



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:

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

2 INTRODUCCIÓN

Uno de los fenómenos más importantes en el diseño de proyectos ubicados en la costa, es el oleaje. La geometría, métodos constructivos y operatividad de obras costeras se encuentran condicionadas por las características típicas del oleaje en un determinado sitio de interés (CIRIA, CUR & CETMEF, 2007).

Para entender este fenómeno, debemos saber que el oleaje generado por el viento en la superficie del océano se propaga hacia la costa con períodos entre 3 a 30 segundos (Holthuijsen, 2007). Otros mecanismos generadores de ondas gravitacionales en el océano pueden ser: erupciones volcánicas submarinas, movimientos del sistema del sol-tierra-luna, explosiones, movimiento de cuerpos flotantes y sumergidos, movimientos del suelo marino y desprendimientos de glaciares y laderas (Beyá et. al., 2016). Sin embargo, dichas oscilaciones del mar no son de relevancia para el estudio que se está presentando.

El oleaje se puede clasificar en dos tipos según su zona de generación: mar de viento y mar de fondo. El mar de viento es producido por viento local, el cual es caótico y desordenado, compuesto por crestas y valles angulosos. Por otro lado, el mar de fondo es un oleaje ordenado, con crestas regulares que se encuentra fuera de la zona de generación (Silva, 2005).

A medida que el oleaje se acerca a la costa, modifica la línea costera generando problemas como acreción y erosión. La batimetría, infraestructuras y otras forzantes externas también pueden ser causales de las modificaciones de la línea de costa.

Existen pronósticos o reconstrucción del oleaje en aguas profundas, como el realizado en el Atlas de Oleaje creado por la Universidad de Valparaíso (Beyá et. al., 2016). Este realiza una reproducción histórica del clima de olas, mediante información de oleaje espectral de 35 años (1980 – 2015), en diferentes puntos frente a las costas de Chile.

En la actualidad existen modelos numéricos que permiten realizar una propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas intermedias-someras. Entre aquellos que promedian la fase como por ejemplo: (1) los modelos de generación global que caracterizan el oleaje en condición de aguas profundas, como WAVEWATCH III (Tolman 1997, 1999a, 2009) y WAM (WAMDIG 1988, Komen et al. 1994), y los (2) modelos de propagación que caracterizan el clima de oleaje en condición de aguas intermedias-someras, como por ejemplo SWAN (Booij et al., 1999), MIKE 21 SW (DHI 2017), STWAVE (Smith et al., 2001). Los modelos en sus formulaciones consideran efectos de refracción, difracción, reflexión, como también la dispersión de frecuencias, disipación por fricción de fondo y *whitcapping*, entre otros.

Se debe tener claro que, si bien los modelos de propagación de oleaje simulan de buena manera los fenómenos existentes en el mar, por muy avanzados que sean, no están libres de errores. Todo esto, debido a que en la realidad los fenómenos existentes son muy complejos.

Una de las necesidades en la ingeniería costera, es adquirir información de oleaje real en la costa y con ella, evaluar aspectos hidráulicos marítimos y/o estructurales de diversas obras. Para ello es práctica usual emplear información de campo para calibrar modelos globales de *hindcasting* y su consecuente transferencia a los sitios de estudio. Para lograr este propósito, suelen emplearse mediciones mediante instrumentos oceanográficos como: ADCP's (*Acoustic Doppler Current Profiler*), boyas y sensores de presión, entre otros.

En el diseño de estructuras costeras, es necesario conocer los parámetros espectrales y estadísticos como altura de ola, período y dirección del oleaje. Numerosos estudios tales como: Glukhovskiy (1966), Battjes & Stive (1985), Klopman (1996) citados por Groenendijk (1998), indican que la distribución de altura de ola en aguas someras se desvía considerablemente de la propuesta por Rayleigh (USACE, 2002). Por ende, estimar el oleaje de diseño mediante la distribución de probabilidad de Rayleigh, podría generar desviaciones de la realidad en aguas someras y de este modo, proveer de diseños susceptibles de sobrepaso excesivo y daños en las obras.

El manual Eurotop (Pullen et.al., 2007) recomienda el uso de una distribución de Rayleigh-Weibull compuesta con el fin de describir estadísticamente el oleaje en aguas poco profundas (Mai et. al., 2010). Autores como Glukhovskiy (1966), Battjes (1986) y Klopman (1996) citados por Groenendijk (1998), por su parte, coinciden en que una distribución Rayleigh difiere significativamente en aguas someras, por lo que, emplean en sus cálculos la distribución de Weibull. Esto, concluye que, los diseños de estructuras costeras se estarían realizando en base a cálculos que corresponderían a aguas profundas, bajo el supuesto de que el oleaje se distribuye en forma Rayleigh.

Lo anteriormente expuesto, motivó el presente estudio a realizar la caracterización probabilística del oleaje en aguas someras en el litoral continental de Chile central. Para esto, se analizó la distribución del oleaje a corto plazo, en aguas someras, a través de datos obtenidos desde trabajos de campo, los cuales fueron registrados mediante el uso de unos ADCP's, en diversos puntos de la costa de Chile.

El objetivo planteado para el presente estudio consistió en verificar si las series de desnivelaciones instantáneas se distribuyen de forma Normal y consecuentemente, si las alturas de olas se distribuyen de forma Rayleigh u otro tipo de distribución, tal como ha sido planteado por diversos estudios. De forma adicional, se analizaron los períodos de la ola mediante la distribución de Bretschneider. Por otra parte, se analizó la relación altura significativa estadística (H_s) versus altura espectral (H_{m0}).

Cabe destacar que todo lo estudiado y analizado se realizó en zonas parcialmente abrigadas en la costa de Chile.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar probabilísticamente el oleaje en aguas someras en el litoral continental de Chile central mediante el análisis de datos de campo recopilados instrumentalmente.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar datos en software Wavesmon.
- Controlar la calidad de los datos considerando: inspección visual, valores inexistentes o *Gaps*, valores anómalos o *Outlier*, corregir la desnivelación y seleccionar la mejor señal.
- Determinar parámetros espectrales y estadísticos.
- Analizar las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, alturas de ola y períodos de ola.
- Analizar relación entre la altura significativa estadística (H_s) versus altura espectral (H_{m0}).

4 ALCANCES

El estudio se realizó en el litoral continental de la costa de Chile, comprendido entre las latitudes 20° a 40° S, mediante mediciones en 11 puntos a lo largo de la costa, de tal modo que la representatividad de los análisis es puntual y no espacial.

No se consideraron los eventos de “El Niño y La Niña”, correspondientes a fenómenos climáticos conocidos como Oscilación del Sur, debido a que las mediciones disponibles no proveen de series de tiempo lo suficientemente largas para dichos propósitos.

Como tampoco las estacionalidades (otoño, invierno, primavera o verano) en las campañas de medición.

Además, no se consideraron las siguientes configuraciones de costa:

- Zonas insulares.
- Zonas abrigadas.
- Zonas extremas desde Puerto Montt hacia el sur de Chile.

5 FUNDAMENTO TEÓRICO

5.1 OLEAJE

El oleaje corresponde a ondas que se propagan por la superficie del océano, producidas principalmente por el viento. Existen otros mecanismos generadores de ondas en el océano, pero que, no corresponden al oleaje. Estos pueden ser movimientos del suelo marino, erupciones volcánicas submarinas, atracción planetaria, movimientos de cuerpos flotantes o sumergidos, entre otros (Beyá, et al., 2016). En la tabla 5-1, podemos encontrar los distintos tipos de ondas, con sus respectivos mecanismos generadores, períodos o longitudes.

Tabla 5-1: Clasificación y energía relativa de las ondas del océano según su período.

Movimiento	Período o Longitud	Fuerzas generadoras	Fuerzas restauradoras	Ejemplos
Corrientes oceánicas	10^6 m	Gradiente de densidad; viento	Fricción; Coriolis; Gravedad	Corrientes del Golfo
Corrientes costeras	10^5 m	Viento y corrientes oceánicas	Fricción; Coriolis; Gravedad	Afloramientos
Corriente de rotura	10^2 m	Ondas gravitatorias	Fricción; gravedad	<i>Rip-currents</i>
Corrientes de marea	10^3 m	Marea astronómica	Fricción; gravedad	Bahías y estuarios
Ondas capilares	$0.1\text{s}/10^{-2}\text{m}$	Viento	Tensión superficial; gravedad	Rizado del viento
Ondas ultragravitatorias	$0.1\text{-}1\text{s}/100\text{m}$	Viento	Gravedad	Ondas de viento en una charca
Ondas gravitatorias	$1\text{-}30\text{s}/1\text{-}10^3\text{m}$	Viento y oleaje de viento	Gravedad; fricción	<i>Sea y swell</i>

Ondas infragravitatorias	30s-5min/10 ³ -10 ⁵ m	Viento y ondas gravitatorias	Gravedad; Coriolis; fricción	<i>Surf-beat</i> , ondas de borde
Ondas Largas	5min/10 ⁵ -10 ⁶ m	Borrascas y terremotos	Gravedad; Coriolis; fricción	Tsunamis
Ondas de marea astronómicas	12-24h/10 ⁷ m	Rotación tierra/atracción Luna, Sol	Gravedad; Coriolis; fricción	Marea astronómica
Ondas transmareales	24h/10 ⁷ m	Orbita solar/gravitatoria	Gravedad; Coriolis; fricción	Marea meteorológica
Ondas internas	4min-25min	Borrascas; ondas de gravedad	Gravedad; Coriolis; fricción	Ondas de densidad en la pycnoclina

(Fuente: UNICAN, 2000).

En el ámbito de la ingeniería oceánica, el oleaje se puede describir principalmente como una onda sinusoidal, la cual permite identificar la altura H , longitud L , período T como se describe en la siguiente figura 5-1 (Kamphuis, 2000).

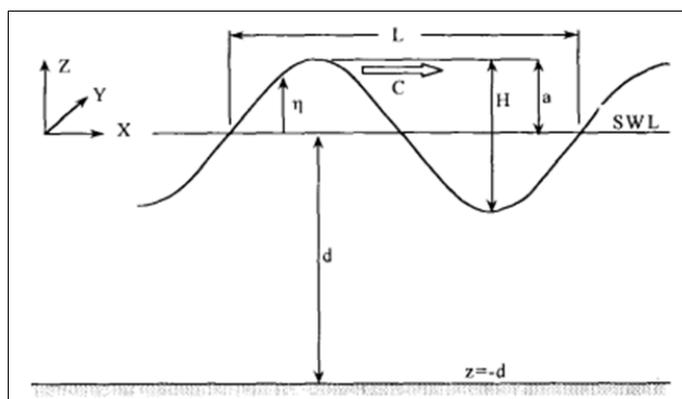


Figura 5-1: Nomenclatura básica del oleaje.

(Fuente: Kamphuis, 2000).

El oleaje se puede clasificar en dos tipos según su zona de generación. El “mar de viento” o “Sea” que corresponde al generado por el viento local. Este tipo de oleaje se caracteriza por tener una gran irregularidad, con olas de gran peralte y asimetría entre la forma de valles y crestas. El “mar de fondo” o “Swell”, por su parte, es generado por tormentas lejanas o bien producidos en una zona de generación en alta mar. Este tipo de oleaje pierde energía al propagarse y sufre una gran dispersión radial y angular (UNICAN, 2000). Podemos visualizar los tipos de oleaje en la figura 5-2.



Figura 5-2: Oleaje tipo Sea (Izquierda) y oleaje tipo Swell (derecha)

(Fuente: Camp, 2004).

También es posible encontrar una combinación de estos estados de mar (Sea o Swell), cuando se superponen dos mares de fondo con diferentes direcciones o períodos, así como también cuando un mar de fondo se propaga sobre una zona de generación de oleaje (Beyá, et al., 2016).

En Chile, los períodos característicos del oleaje tipo Sea es de 4 a 8 segundos y de oleaje tipo Swell de 10 a 25 segundos. La zona de generación del oleaje se encuentra en el Océano Pacífico, cuyos mecanismos generadores son los siguientes y se pueden ver en la figura 5-3.

- Núcleos de bajas presiones el hemisferio sur en las latitudes medias, responsables del oleaje reinante.
- Núcleos de bajas presiones el hemisferio norte en las latitudes medias, responsables del mar de fondo del noroeste.
- Núcleos de bajas presiones, generando durante el invierno mal tiempo y marejadas de mar de fondo en Chile continental.
- Anticiclones que generan viento, mar de viento sur-suroeste y buen tiempo.
- Tormentas tropicales en el Pacífico (Beyá, et al., 2016).

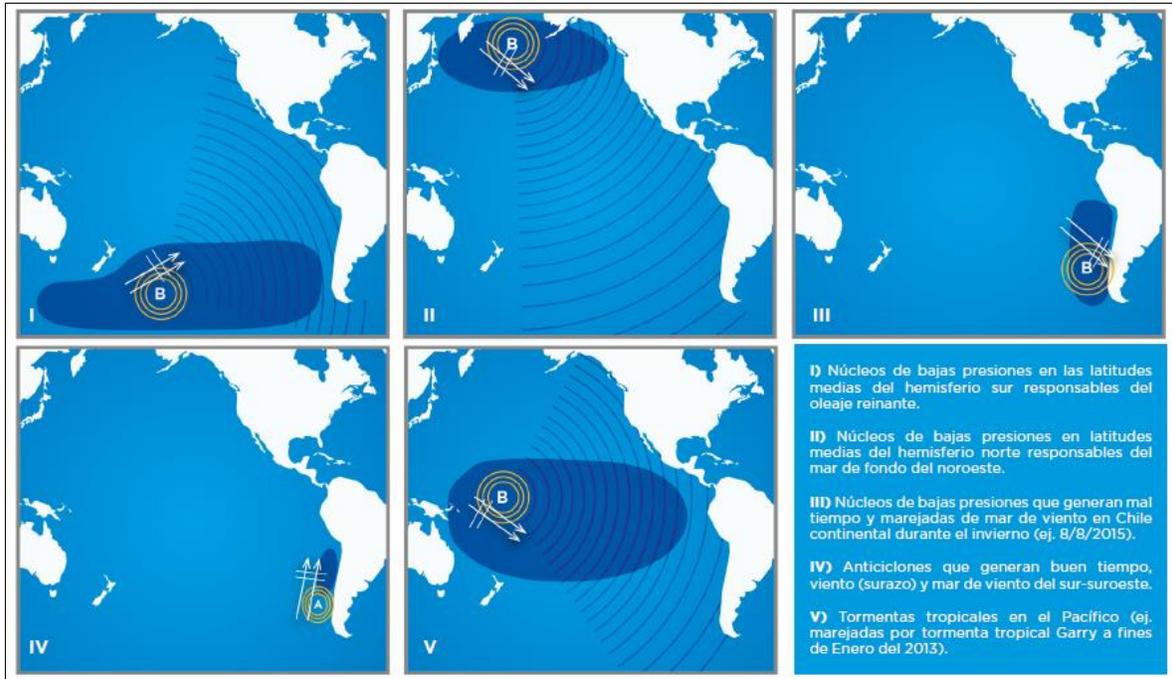


Figura 5-3: Zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas.

(Fuente: Beyá, et al., 2016)

5.1.1 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

A medida que el oleaje se acerca a la costa, el efecto del fondo comienza a notarse. Como consecuencia de esta interacción el tren de olas cambia. Los procesos de transformación son fundamentalmente variaciones en la altura de ola y en la dirección de propagación. Las alteraciones más comunes que sufre el oleaje son asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y rotura. De manera general, cada uno de los fenómenos de propagación del oleaje son descritos a continuación.

Asomeramiento

El asomeramiento es un proceso de transformación del oleaje en el cual, a medida que se aproxima a la costa, modifica su altura y longitud de onda debido a cambios de celeridad de grupo con la disminución de la profundidad (CEDEX, 2004).

Refracción

La refracción ocurre cuando un tren de onda viaja desde aguas profundas y cambia la dirección de propagación, por efectos de la topografía submarina o presencia de una corriente. A medida que el oleaje se propaga a la costa, las crestas de las olas tienden a ponerse paralelas al contorno de fondo, modificando la altura y dirección.

Por otra parte, la refracción actúa cuando la profundidad es igual o inferior a la mitad de la longitud de onda (Holthuijsen, 2007).

Difracción

La difracción es un proceso de transferencia lateral de energía que experimenta el oleaje debido a la existencia de variaciones de altura. Cuando el oleaje se encuentra con algún obstáculo, se genera una zona de abrigo, donde la difracción provoca que parte de la energía se transfiera a la zona protegida.

Este fenómeno es importante por la penetración del oleaje en la zona de puertos y otras zonas abrigadas, donde fenómenos como la resonancia producen importantes daños en las estructuras de los puertos (CEDEX, 2004).

Reflexión

El proceso de reflexión ocurre cuando el oleaje encuentra obstáculos naturales o artificiales, pendientes elevadas o cambios bruscos de pendiente del fondo. Las características reflejantes dependen de la rugosidad, permeabilidad de la superficie, pendiente y del peralte de las olas (Figueroa, et. al, s.f). En la figura 5-4 se muestran ejemplos con las distintas transformaciones del oleaje.

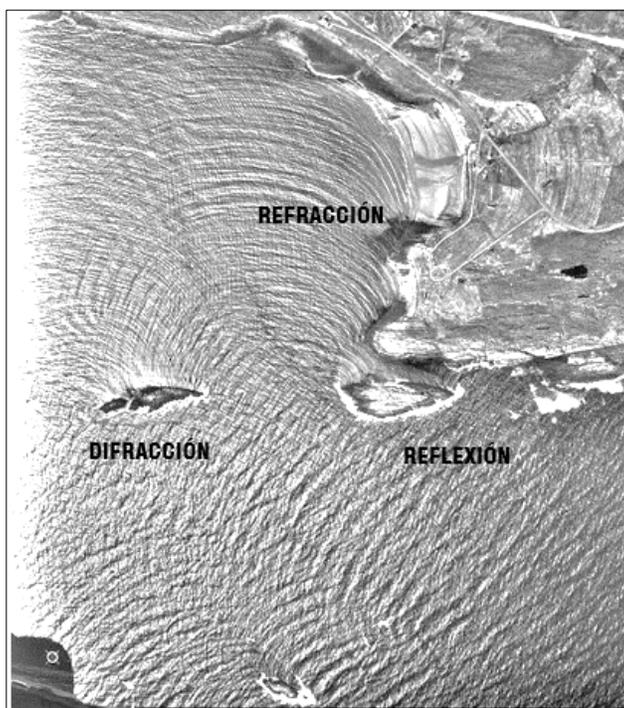


Figura 5-4: Transformación del oleaje editado por el autor.

¹(Fuente: Desdelacroa, 2018)

¹ Desdelacroa. (19 de Junio de 2018). *Blogspot Desde la croa*. Recuperado de 19 de Junio de 2018, de <http://desdelacroa.blogspot.com/2013/02/historias-difraccion-y-reflexion.html>

Rotura

La rotura del oleaje es un fenómeno importante de disipación de energía mecánica en forma de turbulencia. El inicio de la rotura se inicia cuando: i) la velocidad de las partículas en la cresta es superior a la celeridad de la onda, ii) el peralte excede el valor límite o iii) la cresta es superior al ángulo 120° . Antes de la rotura el perfil de la onda pierde su simetría y el frente se pone vertical.

Existe una gran cantidad de factores que pueden afectar la estimación de las características del rompimiento, entre los que se destacan: la presencia de barras en el perfil de la playa, la dinámica morfológica del fondo que interactúa con el fenómeno de rotura y la variabilidad de altura y período en función del espectro de frecuencias.

Los tipos de rotura se pueden caracterizar mediante el número de Iribarren (Battjes, 1974), en el cual determina la forma de la rotura como función de la pendiente de fondo y el peralte de las olas (CEDEX, 2004).

Los tipos de rotura son: *Splilling* o descrestamiento, *Plunging* o voluta, *Colapsing* o colapso, *Surging* o surgimiento (figura 5-5).



Figura 5-5: Tipos de rotura
(Fuente: USACE, 2002)

5.1.2 ANÁLISIS DEL OLAJE

Análisis a corto plazo

El análisis a corto plazo se realiza a partir de registros de series de desnivelaciones instantáneas del oleaje. Estos registros permiten describir las propiedades estadísticas del oleaje de un estado de mar, por lo que es necesario que el período de la medición sea de 10 a 20 minutos por hora o más, para asumir estacionalidad y que el oleaje sea representativo de la medición (Silva, 2005).

En Chile estas mediciones se realizan con campañas de medición de olas por medios instrumentales según el estándar del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 2005). Deben tener una duración mínima de 30 días, registrar olas cada 3 horas, por un período de a lo menos 18 minutos y con una frecuencia de muestreo de 0,5 segundos como mínimo. La profundidad del instrumento debe estar preferentemente entre los veriles 10 y 5 metros. Además, se debe indicar el huso horario, las coordenadas geográficas y UTM² de la posición de fondeo en datum WGS-84³(SHOA, 2005).

El oleaje se puede describir: (1) temporalmente de un estado de mar, con mediciones de una serie de tiempo de desnivelaciones, considerando propiedades estadísticas, parámetros y distribución. (2) De forma espectral de un estado de mar, representando la energía del oleaje en función de las frecuencias (Silva, 2005).

Análisis estadístico

Para conocer las propiedades estadísticas de una muestra de oleaje aleatoria, se asume un proceso estocástico, estacionario y ergódico. Ello permite definir las funciones de distribución teórica de los parámetros como: el desplazamiento de la superficie libre, altura de ola y período.

En la figura 5-6 se presenta un registro característico de superficie libre, donde indica los parámetros fundamentales que definen al oleaje como altura H y período T .

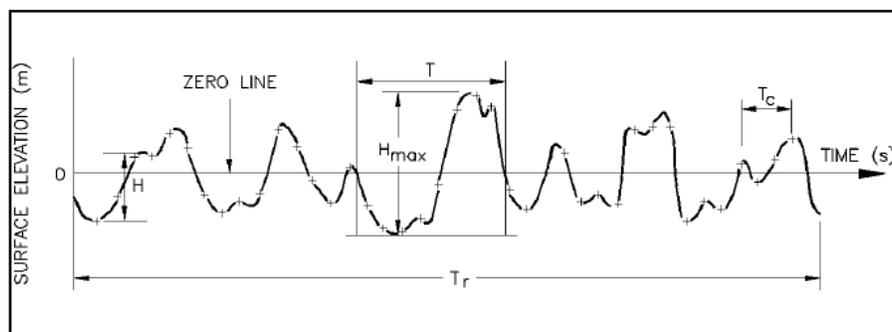


Figura 5-6: Definición de parámetros de olas para un estado de mar aleatorio.

(Fuente: USACE, 2002).

² UTM: sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator.

³ WGS-84: sistema de coordenadas geográficas mundial llamado Sistema Geodésico Mundial 1984.

Los criterios o métodos más comunes para la identificación de las olas y períodos son:

- Método de pasos ascendentes por cero
- Método de pasos descendentes por cero
- Método de distancia entre crestas
- Método de distancia entre valles

Para cualquier método, se debe hacer una corrección del nivel medio del mar, para evitar una distorsión en el análisis estadístico por influencia de ondas largas de mareas. Las tres formas utilizadas son: la media aritmética, corrección lineal o corrección parabólica (Silva, 2005).

Método de pasos ascendentes por cero: se determina una ola individual cuando el valor máximo de la elevación de la superficie libre esté dentro de dos pasos ascendentes por cero. Por otra parte, lo que hay entre dos pasos ascendentes consecutivos es el período de la ola y la altura de ola como la diferencia del valor máximo y mínimo encontrado dentro del período.

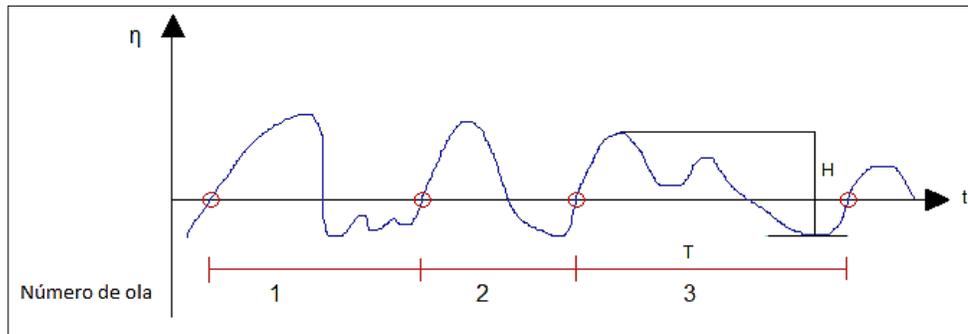


Figura 5-7: Discretización de un registro por método de paso ascendentes por cero

(Fuente: Elaboración propia)

Método de pasos descendentes por cero: se determina una ola individual cuando el valor máximo de la elevación de la superficie libre esté dentro de dos pasos descendentes por cero. El período y la altura de ola quedan definidos de la misma manera que en el método de pasos ascendentes por cero.

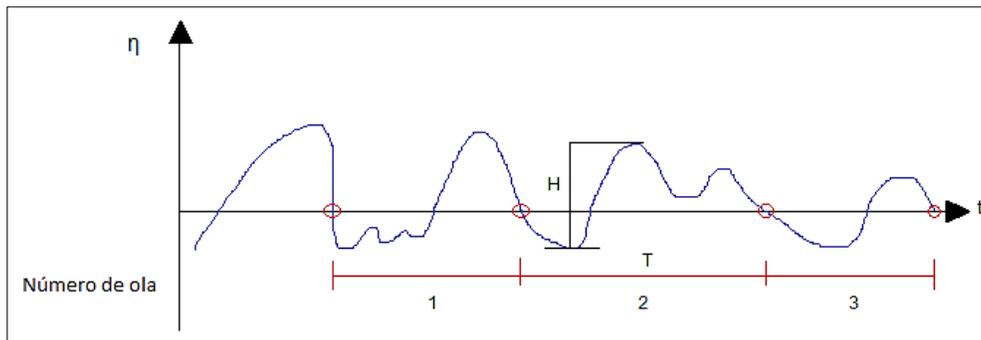


Figura 5-8: Discretización de un registro por método de paso descendentes por cero

(Fuente: Elaboración propia)

Método de distancia entre crestas: la identificación de las olas queda delimitada por dos crestas (máximos) sucesivas.

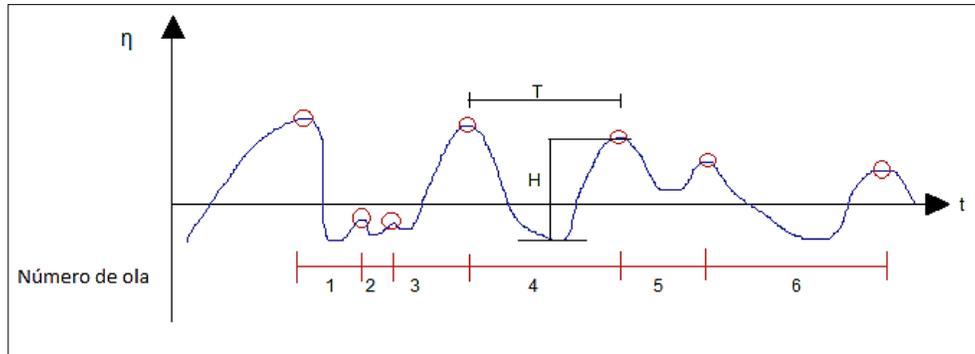


Figura 5-9: Discretización de un registro por método distancia entre crestas
(Fuente: Elaboración propia)

Método de distancia entre valles: la identificación de las olas queda delimitada por dos valles (mínimos) sucesivos.

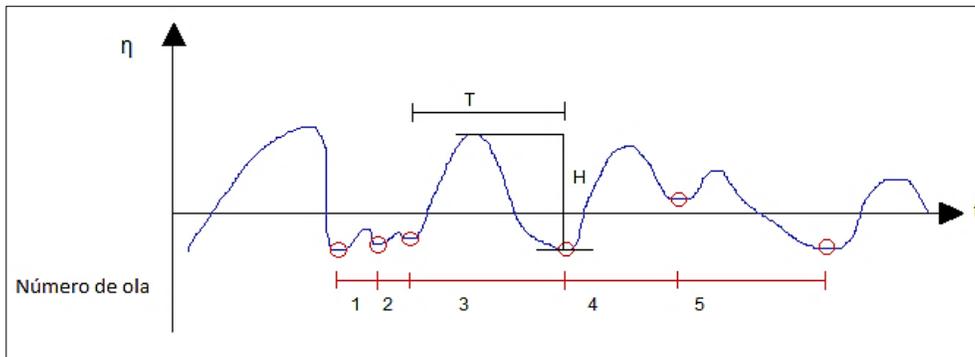


Figura 5-10: Discretización de un registro por método distancia entre valles.
(Fuente: Elaboración propia)

Este proceso permite determinar los parámetros estadísticos más usados como: variación del nivel de mar, altura media, altura cuadrática media, altura significativa, altura máxima, período medio, período máximo, período significativo, entre otros (Liu & Frigaard, 2001).

En la tabla 5-2 se presentan los parámetros de resumen estadísticos del oleaje.

Tabla 5-2: Parámetros del oleaje

Nombre	Fórmula
Variación del nivel del medio del mar	$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i$
Variación de la media cuadrática de la superficie del agua	$\eta^2_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2$
Altura media	$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i$
Altura cuadrática media	$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2}$
Altura de ola 1/10, media aritmética de 1/10 ola más altas	$H_{1/10} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^{N/10} H_i$
Altura significativa o altura un tercio	$H_s = H_{1/3} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$
Período medio	$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i$
Período máximo	$T_{max} = \max(T_i)$
Período de ola 1/n, media aritmética de los N/n períodos correspondientes a las N/n olas más altas	$T_{1/n} = \frac{n}{N} \sum_{i=1}^{N/n} T_i$
Período significativo o período un tercio	$T_s = T_{1/3} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} T_i$

(Fuente: Figueroa, et. al., s.f.)

Donde

η_i : Elevación de la superficie libre del mar en el tiempo t .

N : Número de eventos.

N_0 : Número de olas individuales de todo el registro.

T_i : Período de la ola en segundos.

H_i : Altura de la ola en metros.

Análisis espectral

El análisis espectral determina la distribución de la energía del oleaje y el promedio estadístico para cada frecuencia de la ola mediante la conversión de series de tiempo de oleaje mediante la técnica de la Transformada Rápida de Fourier a un espectro de oleaje. En la figura 5-11 se visualiza un espectro de oleaje multidireccional del oleaje.

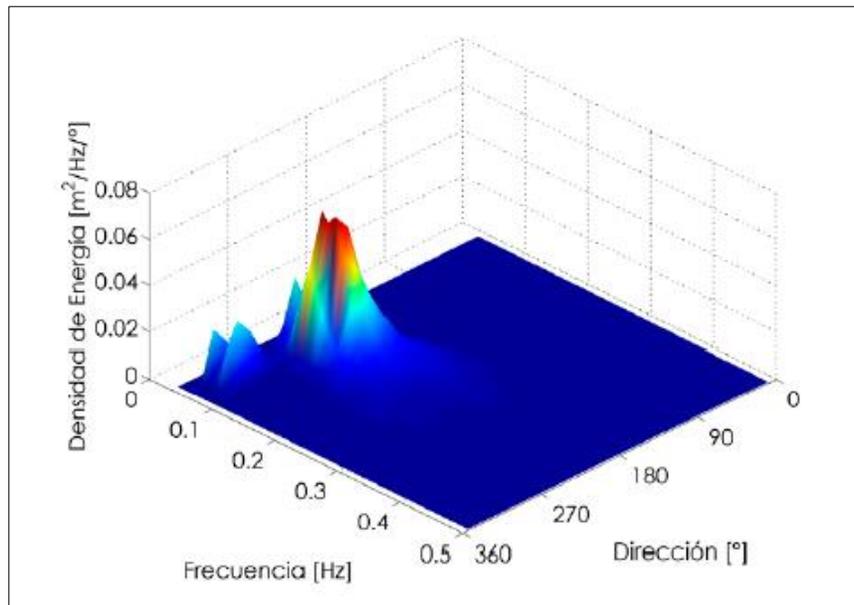


Figura 5-11: Espectro multidireccional del oleaje creado en Matlab.

(Fuente: Beyá, et.al.,2016)

El principio que opera en el análisis espectral es el supuesto de que un registro de oleaje es la suma de ondas sinusoidales que tienen una amplitud, período y dirección como se visualiza en la figura 5-12.

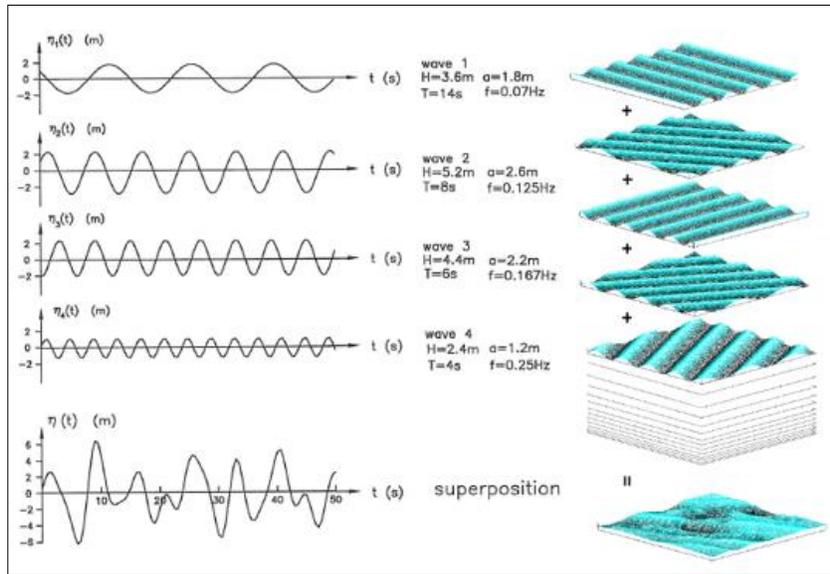


Figura 5-12: Estructura de oleaje aleatorio adaptado.
(Fuente: Pierson & Moskowitz, 1964 y Liu & Frigaard, 2001)

Cada amplitud se puede obtener en función de su densidad espectral como:

$$a_i^2 = 2S(f_i)\Delta f_i$$

Ecuación 5-1

Donde

a_i : Amplitud de onda.

$S(f_i)$: Densidad espectral de energía.

Δf_i : Banda de frecuencia.

Si consideramos válida la teoría lineal de Airy del oleaje (UNICAN, 2000) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{1}{8}\rho g H^2 = \frac{1}{2}\rho g a^2 = \frac{1}{2}\rho g (2S(f_i)\Delta f_i)$$

Ecuación 5-2

Donde

ρ : Densidad.

g : Gravedad.

H y $B(\sigma)$

Por lo que la energía total por unidad de superficie del oleaje es:

$$E = \frac{1}{2}\rho g \left(2 \sum S(f_i)\Delta f_i \right)$$

Ecuación 5-3

Donde

E : Energía.

Para la obtención de la densidad espectral escalar mediante el análisis en el dominio de la frecuencia, se establecen los coeficientes de Fourier para determinar la onda monocromática que constituye cada uno de los términos de la serie (Silva, 2005).

Se asume que la desnivelación instantánea se describe como:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T_r} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T_r} \right)$$

Ecuación 5-4

Donde

$\eta(t)$: Desnivelación instantánea

T_r : Duración de la serie de tiempo.

a_i y b_i : Coeficientes de Fourier.

n : N-ésimo término del coeficiente de Fourier.

t : Tiempo.

Si no se tiene ninguna perturbación del nivel medio, la desnivelación instantánea es 0, por lo que $a_0 = 0$ y los valores de los coeficientes de Fourier serán diferentes entre sí.

La frecuencia angular del n-ésimo coeficiente y la distancia entre armónicos quedan definidos como:

$$\sigma_n = \frac{2\pi n}{T_r} \quad \Delta\sigma_n = \frac{2\pi}{T_r}$$

Ecuación 5-5

Ahora si se incluye la definición de cada uno de los coeficientes en la ecuación de la desnivelación instantánea.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^k \left(\frac{\Delta\sigma_n}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta(t) \cos(\sigma_n t) dt \right) \cos(\sigma_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\sigma_n}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta(t) \sin(\sigma_n t) dt \right) \sin(\sigma_n t)$$

Ecuación 5-6

Se asume que $\Delta\sigma_n \sim 0$ es un número muy pequeño y la duración de la serie de tiempo es muy grande (infinito), la función se convierte en una integral con límites $\sigma = 0$ y $\sigma = \infty$, por tanto, se puede trazar en términos de:

$$\eta(t) = \int_{\sigma=0}^{\infty} \frac{d\sigma_n}{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \cos(\sigma_n t) dt \right) \cos(\sigma_n t) + \int_{\sigma=0}^{\infty} \frac{d\sigma_n}{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \sin(\sigma_n t) dt \right) \sin(\sigma_n t)$$

Ecuación 5-7

Si se reemplazan las siguientes ecuaciones de coeficientes de Fourier asociadas a las desnivelaciones instantáneas a la ecuación anterior nos queda:

$$a(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \cos(\sigma_n t) dt$$

Ecuación 5-8

$$b(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \sin(\sigma_n t) dt$$

Ecuación 5-9

$$\eta(t) = 2 \int_{\sigma=0}^{\infty} a(\sigma) \cos(\sigma_n t) d\sigma + 2 \int_{\sigma=0}^{\infty} b(\sigma) \sin(\sigma_n t) d\sigma$$

Ecuación 5-10

Los términos $A(\sigma)$ y $B(\sigma)$ representan los componentes de la transformada de Fourier de la desnivelación instantánea. La ecuación anterior es también conocida como transformada inversa de Fourier.

Se puede determinar las series de Fourier de forma compleja como:

$$[e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta]$$

Ecuación 5-11

$$F(\sigma) = a(\sigma) - ib(\sigma)$$

Ecuación 5-12

Según la clásica teoría de Fourier se establece que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$$

Ecuación 5-13

Con las definiciones anteriores y considerando $a(\sigma)$ y $b(\sigma)$ como funciones impares, se puede demostrar que:

$$F(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i\sigma t} dt$$

Ecuación 5-14

$$\int_{\sigma=0}^{\infty} a(\sigma) \cos(\sigma_n t) d\sigma = 0$$

Ecuación 5-15

$$\int_{\sigma=0}^{\infty} b(\sigma) \sin(\sigma_n t) d\sigma = 0$$

Ecuación 5-16

Entonces se puede escribir la desnivelación instantánea de acuerdo con la definición de $F(\sigma)$ y los resultados de las integrales anteriores como:

$$\eta(t) = 2 \int_{\sigma=0}^{\infty} F(\sigma) e^{-i\sigma t} d\sigma$$

Ecuación 5-17

Al aplicar una forma discreta las ecuaciones anteriores y un espaciamiento regular, queda:

$$F(\sigma_j) = \frac{1}{N} \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i\sigma_j n \Delta t} \quad j = 0, 2, 3 \dots N/2$$

Ecuación 5-18

$$F(f_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi f_j n \Delta t} \quad j = 0, 2, 3 \dots N/2$$

Ecuación 5-19

$$\sigma_j = \frac{2\pi j}{N\Delta t} = 2\pi \Delta f$$

Ecuación 5-20

Donde

N : Número total de datos de la señal.

Δt : Intervalo de muestreo.

σ_j : Frecuencia angular.

La función de densidad espectral $S(f_n)$ de una serie de tiempo de desnivelación instantánea se calcula a través de la transformada rápida de Fourier y se define con las siguientes ecuaciones:

$$S(f_n) = 0 \quad n = 0$$

Ecuación 5-21

$$S(f_n) = \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_n)|^2 \quad n = 1, 2, 3 \dots N/2$$

Ecuación 5-22

Donde

$$f_n = n\Delta f$$

Ecuación 5-23

$$\Delta f = \frac{1}{t_{max}} = \frac{1}{N\Delta t}$$

Ecuación 5-24

Los procedimientos para realizar el análisis espectral son:

1. Corrección del nivel medio: se realiza una corrección del nivel medio con los métodos presentados en el análisis estadístico.
2. Aplicación de una función ventana: para evitar las discontinuidades que se pudieran presentar al unir dos extremos de la señal, al asumir implícitamente que la señal es periódica. Los métodos son la ventana tipo trapecoide y ventana tipo coseno.
3. Estimación de las componentes de Fourier.
4. Cálculo del espectro de energía.
5. Suavizado del espectro de energía: como los valores calculados de la energía espectral oscilan en torno al valor real, las oscilaciones deben ser controladas mediante un suavizado o un alisado del espectro. Se multiplica el espectro por una función de peso que puede ser filtro rectangular o filtro parabólico.
6. Determinación de parámetros espectrales.

En la tabla 5-3 se presenta un resumen de los parámetros descritos en base a los diferentes momentos espectrales.

Tabla 5-3: Parámetros espectrales del oleaje

Nombre	Fórmula
Momento de orden 0	$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\eta}(f)df$
Momento de orden n	$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_{\eta}(f)df$
Anchura espectral	$\varepsilon = \left(1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)^{\frac{1}{2}}$ $v = \left(\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1\right)^{\frac{1}{2}}$
Altura espectral	$H_{m0} = 4.004\sqrt{m_0}$
Altura significativa	$H_s = H_{m0} = 4.004\sqrt{m_0}$ en aguas profundas.
Altura cuadrática media espectral	$H_{rms} = \sqrt{8m_0}$
Altura de ola 1/10 espectral	$H_{\frac{1}{10}} = 5.1\sqrt{m_0}$
Período medio	$T_{01} = \frac{m_0}{m_1}$ $T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
Variación cuadrática media de la superficie libre	$\eta_{rms} = \sqrt{m_0}$

(Fuente: Silva, 2005)

La principal desventaja del análisis espectral es que se pierde información de olas individuales, lo que no ocurre en el análisis en el dominio del tiempo. Cuando se realiza el análisis de un registro, es posible retener la información acerca de las fases del registro, el cual permite la reconstrucción de las condiciones de olas individuales. Sin embargo, este procedimiento no es realizado frecuentemente (Silva, 2005).

Análisis a medio plazo

El clima medio de oleaje tiene por finalidad describir la condición característica que presenta el oleaje en el plazo de un año medio. Usualmente se utiliza para evaluar el porcentaje de operatividad de una infraestructura portuaria, orientación y ubicación.

El análisis del clima medio se realiza con series de tiempo de parámetros de resumen de estados de mar (1 a 3 horas), de un lugar en específico. Se generan histogramas o tablas de incidencia escalares y direccionales, rosas de oleaje, histogramas de altura de olas anuales y estacionales, para representar de mejor manera las condiciones funcionales de las estructuras y establecer las variaciones diarias, mensuales, anuales e interanuales (Figuroa, et. al, s.f).

En Chile los estudios, se basan en datos recopilados del clima de oleaje en aguas someras, que se propagan desde aguas profundas al sitio de interés. Se debe validar la información con dos campañas de medición de olas in situ (verano e invierno) y comparar de los resultados de la transformación de oleajes. Con los resultados se debe construir tablas de incidencia (altura versus dirección, período versus dirección y altura versus período ejemplo tabla 5-4), rosas de oleaje (figura 5-13) y período (SHOA, 2005).

