



Ingeniería Civil Oceánica
Valparaíso. Chile.

Memoria del Proyecto para Optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico.

**Estudio Morfodinámico del Litoral en la
Desembocadura del Río San José, Arica,
XV Región. Chile.**

TIARE PAZ ESPINOZA VARAS

Agosto 2011

**Estudio Morfodinámico del Litoral en la Desembocadura del Río San José, Arica, XV
Región. Chile.**

Tiare Paz Espinoza Varas

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Mauricio Reyes G

Ernesto Gómez A.

Verónica Maillard T.

Declaración

Este informe o parte de él, no ha sido presentado anteriormente a la Universidad de Valparaíso u otra Institución universitaria chilena o extranjera para su evaluación, comercialización u otros propósitos, salvo las referencias citadas en el mismo.

La Universidad de Valparaíso, reconoce la propiedad intelectual del autor sobre este trabajo de Memoria de Titulación, para ser evaluado con el propósito de obtención de Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, para ello el autor renuncia a los derechos legales del mismo, que posteriormente cede a la Universidad de Valparaíso, siendo está facultada para utilizar solo y exclusivamente con fines académicos.

Tiare Espinoza Varas
Alumna Memorista

Mauricio Reyes Gallardo
Profesor Guía

Agradecimientos.

Mis agradecimientos van dirigidos hacia mi gran y extensa familia....que siempre estuvo, está y estará a mi lado ... enseñándome, criticándome, haciéndome reír, llorar, celebrar y compartir– que es una de las cosas que mejor hacemos - para mis padres, mi hermana Constanza, Nona, Padrino, Tía Silvia, Tito, Tía Ximena, Grace, Marcelo, Arantza, Muriel, Abuela Lucia, Tía Malena, Andrés, Sergio, Sussy, Jorge, Luciano, Maxi, Marta, Daniel y niños..... y mi bisabuela Pepa, que dedicaba parte de su jubilación, para que yo estudiara en Viña.

Los años en la U de Valpo, fueron momentos muy largos... pero ahora son recuerdos llenos de sentimientos y una parte muy valiosa en mi vida, agradezco a Dios haberme puesto en ese instante y en ese lugar para conocer gente tan amable, dedicada y cariñosa como conocí. Nombraré algunas y lamento no poder recordar a todas..., Tía Lila, Felipe, Jano y su tío - la familia de Viña - , Raúl y López (gracias por todos esos regalones desde una taza de café hasta las horas de su tiempo). Juanito y Maggi, Pame de la biblioteca, a la Jacki.... muchas y muchas gracias nuevamente por aguantarme – sé que es muy difícil -, por su paciencia, cariño y por compartir con ustedes.

A mis compañeros y amigos de la UV, nunca los olvidaré y siempre los estoy recordando, muchos fueron personas muy importantes en esos seis años, al igual que sus familias, me alegra que aunque el tiempo y la distancia nos separe, nos sigamos llamando y tratando de juntarnos para hacer algún asado.

No podía olvidar a Patricio Winckler – sus enseñanzas, conversaciones, fotos, críticas e interrupciones – al igual que el profe Rene Astudillo con su paciencia, creación, enseñanza y perseverancia.

A la vez agradezco a Esteban Hernández del INH, el cual proporcionó parte de la información de esta memoria y a José Beyá, el cual generosamente dedicó parte de sus horas para realizar correcciones y modificaciones en mi trabajo.

A Verónica Maillard por sus comentarios y el tiempo dedicado a la revisión de este proyecto.

A Rose Maldonado por toda su ayuda y Aldo Quiroz por sus comentarios y conceptos entregados.

Y por último a Mauricio Reyes, mi profesor guía, por su PACIENCIA, conversaciones de vida, por los INCONTABLES RETOS - DISCUSIONES y por dedicar tiempo en este trabajo. Muchas gracias.

Tiare Espinoza Varas.

...” la historia es nuestra y la hacen los pueblos”...

