



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO DE TSUNAMI  
UTILIZANDO EL TERREMOTO DE 1730 PARA EVALUAR  
DAÑO EN EDIFICACIONES EN LA POBLACIÓN VERGARA  
EN VIÑA DEL MAR.**

**Fernanda Camila Pérez Pinto**

Enero 2020

**APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO DE TSUNAMI UTILIZANDO EL  
TERREMOTO DE 1730 PARA EVALUAR DAÑO EN EDIFICACIONES EN LA  
POBLACIÓN VERGARA EN VIÑA DEL MAR.**

**Fernanda Camila Pérez Pinto.**

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

Patricio Winckler G.  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Rodrigo Filippi F.  
Revisor 1

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Patricio Osorio C.  
Revisor 2

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DECLARACIÓN**

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

FERNANDA PÉREZ  
Alumna Memorista

---

PATRICIO WINCKLER  
Profesor Guía

## **AGRADECIMIENTOS**

Durante todos estos años he contado con el apoyo, la fe y la confianza puesta en mí de muchas personas, pero en especial agradezco a mis hermanas Deysi, Gabriela y Melania, por su paciencia, amor y en seguir siempre adelante a pesar de los problemas que nos ha puesto la vida. También agradezco a mis tatas, a Juani y tía Lili por su infinita fe en mí, y mi amigo, consejero y pololo Felipe por ayudarme a enfrentar este difícil camino, a ustedes infinitas gracias.

Como no agradecer a mi hermano perdido Danilo, a mi tía Gaby y su familia por apoyarme a mí y a mis hermanas durante tantos años, también por las palabras de ánimo la Sra. Graciela y Don Ernesto. A mi amiga Elizabeth que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas y a su familia.

A mis grandes amigos en este largo proceso Stephanie y Pablo, por todas esas conversaciones épicas con un café, tratando de arreglar el mundo, viendo como seguir o terminar un trabajo o como estudiar para un ramo, ¡¡¡chiquillos gracias por todo!!!. A las tías del quiosco, la tía Clari, tía Sole y a Erwin por ese tecito para el frío y brindar su cariño. A las tías del aseo por siempre tratarme con cariño cuando nos encontrábamos en los pasillos de la UV; a pesar de su cansancio siempre estaban dispuestas a entregar un momento cálido.

Mis agradecimientos a mi Profesor Guía Patricio Winckler, por sus consejos y recomendaciones sobre mi estudio, a Rodrigo Filippi, Patricio Osorio y al equipo del laboratorio DOP por ayudarme y entregarme información sobre el Modelo y tsunami, al Profesor Yamazaki por dejarme utilizar el Modelo NEOWAVE y confiar en mí cuando le presente la idea, al Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile por permitirme utilizar LEFTRARU para poder realizar las simulaciones.

A todos mis compañeros con los que hemos compartido todos estos años, a mis profesores durante la carrera, a todos por ser parte de una u otra forma de mi formación de Ingeniero, agradezco haber compartido con ustedes, a la Sra. Virginia Sánchez y Profesor David Jamet por creer en mí y darme la oportunidad de seguir adelante con la carrera.

Finalmente agradezco a la persona más importante de mi vida, que a pesar que no esté conmigo de forma física, sin sus enseñanzas y ejemplo no sería la mujer que soy y no hubiera perseverado como lo he hecho, a JORGE PÉREZ, mi papá, gracias por todo, gracias gracias gracias!!!.

## **DEDICATORIA**

**Para mi Papá.**

*“Eres más valiente de lo que piensas.  
Más fuerte de lo que pareces. Y más  
Inteligente de lo que crees.”*

**Alan Milne.**

## **CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>2. DEFINICIONES</b> .....	15
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>4. ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	19
4.1 ALCANCES.....	19
4.2 LIMITACIONES.....	19
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	20
<b>6. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	21
6.1 HISTORIA SÍSMICA CHILE CENTRAL.....	21
6.2 HISTORIA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
6.3 RUPTURA.....	23
6.4 BATIMETRÍA Y TOPOGRAFÍA.....	25
6.5 MODELO NUMÉRICO NEOWAVE.....	26
6.5.1 FORMULACIÓN TEÓRICA.....	27
6.5.2 ECUACIONES DE GOBIERNO TRIDIMENSIONALES.....	27
6.5.3 ECUACIONES DE GOBIERNO INTEGRADAS EN LA PROFUNDIDAD....	29
6.5.4 RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL.....	34
6.6 CURVAS DE FRAGILIDAD.....	38
6.6.1 OBTENCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	39
6.6.2 MÉTODOS PROBABILÍSTICO.....	40
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	41
7.1 PRE-PROCESO.....	42
7.1.1 ANÁLISIS DE AMENAZA.....	42
7.1.2 MODELO DE FALLA.....	44
7.1.3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA.....	45
7.1.4 INTERPOLACIÓN.....	45
7.2 PROCESO.....	47
<b>8. RESULTADOS</b> .....	59
8.1 RESULTADOS MODELACIÓN NEOWAVE.....	59

8.1.1	MALLA GRUESA.....	59
8.1.2	MALLA FINA.....	61
8.2	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN MODELADA .....	64
8.3	ANÁLISIS DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	67
8.4	PÉRDIDA ECONÓMICA.....	72
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
9.1	CONCLUSIONES.....	74
9.2	TRABAJOS FUTUROS.....	76
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN ...</b>	<b>77</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>80</b>

## **INDICE DE ILUSTRACIONES**

ILUSTRACIÓN 1, MARCO TECTÓNICO DE CHILE.....	13
ILUSTRACIÓN 2, POBLACIÓN VERGARA.....	14
ILUSTRACIÓN 3, SECUENCIA CRONOLÓGICA DE TERREMOTOS EN CHILE CENTRAL.....	21
ILUSTRACIÓN 4, UBICACIÓN SISMOS INTERPLACA E INTRAPLACA.....	24
ILUSTRACIÓN 5, ESQUEMA DEL FLUJO DE SUPERFICIE LIBRE GENERADO POR LA DEFORMACIÓN DEL FONDO MARINO.....	27
ILUSTRACIÓN 6, RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL.....	36
ILUSTRACIÓN 7, CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO.....	40
ILUSTRACIÓN 8, DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.....	41
ILUSTRACIÓN 9, ZONAS DE RUPTURA DE GRANDES TERREMOTOS QUE HAN AFECTADO EL CENTRO DE CHILE.....	43
ILUSTRACIÓN 10, FALLA PLANA EN TRES DIMENSIONES .....	44
ILUSTRACIÓN 11, SPLINES EN TENSIÓN .....	45
ILUSTRACIÓN 12, RUPTURA.....	48
ILUSTRACIÓN 13, SETEO RUPTURA.....	49
ILUSTRACIÓN 14, INICIO RUPTURA.....	50
ILUSTRACIÓN 15, SETEO TIEMPO DE MODELACIÓN.....	50
ILUSTRACIÓN 16, INTERFAZ DE CUADRÍCULA.....	51
ILUSTRACIÓN 17, SETEO MALLAS.....	52
ILUSTRACIÓN 18, SETEO INTERACCION MALLAS.....	52
ILUSTRACIÓN 19, MALLA 01. ....	53
ILUSTRACIÓN 20, MALLA 02. ....	53
ILUSTRACIÓN 21, MALLA 03. ....	54
ILUSTRACIÓN 22, MALLA 04. ....	54
ILUSTRACIÓN 23, CUADRAS INUNDADAS.....	56
ILUSTRACIÓN 24, CURVA DE FRAGILIDAD MADERA.....	57
ILUSTRACIÓN 25, CURVA DE FRAGILIDAD ACERO.....	58
ILUSTRACIÓN 26, CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.....	58
ILUSTRACIÓN 27, PROPAGACIÓN TSUNAMI.....	60
ILUSTRACIÓN 28, INUNDACIÓN POR TSUNAMI.....	62
ILUSTRACIÓN 29, NIVEL MÁXIMO DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA .....	63
ILUSTRACIÓN 30, INUNDACIÓN ZONA DE INTERÉS.....	63
ILUSTRACIÓN 31, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA .....	65
ILUSTRACIÓN 32, PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA. .....	65
ILUSTRACIÓN 33, NÚMERO ESTIMADO DE EDIFICIOS DAÑADOS PARA SEIS NIVELES DE INUNDACIÓN Y CUATRO NIVELES DE DAÑO.....	70
ILUSTRACIÓN 34, SECTOR DE MENOR INUNDACIÓN.....	71
ILUSTRACIÓN 35, EDIFICIO TIPO.....	72
ILUSTRACIÓN 36, CUADRAS POR VALOR ECONÓMICO.....	72
ILUSTRACIÓN 37, PÉRDIDA POR DAÑO COMPLETO .....	73

ILUSTRACIÓN 38, INUNDACIÓN CUADRA C01_1.....	80
ILUSTRACIÓN 39, INUNDACIÓN CUADRA C01_2.....	80
ILUSTRACIÓN 40, INUNDACIÓN CUADRA C01_3.....	81
ILUSTRACIÓN 41, INUNDACIÓN CUADRA C01_4.....	81
ILUSTRACIÓN 42, INUNDACIÓN CUADRA C01_5.....	82
ILUSTRACIÓN 43, INUNDACION CUADRA C02_1.....	82
ILUSTRACIÓN 44, INUNDACIÓN CUADRA C02_2.....	83
ILUSTRACIÓN 45, INUNDACION CUADRA C03_1.....	83
ILUSTRACIÓN 46, INUNDACIÓN CUADRA C03_2.....	84
ILUSTRACIÓN 47, INUNDACIÓN CUADRA C03_3.....	84
ILUSTRACIÓN 48, INUNDACIÓN CUADRA C03_4.....	85
ILUSTRACIÓN 49, INUNDACIÓN CUADRA C03_5.....	85
ILUSTRACIÓN 50, INUNDACIÓN CUADRA C04_1.....	86
ILUSTRACIÓN 51, INUNDACIÓN CUADRA C04_2.....	86
ILUSTRACIÓN 52, INUNDACIÓN CUADRA C04_3.....	87
ILUSTRACIÓN 53, INUNDACIÓN CUADRA C04_4.....	87
ILUSTRACIÓN 54, INUNDACIÓN CUADRA C04_5.....	88
ILUSTRACIÓN 55, INUNDACIÓN CUADRA C04_6.....	88
ILUSTRACIÓN 56, INUNDACIÓN CUADRA C05_1.....	89
ILUSTRACIÓN 57, INUNDACIÓN CUADRA C05_2.....	89
ILUSTRACIÓN 58, INUNDACIÓN CUADRA C05_3.....	90
ILUSTRACIÓN 59, INUNDACIÓN CUADRA C05_4.....	90
ILUSTRACIÓN 60, INUNDACIÓN CUADRA C05_5.....	91
ILUSTRACIÓN 61, INUNDACIÓN CUADRA C05_6.....	91
ILUSTRACIÓN 62, INUNDACIÓN CUADRA C06_1.....	92
ILUSTRACIÓN 63, INUNDACIÓN CUADRA C06_2.....	92
ILUSTRACIÓN 64, INUNDACIÓN CUADRA C06_3.....	93
ILUSTRACIÓN 65, INUNDACIÓN CUADRA C06_4.....	93
ILUSTRACIÓN 66, INUNDACIÓN CUADRA C06_5.....	94
ILUSTRACIÓN 67, INUNDACIÓN CUADRA C07_1.....	94
ILUSTRACIÓN 68, INUNDACIÓN CUADRA C07_2.....	95
ILUSTRACIÓN 69, INUNDACIÓN CUADRA C07_3.....	95
ILUSTRACIÓN 70, INUNDACIÓN CUADRA C07_4.....	96
ILUSTRACIÓN 71, INUNDACIÓN CUADRA C08_1.....	96
ILUSTRACIÓN 72, INUNDACIÓN CUADRA C08_2.....	97
ILUSTRACIÓN 73, INUNDACIÓN CUADRA C08_3.....	97
ILUSTRACIÓN 74, INUNDACIÓN CUADRA C09_1.....	98
ILUSTRACIÓN 75, INUNDACIÓN CUADRA C09_2.....	98
ILUSTRACIÓN 76, INUNDACIÓN CUADRA C09_3.....	99
ILUSTRACIÓN 77, INUNDACIÓN CUADRA C10_1.....	99
ILUSTRACIÓN 78, INUNDACIÓN CUADRA C10_2.....	100
ILUSTRACIÓN 79, INUNDACIÓN CUADRA C11_1.....	100
ILUSTRACIÓN 80, INUNDACIÓN CUADRA C12_1.....	101
ILUSTRACIÓN 81, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 1.....	101
ILUSTRACIÓN 82, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 2.....	102

ILUSTRACIÓN 83, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 3.....	102
ILUSTRACIÓN 84, PERFILES TOPOGRÁFICOS.....	103
ILUSTRACIÓN 85, CORTE TRANSVERSAL INUNDACIÓN.....	103
ILUSTRACIÓN 86, INUNDACIÓN Y UBICACIÓN CUADRAS.....	104
ILUSTRACIÓN 87, ONDA DE TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 1.....	104
ILUSTRACIÓN 88, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 2.....	105
ILUSTRACIÓN 89, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 3.....	105
ILUSTRACIÓN 90, ONDA TSUNAMI, MUELLE VERGARA.....	106
ILUSTRACIÓN 91, CITSU VIÑA DEL MAR.....	106
ILUSTRACIÓN 92, DEM USADA EN MODELO.....	107
ILUSTRACIÓN 93, DEM REGIÓN DE VALPARAÍSO.....	107
ILUSTRACIÓN 94, CUADRAS POR VALOR ECONOMICO.....	108
ILUSTRACIÓN 95, PÉRDIDAS POR DAÑO COMPLETO.....	109

## **INDICE DE TABLAS**

TABLA 1, MAGNITUD SEGÚN ÁREA DE RUPTURAS. ....	23
TABLA 2, NIVELES DE DAÑO. ....	38
TABLA 3, DATOS RUPTURA. ....	47
TABLA 4, TAMAÑO MALLAS. ....	55
TABLA 5, ESPACIAMIENTO. ....	55
TABLA 6, UBICACIÓN LUGARES DE INTERÉS.....	56
TABLA 7, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POR CUADRA ESTUDIADA. ....	67
TABLA 8, PARÁMETROS CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.....	69
TABLA 9, PORCENTAJE DE DAÑOS ACUMULADO RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD. ....	69
TABLA 10, EDIFICACIONES DAÑADAS RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD. ....	70
TABLA 11, PÉRDIDA ECONÓMICA ACUMULADA TOTAL EN USD. ....	73

## **RESUMEN**

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, y donde se ha producido el evento sísmico más grande y energético del que se tiene registro, el terremoto de Valdivia 1960 (9.6  $M_w$ ). La preparación ante una emergencia por la ocurrencia de un tsunami implica generar estudios de simulación de eventos de importancia con el objetivo de apoyar la toma de decisiones.

La estimación de daños por eventos de tsunami puede ser evaluada por medio de modelos numéricos, un ejemplo de ello es el modelo Non-hydrostatic Evolution of Ocean WAVES (NEOWAVE), desarrollado por la Universidad de Hawaii. NEOWAVE es un modelo que utiliza las ecuaciones no lineales de aguas someras y las ecuaciones Boussinesq en sus distintos niveles de anidamiento.

Nuestro país está localizado en una zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, donde la primera subyace a la segunda, es muy útil la aplicación de modelos numéricos que permitan cuantificar la magnitud del impacto de un tsunami, para así tomar las medidas de mitigación, prevención y reducción del riesgo de desastre, definir estados de alerta y alarma, que tienen por finalidad evitar o disminuir los efectos adversos del tsunami en la población y disminuir el daño a la infraestructura.

El presente trabajo muestra la aplicación de NEOWAVE y el posterior análisis de curvas de fragilidad para la Población Vergara, Viña del Mar, región de Valparaíso; sector expuesto que se encuentra en una zona donde existe un GAP sísmico considerable de aproximadamente de 300 años. Para este análisis se utiliza el sismo ocurrido el 8 de julio de 1730, donde el sector de estudio se encontraba ocupado por dos extensas haciendas, de uso rural y agrícola, por ello la importancia de revisar un evento tsunamigénico en el sector y la pérdida económica que produciría.

La simulación muestra que el tsunami arribaría a la primera línea de Viña del Mar a los 13 minutos de terminado el terremoto, generando inundaciones de 7 [m] de profundidad, de esta forma utilizando la inundación se realizó un análisis de daño probable por medio de curvas de fragilidad creadas según los diferentes niveles de inundación, los tipos de daños que serán menor, moderado, mayor y completo en la zona de estudio. Los efectos de este tsunami serían devastadores para la población Vergara, múltiples puntos de interés como equipamiento médico, hoteles, casino Municipal, equipamiento educacional y policiales se encuentran en zonas expuestas. El costo económico que produciría el tsunami en la infraestructura podría llegar a los \$115 millones de dólares.

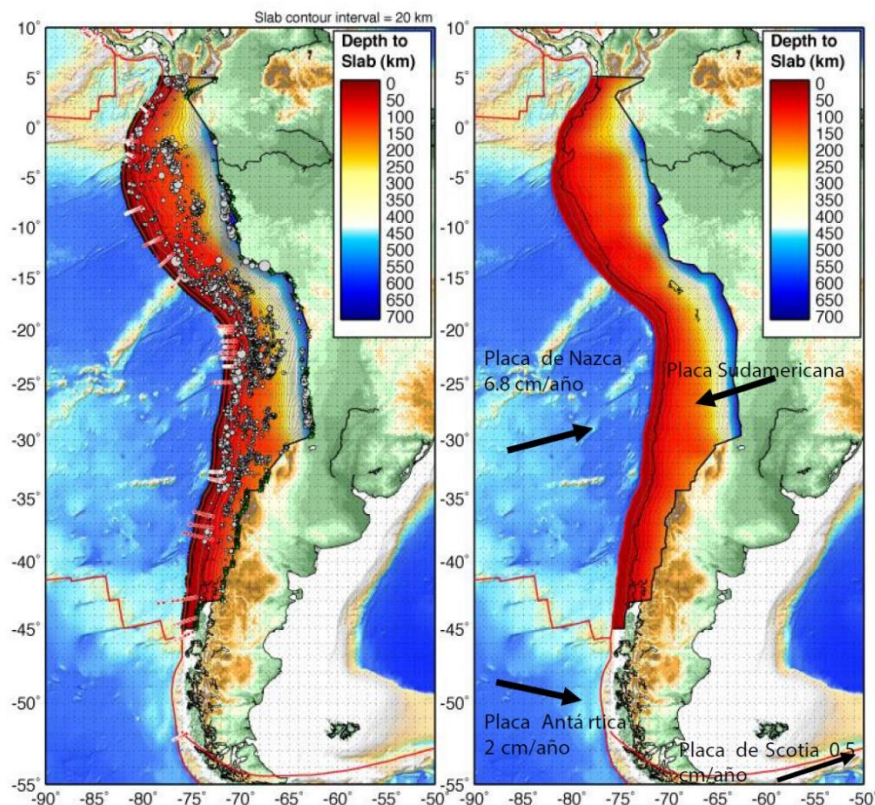
# 1. INTRODUCCIÓN

Chile está ubicado en América del Sur, siendo una delgada faja de tierra que en su extremo Norte limita con el Perú, al Este con Bolivia y Argentina, al Sur con el continente Antártico y al Oeste con el Océano Pacífico.

En términos geológicos, nuestro país se encuentra ubicado sobre la placa Sudamericana, la que converge a la placa de Nazca generando zonas de subducción entre ambas placas (ilustración 1). Estas interacciones producen una gran deformación del continente Sudamericano, y producen terremotos en todo Chile. Debido a la alta velocidad de convergencia entre Nazca y Sudamérica, la sismicidad en esa zona es la más intensa y produce los mayores terremotos en el país (CSN, 2014).

La ilustración 1. - (Izq.) Marco tectónico de Chile. Se muestran las placas que interactúa con la Placa Sudamericana, indicando la dirección y velocidad de convergencia. Los colores indican la profundidad alcanzada por la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Los puntos de color blanco son sismos que permiten determinar la profundidad y geometría de la zona de subducción (CSN, 2014).

ILUSTRACIÓN 1, MARCO TECTÓNICO DE CHILE.



Fuente: Centro Sismológico Nacional (CSN) U. Chile.

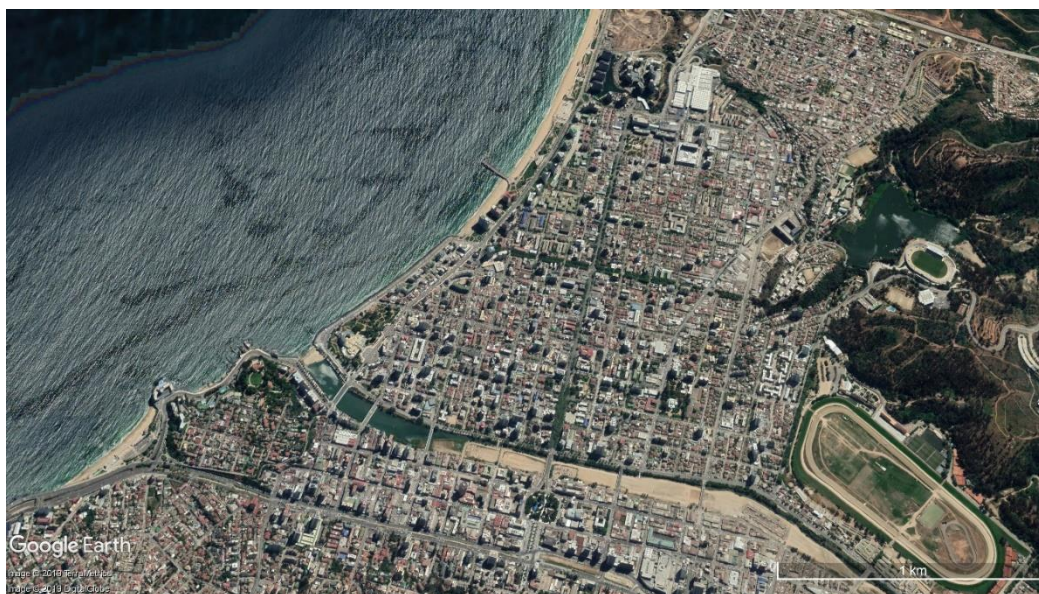
Viña del Mar se caracteriza por una alta densidad de poblacional, caracterizada principalmente por el desarrollo inmobiliario vertical, es decir, edificios que en poco espacio

pueden llegar a concentrar cientos de personas. Para analizar el riesgo de tsunami es necesario comprender la respuesta de edificaciones a las inundaciones para idear prácticas de diseño elaboradas con fines de seguridad. Un ejemplo de esto es el centro de Viña de Mar, es decir la Población Vergara (ilustración 2), donde la planificación del sector toma importancia frente a la ocurrencia de un terremoto y tsunami.

Es necesario considerar que los tsunamis son fenómenos infrecuentes, pero altamente destructivos, por lo que generan gran interés en la comunidad científica, donde, diversos centros de investigación han desarrollado trabajos para disminuir su impacto en la población. Es por ello, la importancia de estimar el daño que se produciría en el sector frente a un terremoto y tsunami como el ocurrido del 8 de julio de 1730. Cabe destacar que el sector de estudio estaba ocupado por dos extensas haciendas en esa época por lo cual no se cuenta con registro del daño provocado por el tsunami.

En este estudio, se utiliza la modelación numérica de NEOWAVE para la propagación de tsunami en el océano Pacífico luego de un terremoto en la costa central de Chile. El modelo se basa en las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSWE), aumentadas con la aproximación de Boussinesq para tener en cuenta los efectos de dispersión en la propagación del tsunami (Carvajal, 2015). Del resultado del modelo se entrega la profundidad de inundación y se realiza un análisis de fragilidad en edificios expuestos a la acción de un tsunami en el sector de estudio. Mediante este estudio se ensayan técnicas robustas de mitigación de desastres para evitar pérdidas humanas y daños a la propiedad tanto pública como privada.

*ILUSTRACIÓN 2, POBLACIÓN VERGARA.*



Fuente: Google Earth (1[cm] a 1[km]).

## 2. DEFINICIONES

Para esta memoria se deben conocer las siguientes definiciones:

- **Amenaza, peligro o peligrosidad:** Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado (Cardona, 2001).
- **Exposición:** La situación de las personas, la infraestructura, la vivienda, las capacidades de producción y otros activos humanos tangibles ubicados en áreas propensas a los peligros (UNISDR, 2019).
- **Riesgo específico:** Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad (Cardona, 2001).
- **Elementos en riesgo:** Son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada (Cardona, 2001).
- **Riesgo total:** Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir el producto del riesgo específico, y los elementos en riesgo (Cardona, 2001).
- **Alerta:** Hace referencia a una situación de vigilancia o atención. Un estado o una señal de alerta es un aviso para que se extremen las precauciones o se incremente la vigilancia (Valderrama, 2010).
- **Alarma:** Es señal con que se avisa de la existencia de un peligro o de alguna anomalía (Valderrama, 2010).
- **Desastre natural:** hace referencia a las enormes pérdidas materiales y vidas humanas ocasionadas por eventos o fenómenos naturales, como terremotos, inundaciones, tsunamis, deslizamientos de tierra, y otros. De acuerdo con la “*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*” (UNISDR), los desastres no son naturales, sino que son el resultado de las omisiones y la falta de prevención y planificación ante los fenómenos de la naturaleza. Desde esta perspectiva, los desastres no suelen ser naturales pues mientras que los fenómenos son naturales, los desastres se presentan por la acción del hombre en su entorno (UNISDR, 2018).
- **Destrucción:** Inutilización total o desaparición de alguna cosa (UNISDR, 2018).
- **Tsunami:** Es un fenómeno físico que se origina por sismos que ocurren bajo o cerca del fondo oceánico, remociones en masa, derrumbes submarinos, erupciones volcánicas, caída de objetos desde el espacio como meteoritos y se manifiestan en la costa como una gran masa de agua que puede inundar y causar destrucción en

zonas costeras. Estas ondas pueden llegar a alcanzar enormes dimensiones y pueden atravesar cuencas oceánicas enteras con poca pérdida de energía. Éstas avanzan como ondas gravitatorias ordinarias con un periodo típico entre 10 y 60 minutos. Los tsunamis se profundizan e incrementan en altura conforme se acercan a aguas poco profundas, inundando áreas en zonas bajas y donde la batimetría causa la amplificación de las ondas producto de lo anterior, estas pueden causar enormes daños (Ortega, 2011).

- **Curvas de Fragilidad:** Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada, de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico (FEMA, 1999).
- **Inundación horizontal:** Distancia horizontal inundada medida desde la línea de costa y generalmente medida en forma perpendicular a la costa (Espinoza, 2015).
- **Máxima intrusión horizontal:** Máxima distancia de inundación horizontal alcanzada para una zona costera. Es posible que su determinación considere más de un evento de tsunami, en cuyo caso corresponderá a la envolvente de las Líneas de Inundación de eventos individuales (Espinoza, 2015).
- **Línea de Inundación,  $I(x,y)$ :** Lugar geométrico de todos los puntos correspondientes a la máxima intrusión horizontal del tsunami. Es posible que su determinación considere más de un evento de tsunami, en cuyo caso corresponderá a la envolvente de las Líneas de Inundación de eventos individuales (Espinoza, 2015).
- **Run-Up,  $R(x,y)$ :** Diferencia entre la cota del punto de máxima intrusión horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami NRE (Nivel de Referencia del Evento). Se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R(x,y) = z(I(x,y)) - NRE \quad (2.1)$$

Se debe notar que, para una zona de estudio dada, el valor de Run-Up no es único, ya que es función de la topografía. En lugares donde la cota no está medida en relación con la máxima intrusión horizontal, esta diferencia se llama altura o cota de inundación (Espinoza, 2015).

- **Distribución de Run-Up:** Conjunto de valores que alcanza el Run-Up a lo largo de una zona costera determinada (Espinoza, 2015).
- **Altura o Cota de Inundación,  $h(x,y)$ :** Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido en cada punto durante el evento y el nivel de referencia del evento NRE relevante al tsunami para una distancia de inundación específica (Espinoza, 2015).
- **Profundidad de Inundación,  $d(x,y)$ :** Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido durante el evento y la cota de terreno existente en el mismo

punto. Su unidad de medida es en metros. De acuerdo con las definiciones anteriores, puede ser estimado como:

$$d(x,y) = h(x,y) - z(x,y) \quad (2.2)$$

(Espinoza, 2015)

- **Velocidad del flujo,  $\vec{U}(x,y,t)$ :** Vector de velocidad del flujo en cada punto del dominio. Es una cantidad variable en el tiempo, tanto en sentido como magnitud. (Espinoza, 2015).
- **Tiempo de arribo del tsunami:** Tiempo de llegada de la primera onda del tsunami. Los mapas de tiempo de arribo consideran el minuto en que se produce el primer contacto entre el flujo de agua y la tierra (Espinoza, 2015).
- **Estructura crítica:** corresponde a toda aquella respecto de la cual el Gobierno y la sociedad dependen para funcionar. Son esenciales para las capacidades de resiliencia ante desastre y corresponden a los principales focos de esfuerzos de restauración una vez ocurrido el evento (Chile, 2017).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el daño en edificaciones del sector de la Población Vergara en Viña del Mar, ante un tsunami con características similares al terremoto ocurrido en 1730, utilizando NEOWAVE como modelo numérico de simulación de tsunami y curvas de fragilidad para determinar daños de estructuras del sector.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos del presente proyecto son:

- Definir modelo de ruptura del terremoto.
- Definir zona inundable utilizando la topografía y batimetría del sector de estudio.
- Determinar la profundidad de inundación de tsunami, utilizando el modelo NEOWAVE.
- Evaluar el daño de edificación.
- Analizar curvas de fragilidad.
- Evaluación del impacto económico de los daños esperados.

## **4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **4.1 ALCANCES**

Los alcances de este proyecto son:

- La modelación numérica realizó con NEOWAVE (Yamazaki, et al., 2009).
- Se utilizó la ruptura del terremoto de 1730 (Aranguiz & Quiroz, 2014).
- El sector de estudio Población Vergara en Viña del Mar (Barría, et al., 2017).
- Evaluación de daños de edificios se desarrolló con la metodología de Suppasri (2012)

### **4.2 LIMITACIONES**

Las limitaciones de este proyecto de título son:

- Modelado en 2D.
- Tiempo de modelado.
- La topografía y batimetría es limitada al no poseer grandes volúmenes de topográfica de detalle, se ha considerado el uso de topografía de precisión solo en el lugar de interés.
- Las cuadras analizadas presentan un variado nivel ocupacional, para efectos de simplificar el análisis se consideró solo aquellas cuadras cuya planificación territorial responda a usos habitacionales y comerciales.
- Las curvas de fragilidad se utilizan solo en edificaciones de Hormigón Armado para facilitar el análisis y cuantificar el daño a través del estudio de Cox (2013).

