovechamiento de la energía de las olas. Se pueden medir presiones del orden de la tonelada por metro cuadrado, e incluso de decenas de toneladas por metro cuadrado durante las tempestades más fuertes, por lo que fácilmente se deduce la importancia que tienen estos valores en la construcción de obras portuarias o en mar abierto o en la misma navegación. La presión de las olas varía, al igual que la energía, con el cuadrado de la amplitud y se atenúa con la profundidad en forma exponencial.

#### 2.2.13.8. Potencia de ola

La potencia NL del frente de onda por unidad de longitud  $b=1$ , es:

$$NL = \frac{1}{2} \rho \cdot g \frac{H^2}{2} \cdot C \cdot \text{sen}^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} \cdot t \right) \left( 1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\text{sh} \left( \frac{4\pi h}{\lambda} \right)} \right)$$

$$= \rho \cdot g \cdot \left( \frac{H}{2} \right)^2 \cdot c g \cdot \text{sen}^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

siendo la velocidad del grupo de olas, (asociada al avance de la energía)  $\bar{c}g$  diferente de la velocidad  $\bar{c}$  de la ola, de la forma:

$$c g = \frac{c}{2} \left( 1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\text{sh} \left( \frac{4\pi h}{\lambda} \right)} \right)$$

La potencia media del frente de onda por unidad de longitud, es:

$$NL = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \text{Th} \left( \frac{2\pi}{\lambda} h \right) \left( 1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\text{sh} \left( \frac{4\pi h}{\lambda} \right)} \right)$$

En aguas profundas  $h > \frac{\lambda}{2}$ , se cumple que  $c g = \frac{c}{2}$  debido a que las olas que están en cabeza del grupo van perdiendo energía y acaban por desaparecer; mientras que en la cola del grupo aparecen nuevas olas; en esta situación, la potencia NL por unidad de longitud de frente de ola, en función del período es:

$$NL = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot c g}{8} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C}{16} = \left[ C = \frac{g \cdot T}{2\pi} ; T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \right]$$

$$= \frac{\rho \cdot H^2 \cdot g^2 \cdot T}{32\pi} = \frac{\rho \cdot H^2}{16} \sqrt{\frac{\lambda \cdot g^3}{2\pi}}$$

En aguas poco profundas  $h < \frac{\lambda}{2}$ , se cumple que  $c g = c$

Si H se mide en metros, T en segundos y  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , resulta  $NL = 0.955 H^2 T$  (Kw/m).

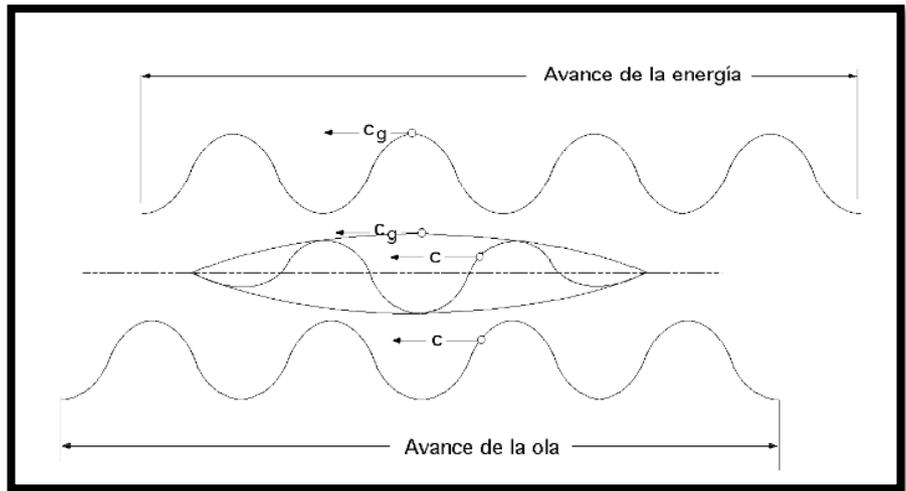


Figura N°7: avance de la ola y avance de la energía de la ola

Fuente: Fernandez diez P. (2014)

La energía de las olas varía con la latitud y los climas; en algunas zonas del Atlántico y en el norte del Japón, las olas pueden alcanzar una densidad de energía del orden de 10 MW por km de frente de onda.

#### 2.2.14. Ondas no lineales

El comportamiento de la ola no lineal se puede describir mediante la teoría de Stokes, o mediante la teoría de la onda solitaria.

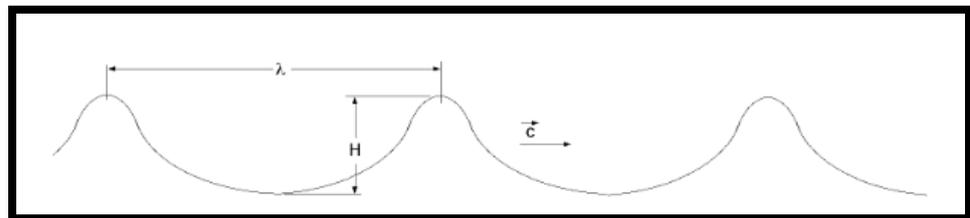


Figura N° 8: Ola no lineal ( Stokes)

Fuente: Fernandez diez P. (2014)

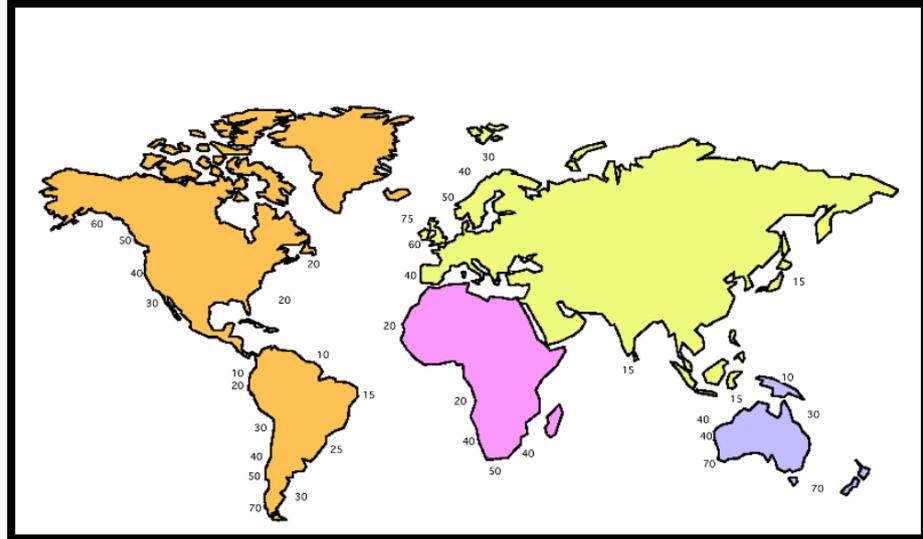


Figura N° 7: Energía de las olas en mar abierto en kW/m

Fuente: Fernandez diez P. (2014)

#### 2.2.14.1. Teoría de Stokes

Para describir la ola en aguas poco profundas, Stokes propone una ecuación cuyo desplazamiento vertical es de la forma:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^2 \cdot H^2}{\pi^2 \cdot h^3} \cdot \cos\left(2 \cdot \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)\right)$$

En la longitud  $\lambda$  de la ola y la celeridad son idénticas a las de la teoría lineal.

La componente  $\bar{u}$  de la velocidad es :

$$u = \frac{\lambda \cdot H}{2hT} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^3 H^2}{\pi^2 \cdot h^4 \cdot T} \cdot \cos\left(2 \cdot \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)\right)$$

La condición de rotura H de la ola , profundidad del agua para la cual

$$\text{rompe la ola es : } HT = \frac{16 \cdot \pi^2}{3g \cdot T^2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{3g \cdot T^2}{4\pi^2 \cdot h}}\right)$$

$$\text{La energía de la ola frente b es: } E = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b}{8} \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot h^6}\right)$$

La potencia de la ola frente a b es:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot c g^b}{8} \left(1 + \frac{9}{4} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot h^6}\right)$$

$$c g = c = \sqrt{g \cdot h}$$

#### 2.2.14.2. Teoría de la onda solitaria

La característica principal de la ola descrita con esta teoría es que su superficie está, en cada instante, por encima del nivel normal del mar en la zona considerada. El perfil de la ola viene dado por el desplazamiento vertical y para cada posición  $x$  y tiempo  $t$ , en la forma:

$$y = H \cdot \operatorname{sech}^2 \left( \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right), \text{ siendo el valor de la celeridad, } c = \sqrt{g \cdot H \left( 1 + \frac{H}{h} \right)}$$

La componente horizontal de la velocidad de las partículas del agua se define como:

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} y = \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot H \cdot \operatorname{sech}^2 \left( \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right)$$

y la condición de rotura de la ola  $HT = 0.714hT$ . La energía de mar de fondo cerca del litoral tiene dada por la expresión.

$$E = 1.54 \gamma \sqrt{(H \cdot h)^3} \cdot b$$

Observándose que la energía generada en estas circunstancias disminuye rápidamente con la altura  $h$ , por lo que esta zona no se considera adecuada para la conversión y aprovechamiento de la energía del oleaje.

#### 2.2.15. Clasificación de las olas

De la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar y, por lo tanto, supuesta una constante solar del orden de  $375 \text{ W/m}^2$ , aproximadamente  $1 \text{ W/m}^2$  se transmite al oleaje, que actúa como un acumulador de energía, por cuanto al tiempo que la recibe, la transporta de un lugar a otro, y la almacena; la intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola. El mecanismo

con que se generan las olas debidas al viento no está aun perfectamente esclarecido; se trata probablemente de la acción de oscilaciones de la presión atmosférica de período corto combinadas con la acción del viento. Por su turbulencia, una corriente de viento que fluye, incluso, paralela a la superficie del mar, se puede asimilar a una sucesión de oscilaciones de la presión atmosférica que actúan en un plano vertical, ortogonalmente a la dirección del viento. Tales oscilaciones, que incluso pueden superar la amplitud de un milibar, llegan a tener períodos del orden de uno a varios segundos, y se corresponden con auténticos golpes alternados con acciones de reflujos, que se desplazan con el avance del viento, por lo que la superficie aparece afectada por una agitación. En el mar existen dos tipos generales de ondas, estacionarias y progresivas o transitorias. (Fernandez ,2014. pp.71)

#### 2.2.15.1.Olas estacionarias

En una ola marina estacionaria, existen uno o varios puntos (o líneas), en los que el movimiento es nulo, (puntos nodales), y uno o más puntos en los que el desplazamiento es máximo, (puntos ventrales). La distancia entre los nodos y la frecuencia de la oscilación, dependen de las dimensiones geométricas de la cuenca en que se produzcan. Las secas son ondas estacionarias como las oscilaciones propias de las cuencas marinas y las oscilaciones de las mareas; para explicar su funcionamiento se recurre al siguiente ejemplo: Cuando se da una sacudida a un recipiente lleno de líquido se observa que toda la masa líquida oscila y, tras un número mayor o menor de oscilaciones, el nivel vuelve a las condiciones de equilibrio iniciales. En una cuenca marina, o en un lago, las secas se manifiestan cuando la masa de agua sufre sacudidas bruscas tanto por la acción del viento y variaciones de la presión atmosférica, como por sacudidas costeras submarinas.

Las oscilaciones de marea son una especie de secas originadas en un mar semicerrado por las mareas externas, que se desarrollan en amplitud oceánica abierta. Sólo en extensiones oceánicas grandes, la fuerza de la marea puede imponer directamente oscilaciones bastante amplias. (Fernandez ,2014. pp.71)

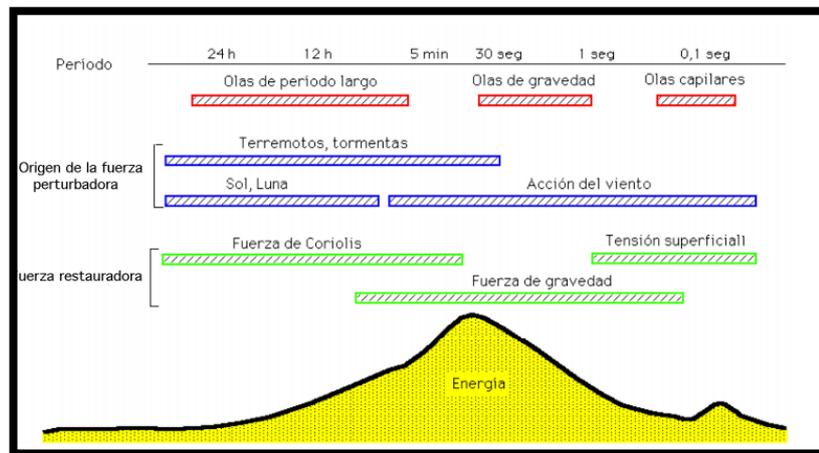


Figura N° 8: Representación esquemática de los tipos de olas

Fuente: Fernandez diez P. (2014)

#### 2.2.15.2. Olas transitorias o progresivas

Una ola marina progresiva es aquella que varía en el tiempo, y en el espacio; pueden formarse en la superficie (por ejemplo, ondas superficiales debidas al viento) o en el seno de la masa oceánica (ondas internas que se producen a lo largo de las discontinuidades de temperatura y salinidad entre las diversas masas de agua). Las ondas largas, típicamente progresivas, son las ondas solitarias y los tsunamis, frecuentes en el Pacífico, que se generan en relación con terremotos costeros y oceanográficos y se propagan de una costa a otra o desde el epicentro oceánico hasta las costas, provocando a menudo cuantiosos daños, mayores incluso que los de los mismos terremotos. Las olas se pueden clasificar atendiendo a la fuerza perturbadora, según la cual las olas pueden ser generadas por distintos fenómenos, como: Acción del viento, terremotos, tormentas, sol y luna.

Las olas debidas al viento son las que contienen más energía y son las que se aprovechan para obtener electricidad; su energía procede. en última instancia, de la energía solar

#### 2.2.15.3. Olas libres y olas forzadas.

Las olas libres son las generadas por una aplicación instantánea de la fuerza perturbadora que cesa al momento y, por lo tanto, la ola

evoluciona libremente. Las olas forzadas son aquellas en las que la perturbación se aplica de manera continua, por ejemplo, las olas de marea (Fernandez ,2014. pp.71)

#### 2.2.16. Obras Marítimas Principales

En función de sus respuestas ante las oscilaciones del cuerpo de agua, y por su forma o manera de resistir la acción del agente predominante, estas Obras Marítimas Principales se clasifican en Fijas o Flotantes. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

##### 2.2.16.1. Obras marítimas fijas

Son aquéllas que mantienen su posición fija con respecto al terreno; y, salvo avería o deformación, su forma no cambia con el tiempo. Se denominan de gravedad si la misma es el agente principal en su estabilidad. Si las acciones que la obra ha de soportar se transmiten al terreno por un número reducido de elementos reciben el nombre de estructurales. En algunas circunstancias es posible proyectar obras que comparten ambas tipologías, gravitatoria y estructural. En el ámbito de las Recomendaciones desde la presente Serie 1 del Programa ROM dichas obras marítimas se denominan fijas mixtas. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

##### 2.2.16.2. Obras marítimas fijas de gravedad

Son aquéllas cuyo agente predominante en su estabilidad es la gravedad. Pueden pertenecer a este tipo las siguientes obras:

Diques de abrigo, que incluyen entre otros:

- Diques rompeolas de escollera o piezas prefabricadas.
- Diques verticales mediante cajones flotantes, bloques y hormigón en masa.
- Diques mixtos de escollera y cajones flotantes.
- Diques mixtos especiales.

a) Obras de gestión y protección del litoral, que incluyen entre otras:

- Muros, revestimientos y taludes de elementos granulares o prefabricados.
  - Espigones perpendiculares a la costa y exentos de elementos granulares.
  - Paseos marítimos.
  - Protecciones de tubería submarina mediante elementos granulares.
- b) Obras de atraque, que incluyen entre otras:
- Muelles de cajones flotantes, bloques de hormigón o de hormigón en masa.
- c) Obras de amarre y fondeo, que incluyen entre otras:
- Duques de Alba en cajón flotante.
- d) Plataformas exteriores, que incluyen entre otras:
- Plataformas tipo “Ekofisk”.

#### 2.2.17. Obras marítimas fijas estructurales

En este grupo se incluye cualquier obra que esté construida con elementos cuyo comportamiento sea estructural; es decir, elementos que se deforman para resistir y transmitir las cargas al terreno; por ejemplo: pilotes, pantallas continuas ranuradas o múltiples, recintos de tablestacas, muros. En el conjunto se encuentran entre otras, las siguientes tipologías: (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

- a) Diques de abrigo, que incluyen entre otros:
- Pantallas delgadas, permeables o impermeables, verticales e inclinadas.
  - Pantallas múltiples.
  - Diques de recintos de tablestacas.
- b) Obras de gestión y protección del litoral, que incluyen entre otras:
- Muros en “L”, pantallas ancladas.
  - Espigones de madera o metal.
  - Paseos marítimos como muro estructural
- c) Obras de atraque, que incluyen entre otras:
- Muelles de pantallas ancladas, muros en “L”.
  - Muelles o pantalanés sobre pilotes.

- Muelles de tablestacas, recintos tablestacados o con otros elementos prefabricados.

d) Obras de amarre y fondeo, que incluyen entre otras:

- Duques de Alba con pilotes aislados o grupos de pilotes.

e) Plataformas exteriores, que incluyen entre otras:

- Plataformas izadas.

- Plataformas pilotadas.

#### 2.2.18. Obras marítimas flotantes

Son aquéllas que cumplen su función estando a flote o fondeadas. De acuerdo con esa definición están comprendidas las siguientes: (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

a) Diques de abrigo, que incluyen entre otros:

- Grupos de neumáticos.

- Pontonas.

- Campos de boyas.

- Pantallas flotantes.

b) Obras de gestión y protección del litoral, que incluyen entre otras:

- Pontonas.

- Campos de boyas.

c) Obras de atraque, que incluyen entre otras:

- Pontonas-pantalanes flotantes.

d) Obras de amarre y fondeo, que incluyen entre otras:

- Monoboyas.

- Sistemas de cadenas.

e) Plataformas exteriores, que incluyen entre otras:

- Plataformas lastradas.

- Plataformas atirantadas.

- Plataformas ancladas

- Plataformas mixtas

### 2.2.19. Partes de un dique

La sección tipo de un dique de abrigo se puede describir considerando las siguientes partes. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

- Cimentación, que determina la forma en que la estructura transmite los esfuerzos al terreno.
- Cuerpo central, que controla la transformación del flujo de energía del oleaje incidente y transmite a la cimentación la resultante de las acciones.
- Superestructura, que controla el rebase sobre la coronación y, en su caso, ofrece un camino de rodadura.