Índice de contenidos

1	INTRODUCCIÓN	1.1
1.1	ALCANCES	1.2
2	OBJETIVOS	2.1
3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	3.1
3.1	CONCEPTO.....	3.1
3.2	MÉTODO PARA EL CÁLCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.	3.4
3.2.1	<i>Campaña de Toma de Datos</i>	3.4
3.2.2	<i>Evidencias Morfológicas de la Costa</i>	3.4
3.2.3	<i>Cálculo Teórico del Transporte Sólido Litoral</i>	3.6
3.2.4	<i>Evolución de la Línea de Costa</i>	3.10
3.3	DESEMBOCADURA	3.11
3.3.1	<i>Estuarios</i>	3.12
3.3.2	<i>Delta</i>	3.15
4	TEORÍA RESPECTO AL OLEAJE	4.1
4.1	TEORÍA LINEAL O DE AIRY	4.3
4.2	TEORÍAS DE ONDA DE ORDEN SUPERIOR.....	4.8
4.3	FENÓMENOS DURANTE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	4.8
4.3.1	<i>Refracción</i>	4.8
4.3.2	<i>Difracción</i>	4.9
4.3.3	<i>Reflexión</i>	4.10
4.3.4	<i>Rotura</i>	4.10
5	CONDICIONES NATURALES.....	5.1
5.1	LOCALIZACIÓN.....	5.1
5.2	TOPOBATIMETRÍA.....	5.3
5.2.1	<i>Línea de Playa Histórica</i>	5.4
5.3	ANÁLISIS OCEANOGRÁFICOS.....	5.5
5.3.1	<i>Corrientes</i>	5.5
5.3.2	<i>Marea</i>	5.10
5.3.3	<i>Oleaje</i>	5.13
5.3.4	<i>Vientos</i>	5.17
5.4	SEDIMENTOS.....	5.19
5.5	TIPO DE ROMPIENTE	5.22
5.6	HIDROLOGÍA.....	5.23
5.6.1	<i>Hidráulica y Mecánica Fluvial</i>	5.25
5.7	MANCHA DE SEDIMENTOS	5.26
6	MODELOS DE PREDICCIÓN DE EVOLUCIÓN DE COSTAS.	6.1
6.1	INTRODUCCIÓN	6.1
6.2	MODELO DE EVOLUCIÓN A CORTO – MEDIO PLAZO	6.2
6.2.1	<i>Modelos de Evolución de Perfil</i>	6.2
6.2.2	<i>Modelos de Evolución en 3D</i>	6.3
6.3	MODELO DE EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO	6.3
6.4	ANÁLISIS DE MODELOS DE LARGO PLAZO	6.3
7	GENESIS: MODELO GENERADO PARA SIMULAR EL CAMBIO DEL LITORAL	7.2
7.1	INTRODUCCIÓN.....	7.2
7.2	CAPACIDADES Y LIMITACIONES DEL GÉNESIS	7.2
7.2.1	<i>Posibilidades</i>	7.2