## 5. HIPÓTESIS

Se plantea la ocurrencia de un terremoto, y tsunami con las características similares al evento de 1730. En el centro de Viña del Mar donde se podrían generar daños debido a los efectos de un tsunami y un terremoto de  $8.8 M_w$ , una ruptura de  $450 [Km]$  de largo y  $140 [Km]$  de ancho (Aranguiz & Quiroz, 2014). Este causaría daños en infraestructuras al menos desde Copiapó por el norte hasta Concepción por el sur (Carvajal, 2015).

Para validar esta hipótesis se modelo con NEOWAVE y se estiman los efectos de este sobre las edificaciones de Hormigón Armado de la Población Vergara Viña del Mar por medio de curvas de fragilidad.

## 6. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 6.1 HISTORIA SÍSMICA CHILE CENTRAL

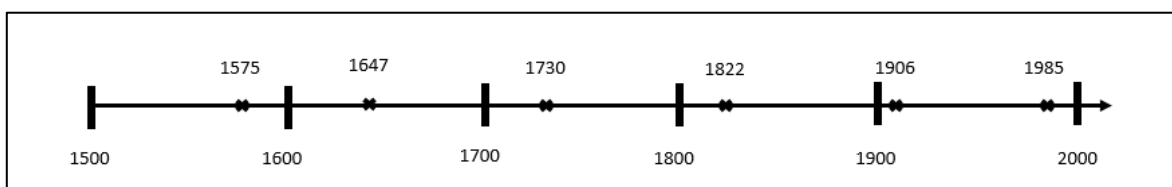
La zona central de Chile es una de las cinco regiones naturales en que la CORFO dividió Chile en 1950. Sus límites son el río Aconcagua por el norte y el río Biobío por el sur. Incluye la mitad sur de la región de Valparaíso (el archipiélago de Juan Fernández), la Metropolitana, O'Higgins, Maule, la parte norte de la región del Biobío y el extremo que se encuentra al norte del río Biobío de la comuna de Lonquimay en la Araucanía (CORFO, 2018).

Históricamente, ha sido la principal zona del país y con el mayor número de habitantes (reúne cerca del 79% de la población total del país). En esta zona se concentra el mayor porcentaje de la productividad económica del país, debido a su favorable clima mediterráneo (Cisternas, 2017).

Los registros históricos de terremotos ocurridos en la zona central del país han sido descritos por medio de testigos del evento o por diversos documentos en los que se mencionan la ocurrencia y destrucción provocada (Cisternas, 2017).

La recopilación de la historia sísmica de Chile, estuvo en primeras instancias en manos de Perrey (1854) y luego por Montessus De Ballore (1911-1916) quien fue el primer director del Servicio Sismológico Nacional, siendo estos trabajos la base del catálogo sísmico chileno, escrito por Lomnitz (1970).

*ILUSTRACIÓN 3, SECUENCIA CRONOLÓGICA DE TERREMOTOS EN CHILE CENTRAL.*



Fuente: Recopilación de datos Tesis Matías Carvajal, elaboración propia.

La ilustración 3 considera sólo los terremotos importantes cuyas rupturas son completamente contenidas en el segmento definido anteriormente como Chile central. No considera los terremotos cuyas rupturas se propagan más al sur de  $37^{\circ}S$  (e.g. 27/02/2010) o más al norte de  $32^{\circ}S$  (e.g. 10/11/1922) (Carvajal, 2015).

## 6.2 HISTORIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Viña del Mar es una comuna y ciudad perteneciente a la Provincia y Región de Valparaíso en Chile y que, en conjunto con las comunas de Valparaíso, Quilpué, Villa Alemana y Concón, forman el Área Metropolitana de Valparaíso. En Viña del Mar se encuentra la población Vergara que cubre desde el norte del estero Marga Marga hasta la calle 15 norte (ilustración 2).

Fue José Francisco Vergara, un político e ingeniero chileno quien contrajo matrimonio con Mercedes Álvarez Prieto, única heredera de las tierras que estaban divididas en dos grandes haciendas: la "Viña de la Mar" (desde el estero Marga Marga hasta la haciendilla de Reñaca, y desde el mar hasta el sector del Olivar) y "las Siete Hermanas" (desde estero Marga Marga hasta el sector del Rodeo de Lillo (Rodelillo) y desde el sector del Puente Las Cucharas, hasta el Cerro Barón) (Santiago, 2018).

Vergara fue quien propuso la creación de una ciudad independiente de Valparaíso, lo que finalmente se produjo el 30 de mayo de 1878, cuando se autorizó la creación de la Municipalidad de Viña del Mar. Así en 1892, Salvador Vergara Álvarez, fundó la Población Vergara. En agosto de 1906, se produjo un terremoto que azotó la zona, dejando a la ciudad de Valparaíso virtualmente en el suelo, lo que llevó a importantes industrias y a las familias a trasladarse a Viña del Mar, específicamente a la población Vergara, transformándose en una incipiente ciudad industrial y de dormitorio, situación que se mantuvo hasta 1928, ya que, se autoriza a la Municipalidad a contratar un empréstito externo, que servirá para llevar adelante una serie de obras que modificarán su fisonomía y destino como ciudad (Santiago, 2018).

Es así como se inician los trabajos y la transformación del sector. Surgen durante los siguientes años obras tan importantes como el casino municipal, el teatro municipal, y la piscina de 8 norte, compra de laguna Sausalito y la construcción del futuro estadio, de la piscina de recreo, del coliseo deportivo, de baños públicos, del Hotel O'Higgins, del balneario de caleta Abarca, pavimentación de camino costero a Concón, y el hermoseamiento del borde costero. Este proceso continúa promediando la década de 1950, ya que, la ciudad comienza a experimentar nuevos y significativos cambios en su fisonomía urbanística; las viejas casas quinta y mansiones, emplazadas principalmente en la zona céntrica y Población Vergara, comienzan a ser reemplazadas por edificaciones de altura, fenómeno que sigue hasta nuestros días (Santiago, 2018).

Actualmente encontramos un sector que cuenta con viviendas, actividades comerciales, oficinas, servicios bancarios, educacionales, de salud, transporte, hotelería y turismo, entre otros.

### 6.3 RUPTURA

Existen dos tipos de sismos que se producen comúnmente en las costas chilenas: los eventos intraplaca que ocurren dentro de una placa tectónica, y los eventos interplaca que ocurren en los límites de dos placas tectónicas (ilustración 4). La ruptura en fallas interplaca tiene profundidades entre 5 y 50 *km*, zona donde la fuerza de roce relativo entre las placas traba el movimiento relativo entre ellas, las que se pueden mover sólo cuando la fuerza neta en la zona interplaca es mayor que la fuerza de roce (Leyton, et al., 2009).

La magnitud del terremoto es proporcional al área de la zona que logró moverse y el desplazamiento relativo ocurrido durante el sismo, si la componente vertical del desplazamiento genera un tsunami sobre la zona de ruptura que se propaga en el océano. Ejemplos de estos eventos son el terremoto de Valdivia de 1960 ( $M_w = 9.5$ ) y el terremoto del Maule de 2010 ( $M_w = 8.8$ ) (CSN, 2014).

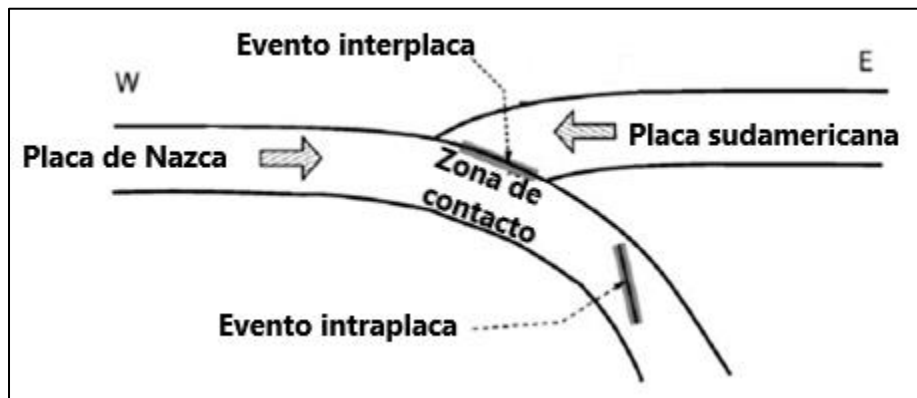
TABLA 1, MAGNITUD SEGÚN ÁREA DE RUPTURAS.

Magnitud ( $M_w$ )	Área [ $Km^2$ ]	Largo [ $km$ ]	Ancho [ $km$ ]
6.5	$6.3 \times 10^{18}$	28	8
7.0	$3.5 \times 10^{19}$	50	14
7.5	$2.0 \times 10^{20}$	89	25
8.0	$1.1 \times 10^{21}$	158	45
8.5	$6.3 \times 10^{21}$	282	79
9.0	$3.5 \times 10^{22}$	501	141
9.5	$2.0 \times 10^{23}$	891	251

Fuente: Adaptado de Riquelme (2011).

Para efectos de esta memoria se utiliza la ruptura propuesta por el trabajo de Aránguiz (2014), es decir, se considera una ruptura de 450 *km* de largo, 120 *km* de ancho, una dislocación media de 11 [*m*], y una magnitud de 8.8  $M_w$ , además, una ruptura ancha para 1730 explica la gran destrucción y los efectos del tsunami resultante.

ILUSTRACIÓN 4, UBICACIÓN SISMOS INTERPLACA E INTRAPLACA.



Fuente: Adaptado de Leyton, et al. (2009).

La ilustración 4, muestra el mecanismo de producción de sismos interplaca e intraplaca.

## 6.4 BATIMETRÍA Y TOPOGRAFÍA

Se utilizó la base de datos batimétrica TOPEX/Poseidón, misión satelital conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y CNES (French Space Agency), la cual fue usada para mapear la batimetría de la superficie oceánica. Lanzado el 10 de agosto de 1992, fue el primer gran satélite de investigación oceanográfica. Y ayudó a revolucionar la oceanografía al proporcionar datos que antes eran imposibles de obtener; pero un mal funcionamiento puso fin a las operaciones normales de satélite en enero de 2006 (NASA, 2017).

TOPEX ha sido utilizado en diversos temas como:

- Investigación del clima.
- Investigación científica.
- Pronóstico de El Niño y La Niña.
- Gestión pesquera.
- Previsión de huracanes.
- Investigación de mamíferos marinos.
- Industrias Offshore.
- Enrutamiento de barcos.

Para la batimetría de la malla fina se utilizaron cartas SHOA.

La topografía, fue entregada por los topógrafos y geógrafos pertenecientes al Laboratorio DOP, por medio de imágenes modelado de elevación digital (DEM) (ANEXO ilustración 92 y 93) y planimetrías topográficas.

## 6.5 MODELO NUMÉRICO NEOWAVE

Varios eventos recientes de tsunamis en todo el mundo han aumentado la conciencia del público en general sobre el riesgo inherente que enfrentan muchas comunidades costeras. En consecuencia, académicos y profesionales han tratado de adquirir una mejor comprensión de los procesos físicos subyacentes implicados, y han desarrollado herramientas numéricas cada vez más sofisticadas para simularlos. Una de ellas es el modelo Non-hydrostatic Evolution of Ocean WAVEs (NEOWAVE), desarrollado por la Universidad de Hawaii.

NEOWAVE es un modelo que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSWE), con una expresión de la velocidad vertical, para considerar olas débilmente dispersivas. Además, plantea la ecuación de conservación del momentum tal que el modelo es capaz de representar saltos hidráulicos.

Las ecuaciones de momentum y de continuidad en los ejes cartesianos  $x, y, z$  utilizadas por el modelo son las siguientes:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{q}{D\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\zeta - h) - n^2 \frac{g}{D^{1/3}} \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{\rho D} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{q}{D\rho} \frac{\partial}{\partial y} (\zeta - h) - n^2 \frac{g}{D^{1/3}} \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{\rho D} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q}{\rho D} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} = 0 \quad (6.4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  es la aceleración de gravedad,  $U$ ,  $V$  y  $W$  son las componentes de velocidad promediadas en la vertical para  $x, y, z$  respectivamente,  $q$  presión no hidrostática en el fondo marino y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning.  $D$  es la profundidad de la columna de agua, que considera tanto la elevación de la superficie libre ( $\zeta$ ) como la profundidad desde el nivel del mar ( $h$ ).

NEOWAVE funciona con 4 carpetas que contienen información necesaria para la configuración y ejecución del modelo. Estas son:

- Directorio para almacenar archivos de entrada (Input), que contiene:
  - Datos de batimetría.
  - Archivo de condición inicial (archivo de parámetros de falla).
  - Archivo de coordenadas de nivel de agua.
- Directorio del código de fuente NEOWAVE (src), que contiene:

- Códigos fortran de NEOWAVE (archivos \*.f90).
- Makefile (archivo compilador)
- Directorio para ejecutar NEOWAVE y guardar archivos de salida (work), que contiene:
  - Archivo ejecutable.
  - Archivo sh, run\_neowave.sh (solo se usa para el clúster).
  - Archivos de salida.
- Directorio para guardar archivos de copia de seguridad (backup), que contiene:
  - Archivos de respaldo.

### 6.5.1 FORMULACIÓN TEÓRICA

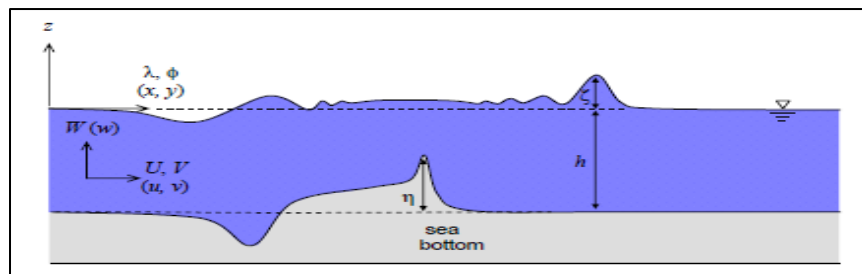
A continuación, se presenta la derivación del modelo numérico NEOWAVE, que fue extraído del trabajo de Yamazaki (2010).

Esta sección deriva las ecuaciones que rigen los flujos superficiales libres no hidrostáticos en el sistema de coordenadas esféricas de Casulli (1995) y Stelling & Zijlema (2003). La formulación comienza con las ecuaciones gobernantes tridimensionales y su integración en la profundidad junto con una aproximación lineal de la presión no hidrostática para ondas débilmente dispersivas. El uso explícito de la velocidad vertical permite que la extensión de la formulación original incluya el desplazamiento del fondo marino para modelar la generación de tsunamis a partir de la ruptura del terremoto. Las ecuaciones de referencia linealizadas integradas en la profundidad proporcionan una evaluación teórica de las características de dispersión de la formulación no hidrostática.

### 6.5.2 ECUACIONES DE GOBIERNO TRIDIMENSIONALES

La ilustración 5. Proporciona un esquema del flujo de superficie libre generado por la deformación del fondo marino. Las ecuaciones que rigen para el flujo no hidrostático integrado en la profundidad son derivadas en el sistema de coordenadas esféricas de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad.

ILUSTRACIÓN 5, ESQUEMA DEL FLUJO DE SUPERFICIE LIBRE GENERADO POR LA DEFORMACIÓN DEL FONDO MARINO.



Fuente: Yamazaki, et al. (2010).

Gill (1982) y Kowalik & Murty (1993) describen las ecuaciones que gobiernan la circulación tridimensional de las cuencas oceánicas en las coordenadas esféricas  $(\lambda, \phi, z)$ , en las que  $\lambda$  es la longitud,  $\phi$  es la latitud y  $z$  denota la distancia normal a la superficie de la tierra, en la forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) (v \sin \phi - w \cos \phi) \\ = -\frac{1}{\rho R \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + A_\lambda \end{aligned} \quad (6.5.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{wv}{R} + \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) u \sin \phi = -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial p}{\partial \phi} + A_\phi \quad (6.5.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial w}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial w}{\partial \phi} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{v^2}{R} - \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) u \cos \phi = -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial p}{\partial z} + A_z - g \quad (6.5.3)$$

$$\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \phi} + \frac{\partial(v \cos \phi)}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.5.4)$$

Donde  $R$  es el radio de la tierra,  $(u, v, w)$  es la velocidad de flujo en  $(x, y, z)$ ,  $t$  es el tiempo,  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra,  $\rho$  es la densidad del agua,  $p$  es la presión,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $(A_\lambda, A_\phi, A_z)$  es la fuerza viscosa. Las ecuaciones de gobierno tridimensionales describen la física asociada con el modelado de tsunamis, pero pueden ser computacionalmente intensivas para aplicaciones prácticas.

Seguindo a Casulli (1995), la presión se descompone en componentes hidrostáticos y no hidrostáticos como

$$p = \rho g(\zeta - z) + pq \quad (6.5.5)$$

Donde  $q$  denota la presión no hidrostática. La derivada  $z$  del término de presión hidrostática en (6.5.3) se convierte

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial[\rho g(\zeta - z)]}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho} (0 - 1) = g \quad (6.5.6)$$

Con la descomposición de la presión, las ecuaciones de Navier-Stokes (6.5.1) - (6.5.3) se reducen a las ecuaciones de momento no hidrostáticas tridimensionales como

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) (v \sin \phi - w \cos \phi) \\ = -\frac{1}{\rho R \cos \phi} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{\partial q}{\partial \lambda}\right) + A_\lambda \end{aligned} \quad (6.5.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{wv}{R} + \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) u \sin \phi \\ = -\frac{1}{\rho R} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + \frac{\partial q}{\partial \phi} \right) + A_{\phi} \end{aligned} \quad (6.5.8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial w}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial w}{\partial \phi} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{v^2}{R} - \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi}\right) u \cos \phi = -\frac{\partial q}{\partial z} + A_z \quad (6.5.9)$$

Nótese que la presión en la ecuación de momento vertical (6.5.9) es impulsada principalmente por las componentes no hidrostáticas a través de la velocidad vertical. La formulación no hidrostática tridimensional basada en (6.5.7) - (6.5.9) y (6.5.4) se ha aplicado extensivamente al modelado de flujos de superficie libre que involucran circulaciones oceánicas y costeras (p. Ej., Mahadevan et al., 1996a; Casulli & Stelling, 1998, Stansby & Zhou, 1998, y Stelling & Busnelli, 2001). Estos modelos primero calculan la solución hidrostática más estable y luego corrigen la solución con la presión no hidrostática, que se resuelve implícitamente a partir de una ecuación de Poisson derivada de la ecuación de continuidad. Mahadevan et al. (1996) muestra que la descomposición de la presión (6.5.5) en la formulación no hidrostática proporciona una solución más estable y mejora significativamente la eficiencia computacional en comparación con una solución directa de (6.5.1) - (6.5.4).

Aunque la descomposición de la presión (6.5.5) mejora la eficiencia computacional, los modelos tridimensionales no hidrostáticos siguen siendo computacionalmente caros. Estos modelos requieren una gran cantidad de celdas o capas de grillas verticales, lo que restringe la aplicación a un área pequeña o el cálculo con una resolución aproximada. Es prácticamente imposible modelar los tsunamis desde la generación, la propagación, hasta la ejecución con una resolución apropiada usando un modelo tridimensional no hidrostático.

### 6.5.3 ECUACIONES DE GOBIERNO INTEGRADAS EN LA PROFUNDIDAD

Los modelos tridimensionales anteriores definen la presión no hidrostática, los cuales requieren una gran cantidad de celdas verticales para describir su variación. Stelling y Zijlema (2003) propusieron un modelo no hidrostático con formulaciones multicapa e integradas en profundidad, que aprovechan el esquema de la caja de Keller (1971) para la aproximación vertical del gradiente. El esquema de Keller (1971) define la presión no hidrostática en las interfaces de las celdas para estimar el gradiente vertical, y con algunas capas verticales, proporciona soluciones equivalentes a las de los modelos tridimensionales no hidrostáticos y Navier-Stokes. El modelo no hidrostático se puede desarrollar en una formulación integrada en profundidad aplicando el esquema de la caja Keller como en la formulación multicapa. Un modelo no hidrostático integrado en la profundidad es mucho más eficiente y permite el modelado de los procesos de evolución del tsunami con la resolución de red deseada en una región extendida.

La formulación integrada en profundidad se deriva de las ecuaciones de control tridimensionales no hidrostáticas (6.5.7) - (6.5.9) y (6.5.4). Las condiciones de contorno en la superficie libre y en el fondo marino facilitan la formulación de las ecuaciones de gobierno integradas en profundidad a través del esquema de caja de Keller (1971). La profundidad de flujo es la distancia entre los dos límites definidos como

$$D = \zeta + (h - \eta) \quad (6.5.10)$$

donde  $\zeta$  es la elevación de la superficie medida desde el NRS (nivel de reducción de sonda) en reposo,  $h$  es la profundidad del agua definida desde el NRS, y  $\eta$  es el desplazamiento del fondo marino. La interacción entre todos los materiales que se encuentran en la columna de agua, siendo la arena, agua y atmosfera y la profundidad del agua dan lugar a las condiciones cinemáticas de la superficie libre y de los bordes del mar como

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} \quad (6.5.11)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial (h - \eta)}{\partial \lambda} - \frac{v}{R} \frac{\partial (h - \eta)}{\partial \phi} \quad (6.5.12)$$

Los términos de presión hidrostática y no hidrostática desaparecen en  $z = \zeta$  para proporcionar la condición de límite de superficie dinámica libre.

Los tsunamis son olas largas con características débilmente dispersiva. La velocidad vertical  $w$  generalmente sigue una distribución lineal entre el fondo marino y la superficie libre. Los efectos de Coriolis, la disipación viscosa y la variación de la velocidad horizontal en la dirección vertical son insignificantes en la propagación del tsunami. Las condiciones de frontera cinemáticas (6.5.11) y (6.5.12) se simplifican a

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} \quad \text{en } z = \zeta \quad (6.5.13)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial (h - \eta)}{\partial \lambda} - \frac{V}{R} \frac{\partial (h - \eta)}{\partial \phi} \quad \text{en } z = -h + \eta \quad (6.5.14)$$

donde  $U$  y  $V$  son componentes de velocidad promediados en la profundidad en las direcciones  $\lambda$  y  $\phi$ , y la ecuación de momento vertical (6.5.9) se reduce a

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (6.5.15)$$

La integración en la profundidad de (6.5.7), (6.5.8), (6.5.15) y (6.5.4) teniendo en cuenta las condiciones de frontera cinemáticas (6.5.13) y (6.5.14) proporciona

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left( 2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi} \right) V \sin \phi \quad (6.5.16)$$

$$= -\frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{1}{DR \cos \phi} \int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial \lambda} dz - f \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{D}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left( 2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi} \right) U \sin \phi \quad (6.5.17)$$

$$= -\frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} - \frac{1}{DR} \int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial \phi} dz - f \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{D}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{1}{D} \int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial z} dz \quad (6.5.18)$$

$$\frac{\partial(\zeta - \eta)}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial(UD)}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial(V \cos \phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (6.5.19)$$

donde  $W$  es la componente de velocidad promediada en la profundidad en la dirección  $z$ ;  $f$  es un factor de fricción adimensional dado en términos del coeficiente de rugosidad relativo de Manning  $n$  como

$$f = n^2 \frac{g}{D^{1/3}} \quad (6.5.20)$$

Textos hidráulicos estándar como Chow (1959) y Chaudhry (1993) proporcionan el coeficiente de Manning en función de los materiales y las condiciones de la superficie, mientras que Bretschneider et al. (1986) determinaron los valores típicos del coeficiente para el terreno y la vegetación de las islas tropicales a través de mediciones de perfiles de viento.

Las ecuaciones de momento (6.5.16) - (6.5.18) contienen integrales de la presión no hidrostática y la forma en que se evalúan influirá en las características de dispersión de las ecuaciones de gobierno resultantes. El término de presión no hidrostática en (6.5.16) puede derivarse a través de la regla de integración de Leibniz:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \int_{-h+\eta}^{\zeta} q dz = \int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial \lambda} dz + q_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - q_{-h+\eta} \frac{\partial(-h+\eta)}{\partial \lambda} \quad (6.5.21)$$

donde  $q_{\zeta}$  y  $q_{-h+\eta}$ , son presión no hidrostática en la superficie libre y en el fondo marino, respectivamente. La integración de la presión no hidrostática en el lado izquierdo de (6.5.21) se aproxima a

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \int_{-h+\eta}^{\zeta} q dz \approx \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ D \left( \frac{q_{\zeta} + q_{-h+\eta}}{2} \right) \right] \quad (6.5.22)$$

Usando (6.5.16) y (6.5.18), el término de presión no hidrostática en (6.5.16) puede reescribirse en la forma:

$$\int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial \lambda} dz = \frac{1}{2} \frac{\partial q_{-h+\eta}}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} q_{-h+\eta} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial \lambda} \quad (6.5.23)$$

El mismo procedimiento da el término de presión no hidrostática en la ecuación  $\phi$ -momento (6.5.17) como

$$\int_{-h+\eta}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial \phi} dz = \frac{1}{2} \frac{\partial q_{-h+\eta}}{\partial \phi} + \frac{1}{2} q_{-h+\eta} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial \phi} \quad (6.5.24)$$

Tenga en cuenta que  $q_{\zeta} = 0$  ya que la presión total desaparece en la superficie libre. La ecuación de momento vertical (6.5.18) se puede simplificar

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q_{-h+\eta}}{D} \quad (6.5.25)$$

La presión no hidrostática en (6.5.23), (6.5.24) y (6.5.25) se expresa ahora en términos de  $q_{-h+b}$  definida en el fondo marino.

La sustitución de los términos de presión no hidrostática (6.5.23) y (6.5.24) en las ecuaciones de momento horizontal (6.5.16) y (6.5.17) y la simplificación de la ecuación  $z$  de momento (6.5.25), junto con la ecuación de continuidad (6.5.19), generando las ecuaciones de gobierno no hidrostáticas integradas en la profundidad:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left( 2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi} \right) V \sin \phi \\ = - \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{1}{DR \cos \phi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{q}{DR \cos \phi} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial \lambda} \\ - f \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{D} \end{aligned} \quad (6.5.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left( 2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi} \right) U \sin \phi \\ = - \frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} - \frac{1}{2} \frac{1}{R} \frac{\partial q}{\partial \phi} - \frac{1}{2} \frac{q}{DR} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial \phi} - f \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{D} \end{aligned} \quad (6.5.27)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q}{D} \quad (6.5.28)$$

$$\frac{\partial(\zeta - \eta)}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial(UD)}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial(V \cos \phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (6.5.29)$$

donde  $q$  ahora se define como la presión no hidrostática en el fondo marino. Debido a la suposición de una distribución lineal para  $w$ , la velocidad vertical es simplemente

$$W = \frac{w_{\zeta} + w_{-h+\eta}}{2} \quad (6.5.30)$$

que es el valor promedio de  $w$  en la superficie libre y el lecho marino dados respectivamente en (6.5.13) y (6.5.14). Excepto por la adición de la ecuación de momento vertical y los términos de presión no hidrostática en las ecuaciones de momento horizontal, las ecuaciones gobernantes tienen la misma estructura que las ecuaciones no lineales de aguas someras. Esta formulación permite una extensión directa de los modelos existentes no lineales de aguas poco profundas para flujos no hidrostáticos.

Las ecuaciones que rigen en el sistema de coordenadas esféricas  $(\lambda, \phi)$  pueden transformarse en el sistema cartesiano  $(x, y)$  para una región relativamente pequeña, donde los efectos de la curvatura de la tierra son insignificantes. La distancia en las direcciones  $x$  e  $y$  se convierte

$$x = R \lambda \cos \phi, y = R \phi \quad (6.5.31)$$

Los términos de Coriolis en las ecuaciones de momento horizontal (6.5.26) y (6.5.27) desaparecen

$$\left(2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi}\right) V \sin \phi = 0, \left(2\Omega + \frac{U}{R \cos \phi}\right) U \sin \phi = 0 \quad (6.5.32)$$

Dado que la escala no disminuye en la dirección norte-sur, simplemente podemos establecer  $\phi = 0$ . Estas modificaciones proporcionan las ecuaciones que rigen en el sistema de coordenadas cartesianas en la forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{q}{D} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial x} - f \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{D} \quad (6.5.33)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{q}{D} \frac{\partial(\zeta - h + \eta)}{\partial y} - f \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{D} \quad (6.5.34)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q}{D} \quad (6.5.35)$$

$$\frac{\partial(\zeta - \eta)}{\partial t} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} = 0 \quad (6.5.36)$$

donde  $U$  y  $V$  son ahora los componentes de velocidad promediados en profundidad en las direcciones  $x$  e  $y$ . La presión no hidrostática se expresa en términos de la aceleración vertical a través de la ecuación de momento (6.5.35). Las condiciones de contorno cinemático (6.5.13) y (6.5.14) describen la velocidad vertical promedio en (6.5.35) como funciones de  $U, V, \zeta$ , y  $\eta$  para cerrar las ecuaciones de gobierno integradas en profundidad para flujos no hidrostáticos.

La ventaja de la formulación no hidrostática integrada en profundidad es la forma de los términos dispersivos, que son solo la primera derivada de la presión no hidrostática. Esto se puede lograr porque la presión no hidrostática se relaciona directamente con la aceleración vertical. Por otro lado, los términos dispersivos en ecuaciones de tipo Boussinesq se expresan en términos de la velocidad horizontal, que requiere una diferenciación temporal y espacial adicional para relacionarse con la presión no hidrostática.

#### 6.5.4 RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL

Las ecuaciones no hidrostáticas integradas en profundidad describen la dispersión de la ola a través de la presión no hidrostática y la velocidad vertical. Aunque los supuestos básicos son consistentes con los de las ecuaciones Boussinesq clásicas de Peregrine (1967), las características de dispersión pueden diferir debido a las variables empleadas y el truncamiento de términos en la derivación de las ecuaciones gobernantes. Esta sección deriva la relación de dispersión lineal para las ecuaciones no hidrostáticas integradas en la profundidad para su comparación directa con las de las ecuaciones Boussinesq clásicas y la teoría de ondas de Airy. Aunque las ecuaciones no hidrostáticas y de Boussinesq no son lineales, la comparación de sus características de dispersión lineal proporciona una línea base para la evaluación.

