



Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**Caracterización probabilística del oleaje en aguas
someras en el litoral continental de Chile central.**

Claudia Pizarro Silva

Abril 2020

APROBACIÓN

CARACTERIZACIÓN PROBABILÍSTICA DEL OLEAJE EN AGUAS SOMERAS EN EL LITORAL CONTINENTAL DE CHILE CENTRAL.

Claudia Silvana Pizarro Silva

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Matías Quezada Labra
Profesor guía.

Patricio Winckler Grez
Integrante comisión

Manuel Contreras López
Integrante comisión

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.

Claudia Pizarro Silva

Alumno

Matías Quezada Labra

Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

Mis primeras palabras van dirigidas a las personas que hicieron esto posible: a mis padres Jaime Luis Pizarro Silva y Teresa del Carmen Silva Torrealba. Gracias por apoyarme en todas las etapas importantes y servir de pilar fundamental en mi vida. Quisiera agradecer también a mis hermanos Francesca y Freddy por siempre ayudarme y darme el empujón que necesitaba en momentos de angustia. En general a toda mi familia Silva, tíos, primos y sobrinos que siempre confiaron, apoyaron mis logros y fracasos. Gracias a mis tatas Enrique Silva Silva, Teresa del Carmen Torrealba Reyes y Elsa Inés Silva Esquivel que me cuidan desde el lugar más hermoso el cielo.

Agradecer profundamente, especial e infinitamente a mi familia Correa Pizarro, en especial a mi pareja de vida Sebastián Omar Correa Araya por su apoyo, tolerancia, compañía y amor en estos 13 años. En especial a mi hijo Joaquín que transformó la base esencial de mi vida y alegra mi corazón.

Quisiera también dar las gracias a mi profesor guía Matías Quezada Labra, por su apoyo y constantes palabras de motivación, además del tiempo dedicado en escuchar y aconsejarme. Un ejemplo a seguir.

Por supuesto quiero agradecer al académico José Beya, a los profesionales Cristián Espejo Ingeniero Civil Oceánico y Fernando Landeta Ingeniero Civil por la ayuda brindada en momentos de dificultad.

Especialmente quiero agradecer al académico Felipe Caselli Ingeniero Civil, de manera cariñosa, por confiar, escuchar y aconsejar en el camino recorrido durante mi carrera profesional.

Como no nombrar a mis amigos (compañeros de U) que me aconsejaban, ayudaban a despejar la cabeza en momentos de estrés. Por sus palabras de apoyo, Rodrigo Campos, Jazmín Lúes, Adolfo Andaur, Eduardo Sánchez y Miguel Aquea.

**“No triunfa quien no tubo momentos difíciles.
Triunfa aquel que paso por ellos, luchó y no se rindió”**

CONTENIDO

1	Resumen	17
2	Introducción.....	19
3	Objetivos	21
3.1	Objetivo general.....	21
3.2	Objetivos específicos.....	21
4	Alcances.....	22
5	Fundamento teórico	23
5.1	Oleaje	23
5.1.1	<i>Transformación del oleaje.....</i>	<i>26</i>
5.1.2	<i>Análisis del oleaje.....</i>	<i>29</i>
5.2	Distribuciones estadísticas del oleaje	42
5.2.1	<i>Distribución de las desnivelaciones</i>	<i>42</i>
5.2.2	<i>Distribución de alturas de ola.....</i>	<i>44</i>
5.2.3	<i>Distribución de los períodos.....</i>	<i>48</i>
5.3	Relación altura significativa estadística versus altura espectral	49
5.4	Instrumento de medición.....	50
6	Metodología	53
6.1	Área de estudio.....	53
6.2	Datos disponibles	56
6.3	Metodología de análisis	57
6.3.1	<i>Procesamiento de datos ADCP</i>	<i>61</i>
6.3.2	<i>Control de calidad.....</i>	<i>61</i>
6.3.3	<i>Análisis de datos.....</i>	<i>69</i>
7	Resultados	84
7.1	Control de calidad.....	84
7.2	Análisis de datos.....	86
7.2.1	<i>Análisis de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas.</i>	<i>86</i>
7.2.2	<i>Determinación y comparación de parámetros de resumen.</i>	<i>92</i>
7.2.3	<i>Análisis de alturas de ola</i>	<i>95</i>
7.2.4	<i>Análisis de períodos</i>	<i>128</i>
7.2.5	<i>Análisis de la relación entre altura significativa versus altura espectral.....</i>	<i>132</i>
8	Análisis de resultados y discusiones.....	134
8.1	Análisis de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas.	134