7.2.2	<i>Limitaciones</i>	7.3
7.3	INTERFAZ	7.3
7.3.1	<i>Ficheros de Entrada</i>	7.4
7.3.2	<i>Los Archivos de Salida</i>	7.4
7.4	SUPUESTOS PARA MODELAR	7.4
7.5	ECUACIONES DE GOBIERNO	7.5
7.6	PARÁMETROS EMPÍRICOS	7.8
7.6.1	<i>Profundidad del Transporte Longitudinal</i>	7.8
7.6.2	<i>Forma y la Pendiente del Perfil a Analizar</i>	7.10
7.6.3	<i>Profundidad de Cierre</i>	7.11
7.6.4	<i>Cálculo de la Ola</i>	7.11
7.7	MODELO INTERNO DE TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	7.12
7.8	OLEAJE DE TRANSMISIÓN.....	7.14
7.9	PROCEDIMIENTO NUMÉRICO DE LA SOLUCIÓN	7.14
7.10	BYPASSING.....	7.15
7.11	ESTRUCTURAS PARALELAS A LA COSTA.....	7.16
7.12	TASAS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL.....	7.16
7.13	TASAS MÚLTIPLES DE TRANSPORTE	7.17
7.14	TASAS DERIVATIVAS.....	7.17
7.14.1	<i>Tasa de Transporte Bruto</i>	7.17
7.14.2	<i>Tasa de Transporte Neto</i>	7.18
7.15	UMBRAL EFECTIVO	7.18
7.16	DATOS DE ENTRADA DEL GENESIS	7.19
7.16.1	<i>Datos de la Posición de la Línea de Costa</i>	7.20
7.16.2	<i>Oleaje Mar Adentro</i>	7.20
7.16.3	<i>Batimetría y Perfiles</i>	7.20
7.16.4	<i>Estructuras Costeras</i>	7.20
7.16.5	<i>Transporte Local de Sedimentos</i>	7.20
7.16.6	<i>Geología Local</i>	7.21
7.16.7	<i>Nivel de Agua</i>	7.21
7.16.8	<i>Sucesos Extremos</i>	7.21
7.17	CONDICIONES DE CONTORNO.....	7.21
7.18	VARIABILIDAD DE PROCESOS COSTEROS.....	7.21
7.19	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	7.22
8	STWAVE: MODELO DEL ESTADO DE EQUILIBRIO DE LA ONDA	8.1
8.1	GENERALIDADES	8.1
8.2	CAPACIDADES DEL MODELO	8.1
8.2.1	<i>Supuestos</i>	8.1
8.2.2	<i>Ecuaciones de Gobierno</i>	8.2
8.3	REFRACCIÓN Y SHOALING.....	8.3
8.4	DIFRACCIÓN	8.3
8.5	FUENTE Y SUMIDERO	8.3
8.6	DISCRETIZACIÓN NUMÉRICA.....	8.4
9	MODELACIÓN NUMÉRICA CON STWAVE.	9.1
9.1	INTRODUCCIÓN	9.1
9.2	MODELO CON STWAVE	9.1
9.2.1	<i>Estadística</i>	9.1
9.2.2	<i>Clima de Oleaje Medio</i>	9.1
9.2.3	<i>Transformación del Oleaje</i>	9.4
9.2.4	<i>Resultados</i>	9.9
10	MODELACIÓN NUMÉRICA CON GENESIS.	10.1
10.1	INTRODUCCIÓN	10.1
10.2	VARIABLES DE ENTRADA	10.1

10.3	RESULTADO.....	10.6
10.3.1	<i>Validación</i>	10.8
10.4	OBRAS MARÍTIMAS.....	10.8
10.4.1	<i>Desembocadura Río San José</i>	10.9
10.4.2	<i>Obras Costeras Playa Chinchorro</i>	10.9
10.5	SIMULACIÓN CON OBRAS MARÍTIMAS PROYECTADAS	10.11
11	CONCLUSIÓN	11.1
11.1	INTRODUCCIÓN.....	11.1
11.2	CONCLUSIONES.....	11.1
12	BIBLIOGRAFÍA	12.1
ANEXO A		12.4
ANEXO B.1		12.5
ANEXO B.2		12.17
ANEXO C		12.36
ANEXO D		12.47
ANEXO E		12.52
ANEXO F ...		12.53

