



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO NO ESTACIONARIO DE CLIMA MEDIO DE
OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE**

Mauricio Andrés Molina Pereira

Junio 2011

APROBACIÓN

ESTUDIO NO ESTACIONARIO DE CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE

Mauricio Andrés Molina Pereira

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

MANUEL CONTRERAS LOPEZ
Profesor guía

SERGIO SALINAS MARCHANT
Docente

MAURICIO REYES GALLARDO
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 cede los derechos legales a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos, sin implicar esto algún propósito comercial o de fines de lucro, lo cual no podrá ser hecha sin la autorización expresa del autor.

Mauricio Molina Pereira
Alumno

Manuel Contreras López
Profesor guía

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a:

*Mi Señor, que utilizó mi carrera para mostrarme su amor
y este proyecto para mostrarme su fidelidad.*

*Mis padres y hermano, que en todo momento me brindaron
su apoyo incondicional.*

Mi novia, que día a día me motivó a culminar de este proyecto.

*Mis compañeros de generación Pía, Bárbara, Eduardo (Polémico),
Juan Carlos, Iván (Místico), Patricio, Rodrigo, Cristian (Chico),
que en los momentos de aprendizaje me mostraron que
uno aprende y trabaja más y mejor cuando tiene
buenos amigos como compañeros.*

*Patricio Winckler, quien me inculcó a lo largo de la carrera la pasión por la
ingeniería marítima y principalmente por el oleaje; quien también me
confió sus ayudantías, correcciones y una que otra clase.*

*Manuel Contreras, que sobrepasando sus obligaciones académicas
me ayudó de gran manera en el desarrollo y principalmente en la
culminación de este documento*

*Y a todos mis compañeros de carrera, profesores, profesionales, amigos
y familiares quienes con sus comentarios, consultas e inquietudes
de manera directa e indirecta sirvieron de ayuda y
motivación para la desarrollar este proyecto.*

Dedicado a:
Jesucristo, mi Señor y Salvador
Mauricio y Sandra, los responsables de lo que felizmente soy
José Patricio, mi compañero de crecimiento y aprendizaje
Shirley, el amor de mi vida

*Grandes son las obras del Señor
Estudiadas por los que en ellas se deleitan
Salmo 111:2 (NVI)*

CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
2	Objetivos y alcances	3
2.1	Objetivos.....	3
2.2	Alcances	3
3	Marco teórico.....	5
3.1	El oleaje	5
3.1.1	Definición del oleaje	5
3.1.2	Generación y Propagación del oleaje	6
3.1.2.1	Generación	6
3.1.2.2	Propagación oceánica: dispersión y clasificación	9
3.1.2.3	Profundidad relativa y propagación costera	10
3.1.3	Caracterización del oleaje	12
3.1.3.1	Registro de oleaje y el estado de mar	12
3.1.3.2	Análisis en el dominio del tiempo	12
3.1.3.3	Análisis en el dominio de la frecuencia	13
3.1.3.4	Estadística de oleaje.....	14
3.1.3.5	Clima Medio de oleaje	15
3.1.3.6	Clima Extremo de oleaje.....	16
3.1.4	Modelos de <i>hindcasting</i>	17
3.1.4.1	Fundamento teórico.....	17
3.1.4.2	Validación y representatividad.....	18
3.2	El oleaje en la costa central de Chile	19
3.2.1	Origen del oleaje de la costa central de Chile	19
3.2.1.1	Zonas de generación y tipología del oleaje	19
3.2.1.2	Fuente de la estadística.....	20
3.2.2	Clima medio de oleaje en la costa central de Chile (análisis tradicional)	24
3.3	El viento	31
3.3.1	Generación	31
3.3.2	Zonificación del viento.....	33
3.3.3	Viento local.....	34
3.3.4	Circulación Walker y surgencia.....	36
3.4	El fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENOS).....	39
3.4.1	Antecedentes del fenómeno	39
3.4.2	Descripción de ENOS	40
3.4.3	Caracterización de ENOS	43
3.4.4	Influencia de ENOS en el patrón de vientos	47
3.5	El Calentamiento Global.....	49

