



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**Análisis y modificación de las ecuaciones de equilibrio en  
planta aplicada a cuatro playas de las zonas del norte  
chico y central de Chile.**

**Patricio Enrique Opazo Arriagada**

Junio 2012

I



**ANÁLISIS Y MODIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO EN PLANTA APLICADA  
A CUATRO PLAYAS DE LAS ZONAS DEL NORTE CHICO Y CENTRAL DE CHILE.**

Patricio Enrique Opazo Arriagada

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

Matías Quezada Labra  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

José Beyá Marshall  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Hernán Vergara Cortés  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

VIÑA DEL MAR  
Junio 2012

## **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.*

**MATÍAS QUEZADA LABRA  
PROFESOR GUÍA**

**PATRICIO OPAZO ARRIAGADA  
AUTOR**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quisiera agradecer a Dios el Señor que me abrió el camino, bajo su voluntad se concibió este documento. Agradecer y dedicar esto a mis padres que me enseñan día a día ese camino y me guiaron para recorrerlo desde un principio.*

*Agradecer mi hermana Karina a quien admiro, y a mi princesa que con su amor se ha visto completo mi corazón.*

*Quisiera agradecer a la Universidad de Valparaíso, a sus docentes, quienes aportaron en mi formación e iniciaron mi transitar por este camino, especialmente a Matías quien brindó la oportunidad de que esta investigación se hiciera realidad. A los profesores Sergio Bidart, Felipe Caselli y Patricio Winckler.*

*Quisiera agradecer a mis compañeros, con ellos aprendí que el océano no es lineal, más que eso, entendí que un mar de sonrisas es mejor que una ecuación responsable de la no linealidad. A ellos, Mauricio, Rodrigo, Juan Carlos, Eduardo, Místico, Darinka, Alejandra y El Chico.*

*El pesimista se queja  
del viento; el optimista espera que cambie; el ingeniero ajusta las velas.*

*Boccaccio Giovanni, modificada por mí.*

## CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>2</b>
1.1	MOTIVACION .....	3
1.2	CONTENIDOS DEL INFORME .....	4
<b>2</b>	<b>MARCO TEORICO</b> .....	<b>6</b>
2.1	GENERALIDADES DE LAS PLAYAS .....	6
2.1.1	CONCEPTO DE PLAYA .....	6
2.1.2	FORMACION DE PLAYAS .....	7
2.1.3	TIPOS DE PLAYAS .....	8
2.1.4	SEDIMENTACION .....	8
2.2	EVOLUCION MORFODINAMICA DE PLAYAS .....	9
2.2.1	INICIO DEL MOVIMIENTO .....	9
2.2.2	DIRECCIONES PRINCIPALES DEL TRANSPORTE EN PLAYAS .....	10
2.2.3	ESCALAS TEMPORALES .....	11
2.3	OLEAJE .....	11
2.3.1	GENERACION Y CARACTERISTICAS DEL OLEAJE .....	11
2.3.2	TEORIA DEL OLEAJE .....	12
2.3.3	METODOLOGIA DE REPRESENTACION DE LAS CONDICIONES DEL OLEAJE .....	13
2.3.4	PROPAGACION DE OLEAJE Y TRANSFERENCIA ESPECTRAL .....	15
2.3.5	PARAMETROS DEL OLEAJE EN RELACION A PROCESOS SEDIMENTARIOS .....	16
2.3.6	GENERALIDADES DEL OLEAJE EN CHILE .....	18
2.4	IMPLEMENTACION NUMERICA .....	19
2.4.1	IMPLEMENTACION NUMERICA Y TIPOS DE MODELOS .....	19
2.4.2	MODELOS DE PROPAGACION DE OLEAJE .....	20
2.4.3	MODELO STWAVE .....	20
2.5	ESTADOS DE EQUILIBRIO .....	21
2.5.1	FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PLANTA .....	22
2.5.2	FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PERFIL .....	25
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>27</b>
3.1	OBJETIVO GENERAL .....	27
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	27
<b>4</b>	<b>PLAYAS EN EQUILIBRIO SELECCIONADAS</b> .....	<b>29</b>
4.1	METODOLOGIA DE SELECCION DE PLAYA .....	29
4.2	SELECCIÓN DE PLAYAS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	30
4.2.1	PLAYA LA SERENA .....	30
4.2.2	PLAYA GUANAQUEROS .....	31
4.2.3	PLAYA TONGOY .....	31
4.2.4	BAHÍA DE QUINTERO .....	32
4.3	DOCUMENTACION DE VARIABILIDAD HISTORICA .....	33
4.3.1	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA LA SERENA .....	33
4.3.2	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA GUANAQUEROS .....	34
4.3.3	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA TONGOY .....	35
4.4	ANALISIS ESPACIO-TEMPORAL A LAS PLAYAS SELECCIONADAS .....	37
4.4.1	SET DE FOTOGRAFIAS HISTORICAS .....	37
4.4.2	ANALISIS HISTORICO DE LA LINEA DE PLAYA .....	45
<b>5</b>	<b>CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL</b> .....	<b>54</b>