Índice de tablas

Tabla 1: Puntos de Referencia SHOA.	5.4
Tabla 2: Coordenadas Estación Total. Sitio 7 Puerto de Arica.....	5.4
Tabla 3: Distancias Horizontales Promedios Líneas de Playa Históricas.	5.5
Tabla 4 : Corrientes Lagrangeanas en Condición de Llenante.....	5.6
Tabla 5 : Corrientes Lagrangeanas en Condición de Vaciante.	5.6
Tabla 6: Coordenadas de Posiciones de Correntómetros.	5.7
Tabla 7: Magnitudes Correntómetro C1.....	5.7
Tabla 8: Magnitudes Correntómetro C2.....	5.8
Tabla 9: Magnitudes Correntómetro C3.....	5.9
Tabla 10: Resumen de Pronóstico del SHOA., días de registro.....	5.12
Tabla 11: Resumen de Incidencia de Atura y Dirección del Oleaje en Aguas Profundas. Arica...	5.14
Tabla 12: Tabla de Incidencia de Altura y Período de Oleaje en Aguas Profundas. Arica.....	5.15
Tabla 13 : Tabla de Incidencia de Dirección y Período de Oleaje en Aguas Profundas. Arica.....	5.16
Tabla 14: Coordenadas de Estación Meteorológica.	5.17
Tabla 15 : Resumen Velocidades Promedios de Viento.....	5.17
Tabla 16 : Resumen Velocidades Rachas de Viento.....	5.17
Tabla 17 : Distribución de Vientos – Velocidad Media.....	5.18
Tabla 18 : Clasificación Wentworth.	5.19
Tabla 19 : Clasificación Sedimentológica y Diámetros Característicos.	5.20
Tabla 20: Análisis de Frecuencia. Estación Pluviométrica. Arica.	5.23
Tabla 21: Caudales de Diseño.	5.25
Tabla 22: Tabla de incidencia Hmo (m), Tp (s).....	9.2
Tabla 23: Dimensión de la grilla de propagación.....	9.5
Tabla 24: Oleaje de Propagación W	9.9
Tabla 25: Oleaje de Propagación SW.....	9.9
Tabla 26: Coeficiente de Altura de Ola	9.14
Tabla 27: Coeficiente de Dirección	9.14
Tabla 28: Comparación Porcentual de Líneas de Playa Históricas v/s Modelo GENESIS.	10.8
Tabla 29: Características de Obras del Molo de Encauzamiento.....	10.9
Tabla 30: Características de las Obras Costeras – Chinchorro.....	10.10