Tabla 5-4: Ejemplo tabla de incidencia dirección versus altura del Puerto de Valparaíso

TABLA DE FRECUENCIA H_{m0} y D_m [%]								
H_{m0} [m]	D_m [°]							TOTAL
	E	SE	S	SO	O	NO	N		NE
]0-0.3[						62.7	0.2	62.9
[0.3-0.6[						31.4	0.4	31.7
[0.6-0.9[						2.8	0.3	3.1
[0.9-1.2[						0.7	0.4	1.1
[1.2-1.5[						0.2	0.3	0.6
[1.5-1.8[						<0.1	0.2	0.3
[1.8-2.1[						<0.1	0.2	0.2
[2.1-2.4[						<0.1	<0.1	0.1
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.9	2.1	100.0

(Fuente: Beyá, et. al, 2016)

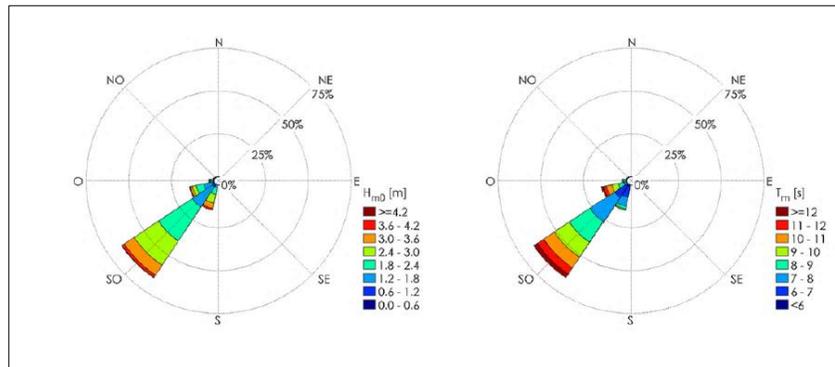


Figura 5-13: Ejemplo de rosas de oleaje altura (izquierda) y período (derecha).

(Fuente: Beyá, et. al, 2016)

Análisis a Largo plazo

El análisis a largo plazo, tiene como objetivo describir las condiciones de tormentas de mayor intensidad en aguas profundas. Se realiza un análisis estadístico de eventos extremos de altura de ola, período peak espectral y dirección de incidencia.

En Chile se necesita una data de a lo menos 20 años de registro, pero como no hay una data tan extensa, se usa Hindcasting. Esto se realiza por cada componente de oleaje tipo *Sea* o *Swell*, con la finalidad de conocer el oleaje de diseño para diferentes direcciones y caracterizar el oleaje de eventos extremos. Esto nos permite realizar un análisis estadístico, estableciendo una estimación de la altura de ola de retorno con períodos de 5, 10, 25, 50 y 100 años (SHOA, 2005).

Para llevar a cabo un análisis a largo plazo, se debe:

- Definir método para la selección y elección de eventos extremos
- Selección de una distribución de probabilidad que caracterice dichos eventos

Existen tres métodos en la selección de datos para determinar las condiciones de diseño: (1) máximo de las series anuales (valores máximos de cada año), (2) picos (valores máximos de los temporales), (3) excedencias (valores que exceden un cierto umbral) (Silva, 2005).

La distribución de probabilidad se puede elegir de forma arbitraria. Entre las distribuciones que se ajustan adecuadamente a los valores pueden ser: Log-normal, Weibull, Gumbel, Frechet y Exponencial, entre otras (Figuroa, et. al., s.f).

Por otra parte, en ingeniería es muy común determinar el período de retorno y su altura asociada, ya que muchos criterios de diseño están basados en ese concepto (Silva,2005).

5.2 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL OLEAJE

Sabemos que, bajo ciertas condiciones, las variables aleatorias como la desnivelación instantánea de la superficie libre, la altura de ola y el período, siguen distribuciones de probabilidades conocidas. Para asociarlas, se utilizan los parámetros estadísticos que se obtienen de las mediciones de instrumentos oceanográficos, como en este caso los ADCP's, lo que nos permite definir completamente las distribuciones estadísticas asociadas a cada variable (UNICAN, 2000).

En el caso de las distribuciones de las desnivelaciones instantáneas, según la literatura planteada a continuación, se comporta mediante una distribución Normal o Gaussiana, validada solamente en aguas relativamente profundas y no definido en aguas someras (Silva, 2005). Esto nos conlleva a analizar la función, supuestos y puntos críticos de la distribución del oleaje en aguas someras de las desnivelaciones instantáneas de la superficie libre.

En aguas someras, sabemos que la distribución de alturas de ola se desvía considerablemente a la Rayleigh, aunque, en la actualidad comúnmente suponen que dicha distribución es válida (USACE, 2002). Variados autores plantean una distribución Rayleigh u Weibull (Rayleigh modificada) en aguas someras, por lo que, conocer la teoría, hipótesis e historia de las distribuciones de alturas de ola, se hace relevante.

De forma excepcional a la memoria, se analizó las distintas distribuciones de los períodos de ola que son obtenidas a partir de las distribuciones conjuntas de alturas y períodos, como son las de Bretschneider y Longuet-Higgins.

5.2.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS DESNIVELACIONES

La desnivelación instantánea de la superficie libre se ajusta a una distribución Normal o Gaussiana de media cero. Esta aproximación es válida solamente en aguas relativamente profundas, cuando la interacción no lineal entre trenes de onda y a los procesos de disipación como la rotura no están presentes (Holthuijsen, 2007). En la figura 5-14 podemos visualizar dicha distribución.

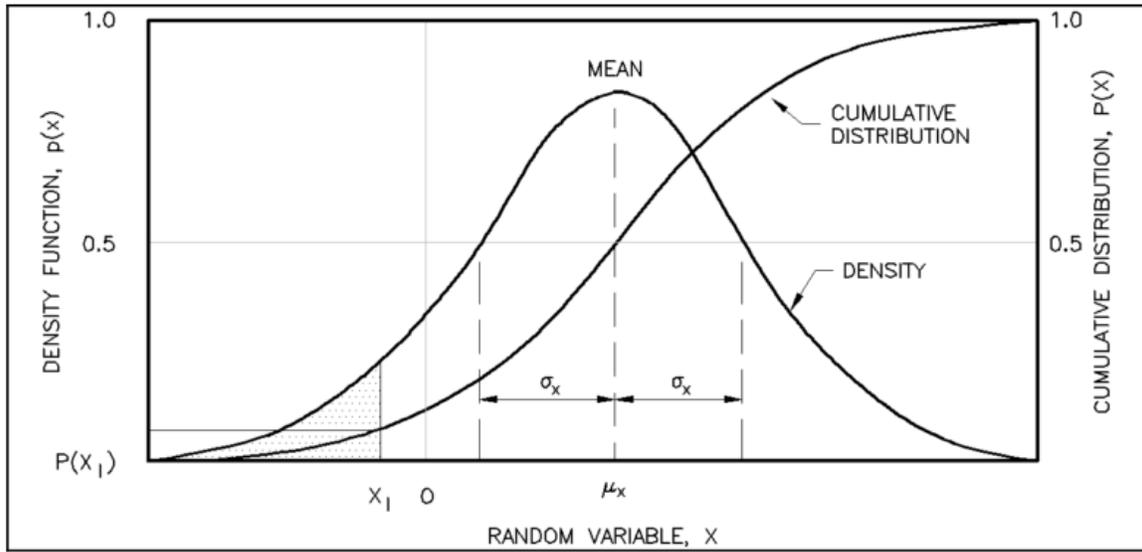


Figura 5-14: Función de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada Normal de las desnivelaciones instantáneas.

(Fuente: USACE, 2002)

Si se asume que la desnivelación instantánea de la superficie libre se presenta como un proceso estocástico (oleaje aleatorio), estacionario (que las características estadísticas se consideran constantes durante un cierto período de tiempo), ergódico (una ventana de tiempo es representativa de la serie) y Gaussiano de media cero, las desnivelaciones instantáneas de la superficie libre se distribuyen según una distribución Normal.

La función de densidad de la probabilidad de la desnivelación instantánea presenta algunos puntos críticos cuando intervienen los procesos no lineales (Silva, 2005).

Los puntos críticos son:

- El modelo lineal de distribución de las desnivelaciones no considera la interacción entre componentes, que genera la cesión de energía de unos componentes a otros.
- En profundidades cercanas a la rotura, el oleaje tiende a peraltarse y la distribución de las desnivelaciones es simétrica.
- La distribución admite que son posibles desnivelaciones extremadamente grandes, aunque no es posible debido a que, la ola rompería antes de que alcance esa altura.

Entonces, la función de densidad de las desnivelaciones instantáneas de la superficie libre es la siguiente (Silva, 2005):

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\eta_{rms}^2}\right)$$

Ecuación 5-25 ,

$$\eta_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2}$$

Ecuación 5-26

Donde:

η : desplazamiento vertical de la superficie libre.

η_{rms} : desplazamiento vertical medio cuadrático de la superficie libre.

N : Número de eventos.

5.2.2 DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS DE OLA

Las alturas de olas pueden ser representadas por una función de probabilidad, debido a que se consideran como una variable estocástica (USACE, 2002). La distribución de probabilidad más usada hoy en día para describir las alturas de olas es la distribución Rayleigh propuesta inicialmente por Cartwright y Longuet-Higgins (1956). Esta distribución plantea diversas hipótesis, de las cuales pueden ser (Silva, 2005):

- “El desplazamiento de la superficie libre sigue una distribución Normal” (Silva, 2005:92).
- “Espectro de banda estrecha” (Silva, 2005:92).
- “La correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es 1” (Silva, 2005:92).
- “La correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es 0” (Silva, 2005:92).
- “La correlación entre los desplazamientos máximos positivos y negativos es arbitraria” (Silva, 2005:92).
- “Alturas de ola limitada por efectos de rotura” (Silva, 2005:92).

La función de distribución Rayleigh es la siguiente (Liu & Frigaard, 2001):

$$F(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right)$$

Ecuación 5-27

También puede ser expresada en base a la altura media o en función de la altura significativa como sigue (UNICAN, 2000):

$$F_{\underline{H}}(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right)$$

Ecuación 5-28

$$F_{\underline{H}}(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-2.005\left(\frac{H}{H_s}\right)^2\right)$$

Ecuación 5-29

Donde:

H : Altura de ola.

H_{rms} : Altura cuadrática media.

\bar{H} : Altura media.

H_s : Altura significativa.

$F_H(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\}$: Función de probabilidad de la altura dada H sea mayor a altura \underline{H} .

La distribución Rayleigh es generalmente adecuada en aguas profundas, pero a medida que el oleaje se acerca a la costa la distribución se desvía sustancialmente, debido a efectos batimétricos y la rotura. Aunque no existe una distribución universal aceptada, diferentes autores presentan modelos de distribución de alturas de olas en aguas someras como Glukhovskiy (1966), Battjes & Janssen (1978), entre otros.

Modelos locales de distribución de alturas de ola en aguas someras

Los modelos de distribución de altura de ola se basan en el supuesto de que están determinados principalmente por parámetros de olas locales y la profundidad del agua, independiente de la historia de las olas de aguas profundas. Cabe destacar que los modelos sólo son válidos en una topografía de fondo simple y en aguas someras (Groenendijk, 1998).

A continuación, se describen algunos modelos de distribución de alturas de olas de aguas someras citados por Groenendijk (1998).

Distribución de Glukhovskiy 1966

Glukhovskiy propuso una distribución de altura de ola en aguas someras, basadas en la distribución de Weibull con dos parámetros que son altura de la media y la profundidad local (Glukhovskiy ,1966). La función de distribución acumulada es:

$$F_H(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} A \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^k\right)$$

Ecuación 5-30

Con	$\tilde{d} = \frac{\bar{H}}{d}$	$k = \frac{2}{1-\tilde{d}}$	$A = \left(1 + \frac{\tilde{d}}{\sqrt{2\pi}}\right)^{-1}$
	Ecuación 5-31	Ecuación 5-32	Ecuación 5-33

Donde

A y k : Parámetros.

\tilde{d} : Relación de altura de ola y profundidad local d .

Cabe destacar que para aguas profundas la distribución presentada se reduce a Rayleigh.

Modificación de la distribución de Glukhovskiy 1986

Battjes y Stive propone una modificación a la distribución de Glukhovskiy, lo que Klopman (1996) ocupa también (Battjes & Stive, 1985).

La función de distribución acumulada es:

$$F_{\underline{H}}(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-A \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^k\right)$$

Ecuación 5-34

Con los parámetros \bar{d} y k iguales a lo propuesto por Glukhovskiy (1966), pero el coeficiente A es:

$$A = \left[\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)\right]^k$$

Ecuación 5-35

Con

Γ : Función Gamma.

Donde

$$\Gamma : [0, \infty] \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

Ecuación 5-36

Nueva modificación de la distribución de Glukhovskiy 1996

Klopman (1996) presenta una nueva modificación a la distribución de Glukhovskiy, donde normaliza las alturas $\frac{H}{H_{rms}}$, usando la altura cuadrática media en vez de la altura media.

La función de distribución acumulada es:

$$F_{\underline{H}}(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = 1 - \exp\left(-A \left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^{k^*}\right)$$

Ecuación 5-37

En la distribución, Klopman modifica el exponente \bar{d} , en base a la altura cuadrática media.

$$d^* = \frac{H_{rms}}{d}$$

Ecuación 5-38

El exponente k , se modifica agregando un coeficiente β , por lo que el nuevo exponente k^* :

$$k^* = \frac{2}{1 - \beta d^*}$$

Ecuación 5-39

El coeficiente $\beta = 0.7$, encontrado en un estudio hecho por Klopman y Stive (1989), con datos de laboratorio. Esto conlleva a la relación del coeficiente A y k^* :

$$A = \left[\Gamma \left(\frac{2}{k^*} + 1 \right) \right]^{\frac{k^*}{2}}$$

Ecuación 5-40

Distribución de alturas de olas de Battjes y Groenendijk 2000

Battjes y Groenendijk plantean una nueva distribución compuesta de Weibull para alturas de olas. En el caso de alturas de olas pequeñas utiliza la distribución Rayleigh y para alturas de olas altas ocupa la distribución de Weibull (Mai, et. al,2010). La distribución compuesta de Weibull es la siguiente:

$$P(H) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{H^2}{H_1^k}\right) & H \leq H_{tr} \\ \exp\left(\frac{H^k}{H_{tr}^{k-2} H_1}\right) & H \geq H_{tr} \end{cases}$$

Ecuación 5-41

Donde

1 : Parámetro perteneciente al tramo de la distribución de Rayleigh.

k : Parámetro perteneciente al tramo de la distribución de Weibull.

H_{tr} : Altura de ola transitoria.

La altura de ola transitoria está definida en función de la profundidad d y la pendiente de la playa α .

$$H_{tr} = (\beta_{tr,1} \beta_{tr,2} \tan \alpha) d$$

Ecuación 5-42

Lo parámetros $\beta_{tr,1}$ y $\beta_{tr,2}$ son definidos mediante experimento de laboratorio propuesto por Battjes y Groenendijk (2000).

Con

$$k = 3,66$$

Ecuación 5-43

$$\beta_{tr,1} = 0,35$$

Ecuación 5-44

$$\beta_{tr,2} = 5,8$$

Ecuación 5-45

5.2.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS PERÍODOS

Las diferentes distribuciones de los períodos de olas derivan de una distribución conjunta de período y altura de ola ($H - t$) (Silva, 2005).

Algunas distribuciones de períodos de ola son:

- Distribución de Bretschneider (1959)

$$p(T) = 2.7 \frac{T^3}{\bar{T}^4} \exp^{-0.675 \left(\frac{T}{\bar{T}}\right)^4}$$

Ecuación 5-46

- Distribución de Longuet-Higgins (1975)

$$p(T) = \frac{v^2 T_{01}^2}{2(v^2 T_{01}^2 + (T - T_{01})^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Ecuación 5-47

- Distribución de Longuet-Higgins (1983)

$$p(T) = \frac{L(v)\bar{T}}{2vT^2} \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{\bar{T}}{T} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}$$

Ecuación 5-48

$$\bar{T} = T_{01} = \frac{m_0}{m_1}$$

Ecuación 5-49

$$L(v) = \frac{1}{\frac{1}{2} \left[1 + (1+v^2)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Ecuación 5-50

Donde:

T : Período

v : Anchura espectral.

5.3 RELACIÓN ALTURA SIGNIFICATIVA ESTADÍSTICA VERSUS ALTURA ESPECTRAL

Las relaciones entre los parámetros de altura y la energía de las olas en aguas profundas han sido ampliamente estudiadas y son suficientemente precisas para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, las relaciones en aguas muy poco profundas donde los perfiles de ola difieren de las ondas sinusoidales, no están bien establecidas. Thompson y Vincent (1985) investigaron cómo varía la relación entre la altura significativa y la altura espectral en aguas poco profundas cerca de la rotura, proponiendo:

$$\left(\frac{H_s}{H_{mo}}\right)_{m\acute{a}x} = \exp\left(-0,02289\left(\frac{d}{gTp^2}\right)^{-0,43642}\right)$$

Ecuación 5-51

Donde

$\left(\frac{H_s}{H_{mo}}\right)_{m\acute{a}x}$: valor máximo de la relación altura significativa H_s versus altura espectral H_{mo} .

La ecuación 5-51 es válida para los valores máximos de la relación, ahora para los valores promedio se presenta la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{H_s}{H_{mo}}\right)_{promedio} = \exp\left(0,0029757\left(\frac{d}{gTp^2}\right)^{-0,720093}\right)$$

Ecuación 5-52

Donde:

H_s : Altura significativa o altura un tercio.

H_{mo} : Altura espectral.

Tp : Período peak.

d : Profundidad.

$\left(\frac{H_s}{H_{mo}}\right)_{promedio}$: valor central de la relación altura significativa H_s versus altura espectral H_{mo} .

Para condiciones de asomeramiento y antes de la rotura la relación $\frac{H_s}{H_{mo}}$ puede ser mayor a 1 y puede alcanzar valores de 1,3 a 1,5.

5.4 INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

Para la realización del presente estudio se utilizó un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) montado en el fondo marino y orientado hacia arriba para medir indirectamente la superficie del mar. Este instrumento tiene un sensor de presión para medir la profundidad del agua. El instrumento más utilizado en hoy en día es el ADCP Sentinel de Teledyne RD Instrument.

El ADCP tiene tres técnicas independientes para procesar las olas:

- La velocidad orbital, que utiliza el principio físico del efecto *Doppler* para medir, mediante el cálculo del tiempo que demora en ir y volver una señal a frecuencia constante.
- El *surface tracking*, que utiliza una medición directa de la superficie y no depende de la frecuencia, excepto para la resolución de la eco localización de la superficie. Mide la distancia desde el instrumento hasta la superficie usando el principio de ecosonda.
- El sensor de presión (técnica tradicional), que mide la presión de la columna de agua. Este está limitado debido a que la medición debe realizarse en la parte inferior.

En la imagen 5-15 se presenta un ejemplo de los ADCP's utilizados en las mediciones utilizadas en la memoria.



Figura 5-15: ADCP "Sentinel" de Teledyne RD Instrument
(Fuente: Elaboración propia)

Las especificaciones técnicas del ADCP utilizado en las mediciones son las se muestran en la figura 5-16.

Workhorse Sentinel

Self-Contained 1200, 600, 300 kHz ADCP



TECHNICAL SPECIFICATIONS

Water Profiling	Depth Cell Size ¹	Typical Range ² 12m 1200kHz		Typical Range ² 50m 600kHz		Typical Range ² 110m 300kHz	
		Vertical Resolution	Range ³	Std. Dev. ⁴	Range ³	Std. Dev. ⁴	Range ³	Std. Dev.^{4}
	0.25m	11m	14.0cm/s				
	0.5m	12m	7.0cm/s	38m	14.0cm/s	see note 1	
	1m	13m	3.6cm/s	42m	7.0cm/s	83m	14.0cm/s
	2m	15m ²	1.8cm/s	46m	3.6cm/s	93m	7.0cm/s
	4m	see note 1		51m ²	1.8cm/s	103m	3.6cm/s
	8m					116m ²	1.8cm/s
Long Range Mode	2m	19m	3.4m/s				
	4m			66m	3.6cm/s		
	8m					154m	3.7cm/s
Profile Parameters	Velocity accuracy	0.3% of the water velocity relative to ADCP ±0.3cm/s		0.3% of the water velocity relative to ADCP ±0.3cm/s		0.5% of the water velocity relative to ADCP ±0.5cm/s	
	Velocity resolution	0.1cm/s		0.1cm/s		0.1cm/s	
	Velocity range:	±5m/s (default) ±20m/s (max)		±5m/s (default) ±20m/s (max)		±5m/s (default) ±20m/s (max)	
	Number of depth cells	1-255		1-255		1-255	
	Ping rate	Up to 10Hz		Up to 10Hz		Up to 10Hz	
Echo Intensity Profile	Vertical resolution			Depth cell size, user configurable			
	Dynamic range			80dB			
	Precision			±1.5dB			
Transducer and Hardware	Beam angle			20°			
	Configuration			4-beam, convex			
	Internal memory			Two PCMCIA card slots; one memory card included			
	Communications			RS-232 or RS-422; ASCII or binary output at 1200-115,200 baud			
Power	DC input			20-50VDC			
	Number of batteries			1 internal battery pack			
	Internal battery voltage			42VDC (new) 28VDC (depleted)			
	Battery capacity @ 0°C			450 watt hrs			
Standard Sensors	Temperature (mounted on transducer)			Range -5° to 45°C, Precision ±0.4°C, Resolution 0.01°			
	Tilt			Range ±15°, Accuracy ±0.5°, Precision ±0.5°, Resolution 0.01°			
	Compass (fluxgate type, includes built-in field calibration feature)			Accuracy ±2°, Precision ±0.5°, Resolution 0.01°, Maximum tilt ±15°			
Environmental	Standard depth rating			200m; optional to 500m, 1000m, 6000m			
	Operating temperature			-5° to 45°C			
	Storage temperature (without batteries)			-30° to 60°C			
	Weight in air			13.0kg			
	Weight in water			4.5kg			
Software	TRDI's Windows™-based software included: WinSC —Data Acquisition System; WinADCP —Data Display and Export						
Available Options	<ul style="list-style-type: none"> • Memory: 2 PCMCIA slots, total 4GB • Pressure sensor • External battery case • High-resolution water-profiling modes • Bottom tracking or surface referencing track • AC/DC power converter, 48VDC output • Pressure cases for depths up to 6000m • Directional Wave Array • Acoustic Modem • Inductive Modem • Velocity for advanced post processing 						
Dimensions	228.0mm wide x 405.5mm long (<i>line drawings available upon request</i>)						

¹ User's choice of depth cell size is not limited to the typical values specified.
² Longer ranges available.
³ Profiling range based on temperature values at 5°C and 20°C, salinity = 35ppt.
⁴ BroadBand mode single-ping standard deviation (Std. Dev.)
⁵ <±1.0° is commonly achieved after calibration.

Figura 5-16: Especificaciones técnicas ADCP "Sentinel" de Teledyne RD Instrument
(Fuente: Teledyne Marine, s.f.)

Para la extracción de datos del ADCP se utiliza un software llamado Wavesmon (figura 5-17), que recopila y procesa datos de olas en tiempo real. Wavesmon utiliza procesamiento de matrices y puede distinguir oleaje en múltiples direcciones (Teledyne Marine, s.f.).

Las aplicaciones de Wavesmon incluyen:

- Protección costera e ingeniería.
- Diseño y operación de puertos.
- Monitoreo ambiental.
- Industria petrolera (plataformas petrolíferas, terminales de GNL, etc.).

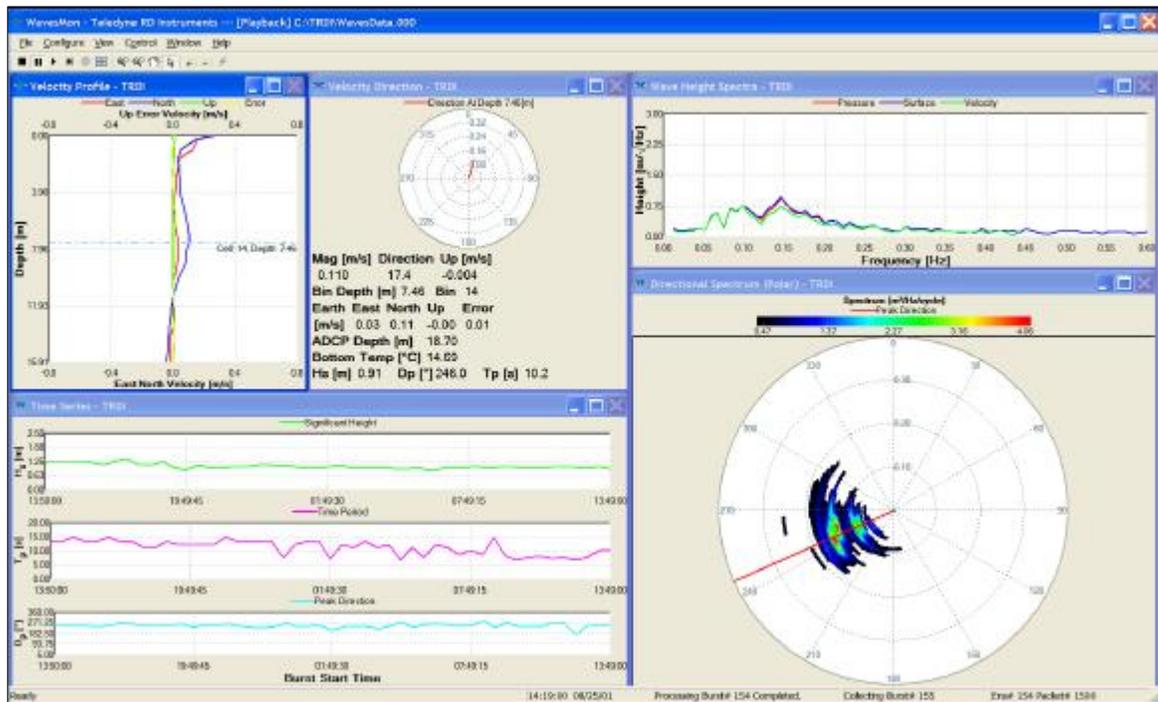


Figura 5-17: Software Wavesmon de Teledyne RD Instrument

(Fuente: Teledyne Marine, s.f.).

6 METODOLOGÍA

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

Para la caracterización probabilística del oleaje en el litoral continental de Chile central, se utilizaron series de tiempo provenientes de 11 campañas de mediciones por medio de un ADCP para diversos proyectos de ingeniería marítima, realizados entre los años 2012 y 2017.

En la figura 6-1 se visualizan las posiciones de los ADCP's a lo largo de Chile.

Las localidades estudiadas son: Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera.

A continuación, en las figuras 6-2 y 6-3 se presenta una breve descripción de cada zona estudiada.

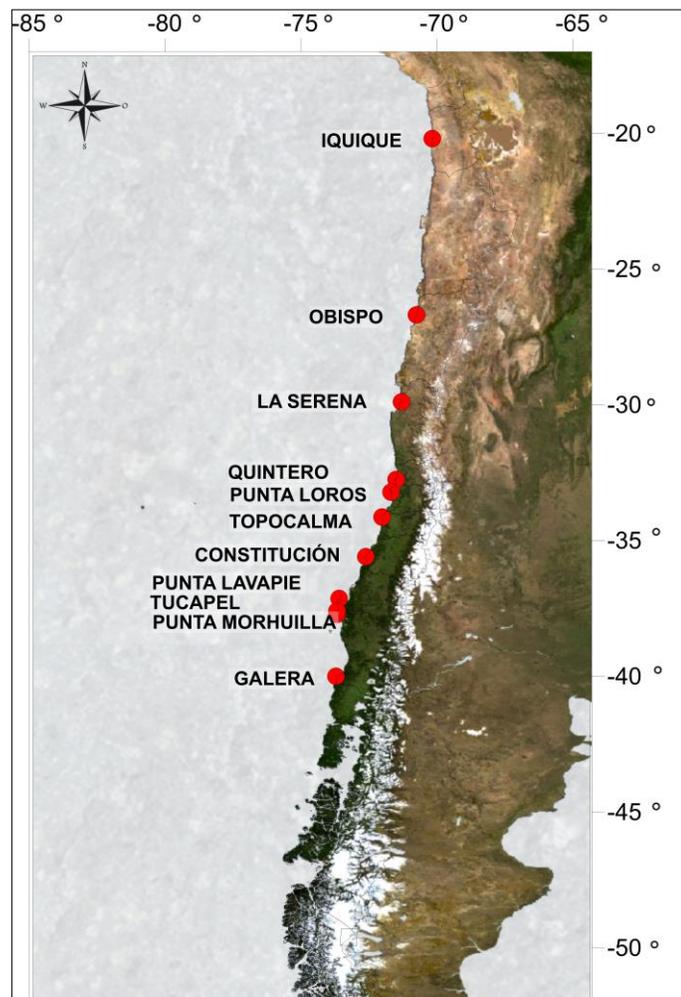


Figura 6-1: Mapa de posiciones de ADCPs

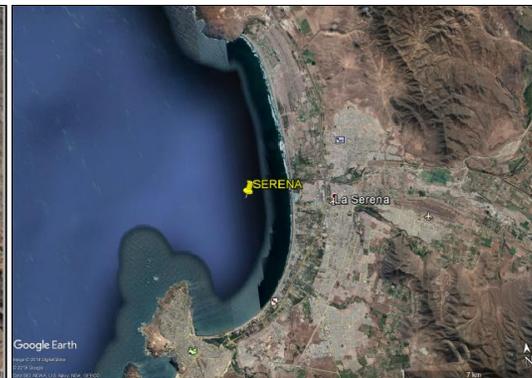
(Fuente: Elaboración propia)



Iquique: Ubicado en la comuna de Iquique, clima desértico, el turismo de esa zona se destaca por su zona franca y grandes balnearios.



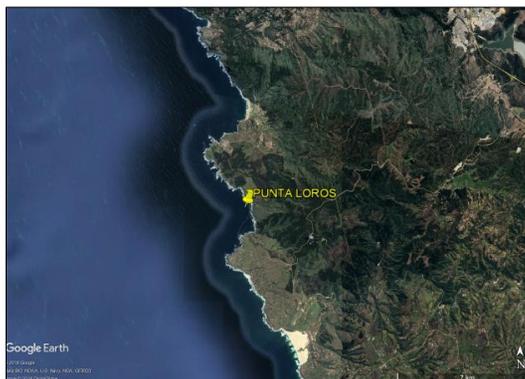
Obispo: Ubicado en la comuna de Caldera, clima desértico, el turismo se destaca por playas de arena blanca y agua turquesa.



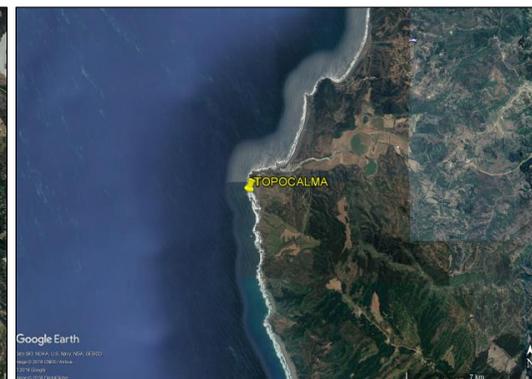
La Serena: Ubicado en la comuna del Norte Chico de Chile, clima de transición entre desértico y templado, el turismo se destaca por ser la "Ciudad de los Campanarios".



Quintero: Ubicado en la comuna de Quintero, de clima templado, el turismo se destaca por amplias playas y zona industrial.

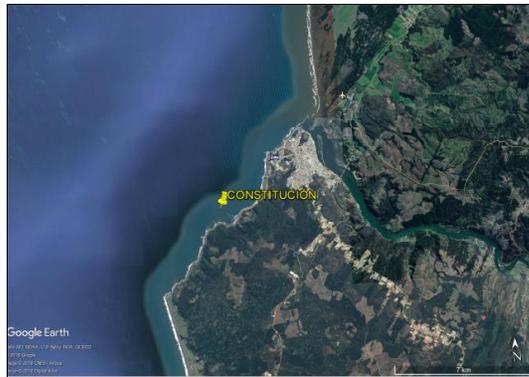


Punta Loros: Ubicado en la provincia de Valparaíso, clima templado, el turismo se destaca por playas especiales para desarrollar deportes acuáticos como el surf.

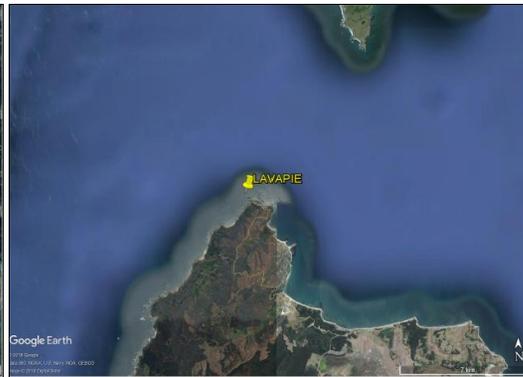


Topocalma: Ubicado en la comuna de Litueche, clima templado, el turismo se destaca por playas con vientos fuertes especial para deportes acuáticos como el windsurf.

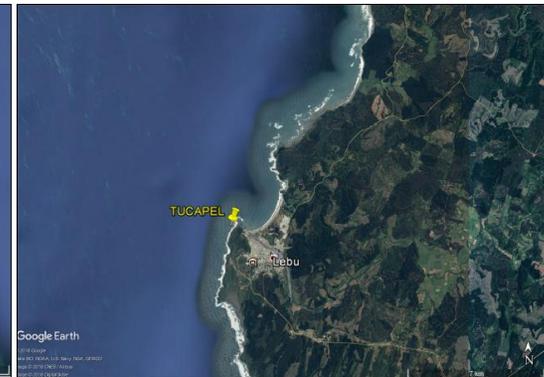
Figura 6-2: Acercamiento y descripción de ADCPs
(Fuente: Elaborada por Google Earth Pro)



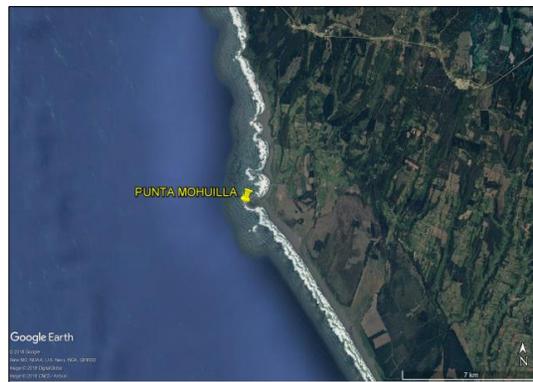
Constitución: Ubicado en la provincia de Talca, el clima es del tipo Mediterráneo, el turismo se destaca por tener bellas playas de arena negra con formaciones rocosas.



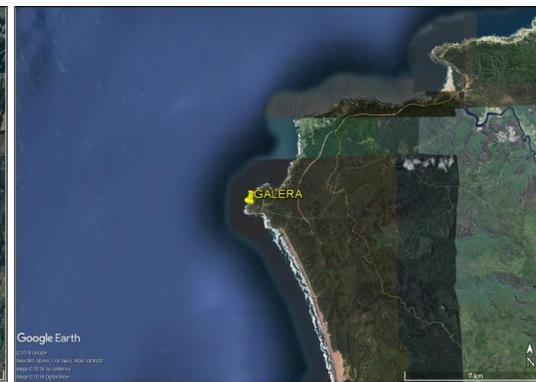
Punta Lavapié: Ubicado en la comuna de Arauco, el clima templado mediterráneo cálido y un clima templado húmedo o lluvioso, el turismo se destaca por playas con arenas finas y una caleta de pescadores artesanales.



Tucapel: Ubicado en la comuna de Tucapel, el clima es templado cálido y lluvioso, el turismo se destaca por balnearios Cholguán (Itata), Laja y Huépil y lagunas.



Punta Morhuilla: Ubicado en la comuna de Lebu, el clima templado cálido y lluvioso, el turismo se destaca por extensas dunas y playas.



Galera: Ubicado en la comuna de Corral, el clima es templado lluvioso, el turismo se destaca por grandes sectores de roqueríos.

Figura 6-3: Acercamiento y descripción de ADCPs
(Fuente: Elaborada por Google Earth Pro)

6.2 DATOS DISPONIBLES

En la ficha técnica resumida en la tabla 6-1 se presenta cada localidad con su respectiva región, posición de la instalación ADCP, fecha de inicio y término de cada campaña de medición, profundidad de medición y sus respectivos estados de mar. La cantidad de estados de mar analizados fueron 10 388, dando como resultado un total de 23 605 248 datos de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas.

Tabla 6-1: Ficha técnica

Localidad	Región	Coordenadas		Fecha campaña			Estados de mar	Profundidad medición (m)
		Latitud	Longitud	Inicio	Término	Estación		
Iquique	Tarapacá	20°12'15.96"S	70°09'53.19"O	21/08/2017	26/09/2017	Invierno	248	19.2
Obispo	Atacama	26°41'41.72"S	70°45'08.76"O	03/02/2015	17/03/2017	Verano	250	11.6
La Serena	Coquimbo	29°53'55.09"S	71°17'56.05"O	06/08/2012	06/09/2012	Invierno	245	21.3
Quintero	Valparaíso	32°45'41.01"S	71°29'50.00"O	06/03/2012	10/04/2012	Verano-Otoño	395	18.6
Punta Loros	Valparaíso	33°13'23.03"S	71°41'06.14"O	07/01/2013	26/03/2013	Verano	1576	17.4
Topocalma	O'Higgins	34° 8'31.60"S	72°00'37.17"O	10/09/2012	04/01/2013	Invierno	1001	15.6
Constitución	Maule	35°21'09.00"S	72°27'49.00"O	31/10/2013	21/12/2013	Primavera	1175	18
Punta Lavapié	Bio-Bio	37° 8'40.01"S	73°35'21.00"O	14/01/2013	06/03/2013	Verano	1207	18.8
Tucapel	Bio-Bio	37°35'39.99"S	73°40'22.00"O	02/04/2013	16/06/2013	Invierno	1739	17.1
Punta Morhuilla	Bio-Bio	37°43'34.01"S	73°39'59.99"O	10/01/2013	01/04/2013	Verano	1749	16.8
Galera	Los Lagos	40° 0'21.99"S	73°42'24.98"O	09/02/2013	16/03/2013	Verano	803	19.3

(Fuente: Elaboración propia)

6.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

A modo de representar los procedimientos realizados, se elaboró un diagrama de flujo (figura 6-4), en el que se indican tres componentes principales:

1. Procesamiento de datos mediante el programa Wavesmon.
2. Control de calidad aplicado a los datos.
3. Análisis de datos.

A partir de las mediciones de campo, se adquirieron series de tiempo de desnivelaciones instantáneas en cada una de las estaciones de monitoreo. En dicho diagrama de flujo se representa en color verde el re-procesamiento de datos mediante el software Wavesmon. En color rojo se representan los procesos desarrollados para el control de calidad y análisis de datos.

El control de calidad fue una de las actividades fundamentales del estudio y se realizó sobre todas las mediciones oceanográficas. Las mediciones, como se afirmó previamente, están sujetas a errores debido a factores externos al instrumento, mal funcionamiento del instrumento o una incorrecta extracción de datos desde el programa Wavesmon. El control de calidad aplicado consiste en los siguientes pasos:

- Inspección visual a los datos extraídos de Wavesmon.
- Corrección de valores inexistentes o *Gaps*.
- Corrección de valores anómalos o *Outliers*.
- Corrección de la desnivelación.
- Selección de transductor con mayor porcentaje de datos existentes.

El análisis de datos fue primordial en este estudio, debido a que determinó si las desnivelaciones se distribuyen en concordancia con lo establecido en la literatura. En el análisis de las alturas de ola se verificó que la distribución de probabilidad corresponde a Rayleigh y Weibull, mientras que para los períodos se realizó un análisis de sensibilidad de las formulaciones de densidad de Bretschneider (1959), Longuet-Higgins (1975) y Longuet-Higgins (1983). Se evaluó la densidad de Bretschneider (1959) con los datos reales de campo. En el análisis de la relación de altura significativa estadística versus altura espectral se verificó si la ecuación propuesta por Thompson y Vincent (1985) se ajusta a cada sector analizado.

Los procedimientos ejecutados en la metodología, se detallan en los siguientes subcapítulos:

- Procesamiento de datos ADCP (sección 6.3.1).
- Control de calidad (sección 6.3.2).
- Análisis de datos (sección 6.3.3).

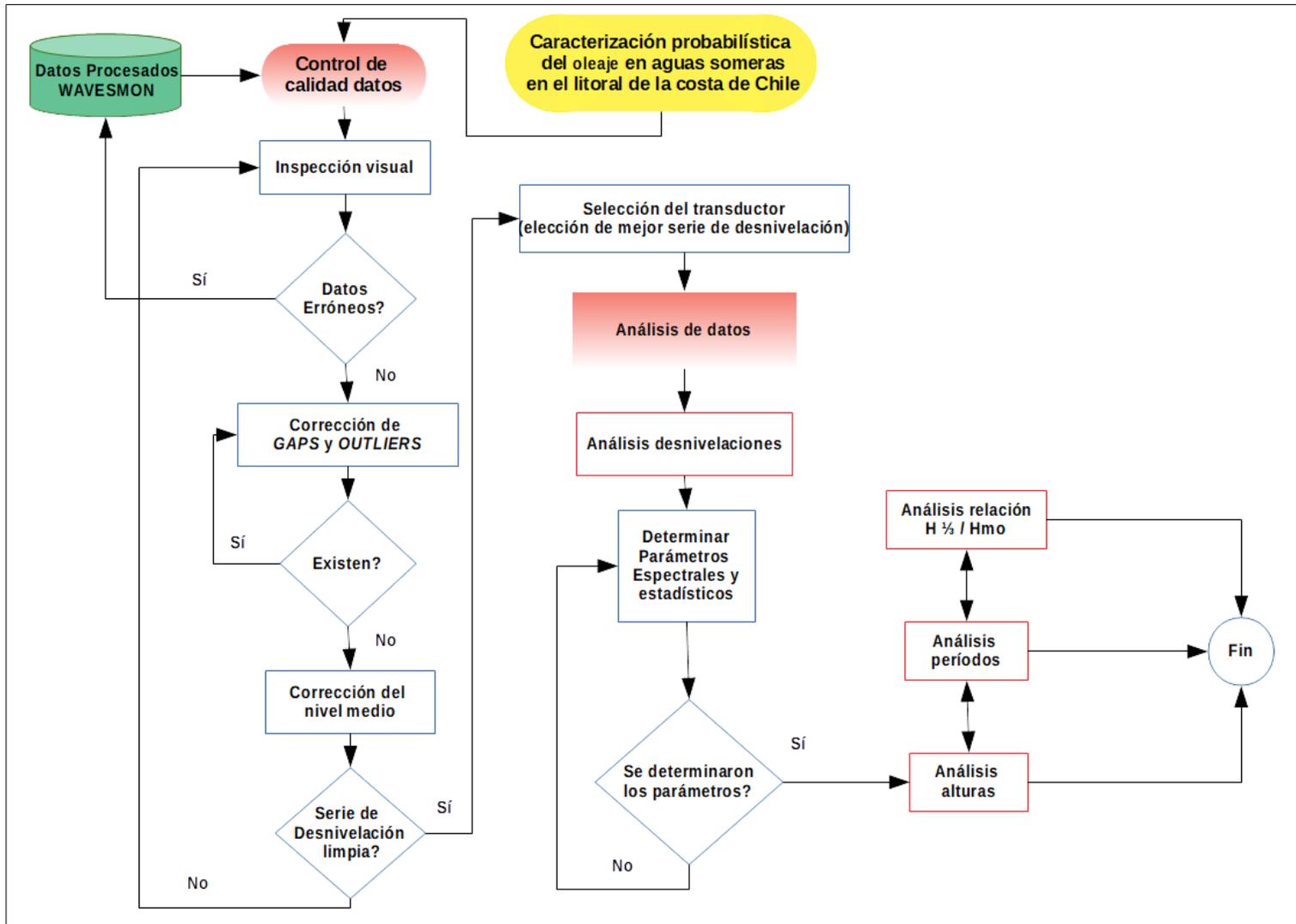


Figura 6-4: Diagrama de flujo metodología
(Fuente: Elaboración propia)

Para ejecutar los análisis descritos sobre la base de datos de cada una de las estaciones de monitoreo, se elaboró un conjunto de scripts en Matlab (*Matrix Laboratory*), debido a su facilidad de implementación para el procesamiento y visualización de los resultados. Algunas de las tareas se describen a continuación:

- Ingresar de datos provenientes del software Wavesmon que son entregados en archivos de texto por cada estado de mar. Estos datos contienen cuatro columnas, correspondientes a los cuatro transductores midiendo el oleaje. Los datos se ingresan al programa Matlab como variables para su posterior análisis.
- Reemplazar de valores inexistentes de la serie o datos que no fueron medidos por el ADCP, como NAN.
- Realizar la eliminación de datos anómalos, mediante un código de elaboración propia, que elimina datos que están fuera de tres desviaciones estándar a partir del promedio de las desnivelaciones.
- Realizar la eliminación de estados de mar que no fueron medidos por el instrumento, de los cuales el archivo de texto no contiene mediciones.
- Generar gráficos de: series de desnivelación instantáneas, corrección de valores anómalos, transductor con mejor señal, entre otros que se presentan en los siguientes subcapítulos.
- Generar un código para calcular parámetros estadísticos y parámetros espectrales.
- Programación para relacionar series de tiempo de desnivelaciones instantáneas con la distribución Normal, alturas de olas relacionadas con la distribución Rayleigh y Weibull.
- Analizar los períodos, mediante la función de distribución de períodos de Bretschneider con los datos medidos y sensibilidad de las ecuaciones presentadas en el marco teórico.
- Analizar la relación entre la altura significativa versus la altura espectral de datos en aguas someras propuesta por Thompson y Vincent.

