



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico**

**ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE UNA ALTERNATIVA DE
ENCAUZAMIENTO PARA LA DESEMBOCADURA DEL
ESTERO LLICO, VII REGIÓN DEL MAULE**

Katherine Elizabeth Rodríguez Tapia

Abril 2018

ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE UNA ALTERNATIVA DE ENCAUZAMIENTO PARA LA DESEMBOCADURA DEL ESTERO LLICO, VII REGIÓN DEL MAULE

Katherine Elizabeth Rodríguez Tapia

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
CLAUDIO HERNÁNDEZ Profesor guía	_____	_____
MAURICIO MOLINA Revisor 1	_____	_____
CRISTOPHER ZAMBRA Revisor 2	_____	_____

ABRIL 2018

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.

CLAUDIO HERNÁNDEZ TORO
PROFESOR GUÍA

KATHERINE ELIZABETH RODRÍGUEZ TAPIA
AUTOR

Dedicado a José Antonio Rodríguez Tapia y José Antonio Rodríguez Cubillos

Para siempre en mi corazón.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre que con mucho esfuerzo y a pesar de miles de problemas nos sacó adelante a mí y a mi hermana. Gracias a ella logré estudiar, formarme como persona y profesional y cumplir mi meta de ser Ingeniero Civil Oceánico.

También a mi familia, hermanos, mi pololo y sobrinit@s que los amo con mi vida y son mi alegría.

A mis eternas amigas Carlita y Barby por siempre darme su apoyo en los momentos que más lo necesité durante este largo proceso, las adoro para siempre.

A mi tía Paty que me brindó apoyo económico para comprarme mi primer Notebook, ese gesto jamás lo olvidaré, la quiero mucho tía.

A mis amigos y compañeros de la Universidad, con los que pasé momentos demasiado entretenidos y de muchos carretes y estudio...en especial a Vicente Flores, Fabián Díaz, Jaime Herrera, César Esparza y Pablo Pedraza que llegó al último, pero igual. Los quiero!!!!

A mis amigos y colegas de la empresa GHD, que cuando llegué a hacer mi práctica me recibieron con los brazos abiertos y me trataron con mucho cariño, en especial quiero agradecer a mi profesor guía Claudio Hernández por brindarme todo el apoyo para poder realizar mi tesis y además por ser un excelente Líder, que me enseñó los valores que debe tener un ingeniero como profesional y como persona. Muchas gracias Claudio.

Quiero agradecer al profesor Mauricio Molina, quien me motivó de manera positiva a terminar y corregir mi tesis, y además por todas sus enseñanzas en los ramos que estuve con él. Profe muchas gracias!!

A mi colega y gentil revisor Cristopher Zambra quien me brindó su apoyo en el término de esta memoria, y también me ha ayudado a lo largo de mi paso por GHD, junto con mis compañeros Patricio Opazo y Mario Venenciano. Gracias por contribuir con miles de risas a mi crecimiento profesional.

Y por último gracias a mis dos ángeles que me miran desde no sé dónde...Mi padre y hermano mayor...quiero decirles que lo hice!!!!!!

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	MOTIVACIÓN.....	2
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2.1	PROBLEMÁTICA PRIMARIA: DESEMBOCADURA ESTERO LLICO.....	4
1.2.2	PROBLEMÁTICA SECUNDARIA: LAGO VICHUQUÉN.....	6
1.2.3	PROBLEMA GENERAL.....	7
1.3	OBJETIVOS Y ALCANCES.....	10
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	10
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.3.3	ALCANCES Y EXCLUSIONES.....	10
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	11
2	MARCO TEÓRICO.....	12
2.1	GENERALIDADES SOBRE OLEAJE.....	12
2.2	GENERALIDADES SOBRE MAREAS.....	14
2.3	HIDRODINÁMICA DE PLAYAS.....	15
2.3.1	TENSORES DE RADIACIÓN.....	15
2.3.2	TIPOS DE CORRIENTES GENERADAS EN LA ZONA DE ROMPIENTES.....	16
2.3.3	ROMPIENTE DEL OLEAJE.....	18
2.4	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COSTERO.....	19
2.4.1	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	19
2.4.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS TRANSVERSAL.....	20
2.4.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS LONGITUDINAL.....	21
2.5	MODELOS NUMÉRICOS.....	22
2.5.1	MODELO MIKE 21 MÓDULO SPECTRAL WAVES.....	23
2.5.2	MODELO MIKE 21 – MÓDULO HIDRODINÁMICO.....	24
2.5.3	MODELO MIKE 21 – MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	26
3	CONDICIONES NATURALES.....	28
3.1	BATIMETRÍA POR SOBRE EL VERIL 100 m.....	28
3.2	BATIMETRÍA HASTA EL VERIL 100 m.....	28
3.3	TOPOBATIMETRÍA DE LA DESEMBOCADURA.....	30
3.4	OLEAJE.....	31
3.4.1	OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	31
3.4.2	OLEAJE EN EL SECTOR DE ESTUDIO.....	34