La ordenación de la sección en tres partes facilita su descripción y ayuda a establecer elementos de comparación entre tipologías. La línea que separa cada una de las partes no es precisa, pero la ordenación se realiza según la función principal que cada una de ellas desempeña. Así, la superestructura puede proporcionar protección frente a los rebases, el camino de rodadura, acceso, etc. y en su caso, una línea de atraque a sotamar del dique. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

El cuerpo central es la principal parte resistente frente a la acción del oleaje provocando su rotura, reflexión, etc.; la cimentación es la parte del dique en contacto con el suelo y por tanto la vía de transmisión de los esfuerzos al terreno. Además, esta ordenación facilita la descripción de los elementos y subelementos. Por ejemplo, el manto principal es un elemento estructural construido, en general, con dos capas de piezas; la pieza, natural o artificial, del manto principal es un subelemento estructural del cuerpo central de un dique rompeolas. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

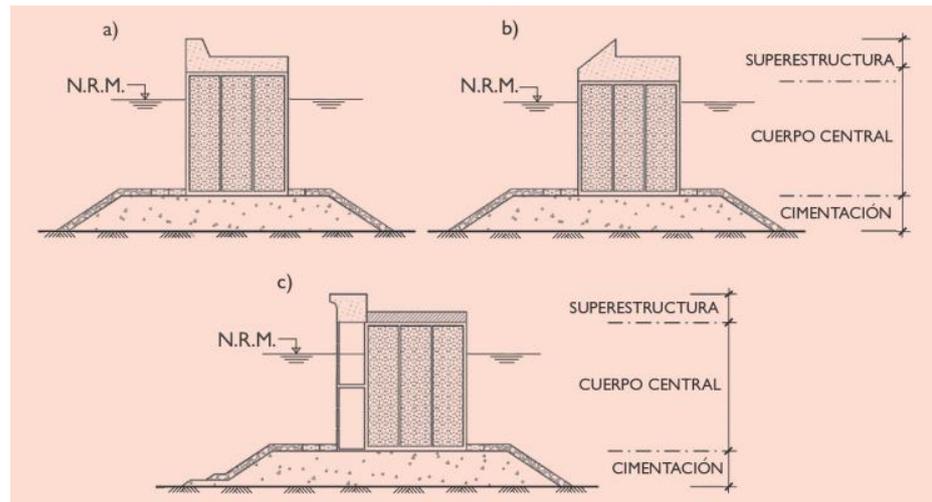


Figura N° 9: Partes de la sección un dique

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

#### 2.2.20. Ecuación de la conservación de la energía del movimiento oscilatorio

La energía incidente se distribuye al interactuar con la sección del dique en, (a) energía reflejada y devuelta hacia el mar, (b) energía transmitida, a través o por encima de la sección propagándose a sotamar del dique, (c) energía disipada y por tanto extinguida y (d) energía transferida a otros modos oscilatorios o generadora de otros movimientos circulatorios. Esta transformación de energía se puede analizar definiendo un volumen de control con anchura transversal unidad, que contenga la sección ver la figura, y en el que se evalúan los flujos de energía entrante, saliente de él y los procesos de disipación en su interior. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado) La ecuación de conservación de la energía del movimiento oscilatorio en el volumen de control, se puede escribir:

$$FI - FR - FT - D' * = 0$$

donde F I, R, T representan los flujos medios de energía incidente, reflejada y transmitida por las secciones de barloamar y sotamar respectivamente, y D' \* evalúa la disipación por unidad de tiempo en el interior del volumen de control provocada por la presencia de la obra y el terreno. El signo negativo

del término representa extracción o salida de energía del volumen de control y el positivo aportación o entrada de energía al volumen de control. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

El flujo de energía es la cantidad de energía que pasa por una superficie del volumen de control en la unidad de tiempo. Sobre esta superficie pueden actuar tensiones (normales y tangenciales) que en la unidad de tiempo pueden contribuir (añadir o extraer energía) con trabajo. (Losada Rodríguez M. (2009) Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. España, publicado en: Puertos del estado)

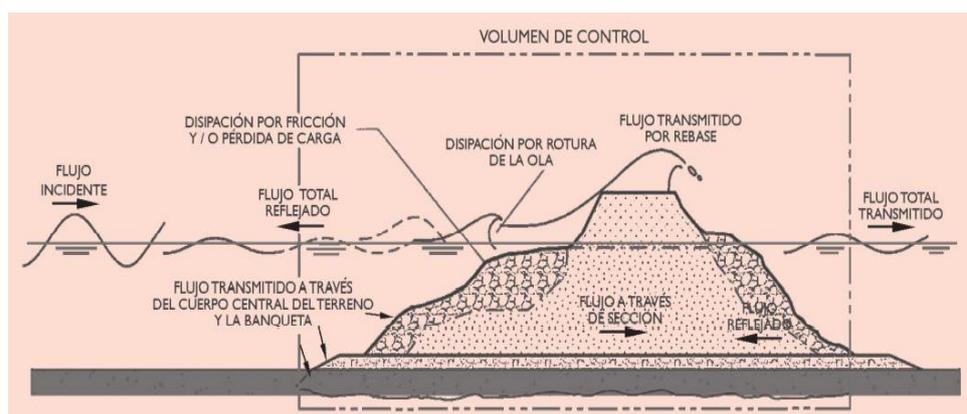


Figura N° 10: Flujo de energía en presencia de la obra

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

## 2.2.21. Tipo de diques

### 2.2.21.1. Dique vertical

Representa una sección de dique vertical cuyas partes central y superestructura están formadas por un único elemento estructural. Tradicionalmente, el paramento de barlomar es vertical, de ahí su denominación de dique vertical, y se puede construir mediante cajones prefabricados, bloques de hormigón en masa, tablestacas, recintos hincados, etc. El cuerpo central suele apoyar en una banqueta de cimentación de material granular, debidamente protegida, en su caso, para que sea estable frente a las oscilaciones

del mar. En zonas con grandes profundidades las dimensiones de esta banqueta pueden ser relevantes estando formada, generalmente, por un núcleo de todo uno de cantera enrasado a una profundidad tal que permita la colocación del cuerpo central (por ejemplo, el fondeo del cajón), y que su estabilidad no esté afectada por las oscilaciones del mar. En zonas de profundidades intermedias o reducidas, salvo complicaciones relacionadas con la capacidad portante del terreno, la cimentación puede estar formada por una capa filtro, todo uno de cantera y la banqueta de enrase propiamente dicha, todos ellos, en general, de pequeño espesor en comparación con el tramo central. El espesor de cada una de estos elementos y los tamaños de los materiales deben adecuarse a las necesidades geotécnicas e hidráulicas. Para proteger la cimentación y el lecho natural en los casos en los que éste sea potencialmente erosionable, es conveniente construir una berma de pie formada por la prolongación del núcleo de todo uno y por los mantos necesarios. En muchas ocasiones, se construye sobre la berma adosado al cuerpo central un bloque de grandes proporciones, denominado de guarda, con la finalidad de reducir y desfasar el pico de las supresiones en el borde de barlomar de la cimentación con respecto al pico de presiones en el paramento. Es habitual coronar la superestructura con un parapeto que, a barlomar, está curvado para facilitar el retroceso del flujo de agua, y que se conoce con el nombre de bataolas. El dique esencialmente actúa como un reflector del flujo de energía incidente, y la transmisión de energía a sotamar sólo se produce por rebase o en proporciones muy pequeñas a través de la cimentación. Con carácter general, se recomienda la tipología de dique vertical allí donde sea muy poco probable la rotura de las olas contra el paramento. A tal efecto se deben cumplir las siguientes condiciones.

$$\frac{d}{h} > 0.85$$

$$\frac{It}{L} < \frac{1}{20}$$

$$\frac{H1}{L} \leq \left[ 0.11 + 0.03 \frac{1 - Kr}{1 + Kr} \right] \tanh \frac{2\pi}{L}$$

$$H^* = (1 + Kr)H1$$

Donde H\* es una altura de ola a pie de dique pero en presencia de él ( es decir, considerando la modificación de las oscilaciones del mar por el área portuaria o litoral, diques, bocana, cambios de alineación, etc )representativa de un estado meteorológico de condiciones de trabajo extremas, h es la profundidad de agua a pie de dique (Esta profundidad debe ser simultánea y compatible con el estado de mar en el que se puede presentar la altura de ola H\* . En su caso, es conveniente analizar más de una profundidad) y d es la altura de agua sobre la berma. HI es la altura de ola del tren incidente y que debe ser representativa de las alturas mayores en el estado.

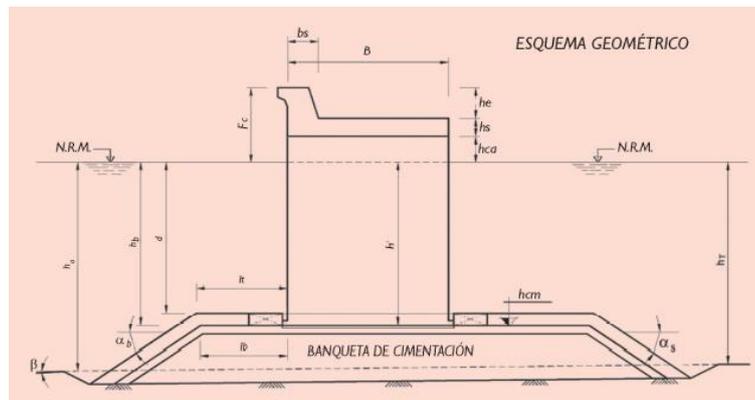


Figura 9: Esquema geométrico de un dique vertical

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

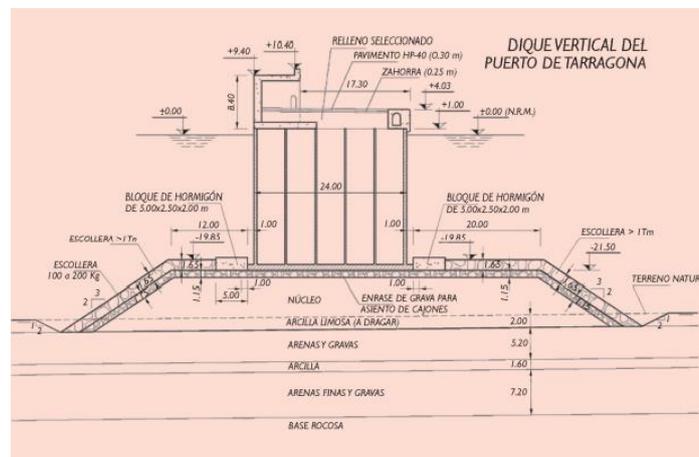


Figura N° 11: Ejemplo de dique vertical de puerto tarragona

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

Una primera estimación del francobordo con respecto al nivel del mar asociado a la profundidad  $h$  para que el dique sea “irrebasable” se puede obtener.

$$\frac{Fc}{H^*} > 0.50$$

Para diques irrebasable de parámetro vertical e impermeable  $H^* \approx 2H_1$  si se satisfacen aquellas condiciones y el dique se proyecta como no rebasarle, se recomienda iniciar el predimensionamiento del dique con una anchura mínima  $B$ , por razones del oleaje,

$$\frac{B}{H^*} \sim 1.0$$

En el caso en el que la probabilidad de rotura de la ola contra el paramento no sea despreciable, se recomienda iniciar el predimensionamiento del dique con una anchura mínima  $B$  por razones del oleaje.

$$\frac{B}{H^*} \sim 1.5$$

Es habitual considerar  $H_1 \approx (1,6 \text{ a } 1,8) H_{s, \Gamma}$  dependiendo de la duración del estado de oleaje y  $H_{s, \Gamma}$  es la altura de ola significativa de dicho estado. Para un dique vertical irrebasable con paramento liso e impermeable, la reflexión es perfecta, por lo que,  $H^* \approx 2H_1$ ,  $H^* \approx (1,6 \text{ a } 1,8) H_{s, \Gamma}$ .

#### 2.2.21.2. Dique vertical con paramento especial

Al objeto de reducir la reflexión del oleaje, en los últimos años se ha explorado la construcción de diques verticales de paramento inclinado, perforado o ranurado con cámaras de oscilación, en toda o a partir de cierta profundidad, con estas modificaciones del paramento a barlomar se desfasan los trenes incidentes, reflejado y se aumenta la disipación por fricción, con el resultado de que para algunos periodos se reduce la altura de ola  $H^*$  a pie de dique y en presencia de él. La cámara de oscilación ayuda en este cometido, no obstante, se debe prestar especial a su anchura  $B_c$  y profundidad  $h_c$  ya que el proceso de reflexión depende de  $B_c / L_c$  donde  $L_c$  es la longitud de onda en el interior de la cámara. La oscilación de la

lámina de agua en el interior de la cámara puede tener una gran amplitud y, en los casos en los que esté cubierta, las presiones sobre ésta pueden ser muy importantes.

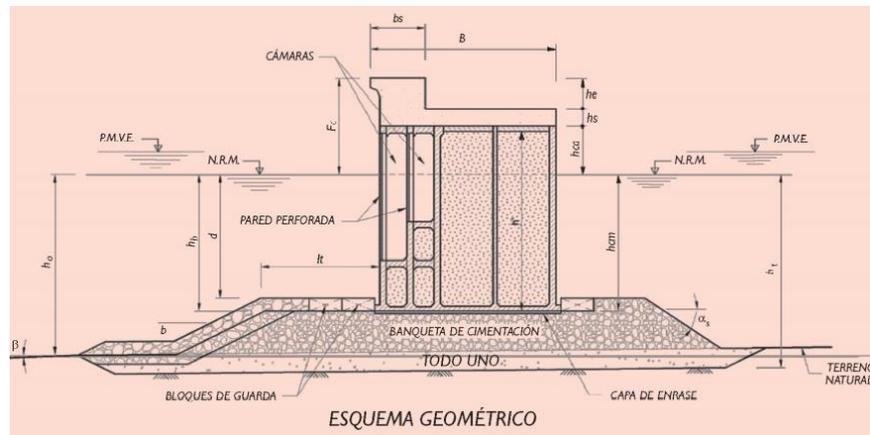


Figura N° 12: Dique vertical como cámaras disipadoras y resonantes

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

### 2.2.21.3. Dique vertical con manto de protección

En la figura se representa un dique vertical protegido con talud de elementos granulares. En este caso el tramo central está formado por dos elementos estructurales, el talud de piezas y el paramento vertical. Ambos elementos estructurales suelen prolongarse por encima de la superficie del agua; en este caso el paramento vertical continúa formando la superestructura. La presencia del talud transforma el dique reflejante en parcialmente reflejante y disipativo, predominando uno u otro modo de trabajo en función de las características del oleaje incidente y de las dimensiones geométricas del talud. Dado que tras el talud granular se encuentra una pared impermeable, el nivel de reflexión de esta sección y las condiciones de estabilidad de las piezas del manto son diferentes a los de un dique rompeolas con núcleo de todo uno de cantera. Se utiliza la palabra berma (de pie) para denominar el elemento estructural y formal, construido por una secuencia de capas de material filtro, todo uno de cantera y mantos secundarios y principal, por lo general, con coronación enrasada horizontalmente. La transición de la berma a la cimentación y al cuerpo central del dique se suele realizar a través del núcleo o materiales de cimentación que se prolongan hacia el mar

y se enrasan horizontalmente. En la construcción de bermas de pie a sotamar y en el morro del dique se pueden aplicar los mismos criterios.

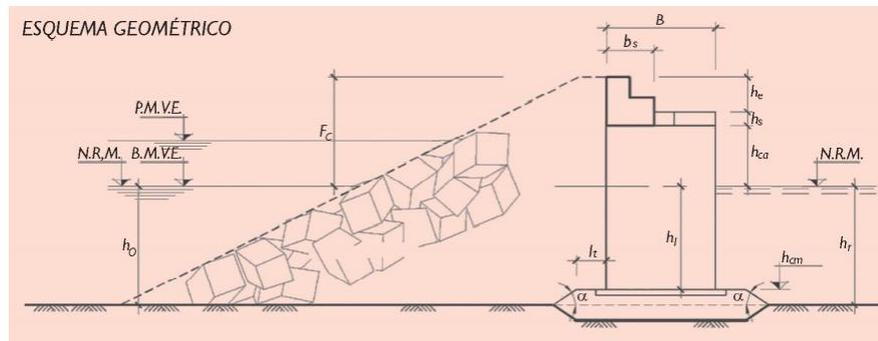


Figura Nº 13: Dique vertical con manto de protección

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

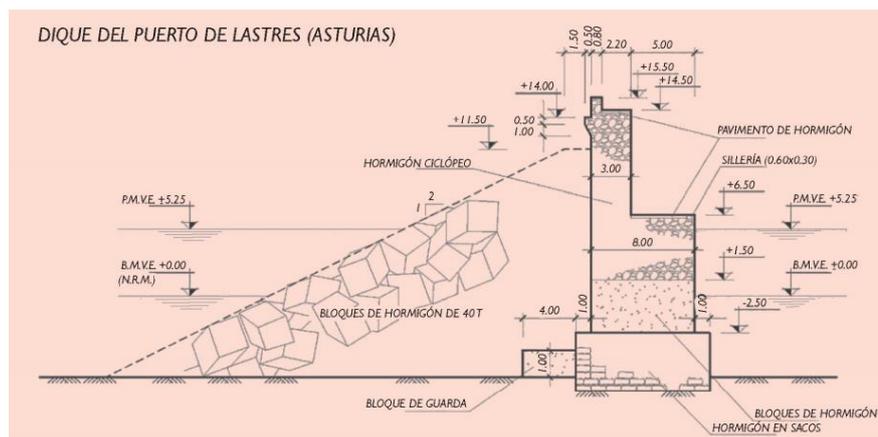


Figura Nº 14: Dique vertical con manto de protección en Asturias

Fuente: Losada Rodríguez M. (2009)

#### 2.2.21.4. Dique Mixto

Cuando la cimentación del dique vertical ocupa una proporción notable de la profundidad tal que su presencia modifica significativamente la cinemática y dinámica de las oscilaciones del mar, la tipología se denomina dique mixto. En la figura se define una tipología mixta; la función protectora se comparte entre el tramo inferior, ampliando su función de cimentación, y el tramo central, que se extiende por encima del plano de agua proporcionando los servicios de una superestructura.



incidente en relación con las dimensiones geométricas del dique, éste puede trabajar predominantemente como dique reflejante, disipativo o mixto, es decir, parcialmente reflejante y disipativo. La transmisión de energía a sotamar del dique se produce por rebase de la coronación o a través de la cimentación que, de no cuidarse adecuadamente construyendo mantos que actúen de filtro, podrá ser significativa.

Para el predimensionamiento de la anchura del cuerpo central del dique mixto se recomienda aplicar los criterios correspondientes a diques verticales, teniendo en cuenta la probabilidad de rotura de la ola contra el paramento. En todos los casos se deberá prestar especial atención a la transformación de la ola por la presencia de la cimentación y la berma, ya que en esta tipología la anchura relativa de la berma  $\epsilon t / Ld$  y del total de la cimentación a barlomar  $(\epsilon t + [h-d] \cot \alpha) / Ld$  pueden tomar valores altos, aumentando su peralte y eventualmente provocando su rotura contra el cuerpo central del dique.

Si no hay rotura de ola sobre el talud o contra el cuerpo central y el dique se proyecta como no rebasable, se recomienda iniciar el predimensionamiento del cuerpo central con una anchura mínima a la profundidad, por razones del oleaje tal que

$$\frac{B}{H_*} > 1,0$$

En el caso en el que la probabilidad de rotura de la ola contra el paramento no sea despreciable, la anchura mínima del dique para iniciar el predimensionamiento deberá ser

$$\frac{B}{H_*} > 1,5$$

Esta sección también se conoce con el nombre de dique compuesto (composite break wáter).

### 2.3. Definición de Términos Básicos.

- Agua: Sustancia hídrica fundamental para el desarrollo de seres vivos y plantas.
- Sismo: Fenómeno natural causado por el movimiento de placas. Los países más sísmicos se encuentran en el cinturón de fuego del pacífico que puede llegar a causar colapso de viviendas, edificios, puentes, entre otros. Ocasionando a su vez la muerte de los habitantes y pérdidas materiales.
- Colapso: Se utiliza el termino de colapso cuando la vivienda o edificio se considera inhabitable debido a presencia de fallas estructurales ocasionando derrumbes y pérdidas de vidas humanas.
- Estructura de protección costera: La función principal de las estructuras de protección costera es mitigar el impacto por las olas hacia la costa evitando ocasionar inundaciones y colapsos. Además, tiene otras funciones como división, aislamiento de zonas públicas o restringidas.
- Tsunami: Es un fenómeno natural que ocurre mayormente después de un tsunami generalmente ocurre cuando el epicentro del sismo es en el mar lo que provoca a su vez que las olas del mar crezcan tanto generando este fenómeno natural.
- Altura de ola: Es la altura que tienes las olas desde el nivel de la superficie hacia arriba. Se considera un tsunami cuando la altura de la ola supera 5.00 mts.