El primer paso es derivar una versión linealizada de las ecuaciones gobernantes no hidrostáticas integradas en la profundidad. Después de descartar los términos no lineales y establecer  $\eta = 0$ , las ecuaciones que rigen en la dirección  $x$ . Las ecuaciones (6.5.33) a (6.5.36) se convierten en

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{q}{h} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (6.5.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{w_{\zeta} + w_{-h+\eta}}{2} \right) - \frac{q}{h} = 0 \quad (6.5.38)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (6.5.39)$$

Las condiciones cinemáticas unidimensionales en la superficie libre y el fondo marino, con la variación vertical de la velocidad horizontal descuidada y  $\eta = 0$ , se vuelven

$$w_{\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + U \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (6.5.40)$$

$$w_{-h} = -U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (6.5.41)$$

La presión no hidrostática  $q$  en términos de  $\zeta$  y  $U$  se puede obtener a partir de la ecuación de momento vertical (6.5.38) mediante la sustitución de las condiciones de contorno cinemático (6.5.40) y (6.5.41) como

$$q = \frac{1}{2}h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{1}{2}hU \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t \partial x} + \frac{1}{2}h \frac{\partial U}{\partial t} \frac{\partial(\zeta - h)}{\partial x} \quad (6.5.42)$$

La derivada  $x$  de  $q$  se expande por la regla de la cadena como

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} = & \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{1}{2} h \frac{\partial^3 \zeta}{\partial t^2 \partial x} + \frac{1}{2} h \frac{\partial U}{\partial t} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t \partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} U \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t \partial x} + \frac{1}{2} h U \frac{\partial^3 \zeta}{\partial t \partial x^2} \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial t} \frac{\partial(\zeta - h)}{\partial x} + \frac{1}{2} h \frac{\partial U}{\partial t \partial x} \frac{\partial(\zeta - h)}{\partial x} + \frac{1}{2} h \frac{\partial U}{\partial t} \frac{\partial^2(\zeta - h)}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (6.5.43)$$

Sustituyendo (6.5.42) y (6.5.43) en la ecuación de momento horizontal (6.5.37), tenemos la ecuación de momento horizontal en términos de  $\zeta$  y  $U$  como

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{4}h \frac{\partial^3 \zeta}{\partial t^2 \partial x} - \frac{1}{4}h \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial x} - \frac{1}{4}h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{1}{4} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \quad (6.5.44)$$

La presión no hidrostática y la velocidad vertical ahora se expresan mediante una derivada de tercer orden de la elevación de superficie y tres términos adicionales relacionados con el gradiente de profundidad.

La relación exacta de dispersión lineal de la teoría lineal de ondas es para la profundidad constante del agua. Las ecuaciones del tipo Boussinesq se derivaron inicialmente para la profundidad constante (Peregrine, 1967). Para proporcionar una comparación directa, los términos de gradiente de profundidad en (6.5.44) se descartan.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{4}h \frac{\partial^3 \zeta}{\partial t^2 \partial x} = 0 \quad (6.5.45)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + h \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (6.5.46)$$

Las ecuaciones de gobierno resultantes para la profundidad constante del agua, siguiendo a Madsen et al. (1991) y Nwogu (1993), se vuelven la relación dispersiva lineal se deriva al considerar un sistema de ondas periódicas de pequeña amplitud en la forma:

$$\zeta = \zeta_0 e^{ik(x-ct)} \quad (6.5.47)$$

$$U = U_0 e^{ik(x-ct)} \quad (6.5.48)$$

donde  $k$  y  $c$  denotan el número de onda y la celeridad.

Sustituyendo (6.5.47) y (6.5.48) en la ecuación linealizada, no hidrostática integrada (6.5.45) y (6.5.46) se obtiene la relación de dispersión:

$$C^2 = \frac{gh}{1 + \frac{1}{4}(kh)^2} \quad (6.5.49)$$

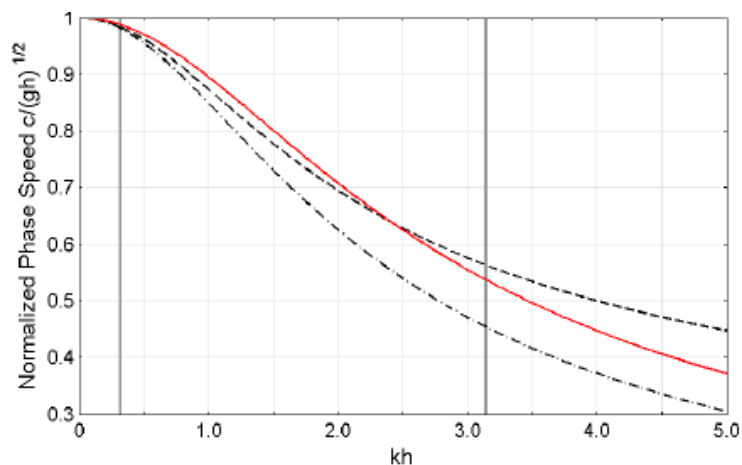
La relación de dispersión lineal de las ecuaciones Boussinesq clásicas de Peregrine (1967) está dada por

$$C^2 = \frac{gh}{1 + \frac{1}{3}(kh)^2} \quad (6.5.50)$$

La relación exacta de dispersión lineal de la teoría de ondas de Airy tiene la forma:

$$C^2 = gh \frac{\tanh(kh)}{kh} \quad (6.5.51)$$

ILUSTRACIÓN 6, RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL



Fuente: Yamazaki, et al. (2010).

- , solución exacta.
- · - · - ·, ecuación clásica de Boussinesq de Peregrine (1967).
- , ecuaciones no hidrostáticas integradas en profundidad.

La ilustración 6 compara las relaciones de dispersión lineal (6.5.49) y (6.5.50) con la relación exacta (6.5.51). El rango aplicable de un modelo es hasta un error del 5% en la relación de dispersión lineal de acuerdo con Madsen (1991). Dentro de la profundidad del agua intermedia  $\pi / 10 < kh < \pi$ , la relación de dispersión de las ecuaciones no hidrostáticas

integradas en profundidad tiene un error inferior al 5%. La ecuación clásica de Boussinesq de Peregrine (1967) tiene un error del 5% a  $kh = 1.35$  y un máximo del 20% dentro del rango de profundidad intermedia. Esto proporciona una prueba teórica de las observaciones de Stelling & Zijlema (2003) y Walters (2005) que sus modelos no hidrostáticos producen mejores características de dispersión que las ecuaciones Boussinesq clásicas.

Para obtener una mejor comprensión de las características de dispersión entre las ecuaciones no hidrostáticas y Boussinesq, la ecuación de momento (6.5.45) se reescribe con la ecuación de continuidad (6.5.46) para expresar el término dispersivo en función de la velocidad horizontal. Después de descartar el término de gradiente inferior, tenemos

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{4} h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \right) = 0 \quad (6.5.52)$$

Esto tiene la misma forma que la ecuación de momento de las ecuaciones de Boussinesq clásicas linealizadas

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \right) = 0 \quad (6.5.53)$$

La única diferencia está en el coeficiente del término dispersivo lineal que refleja las respectivas relaciones de dispersión lineal (6.5.49) y (6.5.50). La principal diferencia entre los dos enfoques es el uso de la condición de flujo irrotacional en las ecuaciones Boussinesq clásicas para expresar la velocidad vertical en términos de la velocidad horizontal. Esto introduce un paso adicional de integración de profundidad en la derivación de las ecuaciones Boussinesq clásicas. La formulación no hidrostática integrada a la profundidad, por otro lado, utiliza una ecuación de momento vertical aproximado para dar cuenta de los efectos de velocidad vertical, que están débilmente acoplados con la velocidad horizontal a través de las ecuaciones gobernantes. Cuando la variación vertical de velocidad sobre una columna de agua se desvía de las suposiciones de onda larga, la integración adicional en las ecuaciones Boussinesq clásicas podría amplificar el error a través de la velocidad horizontal, que es la variable principal en el problema físico. Esto se refleja en la comparación de las relaciones de dispersión en la ilustración 6.

## 6.6 CURVAS DE FRAGILIDAD

El tsunami de Tōhoku en Japón 2011, fue uno de los eventos destructivos más importantes de esa región. A raíz de ese gran terremoto y posterior tsunami se originaron numerosos estudios de campo tanto a nivel hidráulico, estructural, económico, social, entre otros. Este evento proporcionó uno de los conjuntos de datos más completos entre los eventos de tsunami en la historia. Suppasri (2012) realizó un estudio para cuantificar el nivel de daños en infraestructura usando las curvas de fragilidad que derivan de los datos proporcionados por el Ministerio de Tierras, Infraestructura y Transporte de Japón (MLIT), con más de 250.000 estructuras. El análisis refleja los niveles de daño respecto a material estructural, número de pisos y topografía.

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de excedencia de un estado límite de daño en función de un parámetro representativo de profundidad de inundación u otro parámetro asociado al tsunami (hidrodinámica del tsunami, velocidad de la corriente o fuerza hidrodinámica).

Generalmente las curvas de fragilidad se expresan como la probabilidad acumulada de alcanzar o superar un determinado estado de daño para una tipología estructural expuesta a diferentes niveles de severidad del movimiento sísmico (Alacero, 2016).

TABLA 2, NIVELES DE DAÑO.

Nivel de daño	Clasificación	Descripción	Condición
1	Daño menor	No hay daños estructurales o no estructurales significativos, posiblemente solo inundaciones menores	Posible ser usado inmediatamente después de una limpieza menor de piso y pared
2	Daño moderado	Leves daños a los componentes no estructurales	Posible uso después de una reparación moderada
3	Daño mayor	Fuertes daños a varias paredes y algunas columnas	Posible ser usado después de una reparación y readaptación completa Posible ser utilizado después de una reparación completa y modernización.
4	Daño completo	Daños pesados a varios muros y algunas columnas.	Pérdida de funcionalidad. No reparable o gran costo para el reacondicionamiento. No reparable, requiere reconstrucción total.

Fuente: Adaptado de A. Suppasri (2012).

### 6.6.1 OBTENCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad se calcularon en base al estudio de Suppasri (2012), quien desarrolló su trabajo con una muestra de 250.000 edificaciones. De esta estadística filtró por tipo de material y nivel de daño. Con estos datos obtuvo la desviación estándar y la media aritmética. De esta forma obtuvo la probabilidad ( $P$ ) de ocurrencia de daño la cual viene dada por la ecuación (6.6.1) o por (6.6.2):

$$P(x) = \phi \left[ \frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (6.6.1)$$

$$P(x) = \phi \left[ \frac{\ln x - \mu'}{\sigma'} \right] \quad (6.6.2)$$

donde  $\phi$  representa la función de distribución normal estándar,  $x$  representa la característica hidrodinámica del tsunami utilizado como variable la profundidad de inundación, velocidad de la corriente o fuerza hidrodinámica,  $\mu$  y  $\sigma$  ( $\mu'$  y  $\sigma'$ ) representan la media y la desviación estándar de  $x$  o ( $\ln x$ ), respectivamente. Dos parámetros estadísticos de la función de fragilidad,  $\mu$  y  $\sigma$  ( $\mu'$  y  $\sigma'$ ), se obtienen trazando  $x$  o ( $\ln x$ ), contra la inversa de la probabilidad normal o log normal, y realizando el ajuste por mínimos cuadrados.

En consecuencia, se obtienen dos parámetros tomando la intersección (=  $\sigma$  o  $\sigma'$ ) y el coeficiente angular (=  $\mu$  o  $\mu'$ ) en la ecuación (6.6.3) o (6.6.4):

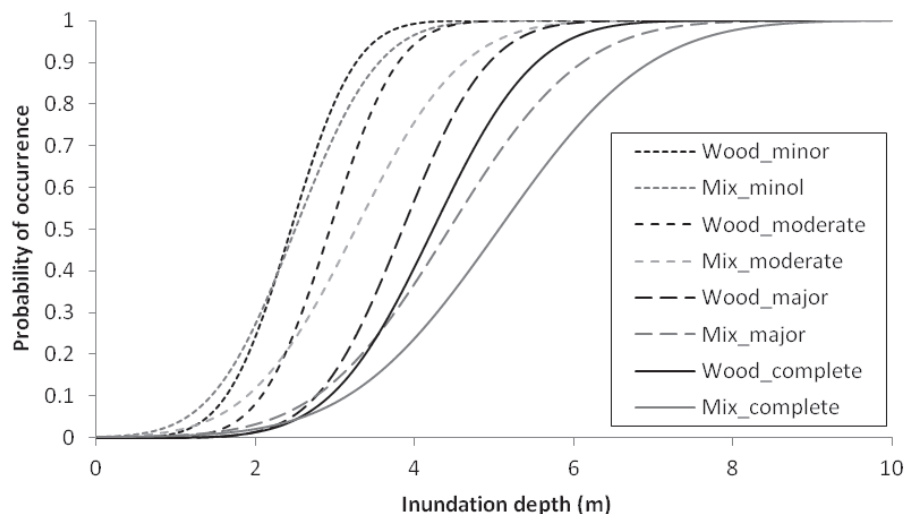
$$x = \sigma \phi^{-1}(p) + \mu \quad (6.6.3)$$

$$\ln x = \sigma' \phi^{-1}(p) + \mu' \quad (6.6.4)$$

Para construir las curvas de fragilidad existen tres metodologías bien consolidadas:

- Observaciones de campo.
- Opinión de expertos.
- Métodos probabilísticos (se incluyen los modelos de simulación).

ILUSTRACIÓN 7, CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO.



Fuente: Suppasri (2012).

Las curvas de fragilidad sirven para estimar el riesgo de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial.

La ilustración 7 muestra la comparación de las curvas de fragilidad de tsunami para la estructura. Donde se presentan casas de madera y edificios de tipo mixto en función de la profundidad de la inundación (Suppasri, et al., 2012).

## 6.6.2 MÉTODOS PROBABILÍSTICO

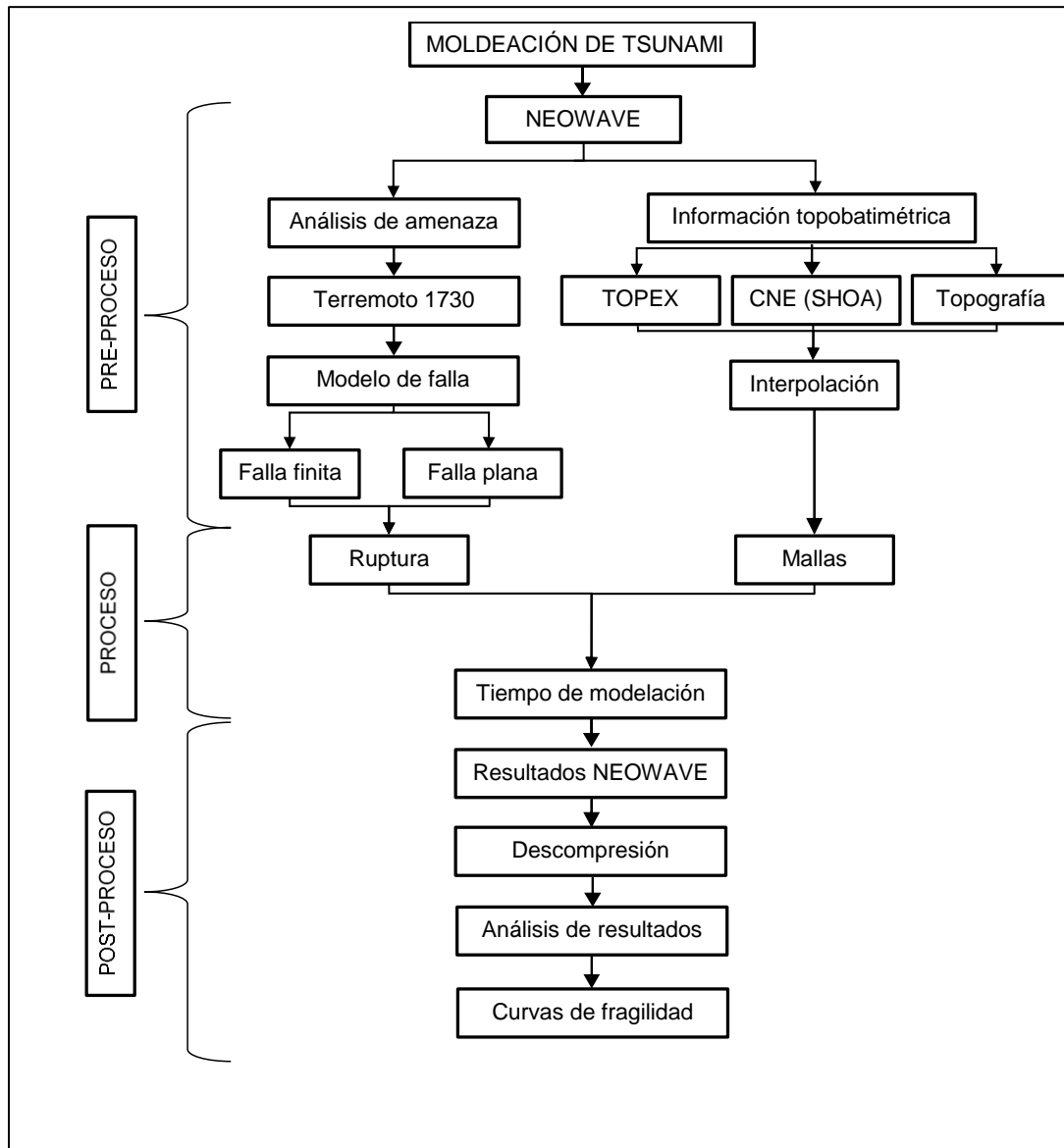
En el presente trabajo sólo se considera el método probabilístico para el análisis de las infraestructuras afectadas por el tsunami en Viña del Mar. Este método utiliza datos que pueden ser empleados para zonas donde no se dispone de observaciones de daños, como es el caso de la Población Vergara, ni suficientes resultados de ensayos de laboratorio.

Los resultados son obtenidos a partir de la simulación de tsunami utilizando los niveles de inundación en la zona de estudio. Con este método es sencillo distinguir los lugares expuestos a sufrir daños (tabla 2), sean estos diferenciados por estructura, material de construcción y topografía del sector.

## 7. METODOLOGÍA

Para cumplir los objetivos propuestos en este proyecto de título, se ha generado una metodología de trabajo para el proceso de modelación y optimización del modelado de tsunami (ilustración 8). Esta metodología contempla el pre-proceso, el proceso y el post-proceso, donde cada etapa contiene diversas sub-etapas.

ILUSTRACIÓN 8, DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.



Fuente: Elaboración propia – Software Microsoft Visio.

## 7.1 PRE-PROCESO

### 7.1.1 ANÁLISIS DE AMENAZA

- Riesgo Sísmico en Chile

Debido a su geografía, la población de Chile se distribuye de manera muy irregular a lo largo del país. Así, en la zona desértica del Norte la población es muy dispersa, aunque el desarrollo de nuevos centros industriales ha atraído una numerosa población hacia Arica, Iquique, Antofagasta, etc. Por otro lado, la región Metropolitana y Valparaíso concentran la mitad de la población chilena, y otro cuarto en la zona que se extiende de Concepción a Temuco en el centro del país. En la parte sur del país, la población es muy escasa. Por esto, desde el punto de vista de la peligrosidad sísmica, parece claro que hay que poner un fuerte énfasis en el estudio de las regiones más pobladas de Santiago a Puerto Montt. Es difícil imaginar los efectos colosales que tendría un terremoto grande en la zona central de Chile o en las nuevas ciudades del Norte de Chile. Lamentablemente, éstas son las dos zonas de alto riesgo de ocurrencia de un gran terremoto en los próximos años (Madariaga, 1998).

Es importante tener en cuenta que Chile no posee una red homogénea de estaciones, por lo que la sismicidad de las lagunas sísmicas es desconocida. Sin un conocimiento acabado de la sismicidad en función del tiempo y del espacio, hay muy poca esperanza que una vez que la laguna sísmica haya sido identificada, se pueda realizar una estimación exacta de la peligrosidad sísmica en dicha zona. Una hipótesis escondida en la observación de lagunas es que los terremotos liberan completamente la energía almacenada en la zona de ruptura, y que por lo tanto una vez ocurrido un gran terremoto se debe esperar largo tiempo antes que la zona de ruptura haya sido recargada en energía de deformación y otro gran terremoto se produzca. Esto es claramente erróneo en el caso de Chile. Una observación muy simple de la sismicidad de Valparaíso muestra que los terremotos nunca se repiten iguales y que nada parece ratificar la idea que un terremoto libera completamente la energía almacenada en la zona. El caso de los terremotos de julio de 1971 y marzo de 1985 es claro. Aquí la ruptura iniciada en un terremoto se terminó en el segundo. La única manera de estimar las zonas de ruptura y ver si efectivamente se ha liberado la deformación completamente, es utilizar datos sismológicos de precisión. Sin ellos no es posible estimar la peligrosidad residual en varias zonas que parecen mantener un potencial sísmico elevado (Madariaga, 1998).

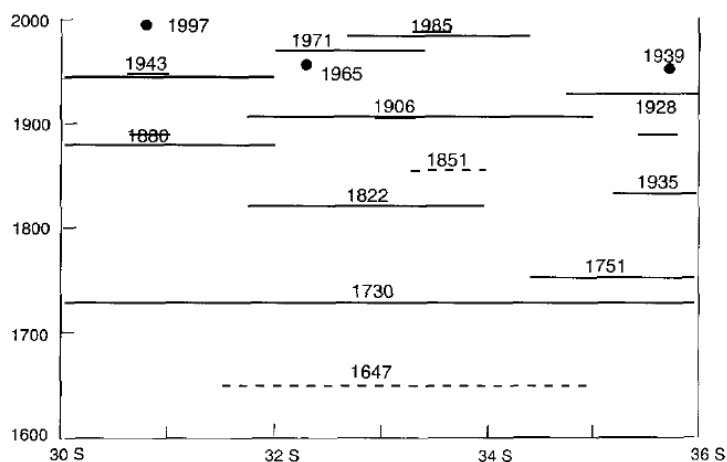
- Laguna Sísmica (gaps) de Chile Central

Los sitios identificados en Chile como especialmente peligrosos desde el punto de vista del estudio de las lagunas sísmicas (gaps) corresponden a regiones que no han tenido grandes terremotos desde hace 30 años o más.

Para ello es importante la recopilación de antecedentes históricos. Para el caso de Chile central se tiene presente el terremoto de 1647, que no es suficientemente conocido, pero a partir del gran terremoto del 8 de julio de 1730, los datos de tsunamis, deformación de la costa, destrucción de ciudades, entre otros, permiten evaluar la zona de ruptura de los grandes sismos. El mayor terremoto de Chile central es sin lugar a dudas el de 1730, aunque las estimaciones de la zona total de ruptura divergen entre 450 km (Lomnitz, 1970) y 550 km (Pardo, et al., 1996), no cabe duda que este terremoto rompió la zona de contacto entre las placas (31°S a 36°S). Esta zona de ruptura, así como el tsunami generado, permitieron estimar su momento sísmico de 8.8 Mw. Ningún terremoto posterior, ni el del 19 de noviembre de 1822, o del 18 de agosto de 1906 (8.3 Mw) ni el del 3 de marzo de 1985 (8.0 Mw) se aproxima a la dimensión del de 1730. En la ilustración 9 aparecen también terremotos “menores” como el de Talca del diciembre de 1928 (7.9 Mw), o el de La Ligua del 9 de julio de 1971 (7.8 Mw) (Madariaga, 1998).

La lista de terremotos de magnitud inferior a 8.0 Mw no es usada en los estudios históricos, porque sus daños limitados a zonas locales de la costa central de Chile se olvidan o pasan desapercibidos en la mayoría de la población que habita en el valle central de Chile. Varios sismos de este tipo se conocen en la segunda mitad del siglo XIX hasta el actual, pero no se pueden incluir en la ilustración 9 porque se introduciría una distorsión en su significado. Teniendo en cuenta esta precaución, se observa que en la zona de Valparaíso terremotos de magnitud superior a 8.0 Mw tienen un periodo de recurrencia de  $83 \pm 9$  años (Madariaga, 1998).

ILUSTRACIÓN 9, ZONAS DE RUPTURA DE GRANDES TERREMOTOS QUE HAN AFECTADO EL CENTRO DE CHILE.



Fuente: Madariaga (1998).

### 7.1.2 MODELO DE FALLA

En general, la estabilidad del talud está determinada por factores geométricos como su altura e inclinación, factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. De esta manera, la combinación de los 4 factores anteriores puede determinar la condición de rotura del terreno en diferentes tipos de superficie (Sanhueza et al., 2013) .

En términos generales, se puede hablar de dos tipos de rotura: plana y finita:

- **Modelo Falla Plana (PFM) o modelo infinito**, es aquella en la cual la SPF (superficies potenciales de falla) es paralela al talud y la longitud de este puede considerarse infinita con respecto al espesor de la masa que falla.
- **Modelo Falla Finito (FFM) o modelo circular**, la SPF corresponde al manto de un cilindro, para los cuales una falla circular es buena aproximación y supone el plano de falla circular de radio finito sobre el cual se aplica instantáneamente un pulso de esfuerzo de cizalle. No hay propagación de fractura porque el esfuerzo se aplica instantáneamente sobre toda el área de la falla.

Para este estudio se utilizó un modelo de falla plana, el cual es de fácil aplicación en la modelación de NEOWAVE, mientras que la construcción de FFM es compleja y necesita mayor dominio en el área geológica.

- Modelo de Falla Plana (PFM)

Se llama rotura planar o plana a aquella que se produce en una única superficie plana. Es la más sencilla de las formas de rotura y se produce cuando existe una fractura dominante y convenientemente orientada respecto al talud. Frecuentemente se trata de fallas que interceptan al talud (Contreras, 2013).

ILUSTRACIÓN 10, FALLA PLANA EN TRES DIMENSIONES



Fuente: Contreras (2013).

Los rumbos del plano del talud y del plano de deslizamiento deben ser paralelos o casi paralelos, formando entre si un ángulo máximo de 20°. Los límites laterales de la masa rocosa deslizante han de producir una resistencia al desplazamiento despreciable.

### 7.1.3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA

Con el fin de agregar información topobatimétrica al modelo se utilizó información de altímetro satelital TOPEX, la cual entrega una resolución espacial de 11,2 [km] (largo) por 5,1 [km] (ancho), la cual se complementó con información batimétrica local a través de las cartas náuticas electrónicas del SHOA. La topografía se obtuvo a través de imágenes de elevación digital (DEM- Región de Valparaíso) y planimetrías topográficas georreferenciado y enlazados a puntos SHOA (monolito con información geográfica y elevación al nivel de reducción de sonda, NRS).

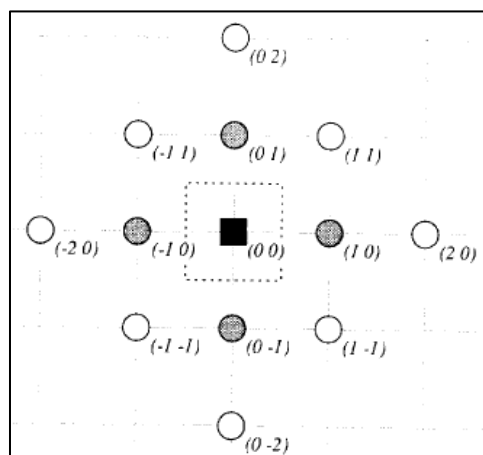
### 7.1.4 INTERPOLACIÓN

Para la interpolación de las mallas se utilizó GMT (*The generic mapping tools*). Esta es una colección de códigos abiertos, donde se pueden encontrar más de 130 herramientas para manipular conjuntos de datos geográficos y cartesianos (incluido el filtrado, el ajuste de tendencias, la cuadrícula, la proyección, entre otros) y la producción de ilustraciones de archivos PostScript encapsulados (EPS) que van desde simples gráficos  $xy$  e  $xyz$  a través de mapas de contorno.

La metodología de interpolación utilizada por GMT es la propuesta por Smith et Wessel (1990) donde mencionan que el método de interpolación considera la curvatura terrestre en una función spline bicubica. Este procedimiento, no obstante produce oscilaciones y extraños puntos de inflexión sobre todo en las regiones con déficit de datos.

Smith y Wessel (1990), muestran que agregar un parámetro de tensión permite eliminar las inflexiones artificiales. Su enfoque es llamado splines en tensión. Consiste en suavizar la condición dirigida a minimizar la curvatura global, en beneficio de una solución con más variación local.

ILUSTRACIÓN 11, SPLINES EN TENSIÓN



Fuente: Smith & Wesse (1990).

En la ilustración 11. Se muestran las diferencias finitas centrales entre los nodos de la cuadrícula, la estimación en un nodo (el cuadrado negro) viene dada por un promedio ponderado de los valores en 12 nodos cercanos (círculos). Al aumentar la tensión aumenta el peso de los círculos sombreados en relación con los no sombreados, produciendo una solución más local. En cualquier caso, se debe resolver el mismo sistema lineal y solo cambian los pesos; por lo tanto, cualquier algoritmo de curvatura mínima se puede modificar fácilmente para incluir la tensión. Las restricciones de datos se asignan a su nodo de cuadrícula más cercano; se usa un dato dentro del cuadro de guiones para restringir el valor de la cuadrícula en el cuadrado (Smith & Wessel, 1990).

## 7.2 PROCESO

Los objetivos específicos presentados en la sección 3.2, fueron dirigidos a la aplicación del modelado de tsunami para obtener la inundación de la Población Vergara y luego las curvas de fragilidad de las edificaciones de interés que se verán afectados. El modelo fue calibrado por medio de las recomendaciones de Yamazaki (2011), por medio de datos de un curso que el realizó el año 2011, en nuestro país.

Esto fue abordado por medio de simulaciones numéricas de varios escenarios, pero finalmente se optó por trabajar con las recomendaciones de ruptura de Aránguiz (2014) y un PFM para la falla.

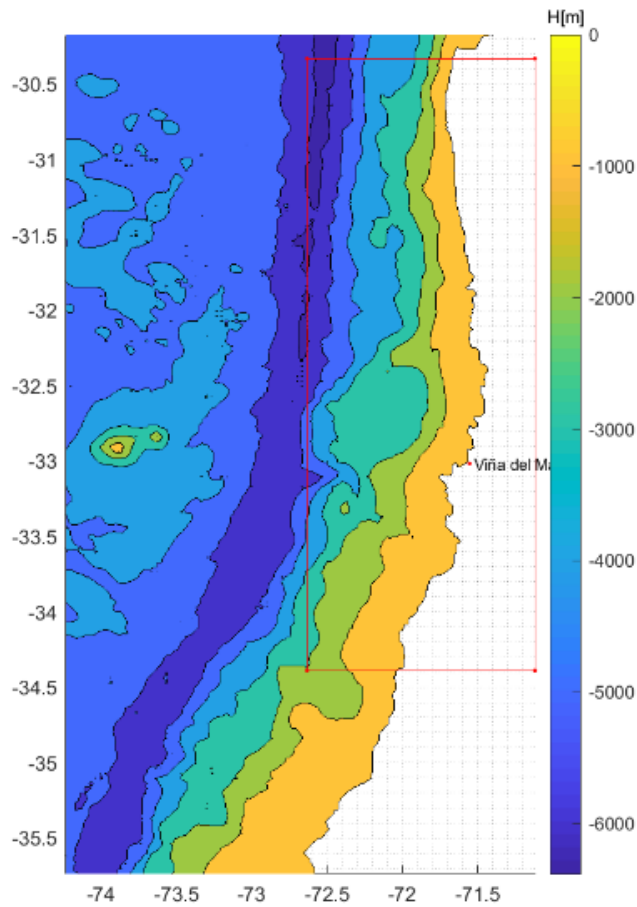
*TABLA 3, DATOS RUPTURA.*

<b>Parámetros de la ruptura</b>	<b>Valor</b>
Latitud inicial	<b>-34.389°</b>
Longitud inicial	<b>-72.632°</b>
Profundidad focal	<b>27[km]</b>
Largo de la ruptura	<b>450[km]</b>
Ancho de la ruptura	<b>140[km]</b>
Dislocación	<b>11[m]</b>

Fuente: Adaptado de Aránguiz (2014)

Para efectos de este estudio el inicio de la ruptura fue ubicada entre la línea de costa y la fosa Chile – Perú como muestra la ilustración 12, para así quedar sobre la zona de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, para generar un evento interplaca y tener una mayor magnitud resultante (Capítulo 6.3). Un PFM es un modelo de falla, que como ya se dijo en el capítulo 7.1.2 y la ilustración 10, es el que cumple con la condición de producir un sismo de características tsunamigénicas, es decir que puede producir un tsunami destructivo para las costas de Chile.

