



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ANÁLISIS MORFODINÁMICO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE
LA LÍNEA LITORAL DE LA BAHÍA DE LEBU. EFECTOS DEL
TSUNAMI DEL 27/F DE 2010.**

Daniel Eduardo Rojas Iturra

Octubre 2012

ANÁLISIS MORFODINÁMICO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA LITORAL DE LA BAHÍA DE LEBU. EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 27/F DE 2010.

Daniel Eduardo Rojas Iturra

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

MATÍAS QUEZADA LABRA
Profesor guía

DRA. CAROLINA MARTINEZ REYES
Docente

MAURICIO MOLINA PEREIRA
Docente

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.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía Don Matías Quezada por su colaboración, voluntad e intensa preocupación en el desarrollo de este proyecto de título. También agradecer a la Doctora Carolina Martínez de la Universidad de Concepción, por hacerme participe de su proyecto FONDECYT N°1100379 y por otorgarme la información necesaria para el proceso de elaboración.

Por otro lado, agradecer el apoyo incondicional de mi madre Lilian, mi tía María Elena y mis tíos suecos Marlene y Stefan que a pesar de la distancia me han apoyado en todo momento. Son la base de mi formación y todo lo logrado se lo debo a ustedes. Muchas gracias.

También agradecer a los verdaderos amigos por el constante ánimo que me dan día a día y a pesar de los momentos difíciles, siempre estuvieron dando muestras de apoyo. Agradecer a mi polola por los consejos y recomendaciones que me brindó en el proceso y periodo de confección del proyecto, además de su constante respaldo anímico.

*Dedicada a mi abuela Clementina, que a
pesar de su memoria, estaría feliz.*

ÍNDICE

RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Zona Costera	3
2.2 Sedimentología	4
2.3 Transporte de Sedimentos	5
2.4 Morfodinámica	8
2.5 Evolución Costera	8
2.6 Oleaje	8
2.7 Tsunami	10
3. ALCANCES	11
4. OBJETIVOS	11
4.1 Objetivo General	11
4.2 Objetivos Específicos	11
5. CAMPAÑA DE TERRENO.....	12
5.1 Descripción del Lugar de Estudio.....	12
5.2 Batimetría y Línea de Costa.....	13
5.3 Mareas.....	15
5.3.1 Marea Armónica	18
5.3.2 Marea No Armónica	18
6. EVOLUCIÓN SEDIMENTARIA.....	19
6.1 Descripción Granulométrica	19
6.1.1 Área de Muestreo.....	19
6.1.2 Herramientas y Proceso de Tamizado.....	20
6.2 Descripción Estadística	22
6.3 Transporte de Sedimentos	24
6.3.1 Condición de Playa en Equilibrio	25
6.3.2 Implementación Fotografías Aéreas	26

7. DESCRIPCIÓN MODELACIÓN NUMÉRICA	27
7.1 Modelo de Propagación de Oleaje	27
7.1.1 Condiciones Espectrales del Oleaje	27
7.1.2 Steady-State Spectral Wave Model (STWAVE).....	28
7.1.3 Metodología de Transferencia de Oleaje	28
7.1.4 Parámetros de Resumen	31
7.2 Modelo de Evolución Costera.....	32
7.2.1 Sistema de Modelado Costero SMC (U. de Cantabria)	32
7.2.2 Tipos de Modelos Implementados	33
8. RESULTADOS	38
8.1 Mareas.....	38
8.1.1 Análisis Armónico 2011.....	38
8.1.2 Análisis No Armónico 2011	43
8.1.3 Comparación de campañas Análisis Armónico.....	47
8.1.4 Comparación de campañas Análisis No Armónico.....	49
8.2 Análisis Granulométrico	50
8.2.1 Análisis Transversal	50
8.2.2 Tipo de Sedimento en la Playa	57
8.3 Análisis Estadístico de los Sedimentos	60
8.3.1 Perfil 1	60
8.3.2 Perfil 2	61
8.3.3 Perfil 4	61
8.3.4 Perfil 3	62
8.4 Transporte de Sedimentos	63
8.4.1 Cambios Batimétricos	63
8.4.2 Cambios en Perfil	67
8.4.3 Transporte Total de Sedimentos.....	69
8.4.4 Comparación con análisis fotográfico Aéreo.....	69
8.5 Transferencia de Olas.....	72
8.5.1 Pre-Tsunami.....	72
8.5.2 Post-Tsunami	75
8.6 Clima de Oleaje Operacional.....	78
8.6.1 Pre-Tsunami.....	78
8.6.2 Post-Tsunami	79
8.6.3 Comparación Climas de Ola	80
8.7 Evolución Línea Litoral.....	83