A continuación, se describen las tareas realizadas en el software Matlab, en orden de prioridad, a través de un diagrama de bloque de la figura 6-5. Los procedimientos realizados se detallan en los siguientes subcapítulos.

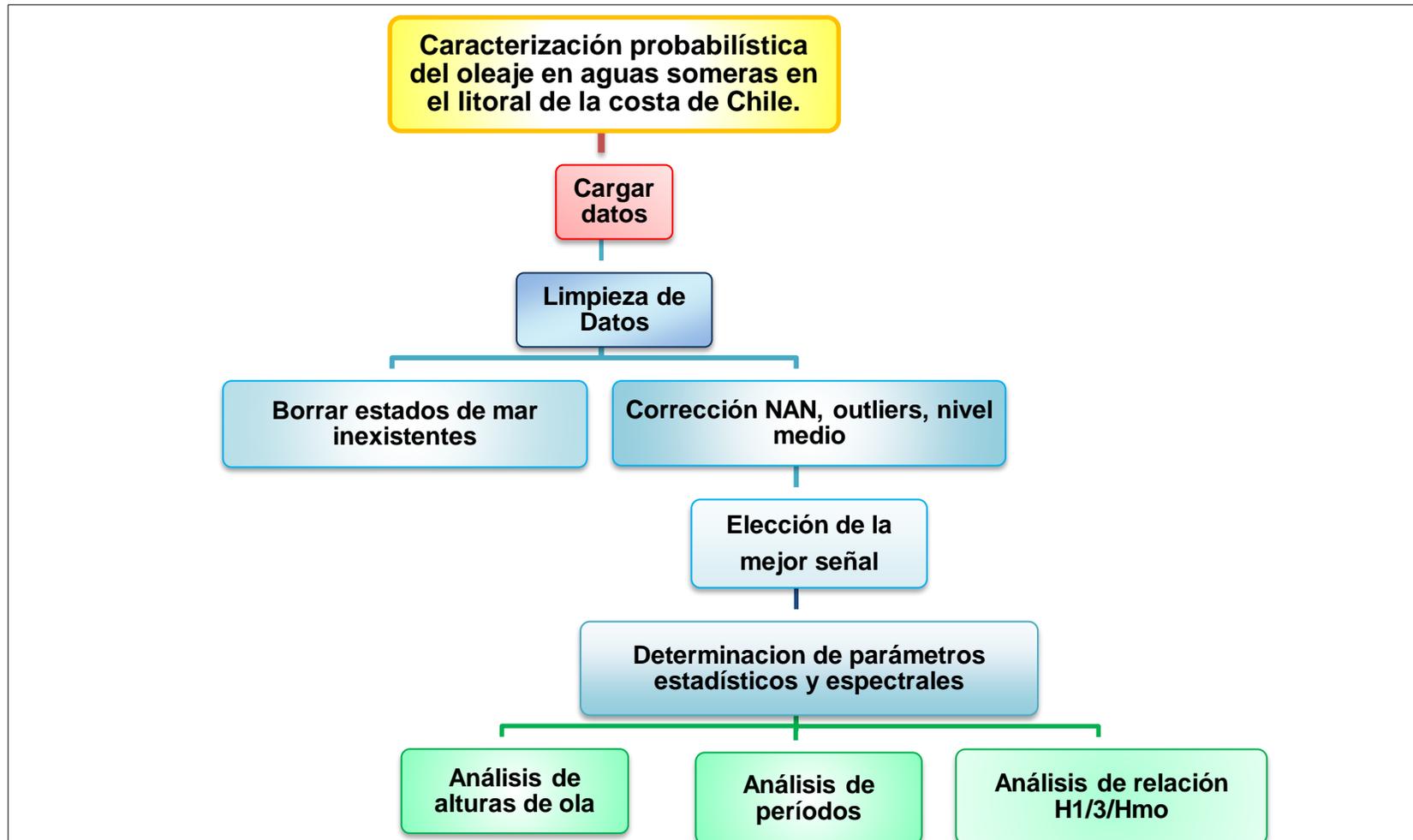


Figura 6-5: Diagrama de caja software Matlab
(Fuente: Elaboración propia)

6.3.1 PROCESAMIENTO DE DATOS ADCP

Las mediciones oceanográficas fueron obtenidas de un ADCP instalado por terceros y que fueron procesadas por el autor mediante el programa Wavesmon, siguiendo la guía de usuario (Teledyne Rd Instrument, 2008). Se realizó un reprocesamiento del archivo "nombre.000", adquirido del ADCP, del cual se obtienen: series de tiempo de desnivelaciones instantáneas de oleaje, parámetros de resumen de alturas de ola y período, espectros de oleaje, entre otros. Los cuales fueron utilizados en los análisis de los siguientes subcapítulos.

6.3.2 CONTROL DE CALIDAD

En toda medición oceanográfica el registro puede presentar anomalías, debido a factores externos del instrumento o un mal funcionamiento. De esto nació la importancia de realizar un control de calidad a los datos.

El control de calidad se realizó en tres fases: la primera correspondió a una inspección visual de los registros de las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas. La segunda correspondió a las correcciones en el registro, que pueden ser: nivel medio, valores inexistentes y valores anómalos. La tercera fase correspondió a la selección de la mejor señal con respecto a los cuatro transductores existentes para el estudio de las alturas.

6.3.2.1 INSPECCIÓN VISUAL

Se realizó una inspección visual de las desnivelaciones por cada estado de mar y en cada uno de los cuatro transductores. Los errores instrumentales que se inspeccionaron visualmente se muestran en la figura 6-6 con sus letras correspondientes, cuyo significado se describe a continuación:

- A) Mala estimación de la desnivelación con valores muy pequeños y lejos de la media.
- B) Repitencia de valores visualizados en forma de recta.
- C) Presentación de un desnivel o cambio de nivel en el valor central de la medición.
- D) Existencia de saltos (*Gaps*) o datos anómalos (*Outliers*) en las mediciones.

Al encontrar errores significativos en la medición de series de tiempo de desnivelación, se descartó la medición.

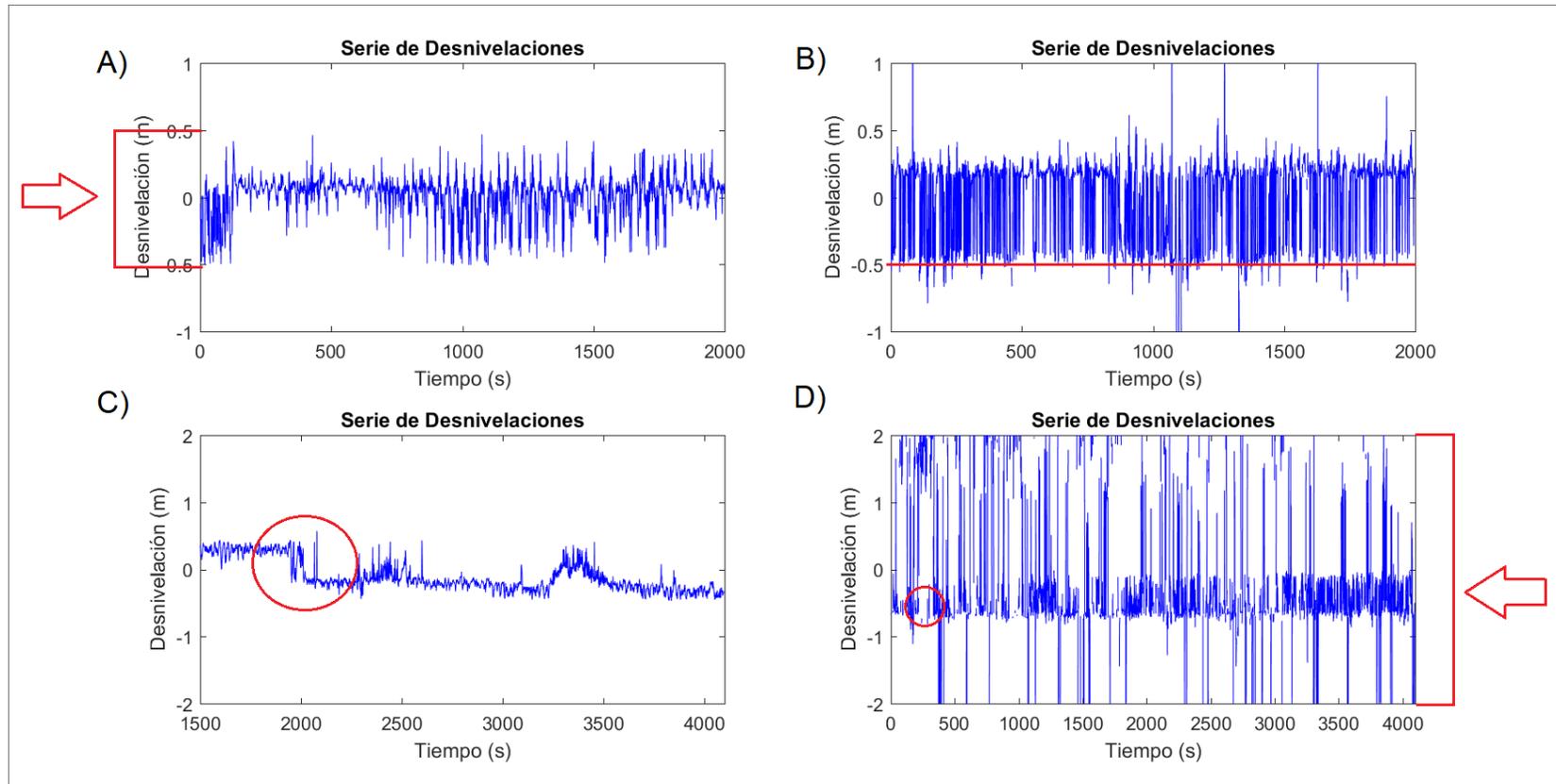


Figura 6-6: Desnivelación con errores en la medición
(Fuente: Elaboración propia)

6.3.2.2 CORRECCIÓN VALORES INEXISTENTES O GAPS

Corresponden a puntos en donde falta información debido a la pérdida del registro por parte del instrumento, desperfectos técnicos u otra fuente de error. En la figura 6-7 se pueden ver *gaps* con círculos rojo, que corta la serie.

Una forma de corregir la serie de desnivelación instantánea es interpolar los valores existentes y rellenar la información faltante. En el caso de este estudio, no se aplicó dicho método. Por otra parte, en los casos que presentaron gran cantidad de valores inexistentes se descartó el *burst* o estado de mar del estudio.

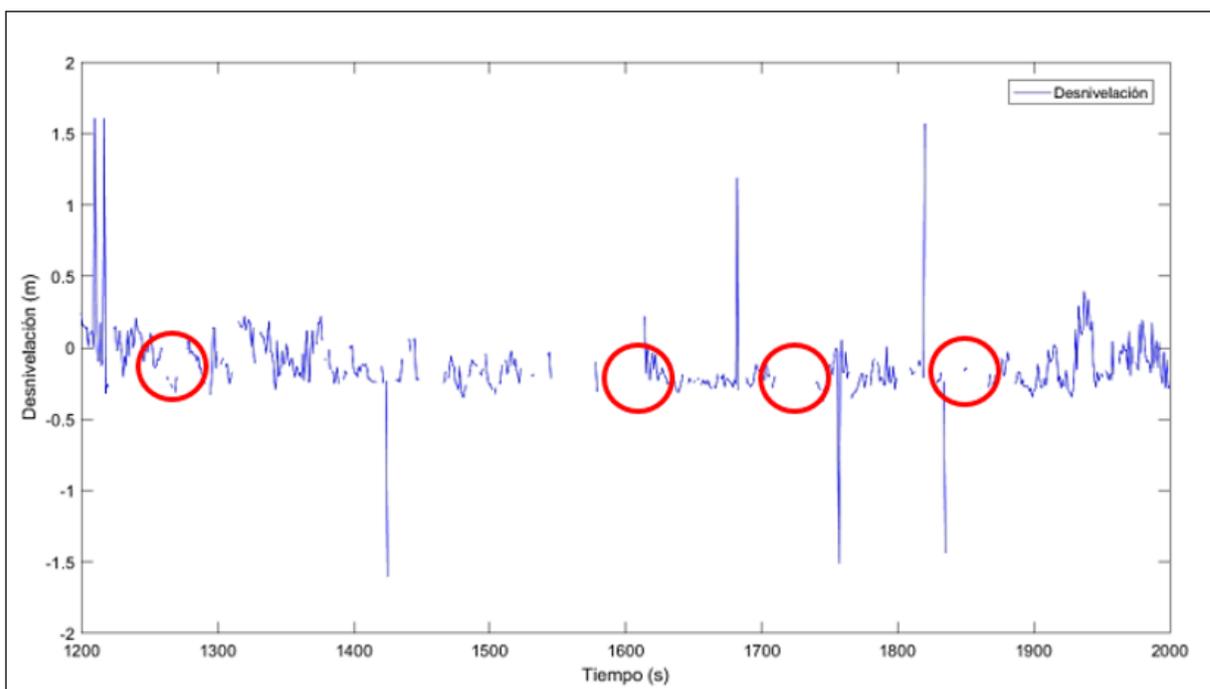


Figura 6-7: Valores inexistentes en la medición.

(Fuente: Elaboración propia)

6.3.2.3 CORRECCIÓN VALORES ANÓMALOS O OUTLIERS

Se analizó el comportamiento de los datos de la serie de desnivelación, eliminando los datos anómalos de acuerdo a diferentes criterios a partir de la desviación típica, como se muestra en la figura 6-8.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\eta_j - \bar{\eta})^2}{N}}$$

Ecuación 6-1

Con

S : Desviación típica

η_j : Desnivelación en $j = 1, 2, \dots, N$

$\bar{\eta}$: Promedio de las desviaciones

N : Total de desnivelaciones

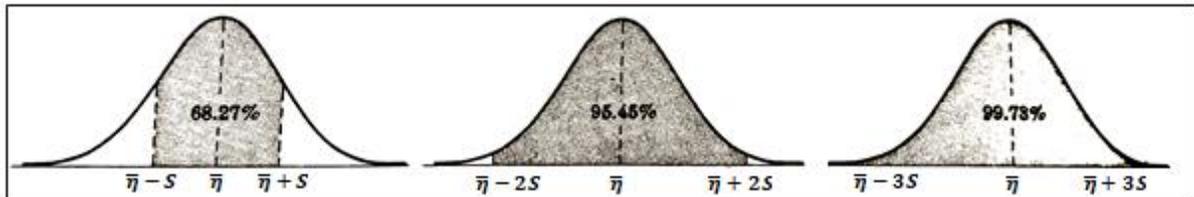


Figura 6-8: Distribución de probabilidad alrededor de la media

(Fuente: Spiegel, 1970)

Se utilizó el criterio de eliminar los valores anómalos fuera del rango promedio \pm tres desviaciones estándar, quedando el 99.73% de los casos dentro de la normalidad de la muestra (figura 6-9).

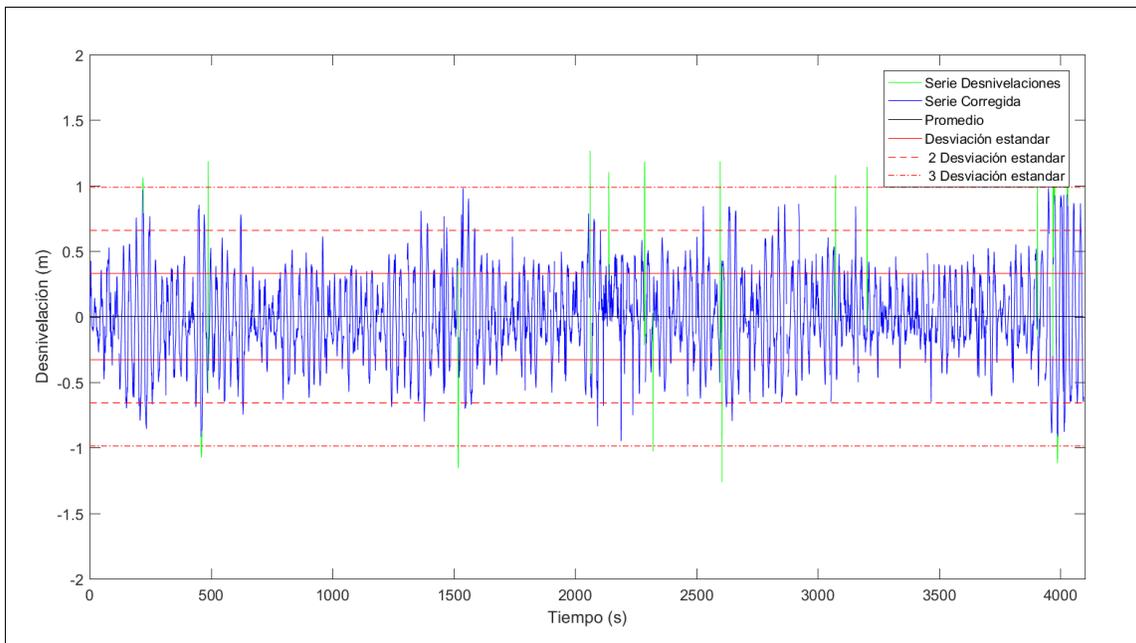


Figura 6-9: Filtro de datos anómalos de la serie de desnivelaciones. La serie bruta de desnivelación se presenta en color verde y la serie corregida sin los valores anómalos es de color azul. Las líneas de color rojo representan los porcentajes de casos: línea recta al 68.28%, línea segmentada al 95.45%, y línea punteada-segmentada 99.73% de los datos contenidos dentro de la normalidad de la serie de desnivelaciones.

(Fuente: Elaboración propia)

6.3.2.4 CORRECCIÓN DEL NIVEL MEDIO

Para evitar errores en el análisis estadístico temporal de la muestra, se realizó una corrección con respecto a la media de los datos y la eliminación de la tendencia. Debido a que el oleaje está influenciado por mareas y ondas largas, es necesario realizar ambas correcciones de dichos niveles para evitar distorsión en la señal.

En primer lugar, se realizó la corrección del nivel medio calculando la media aritmética y restándola al dato original de la desnivelación por cada estado de mar y para cada transductor.

Se utilizó la siguiente fórmula para su cálculo:

$$\eta_{corregida} = \eta_{original} - \bar{\eta}$$

Ecuación 6-2

La figura 6-10 presenta un ejemplo de la corrección aplicada a una serie de tiempo de desnivelación instantánea. La serie de color azul representa a la desnivelación sin la corrección, en el recuadro de color negro aparece el promedio de la desnivelación sin corregir y la serie de color rojo representa la corrección de la desnivelación.

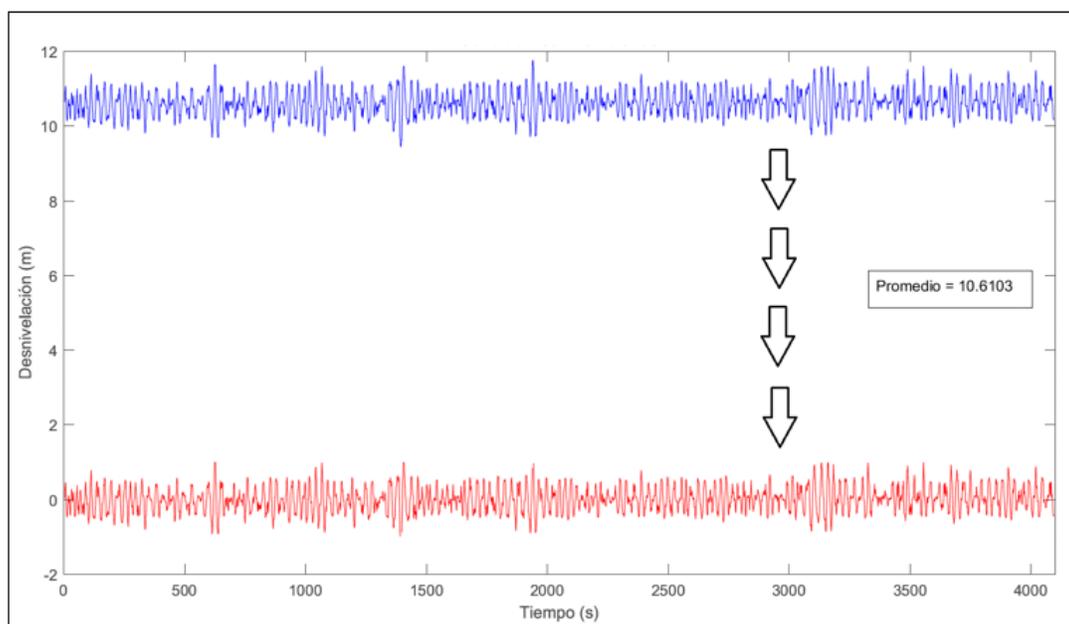


Figura 6-10: Ejemplo corrección del nivel medio de la desnivelación
(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar y sucesivamente, se realizó la corrección del tipo parabólica a la serie corregida anteriormente. Este tipo de corrección utiliza la técnica de mínimos cuadrados para eliminar el efecto de ondas de más largo período y es utilizado cuando no se conoce bien el tipo de mecanismo que genera la variación del nivel. Para esto se siguió la metodología para el análisis temporal del oleaje propuesto por Silva (2005).

La siguiente figura 6-11 muestra una clara tendencia positiva de la serie de desnivelación hacia los últimos estados de mar.

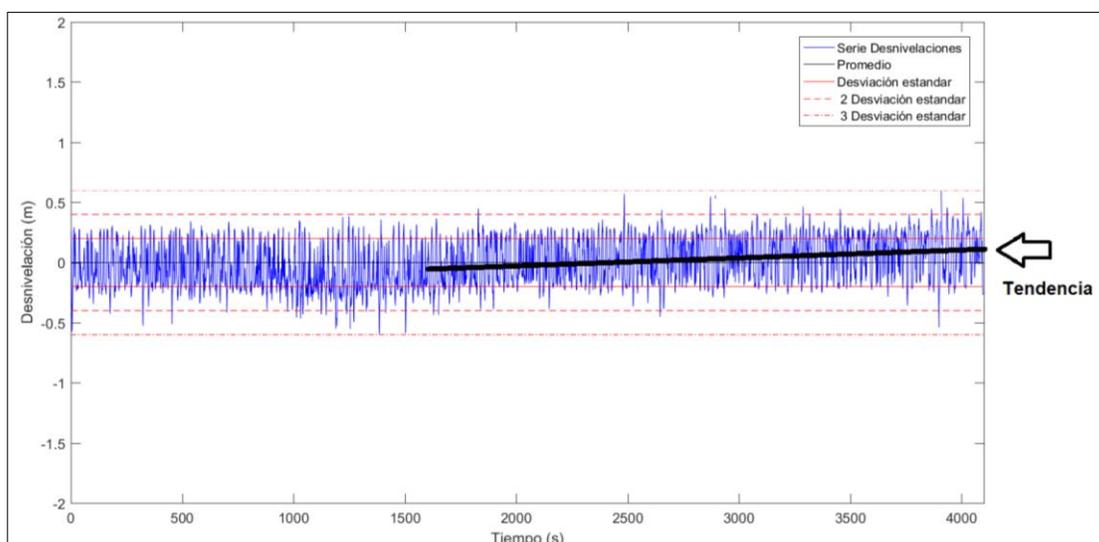


Figura 6-11: Ejemplo tendencia de la serie desnivelación
(Fuente: Elaboración propia)

Se utilizaron las siguientes fórmulas para su cálculo:

$$\bar{\eta}_n = B_0 + B_1 n + B_2 n^2 \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Ecuación 6-3

$$N_i = \sum_{n=1}^N n^i \quad Y_i = \sum_{n=1}^N n^i \eta_{original}$$

Ecuación 6-4

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_4 - N_3^2) + Y_1(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_2(N_1N_3 - N_2^2)]$$

Ecuación 6-5

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_1(N_0N_4 - N_2^2) + Y_2(N_1N_2 - N_0N_3)]$$

Ecuación 6-6

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_1N_3 - N_2^2) + Y_1(N_1N_2 - N_0N_3) + Y_2(N_0N_2 - N_1^2)]$$

Ecuación 6-7

$$\Delta = N_0N_2N_4 + 2N_1N_2N_3 - N_2^3 - N_0N_3^2 - N_1^2N_4$$

Ecuación 6-8

Donde

N : Número de puntos de la muestra.

n : Punto de la muestra.

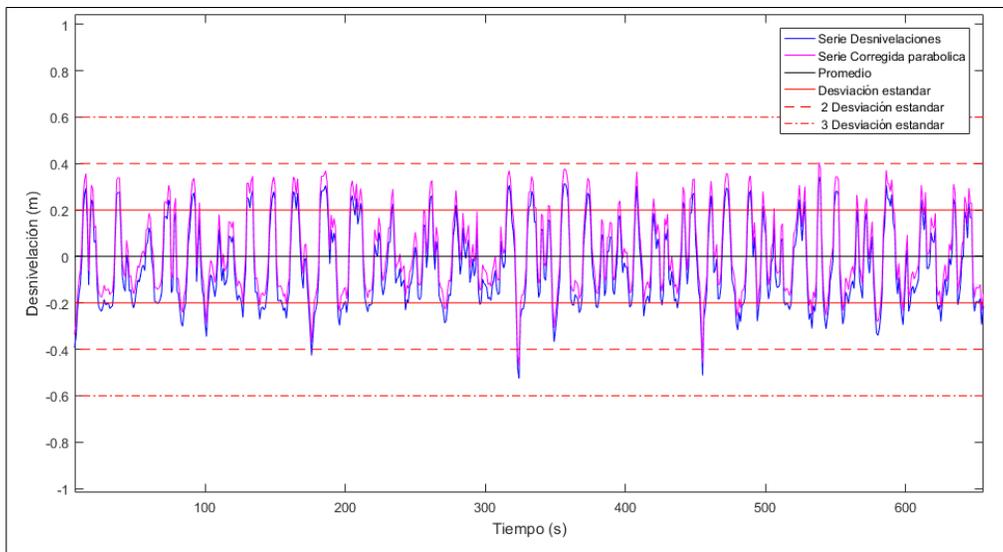


Figura 6-12: Ejemplo corrección parabólica de la serie desnivelación
(Fuente: Elaboración propia)

6.3.2.5 SELECCIÓN DE TRANSDUCTOR

Debido a que el ADCP modelo Sentinel de Teledyne RD Instrument mide a través de cuatro diferentes transductores, los sensores pueden tener una pérdida del registro o desperfecto por parte del instrumento. Es por esto que se analizó el porcentaje de datos existentes en cada transductor, utilizando la frecuencia relativa porcentual para su cálculo. Igualando la frecuencia absoluta fa , que corresponde a la cantidad de datos que existen en el transductor, dividido en el total de datos que debieran existir según el tiempo de medición N .

La ecuación utilizada para el cálculo de la frecuencia relativa es la siguiente:

$$fr = \frac{fa}{N}$$

Ecuación 6-9

Donde

fr : Frecuencia relativa porcentual.

fa : Frecuencia absoluta, corresponde al número de veces que aparece un valor.

N : Número total de datos.

Se puede visualizar en la figura 6-13 que el grafico que contenga más azul tiene una mejor confiabilidad, así a mayor porcentaje de datos existentes o sin errores, los que son seleccionados para trabajar en los siguientes procesos. Es decir que se le asigno un nombre a cada columna de datos que entrega el sensor de las series de desnivelación instantánea, para la primera columna del lado izquierdo se le asignó el nombre “transductor 1”, la segunda “transductor 2” y así sucesivamente.

En la figura 6-13, se presenta un ejemplo para la selección del mejor transductor, que en este caso correspondería al transductor 1, por contener el mayor porcentaje de datos.

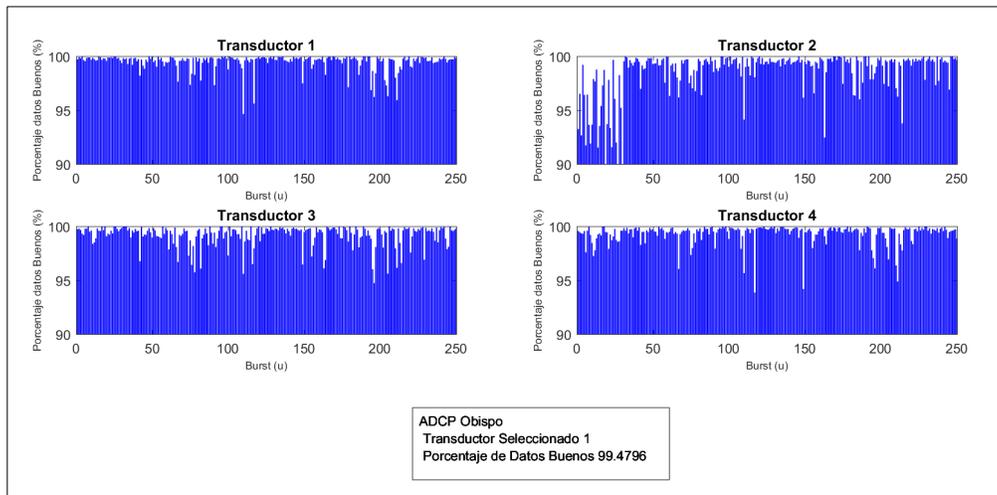


Figura 6-13: Ejemplo selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

A modo de resumir los gráficos anteriormente planteado, se presentó la tabla 7-1 donde resume y presenta cuantitativamente los porcentajes de datos existentes por transductor para cada localidad. Cabe destacar que los gráficos de barra se encuentran en el anexo para cada una de las localidades con las figuras 11-1, 11-14, 11-27, 11-40, 11-52, 11-65, 11-78, 11-91, 11-104, 11-116 y 11-129 con las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

6.3.3 ANÁLISIS DE DATOS

6.3.3.1 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO DE DESNIVELACIONES INSTANTÁNEAS

El análisis de los datos se inició con las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, asociándolas a una función de distribución Normal, según lo planteado en el marco teórico. Aunque dicha distribución no se puede asociar al 100%, ya que el oleaje se comporta de forma irregular, por lo que los efectos no lineales, como ondas de largo período, pueden estar presentes. Es por esto que, se asumió un proceso estocástico, estacionario, ergódico y Gaussiano de media cero (Silva, 2005).

Se utilizó la función de distribución de probabilidad Normal usada en el software Matlab, para relacionar los datos empíricos con la distribución, usando la siguiente ecuación:

$$f(\eta/\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\eta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Ecuación 6-10

Donde:

- η : Desnivelación instantánea.
- μ : mu, parámetro distribución Normal.
- σ : sigma, parámetro distribución Normal.

Entonces, para asociar las desnivelaciones a la distribución Normal, se utilizó el método gráfico de los papeles probabilísticos como se muestra en la figura 6-14, cuyo fundamento es asociar de forma sencilla el comportamiento de una muestra con respecto a una familia paramétrica de función de distribución. Representado mediante un gráfico bidimensional, donde en el eje de la ordenada (y) con $g_{(y)}$ representó la probabilidad empírica de los datos medidos y el eje de la abscisa (x) con $h_{(x)}$ representó la probabilidad Normal (según gráfico lado derecho de la figura 6-14), donde se puede obtener lo siguiente:

1. Parámetros μ y σ de la función de distribución Normal.
2. Ajuste lineal de la distribución Normal, mediante modelo de regresión clásica con su respectiva ecuación de ajuste, los coeficientes del ajuste lineal y coeficiente de determinación de la regresión.
3. Suma de errores al cuadrado con respecto al mejor ajuste.

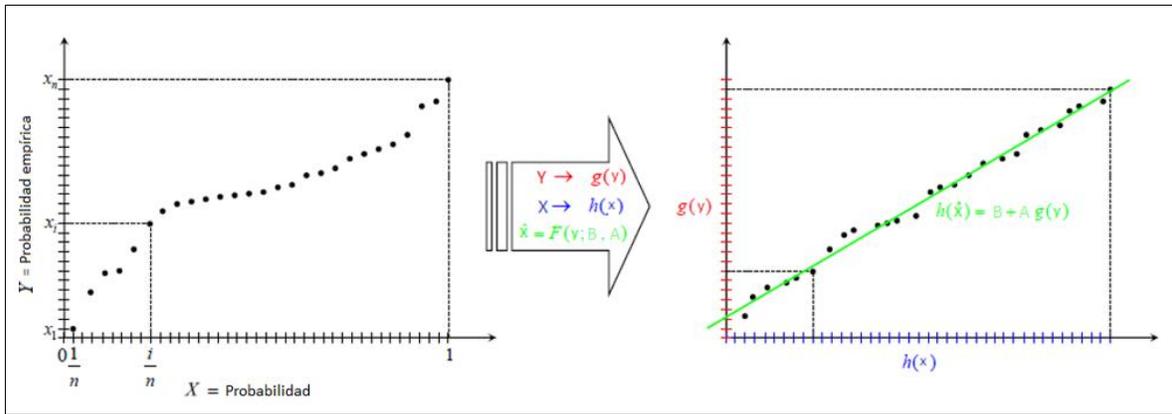


Figura 6-14: Método gráfico de los papeles probabilísticos (modificado) para la estimación de funciones de distribución. (Fuente: Sampetro, 2009).

Como primera parte se obtuvo el ajuste de la función de distribución Normal con sus respectivos coeficientes μ y σ de ajuste Normal, representados con un gráfico de histograma de frecuencia para cada coeficiente en cada uno de los estados de mar (figura 6-15 y 6-16).

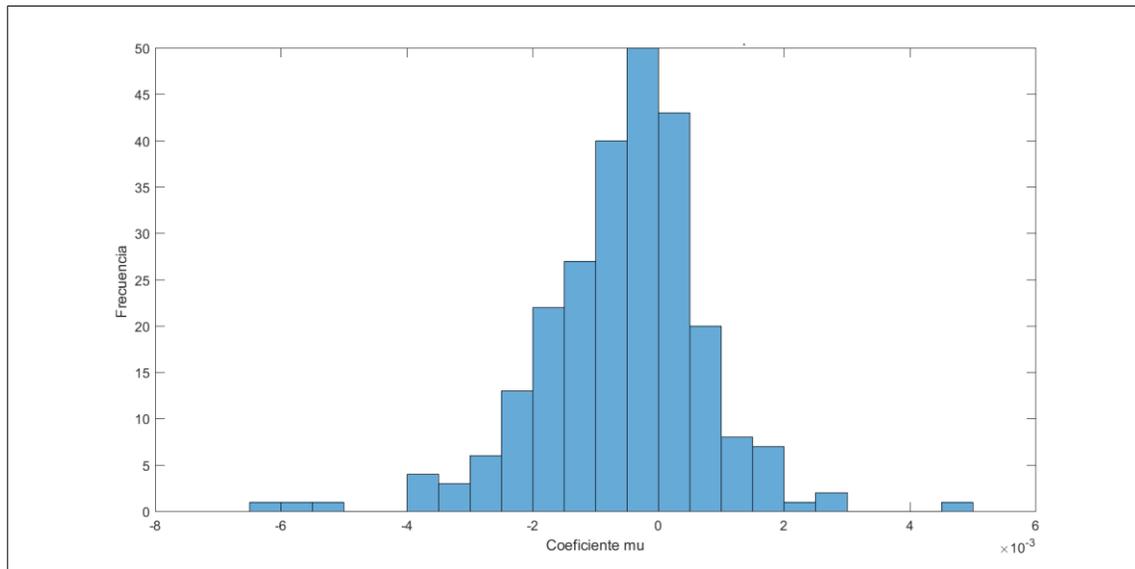


Figura 6-15: Ejemplo de coeficientes μ de distribución Normal. (Fuente: Elaboración propia)

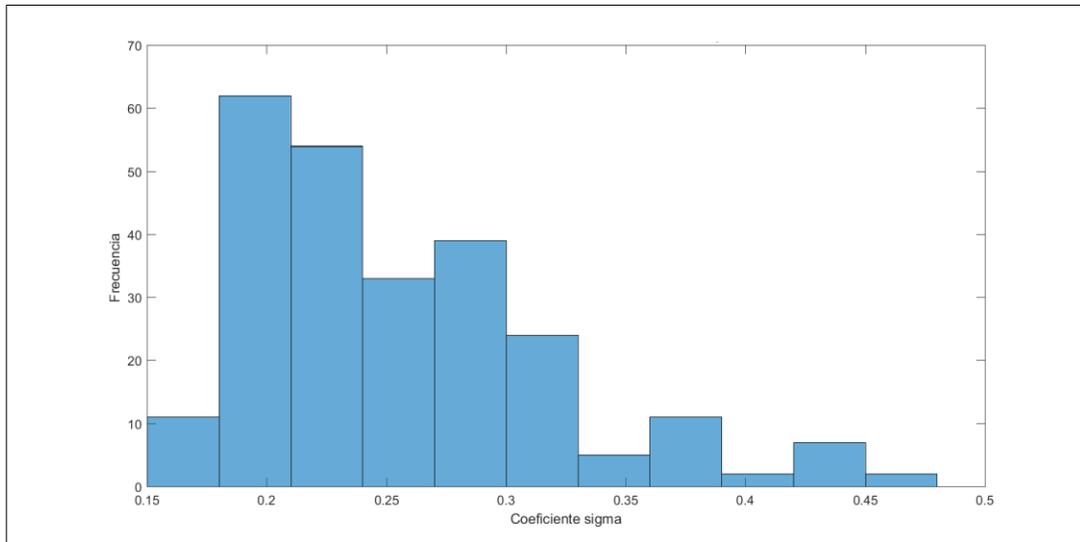


Figura 6-16: Ejemplo de coeficientes sigma de distribución Normal.

(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, se obtuvo un ajuste lineal mediante el modelo de regresión clásica obteniendo la ecuación de la recta de ajuste $Y(y) = A * X(x) + B$, sus respectivos coeficientes A y B del ajuste y el coeficiente de determinación de la regresión, que fueron representados en un gráfico bidimensional donde el eje de la ordenada (y) es la probabilidad empírica de los datos y el eje de la abscisa (x) la probabilidad Normal. Mostrando en un recuadro la ecuación de ajuste lineal y el coeficiente de determinación como se muestra en la figura 6-17. Además, otros dos gráficos con el histograma de frecuencia de los coeficientes A y B obtenidos de la ecuación en cada uno de los estados de mar como se muestra en las figuras 6-18 y 6-19.

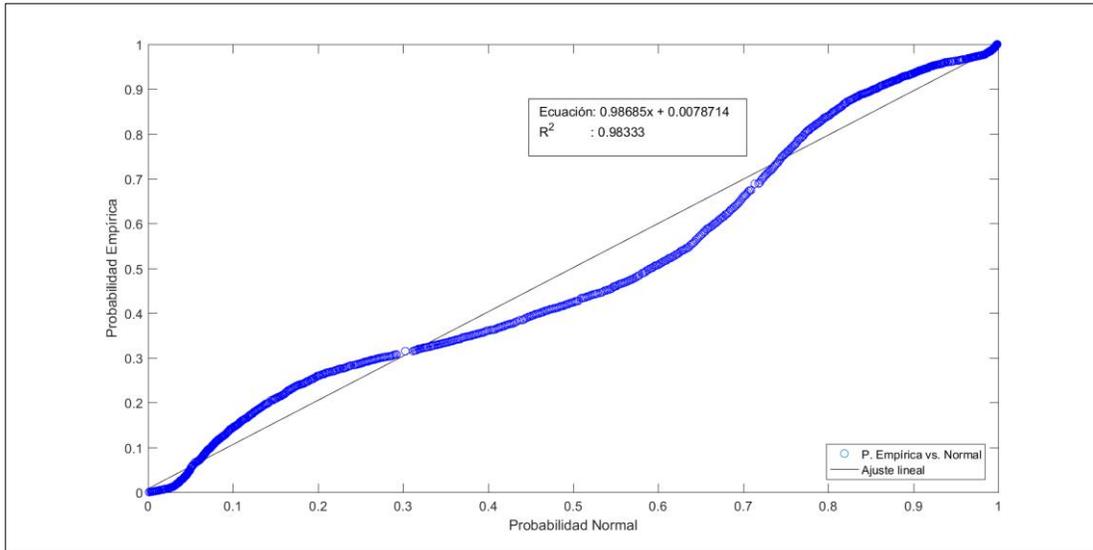


Figura 6-17: Ejemplo Análisis desnivelaciones con ajuste lineal, ecuación de la recta y coeficiente de determinación.