ILUSTRACIÓN 12, RUPTURA



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

Para el ingreso de la ruptura en la configuración del modelo (seteo) NEOWAVE, se debe ingresar un archivo de texto con la información de la ruptura, ilustración 13.

ILUSTRACIÓN 13, SETEO RUPTURA.

```

!... PATH
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: input_path
!...
initial condition files
INTEGER, PARAMETER:: num_fault = 1
REAL, PARAMETER:: z0_lim = 0.0
REAL, PARAMETER:: z0_lim = 5.0
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: fault1_file_name = 'fault_1730_Chile_FPRF_02.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: fault2_file_name = 'notuse_fault2.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: fault3_file_name = 'notuse_fault3.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: fault4_file_name = 'notuse_fault4.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: fault_FFM_file_name = 'subfaults_FFM_USGS_2010_Chil_full.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: eta0_FFM_file_name = 'notuse_eta01.dat'
!...
water level station (WLS) files
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: WLS_file_name = 'water_level_stations.txt'
CHARACTER(LEN=*), PARAMETER:: WLSbar_file_name = 'water_level_stations_averaged.tx'

```

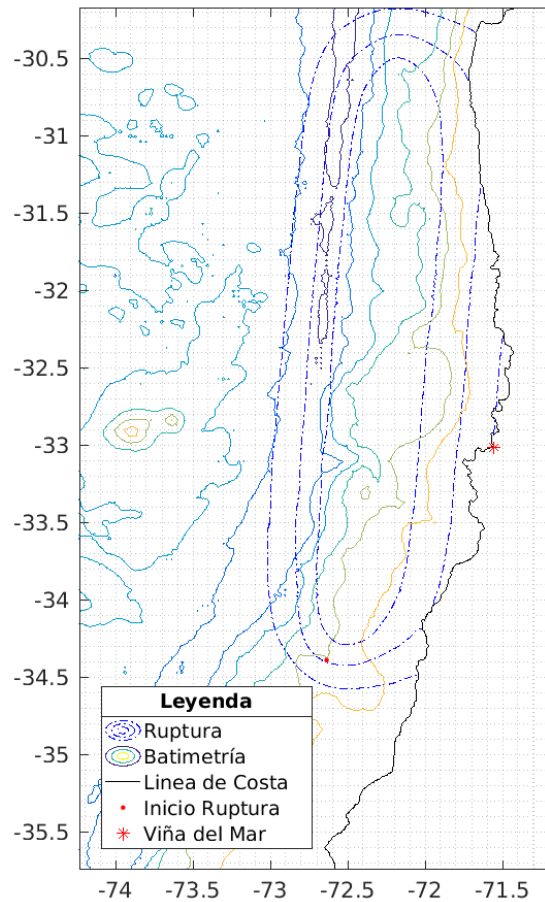
Fuente: Seteo NEOWAVE

También, es posible ingresar mareógrafos virtuales para obtener información de profundidad de inundación, velocidad de arribo del tsunami. Además, en un post-proceso, se tiene máximo Run-Up y flujo en puntos de interés.

Una vez generado el tsunami destructivo, este llegará en pocos minutos a tierra (mayores detalles en el capítulo 8) a continuación, se muestra la ilustración 14 donde se aprecia la onda del tsunami durante los primeros 3 minutos luego de ocurrido el terremoto, el inicio de la ruptura y la batimetría de la malla 2.

Se espera que la intensidad de esta ruptura sea de 8.8  $M_w$ , con el fin de representar de la mejor manera el terremoto ocurrido en 1730 (CSN, 2014).

ILUSTRACIÓN 14, INICIO RUPTURA.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

El tiempo de modelación debe ser ingresado en segundos como se muestra en la ilustración 15, y también se debe indicar desde que instante partirá propagándose el tsunami.

ILUSTRACIÓN 15, SETEO TIEMPO DE MODELACIÓN.

```
!... END Time
! REAL, PARAMETER:: TFIN = 3600.0 ! (s) = 1.0 h
! REAL, PARAMETER:: TFIN = 7200.0 ! (s) = 2.0 h
! REAL, PARAMETER:: TFIN = 10800.0 ! (s) = 3.0 h

!... START Time of double-coupled nested-grid cal.
! REAL, PARAMETER:: TODC = 300.0 ! (s) = 5 m
! REAL, PARAMETER:: TODC = 0.0 ! (s)
```

Tiempo total de modelación

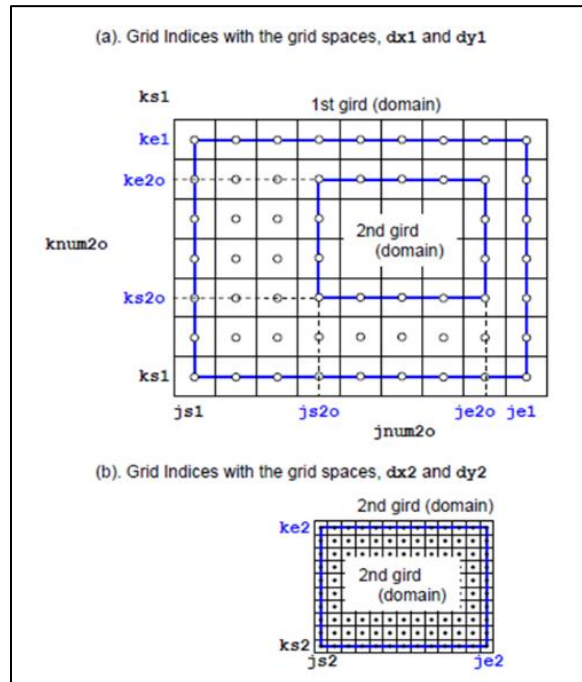
Tiempo de inicio

Fuente: Fuente: Seteo NEOWAVE.

El tiempo de simulación utilizado fue de 3 horas por recomendaciones de programador (Yamazaki, et al., 2010), para así obtener la información a usar en el análisis del tsunami y las posteriores curvas de fragilidad.

La geometría de mallas que define NEOWAVE, donde el nodo ( $ks1, js1$ ) es el inicio de cada malla 1 y que debe estar contenidos dentro de la malla 2 (aplicado a cada malla) (ilustración 16). NEOWAVE puede usar formatos batimétricos en  $xyz$  o matriz  $z$ .

ILUSTRACIÓN 16, INTERFAZ DE CUADRÍCULA.



Fuente: Manual NEOWAVE (2010).

La ilustración 16 muestra la ubicación de la rejilla interna (cuadrícula (b)) relativa a la cuadrícula exterior (cuadrícula (a)). Solo los valores azules son las configuraciones requeridas para la creación y buen calce de las mallas generadas.

NEOWAVE es un modelo que puede ser anidado hasta en cinco mallas, pero para efectos de este estudio se debieron utilizar las primeras cuatro. Esta medida fue tomada para ajustar el tiempo de cómputo y así optimizar el modelo.

ILUSTRACIÓN 17, SETEO MALLAS.

```
! Bathymetry File and Path
!... Data Format ( 0 : xyz format; 1 : z for
! INTEGER PARAMETER:: H_format = 0
INTEGER, PARAMETER:: H_format = 1
!... PATH
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H_path = '../input/'
!... Bathymetry Data Files
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H1_file_name = 'm01.dat'
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H2_file_name = 'm02.dat'
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H3_file_name = 'm03.dat'
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H4_file_name = 'm04.dat'
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: H5_file_name = 'm05.dat'
!... Adaptive Nested Grid (nbg) Masking File
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: CELL21_file_name = 'notuse21.d
CHARACTER (LEN=*) , PARAMETER:: CELL32_file_name = 'notuse32.d
REAL, PARAMETER:: H_max = 10000.0 ! (cm) : ma
REAL, PARAMETER:: H_lim = 1000.0 ! (cm) : mi
REAL, PARAMETER:: H_lim = 0.0 ! (cm) : minimum water depth for coarse grid computation
```

Fuente: Fuente: Seteo NEOWAVE.

ILUSTRACIÓN 18, SETEO INTERACCION MALLAS.

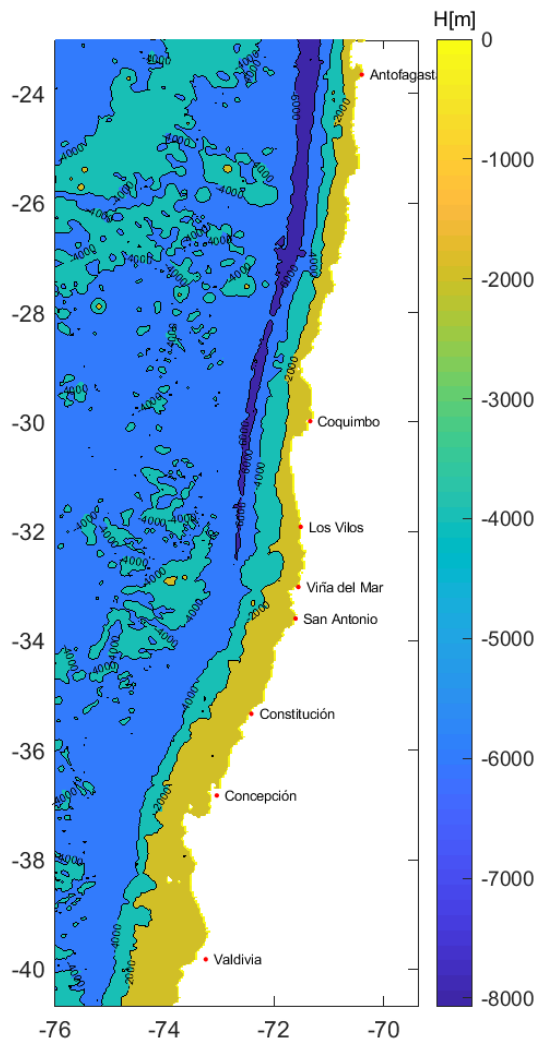
```
! 1st Grid SETUP
!-----
REAL, PARAMETER:: dt1 = 1 ! (s) : time step
REAL, PARAMETER:: dlon1 = 2.0 /60. ! (deg) : x grid size
REAL, PARAMETER:: dlat1 = 2.0 /60. ! (deg) : y grid size
REAL, PARAMETER:: dx1 = R0*dlon1*rad ! (cm) : x grid size
REAL, PARAMETER:: dy1 = R0*dlat1*rad ! (cm) : y grid size
!... BOTTOM and LEFT ends coordinates
REAL, PARAMETER:: lonL1 = 284 ! (deg)
REAL, PARAMETER:: latB1 = -40.6704175344 ! (deg) : BOTTOM END Latitude of 1st Domain
INTEGER, PARAMETER:: js1 = 1 (-)
INTEGER, PARAMETER:: je1 = 200 (-)
INTEGER, PARAMETER:: ks1 = 1 (-)
INTEGER, PARAMETER:: ke1 = 531 (-) : k1 END
INTEGER, PARAMETER:: NJK1 = (je1-js1+1)*(ke1-ks1+1)
! 1st-2nd Grid INTERFACE
!-----
!... Location of 2nd Domain in 1st Domain
! with dx1 and dy1
INTEGER, PARAMETER:: js2o = 54
INTEGER, PARAMETER:: je2o = 146
INTEGER, PARAMETER:: ks2o = 149
INTEGER, PARAMETER:: ke2o = 316
!... number of grids of 2nd Domain with dx1 and dy1
INTEGER, PARAMETER:: jnum2o = je2o -js2o +1
INTEGER, PARAMETER:: knum2o = ke2o -ks2o +1
!-----
! FIG. 1. 1st domain and 2nd domain
```

Fuente: Fuente: Seteo NEOWAVE.

Es muy importante dentro del seteo de NEOWAVE tener en cuenta la interacción entre las más mallas, el ingreso de estas es de la forma que se muestra en la ilustración 18, donde una malla debe estar contenida dentro de la siguiente para ir formando el anidado.

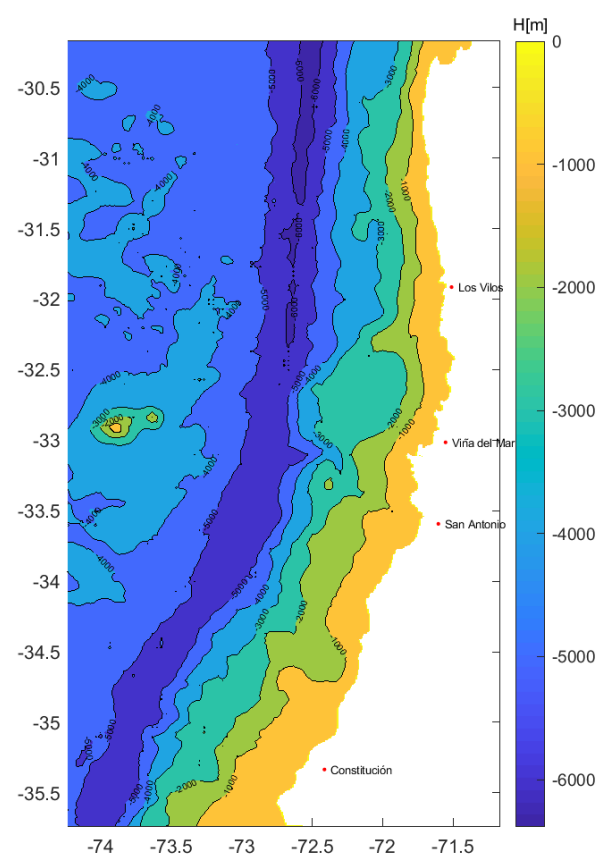
Las mallas (ilustraciones 19 - 22) fueron obtenidas mediante las recomendaciones de Yamazaki (2010). También fueron interpoladas con distintos tamaños de cuadrículas para ir generando una malla más fina a medida que el tamaño de estas se va reduciendo.

ILUSTRACIÓN 19, MALLA 01.



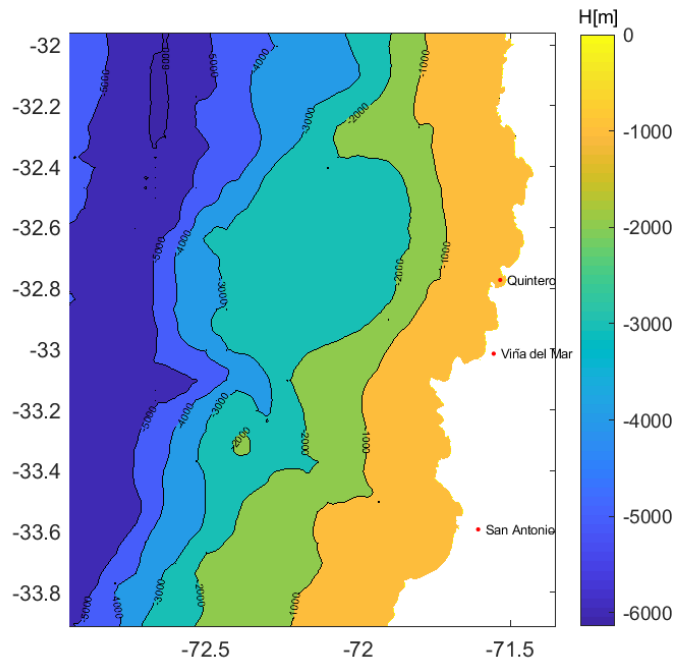
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 20, MALLA 02.



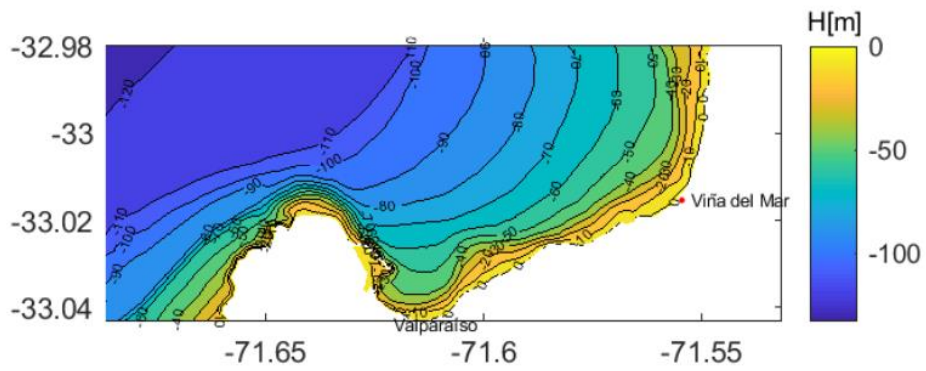
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 21, MALLA 03.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 22, MALLA 04.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

La tabla 4 muestra el tamaño de cada malla, utilizada en las modelaciones.

TABLA 4, TAMAÑO MALLAS.

Malla	Lat(Y)		Lon(x)	
	Y min.	Y máx.	X min.	X Max
Malla 1	-40,670	-23,004	-76,000	-69,367
Malla 2	-35,737	-30,170	-74,233	-71,167
Malla 3	-33,912	-31,962	-72,950	-71,350
Malla 4	-33,043	-32,98	-71,687	-71,532

Fuente: Elaboración propia.

Para la simulación numérica se utilizaron cuatro mallas anidadas de diferente resolución espacial, esto es de 120", 30", 6" y 1" de arco.

TABLA 5, ESPACIAMIENTO.

Malla	Grado Arco	Espaciamiento
1	120"	3,7 [km]
2	30"	0,925 [km]
3	6"	0,185 [km]
4	1"	0,031 [km]

Fuente: Elaboración propia (Yamazaki, et al., 2010).

Finalmente, la configuración del modelo se realizó en el código de fuente, por lo cual se debe compilar cada vez que se realice una nueva modelación. En el caso de este estudio y por la alta cantidad de datos con el que se trabaja se usó el computador de alto rendimiento (HPC) del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, Leftraru.

Del modelo se puede obtener la siguiente información:

- Profundidad de inundación.
- Máximo Run-Up.
- Velocidad ( $u, v$ ).
- Otras variables.

Esta información es descomprimida por medio de códigos Matlab para poder descomprimir, ya que el modelo entrega los resultados en archivos binarios, para efectos de este trabajo se utiliza el z máximo.

Una vez realizada la modelación con NEOWAVE, se debe analizar las curvas de fragilidad con la profundidad máxima de inundación sobre las estructuras a estudiar; lo anterior para caracterizar el posible comportamiento de la estructura frente al tsunami. Para esta parte del trabajo se decidió trabajar con cuadras que presentaban alta probabilidad de inundación, ya sea porque se encontraban cerca de la desembocadura del estero Marga Marga, o en orilla de mar, como es el caso de la Avenida Perú.

Las cuadras analizadas presentan un variado nivel ocupacional, para efectos de simplificar el análisis se consideró solo aquellas cuadras cuya planificación territorial responda a usos habitacionales y comerciales, también se tomó en cuenta que se encuentren cerca del estero Marga Marga y de la línea de costa inundadas por el tsunami.

Se analizaron un total de 43 cuadras (ilustración 22) en la Población Vergara, donde se encuentran 484 edificaciones que son afectadas por el tsunami. Esta información es necesaria para las curvas de fragilidad con la metodología aplica por Suppasri (2012).

ILUSTRACIÓN 23, CUADRAS INUNDADAS.



Fuente: Elaboración propia – Software Google Earth (escala 1[cm] - 1[km]).

Las cuadras estudiadas representan actividades económicas, viviendas, hotelería, establecimientos educacionales, servicios públicos y salud. Algunos ejemplos se muestran en la tabla 6.

TABLA 6, UBICACIÓN LUGARES DE INTERÉS

CUADRA	LUGARES DE INTERÉS
C01-1	CASINO
C01-2	PLAZA COLOMBIA
C03-1	PUB's
C04-1	ESVAL - HOTELES
C04-2	RESTAURANS
C04-6	PETROBRAS
C05-3	CARABINEROS
C05-4	CENTRO MEDICO

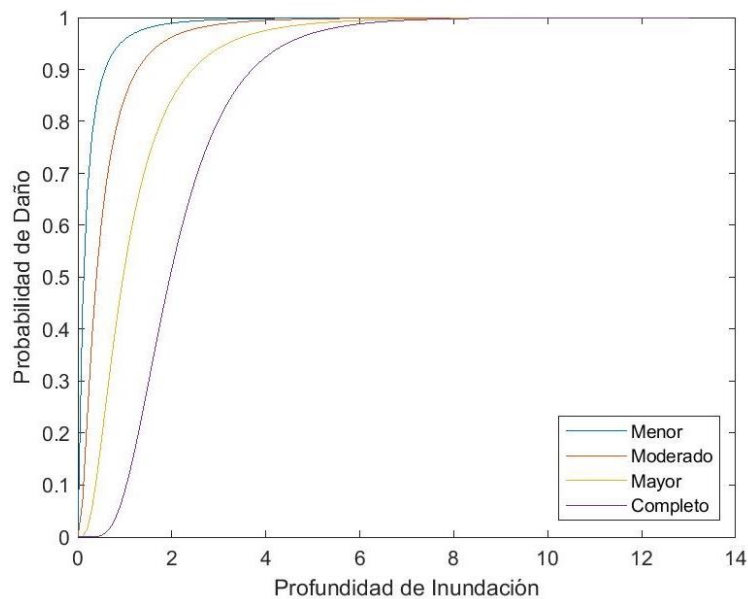
CUADRA	LUGARES DE INTERÉS
C07-2	TNE
C09-2	COLEGIO WILLIAM JAMES
C09-3	PLAZA PALACIO VERGARA
C10-1	SUPERMERCADO SUBTERRANEO - CFT UV - CPECH
C12-1	PDI - INSTITUTO SUBERCASEAUX

Fuente: Elaboración propia.

Estos se encuentran en área inundable y presentan diferentes alturas en sus estructuras, que van desde 1 piso (Instituto Subercaseaux) a 8 pisos de altura (Casino). Los edificios habitacionales alcanzan 22 pisos de altura en el sector (según Dirección de Obras Municipal de Viña del Mar e inspección visual). Es por ello la necesidad de conocer los niveles de inundación y cómo se verán afectadas las edificaciones.

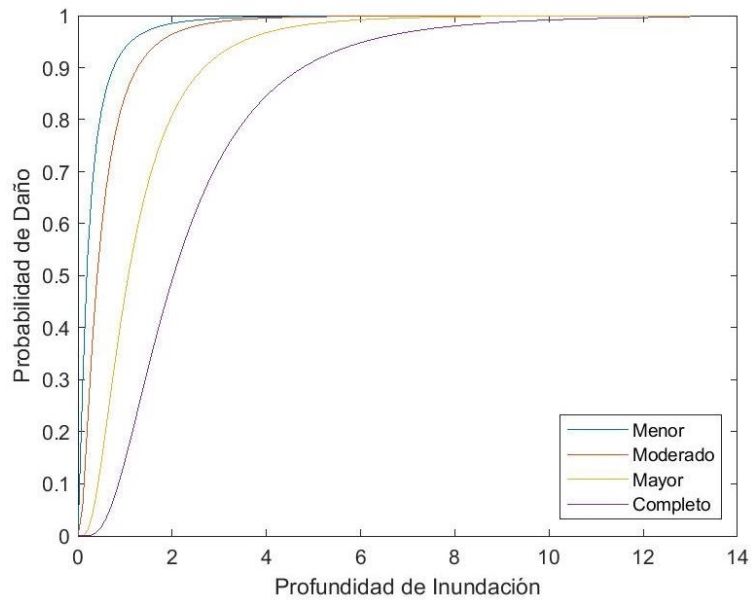
Existen 3 tipos de curvas de fragilidad, bajo las recomendaciones de Suppasri (2012) (tabla 2). Las ilustraciones 23 a 25 se presentan las curvas de fragilidad para edificaciones de Madera, Acero y Hormigón Armado. Para efectos de este estudio se consideró que el material dominante de las edificaciones en la Población Vergara es el Hormigón Armado.

ILUSTRACIÓN 24, CURVA DE FRAGILIDAD MADERA.



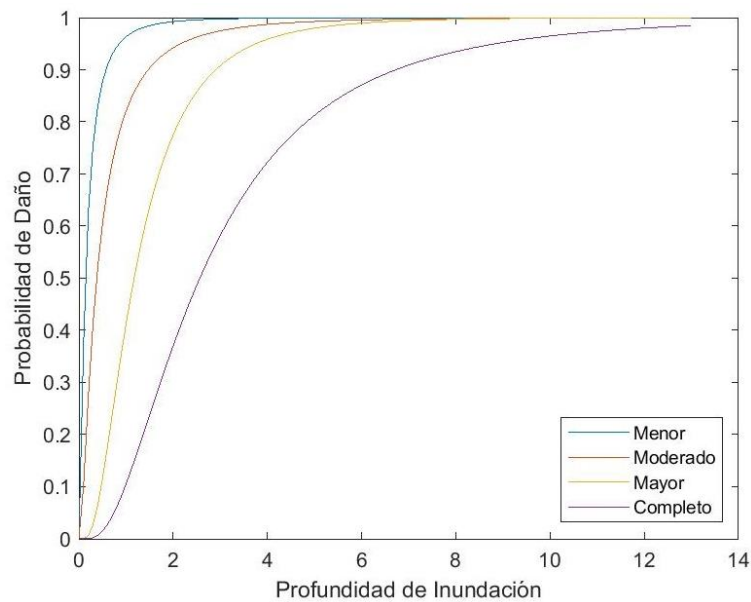
Fuente: Elaborado a partir de Suppasri (2012) – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 25, CURVA DE FRAGILIDAD ACERO



Fuente: Elaborado a partir de Suppasri (2012) – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 26, CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.



Fuente: Elaborado a partir de Suppasri (2012) – Software Matlab.

## 8. RESULTADOS

Los resultados se presentan en dos mallas en forma secuencial, considerando la malla 2 y 4, que muestran la propagación e inundación del tsunami.

### 8.1 RESULTADOS MODELACIÓN NEOWAVE

#### 8.1.1 MALLA GRUESA

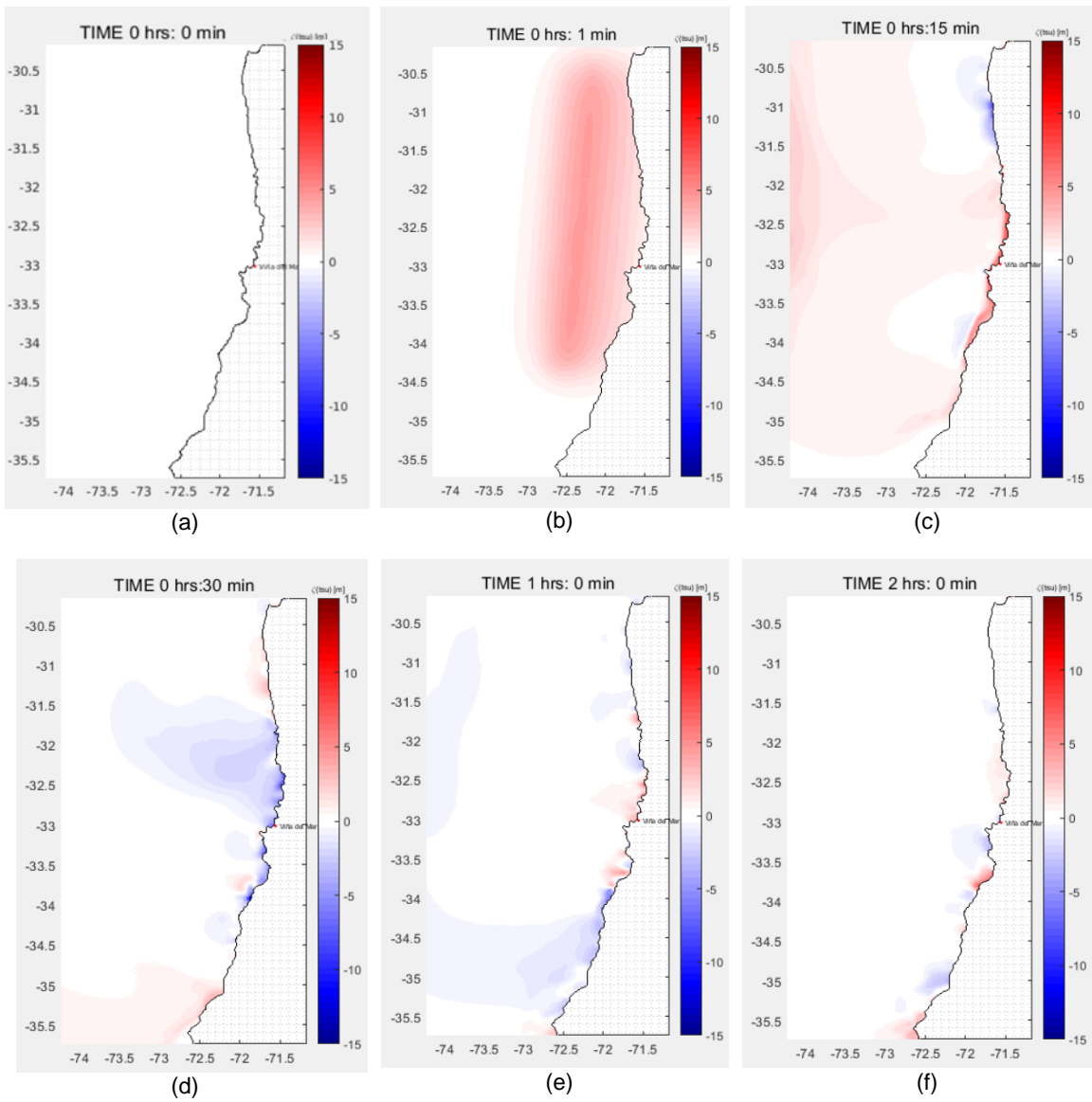
La modelación del evento tsunamigénico de 1730 se realizó en base a 4 mallas en distintos niveles de resolución. La ilustración 27 (b) muestra la generación del tsunami que abarca desde el sur de Coquimbo hasta el norte del Maule.

La ilustración 27 (c) muestra los primeros 15 [min] de simulación; instante en que la propagación de la onda de tsunami abarca desde el norte de Coquimbo hasta el sur de Concepción. Esta onda comienza a inundar sectores costeros de Concepción, Dichato, Cobquecura, Duao, Bucalemu, Pichilemu, San Antonio, Valparaíso, Concón, Quintero, Horcón, Papudo, Los Vilos, Tongoy y Coquimbo.

En la ilustración 27 (d), se observa que la onda de tsunami abarca gran parte del territorio nacional. En ese momento comienza a afectar las localidades insulares como el archipiélago de Juan Fernández, Islas Salas y Gómez. Los poblados cercanos al área de ruptura comienzan a ser amenazado por la segunda onda.