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1. Hipótesis principal

“Para mitigar los daños causados por el fenómeno del tsunami se diseñará un contrafuerte como estructura de protección costera en la zona de influencia.”

#### 3.1.2. Hipótesis secundarias

- a) Se obtendrá la humedad, temperatura, velocidad, dirección del viento, etc.
- b) Se obtendrá la altura de inundación a través software IRIC.
- c) Se diseñará un contrafuerte como estructura de protección costera para mitigar los daños causados por tsunami.

### 3.2. Variables

#### 3.2.1. Definición conceptual de las variables

##### 3.2.1.1. Variable Independiente

Según Garcia G. (2011) La variable dependiente puede ser definida como los cambios sufridos por los sujetos como consecuencia de la manipulación de la variable independiente por parte del experimentador.

La variable independiente es la mitigación de daños causados por un tsunami.

Esta variable es independiente o manipulada debido a que no está sujeta a otra variable en particular, actúa bajo estudio y puede ser modificada a voluntad para la investigación

##### 3.2.1.2. Variable dependiente

Según Garcia G. (2011) Reciben este nombre las variables a explicar, o sea el objeto de investigación, que se intenta explicar en función de otras variables.

La variable dependiente es la propuesta Estructural.

La propuesta será la variable controlada, ya que el resultado de esta varía con respecto a la mitigación de daños esperada.

### 3.3. Operacionalización de Variables

Según Cordero T (2015), está constituida por una serie de procedimientos o indicaciones para realizar la medición de una variable definida conceptualmente. En esta se intenta obtener la mayor información posible de la variable seleccionada, a modo de captar su sentido y adecuación al contexto.

Anexo 2 – Tabla 2

## CAPÍTULO IV: METODOLOGIA DE INVESTIGACION

### 4.1. Tipo y nivel

#### 4.1.1. Tipo

Lozada (2014). La investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto. (p.34)

Hernández (2011). Las investigaciones con enfoque mixto consisten en la integración sistemática de los métodos cuantitativo y cualitativo en un solo estudio con el fin de obtener una “fotografía” más completa del fenómeno, puede decirse que surgieron por la complejidad de algunos fenómenos: las relaciones humanas, las enfermedades o el universo. Esta investigación fue de tipo aplicada con enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo) debido a que se analiza datos obtenidos a través de hechos provocado por tsunami en el Perú, Para ello se recolectara datos, descriptivos y observacionales buscando diseñar un contrafuerte para poder mitigar los daños causados por este fenómeno en la zona de estudio de la urbanización de la encantada en chorrillos.

#### 4.1.2. Nivel

Hernández, Fernández y Baptista (2003) señala que los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. (p. 117)

Arias (2012) define que la investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto) como de los efectos (investigación experimental) mediante la prueba de hipótesis, sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos. (p.26)

La investigación fue de nivel descriptivo y explicativo.

#### 4.2. Diseño de investigación

Kerlinger y Lee (2002) Definieron que la investigación no experimental es la búsqueda empírica y sistemática en la que el científico no posee control directo de las variables independientes, debido a que sus manifestaciones ya han ocurrido o a que son inherentemente no manipulables.

La investigación fue no experimental con diseño longitudinal debido a que la presente investigación se basa en el estudio del fenómeno a través del tiempo y su impacto, debido a que por ser un fenómeno natural no cuenta con la presencia de este en un tiempo determinado.

#### 4.3. Población y muestra

##### 4.3.1. Población

Arias (2006) Define población como un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. (p.81)

La población de la presente investigación fueron todos los tipos de obras de protección costera que puedan mitigar los daños causados por un tsunami.

##### 4.3.2. Muestra

Arias (2006) Define muestra como un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible. En este sentido, el presente estudio se llevará a cabo mediante una muestra representativa ya que sus características son similares a las de un conjunto, que permite generalizar los resultados al resto de la población con un margen de error conocido. (p.83)

Se realizó selección de un contrafuerte como muestra de la investigación para mitigar los daños causados por un tsunami en la urbanización la encantada en Chorrillos. La muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico intencional.

#### 4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

##### 4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos

Para la presente investigación se utilizó la observación directa como tipo de técnica en la zona de estudio ubicado en la urbanización la encantada en el distrito de Chorrillos ya que se encuentra vulnerable frente a un tsunami por encontrarse cerca de las orillas del mar.

Los instrumentos de investigación fueron los siguientes:

- Norma técnica de edificación de concreto armado E-060-2020
- Norma técnica de suelos y edificaciones E-050-2020
- Informe técnico de la “Construcción de la Av. Costa Verde tramo: Av. Rafael Escardo - Jr. Virú, Distrito de San Miguel - Lima – Lima
- Planos de la urbanización La Encantada
- Mapas meteorológicos
- Software IRIC versión 2.3
- Software SAP 2000 versión 22.2
- Software ARGIS versión 3.16.9

#### 4.4.2. Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Las fuentes de esta investigación fueron confiables debido a que su diseño se basa en las normas técnicas peruanas E-080, E-030, E-020 y también basadas en normas internacionales para el diseño del contrafuerte. Para el análisis del comportamiento de la estructura primero se modeló el tsunami en el software IRIC el cual nos brindó las cargas del tsunami que actúan en la estructura. El modelamiento del contrafuerte se realizó en el software SAP 2000 donde se observó el comportamiento de la estructura frente a las fuerzas aplicadas por el fenómeno del tsunami logrando así poder analizar el comportamiento de la estructura frente al desastre natural en mención en la zona de estudio localizada en la urbanización La Encantada en el distrito de Chorrillos.

#### 4.5. Procedimientos para la recolección de datos

Para el presente estudio se recolectarán datos en base al comportamiento de una estructura tsunami resistente frente a un tsunami mediante el modelamiento en el software IRIC y SAP2000. Además de la información climática, características del mar, humedad, direcciones y geográfica de la zona de estudio de la urbanización La Encantada en el distrito de Chorrillos.

Los procedimientos para recolección de datos iniciales fueron:

- Recolección de datos batimétricos a través del mapa de batimetría del Perú.
- velocidad de vientos, direcciones, precipitaciones, humedad, temperatura, etc.
- Modelación del tsunami a través de software IRIC el cual nos proporcionará las fuerzas que se deben aplicar en el diseño del contrafuerte.
- Calcular la fuerza que ejerce el tsunami sobre la estructura al llegar a la costa.

- Modelamiento del contrafuerte en el software SAP 2000 para ver el comportamiento de la estructura frente a las fuerzas que aplica el tsunami frente a este.

#### 4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de información

Para caracterizar la cartografía se utilizó el software ARGIS el cual nos permitió seccionar el área de estudio para poder ingresar la topografía en el software IRIC para poder modelar el tsunami. Además se requirió algunos datos adicionales para la modelación como: La cartografía del mar que se extrajo de GEOGPS PERU ,La temperatura y altura de las olas se extrajeron de la página SEA TEMPERATURE ,La velocidad de los vientos de la página METEOBLUE que nos proporciona información por distritos y departamentos ,La rugosidad del suelo se extrajo de expedientes de estudios anteriores .

Luego de ingresar la información antes mencionada en software IRIC se analizó iteraciones para diferentes magnitudes de sismo el cual nos permitió observar diferentes datos como la magnitud de impacto en la altura de inundación, altura de la ola, área de inundación, máximo lugar de alcance entre otros.

Además, nos permitió calcular el promedio anual de la velocidad del viento, temperatura del mar y el oleaje. La matriz de consistencia se encuentra en la tabla N°4 página 89 anexo 4.

## CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Características Batimétricas y meteorológicas.

#### 5.1.1. Temperatura Media de Chorrillos

En la siguiente figura se muestra las temperaturas promedio por meses obtenidos los cuales utilizan imágenes satelitales y muestras in situ para monitorear la temperatura.

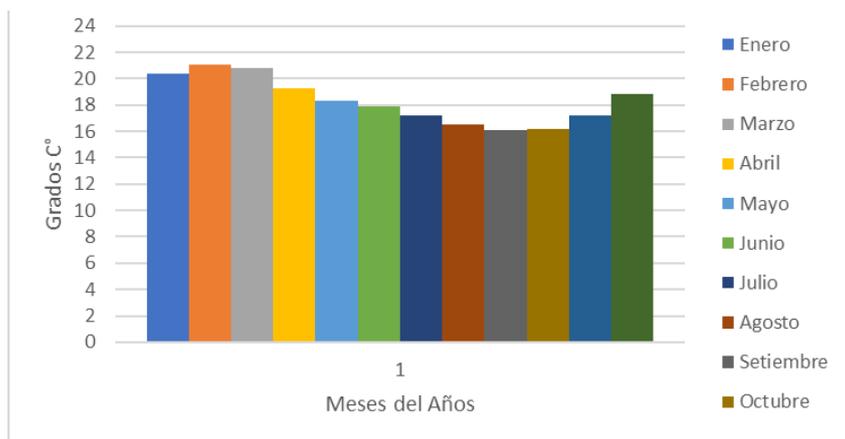


Figura N°17: Temperatura promedio de Chorrillos (2020)

Fuente: Elaboración Propia

#### 5.1.2. Altura de las olas

Según previsiones la altura de las olas varía según la hora, en la siguiente figura se presenta un promedio del último mes.

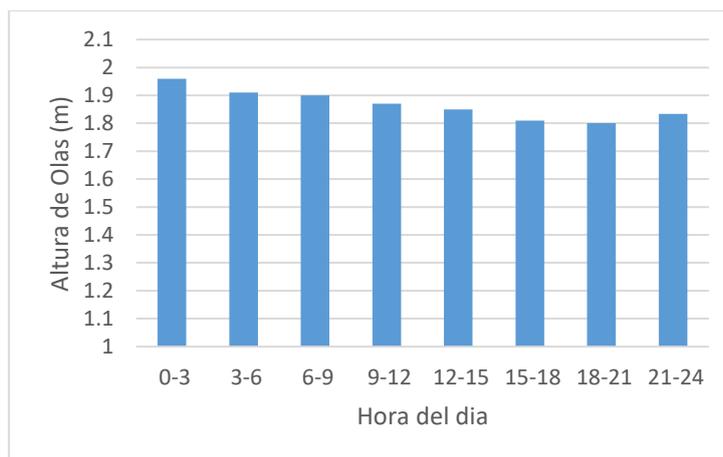


Figura N°18: Altura promedio de la ola en Chorrillos (2020)

Fuente: Elaboración Propia

### 5.1.3. Velocidad del Viento

Como se sabe la velocidad del viento es un factor importante para el diseño de estructuras, este nos ayuda a ver el ángulo en el cual puede estar orientado la estructura para una mayor estabilidad, en las siguientes dos figuras se muestran las velocidades del viento promedio por mes así como su dirección.

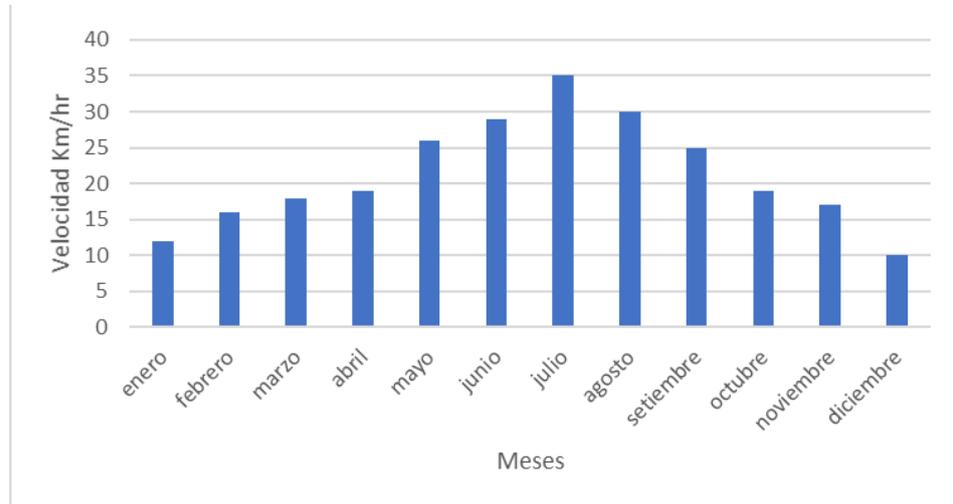


Figura N°19: Velocidad del viento promedio por meses

Fuente: Elaboración propia

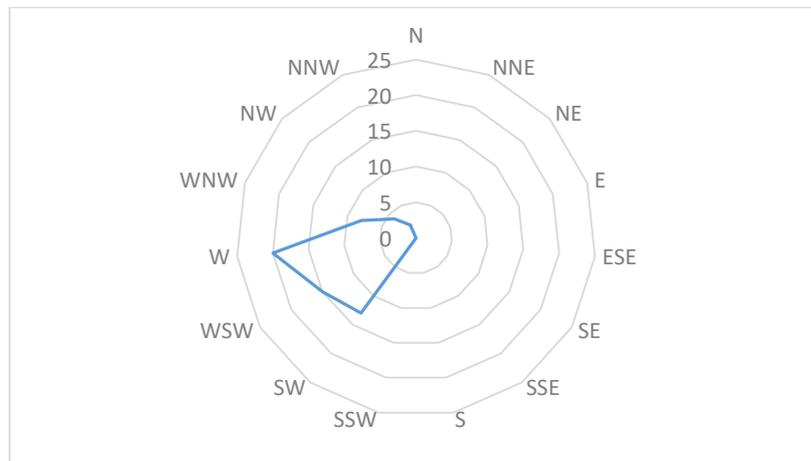


Figura N° 20: Rosa de Vientos

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.4. Batimetría del Perú

Para poder modelar el tsunami se tiene que tener en cuenta que los primordial es la batimetría de la zona a estudiar, por ende, ser recolecto los datos de GEOGPS-PERU, el cual nos facilitó la batimetría de todo el territorio peruano.

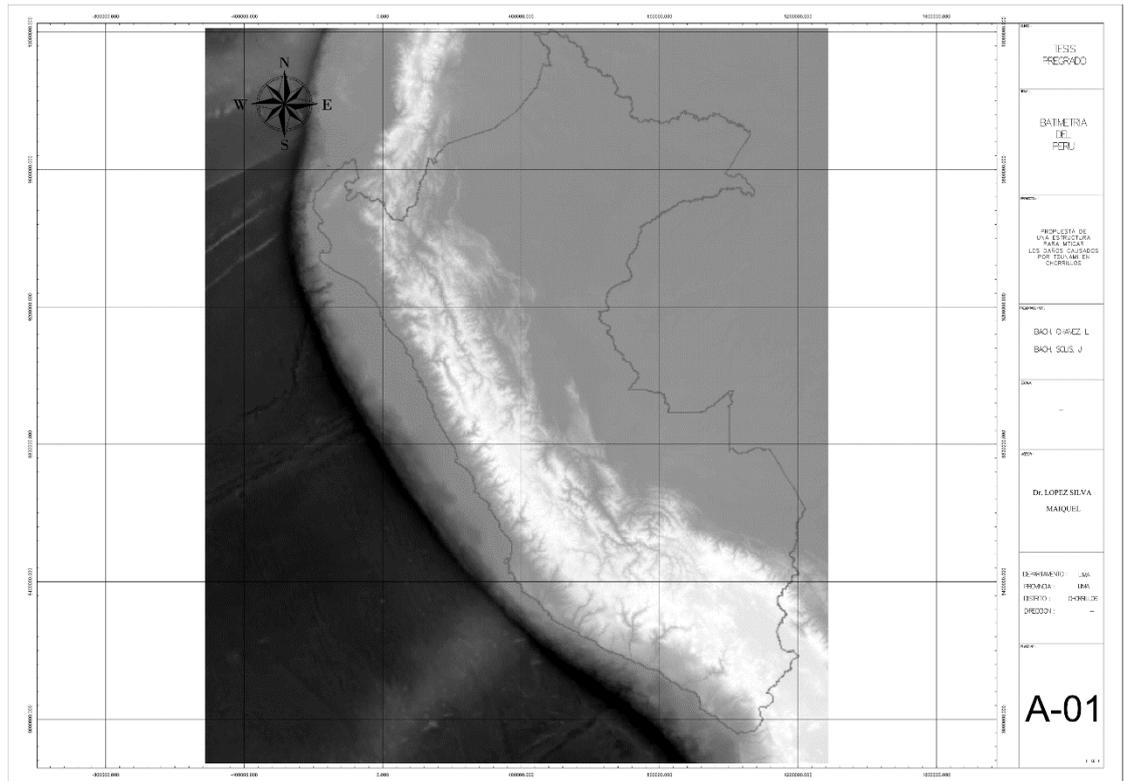


Figura N° 21: Batimetría del Perú

Fuente: Elaboración propia

## 5.2. Modelación del oleaje producto del tsunami

### 5.2.1. Cálculo de altura de las olas

Se uso las fórmulas empíricas de Yamaguchi y silgado para calcular las alturas máximas producidas por un sismo frente a las costas de chorrillos.

Calculo de altura mediante Yamaguchi:

$$H = 12.3Xe^{-0.67xD}$$

Donde:

H= Altura de la ola máxima (m)

D= Distancia desde la costa hasta la proyección de la línea batimétrica -100 m

Para chorrillos sale un resultado de 4.5 m

Aumentado mas la altura promedio de la marea = 2.1 m

$$4.5 + 2.1 = 6.6 \text{ m}$$

Cálculo de altura mediante Silgado:

Poner guion

$$\log(H) = 0.79 \times M - 5.70$$

Donde:

H= Altura de la ola máxima (m)

M = Magnitud del sismo

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla N° 1: Altura de marea según magnitud de cada sismo

Magnitud	Calculo (m)	Altura de marea Promedio (m)	Altura total (m)
9.0	25.70	2.1	27.8
8.7	14.89	2.1	17.0
8.5	10.35	2.1	12.5
8.0	4.48	2.1	6.6
7.5	1.68	2.1	3.8
7.0	0.68	2.1	2.8
6.0	0.11	2.1	2.2
5.0	0.02	2.1	2.1

Fuente: Propia

### 5.2.2. Comportamiento de la ola a través del tiempo.

Se nos proporcionó el comportamiento de la ola del tsunami del 2011 en Kamaishi – Japón el cual se observa así:

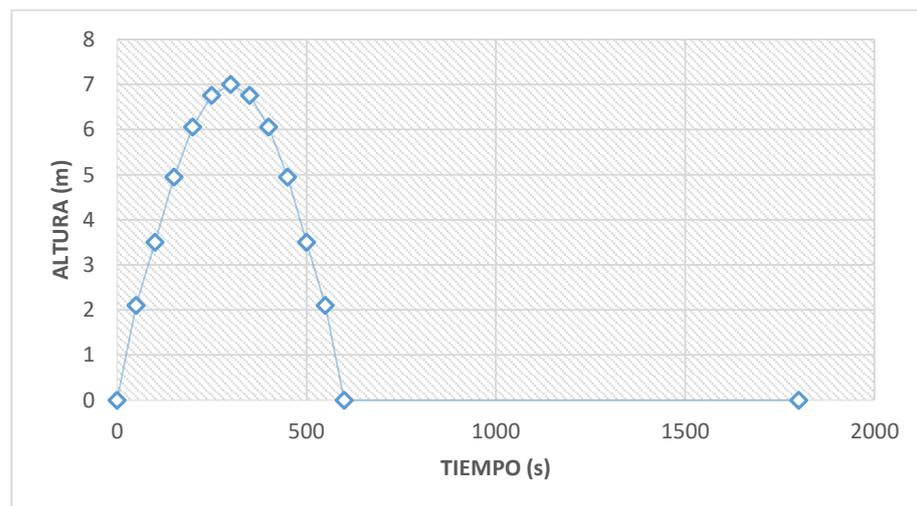


Figura N° 22: Altura de la ola (m) vs el Tiempo (s)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos son:

- Para una magnitud de grado 5 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°23.