3.5	MAREAS	38
3.5.1	REGISTRO DE MAREAS 15/06/2015 AL 19/06/2015	38
3.5.2	REGISTRO DE MAREAS CONSULTORA ACUA AÑO 2012	39
3.5.3	NIVELES LAGO VICHUQUÉN Y ESTERO LLICO	40
3.6	HIDROLOGÍA	42
3.6.1	CAUDALES PARA LA MODELACIÓN	42
3.7	GRANULOMETRÍA	43
3.8	CALIDAD DE AGUAS	44
3.9	SISTEMA SEDIMENTARIO	45
3.9.1	CLASIFICACIÓN DE LA PLAYA	45
3.9.2	FUENTES DE SEDIMENTOS CERCANAS	45
4	ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	47
4.1	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN	47
4.2	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	49
4.3	SELECCIÓN DE CASOS DE MODELACIÓN	50
4.4	TENSORES DE RADIACIÓN POR OLEAJE	51
4.4.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	51
4.4.2	GRILLA DE SIMULACIÓN	51
4.4.3	CONDICIONES DE BORDE	56
4.4.4	RESULTADOS TENSORES DE RADIACIÓN	58
4.5	SIMULACIÓN DE CORRIENTES	60
4.5.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	60
4.5.2	GRILLA DE SIMULACIÓN	61
4.5.3	ANÁLISIS DE MALLA NUMÉRICA PARA VALIDACIÓN DE MODELO HIDRODINÁMICO	63
4.5.4	CONDICIONES DE BORDE	65
4.5.5	RESULTADOS CAMPOS DE CORRIENTES	66
4.6	SIMULACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	69
4.6.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	69
4.6.2	GRILLA DE SIMULACIÓN	69
4.6.3	CONDICIONES DE BORDE	69
4.6.4	RESULTADOS TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	69
4.7	ANÁLISIS CASO EXTREMO	72
4.7.1	RESULTADOS CAMPOS DE TENSORES DE RADIACIÓN	72
4.7.2	RESULTADOS CAMPOS DE CORRIENTES COSTERAS	74