(Fuente: Elaboración propia)

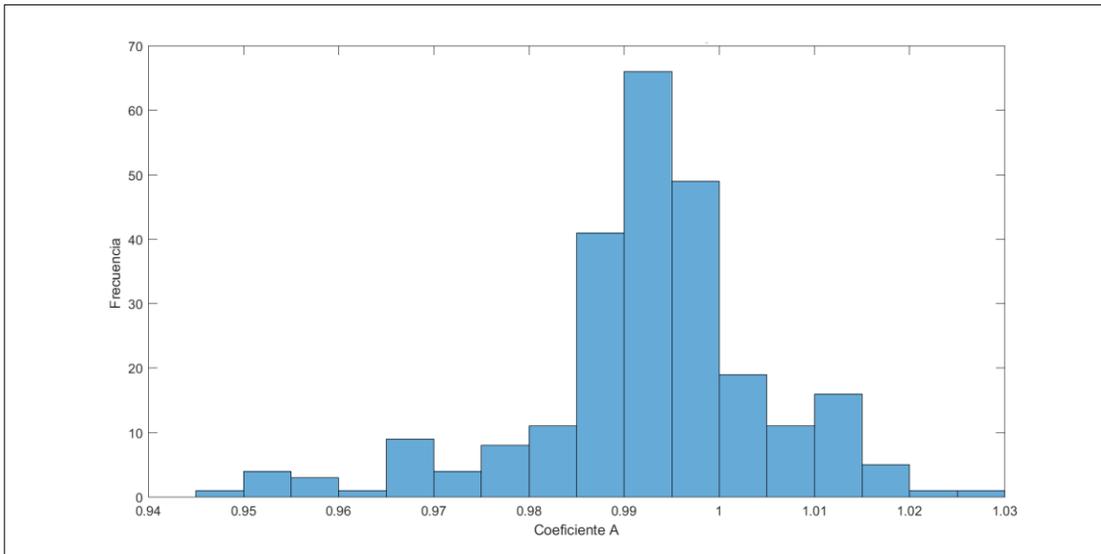


Figura 6-18: Ejemplo coeficiente A del ajuste lineal

(Fuente: Elaboración propia)

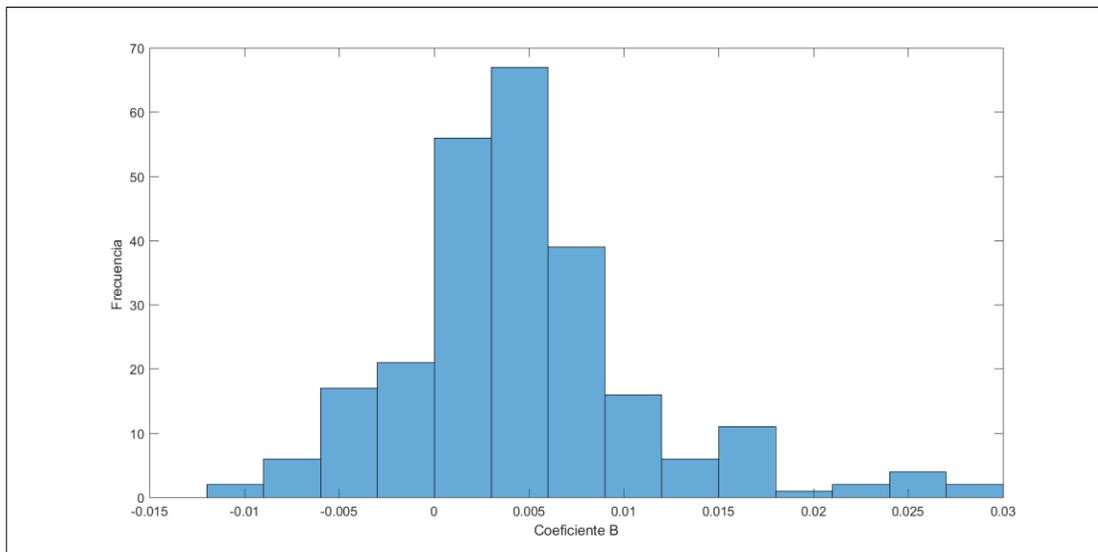


Figura 6-19: Ejemplo coeficiente B del ajuste lineal
(Fuente: Elaboración propia)

En tercer lugar, sabemos que si la probabilidad empírica de los datos versus la probabilidad Normal se intercepta en una recta con ángulo de 45° , quiere decir que los datos se distribuyen según la función de distribución Normal. Por esto, se calculó la suma de errores al cuadrado para visualizar el error entre ambas probabilidades. Se representó un gráfico bidimensional donde el eje de la ordenada (y) es la probabilidad empírica de los datos y el eje de la abscisa (x) la probabilidad Normal, mostrando en un recuadro el valor de la suma de errores al cuadrado de cada estado de mar como se muestra en la figura 6-20.

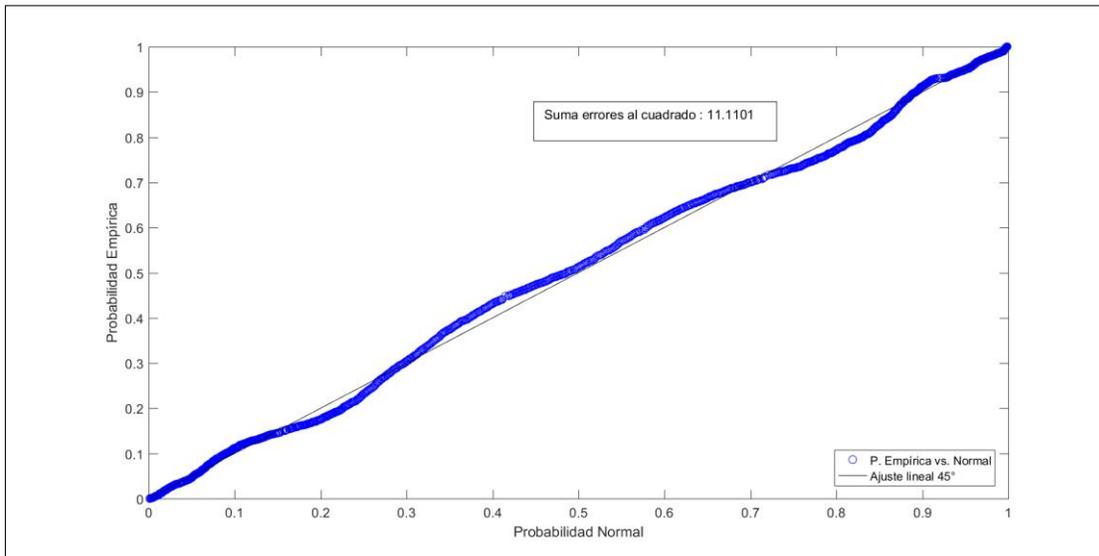


Figura 6-20: Ejemplo ajuste 45° y la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, para corroborar los resultados de los ajustes planteados anteriormente, se realizó la comparación entre la función de densidad de probabilidad Normal con los datos de campo, que fue representado con un gráfico de histograma de frecuencia de los datos empíricos en conjunto con la densidad de la distribución Normal como se visualiza en la figura 6-21, visualizando y comparando los resultados de los papeles probabilísticos y el histograma con la densidad de distribución.

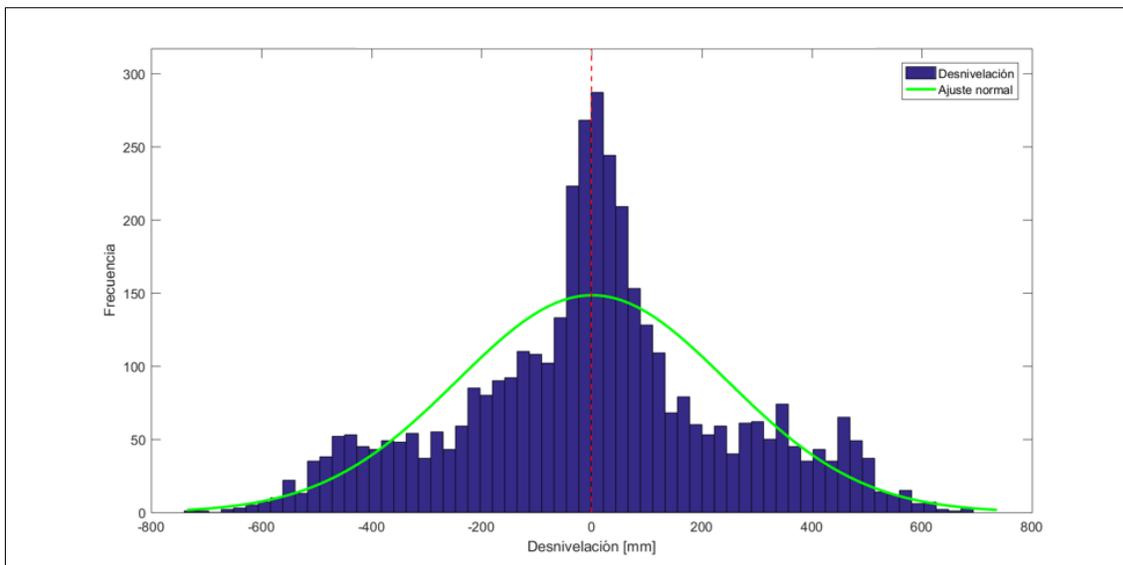


Figura 6-21: Ejemplo función de densidad de distribución Normal versus histograma de los datos de campo.
(Fuente: Elaboración propia)

La Interpretación de posibles resultados obtenidos en el papel probabilístico, pueden ser:

- Asimetría positiva: en el papel probabilístico se presentan como una figura de puntos que forma una especie de curvatura hacia abajo como una \cap invertida, subestimación de valores.
- Asimetría negativa: en el papel probabilístico se presenta como una figura de puntos que forma una especie de curvatura hacia arriba en forma de U , sobrestimación de valores.
- Mezcla de poblaciones: se presenta como una mezcla de dos o más poblaciones con medias diferentes.
- La presencia de datos anómalos: datos que no están ubicados en torno a la recta, más bien se alejan de ella pudiendo ubicarse en las zonas superior derecha u zona inferior izquierda.

Por otra parte, también se puede estimar si ambas familias están relacionadas con la función de probabilidad evaluando la pertenencia. Para esto se verificó el coeficiente de determinación, si es uno indicó que “pertenece a la familia”; en cambio, si es cercano a cero “no pertenece”. En el caso de los parámetros A y B de la recta de regresión si tienen valores $A = 1$ y $B = 0$ o bien $h(x) = g(y)$ son iguales, “las familias están cien por ciento relacionadas” y si los coeficientes son distintos “las familias no están relacionadas”.

6.3.3.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y ESPECTRALES

Con el objetivo de realizar una calibración de alturas de olas, los parámetros estadísticos y espectrales se obtuvieron de un algoritmo propio desarrollado en Matlab y a través del software Wavesmon solamente espectrales. Debido a que, existe un desconocimiento en los métodos de limpieza de la serie de desnivelación realizado en el software Wavesmon y como también, se torna engorroso la extracción de los parámetros de resumen en virtud a la cantidad de datos extraídos, la calibración de las alturas de olas se hace relevante. Se realizó una comparación entre los métodos utilizados en esta memoria y los métodos utilizados por el software, contrastando las diferencias entre parámetros espectrales.

Para esto, estadísticamente se obtuvieron los parámetros: altura significativa, período *peak*, período medio, altura media, altura un décimo y altura máxima, por medio de la señal de desnivelación utilizando el método de ascendentes por cero para la identificación de las olas y períodos, mediante el algoritmo desarrollado por el autor y Wavesmon.

En el caso de la obtención de parámetros espectrales desarrollado en el algoritmo, en primera instancia se realizó una eliminación de períodos superiores a 25 segundos, correspondientes a ondas largas, y períodos menores a 4 segundos, correspondientes a ondas cortas. Obteniendo así los parámetros espectrales: altura espectral, período *peak* y período medio, por medio del uso de la transformada de Fourier directamente de la serie de desnivelación. Y mediante Wavesmon se obtuvieron directamente del software siguiendo la guía de usuario de RDI instrument.

Ambos parámetros tanto espectrales como estadísticos fueron diferenciados y calculados según su zona de generación, puesto que en Chile presenta oleaje tipo *Sea* de 4 a 8 segundos y oleaje tipo *Swell* de 10 a 25 segundos (Beyá et. al ,2016).

A modo de sintetizar la calibración de alturas, se presentó una tabla resumen que contiene las diferencias promedio, moda, valores máximos y mínimos por localidad (tabla 7-2).

En el anexo se incluye el gráfico de comparación de alturas en las figuras 11-2, 11-15, 11-28, 7-4, 11-53, 11-66, 11-79, 11-92, 7-5, 11-117, 11-130, correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

En la figura 6-22 se presentó un ejemplo de la comparación entre las alturas espectrales de Wavesmon (línea color azul) y las generadas con el código Matlab (línea color rojo), visualizando las diferencias entre ambos en el gráfico (líneas celestes).

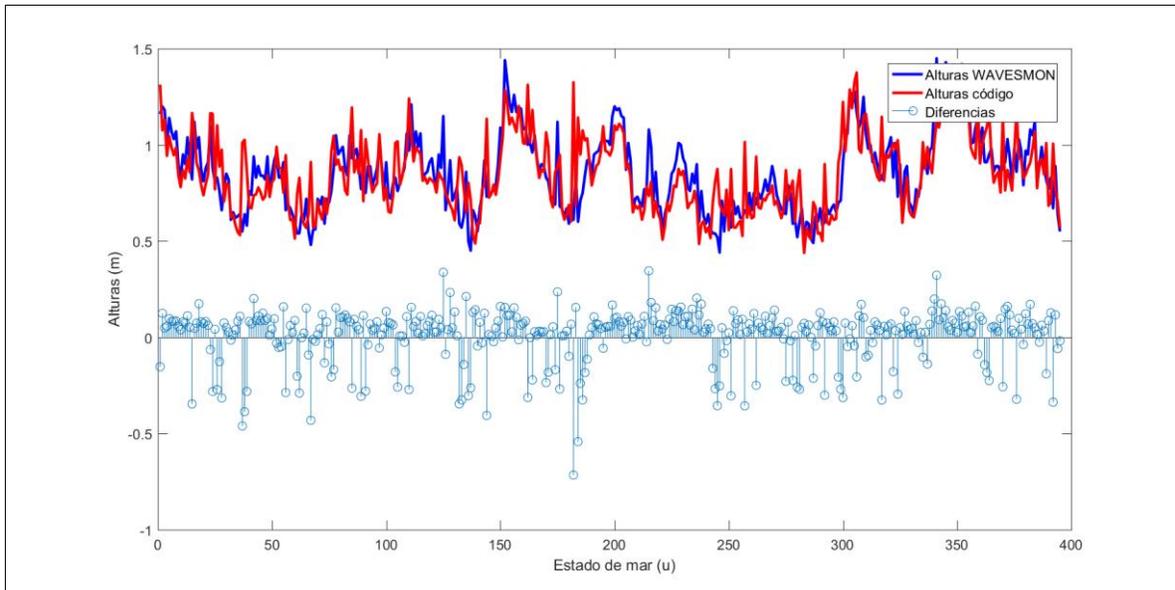


Figura 6-22: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab
(Fuente: Elaboración propia)

6.3.3.3 ANÁLISIS DE ALTURAS DE OLA

Del mismo modo que en el análisis de desnivelaciones instantáneas, se realizó el análisis de alturas de olas, asociándolas a las funciones de distribución mayormente utilizadas hoy en día Rayleigh y Weibull. Aunque, sabemos que existen nuevos avances en la función de la distribución de alturas planteada recientemente por Battjes y Groenendijk (2000), donde utilizan la función de distribución compuesta de Weibull, como se planteó en el marco teórico.

La función compuesta de Weibull, utiliza parámetros obtenidos en experimentos realizados en un canal de olas, generando ondas aleatorias que pasa por diversos puntos de control ubicados en línea recta perpendicular y equidistante a la línea costera. Procedimiento que se efectúa para medir los parámetros del oleaje a diferentes pendientes y profundidades, como se muestra en la figura 6-23. Lo que significa que la función compuesta de la distribución de Weibull no pudo ser utilizada, debido a la ausencia de datos disponibles como: pendiente de la playa, profundidad, puntos de control, entre otros.

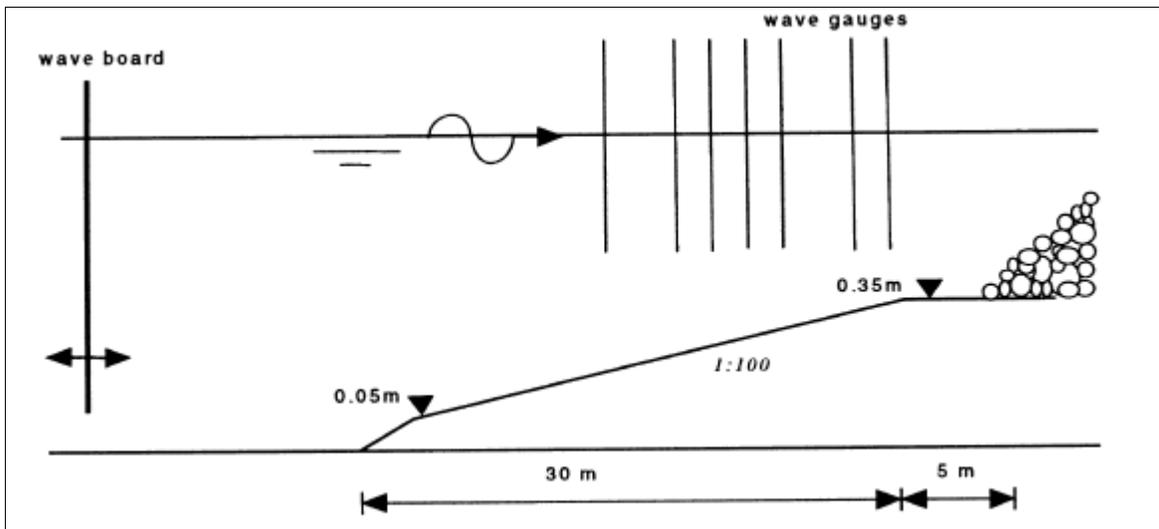


Figura 6-23: Experimento en canal de olas, para una pendiente 1:100 en aguas someras a diferentes puntos de control.

(Fuente: Battjes & Groenendijk, 2000)

Se utilizó la función de distribución de probabilidad Rayleigh y Weibull usada en el software Matlab, para relacionar los datos empíricos con ambas distribuciones, usando las siguientes ecuaciones:

Rayleigh

$$f(H/b) = \frac{1}{b^2} \exp\left(\frac{-H^2}{2b^2}\right)$$

Ecuación 6-11

Donde:

H : Altura de la ola.

b : Parámetro de distribución Rayleigh.

Weibull

$$f(H/a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{H}{a}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{H}{a}\right)^b\right)$$

Ecuación 6-12

Donde:

H : Altura de la ola.

a y b : Parámetros distribución Weibull.

Por consiguiente, se utilizó el método gráfico de los papeles probabilísticos para asociar los datos empíricos con las familias paramétricas de función de distribución Rayleigh y Weibull. De las cuales fueron estudiadas de forma general y separándolas por tipo de oleaje *Sea* o *Swell*. Lo que fue representado en un gráfico bidimensional como se muestra en la figura 6-14, donde en el eje de la ordenada (y) con $g_{(y)}$ representó la probabilidad empírica de los datos medidos y el eje de la abscisa (x) con $h_{(x)}$ representó la probabilidad Rayleigh y Weibull, donde se obtuvo lo siguiente:

1. Parámetro b de la función de distribución Rayleigh y parámetros a y b de la distribución Weibull.
2. Ajuste lineal de la distribución Rayleigh y Weibull, mediante modelo de regresión clásica con su respectiva ecuación de ajuste, los coeficientes del ajuste lineal y coeficiente de determinación de la regresión.
3. Suma de errores al cuadrado con respecto al mejor ajuste.

Ambas distribuciones de probabilidades fueron representadas en un mismo gráfico, para mostrar el mejor ajuste de distribución de los datos medidos. Donde como primera parte se obtuvo un ajuste lineal mediante el modelo de regresión clásica obteniendo la ecuación de la recta de ajuste $Y(y) = A * X(x) + B$, sus respectivos coeficientes A y B del ajuste y el coeficiente de determinación de la regresión, que fueron representados en un gráfico bidimensional donde el eje de la ordenada (y) es la probabilidad empírica de los datos y el eje de la abscisa (x) la probabilidad Rayleigh y Weibull. Mostrando en un recuadro la ecuación de ajuste lineal y el coeficiente de determinación. Además, se obtuvieron gráficos con el histograma de frecuencia de los coeficientes A y B obtenidos de la ecuación en cada uno de los estados de mar.

En segundo lugar, sabemos que si la probabilidad empírica de los datos versus la probabilidad Rayleigh u Weibull se intercepta en una recta con ángulo de 45° , quiere decir que los datos se distribuyen según la función de distribución Rayleigh u Weibull. Por esto, se calculó la suma de errores al cuadrado para visualizar el mejor ajuste entre ambas probabilidades. Se representó un gráfico bidimensional donde el eje de la ordenada (y) es la probabilidad empírica de los datos y el eje de la abscisa (x) la probabilidad Rayleigh y Weibull. Mostrando en un recuadro el valor de la suma de errores al cuadrado de cada estado de mar.

Finalmente, para corroborar los resultados de los ajustes planteados anteriormente, se realizó la comparación entre la función de densidad de probabilidad de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, que fue representado con un gráfico de histograma de frecuencia de los datos empíricos en conjunto con la densidad de la distribución de Rayleigh y Weibull como se visualiza en la figura 6-24, visualizando y comparando los resultados de los papeles probabilísticos y el histograma con la densidad de distribución.

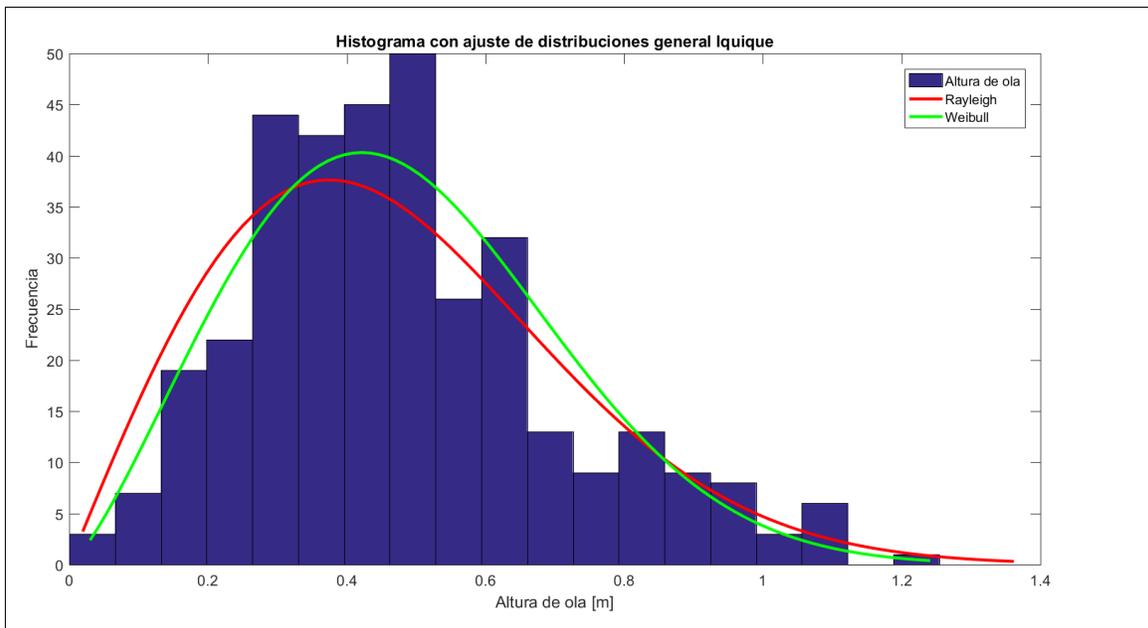


Figura 6-24: Ejemplo función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo.
(Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que, por la inmensa cantidad de gráficos obtenidos por estados de mar, estos no fueron presentados en los resultados, pero si expuestos en el anexo. En consecuencia, y para facilitar el análisis, se efectuaron tablas de resumen exhibidas en el capítulo de resultados con las tablas 7-9,7-10,7-13,7-14,7-17,7-18.

Al igual que en la interpretación de resultados que en las series de desnivelaciones instantáneas para el papel probabilístico podemos encontrar lo siguiente:

- Asimetría positiva: en el papel probabilístico se presentan como una figura de puntos que forma una especie de curvatura hacia abajo como una u invertida \cap , subestimación de valores.
- Asimetría negativa: en el papel probabilístico se presenta como una figura de puntos que forma una especie de curvatura hacia arriba en forma de U, sobrestimación de valores.
- Mezcla de poblaciones: se presenta como una mezcla de dos o más poblaciones con medias diferentes.
- La presencia de datos anómalos: datos que no están ubicados en torno a la recta, más bien se alejan de ella pudiendo ubicarse en las zonas superior derecha u zona inferior izquierda.

Por otra parte, también se puede estimar si ambas familias están relacionadas con la función de probabilidad evaluando la pertenencia. Para esto se verificó el coeficiente de determinación, si es uno indicó que “pertenece a la familia”; en cambio, si es cercano a cero “no pertenece”. En el caso de los parámetros A y B de la recta de regresión si tienen valores $A = 1$ y $B = 0$ o bien $h(x) = g(y)$ son iguales, “las familias están cien por ciento relacionadas” y si los coeficientes son distintos “las familias no están relacionadas”.

6.3.3.4 ANÁLISIS DE PERÍODOS

El estudio de los períodos se elaboró analizando las formulaciones de densidad de los períodos de Bretschneider (1959), Longuet-Higgins (1975) y Longuet-Higgins (1983), citado de Silva (2005).

Se realizaron dos variaciones a los parámetros período T_{01} y la anchura espectral v , los cuales son compartidos en las distintas formulaciones de Bretschneider y Longuet-Higgins. Los valores del parámetro T_{01} utilizados fueron 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24. Y los valores de v fueron 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.

Con las variaciones, se evaluó el comportamiento de las tres curvas por separado y por cada parámetro, identificando la influencia al aumentar o disminuir los parámetros. Además, se midió estadísticamente la medida de apuntalamiento o curtosis de las curvas, en donde se determinó el grado de concentración que presentan los valores de las variables alrededor de la zona central.

Las medidas de apuntalamiento o curtosis son las siguientes y se presentan en la figura 6-25:

- Leptocúrtica: presenta un apuntalamiento relativamente alto, habiendo un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales.
- Platicúrtica: presenta una forma “achatada” con un reducido grado de concentración alrededor de los valores centrales.
- Mesocúrtica: presenta un grado de concentración medio alrededor de los valores centrales.

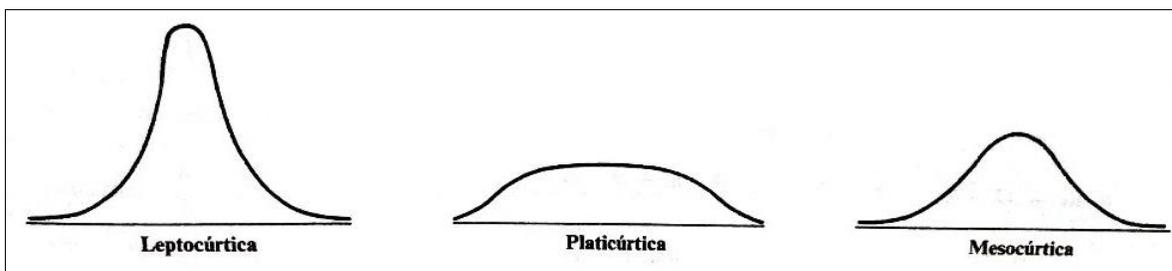


Figura 6-25: Medidas de apuntalamiento o curtosis.

(Fuente: Spiegel, 1970)

En la figura 6-26 se presenta un ejemplo del análisis de períodos de la formulación propuesta por Longuet-Higgins de 1975, para anchura espectral 0.6 y períodos variables de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 segundos.

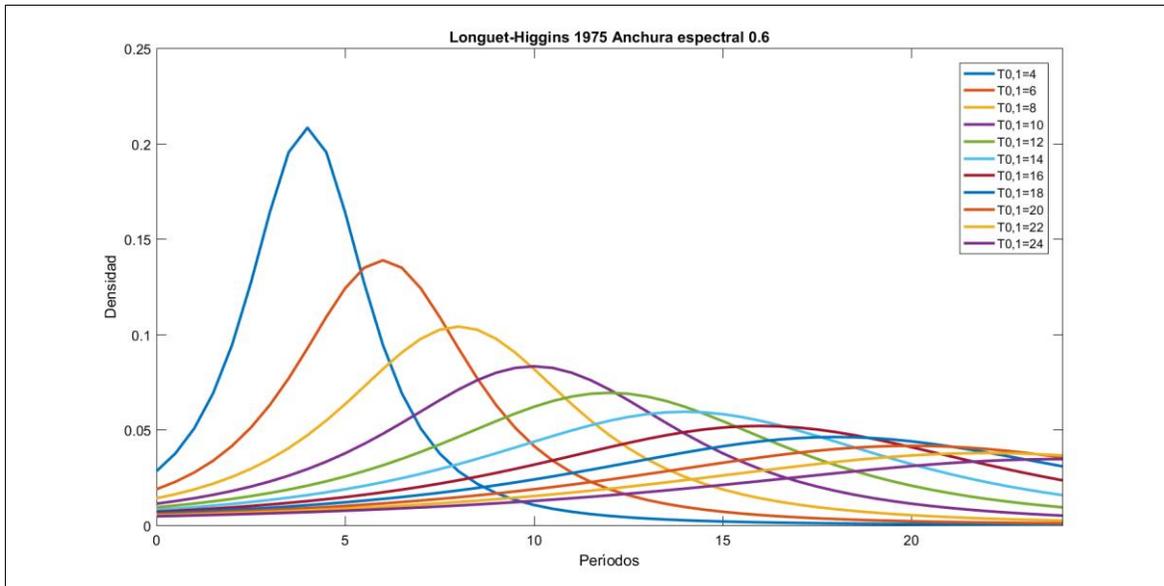


Figura 6-26: Ejemplo análisis de periodos distribución de Longuet-Higgins 1975.
(Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que, el cuerpo del estudio se basa en el análisis de las series de desnivelaciones instantáneas y alturas de ola, por lo que se realizó un análisis somero de los periodos de las olas, comparando la densidad de Bretschneider con los datos de campo. Analizando si dicha distribución es representativa para los periodos existentes en cada zona estudiada de Chile.

6.3.3.5 RELACIÓN ALTURA SIGNIFICATIVA VERSUS ALTURA ESPECTRAL

En el análisis de la relación altura significativa y altura espectral se utilizaron los parámetros estadísticos y espectrales obtenidos anteriormente en el estudio de alturas de ola, para analizar la formulación propuesta por Thompson y Vincent (1985) en aguas someras.

Se analizaron las dos ecuaciones propuestas en el marco teórico, para el límite máximo que adopta la ecuación y para los valores centrados en cada una de las localidades, visualizando ambos ajustes con respecto a los datos de campo en forma general y separados según tipo de oleaje *Sea* y *Swell*.

Además, como complemento, sí se evidenció que los datos no se ajustan a la ecuación de Thompson y Vincent, se buscó un ajuste de los coeficientes A y B de la ecuación 5-51 para cada localidad estudiada. Generando así una ecuación modificada de Thompson y Vincent con coeficientes promedio que representan a las zonas estudiadas en el litoral continental de Chile central.

7 RESULTADOS

7.1 CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad arrojó una variabilidad en la elección de transductores, el transductor 2 con las localidades de Iquique, La Serena, Quintero y Tucapel presentó mejor porcentaje, seguido del transductor 1 con las localidades de Obispo, Constitución y Punta Lavapié y transductor 4 con localidades de Topocalma, Punta Morhuilla y Galera con el mejor porcentaje, mientras que la excepción se presentó en el transductor 3 debido a su bajo porcentaje de datos existentes en comparación con los otros. Esto se puede visualizar en la tabla 7-1, la cual indica que, para las localidades de Obispo, Constitución y Punta Lavapié el transductor seleccionado fue el 1, para las localidades de Iquique, La Serena, Quintero y Tucapel el transductor fue el 2 y para las zonas de Topocalma, Punta Morhuilla y Galera el transductor fue el 4, mientras que el transductor 3 fue el que presentó menores porcentajes de datos existentes en las mediciones y por tanto seleccionado en una localidad la cual fue Punta Loros. Y además los porcentajes promedio de datos existentes en las zonas estudiadas fueron de un 99.33% para los transductores seleccionados y utilizados para realizar los estudios posteriores.

A continuación, se presenta una tabla con los cuatro transductores y su respectivo porcentaje de datos existentes o medidos. El transductor que presenta un mayor porcentaje de datos, se presenta con un color azul intenso y negrita, mientras que para los transductores con un menor porcentaje contiene un color celeste claro o bien blanco.

Tabla 7-1: Selección del transductor

Localidad	Porcentaje de datos buenos			
	Transductor 1	Transductor 2	Transductor 3	Transductor 4
Iquique	92.080	99.550	98.510	98.550
Obispo	99.470	98.560	99.190	99.320
La Serena	97.450	97.660	97.450	97.410
Quintero	98.810	98.930	98.840	98.900
Punta Loros	99.450	99.380	99.530	99.070
Topocalma	99.950	99.620	98.690	99.950
Constitución	99.040	99.000	98.930	99.030
Punta Lavapié	99.600	95.150	96.040	99.470
Tucapel	99.380	99.580	99.430	99.550
Punta Morhuilla	99.540	99.280	98.520	99.640
Galera	99.540	99.490	98.960	99.630

(Fuente: Elaboración propia)

En el anexo, con las figuras 11-1, 11-14, 11-27, 11-40, 11-52, 11-65, 11-78, 11-91, 11-104, 11-116 y 11-129 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena,

Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente, se encuentran los gráficos de barras azules con sus respectivas selecciones de los transductores y porcentaje de la estimación de datos existentes para cada estado de mar.

7.2 ANÁLISIS DE DATOS

7.2.1 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO DE DESNIVELACIONES INSTANTÁNEAS.

Como resultado del análisis de las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, utilizando el método gráfico de los papeles probabilísticos, se obtuvo en primer lugar los coeficientes μ y σ de la función de distribución de probabilidad Normal de los datos, con los siguientes resultados por localidad como se muestra en la tabla 7-2. En promedio el valor del coeficiente μ fue de 0.001 y para el coeficiente σ de 0.443 con respecto a las localidades estudiadas.

Tabla 7-2: Coeficientes promedios de función de distribución Normal

Localidad	μ	σ
Iquique	-0.001	0.211
Obispo	-0.001	0.255
La Serena	-0.001	0.506
Quintero	0.002	0.299
Punta Loros	-0.002	0.430
Topocalma	0.023	0.524
Constitución	-0.003	0.516
Punta Lavapié	-0.002	0.369
Tucapel	-0.004	0.585
Punta Morhuilla	-0.003	0.563
Galera	-0.003	0.620
Máx.	0.023	0.620
Mín.	-0.004	0.211
Media	0.001	0.443

(Fuente: Elaboración propia)

En las siguientes figuras 7-1 y 7-2, se visualizan los coeficientes μ y σ referenciados con respecto a la latitud de cada localidad, para verificar si existe alguna diferencia notoria u similitud entre localidades cercanas. Como resultado del coeficiente μ , los valores se centraron mayoritariamente entre -0.001 y -0.004. Además, se visualizó un valor atípico en la localidad de Topocalma de 0.023, escapando del rango de valores más frecuentes como se ve en la figura 7-1. En el coeficiente σ , presentó una variedad de valores de 0.211 a 0.620 y reveló que hacia el sur de Chile los valores aumentan concentrándose en 0.3 y 0.6, como se muestra en la figura 7-2.

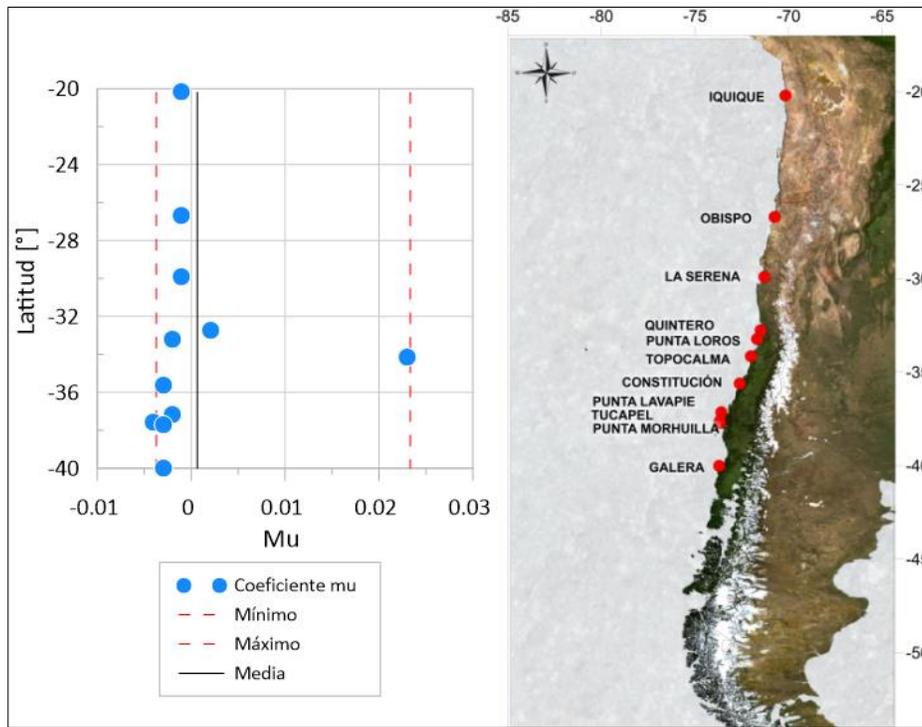


Figura 7-1: Coeficiente mu de la función de distribución Normal
(Fuente: Elaboración propia)

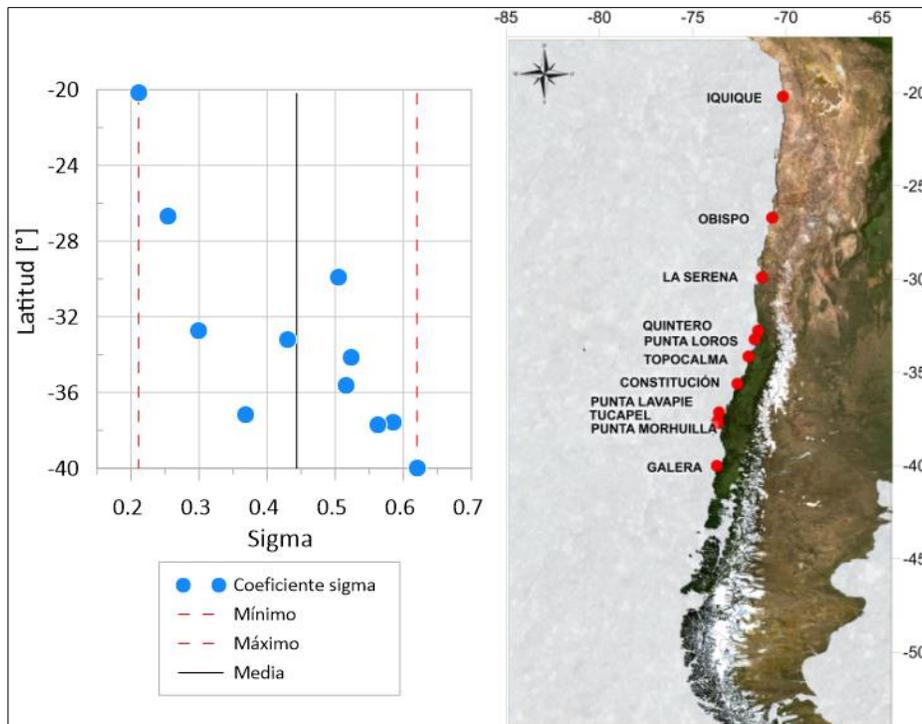


Figura 7-2: Coeficiente sigma de la función de distribución Normal
(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación de la regresión.

En cuanto a los valores del ajuste lineal de la recta $Y(y) = A * X(x) + B$ según tabla 7-4, indicó que el coeficiente A , o también llamado pendiente, es cercano a 1 y el coeficiente B , o intercepto, es cercano a 0, lo que indica que las familias están cien por ciento relacionadas. Adicionalmente, el coeficiente de determinación es cercano a 1, con un promedio de 98.9%; lo que indica que la distribución de probabilidad Normal “pertenece a la familia de probabilidades”. Hacia el sur de Chile el coeficiente de determinación se acerca a 1, obteniendo un mejor ajuste a la regresión, por tanto, la probabilidad Normal describe a la probabilidad empírica de los datos en todas las localidades estudiadas.

En tercer lugar, se obtuvo el ajuste perfecto de la serie de tiempo de desnivelación instantánea, es posible afirmar que el mejor ajuste se presentó en las localidades de Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, mientras que el menor ajuste se presentó en Iquique. Por tanto, se evidenció un mejor ajuste hacia el sur de Chile, mientras que al Norte presento el peor ajuste de entre las localidades.

La tabla 7-4 que resume el estudio de las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas de todos los estados de mar analizados (10 388) y de gráficos extraídos por estados de mar (20 776). La tabla contiene el ajuste lineal, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación con sus respectivos parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo. Asimismo, incluye el ajuste perfecto a recta 45° con sus parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo de la suma de errores al cuadrado de la probabilidad Normal versus los datos medidos de todas las localidades estudiadas.

La tabla 7-3, muestra los resultados obtenidos en el papel probabilístico a partir de los gráficos de los resultados del ajuste lineal y perfecto, donde podemos identificar si existió asimetría positiva o subestimación de valores, asimetría negativa o sobrestimación de valores y la mezcla de poblaciones, podemos obtener los siguiente:

Tabla 7-3: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.

Localidad	Probabilidad acumulada debajo el 50%	50%	Probabilidad acumulada sobre el 50%	Cantidad de población
Iquique	∩	U	∩	3
Obispo	∩	-	U	2
La Serena	∩	U	∩	3
Quintero	U	∩	U	3
Punta Loros	∩	∩	U y ∩	5
Topocalma	∩	∩	U	3
Constitución	U y ∩	∩	U	5
Punta Lavapié	∩	U	∩	3
Tucapel	∩	-	∩ y U	5
Punta Morhuilla	∩	∩	-	5
Galera	∩	U	∩ y U	4

(Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- Π : Asimetría positiva, subestimación de valores.
- U : Asimetría negativa, sobrestimación de valores.
- : Se relacionaron ambas familias.

Según tabla 7-3, respecto a la probabilidad acumulada que están por debajo el 50% las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Punta Loros, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad Normal subestimó la probabilidad empírica. Mientras que en la localidad de Quintero la probabilidad Normal sobrestimó la probabilidad empírica y en Constitución existió una mezcla de poblaciones subestimando y sobrestimando la probabilidad Normal en comparación a la probabilidad empírica.

En la probabilidad acumulada que están en el 50% de los datos las localidades de Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución y Punta Morhuilla, la probabilidad Normal subestimó la probabilidad empírica. En Iquique, La Serena, Punta Lavapié y la probabilidad Normal sobrestimó la probabilidad empírica. En las localidades de Obispo y Tucapel la probabilidad de los datos empíricos se relacionó con la probabilidad Normal, por lo que, para las probabilidades que están en el 50% la probabilidad de los datos empírico se distribuye según la distribución Normal.

En la probabilidad acumulada que están sobre el 50% las localidades de Iquique, La Serena y Punta Lavapié, la probabilidad Normal subestimó la probabilidad empírica. En Obispo, Quintero, Topocalma y Constitución, la probabilidad Normal sobrestimó la probabilidad empírica. En Punta loros, Tucapel y Galera existió una mezcla de poblaciones subestimando y sobrestimando la probabilidad Normal en comparación a la probabilidad empírica.