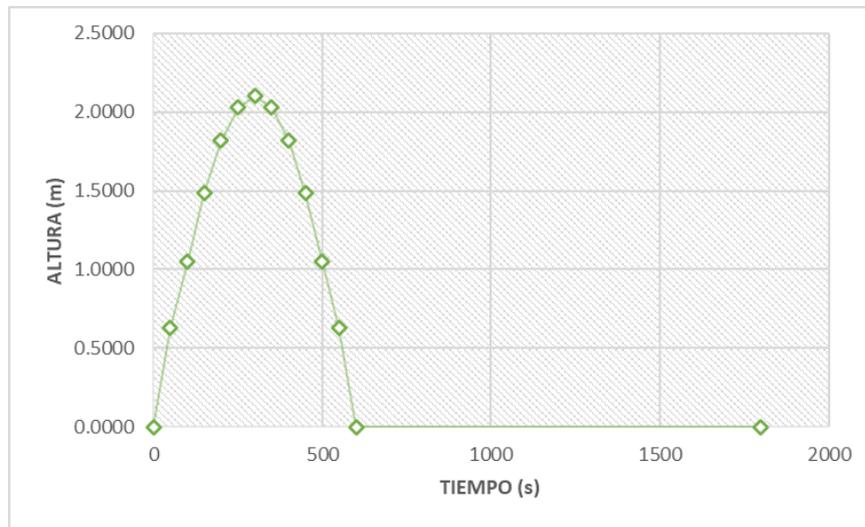


Figura N° 23: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 5

Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 6 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°24.

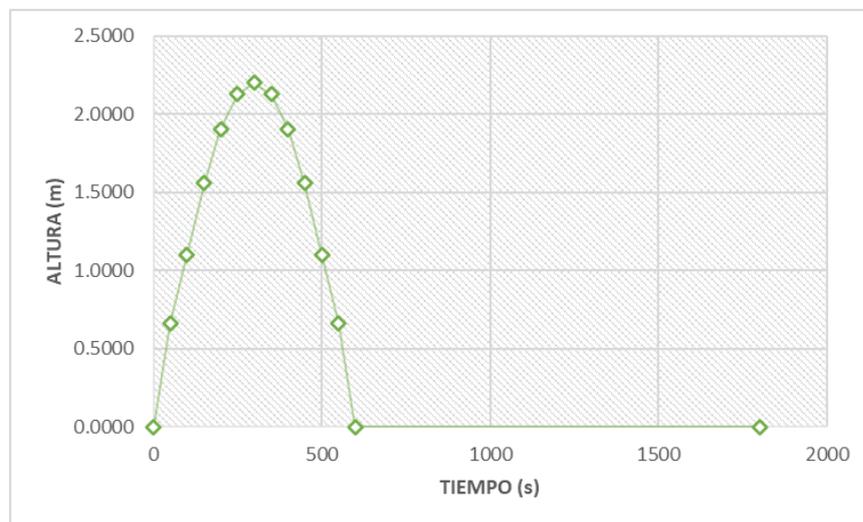


Figura N° 24: Altura vs tiempo para una magnitud de grade 6

Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 7 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°25.

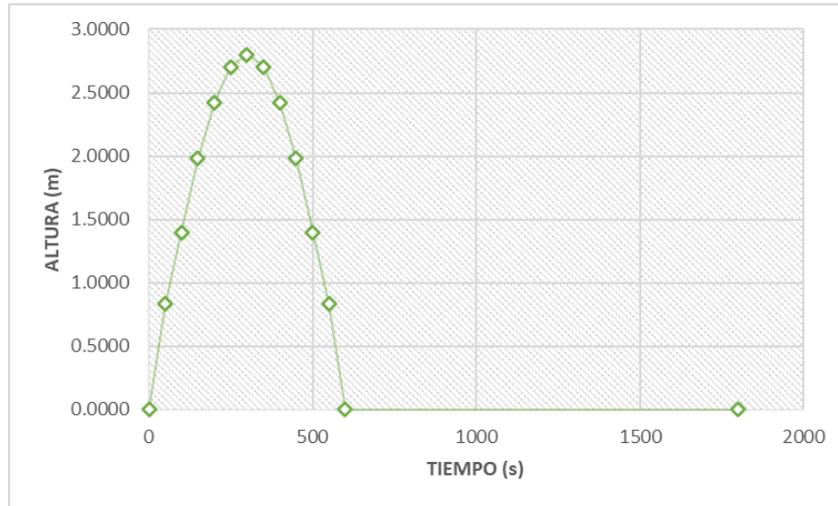


Figura N° 25: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 7

Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 7.5 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°26.

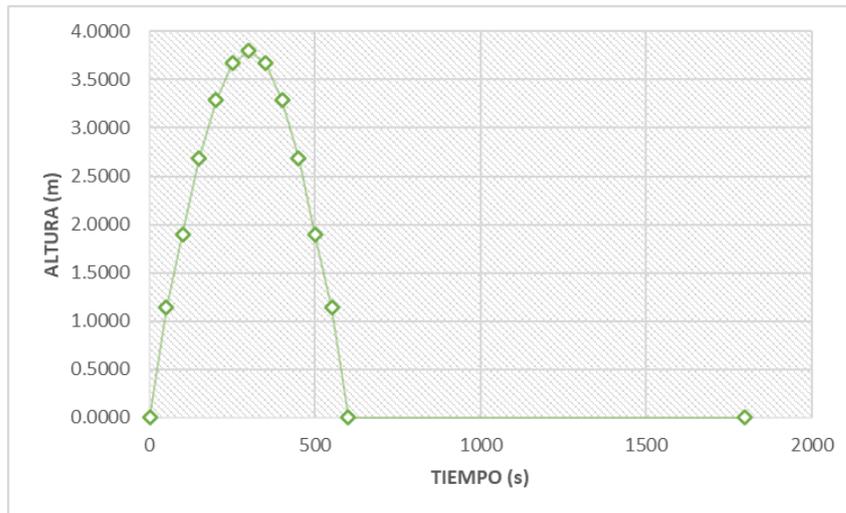


Figura N° 26: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 7.5

Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 8.0 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°27.

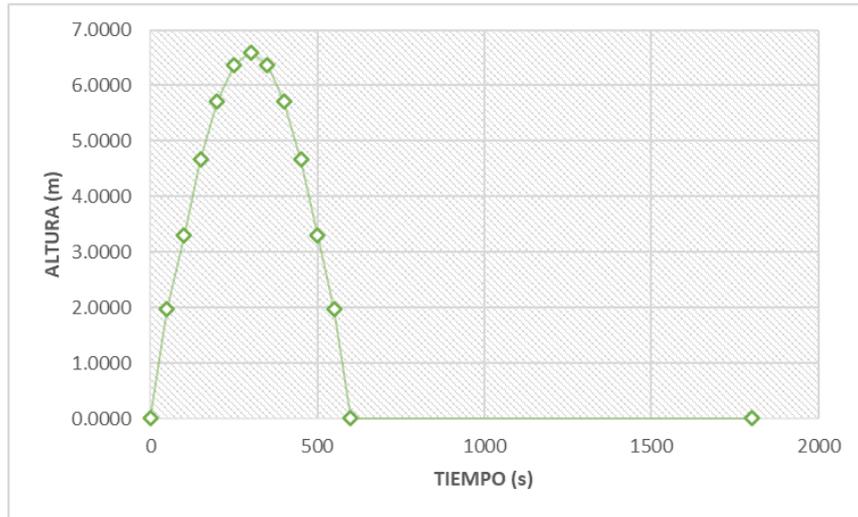


Figura N° 27: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8  
Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 8.5 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°28.

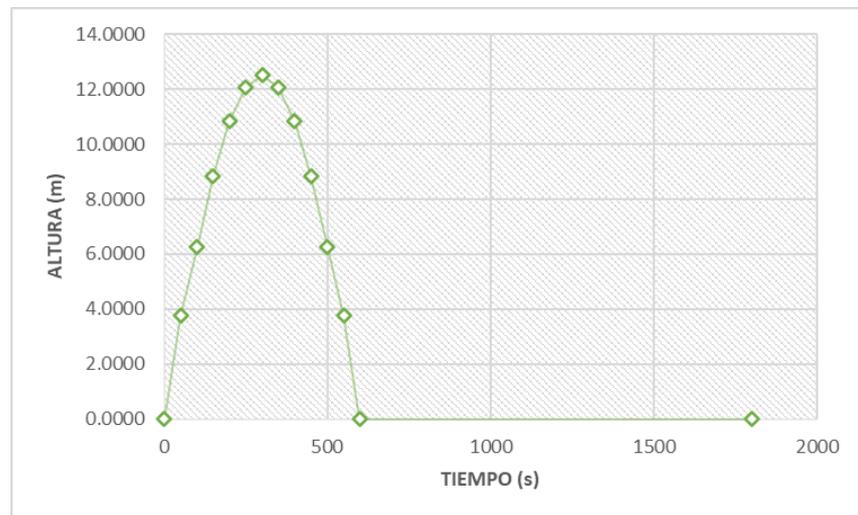


Figura N° 28: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8.5  
Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 8.7 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°29.

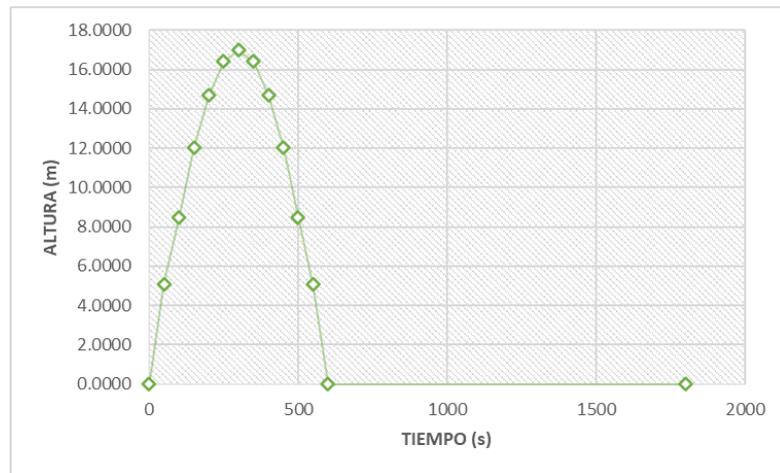


Figura N° 29: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 8.7

Fuente: Elaboración propia

- Para una magnitud de grado 9.0 se muestra el siguiente comparativo de altura vs. Tiempo en la figura N°30.

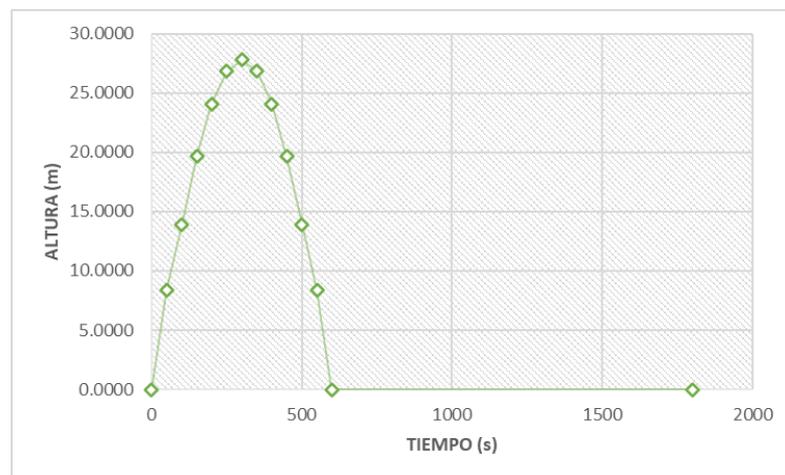


Figura N° 30: Altura vs tiempo para una magnitud de grado 9.0

Fuente: Elaboración propia

Se realizo la emulación con las diferentes magnitudes de sismo:

Tabla N° 2: magnitud vs el tiempo (s)

Tiemp o/vs Mw	Magni tud 5	Magni tud 6	Magni tud 7	Magni tud 7.5	Magni tud 8	Magni tud 8.5	Magni tud 8.7	Magni tud 9
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.630	0.660	0.840	1.140	1.980	3.750	5.100	8.340
100	1.050	1.100	1.400	1.900	3.300	6.250	8.500	13.90
150	1.485	1.555	1.980	2.687	4.667	8.839	12.02	19.65
200	1.818	1.904	2.424	3.289	5.713	10.82	14.71	24.06
250	2.028	2.124	2.704	3.669	6.373	12.07	16.41	26.84
300	2.1	2.2	2.8	3.8	6.6	12.5	17.0	27.8
350	2.028	2.124	2.704	3.669	6.373	12.07	16.41	26.84
400	1.818	1.904	2.424	3.289	5.713	10.82	14.71	24.06
450	1.485	1.555	1.980	2.687	4.667	8.839	12.02	19.65
500	1.050	1.100	1.400	1.900	3.300	6.250	8.500	13.90
550	0.630	0.660	0.840	1.140	1.980	3.750	5.100	8.340
600	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
1800	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente Elaboración propia

En la tabla N° 2 se emula el comportamiento de una ola del sismo ocasionado en Kamaishi – Japon 2011, proyectándola desde la altura máxima con respecto al tiempo, el tiempo es una medida que establece la posición X a medida que la ola se mueve mas no es un tiempo determinado.

### 5.3. Modelamiento en el software IRIC

Se enumerará los pasos necesarios para obtener los resultados en el software IRIC. Primero se crea un archivo con el *solver Nays2D Flood V5.0 64bits*, el cual permite simular y calcular la inundación causada por un fenómeno.

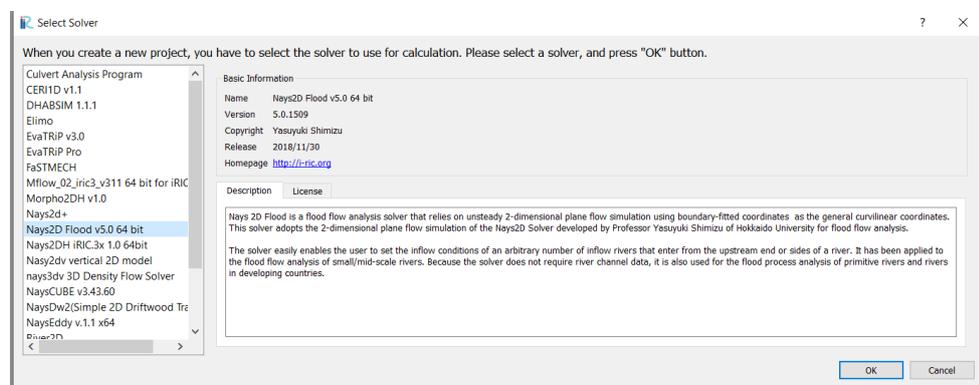


Figura N° 31: Selección del Solver

Fuente: Elaboración propia

Luego se importa la data procesada en el software Qgis, esta representara la data batimétrica que se usara para la simulación. Se selección el método de creación de grilla, el cual nos permitirá limitar y definir la zona, en la cual se hará la simulación.

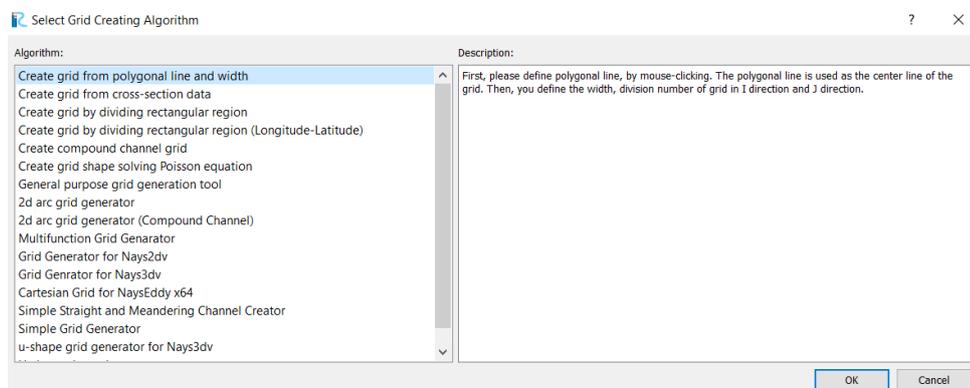


Figura N° 32: Método de creación de Grilla – software IRIC

Fuente: Elaboración propia

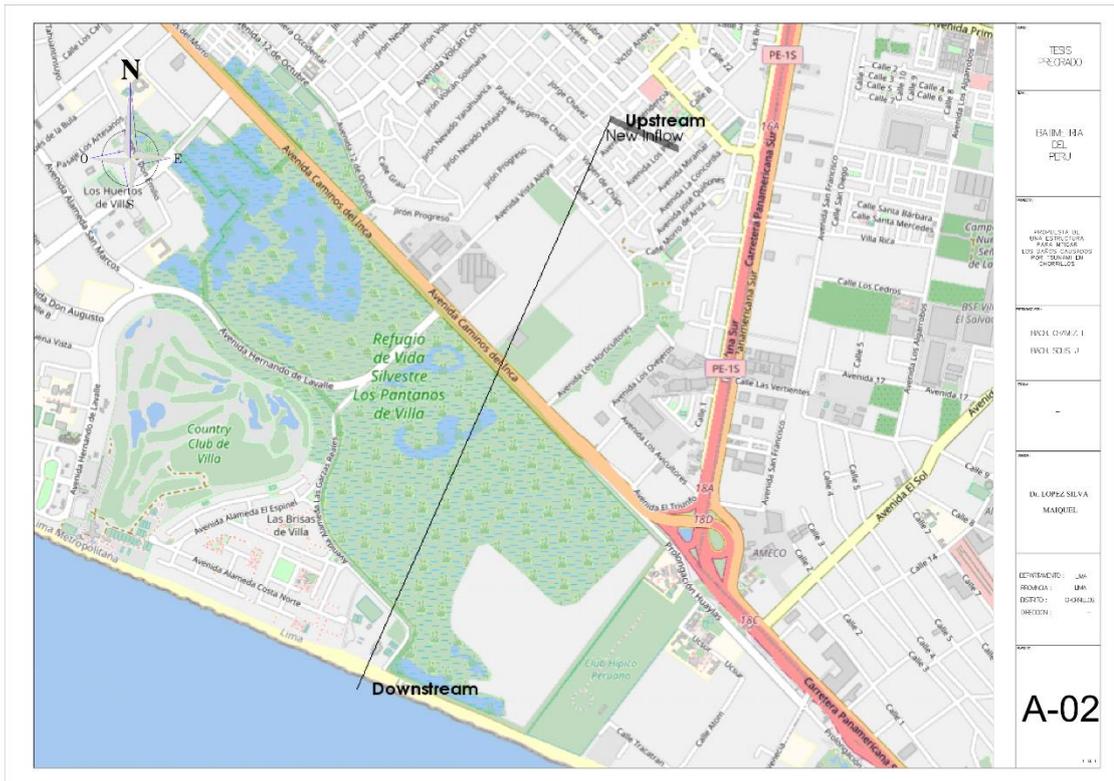


Figura N° 33: Definición de inicio y final de la grilla

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 34: Grilla completa usada para el cálculo de la inundación.