4.7.3	RESULTADOS TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA CASO EXTREMO	76
4.8	ANÁLISIS TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA.....	80
4.9	DISEÑO DE LA OBRA DE ENCAUZAMIENTO	88
4.9.1	BASES DE DISEÑO.....	88
4.9.2	OLEAJE AL PIE DE LA OBRA	89
4.9.3	NIVELES DE DISEÑO	90
4.10	DISEÑO ESTRUCTURAL ESPIGONES.....	91
4.10.1	OLEAJE AL PIE DE LA OBRA	91
4.10.2	DISEÑO ENROCADOS	91
4.11	PLAN COMPLEMENTARIO A LA SOLUCIÓN	95
4.12	COSTOS DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN PROPUESTA	96
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
5.1	CONDICIONES NATURALES	97
5.2	ANÁLISIS HIDRODINÁMICO	98
5.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	99
5.4	ANÁLISIS TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA.....	100
5.5	RECOMENDACIONES GENERALES Y COMENTARIOS.....	100
5.5.1	RECOMENDACIONES GENERALES.....	100
5.5.2	COMENTARIOS	101
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
7	ANEXOS	106
7.1	RESULTADOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE SEDIMENTOS	106
7.2	RESULTADOS CALIDAD DE AGUAS EN LAGO VICHUQUÉN Y ESTERO LLICO	108
7.3	DISEÑO DE ESPIGONES.....	109
7.4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS COMPUERTA <i>RUBBER DAM</i>	112
7.5	SALIDAS TENSORES DE RADIACIÓN	114
7.6	SALIDAS CAMPOS DE CORRIENTES	117
7.7	SALIDAS TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	120
7.8	IMÁGENES HISTÓRICAS SAF	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación sector de estudio	3
Figura 1-2: Zonas de inundación identificadas en el sector de Llico y ubicación de planta de tratamiento de aguas servidas.....	5
Figura 1-3: Ejemplo de turbiedad del agua del lago Vichuquén, Llico.....	6
Figura 1-4: Esquema explicativo niveles del lago Vichuquén.....	7
Figura 1-5: Ejemplo de espigones para encauzamiento de desembocadura	8
Figura 1-6: Ubicación propuesta de espigones de encauzamiento y compuerta	9
Figura 1-7: Barra abierta desembocadura del estero Llico, año 2015.....	9
Figura 2-1: Clasificación de las olas de acuerdo a su periodo	12
Figura 2-2: Espectro Jonswap y Pierson - Moskowitz.....	13
Figura 2-3: Esquema general de generación de marea astronómica.....	14
Figura 2-4: Esquema corriente transversal y transporte de sedimento	17
Figura 2-5: Ejemplo de corriente de retorno en una playa de Cuba.....	17
Figura 2-6: Ejemplo de corriente de resaca	18
Figura 2-7: Esquema de zonificación del transporte de sedimentos	20
Figura 2-8: Esquema de transporte longitudinal neto y bruto.....	22
Figura 3-1: Batimetría exploratoria ejecutada por la Dirección de Obras Portuarias en el año 2015.....	29
Figura 3-2: Levantamiento zona desembocadura estero Llico.....	30
Figura 3-3: Ubicación Nodo Constitución, Olas Chile V	31
Figura 3-4: Rosa de alturas de oleaje en aguas profundas – Nodo Constitución.....	34
Figura 3-5: Nodos de extracción de resultados – costa de Llico	35
Figura 3-6: Rosa de puntos Hs – Nodo P	36
Figura 3-7: Ubicación Mareógrafo Llico	38
Figura 3-8: Registro de mareas en Llico.....	39
Figura 3-9: Ubicación Mareógrafos en sector de estudio.....	40
Figura 3-10: Comparación de marea medida en Vichuquén, Estero Llico y Océano	41
Figura 3-11: Cuenca de Vichuquén y sus principales aportantes de caudal al sistema	42
Figura 3-12: Ubicación de las estaciones de muestreo para el análisis granulométrico en estero Llico.....	43
Figura 3-13: Ubicación de las estaciones de muestreo para el análisis de calidad de agua	44
Figura 3-14: Posibles fuentes de aporte de sedimentos a Llico	46
Figura 4-1: Secuencia metodológica de modelaciones numéricas	48
Figura 4-2: Área definida para la grilla numérica	52
Figura 4-3: Áreas de resolución variable de la grilla numérica de la Situación Actual a partir de MIKE ZERO	53
Figura 4-4: Triangulación de la grilla correspondiente a la situación actual y situación con espigones a partir de MIKE ZERO.....	54
Figura 4-5: Grilla de simulación final de la situación actual y situación con espigones a partir de MIKE ZERO	55
Figura 4-6: Condiciones de borde para simulación de tensores de radiación mediante MIKE 21 SW para la situación base y situación con espigones	57
Figura 4-7: Campos de tensores de radiación (Sxx, Sxy y Syy) para situación actual y situación con espigones- Caso 5.....	59
Figura 4-8: Área definida para la grilla numérica	61