Al corroborar los resultados mediante la comparación entre la función de densidad de probabilidad Normal con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia de los datos empíricos en conjunto con la densidad de la distribución Normal, como se muestra en la figura 7-3, las localidades presentan en algunos casos un buen ajuste (figura 7-3 en el costado izquierdo), mientras que en otros casos no presentan un buen ajuste debido a que los valores no se concentraron en 0. Podemos visualizarlo en las localidades del Norte, Centro y Sur respectivamente con Iquique, Quintero y Galera.

En el capítulo anexo, se incluyen gráficos correspondientes al análisis de las desnivelaciones instantáneas de la probabilidad empírica de los datos y la distribución Normal para cada localidad estudiada. Estos muestran el ajuste lineal, con su respectiva ecuación de la recta, parámetros de ajuste y estimación del coeficiente de determinación en las figuras 11-3, 11-16, 11-29, 11-41, 11-54, 11-67, 11-80, 11-93, 11-105, 11-118 y 11-131 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente. Como también el ajuste perfecto con la suma de errores al cuadrado del ajuste a la recta 45° en las figuras 11-4, 11-17, 11-30, 11-42, 11-55, 11-68, 11-81, 11-94, 11-106, 11-119 y 11-132 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

Tabla 7-4: Resumen resultados del análisis de series de tiempo de desnivelaciones instantáneas.

Localidad	Ajuste lineal						Ajuste Perfecto			
	Parámetros ajuste medio		Coeficiente de determinación				Suma de los errores al cuadrado			
	Coef. A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	0.989	0.006	0.980	0.957	0.998	0.957	13.084	2.163	28.220	2.163
Obispo	0.993	0.005	0.988	0.968	0.998	0.968	11.618	3.572	22.140	3.572
La Serena	0.997	0.003	0.978	0.915	0.996	0.915	11.206	3.028	27.300	3.028
Quintero	0.989	0.003	0.977	0.865	0.998	0.865	11.931	3.390	36.555	3.390
Punta Loros	0.993	0.005	0.992	0.919	0.999	0.919	3.529	1.798	8.090	1.798
Topocalma	1.002	0.003	0.993	0.873	0.999	0.873	3.292	0.478	13.629	0.478
Constitución	0.994	0.006	0.992	0.913	0.999	0.913	3.264	1.191	12.002	1.191
Punta Lavapié	0.992	0.006	0.990	0.886	0.999	0.886	4.056	2.069	9.939	2.069
Tucapel	0.993	0.007	0.994	0.914	0.999	0.914	2.947	0.939	24.432	0.939
Punta Morhuilla	0.993	0.006	0.995	0.972	0.999	0.972	2.857	1.146	7.741	1.146
Galera	0.993	0.005	0.996	0.957	0.999	0.957	2.656	0.878	6.901	0.878

(Fuente: Elaboración propia)

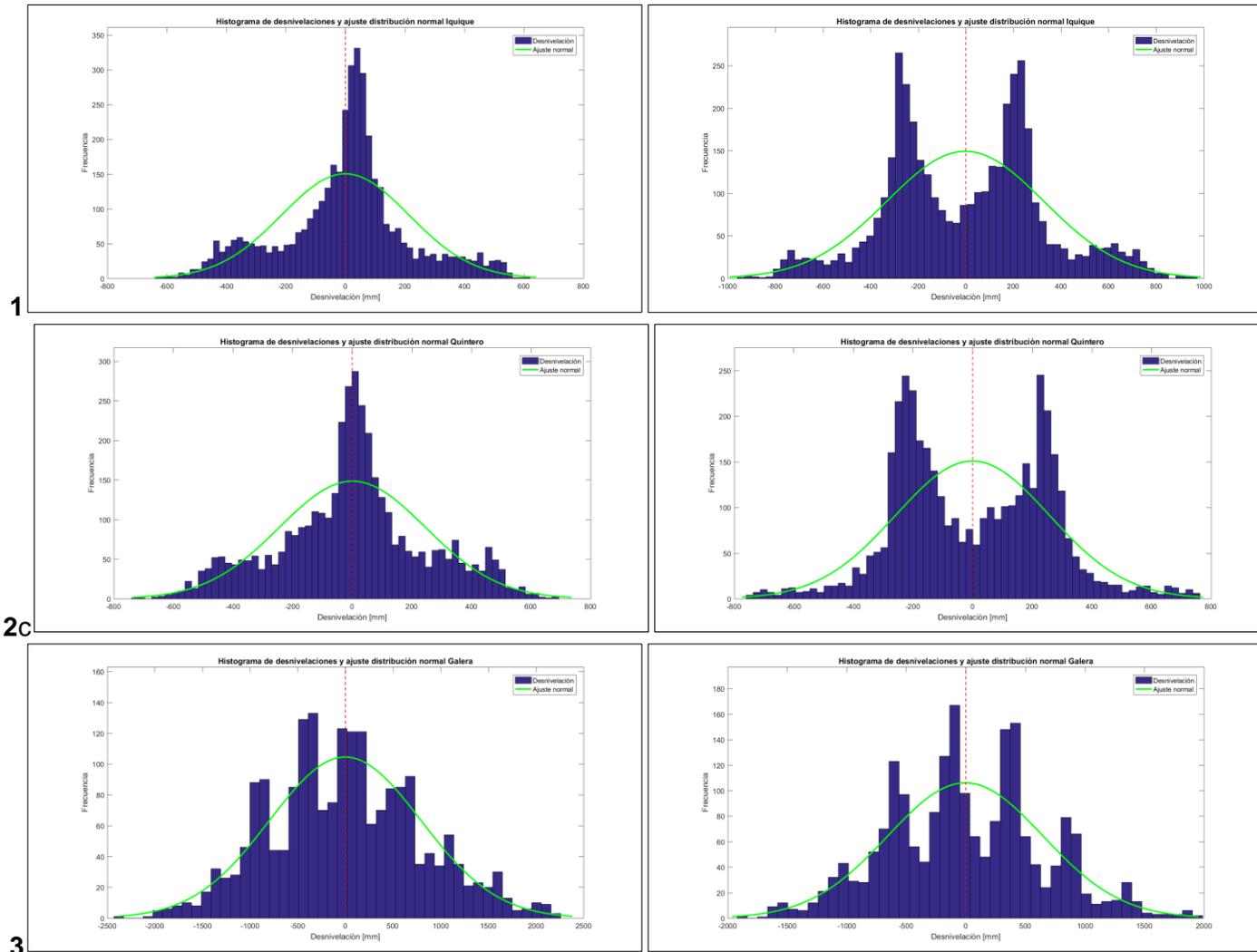


Figura 7-3: Función de densidad de distribución Normal versus histograma de los datos de campo, 1=Iquique, 2=Quintero,3=Galera
(Fuente: Elaboración propia)

7.2.2 DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE RESUMEN.

Se realizó un análisis comparativo de las alturas espectrales obtenidas mediante el software Wavesmon y las desarrolladas con código en Matlab. Las alturas desarrolladas en código Matlab fueron obtenidas directamente de la señal de desnivelación instantánea, siguiendo los procedimientos de limpieza de datos planteados en CEDEX (2004), y en la obtención de alturas en Silva (2005).

Las diferencias entre métodos en la obtención de parámetros espectrales, determinó que en promedio existe una diferencia de 0.045 metros entre las alturas de ola procesadas mediante el programa Wavesmon y el algoritmo propio. En la localidad de Galera, se presentó un valor máximo de -1.9 metros de diferencia, donde las alturas desarrolladas por código propio sobreestimaron a los datos de Wavesmon. En Iquique se presentó un valor mínimo de -0.090 metros, donde al igual que en Galera las alturas desarrolladas por código propio sobreestimaron a los datos de Wavesmon. En cuanto a la media, los valores mínimo y máximo de las alturas espectrales se ubicaron en las localidades de Quintero y Tucapel, respectivamente.

En la tabla 7-5 se evidencia la media, la moda, el valor máximo y el valor mínimo de cada zona de estudio.

Tabla 7-5: Diferencia entre parámetros

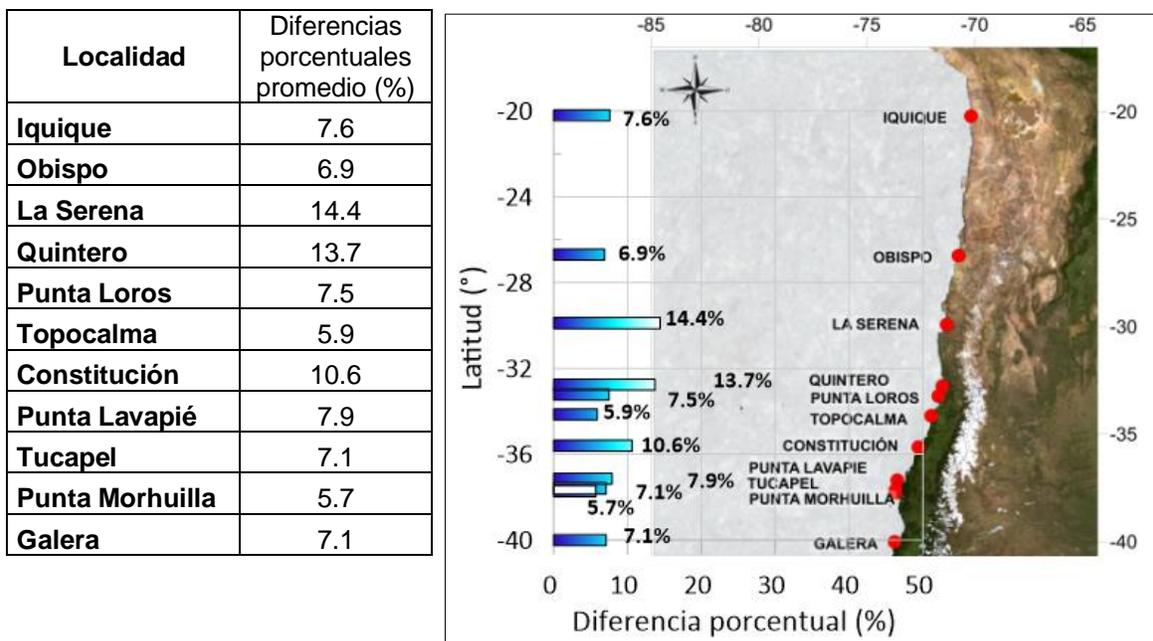
Localidad	Medidas de tendencia central			
	Media (m)	Moda (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
Iquique	0.056	-0.090	0.210	-0.090
Obispo	0.030	-0.679	0.186	-0.679
La Serena	0.035	-1.732	0.821	-1.732
Quintero	0.006	-0.716	0.346	-0.716
Punta Loros	0.098	-0.402	0.809	-0.402
Topocalma	0.076	-0.764	0.757	-0.764
Constitución	-0.074	-1.734	1.130	-1.734
Punta Lavapié	0.098	-0.398	0.491	-0.398
Tucapel	0.134	-1.399	1.418	-1.399
Punta Morhuilla	0.014	-0.747	0.614	-0.747
Galera	0.021	-1.920	0.810	-1.920

(Fuente: Elaboración propia)

De la anterior tabla se dice que para valores positivos (+), las alturas del código subestiman a los datos obtenidos de Wavesmon y para valores negativos (-), las alturas del código sobrestiman a los datos obtenidos de Wavesmon.

En la tabla 7-6, se presenta las diferencias promedio porcentuales de las alturas de ola espectrales entre el software Wavesmon y las desarrolladas con el código propio en Matlab. Se visualizó que el porcentaje de diferencia está dentro del 5% y 15%, donde se encontró la mayor diferencia porcentual en la localidad de La Serena con un 14.4% seguida por la localidad de Quintero con 13.7%. Mientras que la localidad con la menor diferencia porcentual es Punta Morhuilla con 5.7%.

Tabla 7-6: Diferencia porcentuales entre parámetros y grafico comparativo para cada localidad.



(Fuente: Elaboración propia)

En el anexo con las figuras 11-2, 11-15, 11-28, 11-53, 11-66, 11-79, 11-92, 11-117, 11-130 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Punta Morhuilla y Galera respectivamente. Y en análisis de datos las figuras 7-4 y 7-5 de Quintero y Tucapel, podemos encontrar los gráficos de diferencia de alturas espectrales entre el procesamiento mediante Wavesmon (representado en la línea de color azul), el código en Matlab (representado en la línea de color rojo) y las diferencia entre ambas alturas (representado en la línea de color celeste claro).

La zona que presentó un valor promedio mínimo fue la localidad de Quintero, con diferencia entre métodos que no sobrepasa los 0.5 metros, aunque en el estado entre los 180 y 200 presentó un máximo de 0.7 de diferencia entre métodos como se muestra en la figura 7-4.

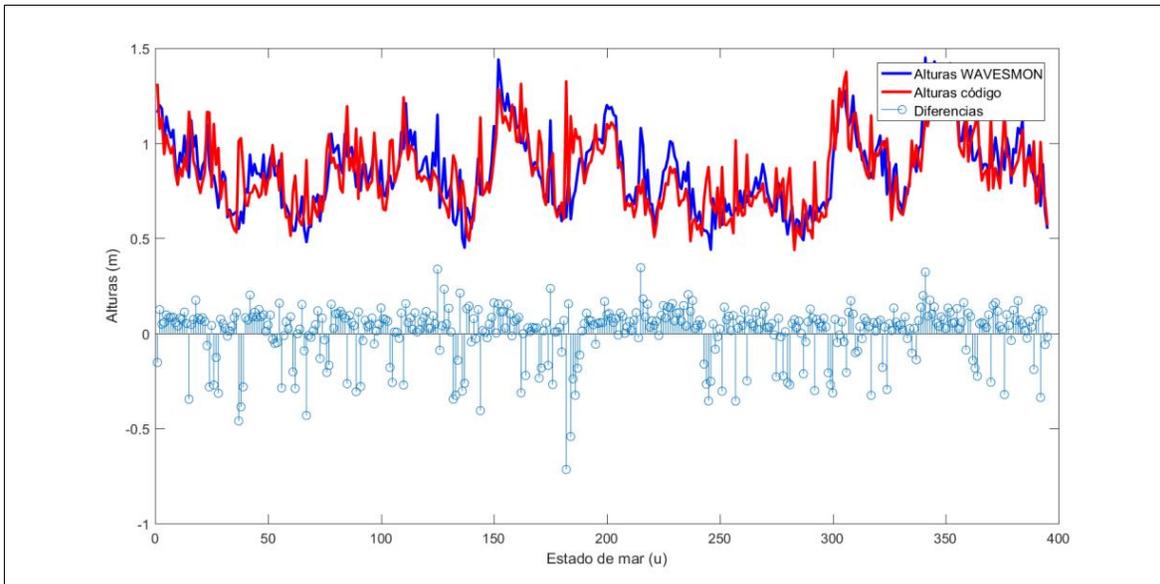


Figura 7-4: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab en Quintero.

(Fuente: Elaboración propia)

La zona que presentó un valor promedio máximo fue la localidad de Punta Tucapel, con diferencia entre métodos de 1.4 metros y en los estados de mar que presentaron las mayores diferencias fueron entre los 160 y 400 como se visualiza en la figura 7-5.

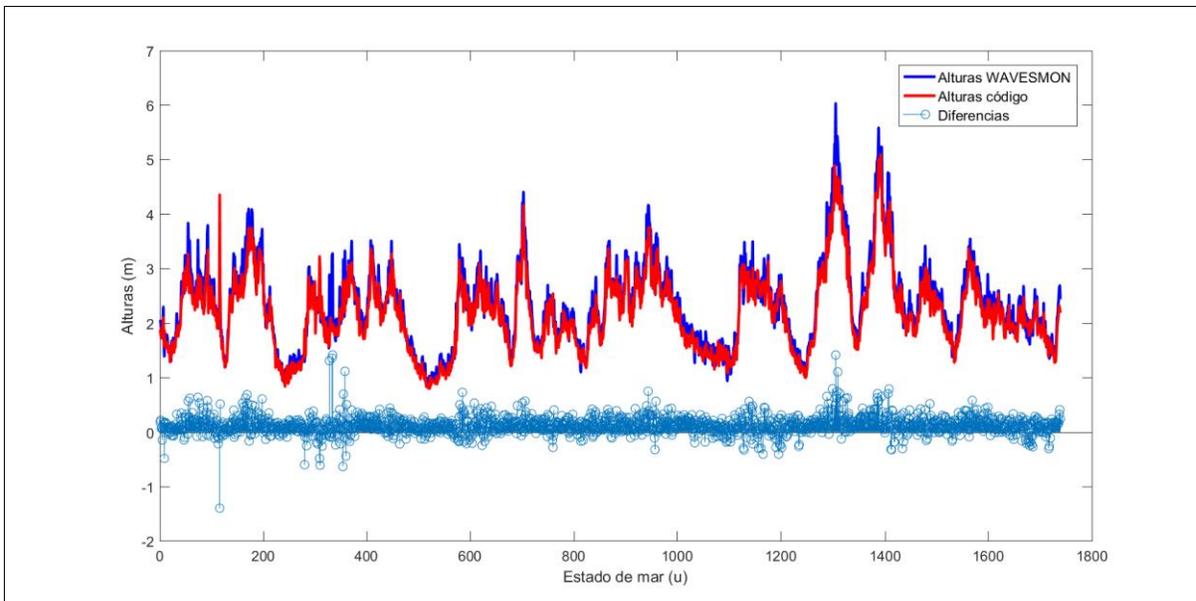


Figura 7-5: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código Matlab en Tucapel

(Fuente: Elaboración propia)

7.2.3 ANÁLISIS DE ALTURAS DE OLA

Al igual que en el análisis de las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, se analizaron las alturas de ola, pero en forma general y por naturaleza; en otras palabras, por tipo de oleaje *Sea* o *Swell*.

7.2.3.1 FORMA GENERAL

Como resultado del análisis de las alturas de ola, utilizando el método gráfico de los papeles probabilísticos, se obtuvo en primer lugar el coeficiente b de la función de distribución Rayleigh y los coeficientes a y b de la distribución Weibull, con los siguientes resultados por localidad como se muestra en la tabla 7-7. En promedio, el valor del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh fue de 0.793 y para los coeficientes a y b de la función de distribución de Weibull 1.113 y 2.016 respectivamente.

Tabla 7-7: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull

Localidad	Coeficientes		
	Probabilidad Rayleigh	Probabilidad Weibull	
	b	a	b
Iquique	0.367	0.507	2.003
Obispo	0.461	0.632	1.813
La Serena	0.874	1.210	2.029
Quintero	0.504	0.722	2.344
Punta Loros	0.767	1.082	2.003
Topocalma	0.954	1.338	1.976
Constitución	0.936	1.329	2.083
Punta Lavapié	0.658	0.924	1.993
Tucapel	1.069	1.492	1.918
Punta Morhuilla	1.011	1.424	2.005
Galera	1.126	1.586	2.010
Máx.	1.126	1.586	2.344
Mín.	0.367	0.507	1.813
Media	0.793	1.113	2.016

(Fuente: Elaboración propia)

En las siguientes figuras 7-6, 7-7 y 7-8, se visualizan los coeficientes b de la función de distribución Rayleigh y coeficientes a y b de la distribución Weibull referenciados con respecto a la latitud de cada localidad; para verificar si existe alguna diferencia notoria u similitud entre localidades cercanas. Como resultado del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh, los valores aumentan hacia el sur de Chile entre las localidades de Punta Loros a Galera con valores de entre 0.767 y 1.126, aunque, en la localidad de Punta Lavapié se visualizó un valor atípico de 0.658 como se ve en la figura 7-6.

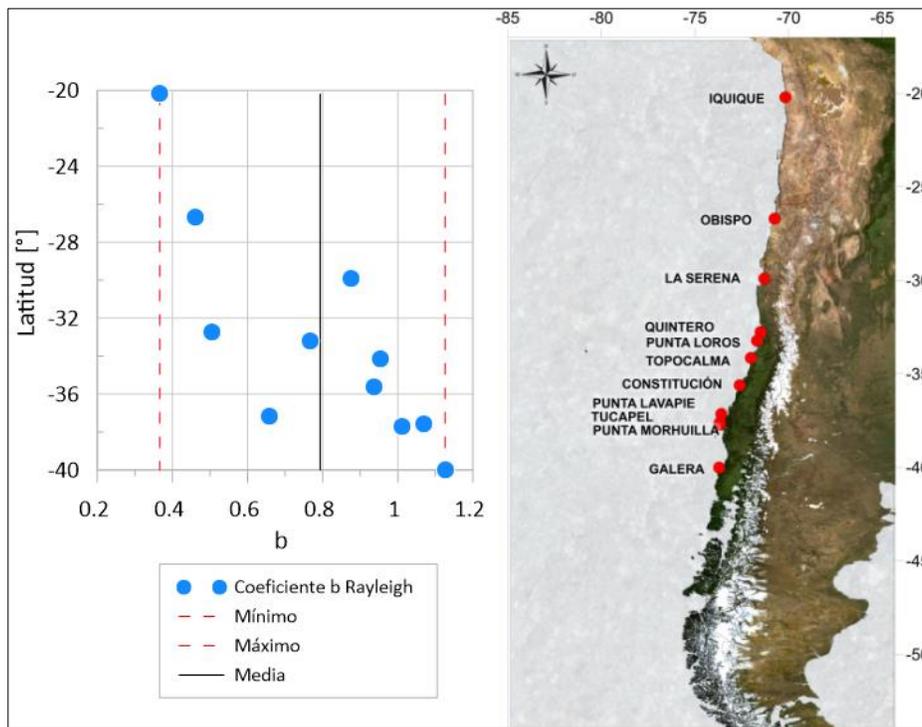


Figura 7-6: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

El coeficiente a de la distribución de Weibull, reveló que hacia el sur de Chile los valores aumentan concentrándose en 1.082 y 1.586, como se muestra en la figura 7-7, pero en localidad de Punta Lavapié presentó una excepción con un valor de 0.924.

En cuanto al el coeficiente b de la función de distribución de Weibull, se concentraron los valores en la mayoría de las localidades entre 1.976 y 2.083, como se muestra en la figura 7-8.

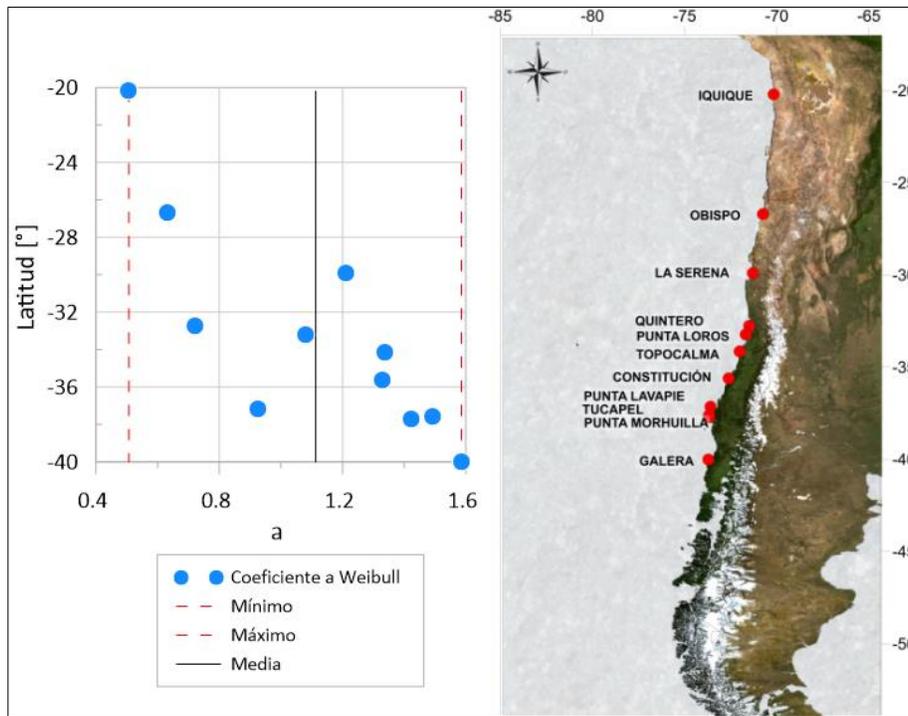


Figura 7-7: Coeficiente a de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

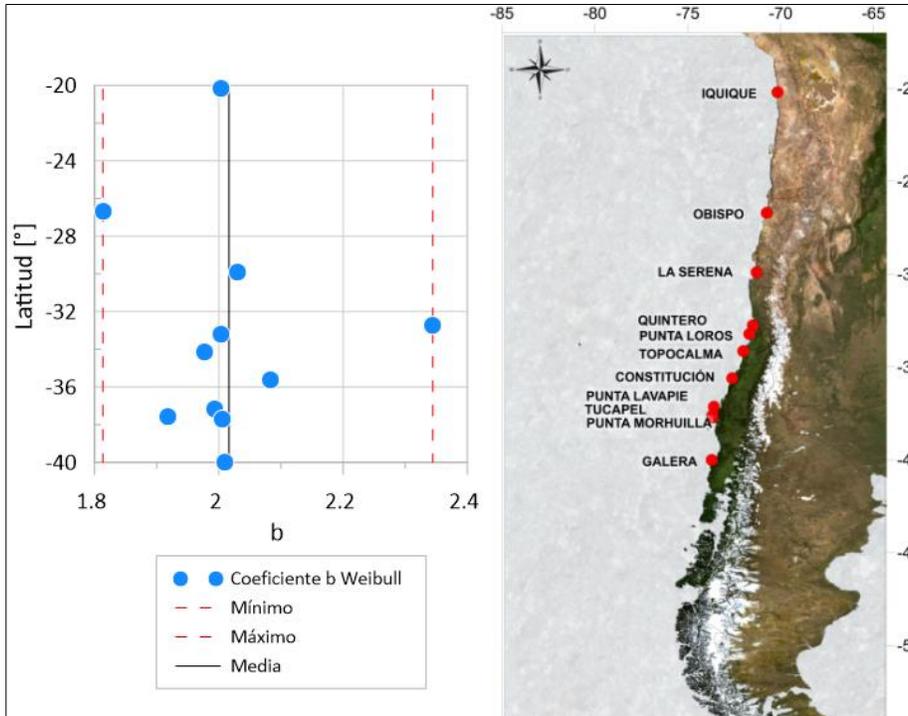


Figura 7-8: Coeficiente b de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación para las funciones de distribución de Rayleigh y Weibull.

En cuanto a los valores del ajuste lineal de la recta según tabla 7-9 para la función de la distribución de Rayleigh, reveló que el coeficiente A (pendiente), tiene un valor promedio de 0.986, cercano a 1. Por otro lado, el coeficiente B (intercepto) tiene un valor de 0.010 cercano a 0. Esto indica que las familias están relacionadas. Por otra parte, el coeficiente de determinación da en promedio un 98.8%, mostrando que la distribución de probabilidad Rayleigh “pertenece a la familia de distribución”.

Para el mismo método, para la función de distribución de Weibull, reveló que el coeficiente A tiene un valor promedio de 0.981, cercano a 1. Así también, muestra que el coeficiente B tiene un valor promedio de 0.013, cercano a 0; de esta manera demuestra que las familias están relacionadas. Añadido a esto, el coeficiente de determinación reportó un promedio de 99.3%, revelando que la distribución de probabilidad Weibull también “pertenece a la familia de distribución”.

En tercer lugar, se obtuvo el ajuste perfecto de las alturas de ola, donde, compara la distribución empírica de los datos con las distribuciones de Rayleigh y Weibull según tabla 7-10. Esto indicó que la suma de errores al cuadrado promedio de la distribución de Rayleigh fue de 0.601 y para la distribución de Weibull la suma de errores al cuadrado promedio fue de 0.231. Además, es posible afirmar que el mejor ajuste se presentó hacia el sur de Chile, mientras que al Norte se presentó el peor ajuste de las localidades estudiadas.

La tabla 7-9 resume el estudio de las alturas de ola en forma general, en ella contiene el ajuste lineal con sus correspondientes coeficientes de ajuste lineal y coeficiente de determinación con sus respectivos parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo para las distribuciones Rayleigh y Weibull.

La tabla 7-10 contiene el ajuste perfecto a recta 45° con sus parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo de la suma de errores al cuadrado para las distribuciones Rayleigh y Weibull.

La tabla 7-8, muestra los resultados obtenidos en el papel probabilístico a partir de los gráficos de los resultados del ajuste lineal y perfecto con el método de los papeles probabilísticos en conjunto de las distribuciones Rayleigh y Weibull, donde podemos identificar si existió asimetría positiva o subestimación de valores, asimetría negativa o sobrestimación de valores y la mezcla de poblaciones, podemos obtener lo siguiente:

Tabla 7-8: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.

Localidad	Probabilidad acumulada debajo el 50%		50%		Probabilidad acumulada sobre el 50%		Cantidad de población
	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	
Iquique	∩	∩	∩	U	U y ∩	U y ∩	3
Obispo	∩	∩	-	U	U	U	3
La Serena	U	-	U	-	∩	-	2

Quintero	U	U	U	U	∩	∩	2
Punta Loros	∩	∩	-	-	U	U	3
Topocalma	∩	∩	∩	∩	U	U	2
Constitución	∩	-	U	U	U	U	4
Punta Lavapié	∩	-	∩	-	U	-	2
Tucapel	∩	∩	∩	U	∩	∩	2
Punta Morhuilla	∩	∩	-	U	U	U	2
Galera	∩	∩	∩	∩	U	U	3

(Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- ∩ : Asimetría positiva, subestimación de valores.
- U : Asimetría negativa, sobrestimación de valores.
- : Se relacionaron ambas familias.

Según tabla 7-8, respecto a la probabilidad acumulada que están por debajo el 50% las localidades de Iquique, Obispo, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que en las localidades de La Serena y Quintero la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Iquique, Obispo, Punta Loros, Topocalma, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En La Serena, Constitución y Punta Lavapié la probabilidad Weibull se relacionó con los datos empírico. Y en Quintero la probabilidad de Weibull sobrestimó a los datos empíricos.

En la probabilidad acumulada que están en el 50% de los datos las localidades de Iquique, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel y Galera, la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que en las localidades de La Serena, Quintero y Constitución la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. Las localidades de Obispo, Punta Loros y Punta Morhuilla la probabilidad de Rayleigh se relacionó con los datos empíricos. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Topocalma y Galera la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En Iquique, Obispo, Quintero, Constitución, Tucapel y Punta Morhuilla la probabilidad Weibull sobrestimó a los datos empíricos. Y en La Serena, Punta Loros y Punta Lavapié, la probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empíricos.

En la probabilidad acumulada que están sobre el 50% las localidades de La Serena, Quintero y Tucapel, la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que, en las localidades de Obispo, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En Iquique existió una mezcla de poblaciones en la probabilidad de Rayleigh subestimando y sobrestimando a la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Quintero y Tucapel la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En Obispo, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Morhuilla y Galera la probabilidad Weibull sobrestimó a los datos empíricos. Y en La Serena y Punta Lavapié, la

probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empírico. En Iquique existió una mezcla de poblaciones en la probabilidad de Weibull subestimando y sobrestimando a la probabilidad empírica.

Al corroborar los resultados mediante la comparación entre la función de la densidad de probabilidades de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia en conjunto con la densidad de la distribución Rayleigh y Weibull, indicaron que ambas distribuciones están relacionadas. Aunque la distribución de Weibull presenta una semejanza mayor a los datos de campo en comparación con la distribución Rayleigh para el análisis de alturas de ola en su forma general como se muestran en las siguientes figuras 7-9 a 7-11. En otros casos, la distribución Rayleigh y la distribución Weibull se comportaron de la misma manera. Podemos visualizarlo en las localidades del Norte, Centro y Sur respectivamente con Iquique, Quintero y Galera.

En el capítulo anexo, se incluyen gráficos correspondientes al análisis de las alturas de ola de la probabilidad empírica de los datos y, la distribución Rayleigh y Weibull para cada localidad estudiada. Estos muestran el ajuste lineal, con su respectiva ecuación de la recta, parámetros de ajuste y estimación del coeficiente de determinación en las figuras 11-5, 11-18, 11-31, 11-43, 11-56, 11-69, 11-82, 11-95, 11-107, 11-120 y 11-133 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Rayleigh. Y en las figuras 11-6, 11-19, 11-32, 11-44, 11-57, 11-70, 11-83, 11-96, 11-108, 11-121 y 11-134 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Weibull. Como también el ajuste perfecto con la suma de errores al cuadrado del ajuste a la recta 45° en las figuras 11-7, 11-20, 11-33, 11-45, 11-58, 11-71, 11-84, 11-97, 11-109, 11-122 y 11-135 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

Tabla 7-9: Resumen resultados del análisis de alturas de ola de la forma general.

Localidad	Ajuste lineal											
	Rayleigh						Weibull					
	Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación				Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación			
	Coef.A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Coef. A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	0.985	0.014	0.985	0.941	0.999	0.941	0.983	0.013	0.993	0.967	1.000	0.967
Obispo	0.931	0.051	0.987	0.942	0.999	0.942	0.966	0.018	0.992	0.968	0.999	0.968
La Serena	0.991	0.009	0.983	0.915	0.999	0.915	0.985	0.011	0.992	0.957	0.999	0.957
Quintero	1.084	-0.060	0.978	0.740	0.999	0.740	1.003	0.002	0.990	0.908	0.999	0.908
Punta Loros	0.980	0.014	0.992	0.759	0.999	0.759	0.977	0.015	0.993	0.896	0.999	0.896
Topocalma	0.986	0.013	0.991	0.782	0.999	0.782	0.990	0.008	0.994	0.918	0.999	0.918
Constitución	0.999	-0.003	0.991	0.874	0.999	0.874	0.980	0.012	0.993	0.911	0.999	0.911
Punta Lavapié	0.981	0.015	0.990	0.894	0.999	0.894	0.979	0.015	0.992	0.956	0.999	0.956
Tucapel	0.953	0.033	0.991	0.946	0.999	0.946	0.968	0.018	0.992	0.964	0.999	0.964
Punta Morhuilla	0.978	0.014	0.992	0.850	0.999	0.850	0.976	0.015	0.994	0.874	0.999	0.874
Galera	0.983	0.010	0.992	0.923	0.999	0.923	0.979	0.013	0.994	0.960	0.999	0.960

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 7-10: Resumen resultados del análisis de alturas de ola de la forma general para ajuste perfecto.

Localidad	Rayleigh				Weibull			
	Suma de los errores al cuadrado				Suma de los errores al cuadrado			
	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	1.051	0.086	3.989	0.086	0.454	0.057	3.292	0.057
Obispo	0.765	0.060	3.876	0.060	0.345	0.055	1.128	0.055
La Serena	1.121	0.074	7.630	0.074	0.310	0.060	2.026	0.060
Quintero	1.864	0.052	17.108	0.052	0.504	0.039	3.655	0.039
Punta Loros	0.232	0.028	10.110	0.028	0.139	0.019	1.522	0.019
Topocalma	0.263	0.018	11.182	0.018	0.134	0.020	3.411	0.020
Constitución	0.283	0.032	4.320	0.032	0.140	0.023	1.654	0.023
Punta Lavapié	0.269	0.033	2.844	0.033	0.146	0.022	0.557	0.022
Tucapel	0.246	0.025	2.578	0.025	0.132	0.022	0.517	0.022
Punta Morhuilla	0.248	0.025	3.714	0.025	0.119	0.020	0.761	0.020
Galera	0.264	0.028	8.664	0.028	0.118	0.020	1.156	0.020

(Fuente: Elaboración propia)

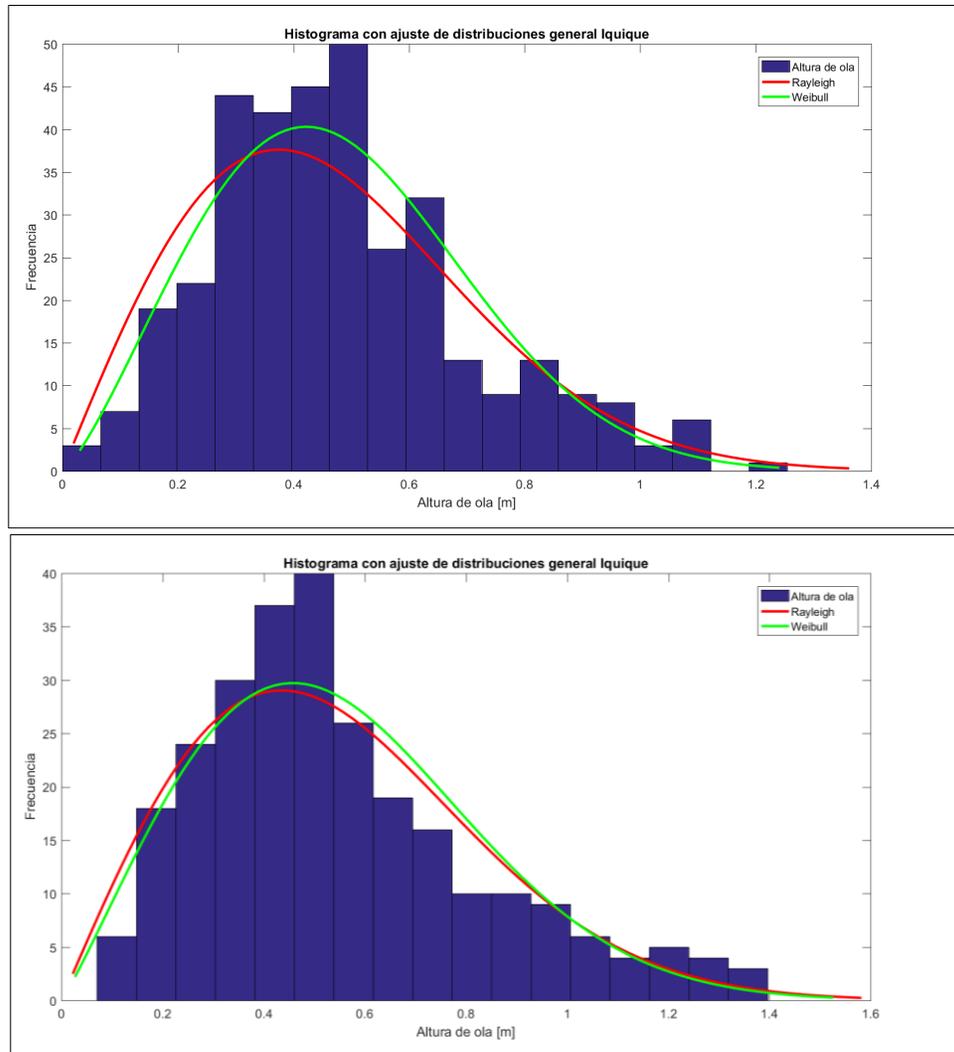


Figura 7-9: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Iquique
(Fuente: Elaboración propia)

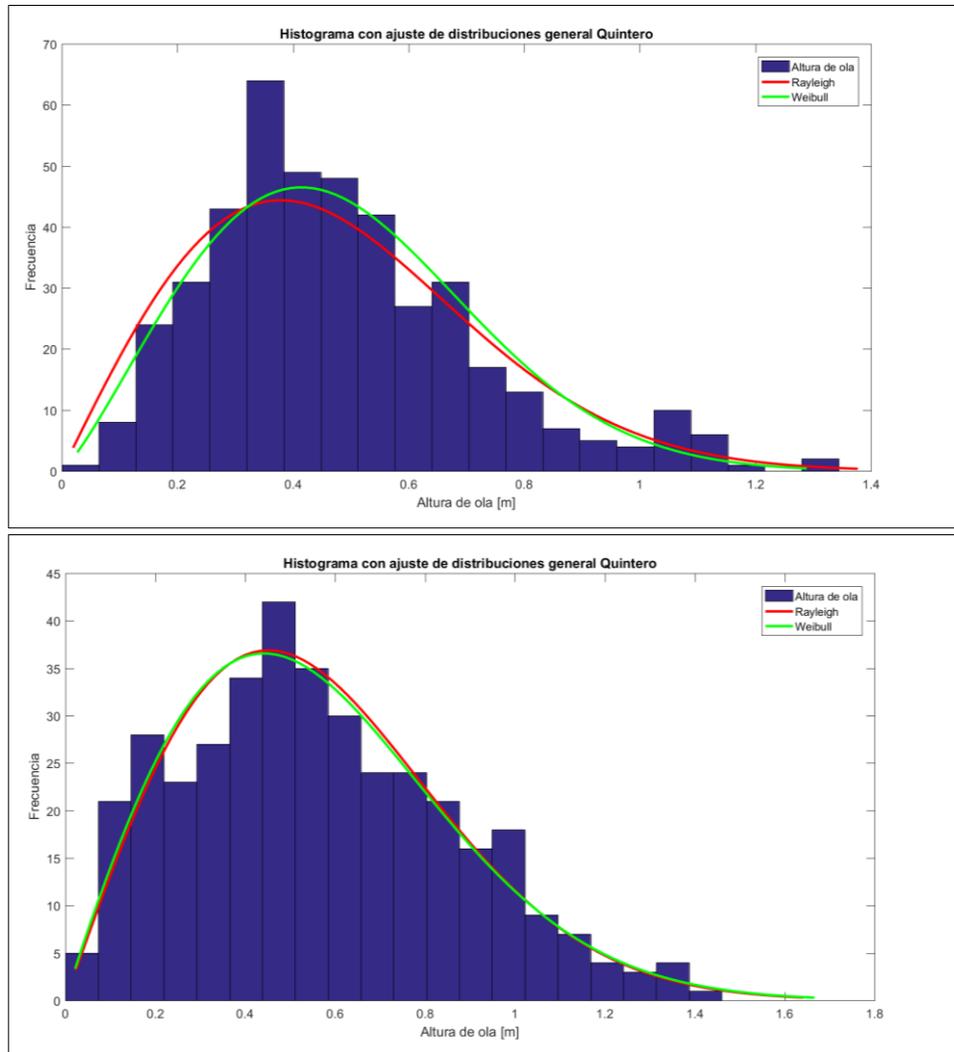


Figura 7-10: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Quintero
(Fuente: Elaboración propia)

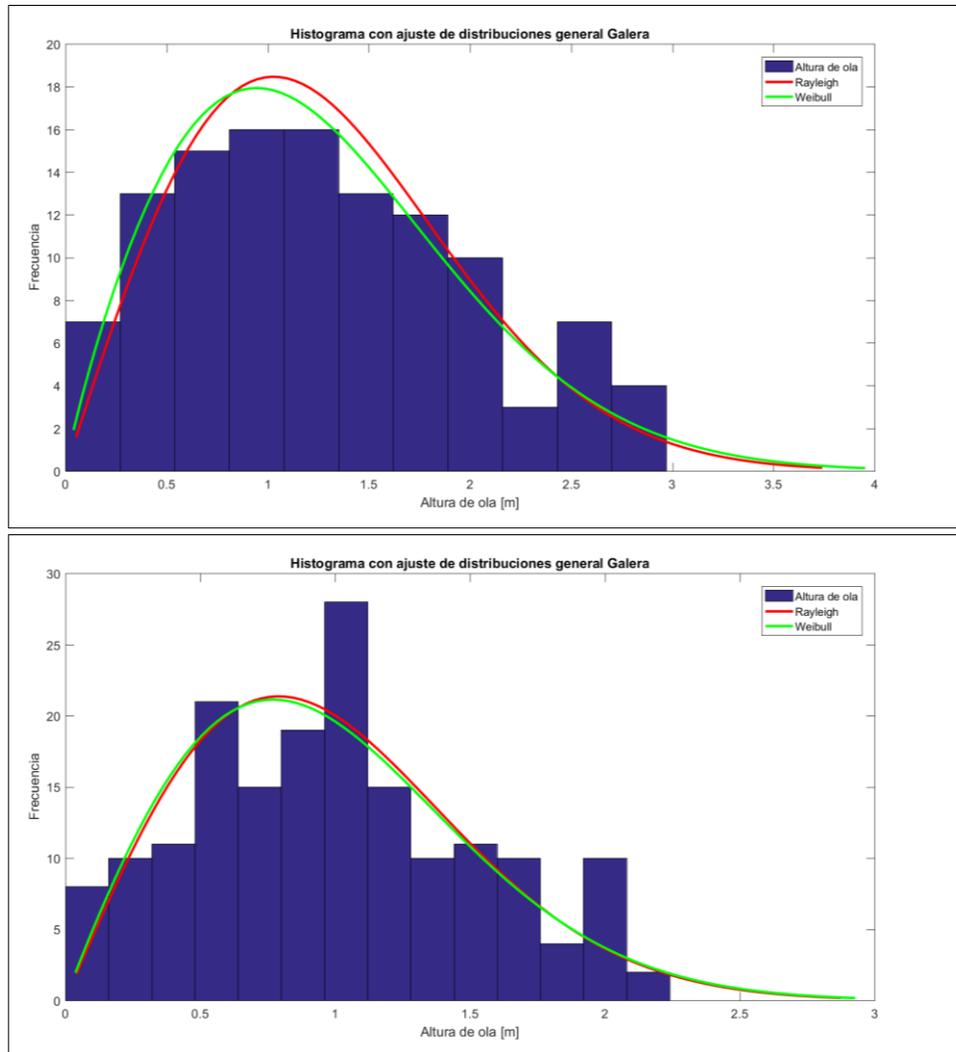


Figura 7-11: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo Galera
(Fuente: Elaboración propia)

7.2.3.2 POR NATURALEZA

Sea

Como resultado del análisis de las alturas de ola por tipo de oleaje Sea, utilizando el método gráfico de los papeles probabilísticos, se obtuvo en primer lugar el coeficiente b de la función de distribución Rayleigh y los coeficientes a y b de la distribución Weibull, con los siguientes resultados por localidad como se muestra en la tabla 7-11. En promedio, el valor del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh fue de 0.582 y para los coeficientes a y b de la función de distribución de Weibull 0.823 y 2.125 respectivamente.