Fuente: Elaboración propia

Se define las condiciones de cálculo en el software. Tales como el tiempo de simulación y la altura de la ola

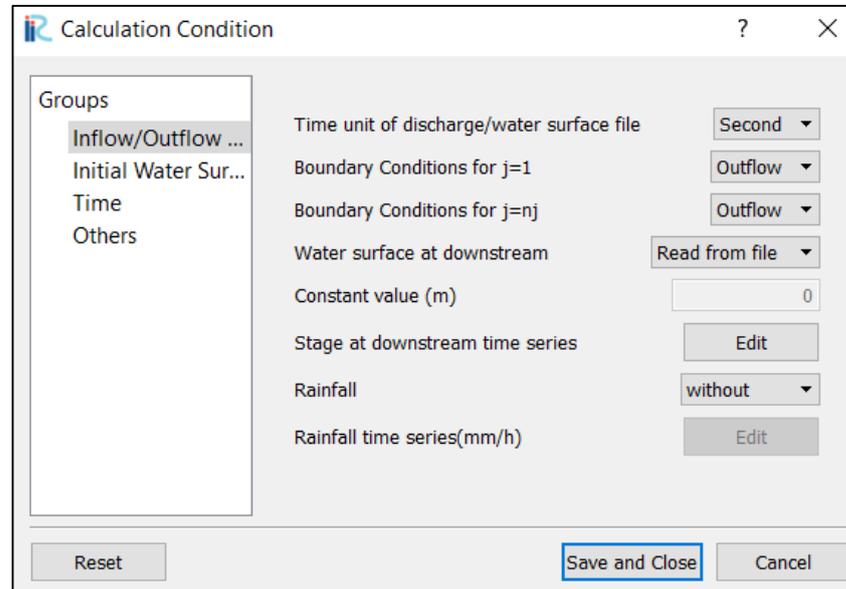


Figura N° 35: Selección de condiciones de Calculo

Fuente: Elaboración propia

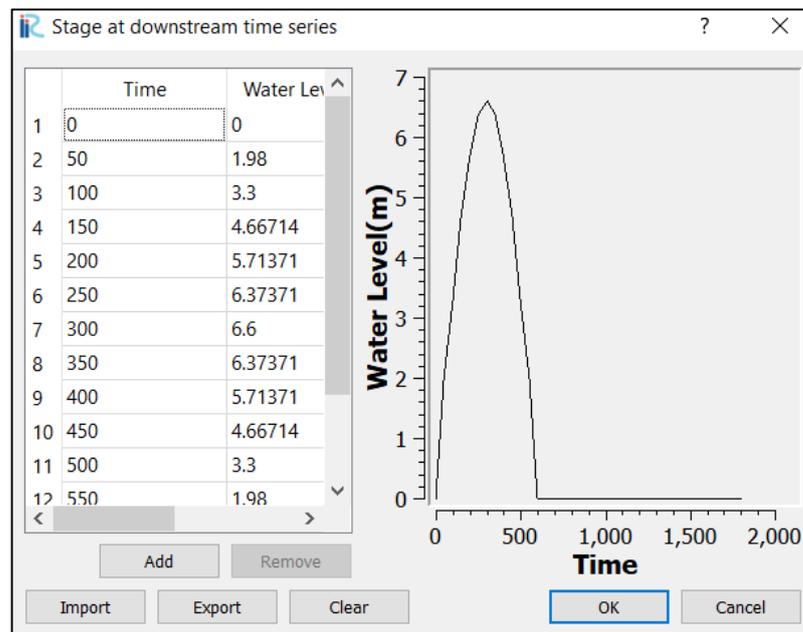


Figura N° 36: Altura de la ola prevista a lo largo del tiempo

Fuente: Elaboración propia

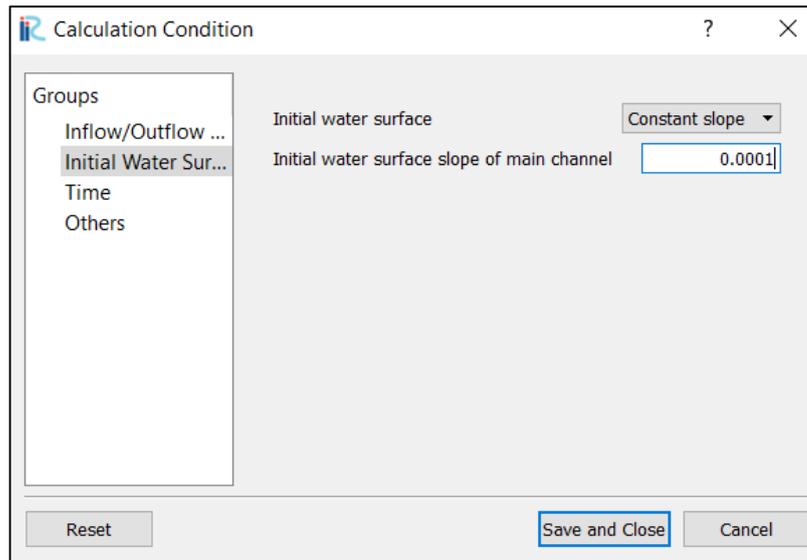


Figura N° 37: Pendiente de la Superficie del agua.

Fuente: Elaboración propia

Se define el coeficiente de rugosidad que usara el modelamiento la zona verde representa el Country club (Zona de pequeños árboles y arbustos sin follaje), la zona roja representa los pantanos de villa (Escasos arbustos y abundante pasto) y por último la zona azul es la zona urbana (Asumida como Cauce de canto rodado con grandes Rocas por la presencia de edificaciones).

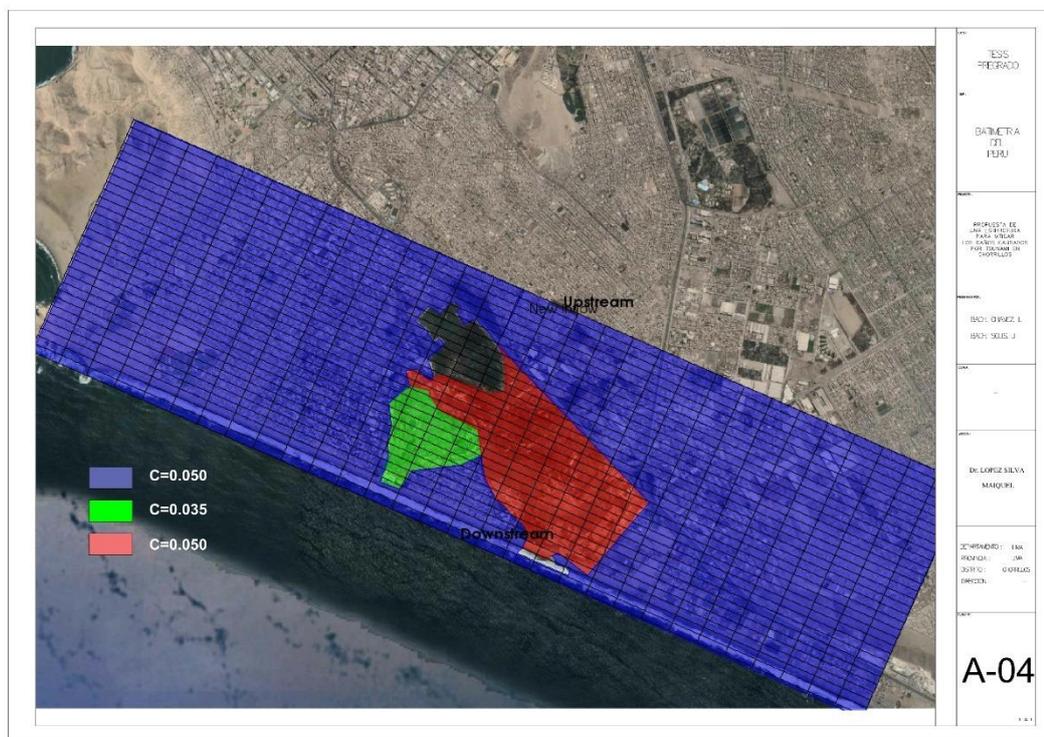


Figura N° 38: Coeficiente de rugosidad

Fuente: Elaboración propia

Luego se establece las condiciones del inflow.

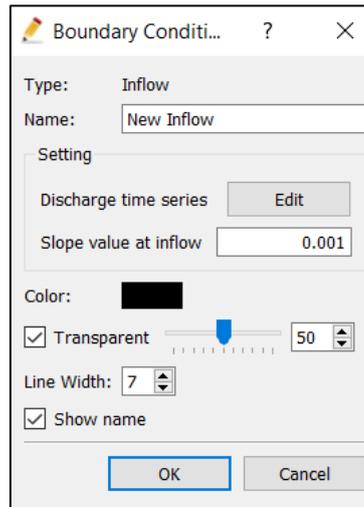


Figura N° 39: Condiciones del Inflow

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.1. Resultados del Software IRIC

#### 5.3.1.1. Velocidades máximas

La presentes velocidad mostrada en la imagen adjunta son modeladas a partir de un sismo de magnitud 8 grados en la escala de Richter, las velocidades más altas se encuentran en la zona de contacto entre la ola y la costa.

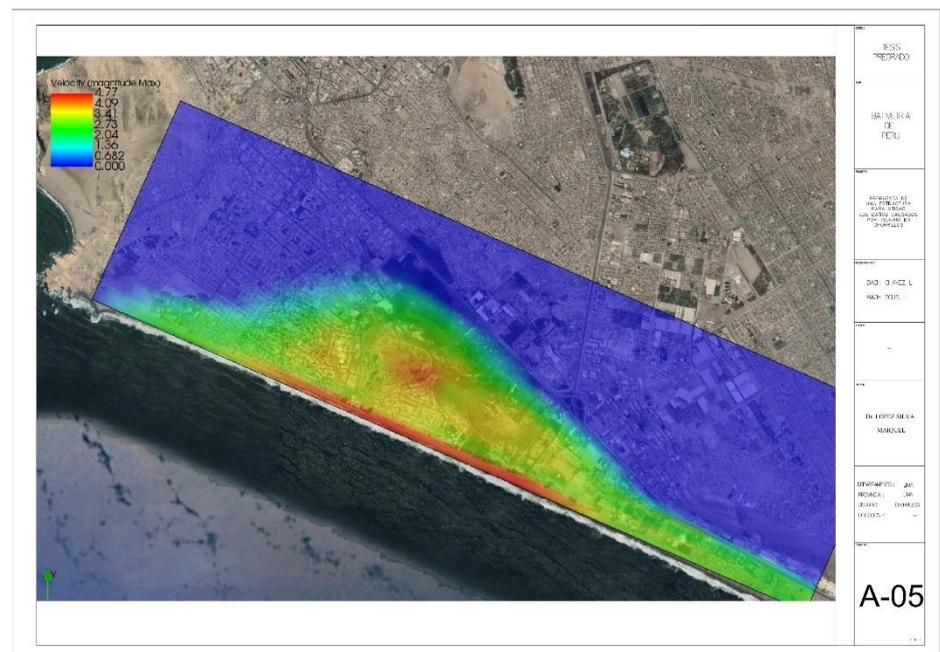


Figura N° 40: Las velocidades máximas producida por un tsunami

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.1.2. Altura Máxima de Inundación

De las alturas máximas de inundación representadas por una gama de colores en la imagen adjunta se puede deducir que la altura máxima de inundación es de 6.65 metros ubicada en la zona más baja y próxima a la costa, Además se observa que la inundación llega hasta la Avenida Prolongación Huaylas.

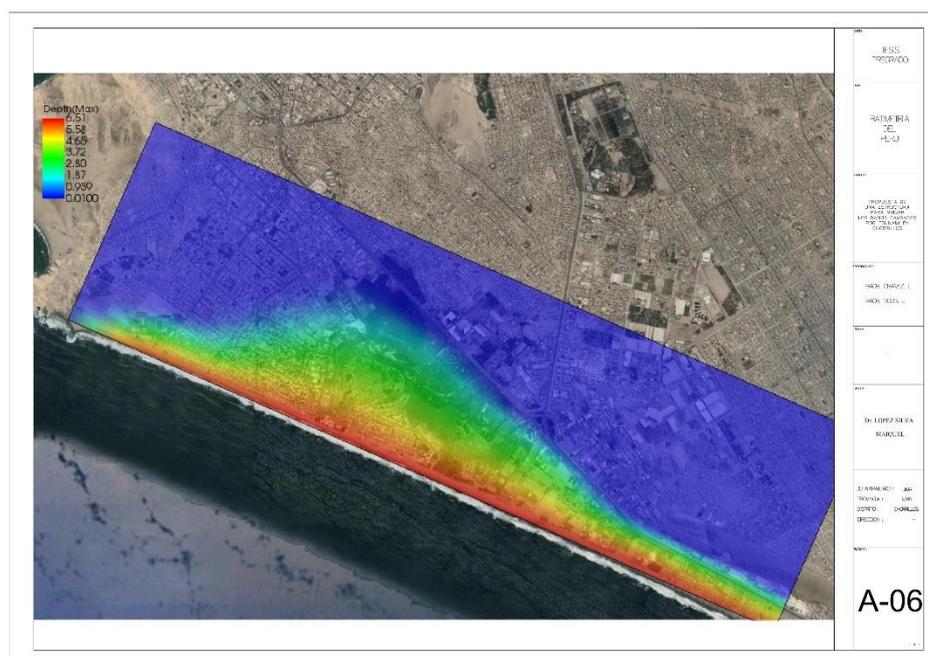


Figura N° 41: Alturas máxima de inundación

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3: Altura de inundación por diferentes magnitudes de sismos

Sismo	Altura máxima de inundación (m)	Área de inundación(m2)	Área de inundación (km2)
5	1.88	3234301.4147	3.2343
6	1.98	3530859.7394	3.5309
7	2.59	4184298.523	4.1843
7.5	3.63	6476336.897	6.4763
8	6.65	10981862.58	10.9819
8.5	12.3	15941693.21	15.9417
8.7	19.8	27162385.02	18.6214
9	39.4	27162385.02	27.1624

Fuente: Elaboración propia

El área máxima de inundación por sismo definido en el software IRIC, nótese que a partir del sismo de grado 7 en la escala de Richter recién se observa una diferencia notable entre áreas de inundación.

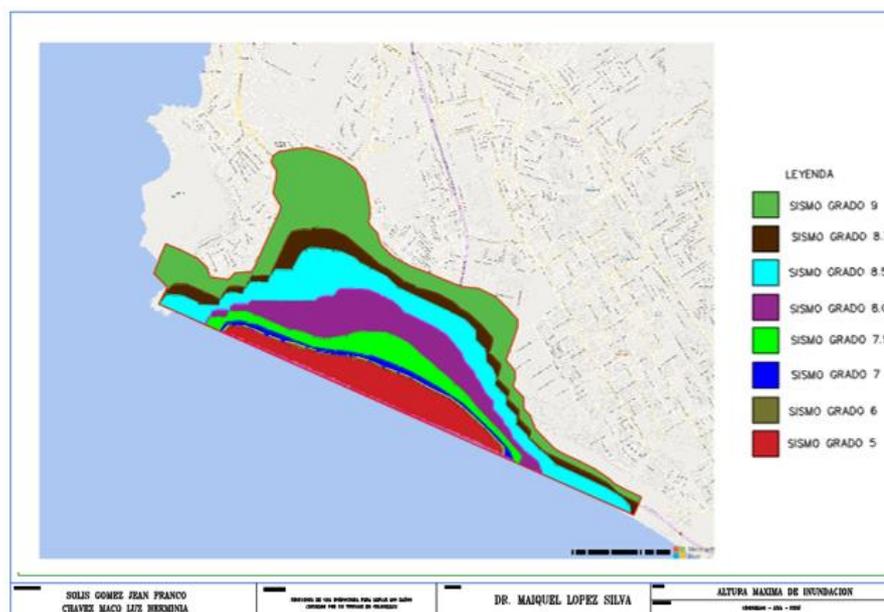


Figura N° 42: Área máxima alcance de inundación

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4. Propuesta de la estructura para mitigar la inundación.

##### 5.4.1. Predimensionamiento del contrafuerte

Como se sabe el sismo de magnitud 8 presenta una altura de 6.65 m de altura, por lo que esa es la altura mínima que tendrá el contrafuerte.

##### 5.4.2. Vista 3D

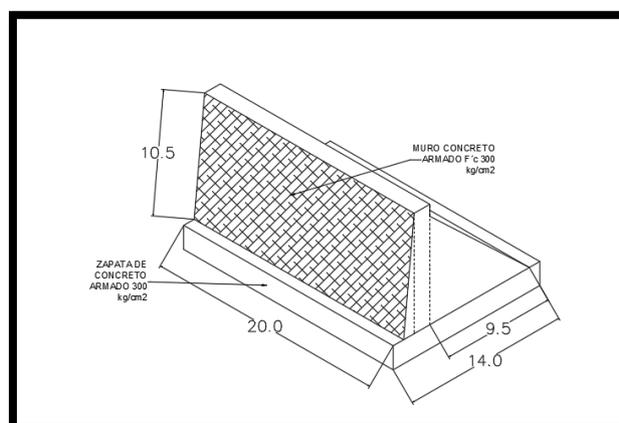


Figura N° 43: Vista en 3D del contrafuerte

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3. Perfil 1

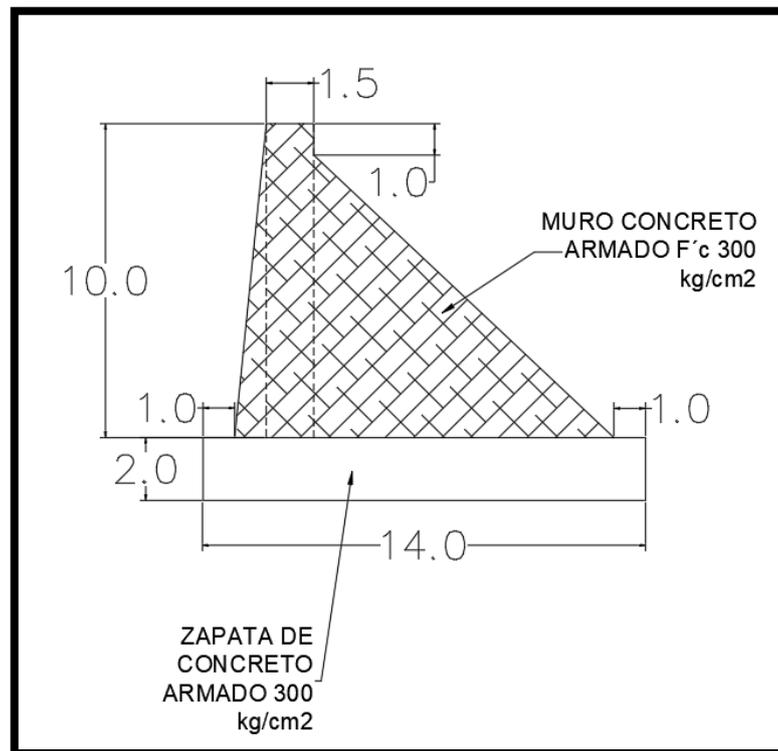


Figura N° 44: Vista de perfil del contrafuerte

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.4. Perfil 2

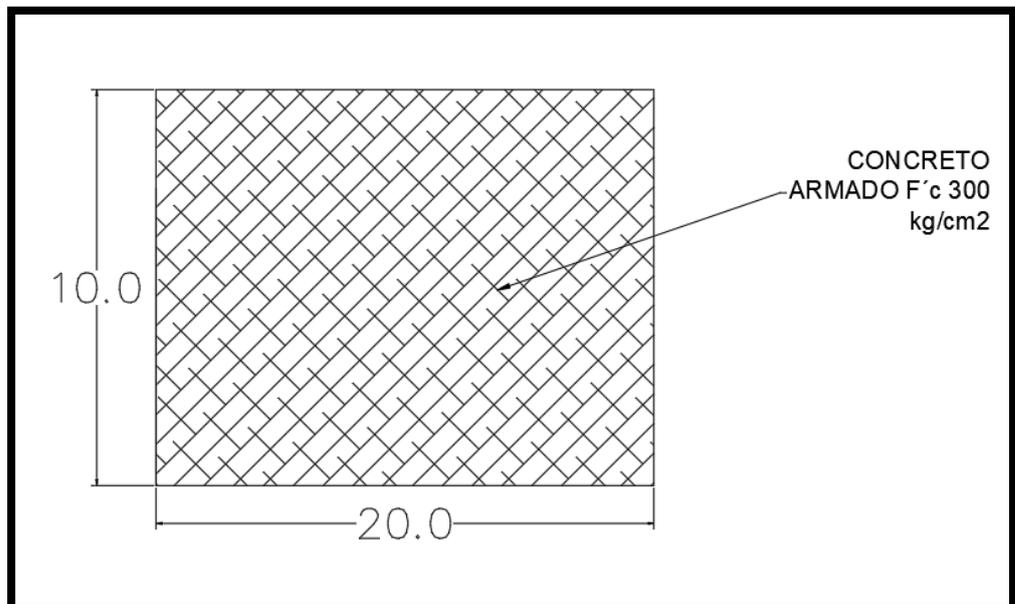


Figura N° 45: Vista en planta del contrafuerte

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.5. Vista Final

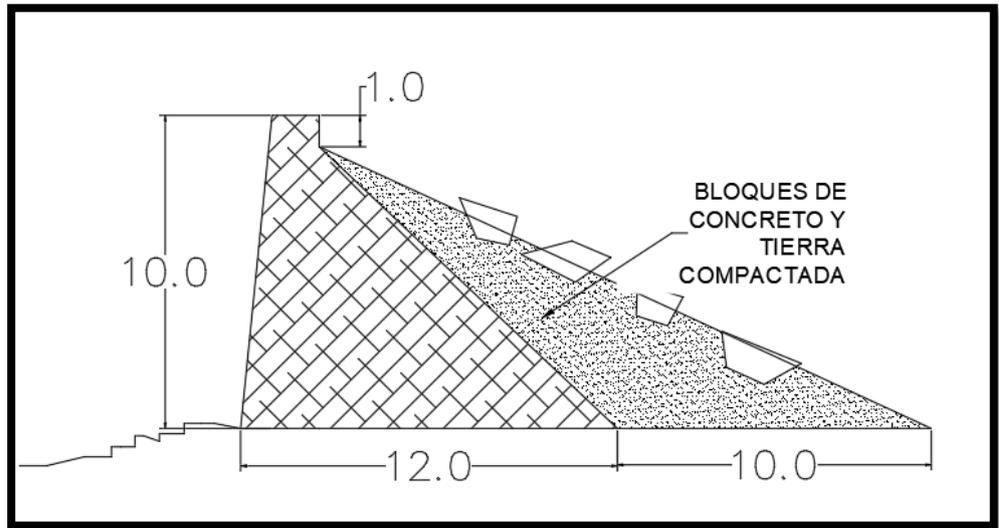


Figura N° 46: Vista de perfil del contrafuerte con manto de protección

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.6. Análisis de factores de seguridad