Figura 4-9: Grilla de simulación final de la situación actual y situación con espigones a partir de MIKE ZERO	62
Figura 4-10: Punto de extracción de resultados MIKE 21 HD	63
Figura 4-11: Resultados análisis de malla numérica, Elevación superficial (m) y dirección de corriente (Rad)	64
Figura 4-12: Condiciones de borde para simulación de corrientes costeras mediante MIKE 21 SW para la situación base y situación con espigones	65
Figura 4-13: Campos de corrientes costeras, de izquierda a derecha, caso 5 situación actual, caso 5 situación con espigones y caudal $Q=4.78$ m ³ /s, caso 5B situación con espigones y caudal $Q=78$ m ³ /s y caso 5C situación con espigones y caudal $Q=168$ m ³ /s.	67
Figura 4-14: Resultados de corrientes en Punto N°1 y 2 de situación actual vs situación con espigones– Caso 5, 5B y 5C.	68
Figura 4-15: Transporte de sedimentos total, de izquierda a derecha, caso 5 situación actual, caso 5 con espigones y caudal $Q=4.78$ m ³ /s, caso 5B situación con espigones y caudal $Q=78$ m ³ /s y caso 5C situación con espigones y caudal $Q=168$ m ³ /s	70
Figura 4-16: Campos de tensores de radiación (S_{xx} , S_{xy} y S_{yy}) para situación actual y situación con espigones- Caso 11 extremo	73
Figura 4-17: Campo de corrientes costeras para la situación actual y situación con espigones- Caso Extremo	75
Figura 4-18: Resultados corrientes en puntos P1 y P2 de la situación actual vs situación con espigones- Caso Extremo	76
Figura 4-19: Transporte de sedimento para la situación actual y situación con espigones- Caso Extremo.....	78
Figura 4-20: Cambios de fondo para la situación actual y situación con espigones- Caso Extremo.....	79
Figura 4-21: Composición borde costero a analizar.....	81
Figura 4-22: Comparación año a año de la línea de costa de izquierda a derecha (año 1978 a 2016).....	82
Figura 4-23: Avance y retroceso de la línea de costa por la carrera de marea	84
Figura 4-24: Perfiles definidos para análisis temporal de línea de costa.....	85
Figura 4-25: Cambios en la línea de costa de Llico con respecto de la línea del 1978	86
Figura 4-26: Distancias relativas a línea de costa de Llico respecto de la línea de base (año 1978).....	87
Figura 4-27: Planta a proyectar	93
Figura 4-28: Sección A Cabezo Dolosse	93
Figura 4-29: Sección B Tronco rocas de 7 a 10 Ton.....	94
Figura 4-30: Sección C Tronco rocas de 3 a 5 Ton	94
Figura 4-31: Sección D Arranque rocas de 2 a 3 Ton.....	94
Figura 4-32: Ejemplos de Compuerta <i>Rubber dam</i>	95
Figura 4-33: Presupuesto estimado obras de encauzamiento para la desembocadura del estero Llico.....	96
Figura 7-1: Distribución porcentual de frecuencia y curva granulométrica (% que pasa) de las Muestras M1, M2, M3 y M4	107
Figura 7-2: Diagrama de alturas de ola no lineales.....	111
Figura 7-3: Coeficientes de estabilidad para los elementos de rocas	111
Figura 7-4: Esquema funcionamiento general <i>RuberDam</i>	112
Figura 7-5: Diagrama de fuerzas hidrostáticas compuerta <i>Ruber Dam</i>	113
Figura 7-6: Ejemplo de funcionamiento de compuerta <i>Ruber Dam</i>	113

Figura 7-7: Campos de tensores de radiación Sxx para situación actual y Situación con espigones- Casos 1, 2 y 3.....	114
Figura 7-8: Campos de tensores de radiación Sxx para situación actual y Situación con espigones- Casos 4, 6 y 7.....	115
Figura 7-9: Campos de tensores de radiación Sxx para situación actual y Situación con espigones- Casos 8, 9 y 10.....	116
Figura 7-10: Campos de corrientes costeras para situación actual y situación con espigones casos 1, 2 y 3.....	117
Figura 7-11: Campos de corrientes costeras para situación actual y situación con espigones- Casos 4,6 y 7.....	118
Figura 7-12: Campos de corrientes costeras para situación actual y situación con espigones- Casos 8, 9 y 10.....	119
Figura 7-13: Transporte de sedimentos potencial total para situación actual y con espigones - Casos 1,2 y 3.....	120
Figura 7-14: Transporte de sedimentos potencial total para situación actual y con espigones - Casos 4,6 y 7.....	121
Figura 7-15: Transporte de sedimentos potencial total para situación actual y con espigones - Casos 8, 9 y 10.....	122
Figura 7-16: Imagen SAF año 1978.....	123
Figura 7-17: Imagen SAF 1994.....	124
Figura 7-18: Imagen SAF año 1997.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Coordenadas nodos de extracción de resultados.....	32
Tabla 3-2: Tabla de incidencia de Alturas vs dirección en aguas profundas – Nodo Constitución.....	32
Tabla 3-3: Tabla de incidencia de Periodos vs dirección en aguas profundas – Nodo Constitución.....	32
Tabla 3-4: Tabla de incidencia de Periodos vs Alturas en aguas profundas – Nodo Constitución.....	33
Tabla 3-5: Coordenadas nodos de extracción de resultados.....	35
Tabla 3-6: Incidencia Dirección (°) v/s Altura Hmo (m) - %.....	36
Tabla 3-7: Incidencia Periodos Tp (seg) v/s Dirección (°).....	37
Tabla 3-8: Valores extremos III cuadrante en nodo P.....	37
Tabla 3-9: Planos mareales Llico año 2012.....	39
Tabla 3-10: Mediciones de marea en la costa de Llico, estero y lago año 2015.....	40
Tabla 4-1: Parámetros de resumen de oleaje empleados para la modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos.....	50
Tabla 4-2: Casos a simular para la situación Actual y Situación con Espigones.....	50
Tabla 4-3: Descripción de áreas malla.....	53
Tabla 4-4: Spreading direccional.....	56
Tabla 4-5: Profundidad activa y de cierre para el sector de estudio.....	86
Tabla 4-6: Niveles máximos de diseño.....	90
Tabla 4-7: Resumen elementos a utilizar.....	91
Tabla 4-8: Resumen elementos a utilizar.....	92
Tabla 7-1: Resultados del análisis granulométrico de los sedimentos marinos según fracción.....	106