5.1	OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	54
5.2	TRANSFERENCIA ESPECTRAL DE OLAJE .....	58
5.2.1	METODOLOGIA DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL.....	58
5.2.2	BATIMETRIA .....	60
5.2.3	RESULTADOS.....	62
5.3	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA LA SERENA.....	65
5.3.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	65
5.3.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	68
5.3.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	68
5.4	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA GUANAQUEROS .....	69
5.4.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	69
5.4.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	71
5.4.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	72
5.5	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA TONGOY .....	72
5.5.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	72
5.5.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	75
5.5.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	76
5.6	OLEAJE OPERACIONAL EN BAHÍA QUINTERO.....	76
5.6.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	76
5.6.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	78
5.6.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	79
<b>6</b>	<b>AJUSTE EN PLANTA.....</b>	<b>81</b>
6.1	METODOLOGIA GENERAL DE PLAYAS EN EQUILIBRIO EN PLANTA.....	81
6.2	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA LA SERENA.....	83
6.3	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA GUANAQUEROS .....	84
6.4	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA TONGOY .....	85
6.5	AJUSTE EN PLANTA PARA BAHÍA QUINTERO.....	86
6.6	RESULTADOS DEL AJUSTE EN PLANTA.....	87
<b>7</b>	<b>ANALISIS DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO PROPUESTA .....</b>	<b>92</b>
7.1	GENERALIDADES DE LAS PLAYAS Y/O BAHIAS SELECCIONADAS .....	92
7.1.1	BAHIA MEJILLONES .....	93
7.1.2	BAHIA SAN VICENTE .....	94
7.2	CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA MEJILLONES .....	95
7.2.1	APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO.....	96
7.3	CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA SAN VICENTE .....	98
7.3.1	APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO.....	98
7.4	APLICACION DE LA ECUACION EN PLAYA ARTIFICIAL .....	100
7.5	COMPARACION CON METODOLOGIAS ACTUALES.....	101
7.5.1	COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA MEJILLONES.....	101
7.5.2	COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA SAN VICENTE .....	102
7.6	RESULTADOS DEL ANALISIS A LA ECUACION PROPUESTA .....	103
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>110</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>115</b>
10.1	ECUACIONES DE GOBIERNO DE STWAVE .....	115
10.2	TABLA CON PARAMETROS GEOMETRICOS PARA CADA PLAYA .....	119
10.3	PARAMETROS GEOMETRICOS DE PLAYA ARTIFICIAL EL ENCANTO, ANTOFAGASTA .....	119