Tabla 7-11: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull oleaje tipo Sea

Localidad	Coeficientes		
	Probabilidad Rayleigh	Probabilidad Weibull	
	b	a	b
Iquique	0.249	0.354	2.256
Obispo	0.255	0.354	1.996
La Serena	0.648	0.910	2.152
Quintero	0.443	0.638	2.481
Punta Loros	0.598	0.847	2.067
Topocalma	0.741	1.034	1.970
Constitución	0.746	1.060	2.099
Punta Lavapié	0.476	0.680	2.165
Tucapel	0.690	0.971	2.012
Punta Morhuilla	0.750	1.065	2.092
Galera	0.806	1.142	2.082
Máx.	0.806	1.142	2.481
Mín.	0.249	0.354	1.970
Media	0.582	0.823	2.125

(Fuente: Elaboración propia)

En las siguientes figuras 7-12, 7-13 y 7-14, se visualizan los coeficientes b de la función de distribución Rayleigh y coeficientes a y b de la distribución Weibull referenciados con respecto a la latitud de cada localidad, para verificar si existe alguna diferencia notoria u similitud entre localidades cercanas. Como resultado del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh, los valores aumentan hacia el sur de Chile entre las localidades de La Serena a Galera con valores de entre 0.648 y 0.806, aunque, en las localidades de Iquique y Obispo se visualizó un valor menor de entre las localidades con 0.249 y 0.255 respectivamente como se ve en la figura 7-12.

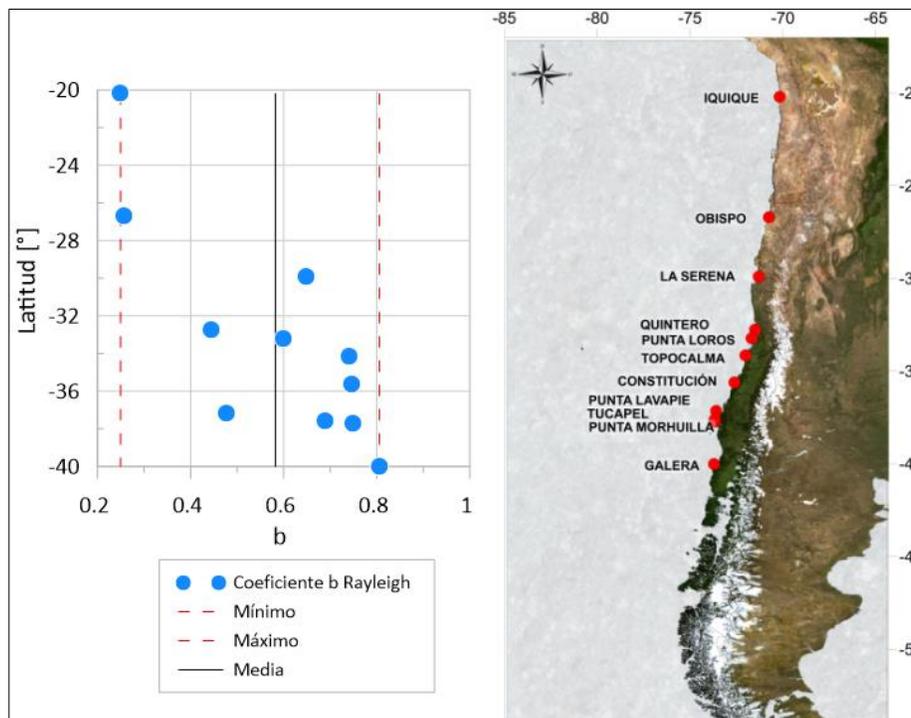


Figura 7-12: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

El coeficiente a de la distribución de Weibull, reveló que hacia el sur de Chile los valores aumentan entre las localidades de La Serena y Galera concentrándose entre 0.638y 1.142, como se muestra en la figura 7-13, los valores menores estuvieron en las localidades de Iquique y Obispo con un valor de 0.354.

En cuanto al el coeficiente b de la función de distribución de Weibull, se concentraron los valores en la mayoría de las localidades entre 1.970 y 2.165, como se muestra en la figura 7-14, a excepción de las localidades de Iquique y Quintero con valores de 2.481 y 2.256 respectivamente.

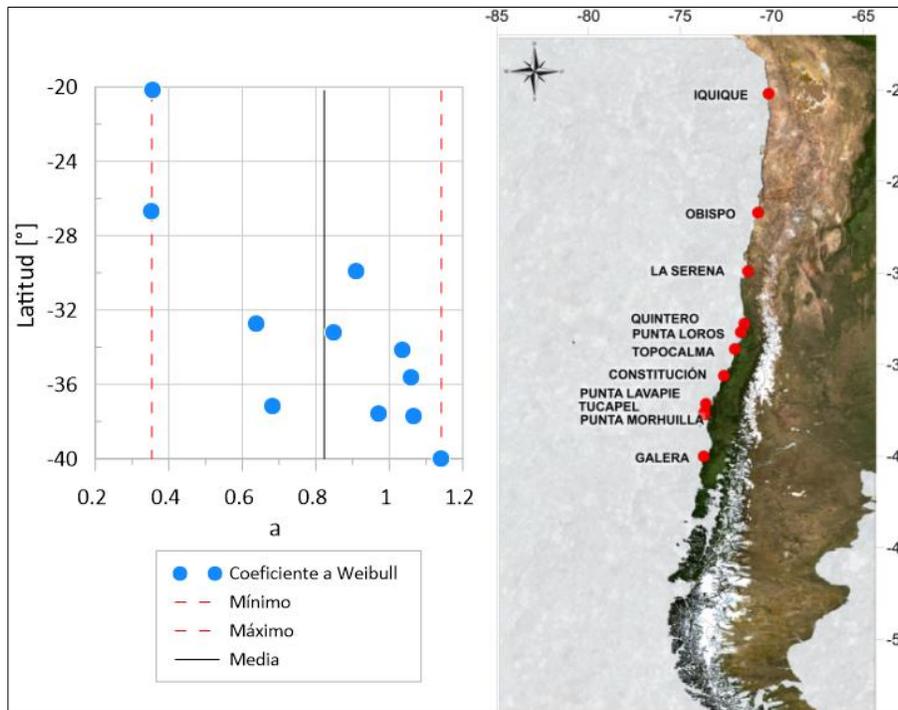


Figura 7-13: Coeficiente a de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

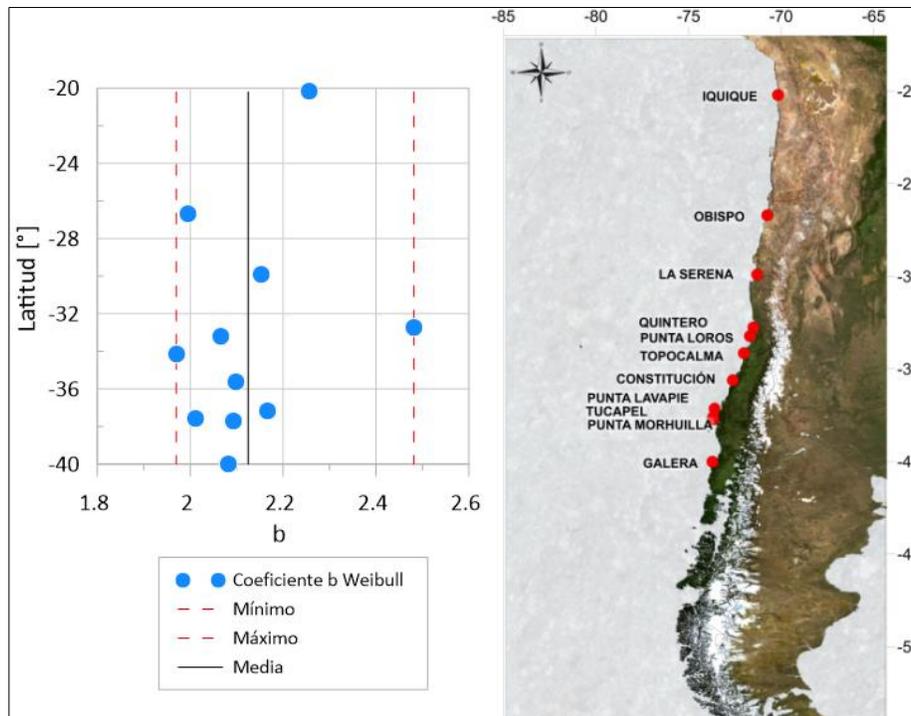


Figura 7-14: Coeficiente b de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación para las funciones de distribución de Rayleigh y Weibull.

En cuanto a los valores del ajuste lineal de la recta según tabla 7-13 para la función de la distribución de Rayleigh, reveló que el coeficiente A (pendiente), tiene un valor promedio de 1.024. Por otro lado, el coeficiente B (intercepto) tiene un valor -0.013 interceptando el eje y en valores negativos; indicando que las familias no están relacionadas. Por otra parte, el coeficiente de determinación dio en promedio un 98.4%, mostrando que la distribución de probabilidad Rayleigh “pertenece a la familia de distribución”, pero las familias no están relacionadas por lo que no se ajustó a la distribución.

Para el mismo método, para la función de distribución de Weibull, reveló que el coeficiente A tiene un valor promedio de 0.996, cercano a 1. Así también, mostró que el coeficiente B tiene un valor promedio de 0.008, cercano a 0; de esta manera demostró que las familias están relacionadas. Añadido a esto, el coeficiente de determinación reportó un promedio de 99.0%, revelando que la distribución de probabilidad Weibull “pertenece a la familia de distribución”.

En tercer lugar, se obtuvo el ajuste perfecto de las alturas de ola, donde, compara la distribución empírica de los datos con las distribuciones de Rayleigh y Weibull según tabla 7-14. Esto indicó que la suma de errores al cuadrado promedio de la distribución de Rayleigh fue de 0.539 y para la distribución de Weibull la suma de errores al cuadrado promedio fue de 0.192.

La tabla 7-13 resume el estudio de las alturas de ola por tipo de oleaje Sea, en ella contiene el ajuste lineal con sus correspondientes coeficientes de ajuste lineal y coeficiente de determinación con sus respectivos parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo para las distribuciones Rayleigh y Weibull. La tabla 7-14 contiene el ajuste perfecto a recta 45° con sus parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo de la suma de errores al cuadrado para las distribuciones Rayleigh y Weibull.

La tabla 7-12, muestra los resultados obtenidos en el papel probabilístico a partir de los gráficos de los resultados del ajuste lineal y perfecto con el método de los papeles probabilísticos en conjunto de las distribuciones Rayleigh y Weibull, donde podemos identificar si existió asimetría positiva o subestimación de valores, asimetría negativa o sobrestimación de valores y la mezcla de poblaciones, podemos obtener lo siguiente:

Tabla 7-12: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.

Localidad	Probabilidad acumulada debajo el 50%		50%		Probabilidad acumulada sobre el 50%		Cantidad de población
	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	
Iquique	∩	∩	∩	-	U	-	2
Obispo	∩	∩	∩	∩	U y ∩	U y ∩	2
La Serena	U	∩	U	U	∩	-	3
Quintero	U	-	U	-	∩	∩	2
Punta Loros	∩	∩	U	U	U	∩	3

Topocalma	∩	∩	∩	U	U	U	3
Constitución	U	∩	U	-	∩	U	4
Punta Lavapié	U	-	U	U	∩	U	4
Tucapel	∩	∩	∩	∩	U y ∩	U y ∩	3
Punta Morhuilla	∩	∩	U	-	-	-	3
Galera	∩	∩	∩	-	U	U	3

(Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- ∩ : Asimetría positiva, subestimación de valores.
- U : Asimetría negativa, sobrestimación de valores.
- : Se relacionaron ambas familias.

Según tabla 7-12, respecto a la probabilidad acumulada que están por debajo el 50% las localidades de Iquique, Obispo, Punta Loros, Topocalma, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que en las localidades de La Serena, Quintero, Constitución y Punta Lavapié la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En Quintero y Punta Lavapié la probabilidad Weibull se relacionó con los datos empíricos.

En la probabilidad acumulada que están en el 50% de los datos las localidades de Iquique, Obispo, Topocalma, Tucapel y Galera, la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que, en las localidades de La Serena, Quintero, Punta Loros, Constitución, Punta Lavapié y Punta Morhuilla la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Obispo y Tucapel la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En La Serena, Punta Loros, Topocalma y Punta Lavapié la probabilidad Weibull sobrestimó a los datos empíricos. Y en Iquique, Quintero, Constitución, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empíricos.

En la probabilidad acumulada que están sobre el 50% las localidades de La Serena, Quintero, Constitución y Punta Lavapié la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. Mientras que, en las localidades de Iquique, Punta Loros, Topocalma y Galera, la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En Obispo y Tucapel existió una mezcla de poblaciones en la probabilidad de Rayleigh subestimando y sobrestimando a la probabilidad empírica. En Punta Morhuilla la probabilidad Rayleigh se relacionó con los datos empírico. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Quintero y Punta Loros la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En Topocalma, Constitución, Punta Lavapié y Galera la probabilidad Weibull sobrestimó a los datos empíricos. Y en Iquique, La Serena y Punta Morhuilla la probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empírico. En Obispo y Tucapel existió una mezcla de poblaciones en la probabilidad de Weibull subestimando y sobrestimando a la probabilidad empírica.

Al corroborar los resultados mediante la comparación entre la función de la densidad de probabilidades de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia en conjunto con la densidad de la distribución Rayleigh y Weibull, indicaron que la distribución de Weibull presentó el mejor ajuste a los datos de campo, mientras que la distribución Rayleigh no se ajustó para el análisis de alturas de ola por tipo de oleaje Sea como se muestra en las siguientes figuras 7-15 a 7-17. Podemos visualizarlo en las localidades del Norte, Centro y Sur respectivamente con Iquique, Quintero y Galera.

En el capítulo anexo, se incluyen gráficos correspondientes al análisis de las alturas de ola por tipo de oleaje Sea de la probabilidad empírica de los datos y la distribución Rayleigh e Weibull para cada localidad estudiada. Estos muestran el ajuste lineal, con su respectiva ecuación de la recta, parámetros de ajuste y estimación del coeficiente de determinación en las figuras 11-8, 11-21, 11-34, 11-46, 11-59, 11-72, 11-85, 11-98, 11-110, 11-123 y 11-136 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Rayleigh. Y en las figuras 11-9, 11-22, 11-35, 11-47, 11-60, 11-73, 11-86, 11-99, 11-111, 11-124 y 11-137 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Weibull. Como también el ajuste perfecto con la suma de errores al cuadrado del ajuste a la recta 45° en las figuras 11-10, 11-23, 11-36, 11-48, 11-61, 11-74, 11-87, 11-100, 11-112, 11-125 y 11-138 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

Tabla 7-13: Resumen resultados del análisis de alturas de olas Sea.

Localidad	Ajuste lineal Sea											
	Rayleigh						Weibull					
	Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación				Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación			
	Coef. A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Coef. A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	1.040	-0.030	0.980	0.921	0.999	0.921	0.989	0.010	0.992	0.962	0.999	0.962
Obispo	0.991	0.017	0.979	0.906	0.998	0.906	0.994	0.011	0.990	0.952	0.999	0.952
La Serena	1.030	-0.017	0.982	0.917	0.999	0.917	0.998	0.006	0.992	0.964	0.999	0.964
Quintero	1.114	-0.085	0.971	0.715	1.000	0.715	1.008	-0.001	0.987	0.850	1.000	0.850
Punta Loros	1.012	-0.004	0.990	0.866	0.999	0.866	0.994	0.010	0.991	0.922	0.999	0.922
Topocalma	1.004	0.011	0.985	0.897	0.999	0.754	1.010	0.002	0.990	0.974	0.999	0.921
Constitución	1.018	-0.010	0.989	0.872	0.999	0.872	0.995	0.009	0.991	0.930	0.999	0.930
Punta Lavapié	1.034	-0.023	0.988	0.886	0.998	0.886	0.994	0.010	0.989	0.936	0.999	0.936
Tucapel	0.998	0.009	0.987	0.897	0.999	0.897	0.992	0.013	0.988	0.912	0.999	0.912
Punta Morhuilla	1.012	-0.006	0.990	0.887	0.999	0.887	0.991	0.011	0.991	0.937	0.999	0.937
Galera	1.012	-0.005	0.988	0.893	0.999	0.893	0.993	0.010	0.991	0.922	0.999	0.922

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 7-14: Resumen resultados del análisis de alturas de olas Sea para ajuste perfecto.

Localidad	Sea							
	Rayleigh				Weibull			
	Suma de los errores al cuadrado				Suma de los errores al cuadrado			
	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	0.848	0.045	3.038	0.045	0.320	0.044	2.878	0.044
Obispo	0.561	0.040	3.072	0.040	0.183	0.028	1.012	0.028
La Serena	0.884	0.040	4.813	0.040	0.228	0.032	2.065	0.032
Quintero	1.870	0.072	17.211	0.072	0.442	0.067	3.436	0.067
Punta Loros	0.200	0.025	4.470	0.025	0.114	0.016	1.208	0.016
Topocalma	0.459	0.050	16.281	0.024	0.288	0.047	16.434	0.016
Constitución	0.260	0.022	4.806	0.022	0.115	0.019	1.425	0.019
Punta Lavapié	0.243	0.022	1.381	0.022	0.124	0.020	0.736	0.020
Tucapel	0.165	0.019	1.854	0.019	0.102	0.017	0.746	0.017
Punta Morhuilla	0.202	0.018	3.962	0.018	0.098	0.015	0.589	0.015
Galera	0.237	0.025	9.048	0.025	0.093	0.022	0.884	0.022

(Fuente: Elaboración propia)

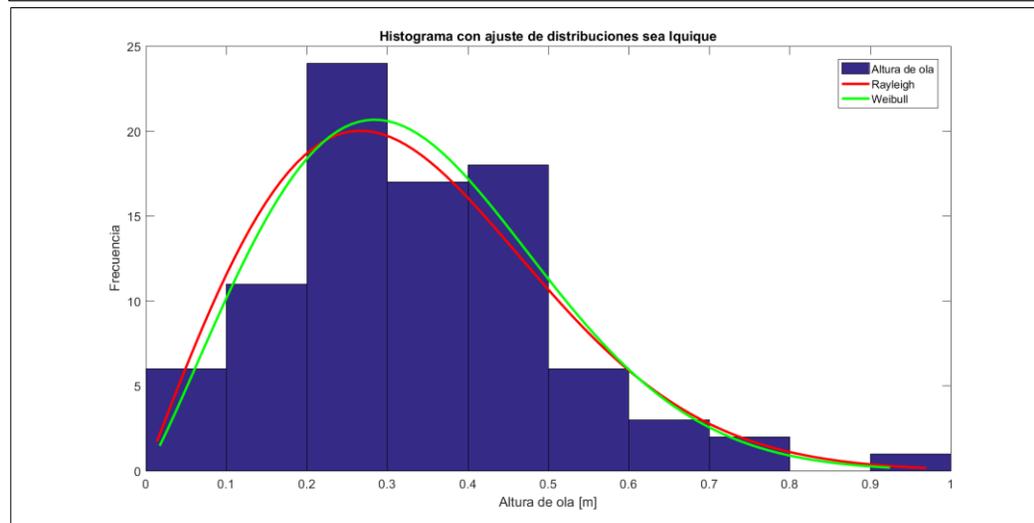
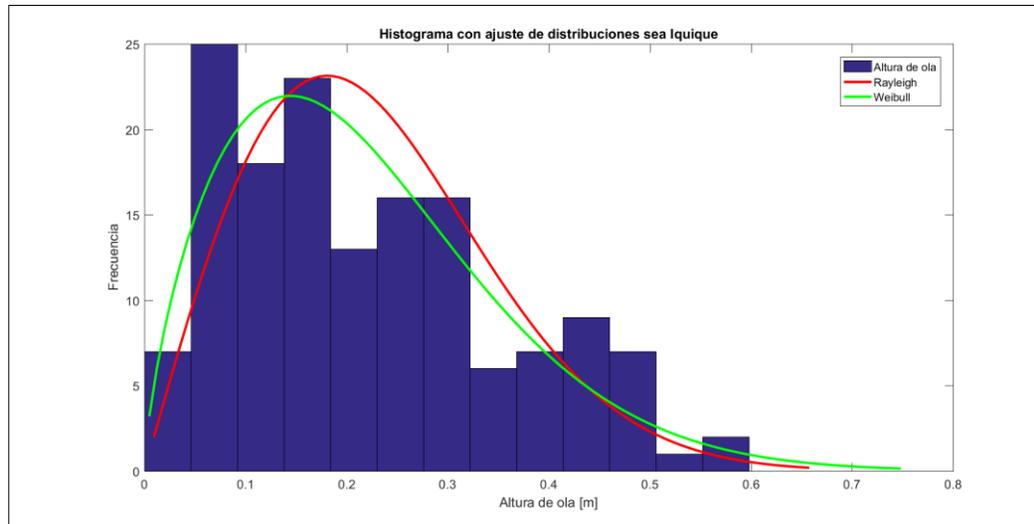


Figura 7-15: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Iquique. (Fuente: Elaboración propia)

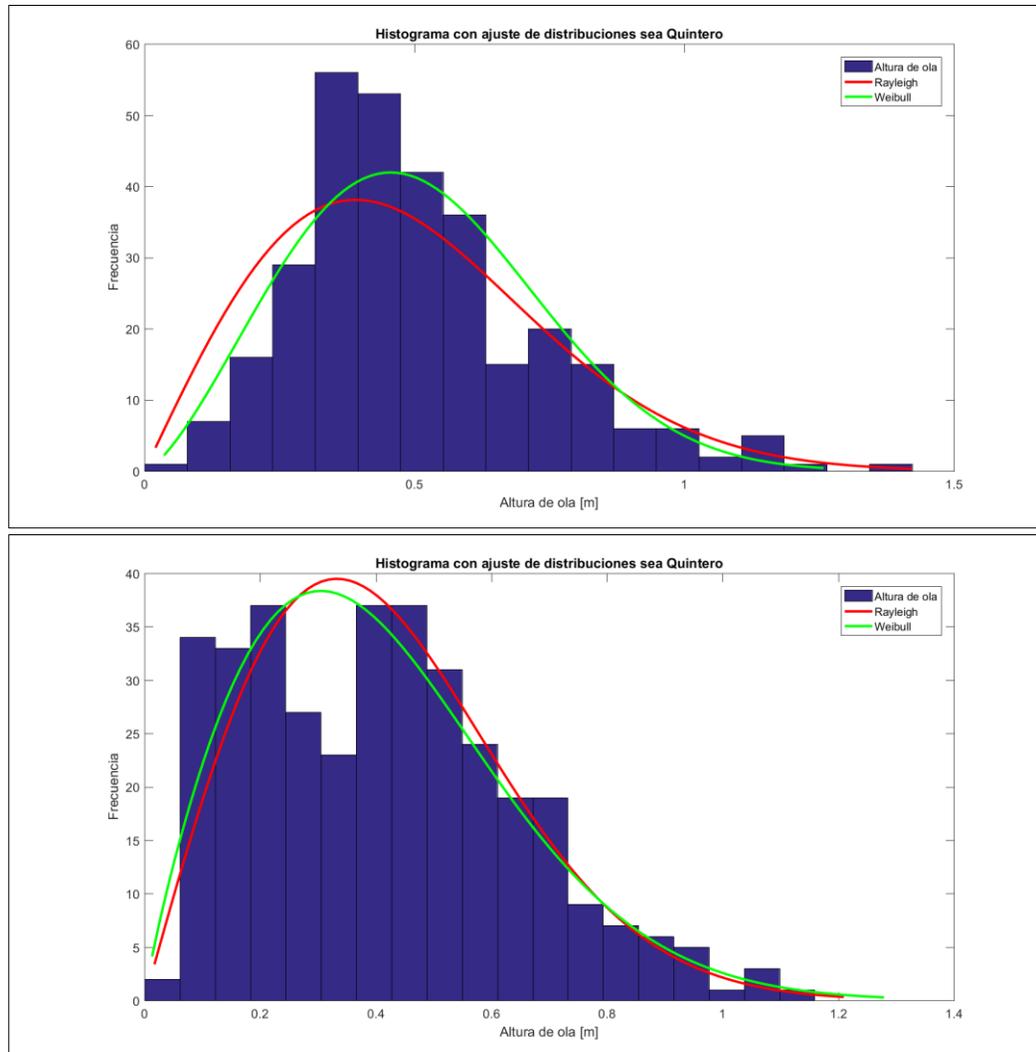


Figura 7-16: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Quintero. (Fuente: Elaboración propia)

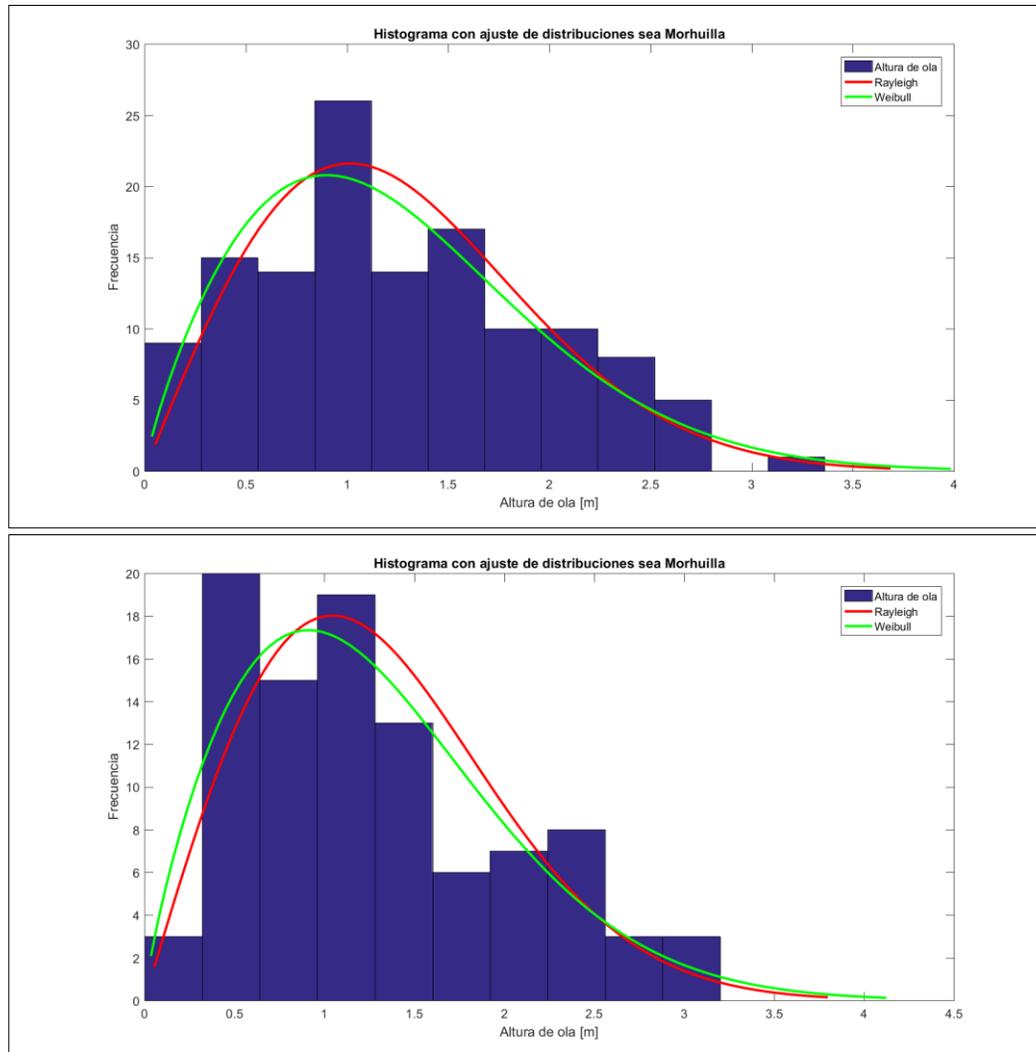


Figura 7-17: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Sea Punta Morhuilla (Fuente: Elaboración propia)

Swell

Como resultado del análisis de las alturas de ola por tipo de oleaje *Swell*, utilizando el método gráfico de los papeles probabilísticos, se obtuvo en primer lugar el coeficiente b de la función de distribución Rayleigh y los coeficientes a y b de la distribución Weibull, con los siguientes resultados por localidad como se muestra en la tabla 7-15. En promedio, el valor del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh fue de 1.063 y para los coeficientes a y b de la función de distribución de Weibull 1.593 y 3.790 respectivamente.

Tabla 7-15: Coeficientes promedios de función de distribución Rayleigh y Weibull oleaje tipo *Swell*.

Localidad	Coeficientes		
	Probabilidad Rayleigh	Probabilidad Weibull	
	b	a	b
Iquique	0.503	0.753	3.806
Obispo	0.588	0.880	3.382
La Serena	1.202	1.794	3.716
Quintero	0.657	0.983	3.847
Punta Loros	1.053	1.582	4.008
Topocalma	1.259	1.881	3.393
Constitución	1.251	1.877	3.946
Punta Lavapié	0.902	1.354	3.945
Tucapel	1.400	2.101	3.788
Punta Morhuilla	1.369	2.056	3.952
Galera	1.508	2.264	3.910
Máx.	1.508	2.264	4.008
Mín.	0.503	0.753	3.382
Media	1.063	1.593	3.790

(Fuente: Elaboración propia)

En las siguientes figuras 7-18, 7-19 y 7-20, se visualizan los coeficientes b de la función de distribución Rayleigh y coeficientes a y b de la distribución Weibull referenciados con respecto a la latitud de cada localidad, para verificar si existe alguna diferencia notoria u similitud entre localidades cercanas. Como resultado del coeficiente b de la función de distribución Rayleigh, los valores aumentaron hacia el sur de Chile y se concentraron desde La Serena a Galera con valores de entre 0.902 y 1.508, a excepción de la localidad de Quintero con un valor menor de 0.657. En las localidades de Iquique y Obispo se visualizaron valores menores de 0.503 y 0.588 respectivamente como se ve en la figura 7-18.

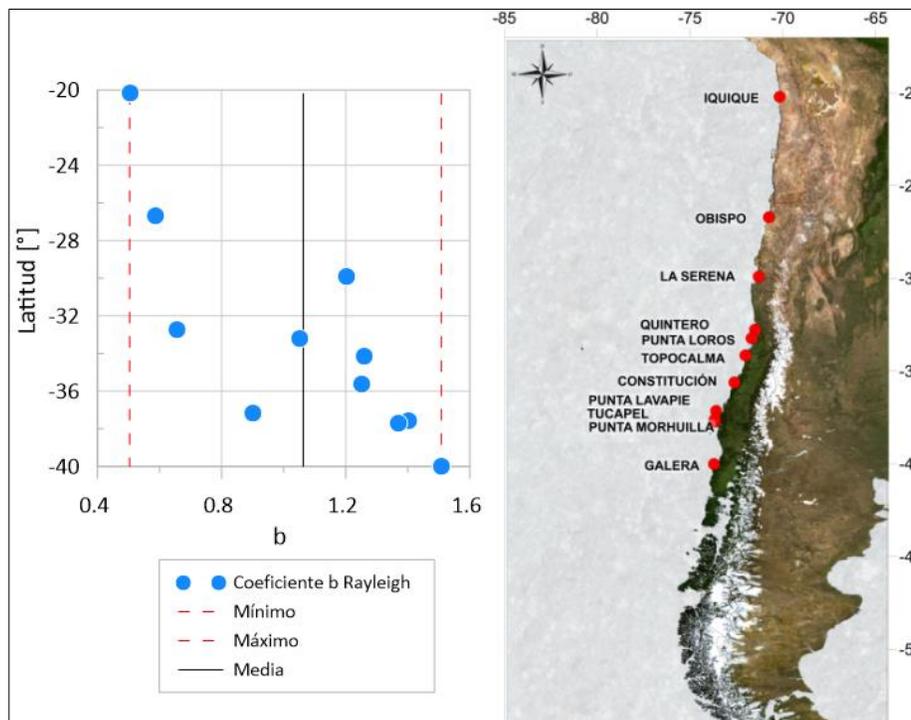


Figura 7-18: Coeficiente b de la función de distribución Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

El coeficiente a de la distribución de Weibull, reveló que hacia el sur de Chile los valores aumentaron concentrándose desde las localidades de La Serena a Galera con valores de entre 1.794 y 2.264, a excepción de la localidad de Quintero con un valor menor de 0.983, como se muestra en la figura 7-19. Los valores menores estuvieron en las localidades de Iquique y Obispo con un valor de 0.753 y 0.880 respectivamente.

En cuanto al el coeficiente b de la función de distribución de Weibull, se concentraron los valores en la mayoría de las localidades entre 3.716 y 4.008, como se muestra en la figura 7-20, a excepción de las localidades de Obispo y Topocalma con valores de 3.382 y 3.393 respectivamente.

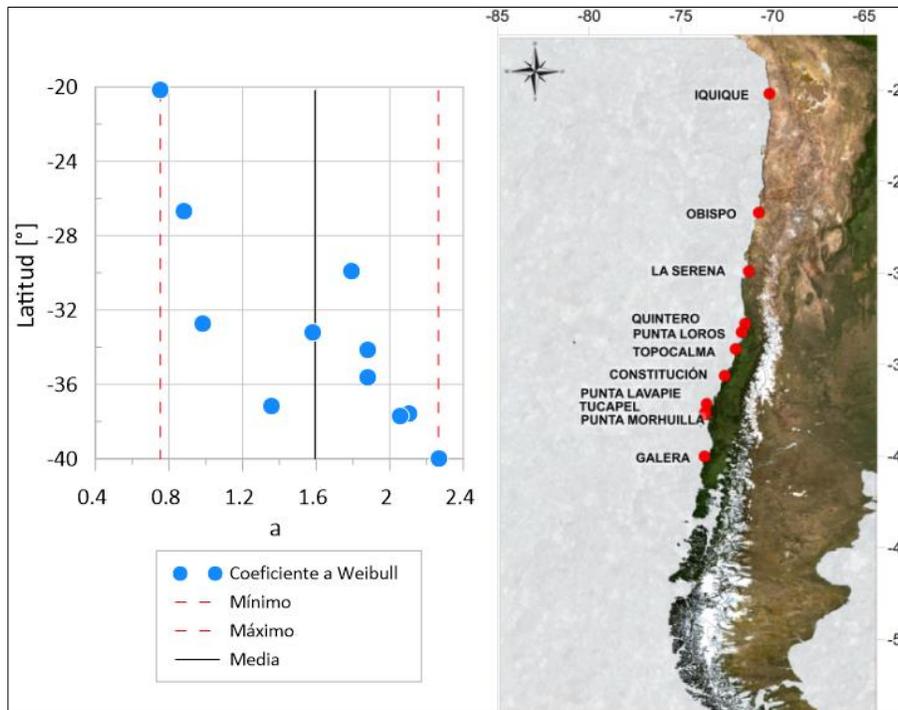


Figura 7-19: Coeficiente a de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

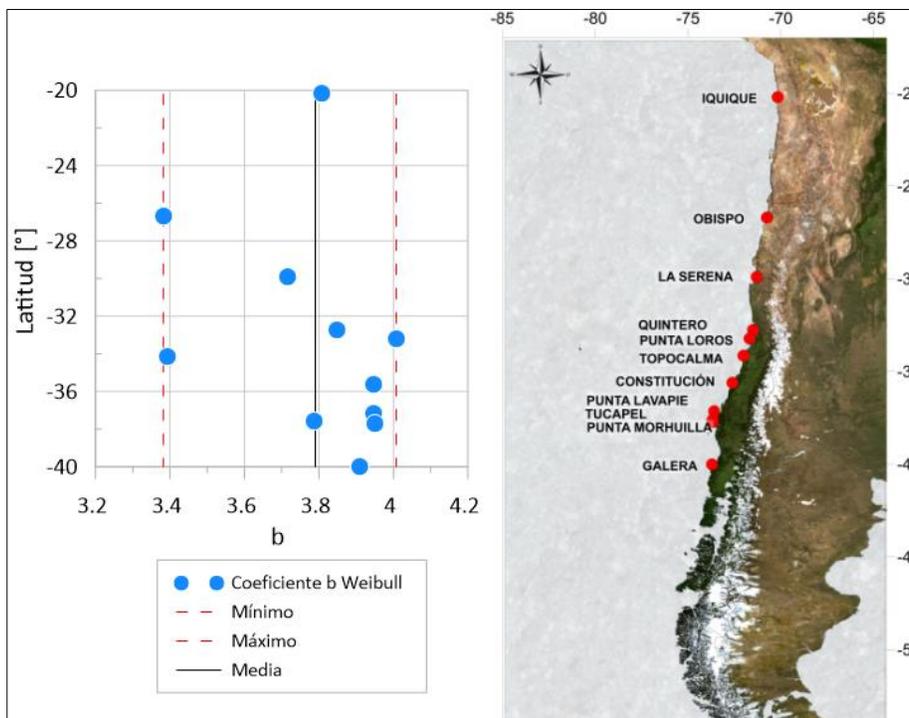


Figura 7-20: Coeficiente b de la función de distribución Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación para las funciones de distribución de Rayleigh y Weibull.

En cuanto a los valores del ajuste lineal de la recta según tabla 7-17 para la función de la distribución de Rayleigh, reveló que el coeficiente A (pendiente), tiene un valor promedio de 1.441. Por otro lado, el coeficiente B (intercepto) tiene un valor -0.322 interceptando el eje y en valores negativos; indicando que las familias no están relacionadas. Por otra parte, el coeficiente de determinación dio en promedio un 96.7%, mostrando que la distribución de probabilidad Rayleigh “pertenece a la familia de distribución”, pero las familias no están relacionadas por lo que no se ajustó a la distribución.

Para el mismo método, para la función de distribución de Weibull, reveló que el coeficiente A tiene un valor promedio de 1.000. Así también, mostró que el coeficiente B tiene un valor promedio de 0.015, cercano a 0; de esta manera demostró que las familias están relacionadas. Añadido a esto, el coeficiente de determinación reportó un promedio de 98.3%, revelando que la distribución de probabilidad Weibull “pertenece a la familia de distribución”.

En tercer lugar, se obtuvo el ajuste perfecto de las alturas de ola, donde, compara la distribución empírica de los datos con las distribuciones de Rayleigh y Weibull según tabla 7-18. Esto indicó que la suma de errores al cuadrado promedio de la distribución de Rayleigh fue de 1.027 y para la distribución de Weibull la suma de errores al cuadrado promedio fue de 0.119.

La tabla 7-17 resume el estudio de las alturas de ola por tipo de oleaje *Swell*, en ella contiene el ajuste lineal con sus correspondientes coeficientes de ajuste lineal y coeficiente de determinación con sus respectivos parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo para las distribuciones Rayleigh y Weibull.

La tabla 7-18 contiene el ajuste perfecto a recta 45° con sus parámetros estadísticos: promedio, moda, mínimo y máximo de la suma de errores al cuadrado para las distribuciones Rayleigh y Weibull.

La tabla 7-16, muestra los resultados obtenidos en el papel probabilístico a partir de los gráficos de los resultados del ajuste lineal y perfecto con el método de los papeles probabilísticos en conjunto de las distribuciones Rayleigh y Weibull, donde podemos identificar si existió asimetría positiva o subestimación de valores, asimetría negativa o sobrestimación de valores y la mezcla de poblaciones, podemos obtener lo siguiente:

Tabla 7-16: Resultados ajuste lineal y perfecto en el papel probabilístico.

Localidad	Probabilidad acumulada debajo el 50%		50%		Probabilidad acumulada sobre el 50%		Cantidad de población
	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull	
Iquique	U	U	U	∩	∩	∩	3
Obispo	U	-	U	∩	∩	-	3
La Serena	U	-	U	-	∩	U	2
Quintero	U	-	U	∩	∩	U	3

Punta Loros	U	∩	U	∩	∩	U	3
Topocalma	U	-	U	∩	∩	U	3
Constitución	U	-	U	-	∩	∩	3
Punta Lavapié	U	-	U	∩	∩	U	3
Tucapel	U	-	U	∩	∩	-	3
Punta Morhuilla	U	-	U	∩	∩	-	3
Galera	U	∩	U	-	∩	∩	3

(Fuente: Elaboración propia)

Donde:

- ∩ : Asimetría positiva, subestimación de valores.
- U : Asimetría negativa, sobrestimación de valores.
- : Se relacionaron ambas familias.

Según tabla 7-16, respecto a la probabilidad acumulada que están por debajo el 50% no existieron localidades en donde la probabilidad Rayleigh subestimó a la probabilidad empírica. Mientras que, en las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades Punta Loros y Galera la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica y en la localidad de Iquique la probabilidad de Weibull sobrestimó la probabilidad empírica. En Obispo, La Serena, Quintero, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel y Punta Morhuilla la probabilidad Weibull se relacionó con los datos empírico.

En la probabilidad acumulada que están en el 50% no existieron localidades en donde la probabilidad Rayleigh subestimó a la probabilidad empírica. Mientras que, en las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, la probabilidad Rayleigh sobrestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull no existieron localidades en donde la probabilidad Rayleigh sobrestimó a la probabilidad empírica. En Iquique, Obispo, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel y Punta Morhuilla la probabilidad Weibull subestimó a los datos empíricos. Y en La Serena, Constitución y Galera, la probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empírico.