La ilustración 27 (e) muestra la primera hora de simulación de tsunami, instante en el cual el tsunami ha recorrido todo el territorio continental. Finalmente, en la ilustración 27 (f), la onda ya disminuye su energía para volver a la calma inicial antes del evento de tsunami. Además, se observan ondas atrapadas (sectores rojos en la costa) en algunas bahías, condición que se puede mantener por varias horas; esta condición es local y condicionada a la geometría de la bahía.

ILUSTRACIÓN 27, PROPAGACIÓN TSUNAMI.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

### 8.1.2 MALLA FINA

En la ilustración 28 (a) se observa la condición inicial de la costa una vez comenzado el tsunami. Viña del Mar aun no es afectada por el tsunami, el cual fue generado y viene propagándose al área de estudio.

En la ilustración 28 (b), el tsunami comienza a inundar a 13 minutos de ocurrido el terremoto (tiempo estimado por el modelo cuando el tsunami toca tierra). El estero Marga Marga canaliza el flujo, siendo la zona afectada en este instante es todo el polígono desde el Marga Marga, 8 Norte, Av. Libertad y la línea costera.

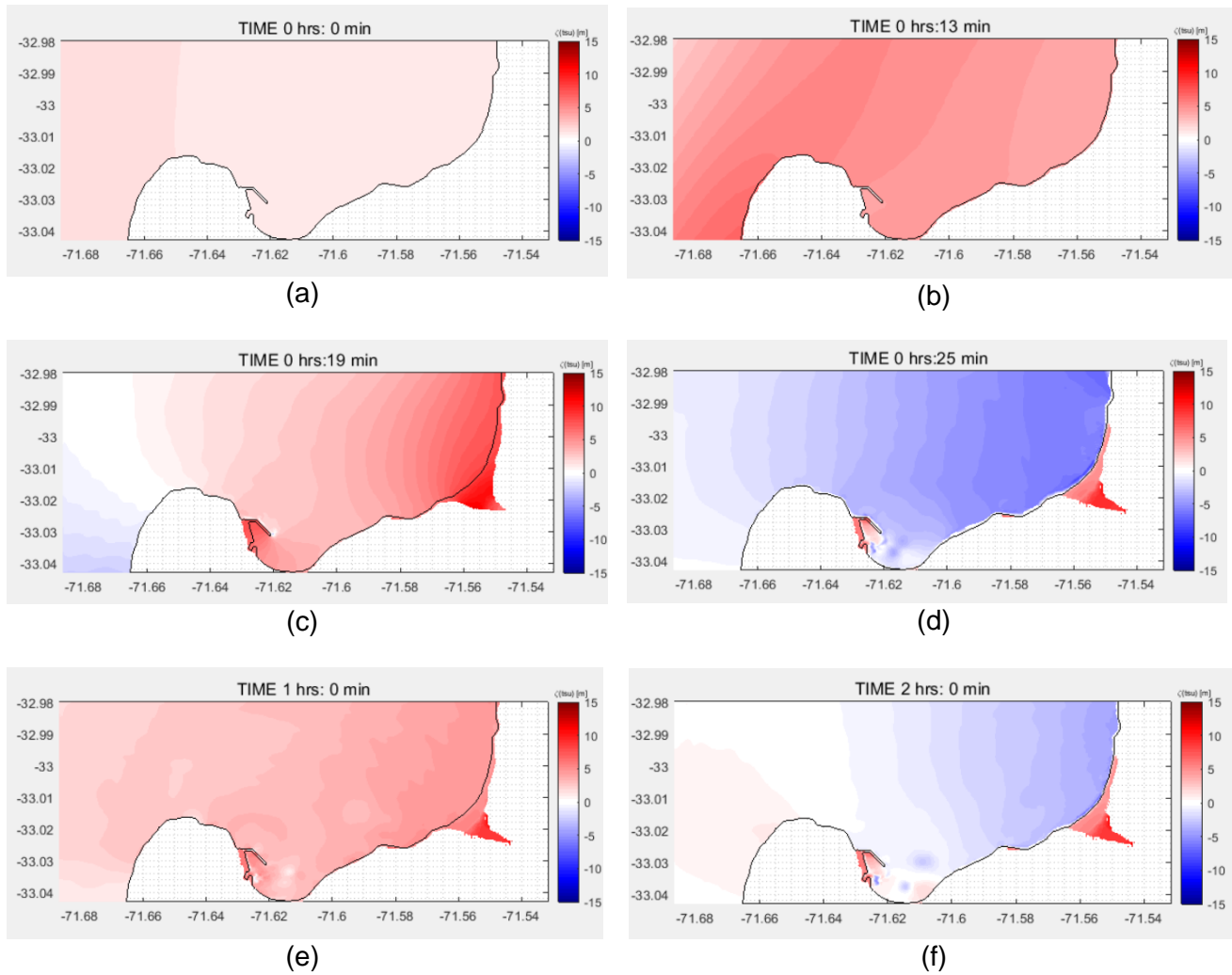
En la ilustración 28 (c), a 19 minutos de producido el terremoto, se genera la inundación máxima de 7 [m] en Av. Perú, de 6 [m] en Av. San Martín, de 4 [m] en 4 poniente, de 2 [m] en 2 poniente, en Av. Libertad en la cuadra cercana al estero de Marga Marga la inundación es de 4 [m], en 2 oriente con 1 norte la inundación es de 3[m].

La ilustración 28 (d) muestra el primer retroceso del tsunami; aún se mantiene la inundación en el sector de estudio producto de desniveles en la topografía.

La ilustración 28 (e) muestra la primera hora de trascurrido el terremoto, se observa una nueva onda del tsunami, la cual vuelve a inundar, aunque en menor medida la zona de estudio.

La ilustración 28 (f) muestra el recogimiento de la onda de tsunami. En este instante el océano comienza a volver al reposo inicial antes del tsunami, las ondas posteriores son menores a la inundación máxima.

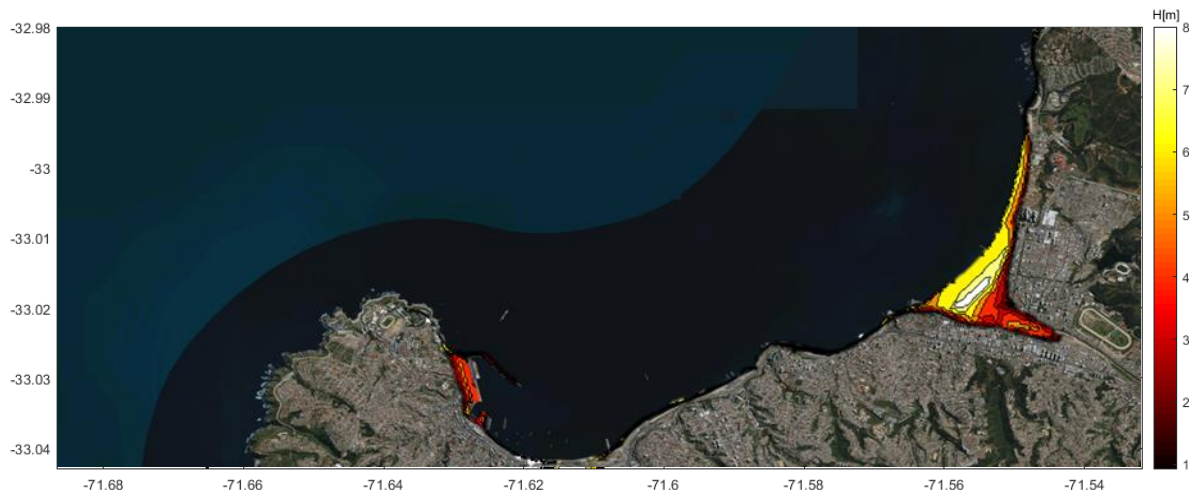
ILUSTRACIÓN 28, INUNDACIÓN POR TSUNAMI.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

La ilustración 29 muestra la inundación máxima. Se observa que las cotas menores de terreno corresponden a todo el centro de Viña del Mar, desde Quillota hasta Av. Perú, siendo este sector donde ocurren las mayores inundaciones.

ILUSTRACIÓN 29, NIVEL MÁXIMO DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

En consecuencia, la cota segura corresponde a los 30 [m] (altura de seguridad definida por el SHOA), sin embargo, se encuentra alejada de la primera línea de Viña del Mar, donde se encuentran las playas, hoteles, casino, bares, comisarias, PDI, centros médicos, colegios y universidades. Estos puntos de alta aglomeración hacen que esta zona sea expuesta ante un evento catastrófico de tsunami.

ILUSTRACIÓN 30, INUNDACIÓN ZONA DE INTERÉS.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

## 8.2 PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN MODELADA

En la ilustración 30 se observa la máxima inundación modelada por cuadra en Viña del Mar. Las máximas inundaciones ocurren en la primera línea de la población Vergara, desde el Casino, hasta 7 norte, y desde Av. Perú, hasta San Martín. El modelo muestra que en esta zona habría inundaciones máximas de 6 [m], es necesario el análisis de por cuadra para el posterior desarrollo de las curvas de fragilidad.

En la zona central de la población Vergara existe un área de menor cota. Esta área presenta inundaciones de 7 [m] corresponde a la cuadra C05 – 6. En esta zona se encuentra el supermercado Unimarc, lo cual hace que el sector sea altamente expuesto ante un evento de tsunami destructivo como el de 1730.

Los puntos de interés como Casino presentan una inundación de 5 [m], la comisaría de Carabineros de 4 [m], el Liceo Bicentenario de Viña del Mar de 4 [m], el CFT de la Universidad de Valparaíso de 5 [m], Centro médico Megasalud de 3 [m], centro médico Centromed de 6 [m], además de una veintena de Hoteles (Queen Royal, Atton, Ankara, Albamar, Enjoy Hotel del Mar, Hotel Diego de Almagro, entre otros) según la simulación realizada, podrían llegar a una inundación de más de 4 [m].

Los puntos de interés seleccionados en el párrafo anterior fueron determinados considerando áreas de gran afluencia de público como Hoteles, Centros Médicos, Casino, centros educacionales además de instituciones de primera respuesta ante emergencias como Carabineros, PDI, Bomberos, entre otros. Cabe destacar, que el Cuerpo de Bomberos de Viña del Mar (segunda compañía) se encuentra fuera de la zona de estudio, pero según la modelación, también se encuentra en zona inundable.

La ilustración 31 muestra las cuadras marcadas por colores, se especifica el nivel de inundación que se produce en lugar. Estos valores fueron aproximados para poder trabajar y desarrollar posteriormente las curvas de fragilidad.

ILUSTRACIÓN 31, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA

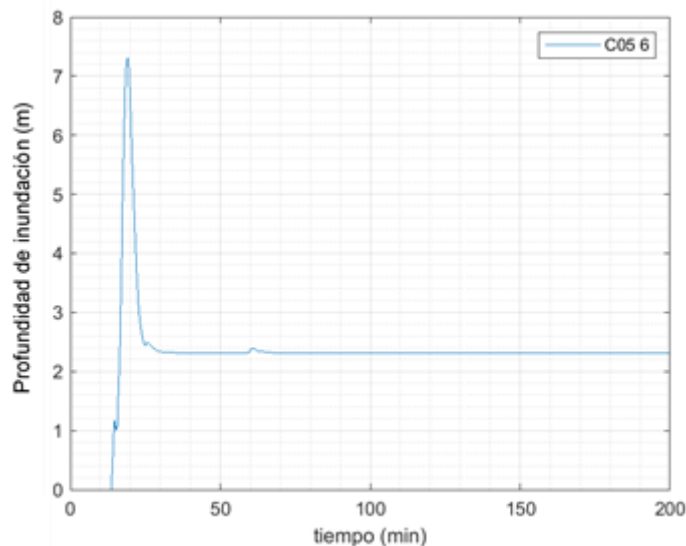


Fuente: Elaboración propia – Software Google Earth (escala 1[cm]- 1[km]).

El uso de los colores y de números enteros para el análisis de la inundación máxima ayuda a apreciar las cuadras, que para efectos de simplificar el análisis se consideró solo aquellas cuadras cuya planificación territorial responda a usos habitacionales y comerciales, que están más expuestas a sufrir daños por el tsunami. Los niveles de inundación van desde los 2 [m] a 7 [m] de altura con respecto al nivel del suelo.

En la ilustración 32. Se observa el máximo nivel de inundación en la Población Vergara corresponde a 7[m] respecto del nivel de suelo.

ILUSTRACIÓN 32, PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

La ilustración 32 muestra la profundidad de inundación del tsunami con respecto al nivel de terreno, pese a que el modelo tuvo problemas al representar el Run-Down, lo que podría ser debido a la topografía. Sin embargo, el modelo si reproduce la propagación y Run-Up del tsunami.

### 8.3 ANÁLISIS DE CURVAS DE FRAGILIDAD

Para realizar el análisis de fragilidad se utilizan solo valores de inundación máximos para facilitar la aplicación de las curvas (Cox, 2013).

Suppasri (2012) realizó un muestreo de edificaciones dañadas donde se determinó que una inundación de 8 [m] puede colapsar una edificación de hormigón, con 7 [m] de inundación el daño es completo, es decir, la edificación queda inhabitable. Esa estimación de daños que definió Suppasri (2012), fue replicada en este estudio. Es importante señalar que se trabajó bajo niveles de daños menores hasta completos; el daño menor corresponde a una estructura con paredes mojadas, que se puede habitar después de una limpieza, y el daño completo corresponde a una estructura inhabitable, o en la que se deberán realizar reparaciones mayores para su uso, como se observa en la tabla 2 del capítulo 6.6.

Bajo el criterio mostrado anteriormente, se construyeron curvas de fragilidad para distintos tipos de materiales de construcción de edificaciones, como Madera, Acero y Hormigón Armado (ilustraciones 24 a 26).

En la tabla 7 se observa la profundidad de inundación por cuadra. Se muestra que la C01 corresponde a la primera línea de edificaciones en la población Vergara, luego se sigue con la siguiente línea de edificaciones avanzando por el sector de estudio, como se muestra en la ilustración 31. Podemos notar hay cuadras donde existe un desnivel producto de imperfecciones en el terreno.

*TABLA 7, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POR CUADRA ESTUDIADA.*

<b>Cuadra</b>	<b>Profundidad de inundación [m]</b>
<b>C01-1</b>	5
<b>C01-2</b>	6
<b>C01-3</b>	6
<b>C01-4</b>	6
<b>C01-5</b>	6
<b>C02-1</b>	6
<b>C02-2</b>	6
<b>C03-1</b>	6
<b>C03-2</b>	6
<b>C03-3</b>	7
<b>C03-4</b>	6

<b>Cuadra</b>	<b>Profundidad de inundación [m]</b>
C03-5	6
C04-1	5
C04-2	6
C04-3	6
C04-4	7
C04-5	6
C04-6	6
C05-1	4
C05-2	5
C05-3	4
C05-4	5
C05-5	6
C05-6	7
C06-1	3
C06-2	4
C06-3	3
C06-4	3
C06-5	6
C07-1	3
C07-2	3
C07-3	2
C07-4	2
C08-1	4
C08-2	2
C08-3	2
C09-1	5
C09-2	4
C09-3	2
C10-1	5
C10-2	3
C11-1	4
C12-1	3

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se dijo con fines de facilitar la interpretación, se consideró que todas las edificaciones de la Población Vergara son de Hormigón Armado, ya que es el material dominante de construcción en el sector. La curva de fragilidad de Hormigón Armado elaborada por Suppasri (2012), se presenta en la tabla 8.

TABLA 8, PARÁMETROS CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.

<b>Hormigón Armado</b>			
<b>Clasificación</b>	$\mu'$	$\sigma'$	$R^2$
<b>Daño Menor</b>	-1.9636	1.0966	0.91
<b>Daño Moderado</b>	-0.9723	1.0600	0.98
<b>Daño Mayor</b>	0.1577	0.7090	0.97
<b>Daño Completo</b>	0.9423	0.7522	0.94

Fuente: Suppasri (2012).

Utilizando los datos de la tabla 8, es que se construye la ilustración 26 “Curva de Fragilidad del Hormigón Armado”, desde donde se extrae el porcentaje de daño acumulado que sufrirían las edificaciones de la Población Vergara. Estos resultados son presentados en la tabla 9.

La información corresponde al nivel de daño acumulado, es decir, para que las edificaciones tengan el siguiente nivel de daño deben tener el daño anterior, por ejemplo, una estructura con daño completo tendrá ya daño menor, moderado y mayor. Esto se muestra en la tabla 9.

TABLA 9, PORCENTAJE DE DAÑOS ACUMULADO RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.

<b>Inundación [m]</b>	<b>Completo (%)</b>	<b>Mayor (%)</b>	<b>Moderado (%)</b>	<b>Menor (%)</b>
<b>2</b>	37.02	77.49	94.19	100
<b>3</b>	58.53	90.78	97.46	100
<b>4</b>	72.25	95.84	98.7	100
<b>5</b>	81.23	97.97	99.26	100
<b>6</b>	87.06	98.94	99.54	100
<b>7</b>	90.89	99.42	99.97	100

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 10 muestra la cantidad de estructuras que podrían ser dañadas por la inundación del tsunami, es necesario considerar todas las estructuras dentro de la cuadra para el análisis, porque se debe conocer con cuantas edificaciones se realizan las curvas, para aplicar la metodología de Suppasri (2012).

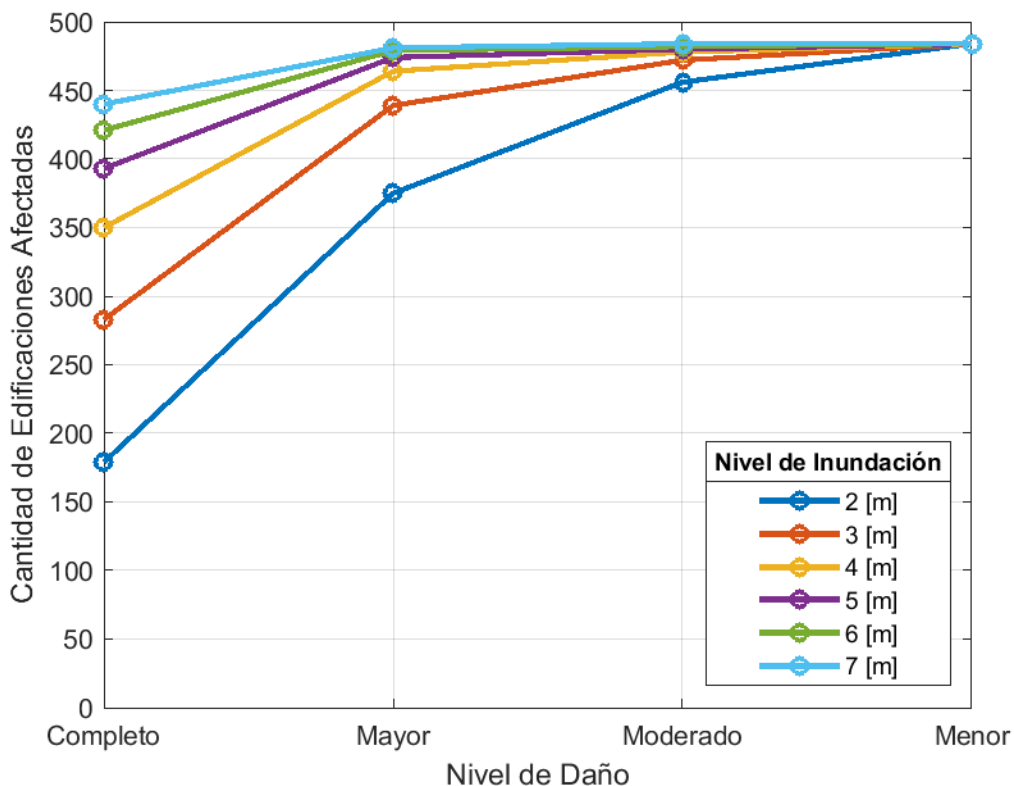
TABLA 10, EDIFICACIONES DAÑADAS RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.

Inundación [m]	Completo	Mayor	Moderado	Menor
2	179	375	456	484
3	283	439	472	484
4	350	464	478	484
5	393	474	480	484
6	421	479	482	484
7	440	481	484	484

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 10 se elaboró la ilustración 33, donde se aprecia que todas las edificaciones de la Población Vergara presentarán daño menor, mientras que daño moderado, mayor y completo va variando a medida que el nivel de inundación se eleva.

ILUSTRACIÓN 33, NÚMERO ESTIMADO DE EDIFICIOS DAÑADOS, PARA SEIS NIVELES DE INUNDACIÓN Y CUATRO NIVELES DE DAÑO.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

A partir del análisis de curvas de fragilidad y las profundidades de inundación obtenidas por la modelación, se podría analizar la posibilidad de evacuación vertical en un sector donde se presentan profundidades entre 2 y 3 [m], como muestra la ilustración 34, donde se encontrarían menores daños debido a la inundación del tsunami, sin embargo, se debe realizar un análisis detallado de las estructuras para determinar la efectividad de este tipo de métodos de evacuación, cabe mencionar que este análisis no está dentro de los objetivos de este proyecto de título por lo cual no se profundizó en el tema.

ILUSTRACIÓN 34, SECTOR DE MENOR INUNDACIÓN.



Fuente: Elaboración propia – Software Google Earth (escala 1[cm] - 1[km]).





## **9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.**

### **9.1 CONCLUSIONES.**

En el desarrollo del presente proyecto se simuló un evento tsunamigénico destructivo, el cual mostró la exposición en que se encuentra en parte de Viña del Mar y especialmente la Población Vergara.

Para la generación del tsunami se utilizó un tipo de falla plana con características equivalentes a un terremoto de 8.8  $M_w$ . Investigaciones anteriores indican que el evento en cuestión tuvo una magnitud de 9.0  $M_w$ , por lo cual, el escenario propuesto corresponde a un caso del evento tsunamigénico de 1730, es decir, la inundación máxima podría ser incluso mayor al simulado.

Es necesario considerar que el modelo no representa bien el Run-Down, pero sí representa bien el Run-Up y la propagación del tsunami; esto se puede deber a problemas con la topografía utilizada.

Con la información de inundación obtenida desde el modelo NEOWAVE, se calcularon las curvas de fragilidad, con la cual se obtuvo la probabilidad de daños de estructuras. Estas se desarrollaron en función de la inundación, la distribución normal estándar y la media, estas últimas obtenidas del trabajo de Suppasri (2011).

De las curvas de fragilidad se obtuvo la probabilidad de daño ante los efectos de la inundación máxima. A partir de ello, se calculó la cantidad de edificaciones dañadas ante una inundación debido al tsunami simulado, lo anterior utilizando como guía el trabajo de Cox (2013).

Se desprenden las siguientes conclusiones.

- La zona central de Chile es un área expuesta debido a la particular morfología costera, es decir, múltiples bahías cerradas generan ondas atrapadas que pueden mantenerse por mayor tiempo.
- La zona de Valparaíso es un área particular debido a que Punta Curaumilla y específicamente el molo generan efectos hidrodinámicos singulares, que pueden afectar la propagación del tsunami.
- Viña del Mar es una zona expuesta debido a que topográficamente es un sector plano e irregular; además el estero Marga Marga funciona como canalizador del flujo del tsunami, ya que este ayuda al ingreso de agua inundado la ciudad.
- La Población Vergara es una zona con una gran densidad poblacional, donde se encuentran múltiples hoteles, discotecas, pub, comercio y restaurantes además de casino Municipal de juegos, equipamientos médicos, equipamientos educacionales, áreas de servicios, cuarteles policiales y áreas de esparcimiento, lo que evidencia la exposición ante un evento tsunamigénico. Por ello aplica mejorar la planificación

territorial ante emergencias. Un ejemplo de esto es que el Centro de Evacuación Masivo (CEM) se encuentra el estadio Sausalito (Polideportivo regional) a más de 3 [km] desde el casino de juegos, es decir a 30 minutos caminando según ejercicios de la Dirección de Protección Civil y Emergencia de Viña del Mar.

- Los antecedentes de este estudio no dejan duda del constante riesgo de tsunami al que se encuentra sometida la ciudad de Viña del Mar. Prácticamente todo el centro de la ciudad que está emplazada en una zona inundable, y para el evento en las cuadras estudiadas se registraron profundidades de inundación de cerca de 7[m].
- Las curvas de fragilidad son un eficiente método para evaluar daño de edificaciones ante un evento de tsunami, ya que permiten estimar los efectos de la inundación en infraestructura dependiendo de su composición estructural. En ese sentido se utilizó este método para obtener la probabilidad de daño ante diferentes niveles de inundación, considerando una edificación tipo de Hormigón Armado.
- La curva de fragilidad calculada en el trabajo de Suppasri (2012) indica que, ante una inundación máxima de 8[m], las estructuras de Hormigón Armado se dañan completamente, es decir, quedan inutilizables. Producto de lo anterior, es que se debieran analizar con más detalles las formas de evacuación.
- Las máximas inundaciones encontradas en este trabajo son entre 6 a 7 [m], es decir, casi toda la primera línea de las cuadras estudiadas de la población Vergara, más de un 87% de las edificaciones tendría un daño completo.
- El costo económico de las edificaciones que serían afectadas con daño menor es de \$ 1.9 millones de dólares, daño moderado es \$ 4.6 millones de dólares, daño mayor de \$ 27.5 millones de dólares y daño completo de \$ 115 millones de dólares.
- El daño material es acumulable y reparable tanto por inversiones públicas como privadas, sin embargo, las pérdidas humanas es un costo incalculable, por lo cual, un plan de mitigación ante el riesgo de tsunami minimiza este impacto.
- De este estudio se infiere la existencia de un área de menor exposición al tsunami en la cual se podría evaluar la evacuación vertical, sin embargo, se debe realizar un análisis detallado de la estructura para determinar la efectividad de este tipo de métodos de evacuación.
- Finalmente, este proyecto de título invita a reflexionar sobre la exposición de una zona altamente turística, y la importancia de la educación en torno al desastre. Señaléticas, simulacros y educación de los planes de evacuación podrían disminuir este riesgo.

## 9.2 TRABAJOS FUTUROS.

Del desarrollo de este proyecto de título se desprenden una serie de temas, que podrían ser una continuación a la investigación en una futura memoria.

- El análisis del comportamiento del modelo en dársenas portuarias y molos de abrigo, en estas zonas se producen importantes efectos hidrodinámicos, sin embargo, este proyecto de título no indagó sobre este fenómeno.
- El trabajo de Cox (2013) se realizó en una serie de tsunamis de distinta magnitud sísmica, de esta forma evaluó el daño que podría producir estos eventos, el presente proyecto de título adaptó ese trabajo y lo analizó en función de la inundación máxima, por lo que se propone estudiar en otro proyecto el daño ante distintos tsunamis en Viña del Mar.
- Como se mostró en este proyecto de título, Viña del Mar es una zona altamente expuesta ante un evento tsunamigénico, aquí se mostró el efecto de este en la Población Vergara. Sin embargo, se podría realizar un análisis del tiempo de respuesta con relación a la evacuación del sector de Playa recta Las Salinas utilizando el modelo NEOWAVE y otros de evacuación pedestre.
- En ese sentido, otro análisis podría realizarse en el sector de Reñaca, donde la población flotante crece de forma exponencial en verano, evaluar el tiempo de respuesta y la calidad de las vías de evacuación ante un escenario de ocupación máxima en temporada estival.

## **10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN**

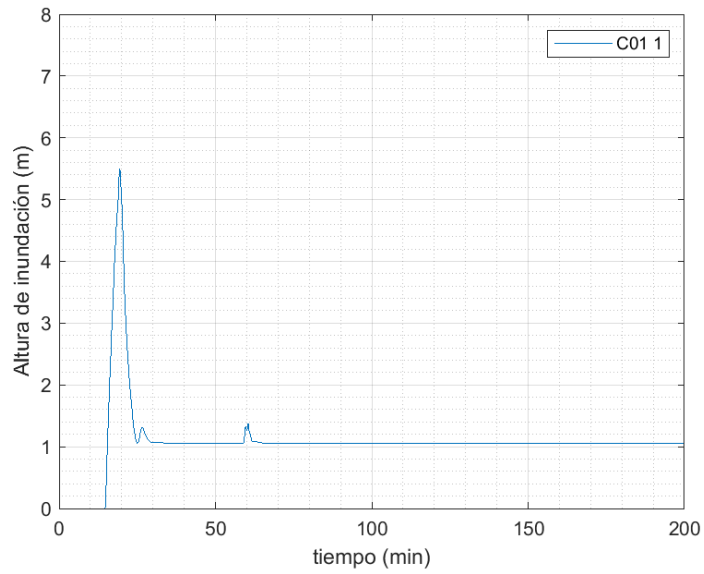
1. Quiroz, M., Aranguiz, R. & Belmonte, A., 2014. Peligro de Tsunami en Chile Central: Modelo de Ruptura del evento de 1730. Santiago de Chile, s.n.
2. Alacero, 2016. <http://www.construccionenacero.com>. [En línea] [Último acceso: abril 2019].
3. Aránguiz, R., 2013. Generación del Tsunami de 1960 en el Sur de Chile , s.l.: s.n.
4. Aranguiz, R. & Quiroz, M., 2014. Peligro de Tsunami en Chile Central: Modelo de ruptura del evento de 1730, s.l.: s.n.
5. Aránguiz, R. & Quiroz, M., 2016. Simulación numérica del tsunami de 1730 en el puerto de San Antonio, s.l.: s.n.
6. Ballore, M. D., 1863. Historia sísmica de los Andes meridionales al sur de paralelo XVI, Santiago de Chile : Cervantes.
7. Barría, R., León, J. & Catalán, P., 2017. Libro del Bordemar. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
8. Burgos, L., 2011. Modelos de tsunamis desarrollados por la comunidad científica.. En: Memoria de titulación para obtención del título de Ingeniero Civil, UTFSM. s.l.:s.n.
9. Cardona, O. D., 2001. Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos, s.l.: Universidad Politécnica de Cataluña.
10. Carvajal, M., 2015. Tamaño del terremoto de Chile central 1730, inferido de evidencias históricas, geológicas y modelación numérica del tsunami resultante, s.l.: s.n.
11. Chile, U. d., 2017. Informe Final Etapa 3 Riesgo sísmico, s.l.: s.n.
12. Cisternas, M., 2017. Registros geológicos e históricos de grandes terremotos y tsunamis en la costa de Chile, s.l.: s.n.
13. Cisternas, M., Gorigoitia, N., Torrejón, F. & Urbina, X., 2011. Terremoto y tsunami de Chile central de 1730: ¿un gigante o una serie de eventos menores?, s.l.: s.n.
14. Contreras, M. N. T., 2013. Modelo de Falla Planar en Taludes. s.l.:scribd.
15. CORFO, 2018. [www.corfo.cl](http://www.corfo.cl). [En línea] [Último acceso: Enero 2018].
16. Cox, W., 2013. Application of fragility curves to estimate building damage and economic loss at a community scale: a case study of Seaside, Oregon..
17. CSN, U. c., 2014. Sísmicidad y terremotos en Chile. s.l.:s.n.