Se uso una hoja de cálculo para calcular los factores de seguridad, tanto por volcamiento como por deslizamiento para un metro lineal:

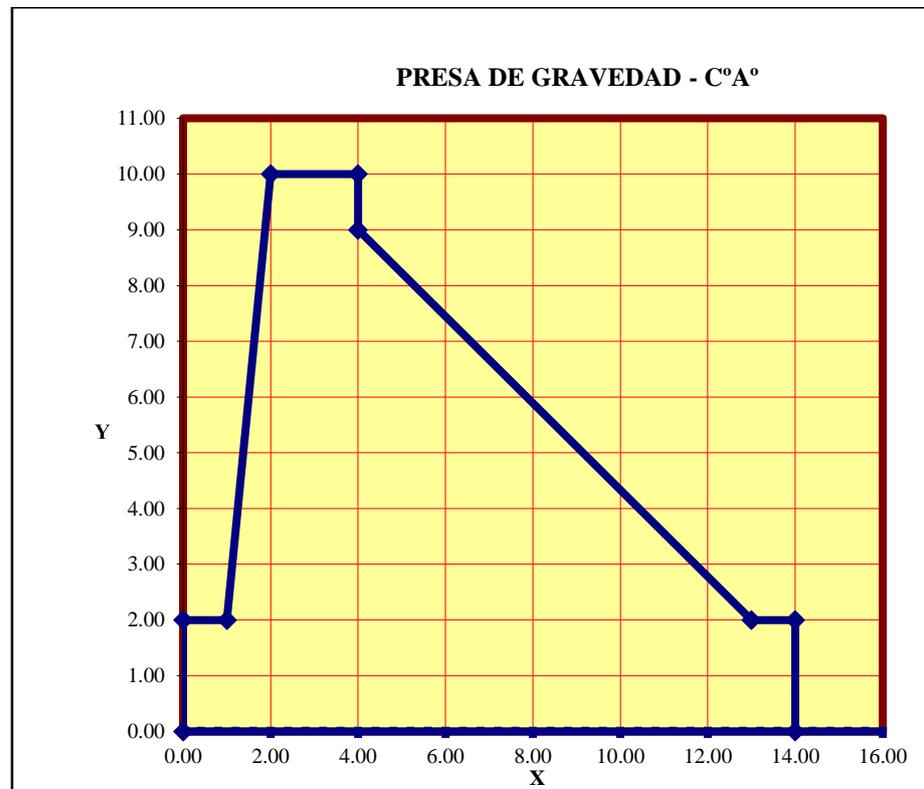


Figura N° 47: Perfil del muro en el eje de coordenadas

Fuente: Propia

Tabla N°4: Coordenadas del muro

Pto.	X	Y
P1	0.00	0.00
P2	0.00	1.00
P3	1.00	1.00
P4	3.00	10.00
P5	4.50	10.00
P6	4.50	9.00
P7	13.00	1.00
P8	14.00	1.00
P9	14.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen se puede observar la división de áreas y aplicación de fuerzas en el muro donde: WI= Fuerza de Impacto, WH= Fuerza Hidrodinámica, WE 3=Fuerza Hidrostática, WS= Fuerza Subpresión, WE1 y WE2 = Peso del agua sobre estructura, W1, W2, W3, W4 = Pesos.

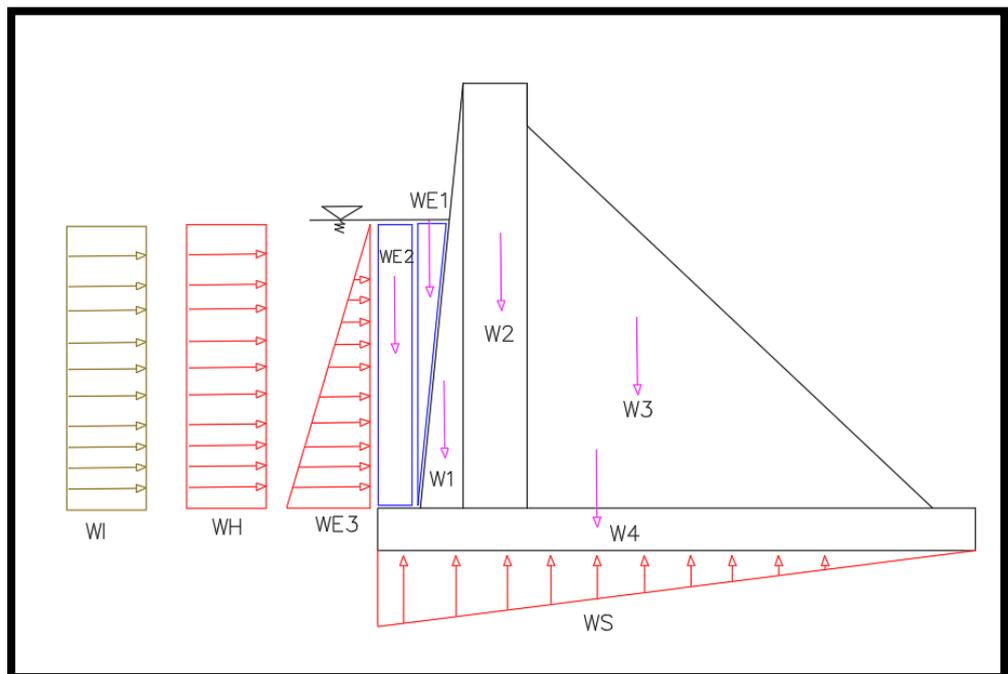


Figura N° 48: División de áreas y aplicación de fuerzas en el muro.

Fuente: Elaboración propia

Datos ingresados y resultados de cada figura geométrica:

Altura total = 12.00 m

Altura de la ola = 6.70 m

- Áreas:

Área 1 (W1) = 5.00 m<sup>2</sup>

Área 2 (W2) = 15.00 m<sup>2</sup>

Área 3 (W3) = 42.75 m<sup>2</sup>

Área 4 (W4) = 28.00 m<sup>2</sup>

Área 5 (WE1) = 3.35 m<sup>2</sup>

Área 6 (WE2) = 6.70 m<sup>2</sup>

- CG:

W1:

X<sub>CG</sub> = 0.67 m

Y<sub>CG</sub> = 3.33 m

W2:

X<sub>CG</sub> = 1.75 m

Y<sub>CG</sub> = 5.00 m

W3:

X<sub>CG</sub> = 5.67 m

Y<sub>CG</sub> = 2.67 m

W4:

X<sub>CG</sub> = 6.00 m

Y<sub>CG</sub> = -1 m

WE1:

X<sub>CG</sub> = 0.33 m

Y<sub>CG</sub> = 0.00 m

WE2:

X<sub>CG</sub> = -0.50 m

Y<sub>CG</sub> = 0.00 m

WH:

X<sub>CG</sub> = 0.00 m

Y<sub>CG</sub> = 3.35 m

WI:

$$X_{CG} = 0.00 \text{ m}$$

$$Y_{CG} = 3.35 \text{ m}$$

WS:

$$X_{CG} = 4.67 \text{ m}$$

$$Y_{CG} = 0.00 \text{ m}$$

- Cálculo de fuerza:

$$W1 = 12.00 \text{ ton}$$

$$W2 = 36.00 \text{ ton}$$

$$W3 = 102.60 \text{ ton}$$

$$W4 = 67.20 \text{ ton}$$

$$WE1 = 3.35 \text{ ton}$$

$$WE2 = 6.70 \text{ ton}$$

$$WE3 = 22.45 \text{ ton}$$

$$WH = 12.83 \text{ ton}$$

$$WI = 101.00 \text{ ton}$$

$$WS = 40.5 \text{ ton}$$

Se trabajará con dos casos:

- Primer Caso:

Fuerza de Impacto + Supresiones vs Fuerzas Estabilizantes

$$F.S.V = 3.1329 > 3.00 \text{ Si cumple}$$

$$F.S.D = 1.520 > 1.50 \text{ Si cumple}$$

- Segundo Caso:

Fuerza Hidrostática + Fuerza Hidrodinámica + Supresiones vs Fuerzas

Estabilizantes

$$F.S.V = 3.455 > 3.00 \text{ Si cumple}$$

$$F.S.D = 2.032 > 1.50 \text{ Si cumple}$$

Como se puede observar en los resultados la estructura soporta las presiones ejercidas por el tsunami, dando un factor de seguridad en el primer caso contra el volteo de 3.13 y un factor de seguridad contra el desplazamiento de 1.52 y para el segundo caso contra el volteo de 3.45 y un factor de seguridad contra el desplazamiento de 2.032.

El primer caso es el más desfavorable debido a que es la ola que mayor energía posee al impactar con la estructura, por ende, los factores de seguridad del primer caso son menores al segundo.

#### 5.5. Modelamiento de la estructura:

##### 5.5.1. Modelamiento en el Software SAP2000

- Primero se Define la grilla:

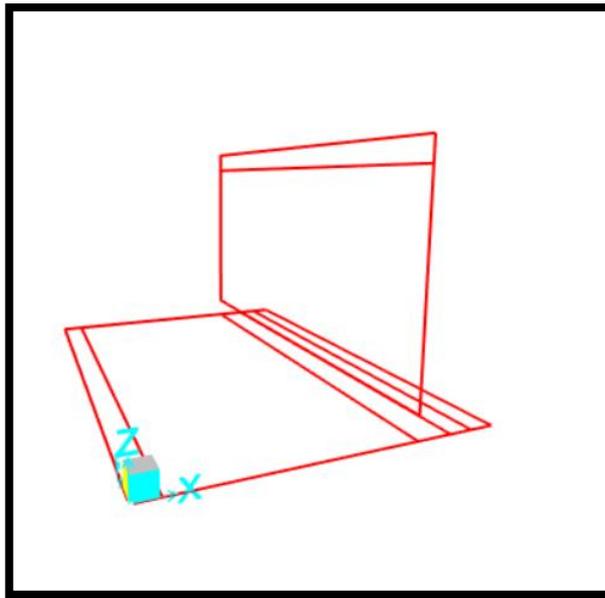


Figura N° 49: Ingreso y definición en el programa SAP 2000

Fuente: Elaboración propia

- Luego se define el material de trabajo:



Figura N° 50: selección del material programa SAP 2000

Fuente: Elaboración propia

- Se realiza el modelamiento de las secciones, una para la zapata y otra para el muro que soportara todas las cargas.

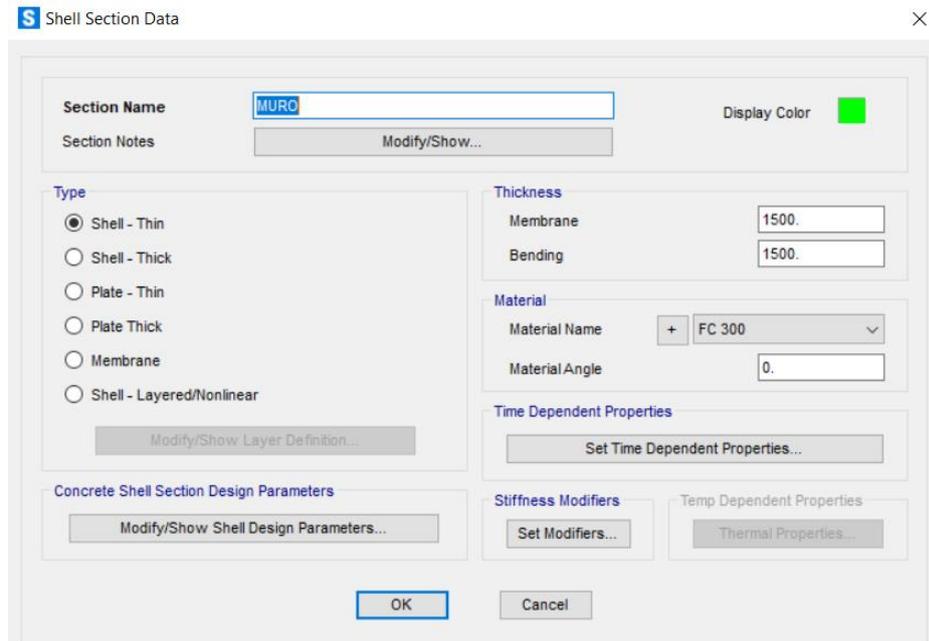


Figura N° 51: Ingreso y definición del muro de contención en SAP 2000

Fuente: Elaboración propia

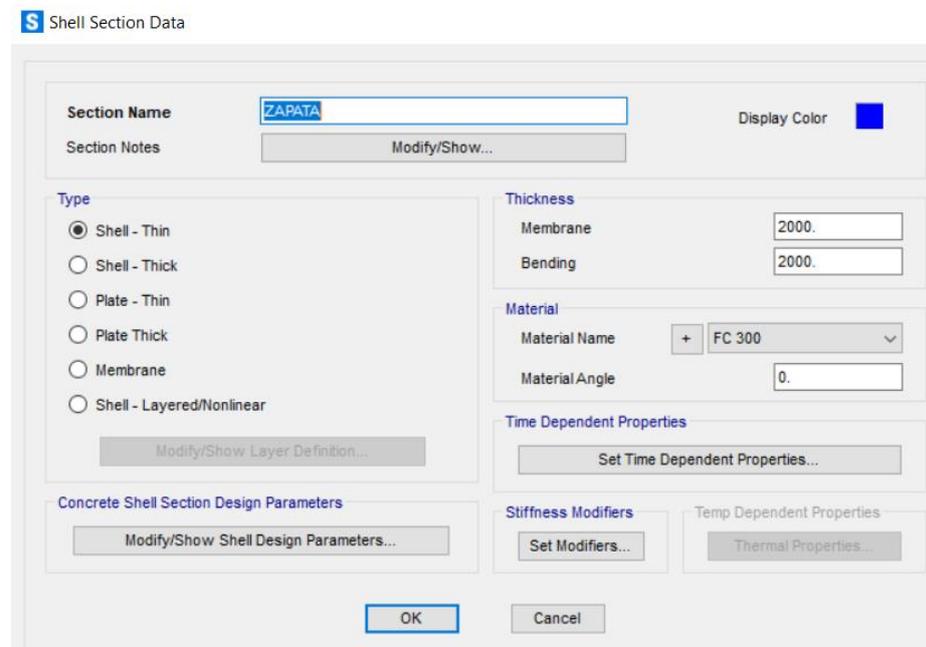


Figura N° 52: Ingreso y definición de la zapata en el programa SAP 2000

Fuente: Elaboración propia

- Luego se define el ancho por cada punto y se separa en bloques de 1 metro x 1 metro

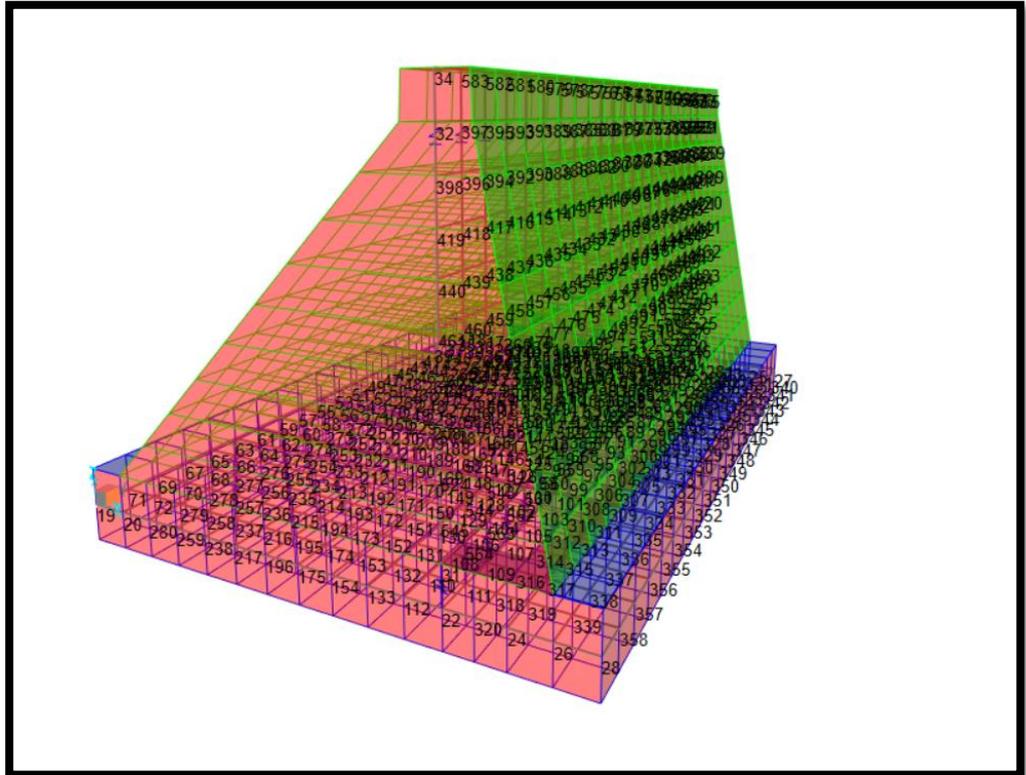


Figura N° 53: Definición anchos y discretización.