En la probabilidad acumulada que están sobre el 50% no existieron localidades en donde la probabilidad Rayleigh sobrestimó a la probabilidad empírica. Las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la probabilidad Rayleigh subestimó la probabilidad empírica. En el caso de la probabilidad Weibull, las localidades de Iquique y Galera la probabilidad Weibull subestimó la probabilidad empírica. En La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución y Punta Lavapié la probabilidad Weibull sobrestimó a los datos empíricos. Y en Obispo, Tucapel y Punta Morhuilla la probabilidad de Weibull se relacionó con los datos empírico.

Al corroborar los resultados mediante la comparación entre la función de la densidad de probabilidades de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia en conjunto con la densidad de la distribución Rayleigh y Weibull, indicaron que la distribución de Weibull presentó el mejor ajuste a los datos de campo, mientras que la distribución Rayleigh no se ajustó para el análisis de alturas de ola por tipo de oleaje *Swell* como se muestra en las siguientes figuras 7-21 a 7-23. Podemos visualizarlo en las localidades del Norte, Centro y Sur respectivamente con Iquique, Quintero y Galera.

En el capítulo anexo, se incluyen gráficos correspondientes al análisis de las alturas de ola por tipo de oleaje *Swell* de la probabilidad empírica de los datos y la distribución Rayleigh e Weibull para cada localidad estudiada. Estos muestran el ajuste lineal, con su respectiva ecuación de la recta, parámetros de ajuste y estimación del coeficiente de determinación en las figuras 11-11, 11-24, 11-37, 11-49, 11-62, 11-75, 11-88, 11-101, 11-113, 11-126 y 11-139 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Rayleigh. Y en las figuras 11-12, 11-25, 11-38, 11-50, 11-63, 11-76, 11-89, 11-102, 11-114, 11-127 y 11-140 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente para Weibull. Como también el ajuste perfecto con la suma de errores al cuadrado del ajuste a la recta 45° en las figuras 11-13, 11-26, 11-39, 11-51, 11-64, 11-77, 11-90, 11-103, 11-115, 11-128 y 11-141 correspondientes a las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente.

Tabla 7-17: Resumen resultados del análisis de alturas de olas Swell.

Localidad	Ajuste lineal Swell											
	Rayleigh						Weibull					
	Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación				Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación			
	Coef.A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Coef. A	Coef. B	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	1.445	-0.329	0.960	0.825	0.998	0.825	1.004	0.008	0.983	0.918	0.998	0.918
Obispo	1.346	-0.260	0.973	0.903	0.999	0.903	1.002	0.010	0.984	0.919	0.999	0.919
La Serena	1.425	-0.313	0.962	0.788	0.997	0.788	0.999	0.012	0.980	0.916	0.998	0.916
Quintero	1.468	-0.339	0.963	0.754	0.997	0.754	1.001	0.014	0.978	0.829	0.999	0.829
Punta Loros	1.488	-0.354	0.965	0.736	0.997	0.736	0.997	0.019	0.982	0.859	0.998	0.859
Topocalma	1.391	-0.280	0.972	0.943	0.997	0.877	1.035	0.001	0.982	0.926	0.998	0.877
Constitución	1.474	-0.343	0.966	0.759	0.997	0.759	0.996	0.019	0.981	0.856	0.997	0.856
Punta Lavapié	1.461	-0.336	0.965	0.758	0.996	0.758	0.993	0.020	0.983	0.826	0.998	0.826
Tucapel	1.424	-0.312	0.971	0.756	0.997	0.756	0.992	0.019	0.986	0.921	0.998	0.921
Punta Morhuilla	1.466	-0.340	0.968	0.829	0.997	0.829	0.993	0.020	0.985	0.822	0.997	0.822
Galera	1.458	-0.335	0.969	0.793	0.997	0.793	0.994	0.019	0.985	0.893	0.997	0.893

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 7-18: Resumen resultados del análisis de alturas de olas Swell para ajuste perfecto.

Localidad	Swell							
	Rayleigh				Weibull			
	Suma de los errores al cuadrado				Suma de los errores al cuadrado			
	Media	Moda	Máximo	Mínimo	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	1.535	0.171	4.633	0.171	0.167	0.027	0.566	0.027
Obispo	1.456	0.336	3.667	0.336	0.177	0.019	0.620	0.019
La Serena	1.354	0.078	4.060	0.078	0.179	0.032	0.860	0.032
Quintero	1.267	0.167	3.287	0.167	0.162	0.030	1.041	0.030
Punta Loros	0.834	0.119	1.965	0.119	0.089	0.023	0.444	0.023
Topocalma	0.720	0.225	1.730	0.097	0.106	0.051	0.790	0.023
Constitución	0.804	0.068	2.069	0.068	0.091	0.019	0.399	0.019
Punta Lavapié	0.804	0.167	2.190	0.167	0.092	0.017	0.887	0.017
Tucapel	0.853	0.076	2.092	0.076	0.085	0.020	0.364	0.020
Punta Morhuilla	0.827	0.104	1.879	0.104	0.082	0.020	0.908	0.020
Galera	0.843	0.096	1.874	0.096	0.081	0.021	0.359	0.021

(Fuente: Elaboración propia)

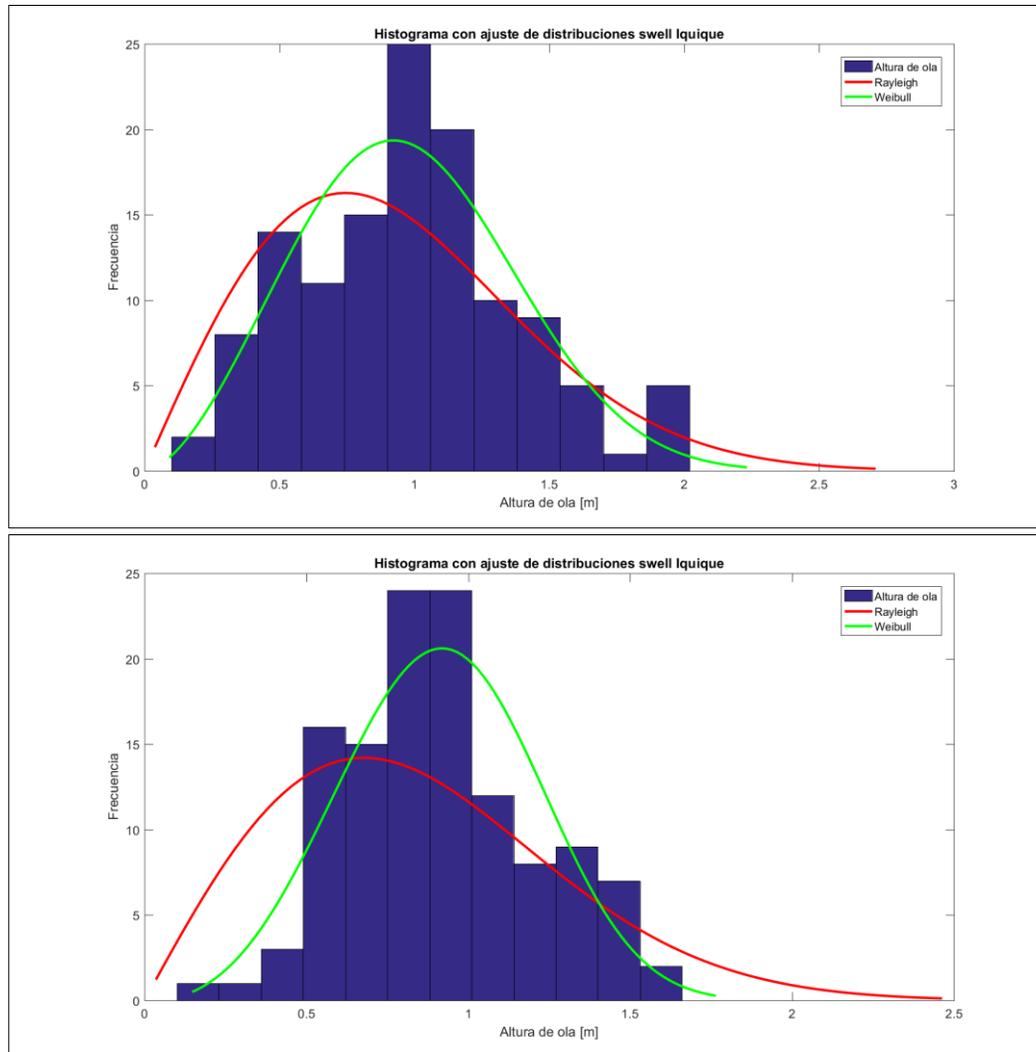


Figura 7-21: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Iquique (Fuente: Elaboración propia)

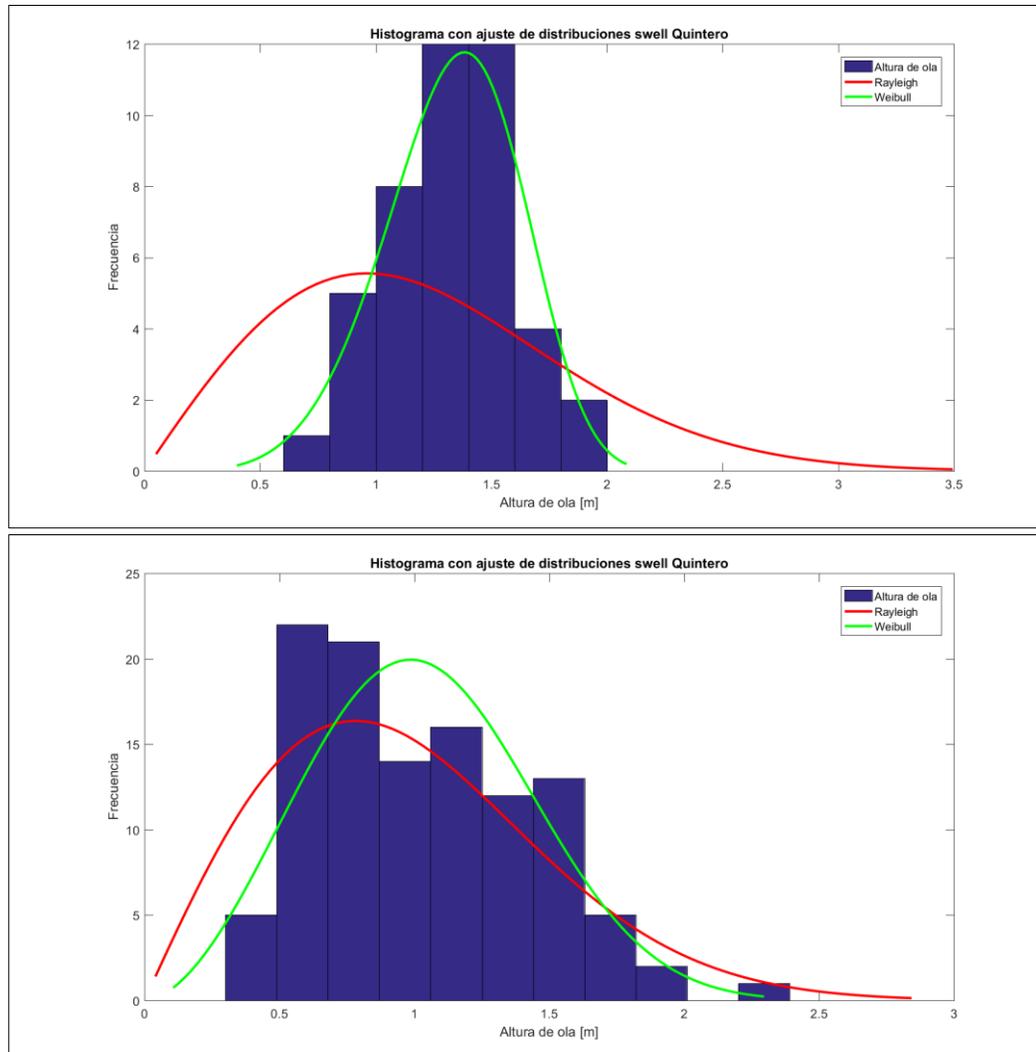


Figura 7-22: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Quintero (Fuente: Elaboración propia)

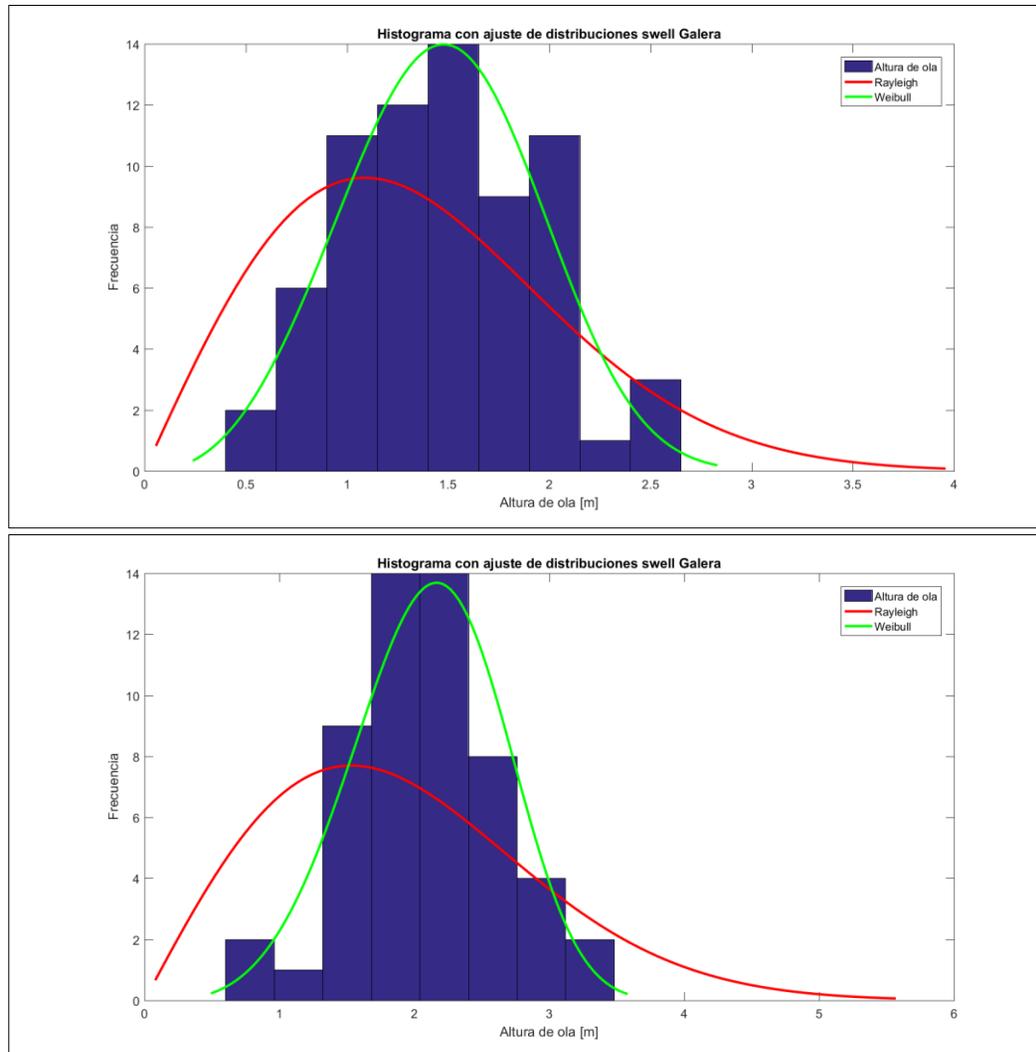


Figura 7-23: Función de densidad de distribución Rayleigh y Weibull versus histograma de los datos de campo, alturas de ola Swell Galera (Fuente: Elaboración propia)

7.2.4 ANÁLISIS DE PERÍODOS

7.2.4.1 EVALUACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PERÍODOS

Se realizó un análisis de sensibilidad de las formulaciones de densidad de períodos, con el fin de evaluar el comportamiento de las curvas de densidad de Bretschneider (1959), Longuet-Higgins (1975), Longuet-Higgins (1983), citadas por Silva (2005).

En la distribución de Bretschneider (1959), se efectuó una variación del parámetro T_{01} , evaluando los períodos con valores 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24. Esto demuestra que la curva de densidad de la distribución de Bretschneider (1959) a períodos bajos, presentó un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales, según su distribución del tipo Leptocúrtica. A medida que los períodos aumentan, la distribución se vuelve del tipo mesocúrtica presentando una concentración media alrededor de los valores centrales y mostrando un sesgo positivo (concentrando los valores a la derecha). A mayores períodos, la distribución se torna completamente Platicúrtica como se muestra en la figura 7-24.

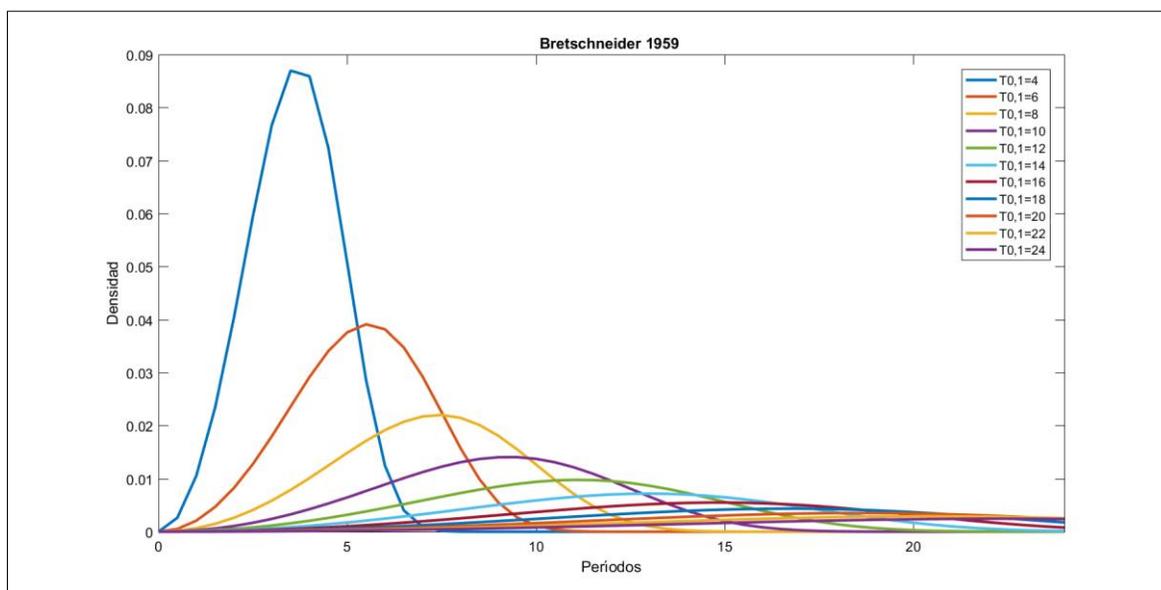


Figura 7-24: Análisis de períodos distribución de Bretschneider 1959, período variable

(Fuente: Elaboración propia)

La densidad de períodos de la distribución de Longuet-Higgins (1975) presentada en el capítulo “anexo” en el análisis de períodos con las figuras 11-142, 11-143, 11-144, 11-145 y 11-146, varió la anchura espectral con valores 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 respectivamente con los períodos T_{01} con valores 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 para todas las figuras, presentando un sesgo positivo.

La distribución a anchura espectral <0.2 y períodos <10 s, tuvo una forma Leptocúrtica, pues poseyó una mayor concentración de valores centrales en comparación con la distribución de Bretschneider. De los 10 -15 s de período y anchura espectral de 0.2-0.6, la

distribución cambia su forma a Mesocúrtica. Desde períodos >20 s, la distribución presenta una forma Platicúrtica. A medida que la anchura espectral aumenta 0.8-1, los períodos < 10 s tienen una forma Mesocúrtica y cambia a una forma Platicúrtica a los 8 s.

La densidad de períodos de Longuet-Higgins 1983 presentada en el anexo con las figuras 11-147, 11-148, 11-149, 11-150 y 11-151, tendieron a variar de la misma forma que la del año 1975, pero con una forma Leptocúrtica más relevante.

7.2.4.2 EVALUACIÓN DENSIDAD DE BRETSCHEIDER Y PERÍODOS EN CHILE

Con el fin de representar los puntos de las localidades estudiadas a una distribución de períodos, se realizó una evaluación de la densidad de la distribución de Bretschneider y la densidad de datos reales de campo. Como resultado se obtuvo la tabla 7-19, la que muestra una diferencia promedio de 0.59, donde la diferencia máxima promedio es de 0.93, y la mínima es de 0.24 de la densidad de datos en comparación con la distribución de Bretschneider.

Tabla 7-19: Resumen resultados del análisis de períodos.

Localidad	Diferencia entre Bretschneider y datos de períodos (densidad)			
	Media	Moda	Máximo	Mínimo
Iquique	0.63	0.31	0.85	0.31
Obispo	0.47	0.22	0.73	0.22
La Serena	0.66	0.33	0.87	0.33
Quintero	0.71	0.43	0.93	0.43
Punta Loros	0.59	0.22	1.04	0.22
Topocalma	0.51	0.15	0.97	0.15
Constitución	0.55	0.18	0.91	0.18
Punta Lavapié	0.66	0.20	0.97	0.20
Tucapel	0.54	0.20	0.95	0.20
Punta Morhuilla	0.60	0.24	1.03	0.24
Galera	0.57	0.19	0.92	0.19
Diferencia promedio total	0.59	0.24	0.93	0.24

(Fuente: Elaboración propia)

La densidad de la distribución de Bretschneider sobreestimó a los datos de campo, lo que queda demostrado en la diferencia promedio del 0.59 de las localidades.

En la figura 7-25, se presenta el ajuste característico en las localidades de Iquique, Quintero y Galera (lado izquierdo) y también las formas diferentes de las mismas zonas estudiadas (lado derecho). En algunos casos, se presentaron distribuciones en forma bimodal o bien 2 *peak* de períodos, como se muestra en el lado izquierdo de la figura 7-25.

Como queda demostrado en la tabla 7-19 y en la figura 7-25, para los períodos existentes en Chile, la distribución de Bretschneider (1959) no se ajustó a los datos de campo.

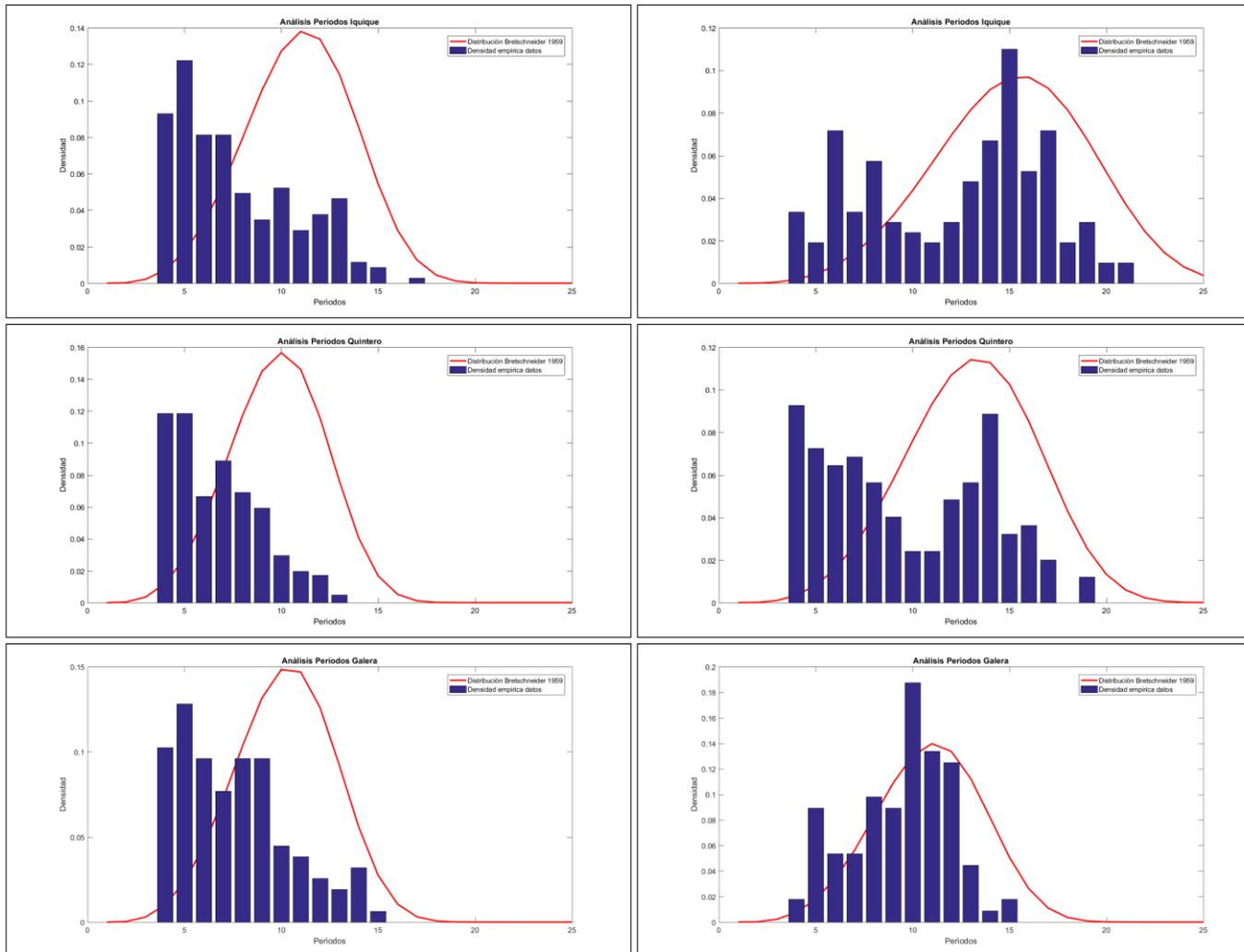


Figura 7-25: Análisis de distribución de periodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Iquique, Quintero, Galera

(Fuente: Elaboración propia)

7.2.5 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE ALTURA SIGNIFICATIVA VERSUS ALTURA ESPECTRAL

7.2.5.1 FORMA GENERAL Y POR NATURALEZA

Los resultados del análisis de la ecuación de aguas someras para el límite máximo y centrado propuesta por Thompson y Vincent (1985) con respecto a los datos de campo en su forma general y por tipo de oleaje *Sea* y *Swell*, arrojó en su forma general que las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la ecuación centrada se ajustó a los valores máximos de los datos de campo. Sin embargo, esta no describió adecuadamente el comportamiento de los parámetros estadísticos, espectrales, profundidad y período en su forma general, como se visualiza en los gráficos presentados en el anexo con las figuras 11-152, 11-153, 11-154, 11-155, 11-156, 11-157, 11-158, 11-159, 11-160 y 11-161 con Iquique, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera respectivamente. Y de forma sencilla lo podemos visualizar en la figura 7-26 correspondiente a la localidad de Obispo, donde los datos de campo en forma general se representaron de color calipso y el ajuste de Thompson y Vincent centrada con una línea continua de color negro.

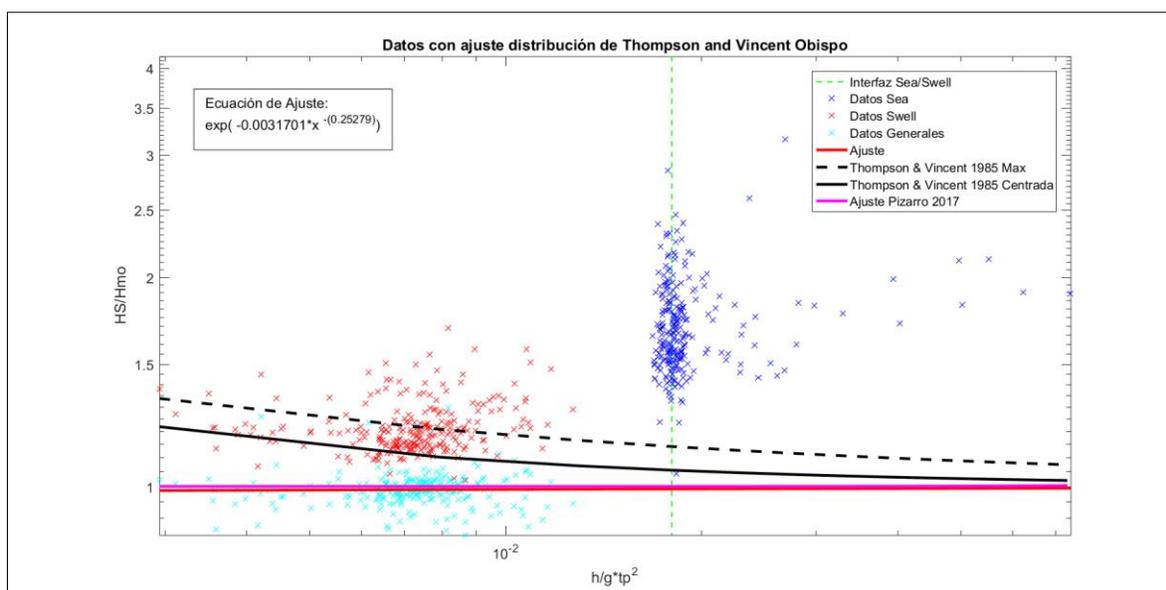


Figura 7-26: Ecuación de Thompson and Vincent Obispo

(Fuente: Elaboración propia)

En los sectores de Iquique, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la ecuación máxima se ajustó a los valores mínimos de los datos de campo para el tipo de oleaje *Swell*. En Obispo la ecuación máxima se ajustó a los valores medios de los datos de campo para el tipo de oleaje *Swell*.

Para el tipo de oleaje Sea las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, no se ajustaron a ninguna ecuación propuesta por Thompson y Vincent. En la localidad de Topocalma se ajustó la ecuación máxima y centrada a valores mínimos en el tipo de oleaje Sea.

La relación altura significativa versus altura espectral en las 11 localidades se concentraron dentro del valor 1 en su forma general como se visualiza en las figuras 11-152, figura 7-26, 11-153, 11-154, 11-155, 11-156, 11-157, 11-158, 11-159, 11-160 y 11-161.

Debido a que los datos de campo en su forma general y por tipo de oleaje no se ajustaron a las ecuaciones propuestas por Thompson y Vincent (1985), en la tabla 7-20 se obtuvieron los coeficientes A y B para cada localidad estudiada en forma general. Y se representó en las figuras del anexo con una línea continua de color rojo.

Tabla 7-20 : Resumen coeficientes del análisis de la ecuación de relación $\frac{H_s}{H_{mo}}$.

Localidad	Coeficiente A	Coeficiente B
Iquique	-4.030E-07	2.296E+00
Obispo	-3.206E-03	2.506E-01
La Serena	6.615E-01	-4.799E-01
Quintero	1.409E-01	-1.994E-03
Punta Loros	-6.199E-05	1.221E+00
Topocalma	3.338E-03	6.731E-01
Constitución	4.687E-02	-1.583E-01
Punta Lavapié	-3.425E-04	8.682E-01
Tucapel	-1.383E-06	1.928E+00
Punta Morhuilla	-5.472E-05	1.182E+00
Galera	-3.992E-05	1.145E+00

(Fuente: Elaboración propia)

Y para obtener un mejor ajuste se obtuvieron coeficientes A y B que representan a la totalidad de las localidades, calculados como el promedio total. De esta forma, la ecuación de Thompson y Vincent modificada por el autor de esta memoria del año 2017 para aguas someras queda de la siguiente manera:

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

Ecuación 7-1

En las figuras 11-152, figura 7-26, 11-153, 11-154, 11-155, 11-156, 11-157, 11-158, 11-159, 11-160 y 11-161, se representa el ajuste planteado por el autor con una línea continua de color magenta.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO DE DESNIVELACIONES INSTANTÁNEAS.

A partir del análisis del método gráfico de los papeles probabilísticos se obtuvieron los coeficientes μ y σ de la función de distribución de probabilidad Normal de los datos, identificando los coeficientes por localidad y promedio de todas las localidades. Obteniendo como promedio para μ un valor de 0.001 y σ un valor de 0.443. Cabe destacar que estos promedios se pueden tomar como constantes para todas las localidades, aunque esto debe ser analizado y verificado, puesto que en este estudio no se incluyó en el análisis. Por tanto, la fórmula propuesta para la distribución de probabilidad Normal sería la siguiente para las localidades estudiadas:

$$f(\eta/0.001,0.443) = \frac{1}{0.443\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\eta-0.001)^2}{2*(0.443)^2}\right)$$

Ecuación 8-1

Donde:

η : Desnivelación instantánea.

También, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación de la regresión. Para indicar si la familia de probabilidad de los datos empíricos se relacionó con la familia de distribución de probabilidad Normal, indicando que ambas familias están relacionadas y que se ajustan con un 98.9% según tabla 8-1, para un promedio general de las localidades. Mientras que en el ajuste perfecto la suma de errores al cuadrado promedio fue de 6.404 según tabla 8-1.

Se identificó del análisis de ajuste perfecto que hacia el sur de Chile se presentó un mejor ajuste, pero hacia el Norte un peor ajuste como se mostró en la tabla 7-4.

Tabla 8-1 : Resumen análisis de alturas de ola en forma general.

Ajuste lineal		Ajuste perfecto	
Parámetros ajuste		Coeficiente de determinación	Suma de los errores al cuadrado
A	B		
0.993	0.005	98.9	6.404

(Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la interpretación de los resultados obtenidos en el papel probabilístico, donde podemos identificar si existió asimetría positiva u subestimación de valores, asimetría negativa u sobrestimación de valores y la mezcla de poblaciones, indicó que para la probabilidad acumulada que están por debajo del 50% la mayoría de las localidades la probabilidad Normal subestimó a la probabilidad empírica. La probabilidad que estuvo en el 50% de las localidades Obispo y Tucapel se relacionaron las familias por lo que se ajustaron. Por otra parte, en 4 localidades la probabilidad Normal sobrestimó a la probabilidad empírica y en 5 subestimaron. En la probabilidad que estuvieron sobre el 50% la localidad de Punta Morhuilla se ajustó a ambas familias, mientras que 4 localidades sobrestimaron, 3 localidades subestimaron y 3 localidades tuvieron una mezcla de sobrestimación y subestimación de la probabilidad empírica. Al identificar la mezcla de población existente en el análisis, se identificaron desde 2 a 5 poblaciones y lo podemos visualizar en la siguiente figura 8-1, donde se muestra la diferencia en la cantidad de poblaciones existentes en la localidad de Iquique (Norte) y Galera (Sur), como también se puede ver la sobrestimación y subestimación de valores.

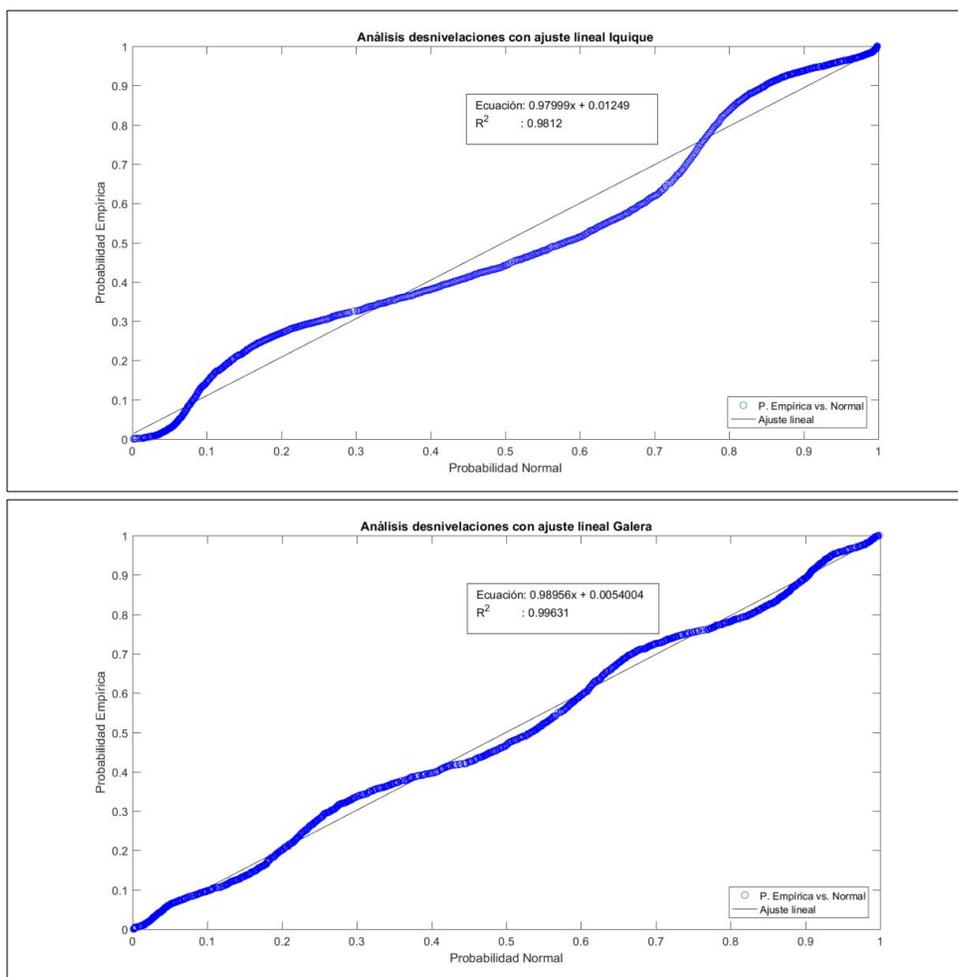


Figura 8-1: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique y Galera.

(Fuente: Elaboración propia)

Al corroborar los resultados mediante el gráfico de histograma de frecuencias de los datos empíricos en conjunto con la densidad de la distribución Normal, reveló que la distribución Normal no se ajustó en algunos casos, observando que los datos no se concentraron alrededor del valor 0, como se presentó en la figura 8-2.

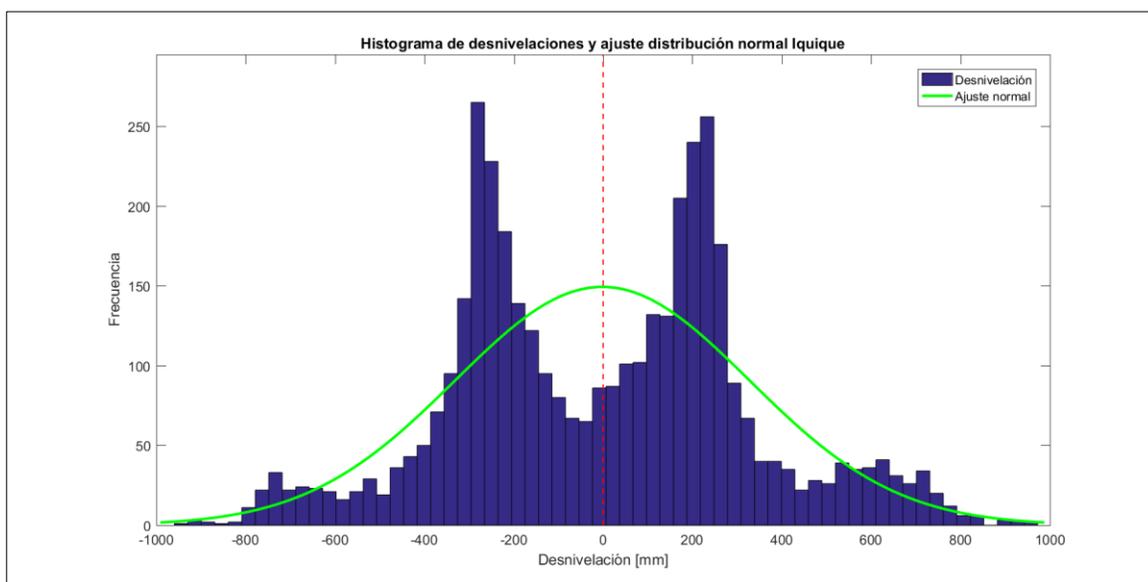


Figura 8-2: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique.

(Fuente: Elaboración propia)

Por esto, se realizó una verificación a las series de tiempo de desnivelaciones instantáneas, previamente corregidas mediante la corrección del nivel medio para eliminar la tendencia y la corrección del tipo parabólica para eliminar el efecto de ondas de más largo período. Aunque, al verificar estas series corregidas continuó presentando una tendencia hacia valores positivos, como se visualiza en la siguiente figura 8-3. Lo que explicaría por qué no se agruparon los valores alrededor de la media.

En consecuencia, debido a los resultados de las series de tiempo de desnivelación instantánea se presentó una onda larga no mareal, no identificada en los cálculos de esta memoria.

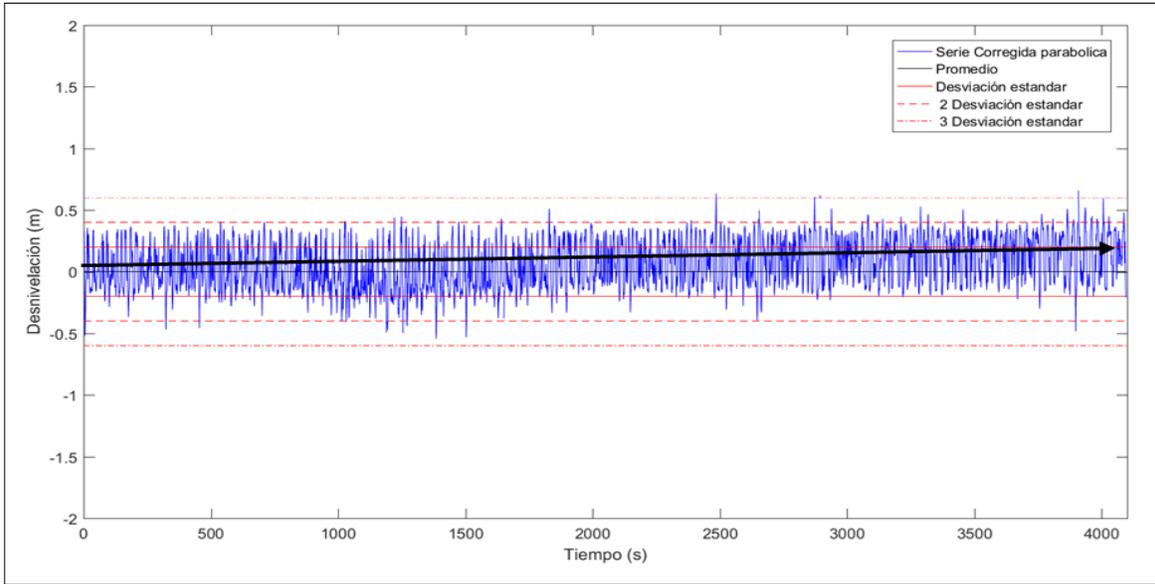


Figura 8-3: Curva de distribución Normal versus distribución de los datos en Iquique.
(Fuente: Elaboración propia)

8.2 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE WAVESMON Y CÓDIGO PROPIO.

En la comparación de alturas de olas procesadas mediante Wavesmon versus el algoritmo matemático en Matlab, se determinó que no se evidencia una gran diferencia promedio entre métodos de procesamiento; de hecho, oscilaron entre los 0.006 y 0.1334 metros. El control de calidad aplicado a los datos de campo es bueno de acuerdo con lo planteado anteriormente, y se puede visualizar en las diferentes localidades y sus respectivos gráficos presentados en el anexo.

De la tabla 7-5, las localidades de Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera las alturas de Wavesmon subestimaron a las alturas obtenidas mediante el código propio, pero se visualiza que la única localidad en donde las alturas de Wavesmon sobrestiman a las alturas del código propio es en Constitución.