8.2	Comparación de parámetros obtenidos mediante Wavesmon y código propio.	134
8.3	Análisis de alturas de ola	139
8.3.1	<i>Forma general</i>	139
8.3.2	<i>Por naturaleza</i>	141
8.4	Análisis de períodos de ola	143
8.5	Análisis relación altura significativa estadística versus altura espectral.....	145
9	Conclusiones	146
10	Referencias bibliográficas y otras fuentes de información	148
11	Anexo.....	151
11.1	Análisis de datos.....	151
11.1.1	<i>Iquique</i>	151
11.1.2	<i>Obispo</i>	158
11.1.3	<i>La Serena</i>	164
11.1.4	<i>Quintero</i>	171
11.1.5	<i>Punta Loros</i>	177
11.1.6	<i>Topocalma</i>	184
11.1.7	<i>Constitución</i>	190
11.1.8	<i>Punta Lavapié</i>	197
11.1.9	<i>Tucapel</i>	203
11.1.10	<i>Punta Morhuilla</i>	209
11.1.11	<i>Galera</i>	216
11.2	Análisis de períodos	223
11.3	Análisis relación altura significativa estadística versus altura espectral.....	229

LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1: Nomenclatura básica del oleaje.	24
Figura 5-2: Oleaje tipo Sea (Izquierda) y oleaje tipo Swell (derecha)	25
Figura 5-3: Zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas.....	26
Figura 5-4: Transformación del oleaje editado por el autor.	27
Figura 5-5: Tipos de rotura.....	28
Figura 5-6: Definición de parámetros de olas para un estado de mar aleatorio.	29
Figura 5-7: Discretización de un registro por método de paso ascendentes por cero.....	30
Figura 5-8: Discretización de un registro por método de paso descendentes por cero.....	30
Figura 5-9: Discretización de un registro por método distancia entre crestas.....	31
Figura 5-10: Discretización de un registro por método distancia entre valles.	31
Figura 5-11: Espectro multidireccional del oleaje creado en Matlab.	33
Figura 5-12: Estructura de oleaje aleatorio adaptado.	34
Figura 5-13: Ejemplo de rosas de oleaje altura (izquierda) y período (derecha).....	40
Figura 5-14: Función de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada Normal de las desnivelaciones instantáneas.	43
Figura 5-15: ADCP “Sentinel” de Teledyne RD Instrument	50
Figura 5-16: Especificaciones técnicas ADCP “Sentinel” de Teledyne RD Instrument	51
Figura 5-17: Software Wavesmon de Teledyne RD Instrument.....	52
Figura 6-1: Mapa de posiciones de ADCPs	53
Figura 6-2: Acercamiento y descripción de ADCPs.....	54
Figura 6-3: Acercamiento y descripción de ADCPs.....	55
Figura 6-4: Diagrama de flujo metodología	58
Figura 6-5: Diagrama de caja software Matlab.....	60
Figura 6-6: Desnivelación con errores en la medición.....	62
Figura 6-7: Valores inexistentes en la medición.	63
Figura 6-8: Distribución de probabilidad alrededor de la media.....	64
Figura 6-9: Filtro de datos anómalos de la serie de desnivelaciones. La serie bruta de desnivelación se presenta en color verde y la serie corregida sin los valores anómalos es de color azul. Las líneas de color rojo representan los porcentajes de casos: línea recta al 68.28%, línea segmentada al 95.45%, y línea punteada-segmentada 99.73% de los datos contenidos dentro de la normalidad de la serie de desnivelaciones.	65
Figura 6-10: Ejemplo corrección del nivel medio de la desnivelación	66
Figura 6-11: Ejemplo tendencia de la serie desnivelación.....	66
Figura 6-12: Ejemplo corrección parabólica de la serie desnivelación.....	67
Figura 6-13: Ejemplo selección de transductor	68
Figura 6-14: Método gráfico de los papeles probabilísticos (modificado) para la estimación de funciones de distribución. (Fuente: Sampedro, 2009).....	70
Figura 6-15: Ejemplo de coeficientes μ de distribución Normal.	70
Figura 6-16: Ejemplo de coeficientes σ de distribución Normal.....	71
Figura 6-17: Ejemplo Análisis desnivelaciones con ajuste lineal, ecuación de la recta y coeficiente de determinación.	72
Figura 6-18: Ejemplo coeficiente A del ajuste lineal	72
Figura 6-19: Ejemplo coeficiente B del ajuste lineal	73
Figura 6-20: Ejemplo ajuste 45° y la suma de errores al cuadrado	74