8.7.1	Ajuste Logarítmico Mediante SMC (U. de Cantabria)	83
8.7.2	Ajuste Parabólico Mediante SMC (U. de Cantabria)	87
8.7.3	Comparación de Resultados	91
9.	CONCLUSIONES	93
10.	BIBLIOGRAFÍA	97
11.	ANEXOS.....	100
11.1	Anexo Análisis Granulométrico	101
11.1.1	Análisis Transversal	101
11.2	Anexo Análisis Estadístico de los Sedimentos	108
11.3	Anexo Olas	112
11.4	Anexo Clima de Oleaje Operacional.....	116
11.4.1	Pre-Tsunami.....	116
11.4.2	Post-Tsunami	119
11.5	Anexo Mareas	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Representación de un tipo de franja costera.	4
Figura 2-2: Erosión y acreción en estructuras por transporte longitudinal.....	6
Figura 2-3: Evacuación de aguas de la playa mediante corriente de resaca.	7
Figura 2-4: Perfil de tormentas y de acreción.	7
Figura 2-5: Características del perfil de una playa.....	9
Figura 2-6 Tipos de rotura.....	10
Figura 5-1: Lugar de Estudio.	12
Figura 5-2: Garmin GPSMAP 421s Combo Dual Transductor.	13
Figura 5-3: GPS Tramin (izquierda). GPS doble frecuencia (derecha). Proceso de batimetría con GPS móvil (abajo).	14
Figura 5-4: Localización de Mareógrafos y perfiles, Lebu.....	16
Figura 5-5: Instalación de mareógrafos para fondeo en el mar (izquierda) y en el río (derecha).....	17
Figura 5-6: HOBO UB-20.	17
Figura 5-7: Óptica estación Base.	17
Figura 6-1: Muestras a lo largo de los perfiles.....	20
Figura 6-2: Balanza digital (arriba); Vasos precipitados (izquierda); Maquina Tamizadora (derecha).....	21
Figura 6-3: Curvas de apuntalamiento.....	22
Figura 6-4: Curvas de Asimetría.....	23
Figura 6-5: Método de Cálculo en el Transporte de Sedimentos.	24
Figura 6-6: Representación de Perfiles.	25
Figura 7-1: Espectro direccional de oleaje.....	27
Figura 7-2: Orientación de grillas para transferencia semipurista.	29
Figura 7-3: Punto de Monitoreo.....	31
Figura 7-4: Aproximación de Modelos con la Bahía de Lebu (Marzo 2010).....	34
Figura 7-5: Representación Matemática Espiral Logarítmica.....	35
Figura 7-6: Representación Matemática Espiral Parabólica.	36
Figura 7-7: Correlación coeficientes y ángulo de incidencia β	36
Figura 8-1: Análisis Armónico en el mar, 2011.	39
Figura 8-2: Análisis Armónico en el río, 2011.	41
Figura 8-3: Comparación flujos residuales, 2011.....	42
Figura 8-4: Análisis No Armónico en el mar, 2011.....	44
Figura 8-5: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, 2011.	44
Figura 8-6: Análisis No Armónico en el río, 2011.....	46
Figura 8-7: Pleamar y bajamar en el sensor Río, 2011.....	46
Figura 8-8: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 1.	52
Figura 8-9: Diagrama d50 para la playa de Lebu.....	59
Figura 8-10: Cambios Batimétricos [m], Caso 2011-1993.....	64
Figura 8-11: Cambios Batimétricos [m], Caso 2012-2011.....	64
Figura 8-12: Cambios Volumétricos [m ³], Caso 2011-1993.	65
Figura 8-13: Cambios Volumétricos [m ³], Caso 2012-2011.	65
Figura 8-14: Comparación de Cambios Volumétricos.....	66
Figura 8-15: Volumen Transportado [m ³], Caso 2011-1993.....	66
Figura 8-16: Evolución Temporal de Perfiles.	68
Figura 8-17: Cambios Espacio Temporales de la Línea. Arriba Pleamar, abajo Bajamar	70