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Descomposición Oleaje Incidente.	3.1
Ilustración 2: Tipos de Transporte de Sedimentos.....	3.2
Ilustración 3: Esquemas de Formas de Transportar el Sedimento.....	3.3
Ilustración 4: Tipo de Barreras. Longitudinales (a, b y c), Transversal (d)	3.5
Ilustración 5: Esquema del Flujo de Energía de la Ola.....	3.6
Ilustración 6: Esquema de Sectores de Playa.	3.11
Ilustración 7 : Morfología General de un Estuario.....	3.13
Ilustración 8: Desembocadura Río Rapel. Estuario.	3.14
Ilustración 9: Desembocadura Río Biobío. Estuario.	3.14
Ilustración 10: Desembocadura Río San José. Delta.	3.15
Ilustración 11: Movimiento de las partículas de olas.....	4.1
Ilustración 12: Efecto de Refracción. Komar.....	4.9
Ilustración 13 : Esquema de Efecto de Difracción.	4.10
Ilustración 14: Transformación del Oleaje por la Profundidad.	4.11
Ilustración 15: División Zonas de Rompiente.....	4.11
Ilustración 16: Perfiles de Rompientes.....	4.15
Ilustración 17 : Visión General Cuenca San José.....	5.1
Ilustración 18: Visión General Zona de Estudio.	5.2
Ilustración 19: Carta Náutica N° 1111. SHOA.....	5.3
Ilustración 20: Ubicación Boyas Existentes, Validación OLAS CHILE.	5.13
Ilustración 21: Imagen de Rompiente en la Playa Chinchorro y desembocadura del Río San José	5.22
Ilustración 22 : Esquema del Proceso de erosión en las riveras	5.25
Ilustración 23: Desembocadura del río San José año 2001. Fuente:DGA.	5.26
Ilustración 24: Mancha de Sedimentos 2002. Fuente: DGA.....	5.27
Ilustración 25: Batimetría General.....	9.5
Ilustración 26: Malla W de Propagación.....	9.6
Ilustración 27: Malla SW de Propagación	9.6
Ilustración 28: Espectro de energía, Dirección W (H=1 m, Tp=14 s).....	9.7
Ilustración 29: Resultados Malla SW, Dir SSW Tp 12 s	9.10
Ilustración 30: Resultados Malla SW, Dir SW Tp 12 s.....	9.10
Ilustración 31: Resultados Malla W, Dir WSW Tp 12 s.....	9.11
Ilustración 32: Resultados Malla W, Dir W Tp 12 s.....	9.11
Ilustración 33: Estación de Monitoreo.	9.12
Ilustración 34 : Batimetría trabajada en GENESIS.	10.1
Ilustración 35: Grilla del GENESIS y Línea de Playa 1996.....	10.2
Ilustración 36: Gráfico Modelo Interno de Olas del GENESIS.	10.3
Ilustración 37: Rosa del Espectro Modelo Interno del GENESIS.	10.3
Ilustración 38: Esquema Perfiles Tipos en la Desembocadura Río San José.....	10.4
Ilustración 39: Grilla Preparada Inicio Modelación GENESIS.....	10.5
Ilustración 40: Línea de Playa Modificada a 6 años.....	10.6
Ilustración 41: Zoom Zona Desembocadura	10.7
Ilustración 42: Zoom Sector Playa Chinchorro.....	10.7
Ilustración 43: Esquema Molos de Canalización Desembocadura Río San José, Arica.....	10.9
Ilustración 44: Esquema Molos o Espigones de Control Playa Chinchorro.....	10.10
Ilustración 45: Salida GENESIS con obras marítimas	10.11
Ilustración 46: Resultado Propagación SW, Dir = SSW, Tp= 10 s	12.37
Ilustración 47: Resultado Propagación SW, Dir = SSW, Tp= 12 s	12.37
Ilustración 48: Resultado Propagación SW, Dir = SSW, Tp= 14 s	12.38
Ilustración 49: Resultado Propagación SW, Dir = SSW, Tp= 16 s	12.38

Ilustración 50: Resultado Propagación SW, Dir = SSW, Tp= 18	12.39
Ilustración 51: Resultado Propagación SW, Dir = SW, Tp= 10 s.....	12.39
Ilustración 52: Resultado Propagación SW, Dir = SW, Tp= 12 s.....	12.40
Ilustración 53: Resultado Propagación SW, Dir = SW, Tp= 14 s.....	12.40
Ilustración 54: Resultado Propagación SW, Dir = SW, Tp= 16 s.....	12.41
Ilustración 55: Resultado Propagación SW, Dir = SW, Tp= 18 s.....	12.41
Ilustración 56: Resultado Propagación W, Dir = W,SW Tp= 10 s.....	12.42
Ilustración 57: Resultado Propagación W, Dir = W,SW Tp= 12 s.....	12.42
Ilustración 58: Resultado Propagación W, Dir = W,SW Tp= 14 s.....	12.43
Ilustración 59: Resultado Propagación W, Dir = W,SW Tp= 16 s.....	12.43
Ilustración 60: Resultado Propagación W, Dir = W,SW Tp= 18 s.....	12.44
Ilustración 61: Resultado Propagación W, Dir = W Tp= 10 s.....	12.44
Ilustración 62: Resultado Propagación W, Dir = W Tp= 12 s.....	12.45
Ilustración 63: Resultado Propagación W, Dir = W Tp= 14 s.....	12.45
Ilustración 64: Resultado Propagación W, Dir = W Tp= 16 s.....	12.46
Ilustración 65: Resultado Propagación W, Dir = W Tp= 18 s.....	12.46
Ilustración 66: Home del GENESIS y sus Aplicaciones.....	12.48
Ilustración 67: Batimetría con Grilla GENESIS creada.	12.49
Ilustración 68: Definición de Celdas de Grilla Específica.....	12.49
Ilustración 69: Salida de GENESIS, Línea de Playa y Estación de Control.	12.50