Tabla 7-2: Resumen resultados calidad de agua Lago Vichuquén y Estero Llico, junio de 2015	108
Tabla 7-3: Vidas útiles mínimas recomendadas por la ROM	109
Tabla 7-4: Riesgos máximos admisibles recomendados por la ROM	110

Resumen

El sector de estudio corresponde al estero Llico, el cual es un afluente del lago Vichuquén. En ambos cuerpos de agua, se presentan problemáticas asociadas a inundaciones de sus riberas en la época invernal, debido a la presencia de una barra de arena ubicada en la desembocadura del estero, la cual no permite que el flujo escape hacia el mar, generando inundaciones en Llico y también en Vichuquén. Existe además un problema secundario, que también se origina por la presencia de la barra de arena mencionada, ya que debido a ella el agua en la zona de la desembocadura se estanca generando insalubridad y malos olores, considerando además que existe una planta de tratamiento de aguas servidas que vierte una cantidad desconocida de desechos al estero.

Dentro del contexto de la problemática identificada, se plantea la siguiente interrogante: ¿qué pasaría si la barra se abre de manera permanente, mediante espigones de encauzamiento?, ¿se evitarían las inundaciones de las riberas y, por ende, se generaría circulación de las aguas que eviten que esta se estanque?, ¿cómo se comportaría la playa y desembocadura de Llico ante la presencia de espigones?

En la presente memoria de título se proporciona una respuesta a las inquietudes planteadas en el párrafo anterior, mediante un análisis morfodinámico de la zona de la desembocadura del estero Llico y playa del mismo nombre, tanto de la situación actual (barra de arena cerrada) como de la situación con proyecto (encauzamiento con espigones). El análisis se ejecutó mediante una revisión y análisis de antecedentes de campo disponibles, con los que se configuraron modelos que describen el comportamiento del patrón hidrodinámico y de transporte de sedimentos operacional de los dos escenarios de estudio. Los modelos utilizados corresponden a los módulos del Software MIKE 21. Los casos de estudio, fueron seleccionados en base al oleaje de mayor frecuencia en aguas profundas, mientras que los casos de descarga del estero fueron seleccionados en base a los promedios de caudales mensuales mínimos, medios y un caudal asociado a un $T_r=10$ años.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se determinó que las corrientes litorales se trasladan de sur a norte considerando las dos direcciones de incidencia principales del oleaje (SW y SSW), la mayor parte del tiempo. En general las magnitudes se encuentran dentro del rango de 0.4 a 0.8 m/s.

En cuanto a la capacidad de transporte de sedimentos, los resultados dieron cuenta de la alta variación en los patrones hidrodinámicos y por consecuencia del transporte de sedimentos del sector estudiado, ya que se identificó una modificación en las corrientes, y por secuela un truncamiento del patrón del transporte de arenas, y respecto a ello, se observó una posible acumulación de sedimentos en el espigón sur y una probable erosión de la playa de Llico al norte, considerando que el estero no aporta sedimentos al sistema y de acuerdo al análisis de línea de costa histórica, la playa actualmente se encuentra en equilibrio sedimentario.

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos en general, no se considera factible la implementación de este tipo de obra, dada la alta perturbación del patrón morfodinámico costero actual, el alto costo que trae consigo su materialización, la alta probabilidad de la necesidad de dragados periódicos en la entrada del canal formado por los espigones, y la posible pérdida de playa en el sector norte de las estructuras.