3.5.1	El efecto invernadero	49
3.5.2	Efecto ampliado de invernadero	50
3.5.3	Evidencia de calentamiento global	52
3.5.4	Proyecciones	54
3.5.5	Influencia del calentamiento global en el patrón de vientos	56
3.6	Metodología de análisis de oleaje no estacionario	57
3.6.1	Problemática del análisis tradicional.....	57
3.6.2	Hipótesis del oleaje no estacionario	58
3.6.2.1	Análisis estacionario insuficiente para caracterizar oleaje.....	58
3.6.2.2	Análisis se basa en el clima medio y se descarta el clima extremo ..	58
3.6.2.3	El oleaje puede ser representado por índices mensuales	58
3.6.2.4	La estadística es representativa solo del oleaje del Pacífico sur	59
3.6.2.5	Estadística de modelos <i>hindcasting</i> es válida para el estudio.....	59
3.6.2.6	Calentamiento Global se comporta como tendencia lineal.....	60
3.6.2.7	ENOS tiene comportamiento cíclico irregular	60
3.6.2.8	ENOS y Calentamiento Global, pueden ser independientes.....	60
3.6.2.9	El oleaje representado como modelo aditivo	61
3.6.3	El oleaje como modelo aditivo	61
3.6.4	Método para estimar influencia del Calentamiento Global en el Oleaje.....	63
3.6.5	Método para estimar influencia de ENOS en el Oleaje	64
3.6.6	Método de análisis de oleaje no estacionario.....	65
4	Resultados	69
4.1	Influencia del Calentamiento Global en el oleaje.....	69
4.2	Influencia de ENOS en el oleaje	73
4.2.1	Análisis de correlación entre los índices ENOS y parámetros de resumen	73
4.2.2	Influencia de ENOS en el oleaje utilizando índice SSTA Niño 3.4	75
4.3	Pronóstico de clima medio de oleaje con análisis no estacionario.....	81
5	Discusión	89
5.1	Discusión por Objetivos	89
5.1.1	Objetivo General: Desarrollo del estudio no estacionario de clima medio	89
5.1.2	Objetivo específico uno: Caracterización del clima medio	91
5.1.3	Objetivo específico dos: Influencia del calentamiento global en el oleaje.....	92
5.1.4	Objetivo específico tres: Influencia del ENOS en el oleaje.	94
5.1.5	Aplicación del estudio de oleaje no estacionario	98
5.2	Discusión aspectos metodológicos	101
5.2.1	Dependencia ENOS - Calentamiento Global y la validez del modelo aditivo .	101
5.2.2	Acerca de los estadígrafos que se emplean	101
5.2.3	Perfeccionamiento y usos futuros de la metodología.....	102
6	Conclusiones	103

