



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN LA CIUDAD DE VIÑA DEL MAR**

**JAIR SALEM VIDAL OTEÍZA**

Agosto 2017

**MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN LA CIUDAD DE VIÑA DEL MAR**

JAIR SALEM VIDAL OTEÍZA

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

MAURICIO REYES GALLARDO  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

PATRICIO WINCKLER GREZ  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

ALEJANDRA GUBLER LABAYRU  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **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.

---

Firma Alumno

---

Firma Profesor Guía

*Dedicado al Señor de los Ejércitos Celestiales, mi Dios y amado.*

*“Él da esfuerzo al cansado, y multiplica las fuerzas al que no tiene ningunas.  
Los muchachos se fatigan y se cansan, los jóvenes flaquean y caen; pero los que  
esperan a Jehová tendrán nuevas fuerzas; levantarán alas como las águilas;  
correrán, y no se cansarán; caminarán, y no se fatigarán.”*

*Isaías 40:29-31*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por conceder el anhelo de mi corazón de desarrollar este trabajo, como Padre me sostuvo en los momentos difíciles y me levantó con mano poderosa. Reconozco que todo lo que soy, se lo debo a Él; que cumple sus promesas y sus propósitos para aquellos que le aman. Sin su misericordia y amor, ningún esfuerzo hubiese sido suficiente para concluir este estudio. A Dios sea todo honor, gloria y alabanza.

En segundo lugar, a mi familia por apoyarme en todo momento. A mis hermanas (Thamar, Licci y Danka) por cada desvelo que les hice pasar por ayudarme, por el amor que demuestran en todo lo que hacen. A mi amada madre por enseñarme el camino correcto y guiar mi vida, cada uno de sus esfuerzos y oraciones son el reflejo de lo que somos.

A mis cotas, porque a pesar de toda dificultad siempre nos mantuvimos unidas. A mis amigos de la Universidad por su constante disposición a ayudarme.

A mi Profesor Guía, por aceptar este desafío, su comprensión y constante preocupación.

A mis amados líderes de la Voz en el Desierto, la Apostólica Iglesia, por ser un ejemplo de perseverancia y amor a la obra. Por demostrarnos que todo lo que hacemos debe ser para la gloria de Dios.

Y a todo aquel que elevó una oración para que este sueño se concretara.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS .....	2
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3. ALCANCES .....	3
4. MARCO TEÓRICO .....	4
4.1 GENERACIÓN DE TERREMOTOS.....	4
4.1.1 TEORÍA DE TECTÓNICA DE PLACAS.....	4
4.1.2 ZONA DE SUBDUCCIÓN.....	5
4.1.3 CONTEXTO TECTÓNICO EN CHILE.....	6
4.2 TEORÍA DE TSUNAMIS.....	7
4.2.1 GENERACIÓN DE TSUNAMIS .....	7
4.2.2 FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN DE UN TSUNAMI .....	9
4.2.3 INTERACCIÓN DE UN TSUNAMI CON LA COSTA.....	10
4.2.4 GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS A NIVEL MUNDIAL.....	14
4.2.5 TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN CHILE CENTRAL.....	15
4.3 MODELACIÓN NUMÉRICA DE TSUNAMIS.....	18
4.3.1 COMCOT .....	18
4.3.2 MODELO DE GENERACIÓN DE TSUNAMI.....	24
4.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	27
5. METODOLOGÍA.....	28
5.1 GENERALIDADES .....	28
5.1.1 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA .....	28
5.1.2 GRILLAS DE MODELACIÓN.....	29
5.1.3 TERREMOTO DE DISEÑO .....	34
5.2 SELECCIÓN DE ESCENARIOS.....	35
5.2.1 CONDICIÓN INICIAL: MODELO DE RUPTURA .....	35
5.2.2 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	37
6. RESULTADOS .....	41
6.1 COMPARACIÓN DEL MODELO .....	41
6.2 PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE TSUNAMI.....	43
6.3 ESCENARIO E1: $n = 0.025 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$ .....	45
6.4 ESCENARIO E2: $n = 0.08 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$ EN ZONA EDIFICADA.....	48