Figura 8-18: Cambios Espacio Temporales de la Línea Litoral en Bajamar.....	71
Figura 8-19: Resultado Modelación Pre-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$; $T_p=14[s]$; $MWD=W$	72
Figura 8-20: Resultado Modelación Pre-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$; $T_p=14[s]$; $MWD=NW$	73
Figura 8-21: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Pre-Tsunami.	74
Figura 8-22: Dirección de aguas someras en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Pre-Tsunami.....	74
Figura 8-23: Resultado Modelación Post-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$; $T_p=14[s]$; $MWD=W$	75
Figura 8-24: Resultado Modelación Post-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$; $T_p=14[s]$; $MWD=NW$	76
Figura 8-25: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Post-Tsunami.	76
Figura 8-26: Dirección de aguas someras en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Post-Tsunami.	77
Figura 8-27: Comparación curvas de excedencia.....	80
Figura 8-28: Comparación de oleaje mediante rosas direccionales.....	81
Figura 8-29: Histogramas de Frecuencia relativa en función de H_{mo} [m] y T_p [s].	82
Figura 8-30: Espaciamiento de 200 [m] entre cada medición.	83
Figura 8-31: Ajuste Logarítmico para año 1984 en la bahía de Lebu.....	85
Figura 8-32: Ajuste Logarítmico para año 1993 en la bahía de Lebu.....	85
Figura 8-33: Ajuste Logarítmico para año 2010 en la bahía de Lebu.....	86
Figura 8-34: Ajuste Logarítmico para año 2011 en la bahía de Lebu.....	86
Figura 8-35: Ajuste Parabólico para año 1984 en la bahía de Lebu.	88
Figura 8-36: Ajuste Parabólico para año 1993 en la bahía de Lebu.	89
Figura 8-37: Ajuste Parabólico para año 2010 en la bahía de Lebu.	89
Figura 8-38: Ajuste Parabólico para año 2011 en la bahía de Lebu.	90
Figura 8-39: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Logarítmico. ...	92
Figura 8-40: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Parabólico.	92
Figura 11-1: Curvas Granulométricas Perfil 1.....	101
Figura 11-2: Curvas Granulométricas Perfil 2.....	102
Figura 11-3: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 2.	103
Figura 11-4: Curvas Granulométricas Perfil 3.....	104
Figura 11-5: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 3.	105
Figura 11-6: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 4.....	106
Figura 11-7: Curvas Granulométricas Perfil 4.....	107
Figura 11-8: Rosas direccionales, caso Pre-Tsunami.....	117
Figura 11-9: Curva de excedencia, caso Pre-Tsunami.	118
Figura 11-10: Rosas direccionales, caso Post-Tsunami.	120
Figura 11-11: Curva de excedencia, caso Post-Tsunami.....	121
Figura 11-12: Histogramas de Frecuencia acumulada en función de H_{mo} [m] y T_p [s].	122
Figura 11-13: Correlación mareas en el mar, 2011.....	125
Figura 11-14: Correlación mareas en el río, 2011.....	125
Figura 11-15: Densidad espectral de energía en el mar, 2011.	126
Figura 11-16: Densidad espectral de energía en el río, 2011.	126
Figura 11-17: Comparación NMM, análisis armónico, 2011.	127
Figura 11-18: Comparación de densidades espectrales de energía, 2011.	127
Figura 11-19: Pleamar y bajamar, campaña 2011.....	128
Figura 11-20: Comparación parámetros No Armónicos, 2011.	129
Figura 11-21: Comparación densidad espectral en sensor Mar, 2011 y 2012.	130
Figura 11-22: Comparación Pronósticos NMM en sensor Mar, 2011 y 2012.	130