7	Recomendaciones	107
8	Referencias	109
9	Anexos	111
9.1	Figuras	111
9.2	Tablas	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición de altura, periodo y dirección de una ola.....	5
Figura 2. Clasificación de ondas según su periodo.	6
Figura 3. Proceso de generación de una onda por presión de viento.	7
Figura 4. Formación de tipos de oleaje según características de generación.....	7
Figura 5. Crecimiento del oleaje por viento según duración (a) y longitud (a) de <i>fetch</i>	8
Figura 6. Dispersión direccional y radial del oleaje.	9
Figura 7. Oleaje tipo <i>Swell</i> (a) y <i>Sea</i> (b).	10
Figura 8. Profundidades relativas del oleaje.....	10
Figura 9. Descripción de fenómenos perturbadores del oleaje.	11
Figura 10. Registro de oleaje y su caracterización.	12
Figura 11. Descripción de teoría de superposición de ondas.....	13
Figura 12. Espectro de energía de oleaje.....	14
Figura 13. Herramientas gráficas y estadísticas que describen el clima medio de oleaje.	15
Figura 14. Ejemplo selección datos extremos de una serie (a) y ajuste de distribución (b).	16
Figura 15. Trazado de grilla para un modelo <i>hindcasting</i>	18
Figura 16. Propagación del <i>swell</i> norte y sur que llegan a la cuarta región (Latitud 31°S).....	19
Figura 17. Espectros típicos de la costa central de Chile.	20
Figura 18. Línea de tiempo de altimetría satelital utilizada y de oleaje disponible.....	21
Figura 19. Correlación entre altimetría satelital proyecto Topex y mediciones con boya (a) y los puntos con estadística de oleaje calibrada (b).	21
Figura 20. Ubicación de estadística disponible y representatividad latitudinal.....	22
Figura 21. Probabilidad de Ocurrencia y frecuencia relativa por parámetro y nodo.	25
Figura 22. Rosa altura significativa <i>versus</i> dirección <i>peak</i> y media.	29
Figura 23. Rosa periodo <i>peak versus</i> dirección <i>peak</i> y periodo medio <i>versus</i> dirección media.....	30
Figura 24. Esquematación de la circulación atmosférica global. Arriba: idealización de circulación en un planeta sin continentes. Abajo: vista de la circulación latitudinal.	32
Figura 25. Mapa de la velocidad media anual del viento y de la presión superficial en 1989.....	33
Figura 26. Posición del anticiclón del Pacífico sur (A) y las rutas de las depresiones (D) en Enero (a) y Julio (b).	34
Figura 27. Generación de los vientos entre el anticiclón y una depresión en el hemisferio sur.....	35
Figura 28. Evolución de <i>fetch</i> entre sistemas de alta y baja presión que genera oleaje local.	36
Figura 29. Acción de vientos alisios en el Pacífico ecuatorial.	37
Figura 30. Diagrama esquemático simplificado de la circulación atmosférica ecuatorial como la circulación de aire en una habitación cerrada.....	37
Figura 31. Ciclo de nutrientes en un sistema de surgencia costero idealizado (a) y principales regiones de surgencia costera del mundo con los sistemas de alta presión atmosférica que los influyen (b).	38
Figura 32. Modelo de propagación de ondas Kelvin y Rossby.....	41
Figura 33. Modelo de convección, temperatura y surgencia, en condición Niño, Media y Niña.	42
Figura 34. Cuadrantes que definen los índices ENOS de anomalía de temperatura.....	43
Figura 35. Variación de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, que define al índice IOS.	44
Figura 36. Índices que describen ENOS, en rojo eventos Niño (fase cálida) y azul eventos Niña (fase fría).	45
Figura 37. Ocurrencia histórica mensual de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 (60 años) con desviaciones estándar asociadas a cada mes.	46
Figura 38. Ocurrencia de eventos ENOS en el intervalo de estadística de oleaje disponible.	47
Figura 39. Diagrama Latitud-Tiempo de la anomalía de la componente zonal del viento (m/s)	48
Figura 40. Esquema descriptivo del efecto invernadero.....	49
Figura 41. Concentraciones atmosféricas mundiales de tres gases de efecto invernadero.	50
Figura 42. Balance anual de la energía en la Tierra.....	51