Figura 6-21: Ejemplo función de densidad de distribución Normal versus histograma de los datos de campo.....	74
Figura 6-22: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab	77
Figura 6-23: Experimento en canal de olas, para una pendiente 1:100 en aguas someras a diferentes puntos de control.	78
Figura 6-24: Ejemplo función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo.....	80
Figura 6-25: Medidas de apuntalamiento o curtosis.	81
Figura 6-26: Ejemplo análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975.	82
Figura 7-1: Coeficiente μ de la función de distribución Normal.....	87
Figura 7-2: Coeficiente σ de la función de distribución Normal	87
Figura 7-3: Función de densidad de distribución Normal versus histograma de los datos de campo, 1=Iquique, 2=Quintero,3=Galera.....	91
Figura 7-4: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab en Quintero.....	94
Figura 7-5: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab en Tucapel.....	94
Figura 7-6: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh	96
Figura 7-7: Coeficiente a de la función de distribución Weibull	97
Figura 7-8: Coeficiente b de la función de distribución Weibull	97
Figura 7-9: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Iquique.....	103
Figura 7-10: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Quintero.....	104
Figura 7-11: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Galera.....	105
Figura 7-12: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh	107
Figura 7-13: Coeficiente a de la función de distribución Weibull	108
Figura 7-14: Coeficiente b de la función de distribución Weibull.....	108
Figura 7-15: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Iquique.	114
Figura 7-16: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Quintero.	115
Figura 7-17: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Punta Morhuilla	116
Figura 7-18: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh	118
Figura 7-19: Coeficiente a de la función de distribución Weibull	119
Figura 7-20: Coeficiente b de la función de distribución Weibull.....	119
Figura 7-21: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Iquique	125
Figura 7-22: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Quintero	126
Figura 7-23: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Galera	127
Figura 7-24: Análisis de períodos distribución de Bretschneider 1959, período variable	128
Figura 7-25: Análisis de distribución de períodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Iquique, Quintero, Galera.....	131