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama que representa la composición de una playa.....	7
Figura 2: Formas de Movimiento de las partículas.....	10
Figura 3: Clasificación de distintas ondas generadas en el Océano.....	12
Figura 4: Espectro Unidimensional.....	14
Figura 5: Espectro direccional de oleaje.....	14
Figura 6: Esquema de una grilla cartesiana utilizada en STWAVE.....	21
Figura 7: Regiones de una playa por efecto de la refracción y difracción del oleaje.....	24
Figura 8: Sectores de estudio de las zonas del norte chico y central de Chile.....	29
Figura 9: Forma de la planta de playa La Serena.....	30
Figura 10: Forma de la planta de playa Guanaqueros.....	31
Figura 11: Forma de la planta de playa Tongoy.....	32
Figura 12: Imagen aérea de bahía de Quintero.....	32
Figura 13: Ubicación de los sitios de estudio.....	34
Figura 14: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Guanaqueros.....	35
Figura 15: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Tongoy.....	36
Figura 16: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	37
Figura 17: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	38
Figura 18: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	38
Figura 19: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	39
Figura 20: Fotos aéreas de Playa Guanaqueros.....	39
Figura 21: Foto aéreas de Playa Guanaqueros.....	40
Figura 22: Foto aérea de Playa Tongoy.....	40
Figura 23: Foto aérea de Playa Tongoy.....	41
Figura 24: Foto aérea de Playa Tongoy.....	41
Figura 25: Foto aérea de Playa Tongoy.....	42
Figura 26: Foto aérea de Playa Tongoy.....	42
Figura 27: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	43
Figura 28: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	43
Figura 29: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	44
Figura 30: Foto aérea de Bahía Quintero.....	44
Figura 31: Cambios espacios-temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa La Serena.....	45
Figura 32: Líneas de costas históricas de playa La Serena.....	46
Figura 33: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Guanaqueros.....	47
Figura 34: Líneas de costas históricas de playa Guanaqueros.....	48
Figura 35: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Tongoy.....	49
Figura 36: Variación de línea de costa Playa Tongoy.....	50
Figura 37: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de bahía Quintero.....	51
Figura 38: Variación de línea de costa Playa Quintero.....	52
Figura 39: Gráfica general (H, T, D) del oleaje en zona central. Olas Chile III.....	54
Figura 40: Histograma de alturas del oleaje.....	56
Figura 41: Histograma de periodos del oleaje.....	56
Figura 42: Histograma de dirección del oleaje.....	57
Figura 43: Rosa de altura del oleaje.....	57
Figura 44: Rosa de periodo del oleaje.....	57
Figura 45: Rosa de energía del oleaje.....	58
Figura 46: Representación de procedimientos desarrollados en Stwave.....	59
Figura 47: Esquema de mallas utilizadas en la propagación de oleaje.....	60
Figura 48: Representación de procesamiento de la batimetría utilizada. FUENTE: Elaboración propia.....	61
Figura 49: Representación en 3-D de la batimetría utilizada. FUENTE: Elaboración propia.....	61