Fuente: Elaboración propia

- Se realiza la definición de las cargas actuantes en el contrafuerte

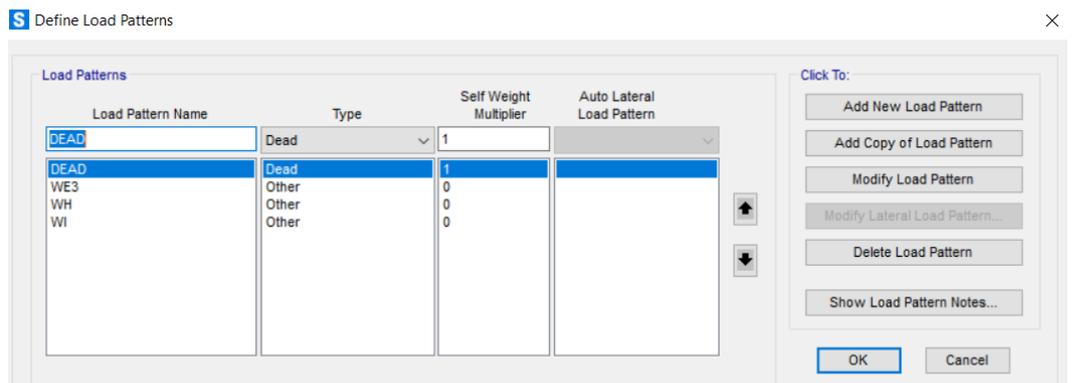


Figura N° 54: Definición de Cargas Actuantes

Fuente: Elaboración propia

- Se realiza la definición de link o unión a usar para que las cargas sean transferidas del Muro hacia la zapata, las restricciones en todos los grados de libertad, denotando un empotramiento perfecto.

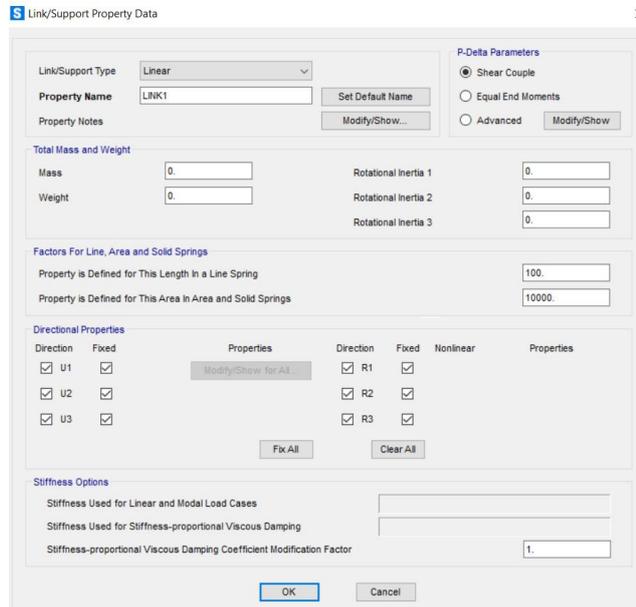


Figura N° 54: Definición de Unión,

Fuente: Elaboración propia

- Se añade la carga producida por la fuerza Hidrodinámica y la fuerza de Impacto

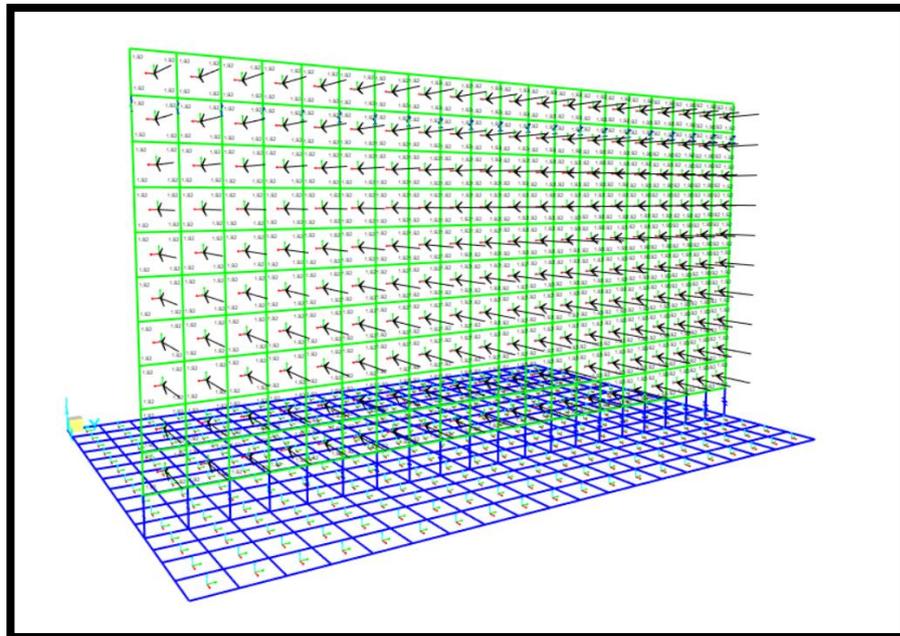


Figura N° 55: Adición de carga Hidrodinámica y de Impacto

Fuente: Elaboración propia

- Se añade también la carga hidrostática, esta se diferencia en que es un empuje que aumenta con respecto a la altura, por lo que no es uniformemente rectangular, sino más bien triangular.

Figura N° 56: Definición de carga hidrostática en el muro.

Fuente: Elaboración propia

- Se define el primer caso = Fuerza de Impacto vs Fuerzas Estabilizantes

Figura N° 57: Definición del primer caso de Análisis.

Fuente: Elaboración propia

- Se define el segundo caso = Fuerza Hidrostática + Fuerza Hidrodinámica + vs Fuerzas Estabilizantes

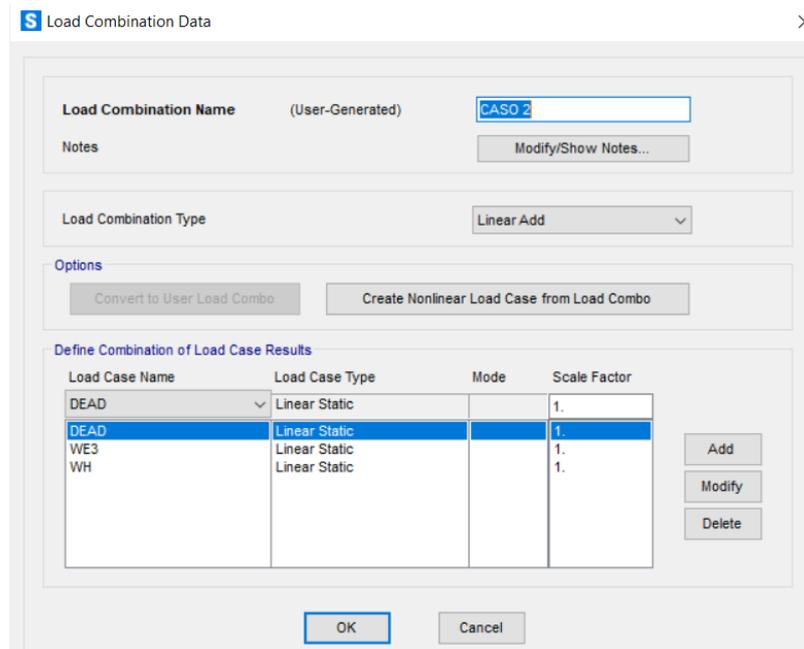


Figura N° 58: Definición del segundo caso de Análisis.

Fuente: Elaboración propia

- Caso 1:

Fuerzas Máximas:

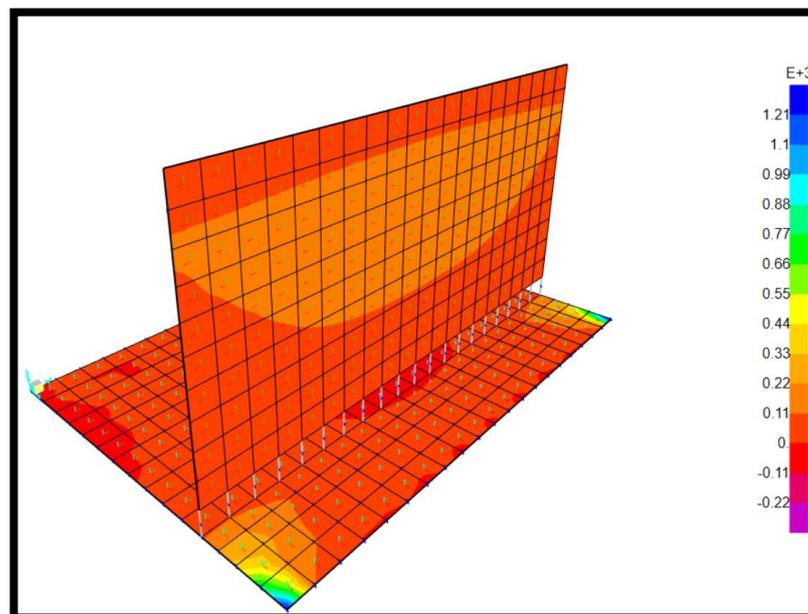


Figura N° 59: Fuerzas Máximas para el primer caso (ton)

Fuente: Elaboración propia

Momentos Máximos:

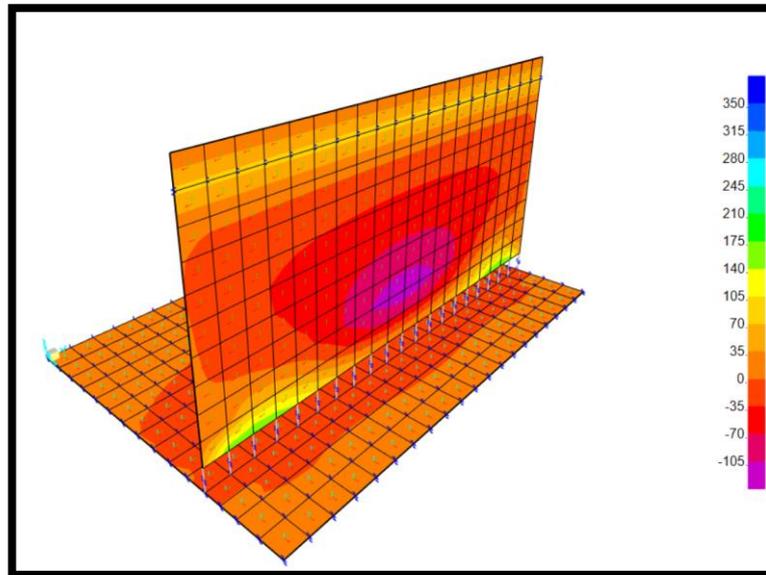


Figura N° 60: Momentos Máximos para el primer caso (ton.m)

Fuente: Elaboración propia

- Caso 2:

Fuerzas Máximas:

En el diagrama adjunto se muestra que las fuerzas se concentran en la zona media del muro, esto debido a la presión hidrostática que es una carga uniforme triangular.

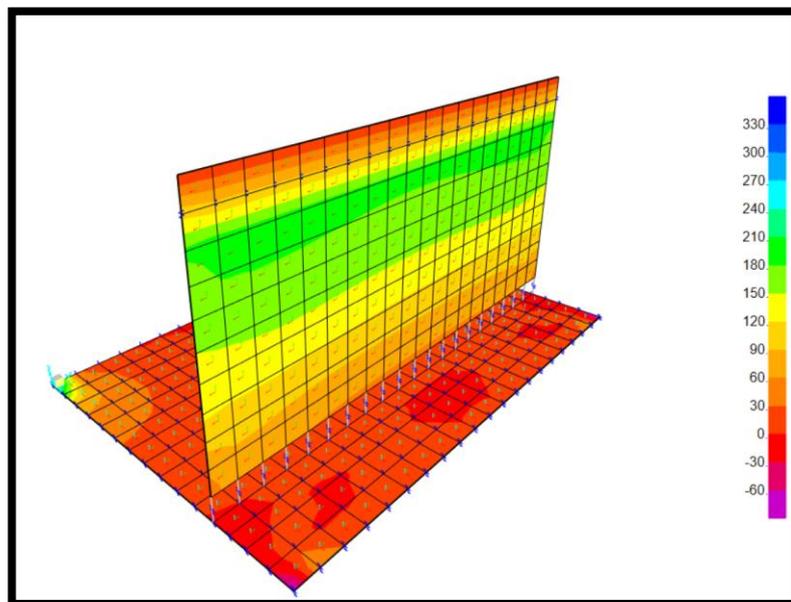


Figura N° 61: Fuerzas Máximas para el segundo caso (ton)

Fuente: Elaboración propia

Momentos Máximos:

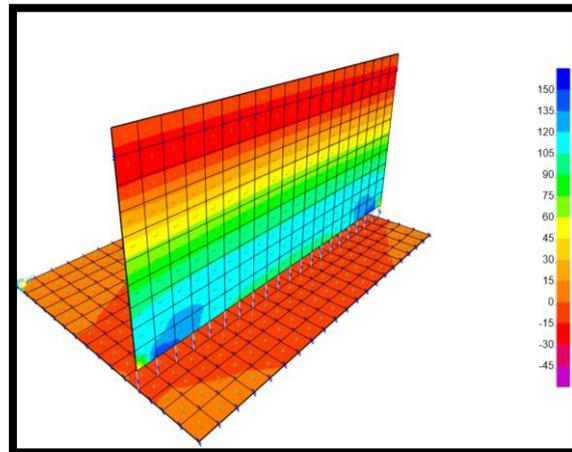


Figura N° 62: Momentos Máximos en el segundo caso (ton.m)

Fuente: Elaboración propia

### 5.5.2. Modelamiento en el Software IRIC

Luego de tener todos los resultados necesarios, se procede a realizar el modelamiento de la estructura en el software IRC, mediante cotas topográficas, este paso es importante para ver si a al tener un obstáculo que impida el flujo del agua.

El área de inundación disminuirá, luego de que el contrafuerte fuera modelado, se puede observar que el área es mínima, no se afecta ninguna zona urbana o ecológica.

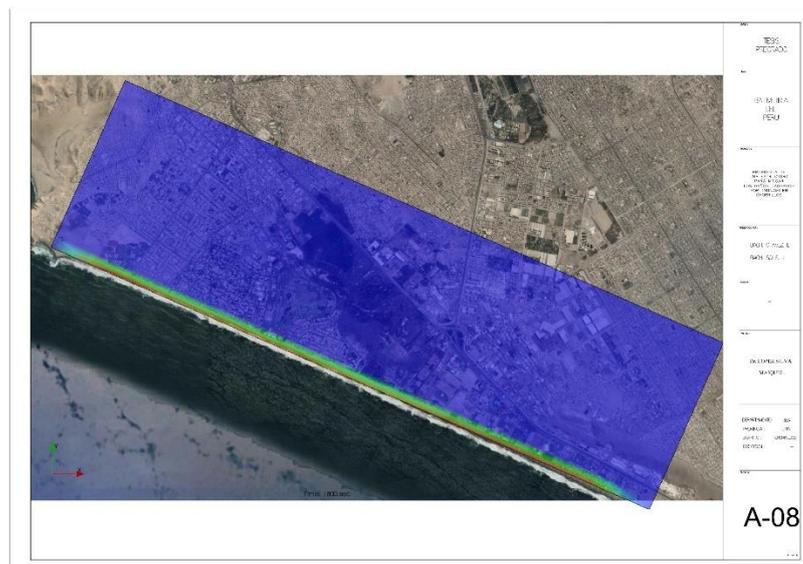


Figura N° 63: Área de Inundación con protección del contrafuerte

Fuente: Elaboración propia

## 5.6. Análisis de Resultados

A través de los resultados derivados de la investigación se puede caracterizar meteorológicamente como una zona húmeda templada la mayor parte del año, a lo largo de la costa peruana esto es un dato común, este fenómeno se sabe desde ya muchos años, como explica Paz S. (1936), “La conformidad del clima costero se revela en que, a pesar de existir una diferencia apreciable de latitud, Arica presenta una media anual de 18°, Mollendo 17° y Lima 19°”

El mar es una zona del Perú importante, ya que por ella recorre e su gran parte la corriente de Humboldt, una corriente fría que ronda los 10° a 8°, que en promedio alcanza olas de 1.9 metros de altura en los meses de invierno y otoño, siendo estos los meses en los cuales la altura de la ola es mayor, debido a que en esos meses en promedio la velocidad del viento aumenta considerablemente debido a los cambios de estación.

Gracias a la batimetría proporcionada y a los análisis realizados, se identifica que la pendiente del lecho marino frente a las costas chorrillanas no presenta una pendiente pronunciada y la cota -100 m.s.n.m esta aproximadamente a cinco kilómetros de la línea marítima. Esto deriva en olas de altitud baja, no presenta oleajes extremos, como explica La universidad católica de Chile en su página web destinada a el estudio de la oceanografía. “En aguas más profundas que la mitad de la longitud de la onda, las partículas orbitantes no entran en contacto con el fondo oceánico, mientras que a profundidades menores que la mitad de la longitud de onda, las orbitas son achatadas por la resistencia debido a la fricción, pierden energía y se dice que la ola “siente el fondo”, con esto es posible evidenciar que a mientras más profundo sea el lecho marino frente a las costas más altura tendrá la ola que azote dicha zona.

Es posible señalar que el modelamiento en el software IRIC del tsunami con un sismo de grado 8 nos dio parámetros para que cálculo de la fuerza y el área afectada en la zona de chorrillos, en la tabla N° 1 se define igual una comparativa de las alturas de las olas y su zona de inundación, en este caso se estima una altura de ola de 6.65 metros de altura y una zona de inundación de 10.98 kilómetros

cuadrados, si lo comparamos con los límites de inundación en casos de sismos de 8.5 y 9 grados respectivamente es posible apreciar que se asemejan bastante a su resultado realizado mediante el software TUNAMI N2 presentado en la carta de inundación en caso de Tsunami Playa Villa Chorrillos del Minagri.

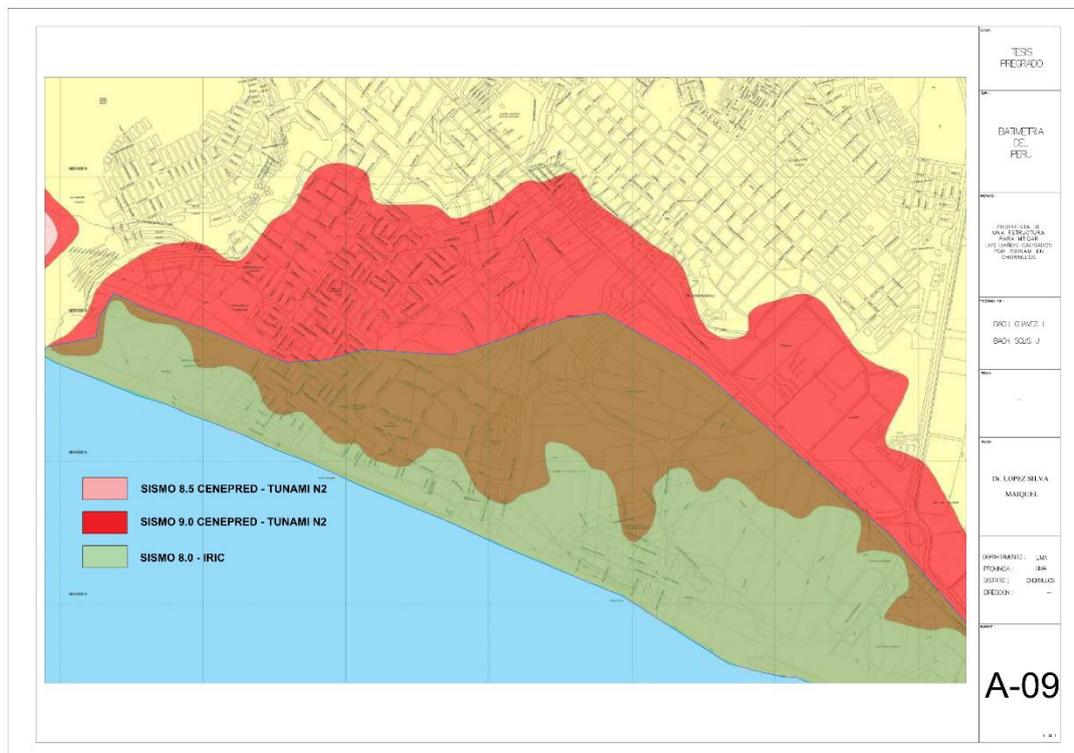


Figura N° 65: Comparación de resultados.