18. Espinoza, L. U., 2015. Estimación de daños por tsunami en Iquique, Concepción: s.n.
19. FEMA, F. E. M. A., 1999. EARTHQUAKE LOSS ESTIMATION METHODOLOGY. Vol. 1 ed. Washington, D.C.: Technical Manual.
20. FEMA, F. E. M. A., 1999. NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, Washington, D.C.: s.n.
21. Jorquera, R., 2014. CATÁLOGO DE TERREMOTOS SUBDUCTIVOS CHILENOS PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD, s.l.: s.n.
22. León, J., 2017. Análisis multi-escalar de evacuación en caso de tsunamis, Población Vergara, Viña del Mar, s.l.: s.n.
23. León, J. & March, A., 2014. Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: a case study of Talcahuano, Chile., s.l.: s.n.
24. León, J. y otros, 2019. Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile.
25. Leyton, F., Ruiz, J., Campos, J. & Kausel, E., 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison, s.l.: Elsevier.
26. Lomnitz, C., 1970. Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955. En: Geogische Rundschau. s.l.:s.n.
27. Madariaga, R., 1998. Sismicidad de Chile, s.l.: Département de Sismologie, Université Denis Diderot de Paris 7..
28. Moreno, R., 2010. CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EVALUAR EL DAÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS DE CONCRETO ARMADO CON LOSAS RETICULARES. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V, 25(4), p. 61–71.
29. NASA, 2017. [podaac.jpl.nasa.gov](http://podaac.jpl.nasa.gov). [En línea].
30. Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. Bulletin of the Seismological Society of America.
31. ONEMI, 2011. Chile Preparado 2011. Viña del Mar .V región de Valparaíso. Comuna de Viña del Mar, s.l.: s.n.
32. Ortega, B., 2011. ESTIMACIÓN DE DAÑOS POR TSUNAMI USANDO MODELO NUMÉRICO Y DATOS POST-TSUNAMI. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
33. Pardo, M. y otros, 1996. Central Chile Pwave tomography: time and space velocity variations within the 1985 earthquake rupture zone, preprint., s.l.: s.n.
34. Perrey, A., 1854. Documents relatifs aux tremblements de terre, au Chili, par M. Alexis Perrey,... présentés à la Société impériale d'agriculture, d'histoire naturelle et des arts utiles de Lyon, dans la séance du 3 mars 1854, s.l.: s.n.

35. Rehman, K. & Cho, Y.-S., 2015. Building Damage Assessment Using Scenario Based Tsunami Numerical Analysis and Fragility Curves. Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University.
36. Riquelme, S., 2011. Tsunami-Fuente Sísmica, s.l.: s.n.
37. Sanhueza et al., 2013. Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. Revista de la Construcción vol.12 no.1 Santiago.
38. Santiago, 2018. [http://www.vinadelmar.travel/index\\_i.html](http://www.vinadelmar.travel/index_i.html). [En línea].
39. Smith & Wessel, 1990. Griding with continuous curvature splines in tension. GEOPHYSICS., Volumen VOL. 55.
40. Suppasri, y otros, 2012. Building damage characteristics based on surveyed data, s.l.: s.n.
41. UNISDR, 2018. [www.eird.org](http://www.eird.org). [En línea].
42. UNISDR, 2019. <https://www.unisdr.org>. [En línea] Available at: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology#letter-e>
43. Valderrama, A., 2010. <http://evacuacionalertayalarma.blogspot.com>. [En línea].
44. Yamazaki, Y., Cheung, K. F. & Kowalik, Z., 2010. NEOWAVE Manual. s.l.: Department of Ocean and Resource Engineering, University of Hawaii at Manoa y Institute of Marine Science University of Alaska, Fairbanks..
45. Yamazaki, Y., Cheung, K. F. & Kowalik, Z., 2011. Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run-up. International Journal for Numerical Methods in Fluids.
46. Yamazaki, Y., Kowalik, Z. & Cheung, K. F., 2009. Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up.. International Journal for Numerical Methods in Fluids.

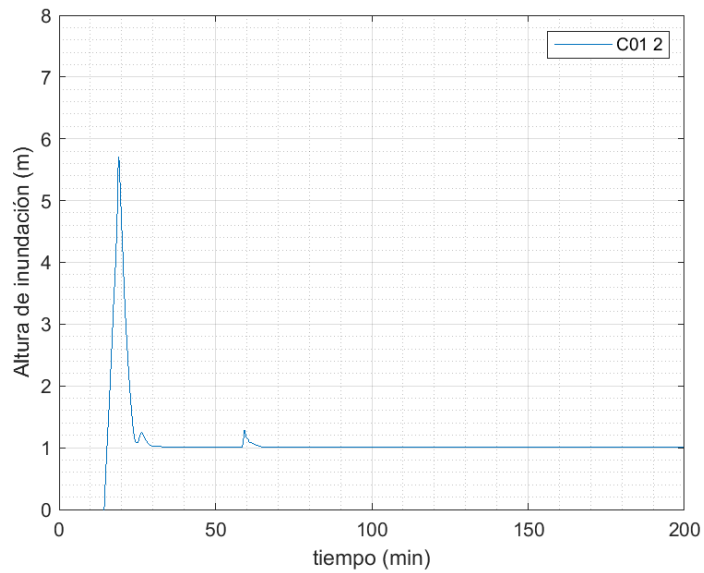
## 11. ANEXO

ILUSTRACIÓN 38, INUNDACIÓN CUADRA C01\_1.



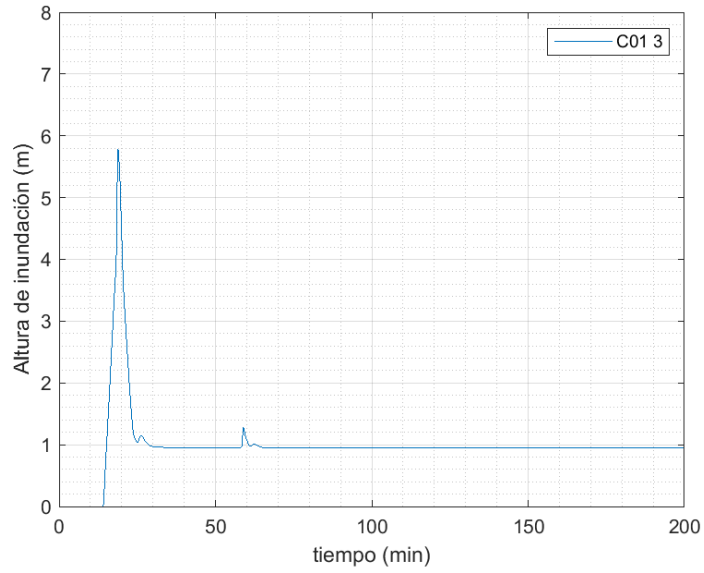
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 39, INUNDACIÓN CUADRA C01\_2



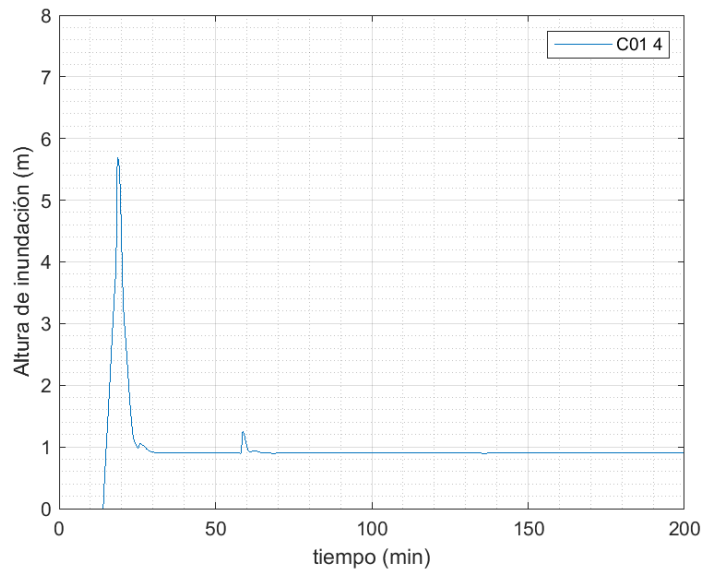
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 40, INUNDACIÓN CUADRA C01\_3.



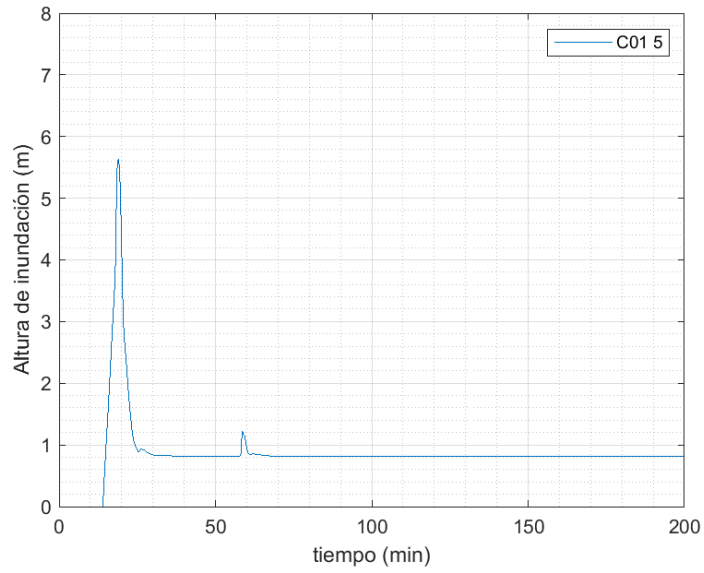
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 41, INUNDACIÓN CUADRA C01\_4.



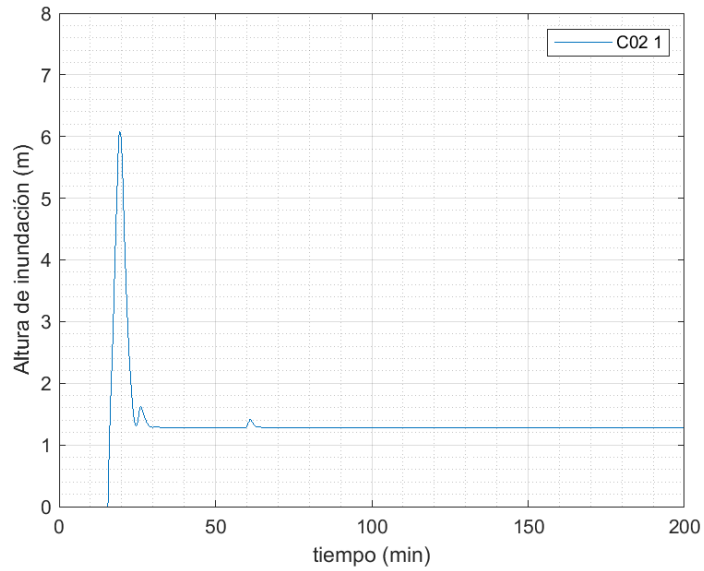
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 42, INUNDACIÓN CUADRA C01\_5.



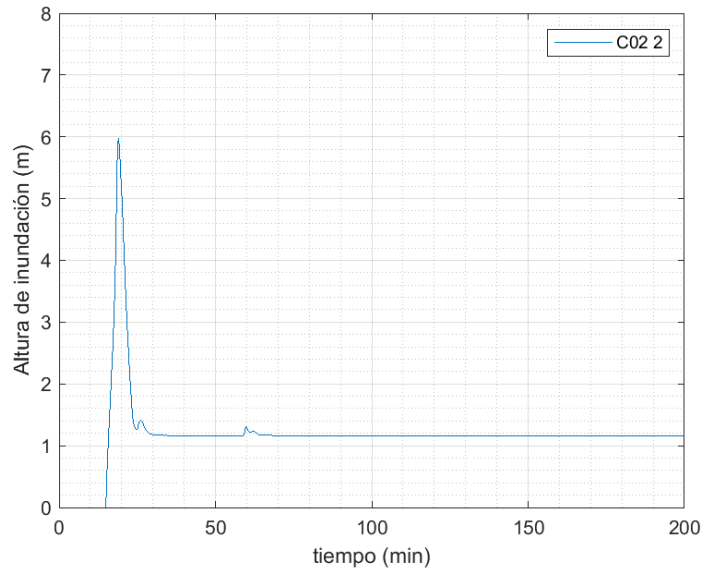
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 43, INUNDACION CUADRA C02\_1.



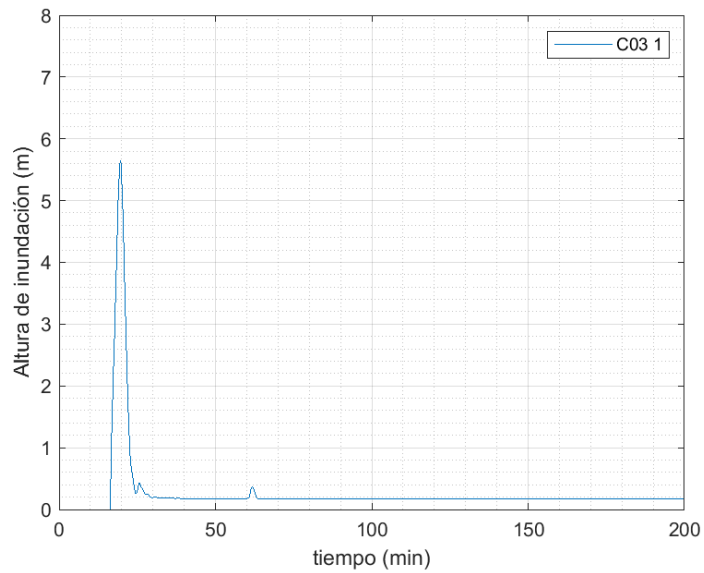
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 44, INUNDACIÓN CUADRA C02\_2



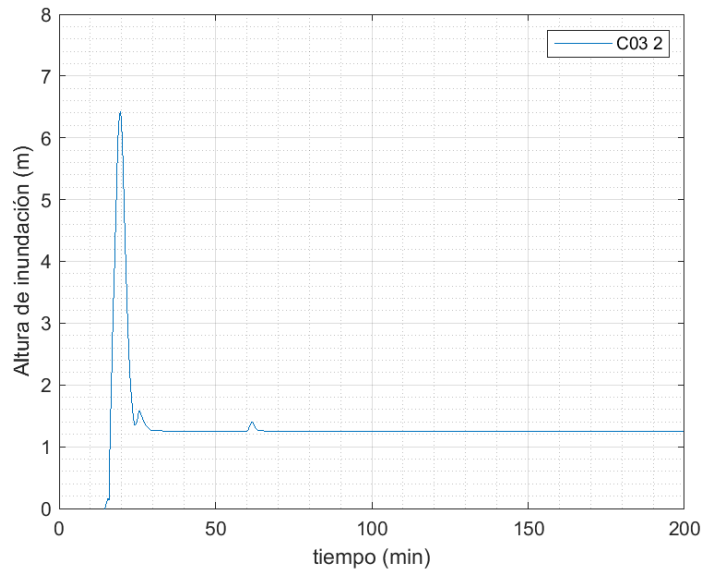
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 45, INUNDACION CUADRA C03\_1.



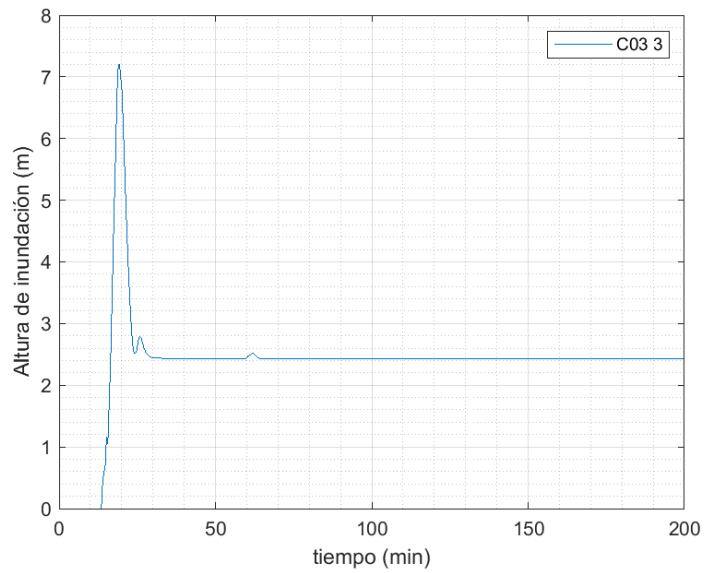
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 46, INUNDACIÓN CUADRA C03\_2.



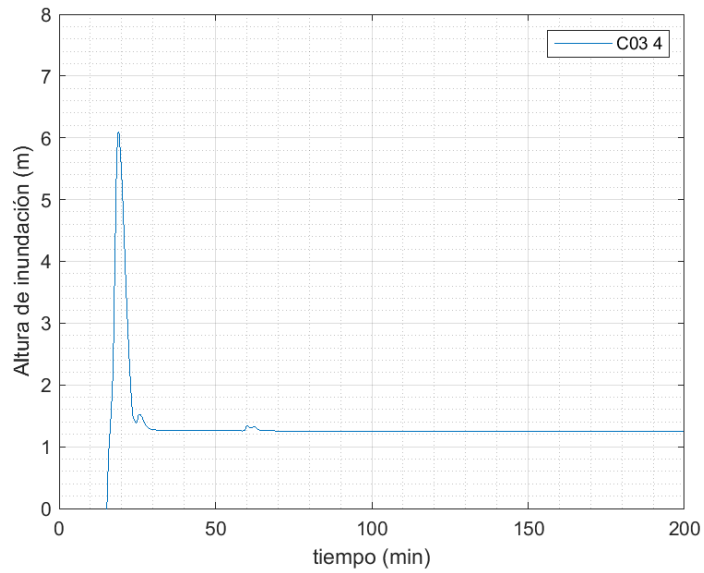
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 47, INUNDACIÓN CUADRA C03\_3



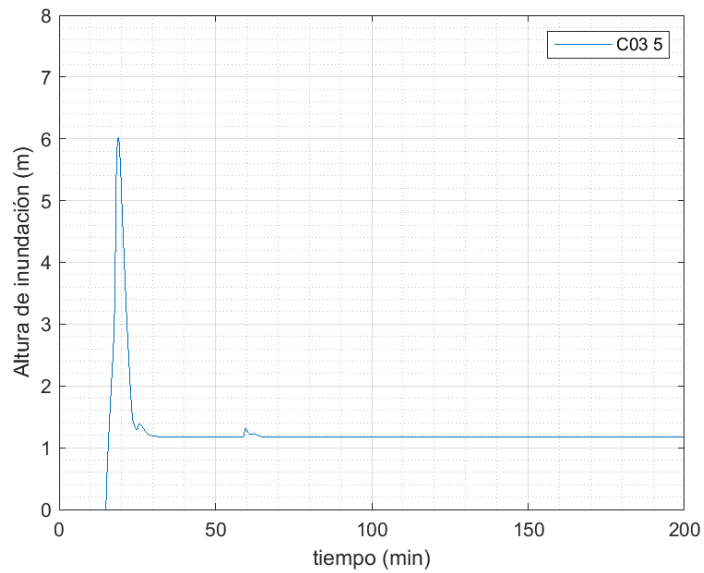
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 48, INUNDACIÓN CUADRA C03\_4.



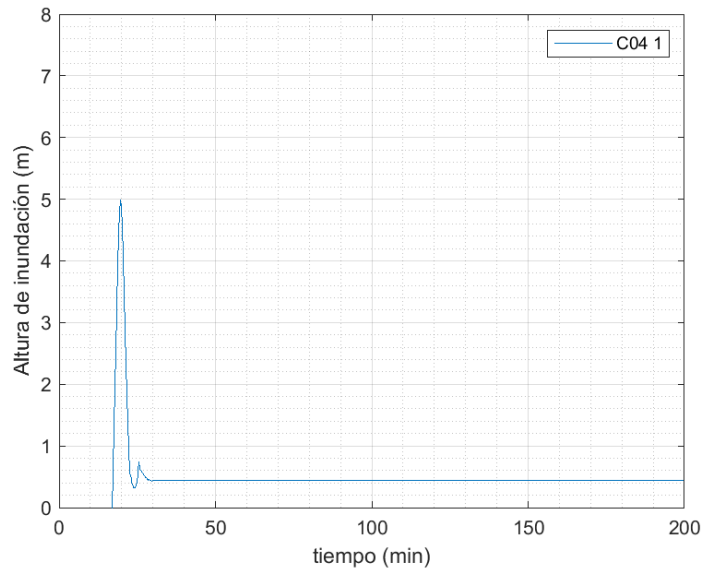
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 49, INUNDACIÓN CUADRA C03\_5.



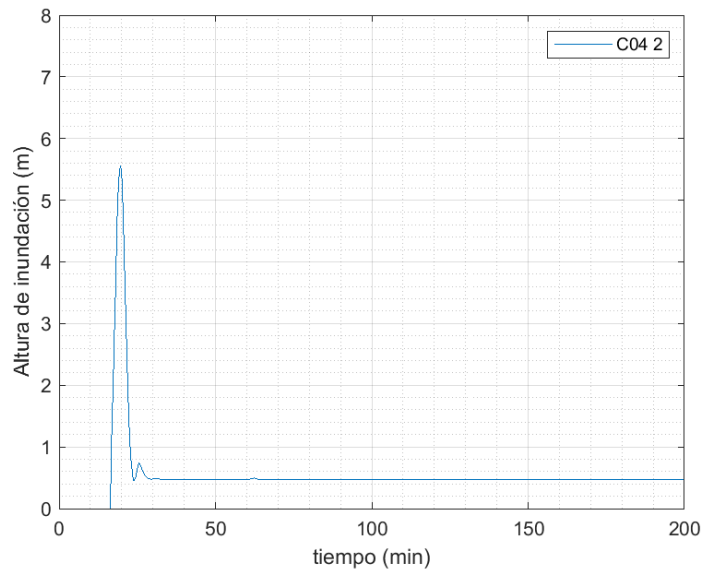
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 50, INUNDACIÓN CUADRA C04\_1.



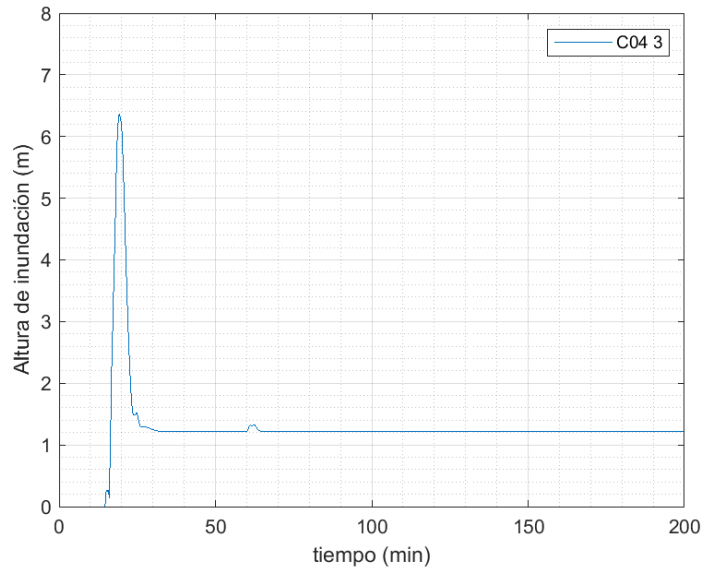
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 51, INUNDACIÓN CUADRA C04\_2.



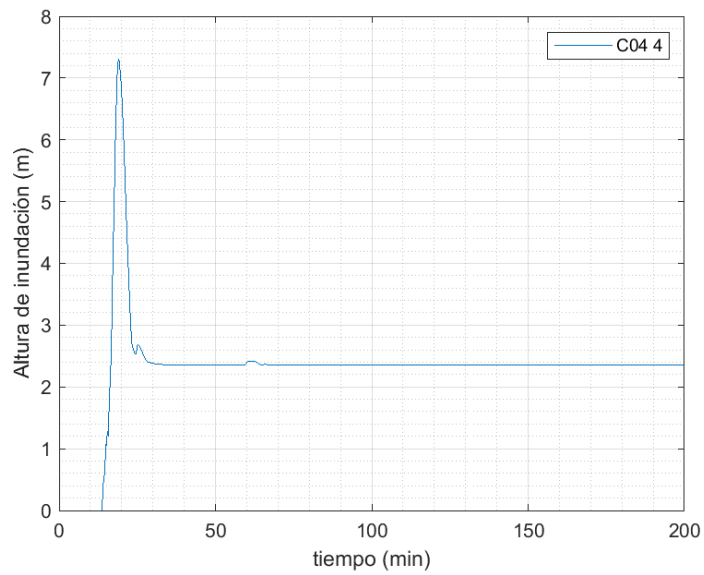
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 52, INUNDACIÓN CUADRA C04\_3.



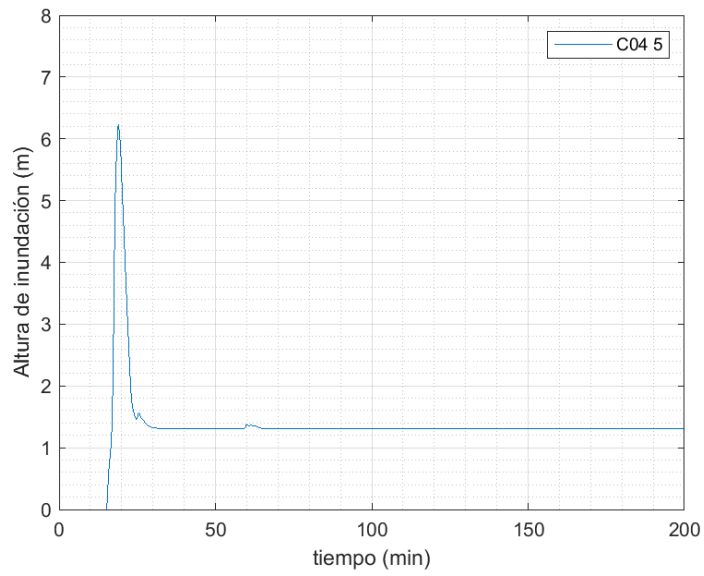
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 53, INUNDACIÓN CUADRA C04\_4.



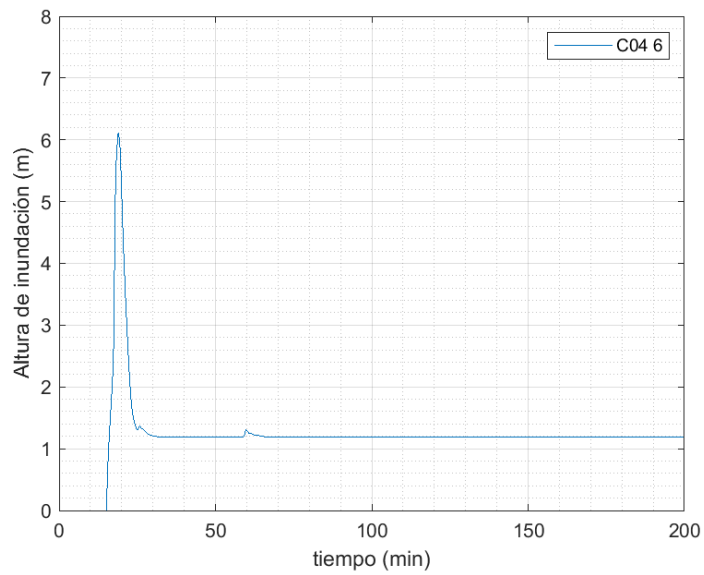
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 54, INUNDACIÓN CUADRA C04\_5.



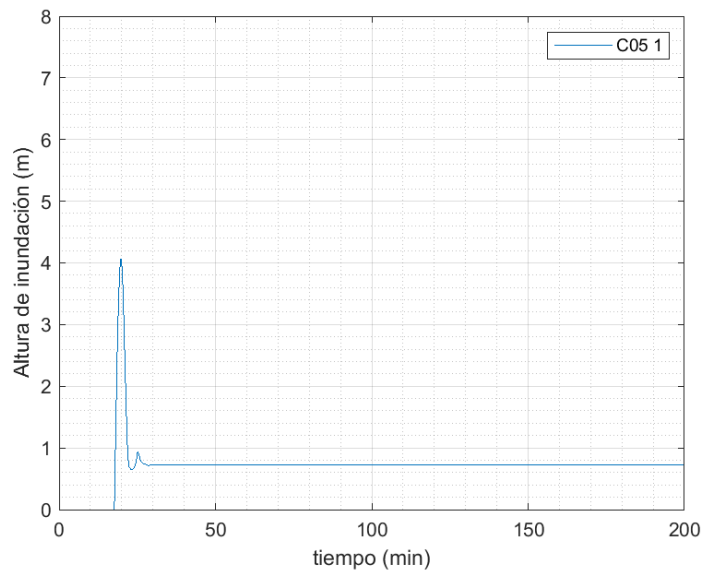
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 55, INUNDACIÓN CUADRA C04\_6.



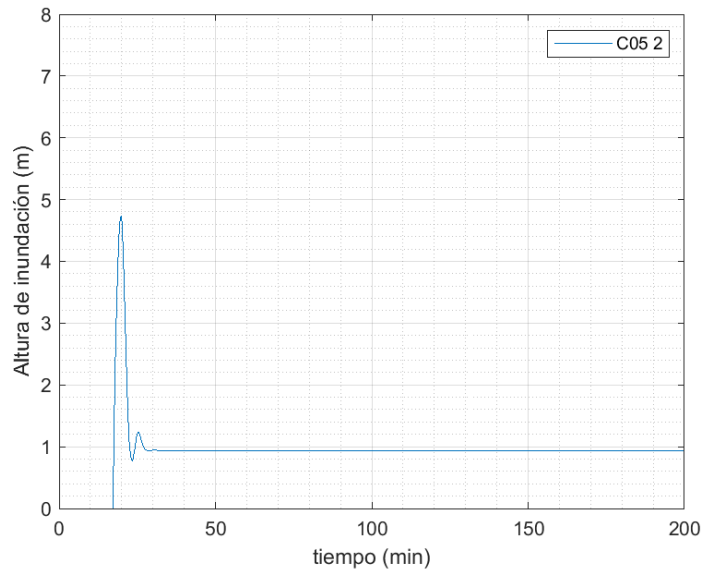
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 56, INUNDACIÓN CUADRA C05\_1.



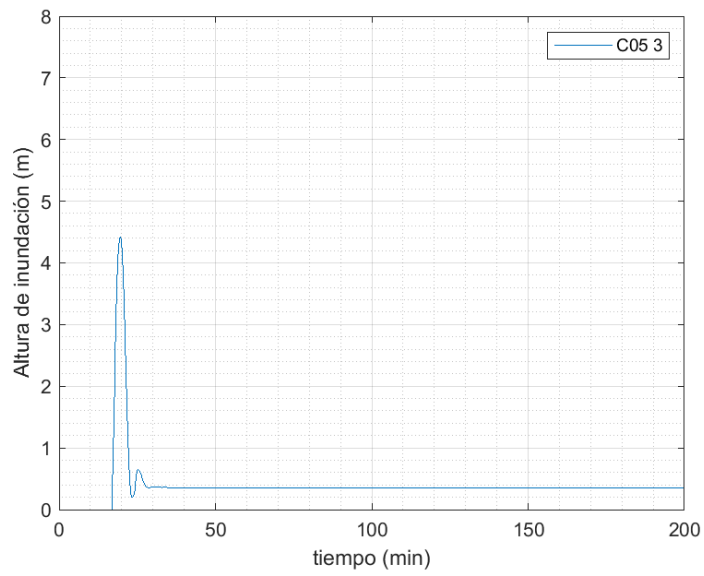
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 57, INUNDACIÓN CUADRA C05\_2.