Figura 50: Funciones de transferencia de playa La Serena. FUENTE: Elaboración propia. ....	62
Figura 51: Funciones de transferencia de playa Guanaqueros. FUENTE: Elaboración propia. ....	62
Figura 52: Funciones de transferencia de playa Tongoy. FUENTE: Elaboración propia. ....	63
Figura 53: Funciones de transferencia de Bahía Quintero. FUENTE: Elaboración propia. ....	63
Figura 54: Resultados gráficos de trans. de oleaje a playa Tongoy. Dirección SW. FUENTE: Elaboración propia. ....	64
Figura 55: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección W. ....	64
Figura 56: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección NW. ....	64
Figura 57: Histograma de altura del oleaje. ....	66
Figura 58: Histograma de periodos del oleaje. ....	66
Figura 59: Histograma de dirección del oleaje. ....	67
Figura 60: Rosa de altura del oleaje. ....	68
Figura 61: Rosa de periodo del oleaje. ....	68
Figura 62: Rosa de potencia del oleaje en playa La Serena. ....	68
Figura 63: Histograma de altura del oleaje. ....	70
Figura 64: Histograma de periodo del oleaje. ....	70
Figura 65: Histograma de dirección del oleaje. ....	70
Figura 66: Rosa de altura del oleaje. ....	71
Figura 67: Rosa de periodo del oleaje. ....	71
Figura 68: Rosa de potencia del oleaje en playa Guanaqueros. ....	72
Figura 69: Histograma de altura del oleaje. ....	74
Figura 70: Histograma de periodos del oleaje. ....	74
Figura 71: Histograma de dirección del oleaje en Playa Tongoy. ....	74
Figura 72: Rosa de altura del oleaje. ....	75
Figura 73: Rosa de periodo del oleaje. ....	75
Figura 74: Rosa de potencia del oleaje en playa Tongoy. ....	75
Figura 75: Histograma de alturas del oleaje. ....	77
Figura 76: Histograma de periodos del oleaje. ....	77
Figura 77: Histograma de direcciones del oleaje. ....	77
Figura 78: Rosa de altura del oleaje. ....	78
Figura 79: Rosa de periodo del oleaje. ....	78
Figura 80: Rosa de potencia del oleaje en Bahía Quintero. ....	79
Figura 81: Dirección del flujo medio de energía del oleaje en cada zona de estudio. ....	83
Figura 82: Representación del cálculo de constantes geométricas de playa La Serena. ....	84
Figura 83: Cálculo de constantes geométricas de playa Guanaqueros. ....	85
Figura 84: Cálculo de constantes geométricas de playa Tongoy. ....	86
Figura 85: Cálculo de constantes geométricas de Bahía Quintero. ....	87
Figura 86: Comparación de principales constantes morfodinámica de las playas versus constantes los parámetros de playas en equilibrio de la costa española. ....	88
Figura 87: Ubicación y forma característica de Bahía Mejillones. ....	93
Figura 88: Ubicación y forma característica de Bahía San Vicente. ....	95
Figura 89: Determinación de constantes geométricas en Bahía Mejillones. ....	96
Figura 90: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la Bahía Mejillones. ....	97
Figura 91: Determinación de constantes geométricas en Bahía San Vicente. ....	98
Figura 92: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la bahía San Vicente. ....	99
Figura 93: Representación de la validación de la ecuación de equilibrio propuesta para playa Paraíso. ....	100
Figura 94: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de las zonas del norte chico y central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía Mejillones. ....	102
Figura 95: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de la zona central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía San Vicente. ....	103
Figura 96: Vectores de corriente y olas. ....	116

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Autores y características de modelos de planta de equilibrio. ....	3
Tabla 2: Relación entre granulometría, tamaño y pendiente de la playa. ....	9
Tabla 3: Clasificación de tipos de ondas generadas en el océano. ....	12
Tabla 4: Características de los modelos y estudios de la forma en planta de equilibrio. ....	22
Tabla 5: Variabilidad de la línea litoral de playa La Serena. ....	34
Tabla 6: Variabilidad de la línea litoral de playa Guanaqueros. ....	35
Tabla 7: Variabilidad de la línea litoral de playa Tongoy. ....	36
Tabla 8: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje, aguas profundas. ....	55
Tabla 9: Tabla de incidencia porcentual Periodo-Dirección del oleaje, aguas profundas. ....	55
Tabla 10: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa La Serena. ....	65
Tabla 11: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa La Serena. ....	66
Tabla 12: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Guanaqueros. ....	69
Tabla 13: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Guanaqueros. ....	69
Tabla 14: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Tongoy. ....	73
Tabla 15: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa Tongoy. ....	73
Tabla 16: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Bahía Quintero. ....	76
Tabla 17: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Bahía Quintero. ....	76
Tabla 18: Tabla de resultados de coeficientes C0, C1 y C2 para las zonas de estudio. ....	89
Tabla 19: Tabla de coeficientes a-dimensionales promediados para las cuatro zonas de estudio. ....	89
Tabla 20: Tabla de coeficientes a-dimensionales obtenidos en función de “ $\beta$ ” mediante la metodología de la parábola de HSU 1989 para las cuatro playas de estudio. ....	90
Tabla 21: Principales mediciones geométricas de Bahía Mejillones. ....	96
Tabla 22: Principales mediciones geométricas de Bahía San Vicente. ....	98
Tabla 23: Parámetros Geométricos en zonas de estudio. ....	119
Tabla 24: Estimación en playa artificial El Encanto, Antofagasta. ....	119