Figura 43. Temperatura media del planeta entre 1880 y 2000.	52
Figura 44. Derretimiento del glaciar Uspala (Argentina) de 1928 a 2004.	53
Figura 45. Derretimiento glaciar Viedma (Argentina) de 1930 a la actualidad.	53
Figura 46. Evolución de la anomalía anual de la superficie de hielo en el hemisferio norte.	53
Figura 47. Escenarios de emisiones de GEI de 2000 a 2100 y proyecciones de la temperatura.	54
Figura 48. Cambios de temperatura superficial mundial proyectados para finales del siglo XXI (2090-2099) respecto al periodo 1980-1999 para el escenario A1B.	55
Figura 49. Vientos y presiones medias entre septiembre y febrero para la condición base (a) y su diferencia respecto al escenario A2 (b).	56
Figura 50. Esquema de comparación de índice GLOTI con parámetros.	63
Figura 51. Esquema determinación influencia de ENOS en el oleaje.	65
Figura 52. Diagrama cálculo de parámetro mensual incorporando influencia no estacionaria.	67
Figura 53. Diagrama de ejecución del estudio no estacionario.	68
Figura 54. Tendencia del promedio mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI.	71
Figura 55. Tendencia de la desviación estándar mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI.	72
Figura 56. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía del promedio mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro.	78
Figura 57. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía de la desviación estándar mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro.	79
Figura 58. Dispersión entre anomalía mensual por parámetro y las fases de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 en el Nodo 35°S.	80
Figura 59. Valor medio con banda de una desviación estándar para cada parámetro y nodo en la condición estacionaria y las proyectadas de 25 años para cada fase de ENOS.	87
Figura 60. Promedio y desviación estándar total, anual y mensual de la dirección <i>peak</i> en el nodo 35°S.	90
Figura 61. Influencia general de ENOS y Calentamiento Global en el oleaje.	98
Figura 62. Diagrama de resultados del estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile.	100
Figura 63. Puntos de calibración del modelo ECMWF WAM en la costa central de Chile (nodos 31°S y 37°S), los <i>tracks</i> de altimetría satelital utilizados y los ajustes asociados.	111
Figura 64. Temperatura media del planeta con filtro triangular de 5 años entre 1880 y 2010 (arriba) y detalle del lapso de interés entre 1985 y 2007 con tendencia lineal (abajo).	112
Figura 65. Series de índices que describen ENOS, contemporánea a la estadística de oleaje.	113
Figura 66. Comparación entre índices SSTA Niño 3.4 y GLOTI.	114
Figura 67. Promedios por parámetro y nodo para los meses normales según SSTA Niño 3.4 y los números de meses normales considerados.	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo (días) de propagación de una ola entre zona de generación y la costa central de Chile.	20
Tabla 2. Principales estadígrafos por parámetro y nodo.	26
Tabla 3. Correlación entre los 4 nodos para cada parámetro de oleaje.	27
Tabla 4. Correlaciones entre los índices ENOS.	46
Tabla 5. Frecuencia del <i>Swell</i> NW en cada nodo.	59
Tabla 6. Valores medios y variaciones anuales por parámetro δCG	69
Tabla 7. Variación de la media del parámetro en los 22 años de la estadística.	70
Tabla 8. Proporción entre variación de 22 años y rango de valores de la serie.	70
Tabla 9. Correlaciones entre los índices de ENOS y los promedios mensuales y desviaciones estándar mensuales para cada parámetro y nodo.	73
Tabla 10. Promedio de correlaciones absolutas por índices.	74
Tabla 11. Promedio correlaciones absolutas de fases Niño y Niña de ENOS para el índice SSTA Niño 3.4 según parámetro y nodo.	74
Tabla 12. Variación de un parámetro por unidad de índice de ENOS.	76
Tabla 13. Proporción de variaciones de parámetro por unidad de índice de ENOS y rango de valores de la serie mensual respectiva.	77
Tabla 14. Media de los efectos de ENOS ($\Delta ENOS$) en la estadística (a) y su proporción respecto al rango de la serie (b).	77
Tabla 15. Valores medios por parámetro y nodo de la estadística (P) y en condición estacionaria (P).	81
Tabla 16. Variaciones por Calentamiento Global ($\Delta CG *$) en horizonte de 25 años (a) y su proporción respecto a rango de la serie (b).	82
Tabla 17. Variaciones por condiciones extremas de ENOS ($\Delta ENOS *$) para fase Niño (a) y Niña (b) con sus proporciones respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.	83
Tabla 18. Proyecciones de parámetros ($P *$) en horizonte 25 años para las tres fases de ENOS en condiciones extremas.	84
Tabla 19. Variación respecto a condición estacionaria de la proyección de 25 años con Niño (a) y Niña (b) extremo y su proporción respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.	85
Tabla 20. Valores asociados a una probabilidad de ocurrencia para cada nodo y parámetro.	117
Tabla 21. Frecuencias relativas asociadas a cada parámetro y nodo.	118
Tabla 22. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> periodo <i>peak</i> para todos los nodos.	119
Tabla 23. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> periodo medio para todos los nodos.	120
Tabla 24. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> dirección <i>peak</i> para todos los nodos.	121
Tabla 25. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> dirección media para todos los nodos.	122
Tabla 26. Tablas de frecuencia dirección <i>peak versus</i> periodo <i>peak</i> para todos los nodos.	123
Tabla 27. Tablas de frecuencia dirección media <i>versus</i> periodo medio para todos los nodos.	124
Tabla 28. Valores máximos y mínimos de las series mensuales de cada parámetro (a) y diferencia entre máximos y mínimos (rango) de cada serie (b).	125