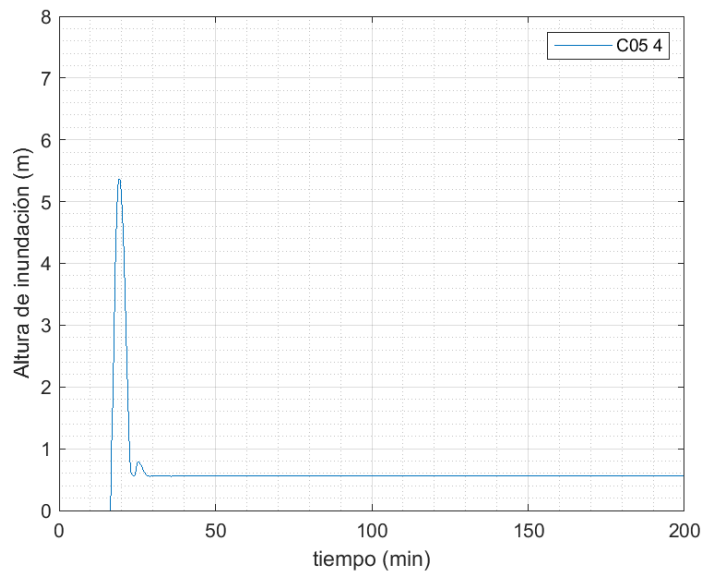
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 58, INUNDACIÓN CUADRA C05\_3.



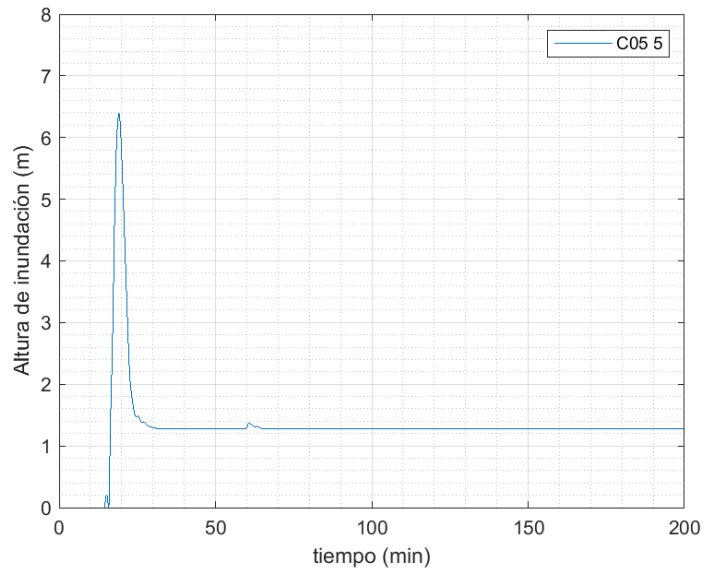
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 59, INUNDACIÓN CUADRA C05\_4.



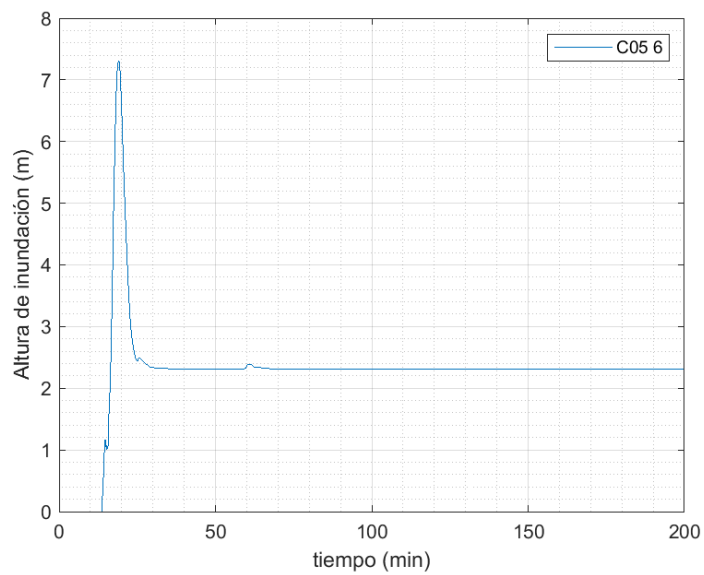
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 60, INUNDACIÓN CUADRA C05\_5.



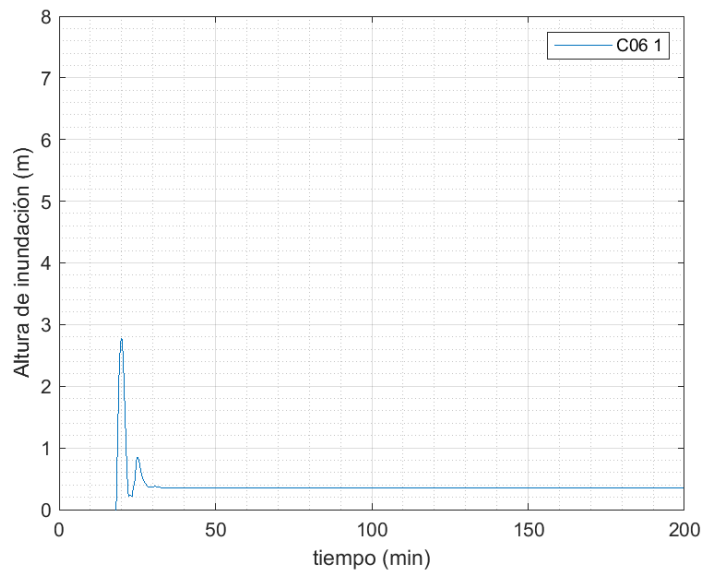
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 61, INUNDACIÓN CUADRA C05\_6.



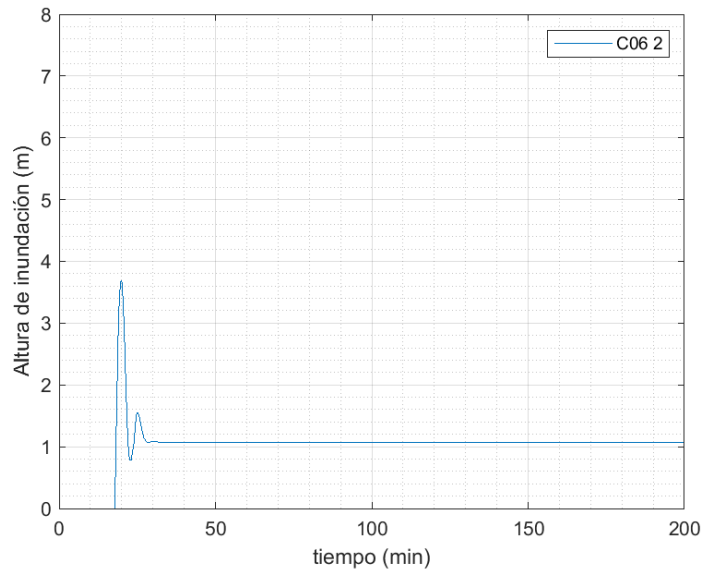
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 62, INUNDACIÓN CUADRA C06\_1.



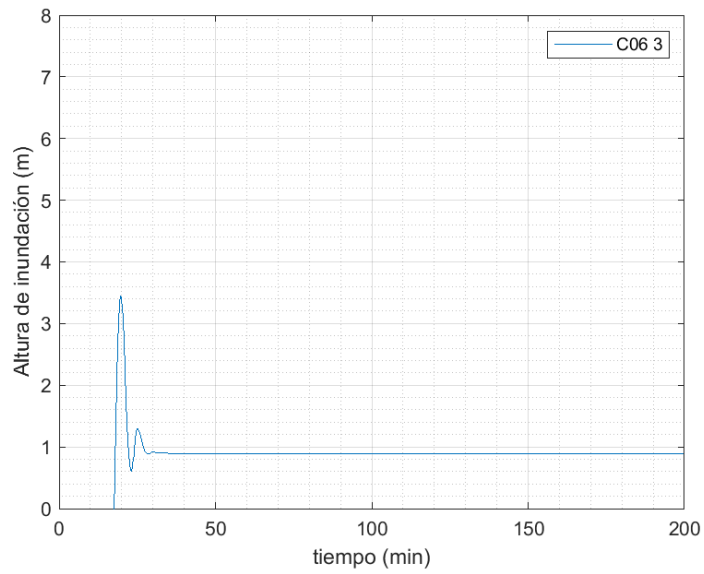
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 63, INUNDACIÓN CUADRA C06\_2.



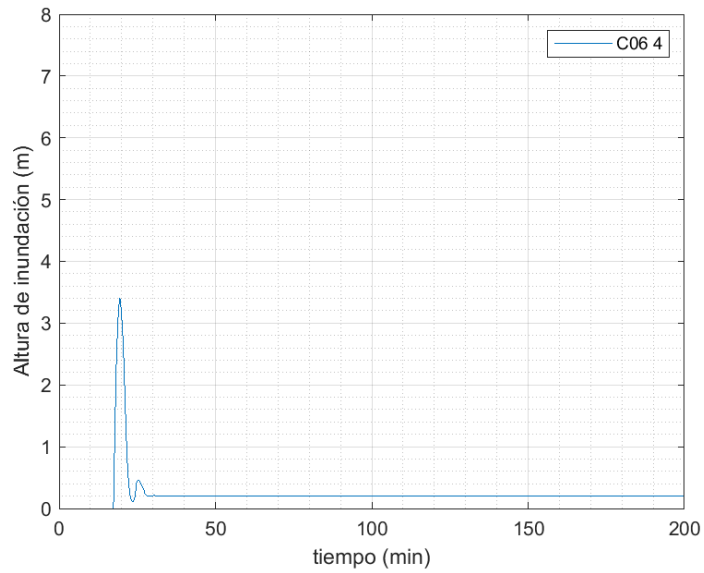
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 64, INUNDACIÓN CUADRA C06\_3.



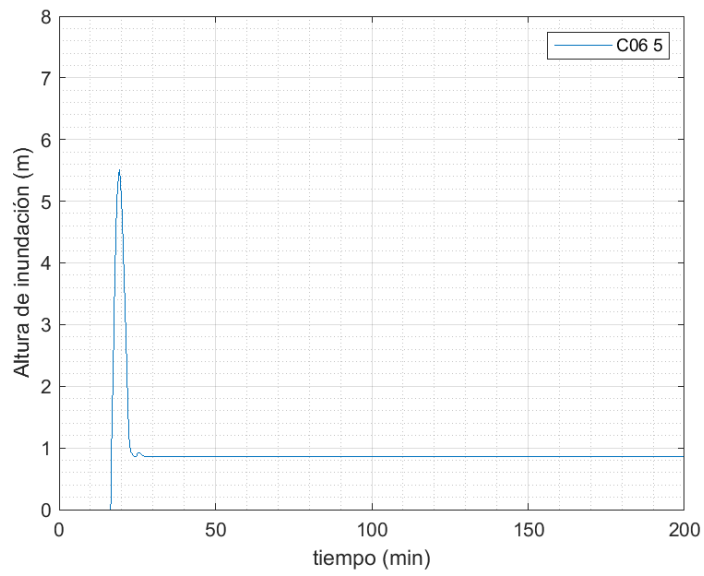
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 65, INUNDACIÓN CUADRA C06\_4



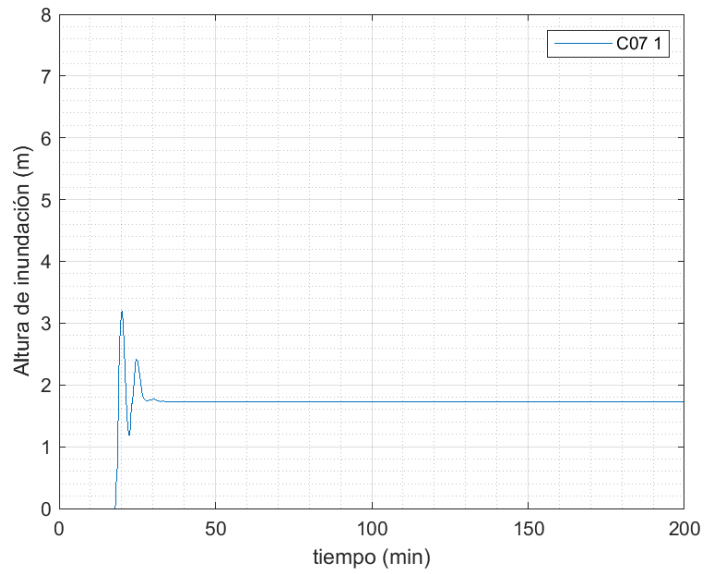
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 66, INUNDACIÓN CUADRA C06\_5.



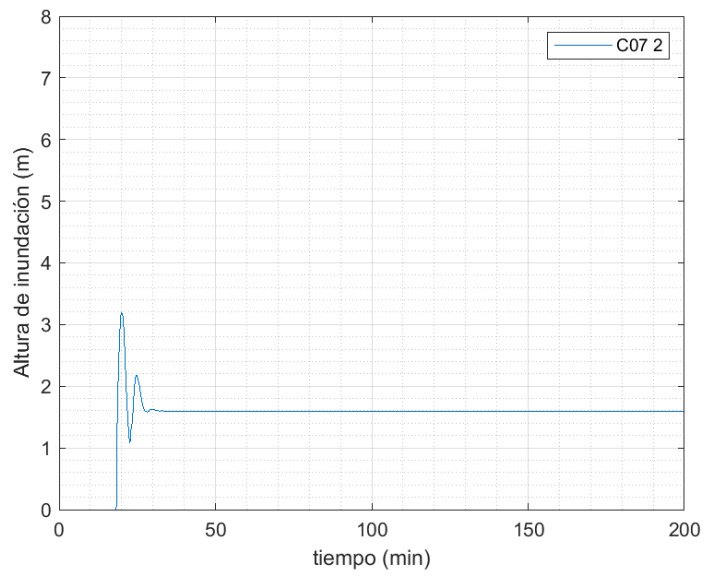
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 67, INUNDACIÓN CUADRA C07\_1.



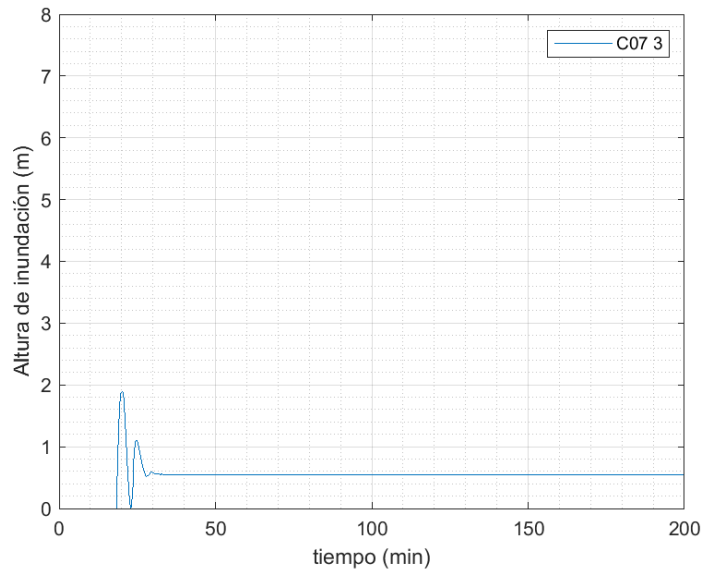
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 68, INUNDACIÓN CUADRA C07\_2.



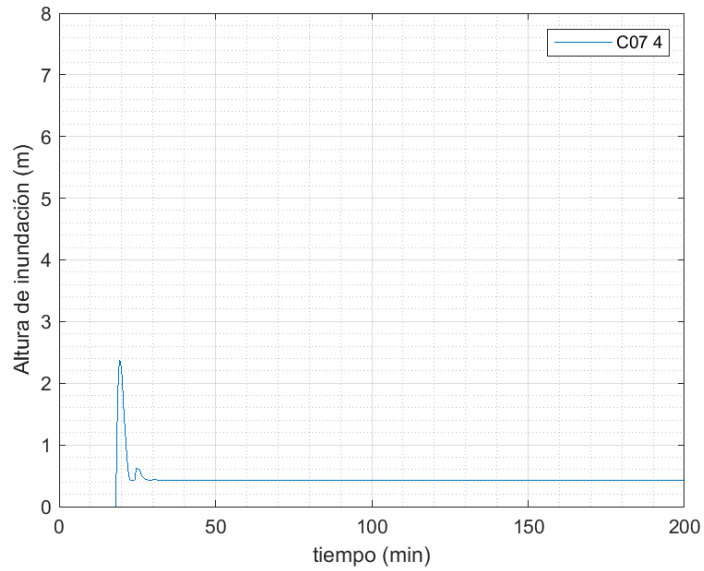
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 69, INUNDACIÓN CUADRA C07\_3.



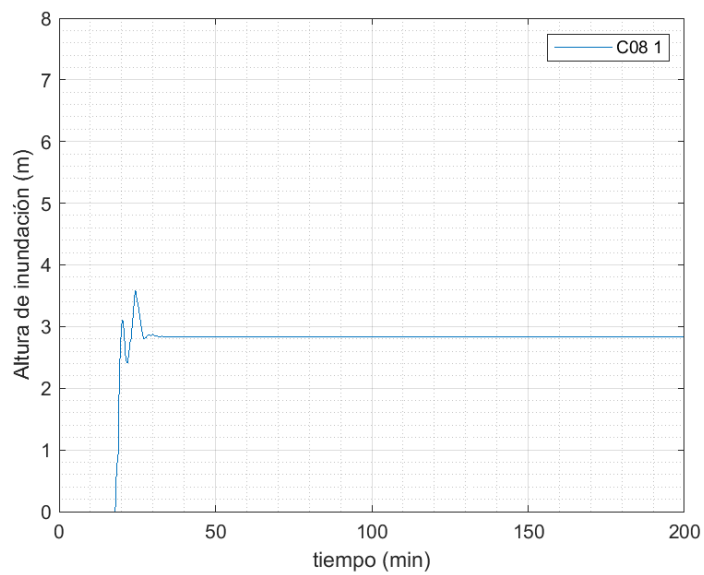
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 70, INUNDACIÓN CUADRA C07\_4.



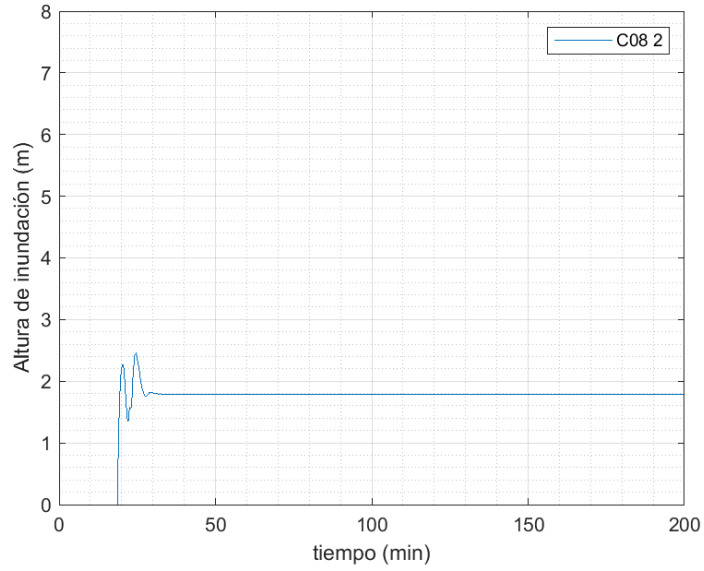
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 71, INUNDACIÓN CUADRA C08\_1.



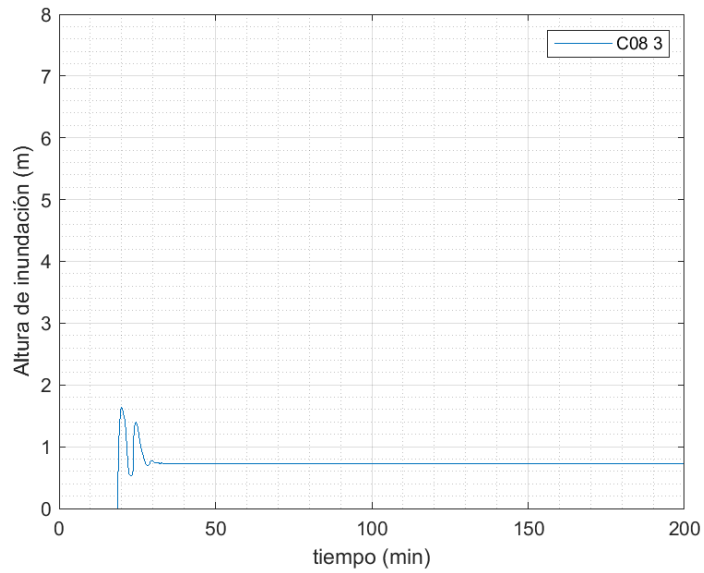
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 72, INUNDACIÓN CUADRA C08\_2.



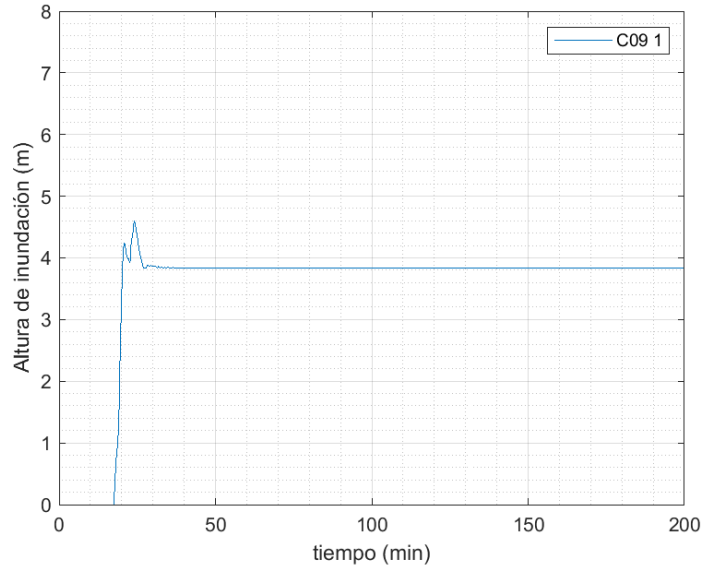
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 73, INUNDACIÓN CUADRA C08\_3.



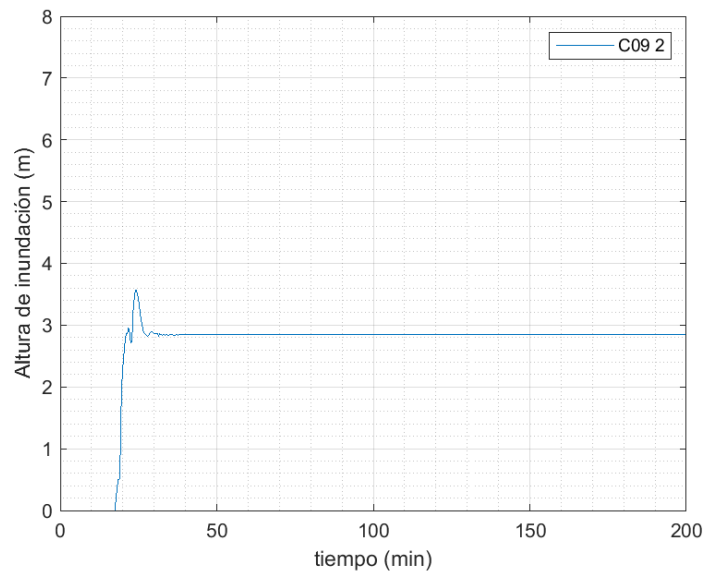
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 74, INUNDACIÓN CUADRA C09\_1.



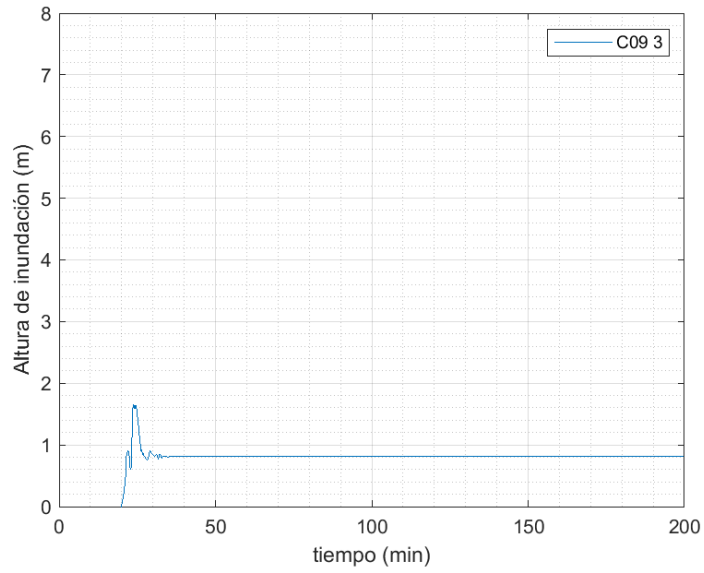
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 75, INUNDACIÓN CUADRA C09\_2.



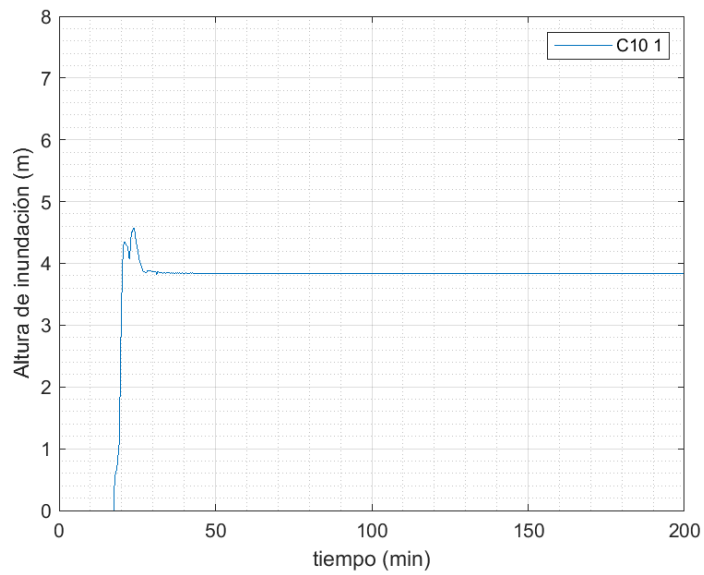
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 76, INUNDACIÓN CUADRA C09\_3.



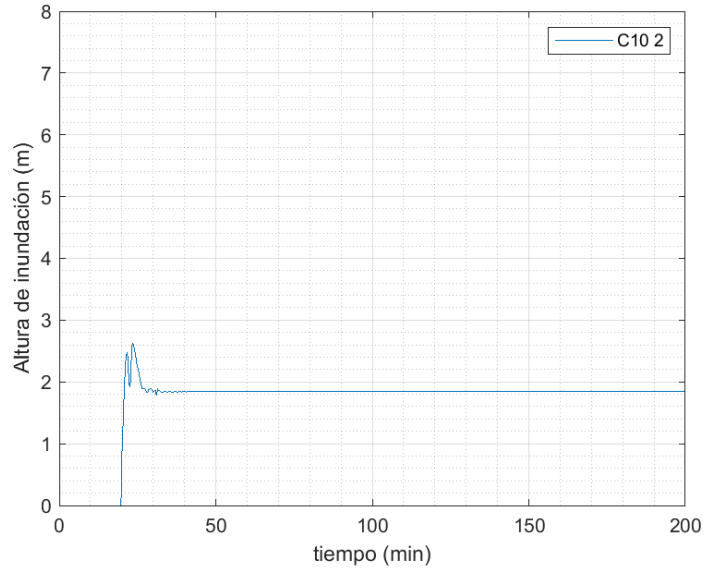
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 77, INUNDACIÓN CUADRA C10\_1.



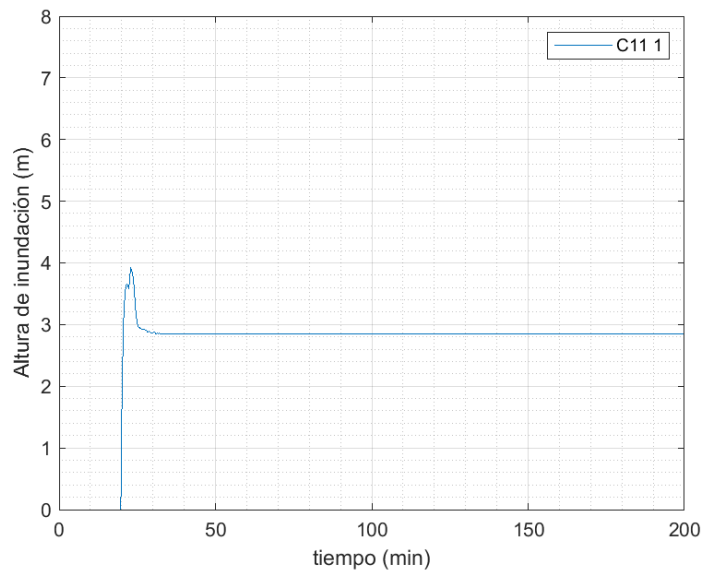
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 78, INUNDACIÓN CUADRA C10\_2.



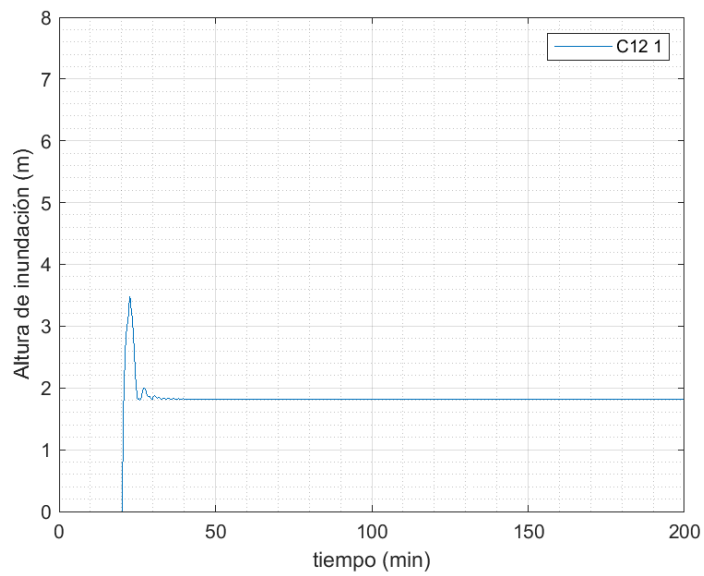
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 79, INUNDACIÓN CUADRA C11\_1.