6.5	ESCENARIO E3: $n = 0.172$ [ $m^{(1/3)}s$ ] EN ZONA EDIFICADA .....	51
6.6	ESCENARIO E4: $n = 1.3$ [ $m^{(1/3)}s$ ] EN ZONA EDIFICADA .....	54
6.7	ANÁLISIS COMPARATIVO .....	56
6.7.1	MÁXIMA INTRUSIÓN HORIZONTAL .....	57
6.7.2	MÁXIMA PROFUNDIDAD DE FLUJO .....	58
6.7.3	VELOCIDAD.....	59
6.7.4	ANÁLISIS DEL ENTORNO A ZONAS SEGURAS .....	65
6.7.5	VÍAS DE EVACUACIÓN.....	68
7.	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	86
8.	CONCLUSIONES .....	88
8.1	COMENTARIOS GENERALES .....	88
8.2	METODOLOGÍA.....	88
8.3	RESULTADOS .....	88
9.	GLOSARIO.....	91
9.1	ALTURA DE TSUNAMI .....	91
9.2	PERIODO DEL TSUNAMI .....	91
9.3	DESNIVELACIÓN.....	92
9.4	LONGITUD DE ONDA.....	92
9.5	TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO.....	92
9.6	INUNDACIÓN HORIZONTAL .....	92
9.7	RUN-UP .....	93
9.8	ALTURA DE INUNDACIÓN .....	93
9.9	PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN .....	93
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
11.	ANEXO A: TIPOLOGÍAS DE TSUNAMIS.....	100
11.1	TSUNAMI LOCAL.....	100
11.2	TSUNAMI REGIONAL.....	100
11.3	TELETSUNAMI .....	102
12.	ANEXO B: GENERALIDADES DE LOS TERREMOTOS .....	104
12.1	TERREMOTO.....	104
12.1.1	ONDAS SÍSMICAS.....	104
12.1.2	MAGNITUD .....	106
12.1.3	INTENSIDAD.....	108
12.1.4	SOLUCIÓN DEL MECANISMO FOCAL .....	110
13.	ANEXO C: GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS A NIVEL MUNDIAL.....	112

14.	ANEXO D: SUPERFICIE LIBRE.....	121
14.1	SERIE DE TIEMPO DE LA PROPAGACIÓN.....	121
14.2	SERIE DE TIEMPO DE LA INUNDACIÓN.....	123

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Mapa tectónico de la Tierra.....	5
Figura 2: Movimiento relativo anual de las placas en el continente Sudamericano. ....	6
Figura 3: Tsunamis de origen sísmico. ....	7
Figura 4: Tsunami generado por un terremoto.....	8
Figura 5: Plano de Valparaíso levantado en 1803.....	17
Figura 6: Esquema de diferencias finitas "leap-frog".....	22
Figura 7: Deformación inicial del fondo marino. ....	25
Figura 8: Esquema del plano de falla, Okada (1985). ....	26
Figura 9: Corrección del nivel medio del mar. ....	28
Figura 10: Grilla nivel 1. ....	31
Figura 11: Grilla nivel 2. ....	32
Figura 12: Grilla nivel 3. ....	33
Figura 13: Grilla nivel 4. ....	34
Figura 14: Deformación del fondo marino y fosa del Pacífico, esta última indicada con línea azul continua. ....	36
Figura 15: Grilla con distribución rugosidades de Manning equivalente. ....	38
Figura 16: Acercamiento de la distribución de la rugosidad en el territorio.....	39
Figura 17: Máxima profundidad de flujo escenario E0.....	42
Figura 18: CITSU de Viña del Mar. ....	42
Figura 19: Desplazamiento inicial de la superficie del mar.....	43
Figura 20: Secuencia de la propagación del tsunami en el dominio de modelación. ....	44
Figura 21: Arribo del primer frente de onda.....	45
Figura 22: Secuencia de la inundación para el Escenario 1.....	46
Figura 23: Máxima profundidad de flujo del escenario E1.....	47
Figura 24: Secuencia de la inundación para el escenario E2.....	49
Figura 25: Máxima profundidad de flujo del escenario E2.....	50
Figura 26: Secuencia de la inundación para el escenario E3.....	52
Figura 27: Máxima profundidad de flujo del escenario E3.....	53
Figura 28: Secuencia de la inundación para el Escenario 4.....	55
Figura 29: Máxima profundidad de flujo del escenario 4.....	56
Figura 30: Puntos de control distribuidos en la ciudad. ....	57
Figura 31: Máxima intrusión horizontal alcanzada en todos los escenarios. ....	58
Figura 32: Nuevos puntos de control para perfiles de velocidad. ....	61
Figura 33: Perfil de velocidad de A, B y desde P08 a P15 (Arriba) y ubicación (Abajo)...	62
Figura 34: Perfil de velocidad desde P16 a P25 (Arriba) y ubicación (Abajo).....	63
Figura 35: Perfil de velocidad desde P26 a P34 (Arriba) y ubicación (Abajo).....	64
Figura 36: Nuevos puntos de control para evaluación de áreas.....	65
Figura 37: Ejemplo de las áreas que se analizaron.....	66
Figura 38: Vías de evacuación analizadas.....	68
Figura 39: Perfil de velocidades vía de evacuación calle 2 Norte.....	69
Figura 40: Perfil de velocidades vía de evacuación calle 3 Norte.....	70
Figura 41: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 4 Norte. ....	71
Figura 42: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 6 Norte. ....	72
Figura 43: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 8 Norte. ....	73
Figura 44: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 10 Norte. ....	74
Figura 45: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 12 Norte. ....	75