Figura 7-26: Ecuación de Thompson and Vincent Obispo.....	132
Figura 8-1: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique y Galera.	135
Figura 8-2: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique. ..	136
Figura 8-3: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique. ..	137
Figura 8-4: Diferencias de la distribución Rayleigh y distribución Weibull versus distribución de los datos en Galera.....	142
Figura 8-5: Análisis de distribución de períodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma....	143
Figura 8-6: Análisis de distribución de períodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Constitución, Lavapié Punta Tucapel, Punta Morhuilla y Galera. ...	144
Figura 11-1: Selección de transductor.....	151
Figura 11-2: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB Iquique	152
Figura 11-3: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	152
Figura 11-4: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	153
Figura 11-5: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	153
Figura 11-6: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	154
Figura 11-7: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	154
Figura 11-8: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh... ..	155
Figura 11-9: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull.....	155
Figura 11-10: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	156
Figura 11-11: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	156
Figura 11-12: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull.	157
Figura 11-13: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	157
Figura 11-14: Selección de transductor.....	158
Figura 11-15: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB Obispo	158
Figura 11-16: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	159
Figura 11-17: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	159
Figura 11-18: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	160
Figura 11-19: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	160
Figura 11-20: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	161
Figura 11-21: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.	161
Figura 11-22: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull... ..	162
Figura 11-23: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	162
Figura 11-24: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	163
Figura 11-25: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull.	163
Figura 11-26: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	164

Figura 11-27: Selección de transductor.....	164
Figura 11-28: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	165
Figura 11-29: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	165
Figura 11-30: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	166
Figura 11-31: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.....	166
Figura 11-32: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	167
Figura 11-33: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	167
Figura 11-34: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh..	168
Figura 11-35: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	168
Figura 11-36: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	169
Figura 11-37: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	169
Figura 11-38: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull..	170
Figura 11-39: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	170
Figura 11-40: Selección de transductor.....	171
Figura 11-41: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	172
Figura 11-42: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	172
Figura 11-43: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.....	173
Figura 11-44: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	173
Figura 11-45: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	174
Figura 11-46: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh..	174
Figura 11-47: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	175
Figura 11-48: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	175
Figura 11-49: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	176
Figura 11-50: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull..	176
Figura 11-51: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	177
Figura 11-52: Selección de transductor.....	177
Figura 11-53: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	178
Figura 11-54: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	178
Figura 11-55: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	179
Figura 11-56: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.....	179
Figura 11-57: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	180
Figura 11-58: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	180
Figura 11-59: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh..	181
Figura 11-60: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	181

Figura 11-61: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	182
Figura 11-62: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	182
Figura 11-63: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	183
Figura 11-64: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	183
Figura 11-65: Selección de transductor.....	184
Figura 11-66: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	184
Figura 11-67: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	185
Figura 11-68: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	185
Figura 11-69: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.....	186
Figura 11-70: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	186
Figura 11-71: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	187
Figura 11-72: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh..	187
Figura 11-73: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	188
Figura 11-74: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	188
Figura 11-75: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	189
Figura 11-76: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	189
Figura 11-77: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	190
Figura 11-78: Selección de transductor.....	190
Figura 11-79: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	191
Figura 11-80: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	191
Figura 11-81: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	192
Figura 11-82: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh.....	192
Figura 11-83: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	193
Figura 11-84: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	193
Figura 11-85: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh..	194
Figura 11-86: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	194
Figura 11-87: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	195
Figura 11-88: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	195
Figura 11-89: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	196
Figura 11-90: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	196
Figura 11-91: Selección de transductor.....	197
Figura 11-92: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	197
Figura 11-93: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	198

Figura 11-94: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	198
Figura 11-95: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	199
Figura 11-96: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	199
Figura 11-97: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	200
Figura 11-98: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh ..	200
Figura 11-99: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull...	201
Figura 11-100: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	201
Figura 11-101: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	202
Figura 11-102: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	202
Figura 11-103: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	203
Figura 11-104: Selección de transductor.....	203
Figura 11-105: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	204
Figura 11-106: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	204
Figura 11-107: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	205
Figura 11-108: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	205
Figura 11-109: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	206
Figura 11-110: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	206
Figura 11-111: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull .	207
Figura 11-112: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	207
Figura 11-113: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	208
Figura 11-114: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	208
Figura 11-115: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	209
Figura 11-116: Selección de transductor.....	209
Figura 11-117: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	210
Figura 11-118: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	210
Figura 11-119: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	211
Figura 11-120: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	211
Figura 11-121: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	212
Figura 11-122: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	212
Figura 11-123: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	213
Figura 11-124: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull .	213
Figura 11-125: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	214
Figura 11-126: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	214
Figura 11-127: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	215