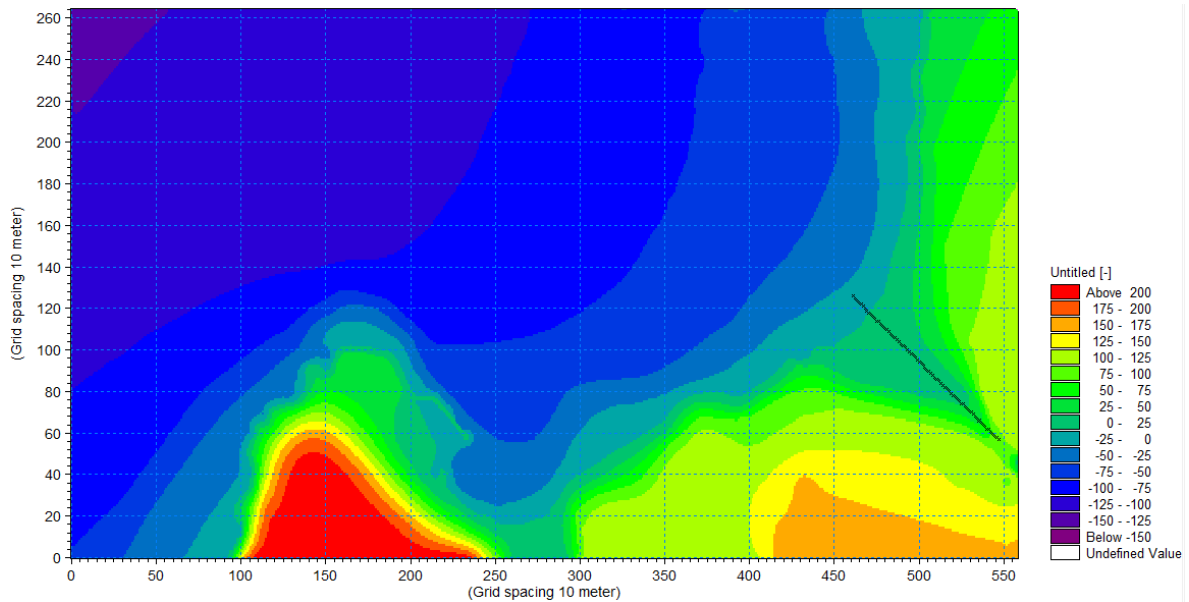
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 80, INUNDACIÓN CUADRA C12\_1.



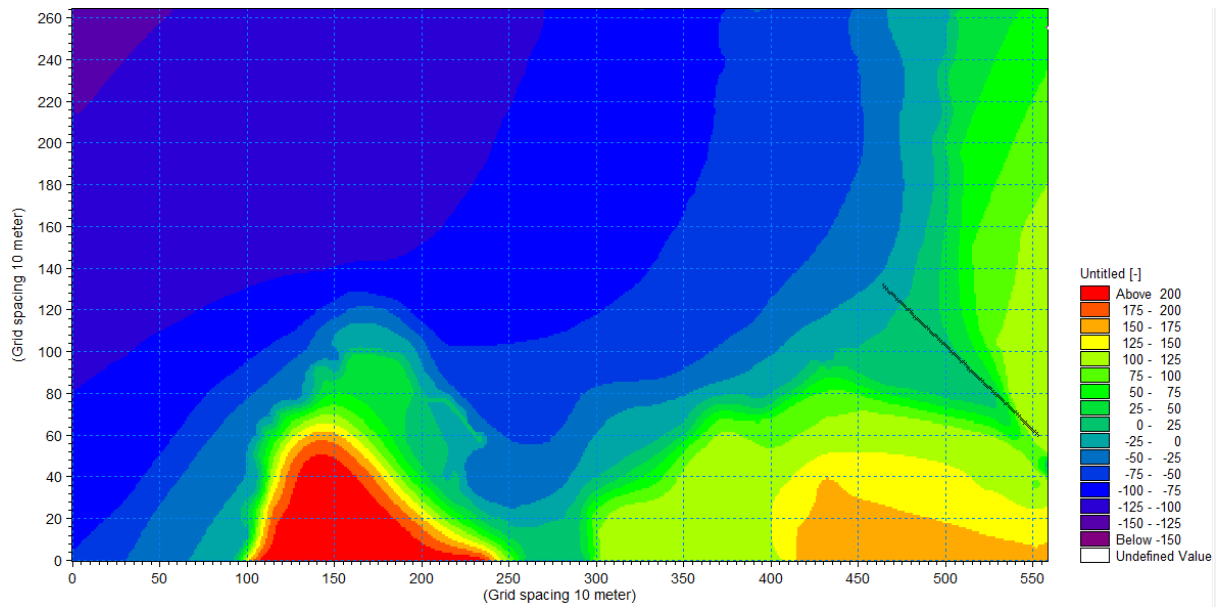
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 81, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 1.



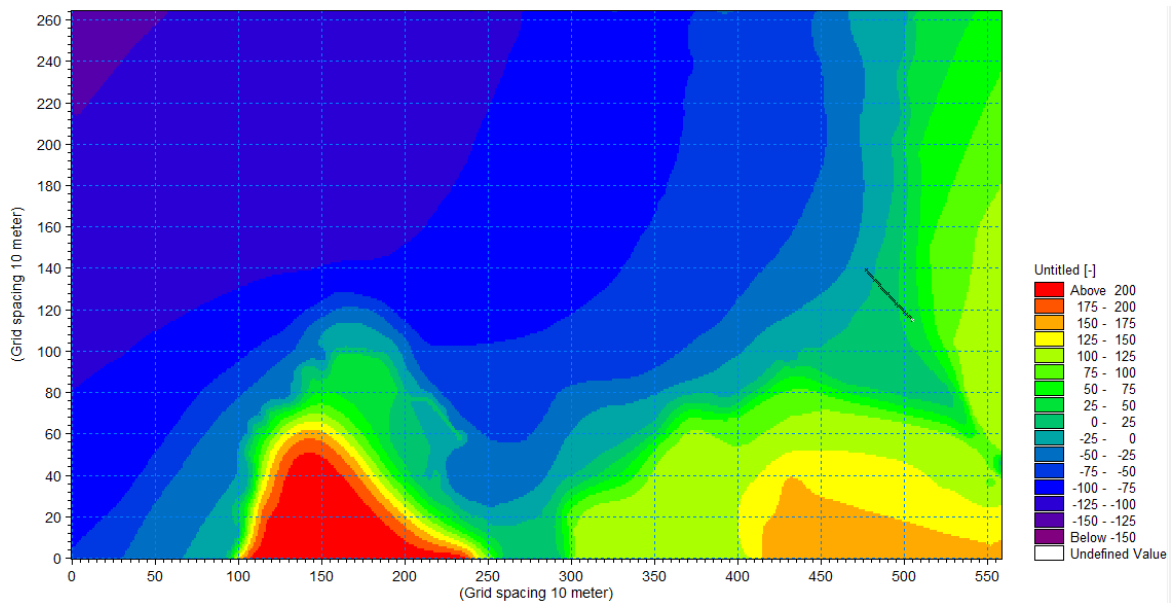
Fuente: Elaboración propia – Software Mike 21.

ILUSTRACIÓN 82, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 2.



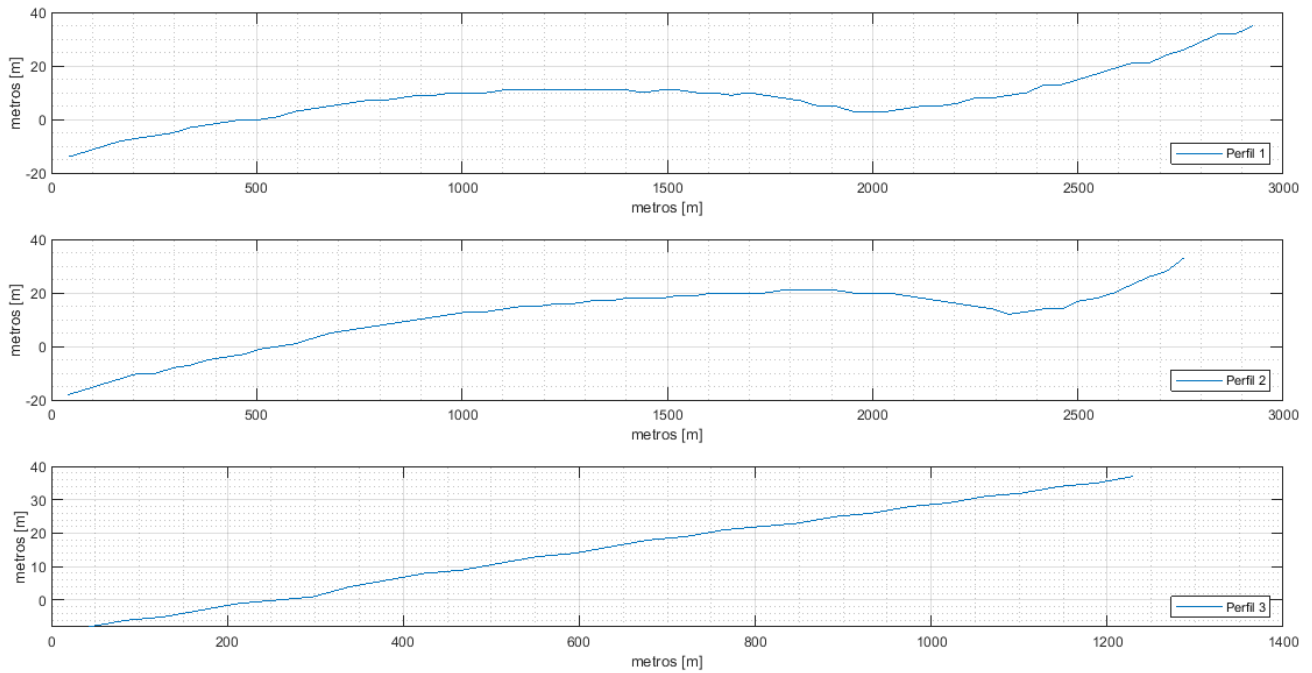
Fuente: Elaboración propia – Software Mike 21.

ILUSTRACIÓN 83, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 3.



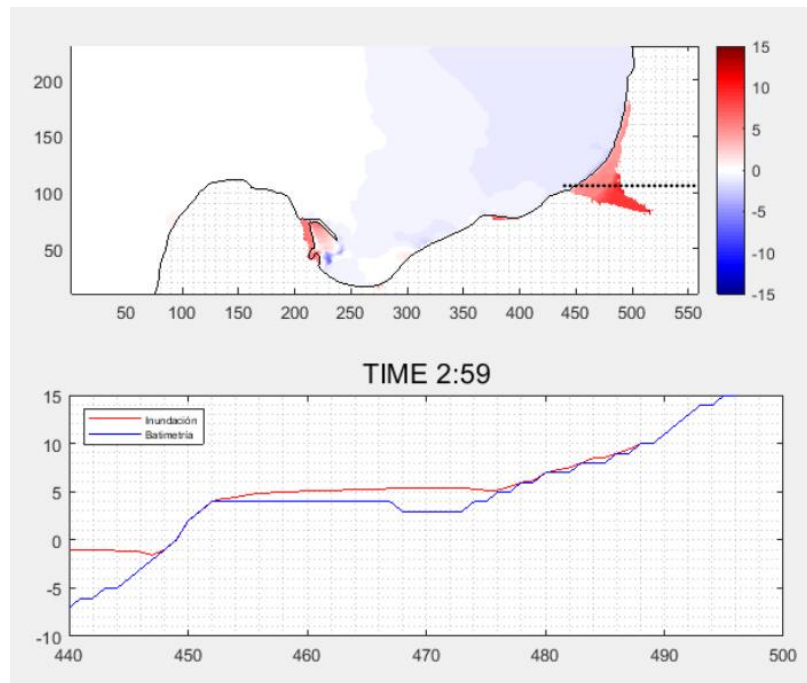
Fuente: Elaboración propia – Software Mike 21.

ILUSTRACIÓN 84, PERFILES TOPOGRÁFICOS.



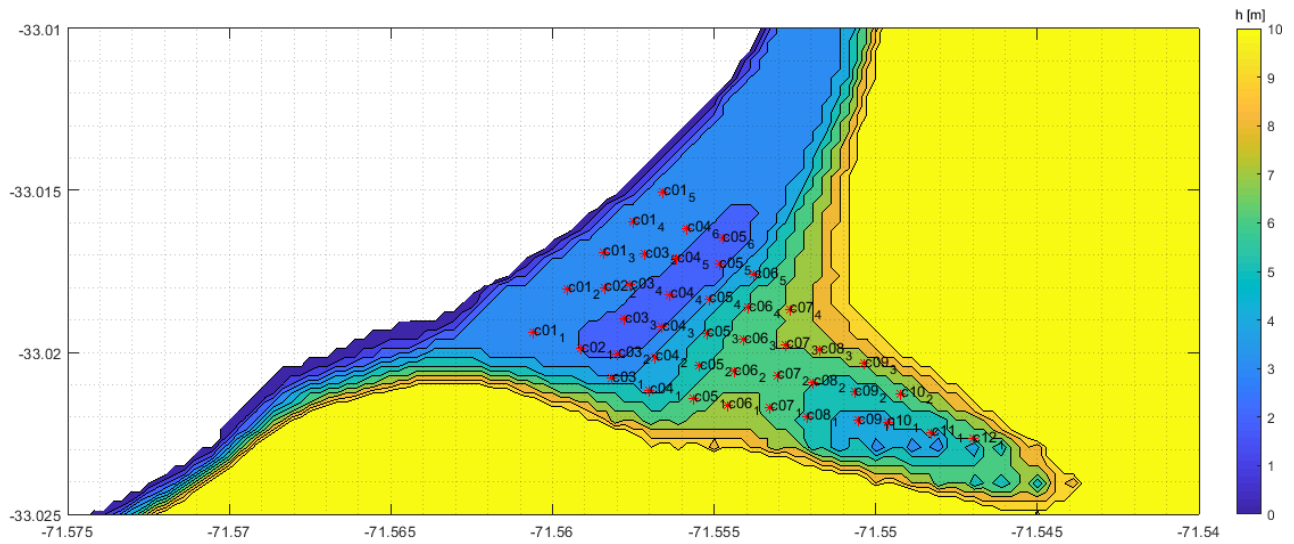
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 85, CORTE TRANSVERSAL INUNDACIÓN



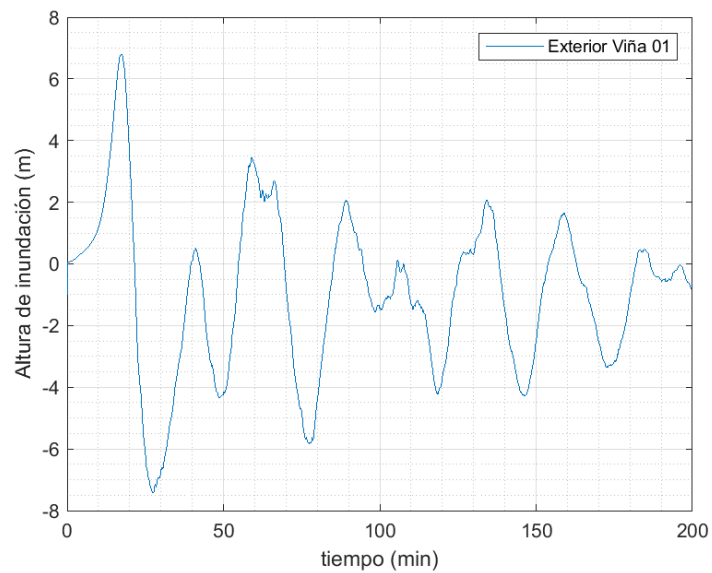
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 86, INUNDACIÓN Y UBICACIÓN CUADRAS.



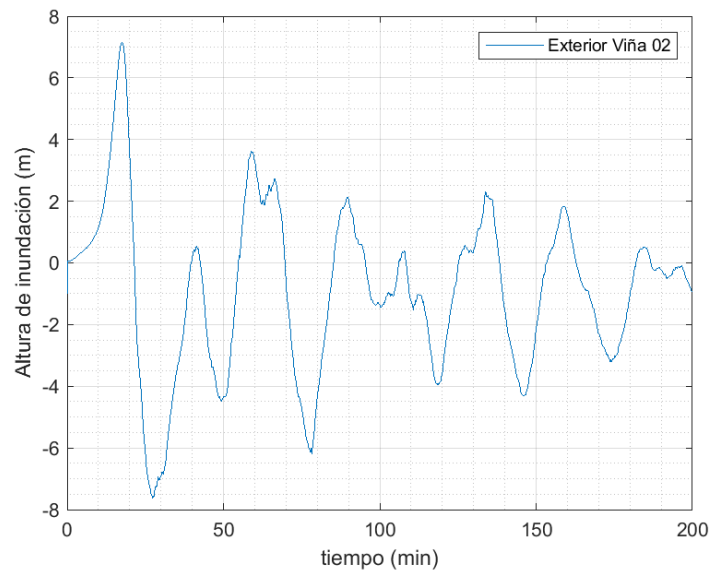
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 87, ONDA DE TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 1.



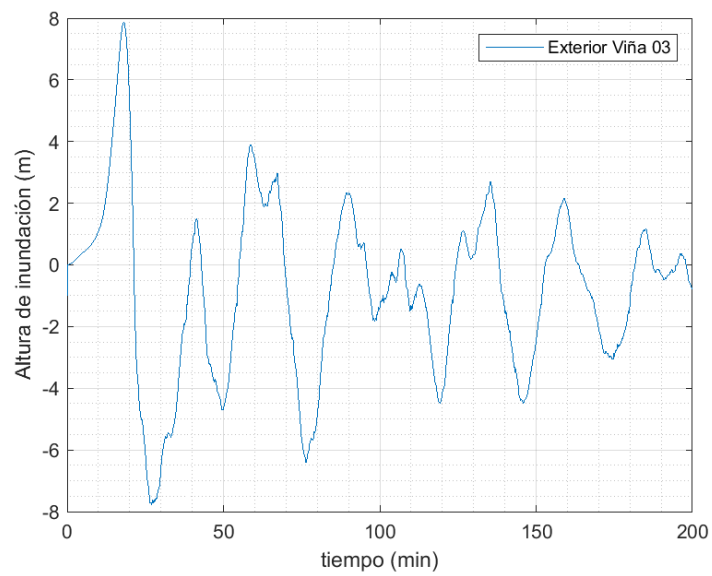
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 88, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 2.



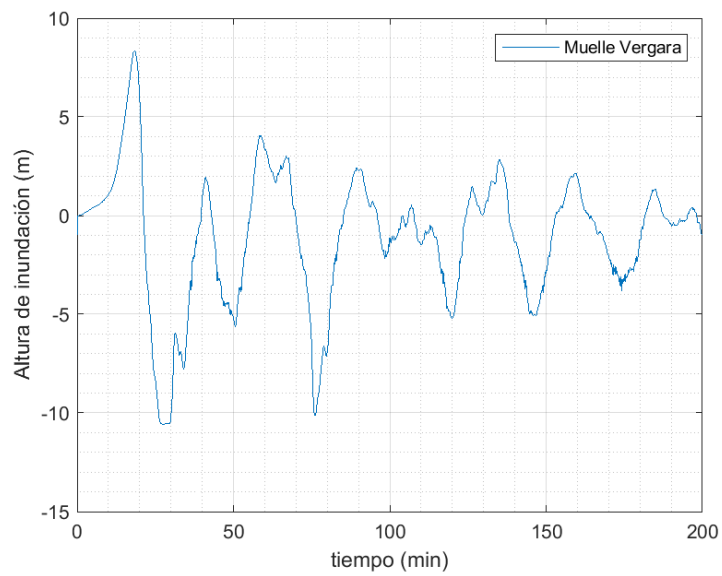
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 89, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 3.



Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 90, ONDA TSUNAMI, MUELLE VERGARA.



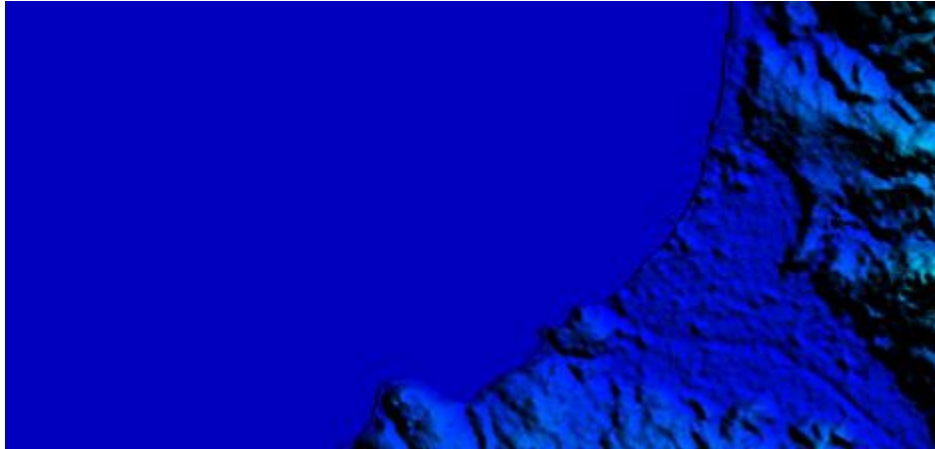
Fuente: Elaboración propia – Software Matlab.

ILUSTRACIÓN 91, CITSU VIÑA DEL MAR.



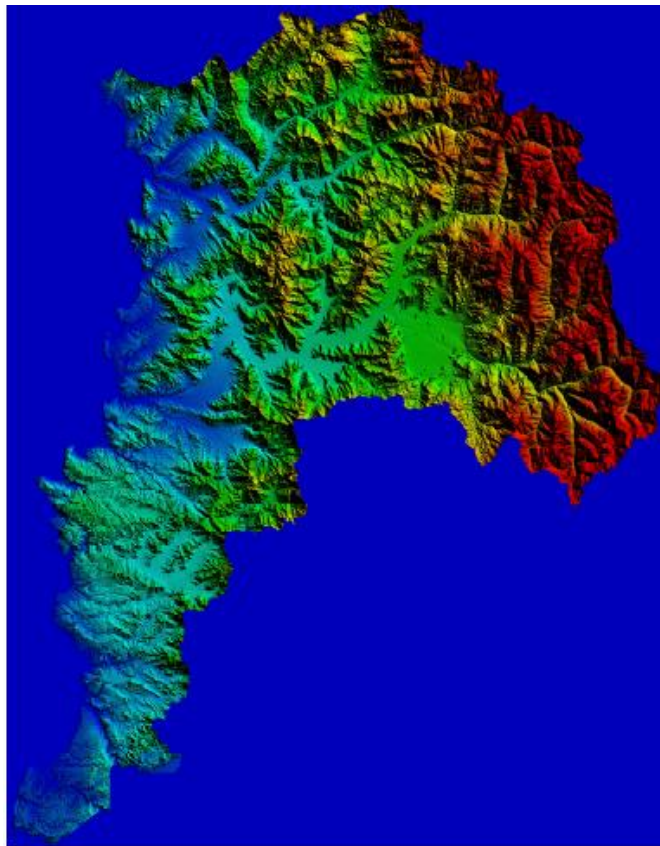
Fuente: Adaptado de SHOA, Google Earth (1 a 1[km]).

*ILUSTRACIÓN 92, DEM USADA EN MODELO.*



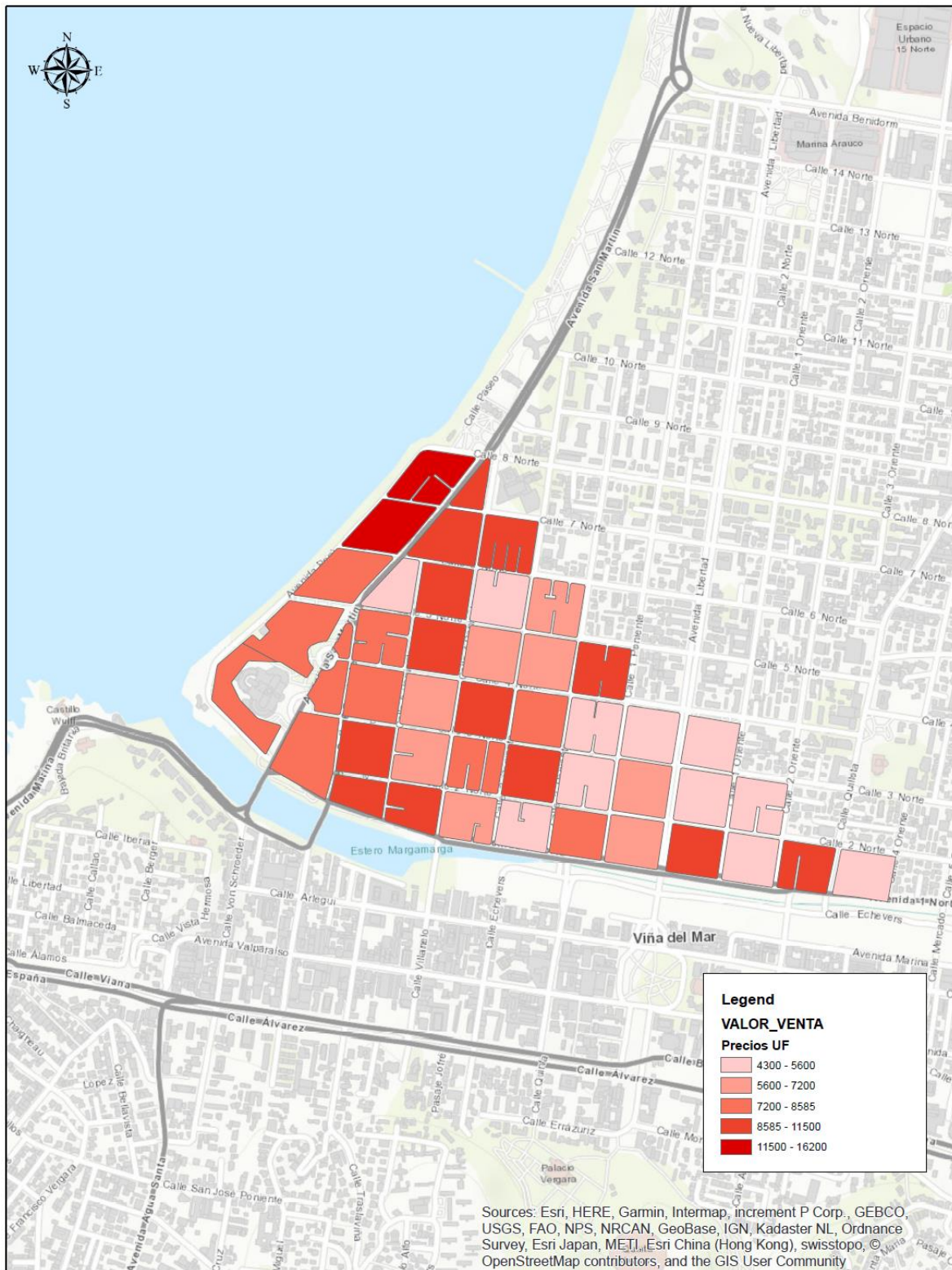
Fuente: MOP.

*ILUSTRACIÓN 93, DEM REGIÓN DE VALPARAÍSO.*



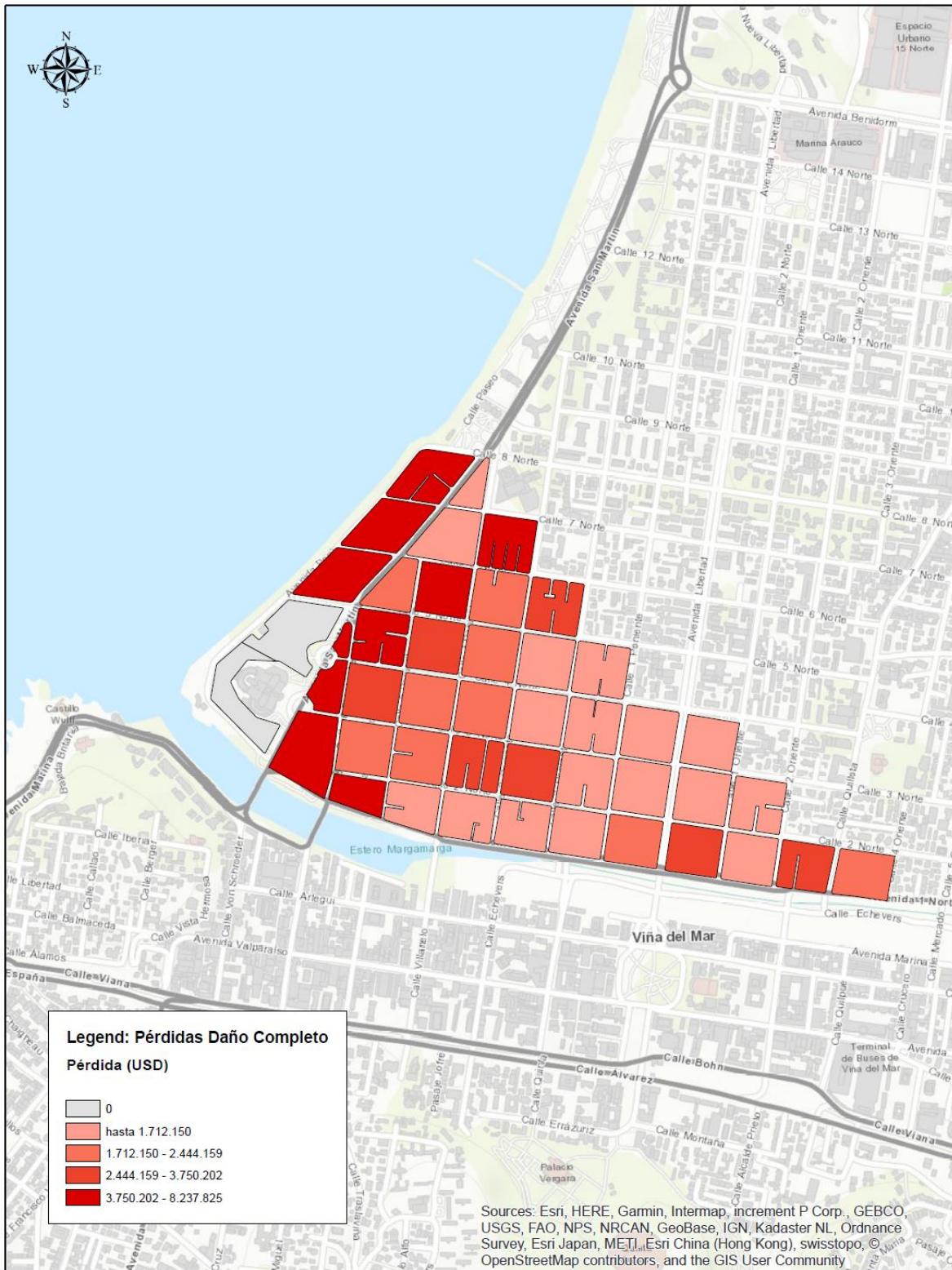
Fuente: MOP.

ILUSTRACIÓN 94, CUADRAS POR VALOR ECONOMICO



Fuente: Elaboración propia & MOP – Arcgis

ILUSTRACIÓN 95, PÉRDIDAS POR DAÑO COMPLETO.



Fuente: Elaboración propia & MOP – Arcgis