Figura 46: Perfiles de velocidades vías de evacuación calle 13 Norte. ....	76
Figura 47: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 2 Norte. ....	77
Figura 48: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 3 Norte. ....	78
Figura 49: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 4 Norte. ....	79
Figura 50: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 6 Norte. ....	80
Figura 51: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 8 Norte. ....	81
Figura 52: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 10 Norte. ....	82
Figura 53: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 12 Norte. ....	83
Figura 54: Perfil de profundidad de flujo vía de evacuación calle 13 Norte. ....	84
Figura 55: Parámetros de una onda de tsunami. ....	91
Figura 56: Ondas de cuerpo P y S. ....	105
Figura 57: Ondas superficiales. ....	105
Figura 58: Diagramas de pelotas de playa o beach balls. ....	111
Figura 59: Ángulos de deslizamiento del plano de falla.....	111
Figura 60: Extensión de la falla del terremoto de 1960, Valdivia. ....	112
Figura 61: Algunas de las localidades afectadas por el evento de 1960. ....	113
Figura 62: Localidades afectadas por el evento de 1960, en la Región de Los Lagos. ..	114
Figura 63: Imagen aérea con el antes y después del puerto de Corral. ....	116
Figura 64: Propagación y tiempos de arribo del terremoto de 1960, Valdivia. ....	117
Figura 65: Daños presentados luego del terremoto de 1964, Alaska. ....	118
Figura 66: Propagación y tiempos de arribo del terremoto de 2004, Sumatra. ....	119
Figura 67: Elevación de la superficie para los puntos de control en mar abierto. ....	121
Figura 68: Elevación de la superficie para los puntos de control frente a las costas de Viña del Mar.....	122
Figura 69: Puntos de control en mar abierto. ....	123
Figura 70: Puntos de control frente a las costas de Viña del Mar.....	124
Figura 71: Elevación de la superficie para los puntos de control dentro de la ciudad. ....	125

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Terremotos más grandes de la historia. ....	15
Tabla 2: Parámetros de entrada del modelo de Okada (1985).....	27
Tabla 3: Parámetros de relación entre las grillas y la condición de estabilidad numérica. ....	30
Tabla 4: Características del dominio de modelación. ....	30
Tabla 5: Escenario de ruptura para terremoto de magnitud M 8.5 de acuerdo a la formulación propuesta por Papazachos et al. (2004). ....	34
Tabla 6: Características del plano de ruptura con magnitud M 9.0.....	35
Tabla 7: Coeficientes de rugosidad de Manning equivalente escenarios E1, E2, E3 y E4. ....	38
Tabla 8: Tiempos de arribo escenario E1.....	47
Tabla 9: Tiempos de arribo escenario E2.....	48
Tabla 10: Tiempos de arribo escenario E3.....	51
Tabla 11: Tiempos de arribo escenario E4.....	54
Tabla 12: Ubicación de los puntos de control de la Figura 30. ....	57
Tabla 13: Máximas profundidades de flujo de P05 a P09, para cada escenario.....	59
Tabla 14: Porcentaje de error de las máximas profundidades de flujo en relación al escenario E1.....	59
Tabla 15: Velocidades máximas de P08 a P15, para cada escenario. ....	60