Figura 11-128: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	215
Figura 11-129: Selección de transductor.....	216
Figura 11-130: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB	216
Figura 11-131: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal	217
Figura 11-132: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	217
Figura 11-133: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	218
Figura 11-134: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	218
Figura 11-135: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	219
Figura 11-136: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	219
Figura 11-137: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull .	220
Figura 11-138: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado	220
Figura 11-139: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh	221
Figura 11-140: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull	221
Figura 11-141: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado	222
Figura 11-142: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,2.....	223
Figura 11-143: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,4.....	223
Figura 11-144: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,6.....	224
Figura 11-145: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,8.....	224
Figura 11-146: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 1	225
Figura 11-147: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,2.....	226
Figura 11-148: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,4.....	226
Figura 11-149: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,6.....	227
Figura 11-150: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,8.....	227
Figura 11-151: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 1.....	228
Figura 11-152: Ecuación de Thompson y Vincent Iquique	229
Figura 11-153: Ecuación de Thompson y Vincent La Serena.....	229
Figura 11-154: Ecuación de Thompson y Vincent Quintero	230
Figura 11-155: Ecuación de Thompson y Vincent Punta Loros.....	230
Figura 11-156: Ecuación de Thompson y Vincent Topocalma	231
Figura 11-157: Ecuación de Thompson y Vincent Constitución.....	231
Figura 11-158: Ecuación de Thompson y Vincent Lavapié.....	232
Figura 11-159: Ecuación de Thompson y Vincent Tucapel	232

Figura 11-160: Ecuación de Thompson y Vincent Morhuilla.....	233
Figura 11-161: Ecuación de Thompson y Vincent Galera	233

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1: Clasificación y energía relativa de las ondas del océano según su período. ...	23
Tabla 5-2: Parámetros del oleaje	32
Tabla 5-3: Parámetros espectrales del oleaje	39
Tabla 5-4: Ejemplo tabla de incidencia dirección versus altura del Puerto de Valparaíso .	40
Tabla 6-1: Ficha técnica.....	56
Tabla 7-1: Selección del transductor.....	84
Tabla 7-2: Coeficientes promedios de función de distribución Normal	86
Tabla 7-3: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.....	88
Tabla 7-4: Resumen resultados del análisis de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas.....	90
Tabla 7-5: Diferencia entre parámetros.....	92
Tabla 7-6: Diferencia porcentuales entre parámetros y grafico comparativo para cada localidad.....	93
Tabla 7-7: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull.....	95
Tabla 7-8: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.....	98
Tabla 7-9: Resumen resultados del análisis de alturas de ola de la forma general.	101
Tabla 7-10: Resumen resultados del análisis de alturas de ola de la forma general para ajuste perfecto.....	102
Tabla 7-11: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull oleaje tipo <i>Sea</i>	106
Tabla 7-12: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.....	109
Tabla 7-13: Resumen resultados del análisis de alturas de olas <i>Sea</i>	112
Tabla 7-14: Resumen resultados del análisis de alturas de olas <i>Sea</i> para ajuste perfecto.	113
Tabla 7-15: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull oleaje tipo <i>Swell</i>	117
Tabla 7-16: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.....	120
Tabla 7-17: Resumen resultados del análisis de alturas de olas <i>Swell</i>	123
Tabla 7-18: Resumen resultados del análisis de alturas de olas <i>Swell</i> para ajuste perfecto.	124
Tabla 7-19: Resumen resultados del análisis de períodos.	130
Tabla 7-20 : Resumen coeficientes del análisis de la ecuación de relación $H_s H_{mo}$	133
Tabla 8-1 : Resumen análisis de alturas de ola en forma general.	134
Tabla 8-2 : Promedios análisis de alturas de ola en forma general.	140
Tabla 8-3 : Ecuaciones Rayleigh y Weibull forma general propuestas.	141
Tabla 8-4 : Promedios análisis de alturas de ola por tipo de oleaje.....	142