RESUMEN

El oleaje, fenómeno generado por el viento trascendente en la ingeniería marítima, es supuesto por simplicidad como estacionario, es decir, que las características presentes en una estadística no variarían en el tiempo, haciéndola representativa de la condición futura. Evidencias encontradas sobre las influencias de los fenómenos (no estacionarios) El Niño – Oscilación Sur (ENOS) y Calentamiento Global en los patrones de viento (Garreaud y Falvey 2008, Avaria *et al.* 2004) permiten suponer que el oleaje es en realidad no estacionario.

Esto conduce a buscar una metodología que permita incorporar las influencias de estos fenómenos en los estudios de clima medio de oleaje para obtener pronósticos con mayor certidumbre. Los resultados encontrados indican la presencia de variaciones en el oleaje relacionados con ambos fenómenos en los promedios y desviaciones estándar mensuales de los parámetros de altura significativa, periodo *peak*, periodo medio, dirección *peak* y dirección media en la estadística de 20 años de parámetros de resumen en 4 puntos de la costa central de Chile en las latitudes 31°S, 35°S, 37°S y 39°S (desde la IV a la XIV región exceptuando la V).

Se obtienen las condiciones base de oleaje a partir de un estudio de oleaje tradicional y luego se simulan las características del oleaje bajo tres escenarios de ENOS en el futuro: Niño extremo, normal y Niña extrema en el año 2031, usando el índice SSTA Niño 3.4. Se estima que las condiciones futuras (año 2031) del clima medio de oleaje en condición normal de ENOS presentarían variaciones de hasta +0,22 [m] en la altura de ola, hasta +0,7 [s] en los periodos y hasta -22,6° en las direcciones respecto a las condiciones medias actuales (8,7%, 5,8% y 9,5% respectivamente), mientras que en condiciones extremas de ENOS se presentarían variaciones de hasta +0,42 [m] en la altura, hasta +0,7 [s] en los periodos y hasta -28,17° en las direcciones (16,9%, 5,9% y 12,3% respectivamente).

ABSTRACT

In the conventional design of maritime works, wind waves are usually supposed to be statistically stationary, i.e. wave parameters are assumed to have a constant behavior in statistical sense, during the lifetime. However, recent studies (Garreaud & Falvey 2008, Avaria *et al.* 2004) indicate that large scale climate phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Global Warming may affect winds and therefore the wave patterns.

A methodology incorporating long-term fluctuations of the mean wave climate is proposed herein. The methodology was applied to 20-year statistical wave parameters in 4 nodes off the central coast of Chile (31°S, 35°S, 37°S and 39°S). Results of the historical dataset indicate the presence of long term fluctuations in the relevant wave parameters (i.e. monthly averages and standard deviations of the significant height, peak period, mean period, peak direction and mean direction).

Once a model to characterize the long term fluctuations was obtained, 3 ENSO scenarios derived on the SSTA Niño 3.4 index were used to forecast the wave parameters in a 20 years horizon (2031): extreme Niño, normal and extreme Niña. These scenarios were compared to an estimation considering statistically stationary behavior of the data. The forecast indicated that mean wave climate in the normal ENSO conditions would present increments of 0.22 [m] in the wave height, 0.7 [s] in the periods and deviations of -22.6 in the directions when compared to the stationary model (8.7%, 5.8% and 9.5% respectively). In extreme ENSO conditions, the increments in significant height are of 0.42 [m] and of 0.7 [s] in periods. The direction chance -28.17° (16.9% 5.9% and 12.3% respectively).