Figura 11-23: Comparación Flujos Residuales en sensor Mar, 2011 y 2012.	131
Figura 11-24: Comparación densidad espectral en sensor Río, 2011 y 2012.	131
Figura 11-25: Comparación Pronósticos NMM en sensor Río, 2011 y 2012.	132
Figura 11-26: Comparación Flujos Residuales en sensor Río, 2011 y 2012.	132
Figura 11-27: Comparación parámetros No Armónicos en sensor Mar, 2011 y 2012.	133
Figura 11-28: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, campaña 2011 y 2012.	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 6-1: Escala granulométrica de Udden & Wentworth (1922).	19
Tabla 7-1: Modelos con direcciones propagadas.	30
Tabla 7-2: Direcciones para cada grilla.	30
Tabla 7-3: Configuración espectral del caso 202.5 [°].	30
Tabla 8-1: Parámetros de marea en el mar, 2011.	38
Tabla 8-2: Parámetros de marea en el río, 2011.	40
Tabla 8-3: Parámetros No Armónicos en el mar, 2011.	43
Tabla 8-4: Parámetros No Armónicos en el río, 2011.	45
Tabla 8-5: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el mar.	48
Tabla 8-6: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el río.	48
Tabla 8-7: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 1.	51
Tabla 8-8: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 2.	54
Tabla 8-9: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 3.	55
Tabla 8-10: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 4.	56
Tabla 8-11: Clasificación de Sedimentos, Perfil 1.	57
Tabla 8-12: Clasificación de Sedimentos, Perfil 2.	57
Tabla 8-13: Clasificación de Sedimentos, Perfil 4.	58
Tabla 8-14: Clasificación de Sedimentos, Perfil 3.	58
Tabla 8-15: Transporte Total de Sedimentos.	69
Tabla 8-16: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Logarítmico.	87
Tabla 8-17: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Parabólico.	90
Tabla 11-1: Indicadores Estadísticos, Perfil 1.	108
Tabla 11-2: Indicadores Estadísticos, Perfil 2.	109
Tabla 11-3: Indicadores Estadísticos, Perfil 3.	110
Tabla 11-4: Indicadores Estadísticos, Perfil 4.	111
Tabla 11-5: Funciones de Transferencia caso Pre-Tsunami.	112
Tabla 11-6: Funciones de Transferencia caso Post-Tsunami.	114
Tabla 11-7: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Pre- <i>Tsunami</i>	116
Tabla 11-8: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Pre- <i>Tsunami</i>	116
Tabla 11-9: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Post- <i>Tsunami</i>	119
Tabla 11-10: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Post- <i>Tsunami</i>	119
Tabla 11-11: Componentes armónicas en el mar, 2011.	123
Tabla 11-12: Componentes armónicas en el río, 2011.	124

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Número de Iribarren.....	10
Ecuación 2-2: Evolución de rompiente.	10
Ecuación 6-1: Curtosis.	22
Ecuación 6-2: Desviación Estándar.....	23
Ecuación 6-3: Asimetría.	23
Ecuación 7-1: Expresión Espiral Logarítmica.	34
Ecuación 7-2: Expresión Espiral Parabólica.	35
Ecuación 7-3: Expresión de <i>α_{min}</i>	36

RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en analizar los cambios históricos de la línea litoral y las características morfodinámicas asociadas en la bahía de Lebu (38°S), Región del Bío-Bío, considerando especialmente los efectos del *tsunami* del 27 de Febrero de 2010. Para ello, se construyó una serie histórica de fotografías aéreas correspondiente al periodo entre 1984-2011, las cuales fueron georreferenciadas y digitalizadas para posteriormente aplicar ajustes logarítmicos y parabólicos a través del Sistema de Modelado Costero (SMC) de la Universidad de Cantabria. Se determinó el flujo medio de energía anual para obtener información del oleaje para casos antes y después del *tsunami* a través del software Steady-State Spectral Wave Model (STWAVE).

Considerando la geometría al sur de la ensenada, la espiral logarítmica de Yasso (1965) se ajustó de forma adecuada a la línea litoral para la serie histórica, determinando su configuración. El modelo parabólico adquirió una tendencia similar a la línea litoral, excepto en el sector sur, donde se observaron pequeños desajustes debido a la intrusión de agua en la desembocadura del río Lebu durante el *tsunami* del 27 de Febrero (27/F). El mejor ajuste fue presentado por este modelo con una tasa de acumulación promedio de 22.2 [m] a lo largo de la playa. Los ajustes de modelamiento costero para los 28 años de serie histórica de fotografías aéreas, se correlacionan mediante factores de oleaje y sedimentos, sin embargo, el *tsunami* del 27/F de 2010 modificó considerablemente la línea litoral, produciendo un avance por depositación sedimentaria.

Se concluyó que en el largo plazo, los cambios de la serie histórica se deben a los procesos litorales propios de la bahía, ya sean por cambios estacionales o por eventos de clima extremo como las tormentas. Con respecto al modelo parabólico de Hsu (1989), en el año 1984 existió un retroceso de -25.4 [m] y en 1993 un retroceso de -25.3 [m]. Una vez ocurrido el *tsunami* del año 2010 ha existido una alta variabilidad espacial de la línea litoral en el corto plazo, modificándola transcendentamente con un avance de 22.2 [m]. Así, se logró determinar que una vez culminado el *tsunami*, la condición en la bahía es de un estado de acumulación sedimentaria que en el mediano plazo está presentando características de equilibrio (retroceso de -14 [m] para el año 2011).