1 RESUMEN

La altura de ola es un factor relevante en el diseño de estructuras que interactúan con el mar, ya sea en la costa o fuera de ella. En aguas someras, diversas ecuaciones para el diseño de obras marítimas asumen que la distribución de las alturas del oleaje es del tipo Rayleigh y de esta manera simplifican el problema, a pesar de que publicaciones recientes de Mai, et. al (2010) y Battjes & Janssen (1978) han indicado que esta distribución de probabilidad no siempre se ajusta de manera adecuada en el comportamiento estadístico de las alturas de olas.

Los estudios de distribución de probabilidad de los parámetros de resumen del oleaje, tanto para la altura como el período, usualmente son obtenidos mediante ensayos en modelos físicos y en la mayoría de las investigaciones, no reflejan de manera íntegra las características del oleaje en las costas Chilenas. De esta manera, surge una brecha en el conocimiento de esta materia, lo que conduce a realizar una caracterización probabilística del oleaje en aguas someras, basada en datos de campo en diversas ubicaciones a lo largo del litoral chileno.

Para conocer las características estadísticas del oleaje a lo largo de la costa chilena, se analizaron datos de campo proveniente de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas (entre otros parámetros) de 11 localidades de Chile central, con más de 10 000 estados de mar y un total de 23 605 248 datos.

Toda la información recopilada en campo se adquiere mediante la utilización de instrumentos tipo *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), los cuales fueron fondeados en distintos puntos de la costa chilena por terceros. Esto permitió conocer las condiciones de oleaje entre los años 2012 y 2017, en la franja litoral comprendida entre las regiones de Tarapacá y Los Lagos a una profundidad entre 11 a 21 metros.

Las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas tuvieron una duración de 20 a 30 minutos, con estados de mar cada 3 horas durante 30 días en algunos casos, mientras que en otros de 60 a 90 días. Estas series de tiempo fueron procesadas mediante un algoritmo matemático de diseño propio creado en el software Matlab, obteniendo alturas, períodos y espectros del oleaje, entre otros parámetros de interés para el autor. Esto permitió desarrollar diversas actividades a lo largo del presente estudio, entre las cuales se destacan las siguientes:

- Análisis estadístico de las desnivelaciones instantáneas, mediante la comparación de la distribución de probabilidad Normal.
- Análisis estadístico de las alturas de oleaje, mediante la comparación de las distribuciones de probabilidad de Rayleigh y Weibull.
- Análisis estadístico de los períodos de oleaje, mediante la distribución de probabilidad de Bretschneider.
- Análisis comparativo entre la distribución de probabilidad de datos registrados de altura de oleaje con la ecuación de Thompson y Vincent.

A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que para el análisis de las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, la aplicabilidad de la distribución de probabilidad Normal o Gaussiana no se ajusta a todos los datos obtenidos en campo.

La mejor distribución que presenta las alturas de ola en Chile, es la distribución Weibull. Sin embargo, la distribución Rayleigh también representa de manera adecuada las alturas, aunque con un menor grado de correlación.

Por otra parte, los períodos analizados de las olas en Chile no son caracterizados de manera correcta por la distribución de períodos de Bretschneider. Esto se debería a que, la distribución de probabilidad fue diseñada para condiciones de oleaje en aguas profundas y para oleaje que difiere de las condiciones de generación propias de la franja litoral estudiada.

Finalmente, al asociar la ecuación planteada por Thompson y Vincent, que relaciona la altura significativa estadística versus la altura espectral de olas, se verificó que esta no ajusta de buena manera los datos de campo y fue necesario corregirla. Esto ha llevado a proponer una nueva formulación, la cual se presenta a continuación:

$$\left(\frac{H_s}{H_{mo}}\right) = \exp\left(1.8208\left(\frac{h}{gTp^2}\right)^{-(-2.4658)}\right)$$