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Número de Froude de acuerdo a Hellermeier (1978-1981). ....	16
Ecuación 2: Profundidad activa de acuerdo a Hellermeier (1978-1981). ....	16
Ecuación 3: Profundidad activa de acuerdo a Birkemeier (1985). ....	16
Ecuación 4: Profundidad activa de acuerdo a Houston (1995). ....	17
Ecuación 5: Profundidad de cierre de la zonificación del transporte de sedimentos. ....	17
Ecuación 6: Potencia de un campo de oleaje. ....	17
Ecuación 7: Celeridad de un grupo de ondas. ....	18
Ecuación 8: Celeridad de una onda de acuerdo a T.L.O. ....	18
Ecuación 9: constante “n” de acuerdo a T.L.O. ....	18
Ecuación 10: Potencia del oleaje. ....	18
Ecuación 11: Potencia del oleaje. ....	18
Ecuación 12: Formulación de espiral logarítmica de Yaso (1965). ....	23
Ecuación 13: Formulación de la parábola de Hsu (1989). ....	23
Ecuación 14: Ecuación para determinar el ángulo alfa mínimo. ....	25
Ecuación 15: Modelo parabólico de Hsu y Evans (1989). ....	82
Ecuación 16: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile. ....	90
Ecuación 17: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile. ....	92
Ecuación 18: Parábola de Hsu. ....	101
Ecuación 19: Ecuación de dispersión en STWAVE. ....	115
Ecuación 20: Ecuación de dispersión en un sistema de referencia. ....	115

Ecuación 21: Celeridad de onda.....	115
Ecuación 22: Dirección de onda y grupo en un sistema de referencia. ....	116
Ecuación 23: Ecuación de dirección ortogonal de ola. ....	116
Ecuación 24: conservación espectral de energía. ....	116
Ecuación 25: Energía de la ola debido a difracción.....	117
Ecuación 26: Relación de rompimiento del oleaje de acuerdo al criterio de Miche (1951). ....	117
Ecuación 27: Flujo de energía que contribuye al oleaje debido al viento. ....	117
Ecuación 28: Tiempo de paso de una ola por una celda de grilla. ....	117
Ecuación 29: Representación del cambio de frecuencia espectral.....	118
Ecuación 30: Tensores de radiación 1 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 31: Tensores de radiación 2 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 32: Tensores de radiación 3 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 33: Gradientes de tensores en x e y. ....	118

## **RESUMEN**

El estudio de playas en equilibrio en Chile Central, la forma en planta de éstas y el diseño artificial, pueden presentar algunos errores en sus estimaciones debido a que los cálculos para estos estudios, se desarrollan con ecuaciones que fueron validadas en otras costas donde las características hidrodinámicas y morfológicas difieren estructuralmente de las costas chilenas.

Dadas estas diferencias, se ha llevado a cabo una investigación mediante un estudio de cuatro playas en equilibrio pertenecientes al litoral de las Zonas del Norte Chico y Central de Chile. Considerando características morfodinámicas e hidrodinámicas de cada una de las zonas de estudio, se ha propuesto una nueva ecuación que permite calcular la forma que adoptan estas playas en el largo plazo. Esta formulación puede ser una herramienta útil para ejecutar el diseño artificial de playas en equilibrio en algunos sectores del litoral central, donde las metodologías clásicas pueden presentar algunas diferencias.

Se verificó la aplicabilidad de esta ecuación de equilibrio propuesta en otras zonas geográficas de Chile, particularmente, zonas norte y sur del país, de lo cual se obtuvieron buenos resultados que permiten atribuir el uso de esta formulación como alternativa a las ecuaciones clásicas de la literatura científica.