Tabla 16: Áreas de inundación. ....	66
Tabla 17: Velocidades A1. ....	67
Tabla 18: Velocidades A2. ....	67
Tabla 19: Velocidades A3. ....	67
Tabla 20: Tsunamis locales y regionales que han dejado más de 4.000 víctimas fatales. ....	101
Tabla 21: Recuento de los 14 teletsunamis producidos durante los últimos 200 años. ...	103
Tabla 22: Escala de intensidad de Mercalli modificada. ....	109
Tabla 23: Elevación de la superficie para los puntos de control en mar abierto. ....	122
Tabla 24: Elevación de la superficie para los puntos de control frente a las costas de Viña del Mar. ....	123
Tabla 25: Ubicación de los puntos de control de la Figura 35 y 36. ....	124
Tabla 26: Máximas elevaciones de la superficie en P08 a P15, para cada escenario. ...	126
Tabla 27: Porcentaje de error de las máximas elevaciones de la superficie en relación al Escenario 1. ....	126

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1: Conservación de masa, en su versión lineal. ....	19
Ecuación 2: Conservación de momentum componente P, en su versión lineal. ....	19
Ecuación 3: Conservación de momentum componente Q, en su versión lineal. ....	19
Ecuación 4: Conservación de masa, en su versión no lineal. ....	20
Ecuación 5: Conservación de momentum componente P, en su versión no lineal. ....	20
Ecuación 6: Conservación de momentum componente Q, en su versión no lineal. ....	20
Ecuación 7: Fricción de fondo en la componente P. ....	20
Ecuación 8: Fricción de fondo en la componente Q. ....	20
Ecuación 9: Conservación de masa lineal, expresada en su forma explícita. ....	21
Ecuación 10: Conservación de momentum componente P lineal, expresada en su forma explícita. ....	21
Ecuación 11: Conservación de momentum componente Q lineal, expresada en su forma explícita. ....	21
Ecuación 12: Conservación de masa no lineal, expresada en su forma explícita. ....	23
Ecuación 13: Conservación de momentum componente P no lineal, expresada en su forma explícita. ....	23
Ecuación 14: Conservación de momentum componente Q no lineal, expresada en su forma explícita. ....	23
Ecuación 15: Fricción de fondo discretizado en la componente P. ....	23
Ecuación 16: Fricción de fondo discretizado en la componente Q. ....	23
Ecuación 17: Término $\nu_x$ para la evaluación de la formulación de Manning. ....	23
Ecuación 18: Término $\nu_y$ para la evaluación de la formulación de Manning. ....	24
Ecuación 19: Factor que relaciona los cambios del fondo marino con la superficie libre del agua. ....	25
Ecuación 20: Condición de estabilidad numérica de Courant. ....	29

## **RESUMEN**

Para este estudio se ha simulado el terremoto de 1730 que se desarrolló frente a las costas de Valparaíso y cuya magnitud se estima en torno a Mw 9.0. Los parámetros geométricos de la ruptura se establecieron mediante formulaciones determinadas en la literatura.

La modelación del mecanismo de generación, propagación e inundación del tsunami, se ha efectuado con el modelo hidrodinámico COMCOT en su versión 1.7. Para ello se han definido 4 niveles de grillas anidadas, con un coeficiente de rugosidad de Manning constante hasta el tercer nivel, incorporando en el cuarto nivel de grilla distribuciones de rugosidad variable en las zonas inundables de Viña del Mar.

Se definieron cuatro escenarios para analizar el comportamiento de la inundación por tsunami en la ciudad Viña del Mar, mediante la sensibilización de la distribución espacial de las rugosidades en la zona inundable de la ciudad.

El escenario E1 se construyó con un coeficiente de rugosidad de Manning constante de  $0.025 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$ , constituyendo el modelo base para el análisis comparativo. El escenario E2 consideró una rugosidad de  $0.08 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$  determinada empíricamente y que se aplicó como un aumento de rugosidad en las manzanas construidas. Por su parte, el escenario E3 toma en cuenta un coeficiente que alcanza un valor de  $0.172 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$  para la rugosidad en las manzanas construidas. Finalmente, en el escenario E4 se aumentó el valor de “n” a  $1.3 \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$  para mostrar el impacto que tienen las estructuras en la inundación por tsunami en la ciudad de Viña del Mar.

Los resultados obtenidos muestran que al aumentar la rugosidad en las zonas edificadas de la ciudad de Viña del Mar, se produce una reducción significativa de la máxima inundación horizontal y los valores de la máxima profundidad de flujo, que se registran en la simulación de cada uno de los escenarios.