Índice de gráficos

Gráfico 1 : Velocidad del Correntómetro C1.	5.8
Gráfico 2 : Velocidad Correntómetro C2.	5.9
Gráfico 3 : Velocidad Correntómetro C3.	5.10
Gráfico 4: Niveles de Marea en Arica.	5.11
Gráfico 5 : Diámetro Característico de Sedimentos.	5.21
Gráfico 6: Diámetro de Gravas Gruesas Existentes.	5.21
Gráfico 7: Diámetros de Arenas Finas y Limos Existentes.	5.22
Gráfico 8: Caudales Fórmula Racional. Tormenta de Diseño de 3 a 4 horas de Duración.	5.24
Gráfico 9: Frecuencia de ocurrencia del oleaje.	9.3
Gráfico 10: Frecuencia de ocurrencia T_p (s)	9.3
Gráfico 11: Frecuencia de ocurrencia por dirección	9.4
Gráfico 12: Coeficientes de altura de ola	9.13
Gráfico 13 : Dirección de incidencia del oleaje	9.13

Resumen

El río San José tiene 128 kilómetros de extensión y posee una cuenca de 3.060 kilómetros cuadrados cuyo escurrimiento hidráulico desemboca en el sector norte de la ciudad de Arica. En periodos de invierno altiplánico presenta un régimen hidrológico impermanente con escurrimiento durante los meses de verano, con crecidas violentas que contienen una alta concentración de arena, sedimentos y basuras que impactan sobre la costa.

La magnitud de las crecidas ha generado múltiples problemas de erosión de terrenos, socavación de pilas de puentes, daño a estructuras hidráulicas, contaminación de la playa Chinchorro con sedimentos en suspensión y embancamiento del Sitio 7 del Puerto de Arica. Por tales factores, la Dirección de Obras Portuarias (DOP), solicitó al Instituto Nacional de Hidráulica de Chile (INH) la verificación del diseño hidráulico de los espigones de encauzamiento y de control propuestos en el “Plan Maestro de Aguas Lluvias de Arica, Manejo de los Cauces de los Ríos Lluta y San José y sus Desembocaduras”.

En el presente proyecto de tesis se busca detectar y analizar los efectos causados por las obras costeras propuestas como solución de ingeniería avanzada, en lo referente a efectos de largo plazo en la dinámica del transporte de sedimentos en la costa de Arica. Para ello se han recopilado antecedentes de estudios oceanográficos; topobatimetría del sector, datos de oleaje referente a una estadística de 20 años de información, mareas y corrientes. Además, se realiza un análisis sobre datos de sedimentos existentes y transportados en la zona de estudio, a partir de estudios hidrológicos existentes para la cuenca del río San José.

El procedimiento principal desarrollado es un modelo de evolución costera a largo plazo con el software GENESIS, simulando respuestas de los perfiles de playa bajo condiciones de oleaje, pendiente de la costa, tipología de obras y tamaño de sedimentos. La variable de mayor relevancia en este análisis es el cambio en el transporte de sedimentos a lo largo de la costa, sobre la cual este estudio se ha centrado.

Con el fin de complementar los datos de oleaje analizados y como variable de entrada al modelo de GENESIS, se han realizado propagaciones de oleaje para simular su comportamiento desde aguas profundas a aguas someras, utilizando para ello el módulo o modelo computacional STWAVE.

La calibración de los modelos se ejecuta mediante el contraste de resultados con evidencias empíricas del transporte de sedimentos, como fotografías aéreas y planos batimétricos. Finalmente, se evalúa la respuesta morfodinámica a largo plazo que tendría el emplazamiento de las obras costeras proyectadas.

El resultado que se obtiene es un análisis de la morfodinámica del litoral a largo plazo en la desembocadura del río San José y una aproximación de los efectos provocados por las estructuras costeras proyectadas como solución a los problemas de las crecidas de este río.