Fuente: Propia

También se constata que según los resultados la altura y fuerza establecidos en la tabla N° 3 de los diferentes grados del tsunami, los grados entre el cinco y el siete tiene poca disimilitud en cuanto a sus efectos, por lo que el modelamiento entre ellos arroja casi los mismos resultados.

El cálculo de las olas se realizó mediante dos fórmulas empíricas, una la de Yamaguchi y la de Salgado, ambas con una gran diferencia, Yamaguchi presenta una fórmula más conservadora, siendo su única variable la distancia a la cual la cota -100 se encuentra y no importa el grado del sismo, pero el especifica que su fórmula trata para un sismo de 7.5 grados aproximadamente, mientras que Salgado utiliza una fórmula basado en un análisis estadístico de tsunamis ocurridos en Sudamérica, comparando ambas se ve que Salgado presenta una altura mayor y que su fórmula mientras más alto sea el grado del sismo la altura aumenta

exponencialmente, esto con fines de cálculo te da una imagen sobredimensionada de la ola, sin embargo por temas de seguridad es la que se usó de referencia para los cálculos.

Para estructuras que sean diseñadas para soportar las fuerzas de un tsunami no solo tiene que resistir el embate de la ola, sino también la el efecto de la erosión, entre tantas estructuras se diseñó un contrafuerte con protección ante erosiones, principalmente con el objetivo de salvaguardar las vidas y los bienes frente a las costas. Como describe el departamento de ingeniería civil y ambiental de la universidad de Waseda en su artículo Implicaciones del tsunami de Tohoku del año 2011 para la gestión de desastres naturales en Japón (2012) “Un elevado número de los rompeolas que fueron diseñados para proteger contra olas generadas por tormentas y tifones sufrieron también grandes daños, y en algunos casos fueron completamente destruidos, como el rompeolas a la entrada del puerto de Onagawa. Estos rompeolas, como resulta evidente, no fueron diseñados con tsunamis en mente y por tanto resulta lógico que fueran dañados”.

La presa por su mismo peso soportará el choque de la ola en ambos casos, tanto el numero 1 como el número 2, y con los resultados del software Sap2000 se podrá realizar un análisis estructural más detallado, teniendo este como resultado una mayor reforzamiento en la zona media baja, que es donde mayormente se concentraron las fuerzas, esto sumado al manto de protección da una estructura estable y como se ve en la figura 65 capaz de soportar un tsunami producido por un sismo de 8.5 grados en la escala de Richter modelado por el software TUNAMI N2.

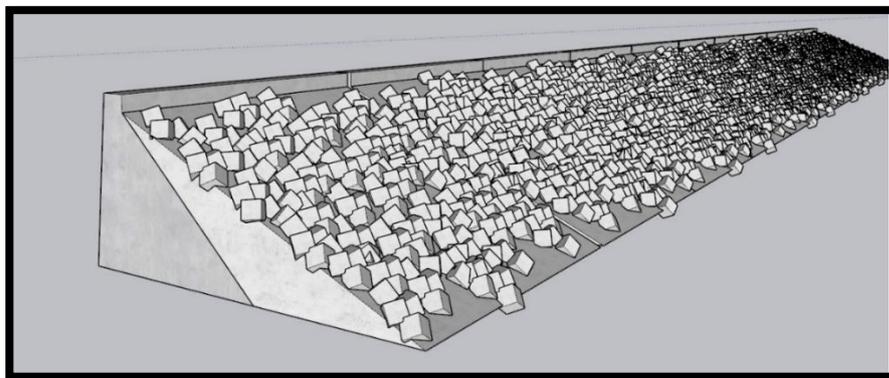


Figura N° 66: Vista 3D del contrafuerte

Fuente: Propia

### 5.7. Contrastación de hipótesis

- Hipótesis principal: Para mitigar los daños causados por el fenómeno del tsunami se diseñará un contrafuerte como estructura de protección costera en la zona de influencia.

La hipótesis se cumple en su totalidad. Se logró obtener una modelación adecuada con el software IRIC donde se obtuvo, que para un sismo de grado 8 la altura de la ola para del tsunami es 6.68 m, considerando esta altura como la altura mínima para el diseño del contrafuerte.

Se diseño un contrafuerte con las siguientes medidas: altura =10 m, profundidad =15 m, espesor = 2m .Además se pudo comprobar el comportamiento de la estructura frente a las fuerzas ejercidas sobre la estructura como : velocidad del viento, fuerza de empuje entre otros ocasionados por el fenómeno del tsunami cumplen permitiendo a su vez salvaguardar las vidas de los habitantes y evitando que las casas y/o edificios colapsen por el tsunami ya que este fenómeno es conocido por su destrucción y colapsos de estructuras provocando la muerte a su paso.

- Hipótesis 1: Se obtendrá la humedad, temperatura, velocidad, dirección del viento, etc.

La hipótesis 1 se cumple en su totalidad. Se pudo recolectar los datos batimétricos atreves del mapa de batimetría del Perú que es una página web de una estación meteorológica que se encuentra en chorrillos. La velocidad del viento se obtuvo de una página web meteorológica Metéoblue. Además, la temperatura y altura de olas se pudo obtener atreves de la página web Seatemperature lo que a su vez era la base de datos necesaria para poder modelar el tsunami en el software IRIC.

- Hipótesis 2: Se obtendrá la altura de inundación a través software IRIC.

La hipótesis 2 mencionada si se cumple debido a que se pudo recolectar las características y datos batimétricos .Además se pudo modelar el tsunami en el software IRIC que a su vez al modelar se pudo obtener la altura de inundación para 8 tipos de grados de diferentes magnitudes se puede observar en el grafico N.º 27 .Además de ello se pudo analizar la altura máxima de inundación se obtiene

con un sismo de grado 9 lo cual se puede observar en la tabla comparativa de magnitud vs altura de inundación en la tabla N°3.

- Hipótesis 3; Se diseñará un contrafuerte como estructura de protección costera para mitigar los daños causados por tsunami.

La hipótesis 3 en mención si se cumple debido se pudo diseñar la estructura adecuada para mitigar los daños causados por el tsunami donde se tomo como medida mínima la altura 6.68 que fue la altura máxima de inundación para un grado de magnitud 8 lo cual se obtuvo del software IRIC las dimensiones obtenidas para un adecuado comportamiento frente a las fuerzas del tsunami se pueden observar en el grafico N°29 .Además de ello se optó por un diseño de un contrafuerte con manto de protección para evitar la socavación provocada por el arrastre de sedimentos al momento de ocurrir el fenómeno del tsunami

## CONCLUSIONES

1. El área de estudio se encuentra entre el centro cultural deportivo de Lima con el club Las Garzas, se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico intencional ya que dicha población se encuentra en una zona vulnerable al encontrarse a pocos metros de las orillas del mar, para poder caracterizar la batimetría del área de estudio se recolectó los datos batimétricos de todo el territorio peruano de GEOGPS-PERU además de delimitar la zona de estudio con el software ARGUIS. La meteorología es un factor importante para el diseño ya que nos brinda diversas características tanto para la modelación como para el diseño de la estructura con lo que podemos concluir que la mayor temperatura superficial del mar se presenta en el mes de febrero con 21 °C y la mínima se presenta en el mes de setiembre descendiendo a 16 °C. La altura máxima en el día se presenta desde las 0:00-3:00 horas del día con una altura de 1.95 m y presentándose la mínima desde las 15:00-21:00 horas del día con 1.8 m. Además de presentar fuertes vientos en el mes de julio con 35 Km/h y de menor intensidad en el mes de diciembre con 10 Km/h.
2. Mediante el software IRIC se pudo obtener la medida de impacto del tsunami con diferentes grados de sismo en la zona de estudio con la cual pudimos observar que para un grado de sismo 9 en escala Richter se obtuvo la mayor altura de inundación con 39.8 m. Los límites de inundación aumentan cada vez que el sismo aumenta de grado. Además, se pudo obtener que la altura promedio de marea es de 2.1 m lo que se mantiene para todos los grados de sismo, cabe recalcar que para sismo de grado 9 en escala Richter se presenta una altura de marea de 27.8 m y área de inundación de 27.1624 km<sup>2</sup>.
3. Se propuso un contrafuerte vertical con manto de protección para evitar el efecto de volteo por la socavación, que se produce al arrastre de sedimentos con la fuerza del agua. Lo que se buscó con el manto de protección es evitar lo mencionado y así poder salvaguardar a los habitantes dándoles la oportunidad de evacuar sus viviendas en caso de colapsar. Se diseñó un contrafuerte con las siguientes características: altura = 10 m, profundidad = 14 m, espesor = 1.5 m con una zapata de 14 m de largo con 15 m de ancho. El peso de la estructura es de 828 ton con un  $F_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  con un factor de seguridad contra el volteo de 6.65 y un factor

de seguridad contra el desplazamiento de 8.866. Según las estimaciones para soporta las cargas producidas, con un factor de seguridad mayor a 1.5 que indica que el diseño es óptimo para un tsunami producido hasta por un sismo de grado 8.5 en la escala de Richter.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la población ubicada en la zona de estudio, comprendida por la urbanización encantada y sus alrededores tener un plan de evacuación eficiente en caso de desastres naturales. Además de un distanciamiento mínimo de 10m a más de las orillas del mar, ya que la presente investigación advierte que para un fenómeno natural de gran magnitud como el tsunami puede llegar a causar grandes daños como el colapsos de casas y/o edificaciones.
2. Se recomienda a las urbanizaciones a orillas del mar contar con una estructura de protección costera, para poder mitigar los daños causados por el tsunami, permitiendo a su vez poder evacuar para así salvaguardar sus vidas, tener una alerta temprana, ya sea sonora o por otro medio a las urbanizaciones situadas a las orillas del mar.
3. Se recomienda desarrollar normas peruanas para un diseño de estructuras de protección costera para mitigación de efectos del tsunami.
4. Para la modelación y diseño de estructuras de protección costera se recomienda usar normas internacionales de países más concurridos con este fenómeno. Para la modelación del tsunami se recomienda el software TUNAMI N2 por su proporción de resultados como el área de inundación, altura de la ola, altura de inundación, las características del sismo, etc. Además, se recomienda iterar con diferentes grados de sismo lo cual nos permite un amplio análisis y mayor precisión de los resultados.
5. Se recomienda para futuras investigaciones el estudio del fenómeno del tsunami debido a ser una investigación muy interesante, además de aportar investigación, información y soluciones para mitigar los daños debido a que no es un tema muy estudiado en nuestro país con el cual podemos aportar a zonas vulnerables la protección y/o mitigación de los daños que podría producir este fenómeno.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

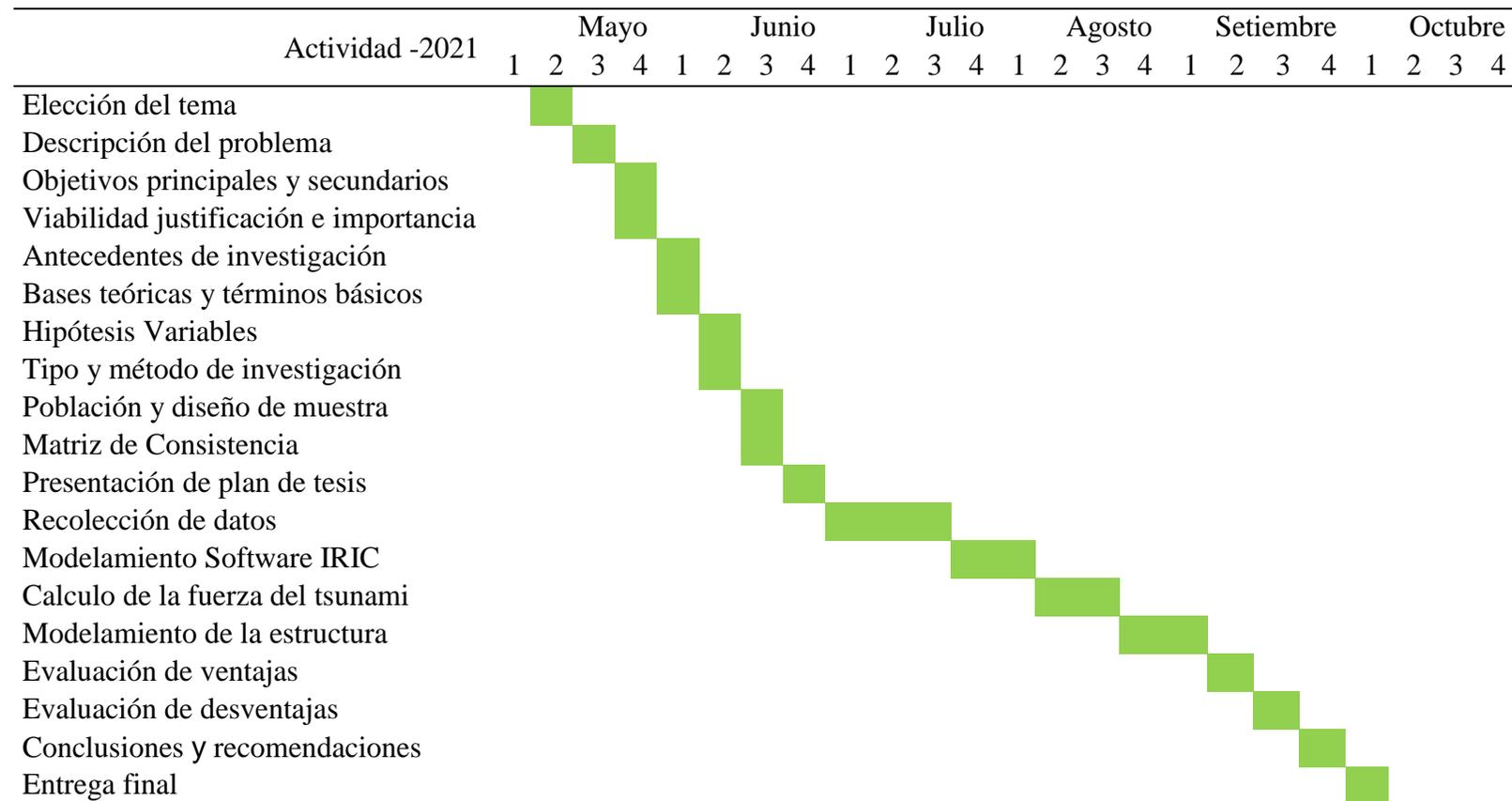
- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme S.A
- Belloso, Rafael (2019) Manual de normas para la elaboración y presentación del trabajo especial de grado, Primera edición, Capitulo III, Metodología de investigación, Fondo editorial de la Universidad Privada, Maracaibo - Venezuela
- Carta batimétrica del Perú (<https://www.geogpsperu.com>)
- Castillejo y Espinoza (2015). Simulación de tsunami para la generación de mapas de inundación y daño en el distrito de ancón (tesis de pregrado) Universidad Ricardo palma, Lima, Perú.
- CENEPRED (2017) escenario de riesgo por sismo y tsunami para lima metropolitana y la provincia constitucional del callao.
- Espinoza Diego (2017) Análisis de la efectividad frente a tsunamis de muros costeros y rompeolas en playa cavacha, Iquique, Chile
- Fabián Hernando Ramírez Atehortúa, Anne Marie Zwerg-Villega ( ), Metodología de la investigación: más que una receta Research Methodology: More than a recipe.
- Francesc Sánchez (2014) La generación de un tsunami, El informista digital periódico independiente desde el subsuelo, Barcelona- España, obtenido en <https://www.elinconfirmistadigital.com/2004/12/28/la-generacion-de-un-tsunami-por-francesc-sanchez/>
- Giraud Herrera, Loraine; Rinaldi Villegas, Arturo (2014) Diseño Urbano y Gestión de Riesgo. Medidas de Mitigación y Prevención para el caso de Tsunamis Provincia, núm. 32, pp. 43-70 Universidad de los Andes Mérida, Venezuela
- Hernando Tavera (2014). Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú.
- Hernández R. (25 de octubre del 2011). Roberto Sampieri visito la UNED. Acontecer digital. Recuperado de <https://www.uned.ac.cr/>
- Ishiwatari, Mikio; Sagara, Junko. (2012) structural measures against tsunamis

- Lozada José (2014) Investigación Aplicada, publicado en: *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, ISSN-e 1390-9592, Vol. 3, N°. 1, 2014.
- Marina de guerra del Perú (2001) Centro nacional de alerta de tsunami. dhn: Que es un tsunami, Perú. Obtenido en [http:// www.dhn.mil.pe](http://www.dhn.mil.pe)
- Sáenz Byron (2017) Propuesta de acciones de reducción de riesgos frente a un tsunami en el malecón de Atacames a partir de un análisis de riesgo integral, Ecuador
- Urra Luisa (2015) Estimación de daños por tsunami en Iquique, Chile
- Winckler, Reyes y Contreras (2011). Recomendaciones de diseño de obras marítimas y terrestres sometidas a cargas de tsunamis, *Anales del instituto de ingenieros de Chile*, vol. 123.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Cronograma de actividades

Tabla N° 5: Cronograma de actividades



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 2: Presupuesto de Actividades

Tabla N° 6: Presupuesto

Descripción	unid	Cantidad	Pu (S/.)	Precio total (S/.)	Financiamiento
Recursos físicos					
Curso de titulación de tesis	glb	2	6000	12000	
Útiles de escritorio	glb	1	100	100	
Materiales	glb	2	150	300	
Servicios					
Internet	glb	2	480	960	Propio
Alimento	glb	2	300	600	
Fotocopias	glb	1	150	150	
Impresiones	glb	1	150	150	
Presupuesto total		14260			

Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 3: Operalización de Variables

Tabla N° 7: Operación de variables

Variable independiente	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Ítem
Mitigación de daños causados por un tsunami	Reducción de la vulnerabilidad, es decir, la atenuación de los daños potenciales sobre la vida y los bienes causados por un evento	Evaluación de daños	Zona afectada	Software IRIC Hoja de calculo Google earth	Modelamiento hidráulico Modelamiento topografico
Variable independiente	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Ítem
Propuesta estructural	La propuesta estructural de un proyecto es aquella que satisface las necesidades del proyecto y cumple con la normativa vigente.	Modelación matemática Diseño hidráulico Diseño estructural	Resistencia	SAP 2000 Reglamento nacional de edificaciones Hoja de calculo	Modelamiento estructural

Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 4: Matriz de consistencia**

Tabla N° 8: Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente	Dimensión	Indicador	Técnicas / instrumentos
¿Cómo una estructura puede mitigar los daños causados por un tsunami?	Realizar una propuesta estructural que mitigue los daños causados por un tsunami en la localidad de chorrillos.	Realizar una propuesta estructural que mitigue los daños causados por un tsunami en la localidad de chorrillos.	Mitigación de daños causados por un tsunami	Evaluación de daños	zona afectada	-Software IRIC -Hoja de cálculo -Google Earth
Problema específico	Objetivo específico	Hipótesis específica	Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Técnicas / instrumentos
Cuáles son las características batimétricas y meteorológicas de la zona.	Caracterizar el área de estudio en función de la batimetría y meteorología.	Se podrá caracterizar el área de estudio en función de la batimetría y meteorología.		Modelación matemática	SAP 2000	
Cuáles son los límites de inundación provocados por un tsunami en chorrillos.	Modelar el oleaje del mar ante condiciones de tsunami con el software IRIC.	Se modelará el oleaje del mar ante condiciones de tsunami con el software IRIC.	Propuesta estructural	Diseño hidráulico	Reglamento nacional de edificaciones	Modelamiento estructural
Cuál es la estructura más adecuada para mitigar los daños causados por tsunami en chorrillos.	Proponer la estructura que mitigue un tsunami en la localidad de chorrillos.	Se propondrá la estructura que mitigue un tsunami en la localidad de chorrillos.		Diseño estructural	Hoja de calculo	

Fuente: Elaboración propia