Las diferencias promedio porcentuales por localidad entre métodos de procesamiento indicaron que en promedio tienen un 8%. Y al asociar los porcentajes entre localidades para visualizar alguna semejanza entre ellas, ya sea Norte o Sur, cercanía, entre otras cosas, no fue posible asociar alguna similitud.

Una de las posibles causas donde se encontraron una mayor discrepancia entre métodos, puede atribuirse a las diferencias entre morfología costera, la interacción entre trenes de onda y otras que no estuvieron incluidas dentro del análisis.

También, es posible que las diferencia entre métodos de limpieza del programa Wavesmon y el método utilizado en el código propio sea otra posible causa. Como sabemos el software Wavesmon se visualiza como una “caja negra”, donde no se puede determinar los métodos de limpieza utilizado por el programa. Mientras el método utilizado por el autor, se presenta de manera explícita en la metodología de esta memoria. Por tanto, las diferencias pueden estar relacionadas en cuanto al filtro de datos y limpieza entre ambos métodos.

8.3 ANÁLISIS DE ALTURAS DE OLA.

8.3.1 FORMA GENERAL

Según lo manifestado en esta memoria, en aguas profundas la distribución Rayleigh puede ser representada en función de las alturas de olas, a medida que el oleaje se propaga a aguas someras, los efectos en la batimetría, y la rotura hacen que la distribución se desvíe considerablemente. Es por esto que se compararon dos familias de distribución Rayleigh y Weibull con la distribución empírica de los datos de campo.

A partir del análisis del método gráfico de los papeles probabilísticos se obtuvieron el coeficiente b de la función de distribución Rayleigh y coeficientes a y b de la distribución Weibull promedio de todas las localidades. Obteniendo como promedio para b un valor de 0.793 en la función en la distribución Rayleigh y para a y b un valor de 1.113 y 2.016 respectivamente en la distribución Weibull. Cabe destacar que estos promedios se pueden tomar como constantes para todas las localidades, aunque esto debe ser analizado y verificado, puesto que en este estudio no se incluyó en el análisis. Por tanto, la fórmula propuesta para la distribución de probabilidad Rayleigh y Weibull sería la siguiente para las localidades estudiadas:

Rayleigh

$$f(H/0.793) = \frac{1}{0.793^2} \exp\left(\frac{-H^2}{2 \cdot 0.793^2}\right)$$

Ecuación 8-2

Weibull

$$f(H/1.113, 2.016) = \frac{2.016}{1.113} \left(\frac{H}{1.113}\right)^{2.016-1} \exp\left(-\left(\frac{H}{1.113}\right)^{2.016}\right)$$

Ecuación 8-3

Donde:

H : Altura de la ola.

También, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación de la regresión. Para indicar si la familia de probabilidad de los datos empíricos se relacionó con la familia de distribución de probabilidad Rayleigh y Weibull. Indicando que la probabilidad de Rayleigh se relacionó con los datos de campo con un 98.8% y Weibull con un mejor ajuste de 99.3%.

En cuanto la diferencia de la suma de errores al cuadrado, la distribución de Weibull es mejor en comparación con la distribución Rayleigh con valores de 0.231 y 0.601 respectivamente. La diferencia de la suma de errores al cuadrado de la distribución Rayleigh es de un 38% sobre la distribución Weibull; un resumen de ello se visualiza en la tabla 8-2.

Tabla 8-2 : Promedios análisis de alturas de ola en forma general.

Ajuste lineal						Ajuste perfecto	
Parámetros ajuste				Coeficiente de determinación		Suma de los errores al cuadrado	
Rayleigh		Weibull		Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull
A	B	A	B				
0.986	0.010	0.981	0.013	98.8%	99.3%	0.601	0.231

(Fuente: Elaboración propia)

El análisis mediante la comparación entre la función de la densidad de probabilidades de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia en conjunto con la densidad de la distribución Rayleigh y Weibull, indicaron que la distribución Weibull es el mejor ajuste en relación con los datos de campo en las localidades. Sin embargo, existe una diferencia baja para la distribución Rayleigh, por lo que ambas distribuciones pueden ser ocupadas.

8.3.2 POR NATURALEZA

Se realizó el análisis de alturas de ola para dos tipos de oleaje *Sea* y *Swell*, a partir del análisis del método gráfico de los papeles probabilísticos se obtuvieron el coeficiente b de la función de distribución Rayleigh y coeficientes a y b de la distribución Weibull promedio de todas las localidades. Obteniendo como promedio para b un valor de 0.582 para *Sea* y 1.063 para *Swell* en la función en la distribución Rayleigh. Y para a un valor de 0.823 para *Sea* y 1.593 para *Swell*, mientras que para el coeficiente b 2.125 para *Sea* y 3.790 para *Swell* en la distribución Weibull. Cabe destacar que estos promedios se pueden tomar como constantes para todas las localidades, aunque esto debe ser analizado y verificado, puesto que en este estudio no se incluyó en el análisis. Por tanto, las formulaciones propuestas para las distribuciones de probabilidad Rayleigh y Weibull por tipo de oleaje *Sea* y *Swell* sería la siguiente:

Tabla 8-3 : Ecuaciones Rayleigh y Weibull forma general propuestas.

Rayleigh	
<i>Sea</i>	$f(H/0.582) = \frac{1}{0.582^2} \exp\left(\frac{-H^2}{2*0.582^2}\right)$
<i>Swell</i>	$f(H/1.063) = \frac{1}{1.063^2} \exp\left(\frac{-H^2}{2*1.063^2}\right)$
Weibull	
<i>Sea</i>	$f(H/0.823, 2.125) = \frac{2.125}{0.823} \left(\frac{H}{0.823}\right)^{2.125-1} \exp\left(-\left(\frac{H}{0.823}\right)^{2.125}\right)$
<i>Swell</i>	$f(H/1.593, 3.790) = \frac{3.790}{1.593} \left(\frac{H}{1.593}\right)^{3.790-1} \exp\left(-\left(\frac{H}{1.593}\right)^{3.790}\right)$

(Fuente: Elaboración propia)

Donde:

H : Altura de la ola.

También, se obtuvo la ecuación de ajuste lineal por medio del modelo de regresión clásica, coeficientes de ajuste lineal y el coeficiente de determinación de la regresión. Para indicar si la familia de probabilidad de los datos empíricos se relacionó con la familia de distribución de probabilidad Rayleigh y Weibull. Por tipo de oleaje *Sea* y *Swell*, la probabilidad de Rayleigh no se ajusta a la probabilidad de los datos de campo, mientras que para la función de probabilidad de Weibull se ajustó con un 99% para el oleaje *Sea* y con 98.3% para *Swell*. Además, la función de distribución Weibull presentó el menor valor de la suma de errores al cuadrado, como se visualiza en la tabla 8-4.

Tabla 8-4 : Promedios análisis de alturas de ola por tipo de oleaje.

Tipo oleaje	Ajuste lineal						Ajuste perfecto	
	Parámetros ajuste				Coeficiente de determinación		Suma de los errores al cuadrado	
	Rayleigh		Weibull		Rayleigh	Weibull	Rayleigh	Weibull
	A	B	A	B				
Sea	1.024	-0.013	0.996	0.008	0.984	0.990	0.539	0.191
Swell	1,441	-0,322	1,001	0,015	0,967	0,983	1,027	0,119

(Fuente: Elaboración propia)

El análisis mediante la comparación entre la función de la densidad de probabilidades de Rayleigh y Weibull con los datos de campo, por medio del gráfico de histograma de frecuencia en conjunto con la densidad de la distribución Rayleigh y Weibull, indicaron que la distribución Weibull se ajustó en relación con los datos de campo en las localidades.

En conclusión, por tipo de oleaje *Sea* u *Swell* la función de distribución Weibull fue la que se ajustó a los datos de campo en las zonas estudiadas. Lo podemos visualizar en la siguiente figura 8-4, donde, la distribución de probabilidad Rayleigh para alturas de ola en el oleaje *Swell* no se ajusta a los datos de campo.

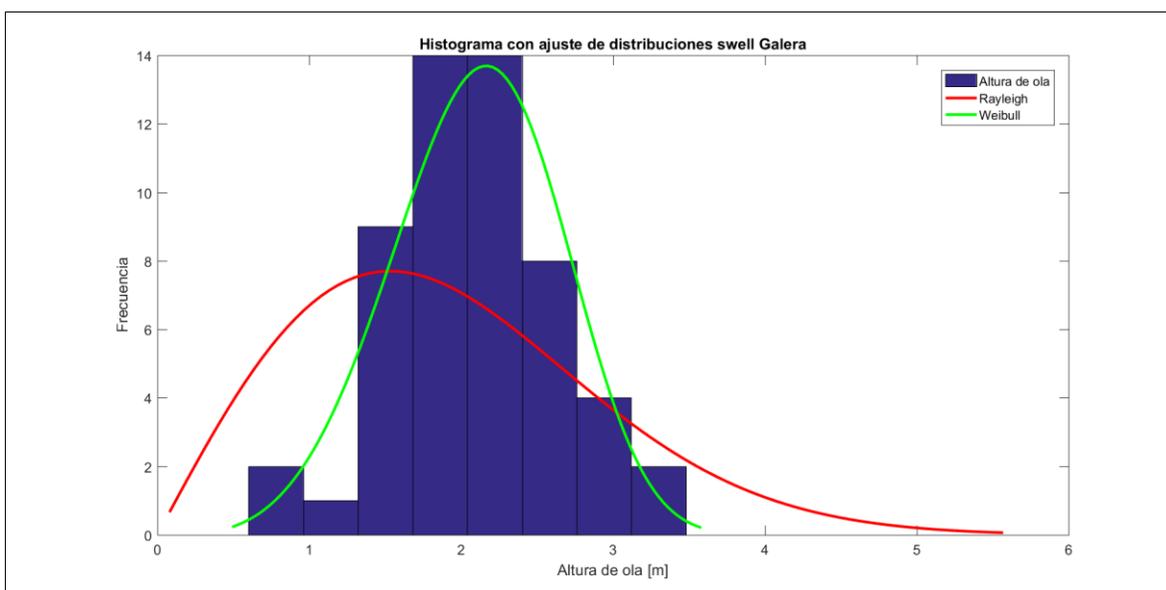


Figura 8-4: Diferencias de la distribución Rayleigh y distribución Weibull versus distribución de los datos en Galera.

(Fuente: Elaboración propia)

8.4 ANÁLISIS DE PERÍODOS DE OLA.

La densidad de la distribución de Bretschneider sobreestima los datos de campo, debido a que, la distribución se aplica en aguas profundas. Para distribuciones de forma bimodal (2 *peak*), la distribución se ajusta de buena manera para el oleaje tipo *Swell*. Que existan formas bimodales en los períodos no es raro, debido a que en Chile existen a lo menos dos tipos de oleaje característicos (*Sea* con períodos de 4 a 8 segundos y *Swell* de 10 a 25 segundos) que pueden combinarse.

En las figuras 8-5 y 8-6 se puede visualizar lo anteriormente planteado en los casos que se presentaron doble *peak*.

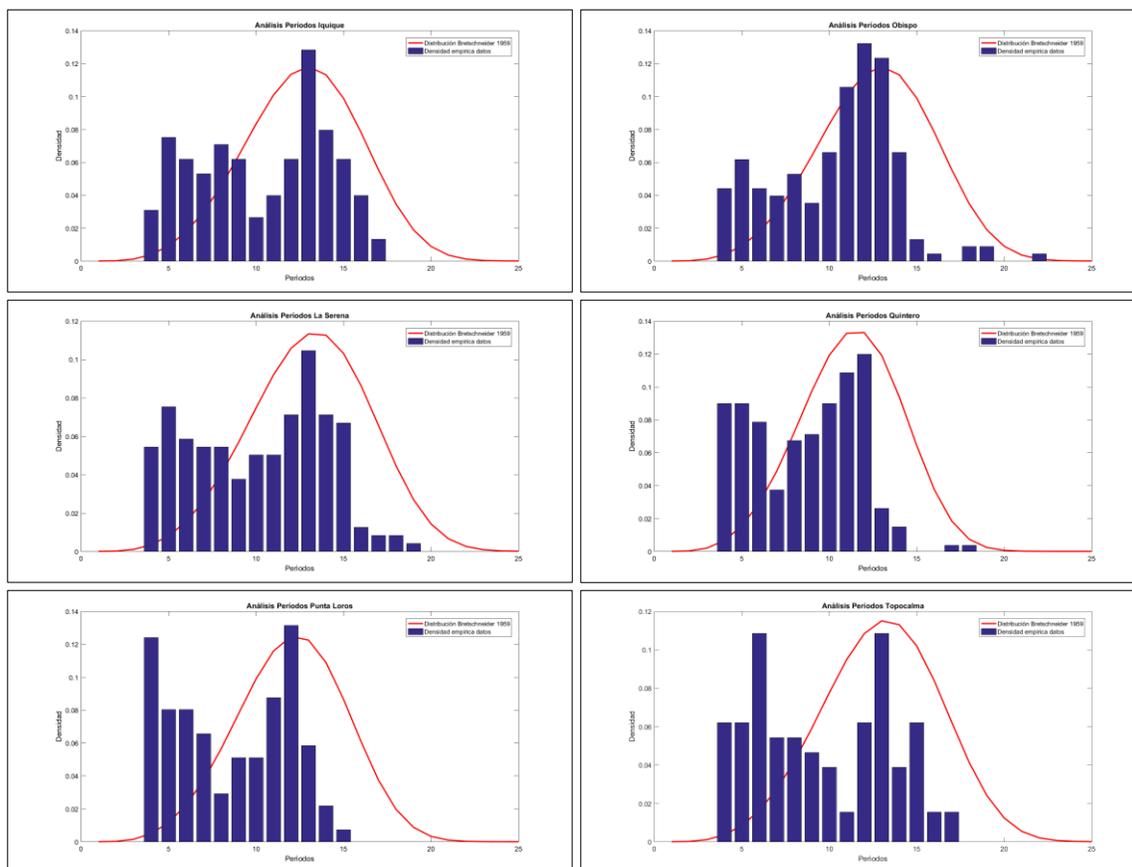


Figura 8-5: Análisis de distribución de períodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Iquique, Obispo, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma.

(Fuente: Elaboración propia)

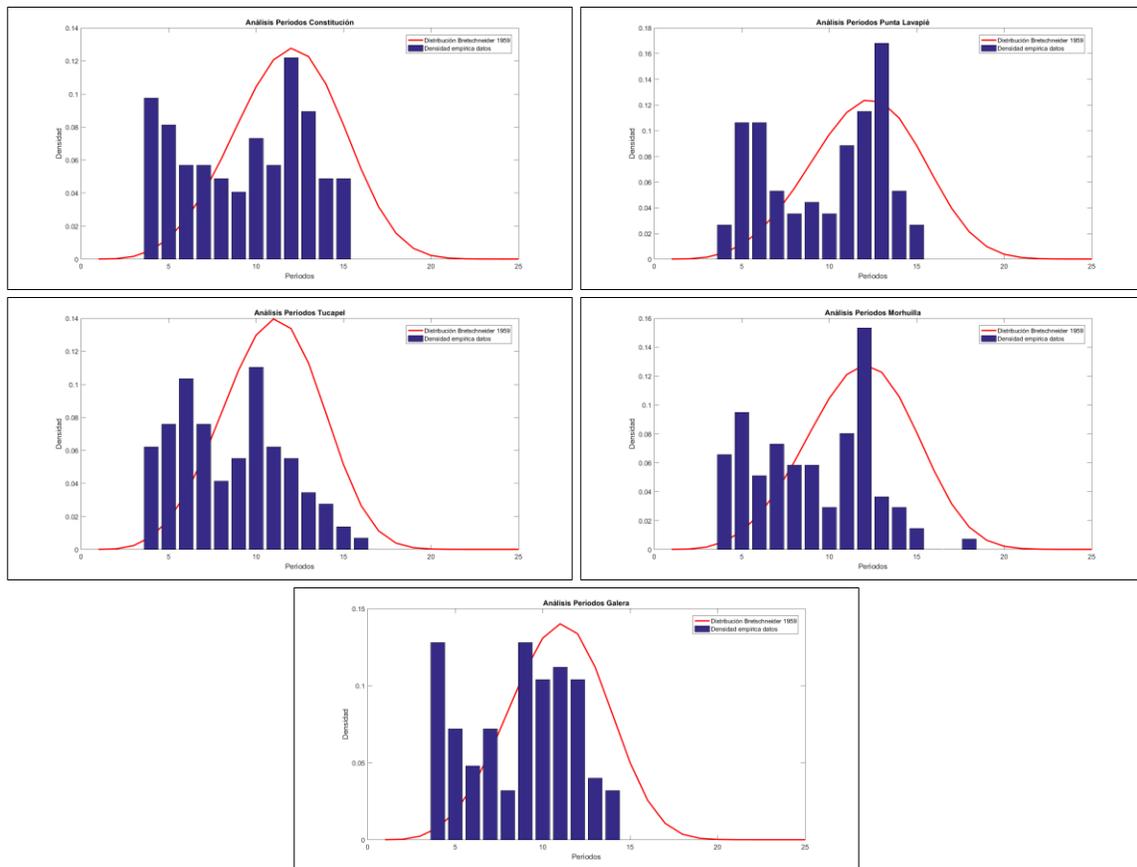


Figura 8-6: Análisis de distribución de periodos de Bretschneider (1959) versus datos de campo Constitución, Lavapié Punta Tucapel, Punta Morhuilla y Galera.

(Fuente: Elaboración propia)

En conclusión, la distribución de Bretschneider no se ajusta a los datos de campo, debido a que, estos presentan oleaje tipo Sea que no se contemplan en esta distribución (Bretschneider se ajusta de manera óptima para el oleaje tipo *Swell*).

8.5 ANÁLISIS RELACIÓN ALTURA SIGNIFICATIVA ESTADÍSTICA VERSUS ALTURA ESPECTRAL.

El análisis muestra que la mayoría de las localidades (Iquique, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera) la ecuación propuesta por Thompson y Vincent (1985) se ajusta de mejor manera para los valores máximos de los datos de campo.

El estudio de oleaje tipo *Swell* para las localidades de La Serena, Punta Loros, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, mostró que la ecuación diseñada para los valores máximos se ajusta a los valores mínimos. Para el tipo de oleaje *Sea*, ninguna de las dos formulaciones propuestas por Thompson y Vincent se ajustaron a los datos.

Al realizar la separación por tipo de oleaje, no se pudo mantener la misma categoría que la forma general. Ello, debido a que al cortar el espectro por frecuencia se pierde energía, por lo que se estimó una altura espectral menor, lo que conllevó a que la relación de $\frac{H_s}{H_{mo}}$ fuera mayor.

Para el oleaje *Sea*, la acumulación que se visualizó en la interfaz *Sea-Swell*, se debió a la concentración de períodos en 8 segundos, debido al corte del espectro entre la interfaz. Por otra parte, la dispersión de la relación $\frac{H_s}{H_{mo}}$ está entre los valores 1 a 2. El oleaje tipo *Swell* presentó una mayor dispersión en ambas relaciones $\frac{H_s}{H_{mo}}$ y $\frac{h}{gTp^2}$ para todas las localidades.

La relación de $\frac{H_s}{H_{mo}}$ versus $\frac{h}{gTp^2}$ en todas las zonas presentaron una concentración hacia el tipo de oleaje *Swell*, por lo que la relación no se vio influenciada por oleaje de viento local. También se visualizó una mayor dispersión en la relación $\frac{h}{gTp^2}$.

De esta forma, la ecuación de Thompson y Vincent modificada en aguas someras de los puntos estudiados de la costa de Chile quedó de la siguiente manera:

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

Ecuación 8-4

9 CONCLUSIONES

A raíz de los resultados obtenidos durante esta investigación se pudo determinar que:

El control de calidad aplicado en las alturas de olas obtenidas mediante el programa Wavesmon y el algoritmo en Matlab desarrollado en esta memoria, no evidenció una diferencia significativa. En algunas localidades existió una mayor diferencia entre métodos, debido, presuntamente, a la morfología costera, interacción entre trenes de onda y otros factores que no estuvieron incluidos dentro del control de calidad. También, es posible que las diferencias entre métodos estén relacionadas en cuanto al filtro de datos y los métodos de limpieza.

Al analizar la distribución de probabilidad que presenta el oleaje en aguas someras en algunos puntos de la costa de Chile, se concluyó que al asociar las desnivelaciones instantáneas con la función de distribución Normal se relacionaron en un 98.8% con los datos de campo. Esto se corrobora con el análisis de ajuste perfecto, donde las localidades presentaron un error residual promedio de 6.4 entre probabilidades. Por tanto, en las zonas estudiadas las desnivelaciones instantáneas se distribuyen de forma Normal en aguas someras. En los casos donde la distribución Normal no se ajustó (los datos no se concentraron alrededor del valor 0) a los datos de campo, fue a consecuencia de la presencia de una onda larga no mareal, no identificada en los cálculos de esta memoria.

Para el análisis de las alturas de ola, diversos autores presentados en esta memoria proponen utilizar las distribuciones de Weibull y Rayleigh. De esta forma se reveló que en general la mejor distribución de alturas de ola es la distribución de Weibull en aguas someras para las localidades estudiadas. Sin embargo, debido a la baja diferencia entre ambas distribuciones, ambas pueden ser ocupadas.

Al realizar este análisis por tipo de oleaje, se demostró que tanto para *Sea* o *Swell*, la distribución que presentó un mejor ajuste a los datos de campos fue la distribución de Weibull en todas las localidades.

Hoy en día, la distribución Rayleigh es la más utilizada en el diseño de estructuras en la costa o fuera de ella; generalmente para el diseño se toma como referencia la altura de la ola máxima durante las tormentas. En función de los resultados se recomienda utilizar la distribución de Weibull para el análisis de alturas de olas en algunos puntos de la costa chilena.

La densidad de la distribución de Bretschneider sobreestimó los datos de campo en las localidades estudiadas. Esto debido a que la distribución está diseñada para ser ocupada en aguas profundas. Para distribuciones de forma bimodal, esta distribución se ajusta de buena manera para el oleaje tipo *Swell*. Para futuros estudios se propone estudiar la distribución de períodos en Chile para oleaje con presencia de *Swell*.

El análisis de la relación entre altura significativa versus altura espectral muestra que, en las localidades de Iquique, La Serena, Quintero, Punta Loros, Topocalma, Constitución, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera la ecuación propuesta por Thompson y Vincent (1985) se ajusta de mejor manera para los valores máximos de los datos de campo en aguas someras.

El estudio de oleaje tipo *Swell* para las localidades de La Serena, Punta Loros, Topocalma, Punta Lavapié, Tucapel, Punta Morhuilla y Galera, mostró que la ecuación diseñada para los valores máximos se ajusta a los valores mínimos. Para el tipo de oleaje *Sea*, ninguna de las dos formulaciones propuestas por Thompson y Vincent se ajustaron a los datos.

Finalmente, la propuesta de modificación de la fórmula de Thompson y Vincent para los puntos estudiados de las costas de Chile es:

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

Esta ecuación puede ser utilizada hoy en aguas someras para la relación de altura significativa versus altura espectral.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

- Battjes, J.A. (1974). Surf similarity, Proceedings of 14 th Coastal Engineering Conference, Copenhagen, Denmark, American Society of Civil Engineers, New York, pp.466-480
- Battjes, J., & Janssen, J. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings of the 16th International Conference Coastal Engineering*, (pág. 569). New York.
- Battjes, J.A. and Stive, M.J.F., 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *J. Geophysical Res.*, Vol.90, No.C5, pp.9159-9167.
- Battjes, J.A.; Groenendijk, H.W. (2000). Wave height distributions on shallow foreshores. *Coast. Eng.* 40(3): 161-182
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Parra, C., . . . Molina, M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile* (Primera ed.). Valparaíso, Chile: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research*, 104, C4, 7649-7666
- Bretschneider, C.L. (1959). Wave variability and wave spectra for wind—generated gravity waves, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 118, 192pp.
- Camp, A. S. (2004). *artsurfcamp*. Recuperado el Agosto de 2017, de www.artsurfcamp.com
- Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S. (1956) The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 237, 212-232.
- CEDEX. (2004). *Master en ingeniería de puertos y costas: "Conceptos generales y caracterización del medio"*. (Volumen 1 ed.). Madrid.
- CIRIA, CUR, CETMEF, (2007), *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd edition). C683, CIRIA, London, ISBN 978-0-86017-683-1
- DHI, 2017, "MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening tool. Hydrodynamic Module. Scientific Documentation", DHI, Hørsholm, Denmark
- Figueroa, R., Riquelme, D., & San Martín, C. (s.f). *Definiciones y Conceptos Básicos de la Ingeniería Marítima y Portuaria*.
- Glukhovskiy, B. K. (1966). Investigation of sea wind waves (in Russian). *Spectra of extreme wave conditions in the Southern North Sea of Sea Climatology Conference*, (págs. 51–71). París.
- Groenendijk, H. W. (1998). *Shallow foreshore wave height statistics*. Delft University of Technology.

- Holthuijsen, L. (2007). *Wave in oceanic and coastal waters*. New York: Cambridge University Press.
- Kamphuis, J.W.(2000), Introduction to Coastal Engineering and Management.Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 16. World Scientific
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen, 1994: Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 532 pp.
- Klopman, G and M.J.F Stive (1989) Extreme waves and wave loading in shallow water, paper presented at the E&P Forum Workshop in Paris, Delft Hydraulics, The Netherlands
- Klopman, G., 1996. Extreme wave heights in shallow water, Report H2486, WL/Delft hydraulics, The Netherlands.
- Liu, Z., & Frigaard, P. (2001). *Generation and Analysis of Random Waves*. Aalborg Universitet.
- Longuet-Higgins, M.S. (1975). On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves. *Journal of Geophysical Research* 80: doi: 10.1029/JC080i018p02688. issn: 0148-0227.
- Longuet-Higgins,M.S. (1983). On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field.Proc. Royal Society, Vol.A389, pp.241-258.
- Mai, S., Wilhelmi, J., & Barjenbruch, U. (2010). Wave Heigth Distribution in Shallow Waters. *Coastal Enginneering Proceedings*, 32-63. doi:10,9753/icce.v32.waves.63
- Pierson, W., & Moskowitz, L. (1964). *A proposed spectral form for fully developed winds seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii*.
- Pullen, T., Allsop, N., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & Meer, J. v. (2007). *EurOtop – Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Die Küste. Obtenido de <http://www.overtopping-manual.com/eurotop.pdf>
- Sampedro, A. T. (2009). *Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo (tesis doctoral)*. España: Universidad de Cantabria.
- SHOA. (2005). *Instrucciones Oceanográficas N°1* (Tercera ed.). Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*.
- Smith, J., Sherlock, A., Resio, D., (2001), STWAVE:Steady-State Spectral Wave Model. User's Manual for STWAVE, Version 3.0; ERDC/CHL, US Army Corps of Engineers; Washington, DC.
- Spiegel, M. (1970). *Teoría y problemas de estadística*. México: McGraw-Hill.
- Teledyne Marine. (s.f.). *Teledyne Marine*. Recuperado el Enero de 2017, de <http://www.teledynemarine.com>
- Teledyne Rd Instrument. (2008). *WavesMon Users Guide*. California.
- Tolman, H. L., 1997: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.

- Tolman, H. L., 1999a: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- Tolman, H. L., 2009: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- Thompson, E., & Vincent, C. (1985). *Significant Wave Height for Shallow Water Design* (n° 5 ed., Vol. III). Vicksburg: US Army Coastal Engineering.
- U.S.A.C.E. (2002). *Coastal Engineering Manual* (Primera ed.). Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- Universidad de Cantabria-UNICAN. (2000). *Documentos de referencia Volumen I: Dinámicas*. Grupo de Oceanografía y de Costas.
- WAMDIG 1988: The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.

11 ANEXO

11.1 ANÁLISIS DE DATOS

A continuación, se presentan los gráficos del análisis de control de calidad, comparación de parámetros de resumen, desnivelaciones instantáneas, alturas de ola para cada localidad.

11.1.1 IQUIQUE

Control de calidad

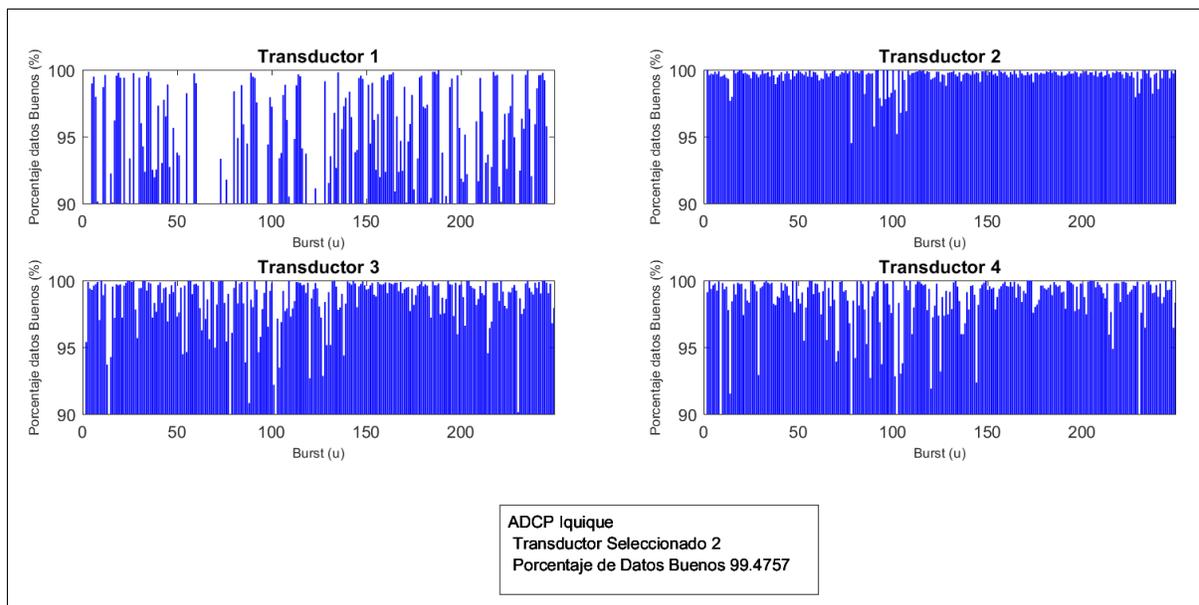


Figura 11-1: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

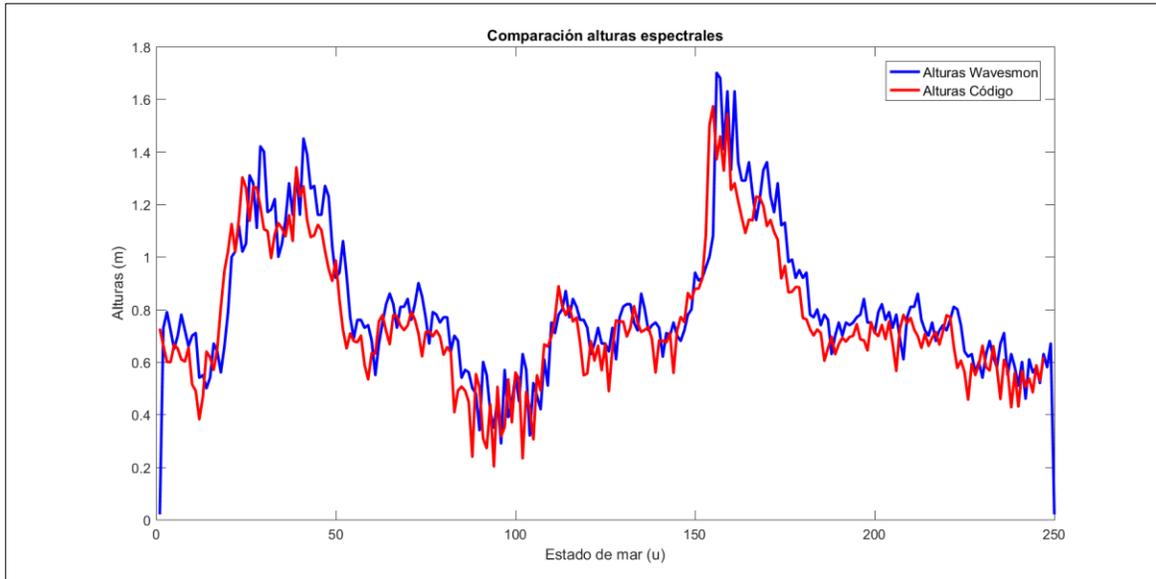


Figura 11-2: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB Iquique
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

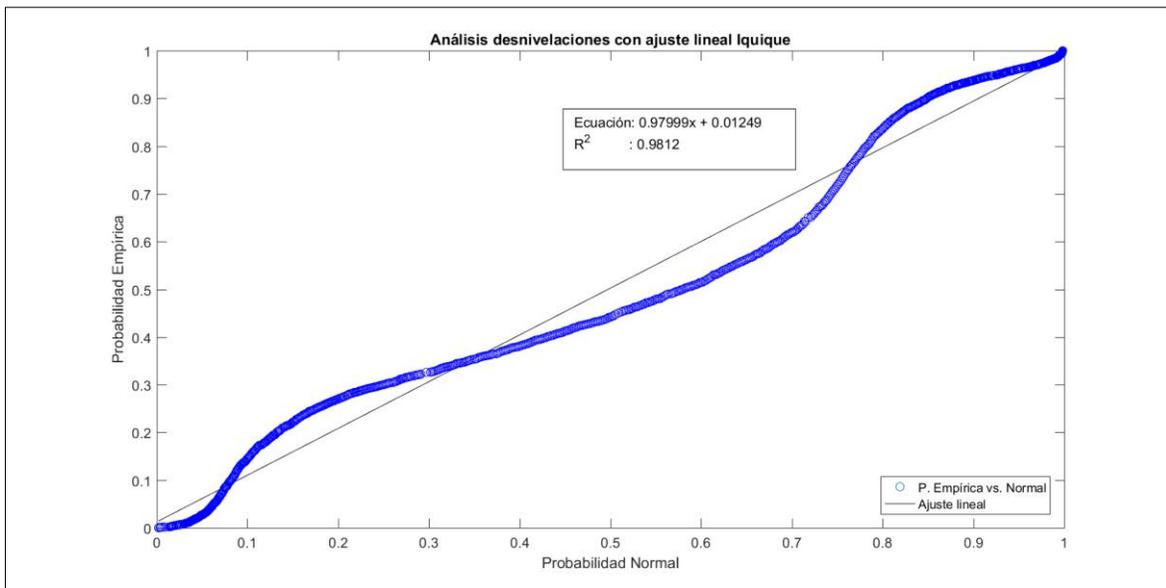


Figura 11-3: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

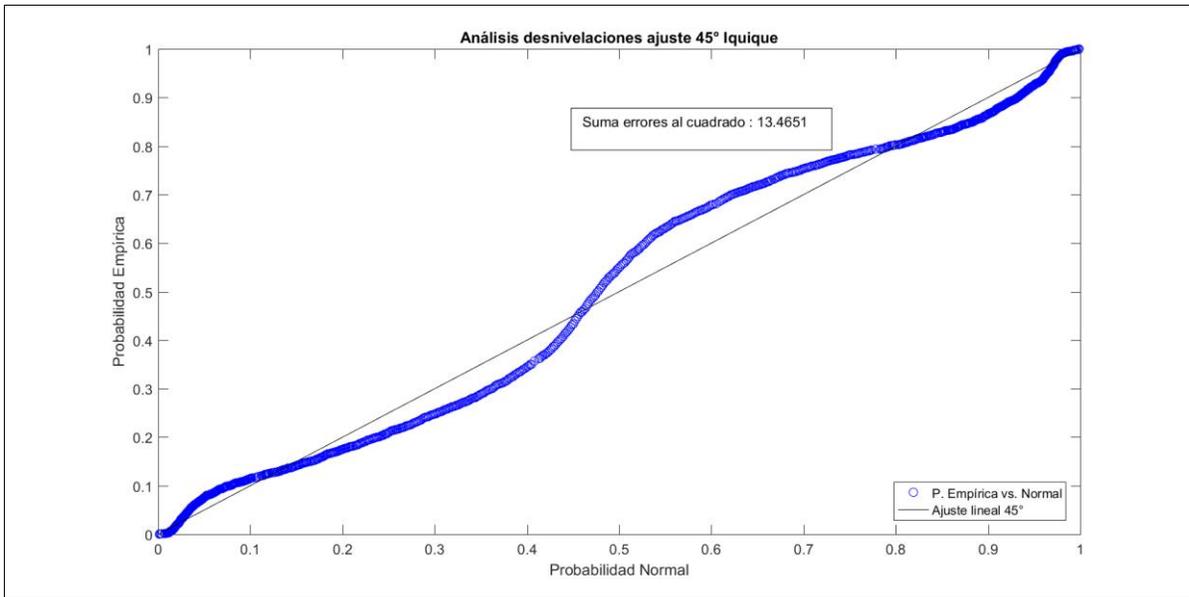


Figura 11-4: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

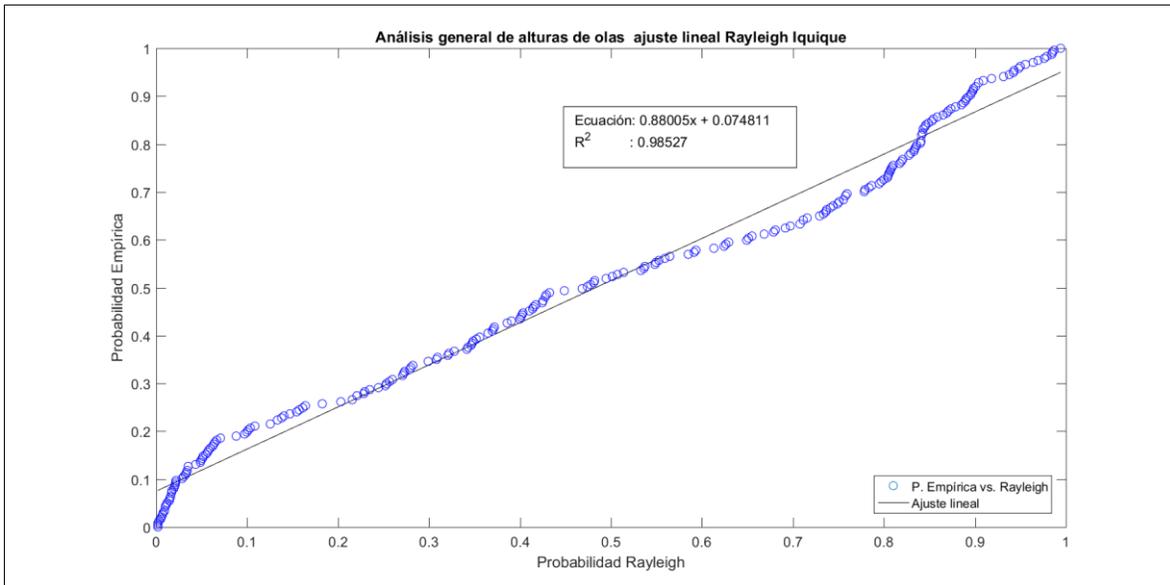


Figura 11-5: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

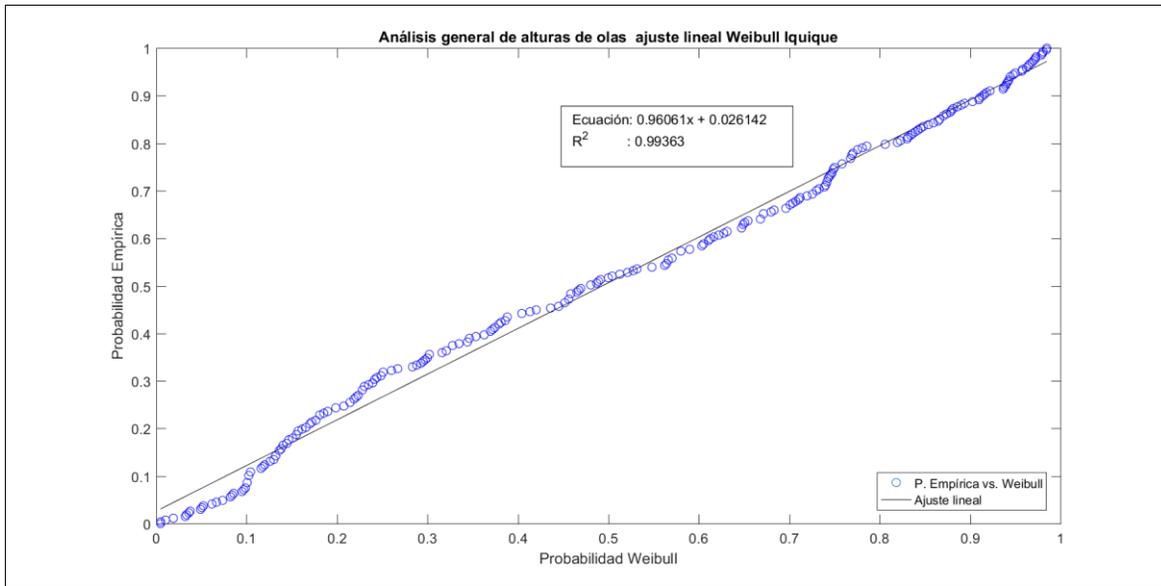


Figura 11-6: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull

(Fuente: Elaboración propia)

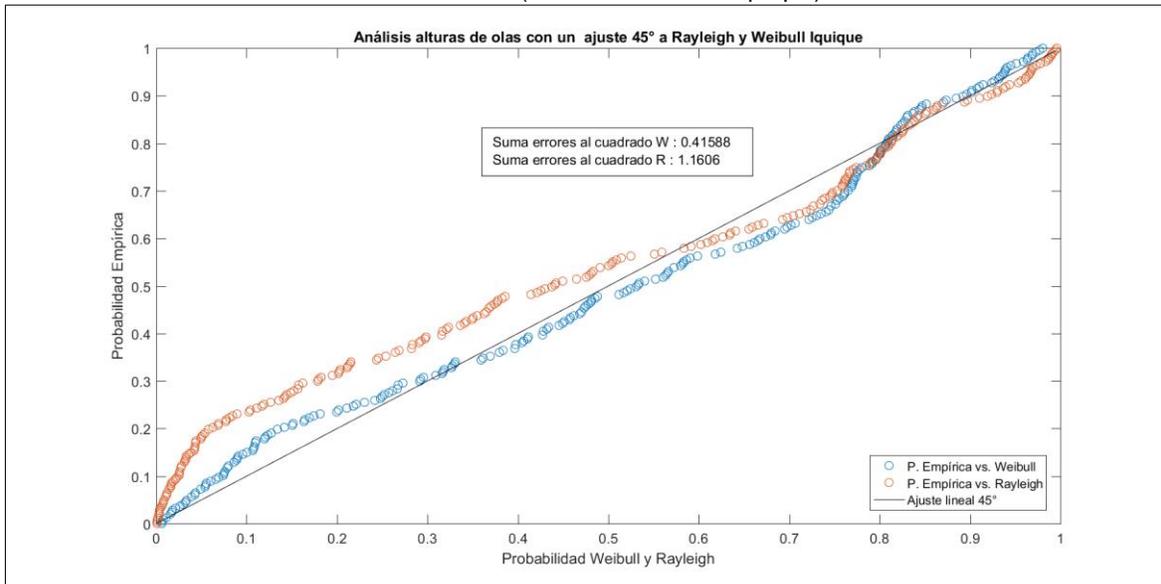


Figura 11-7: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

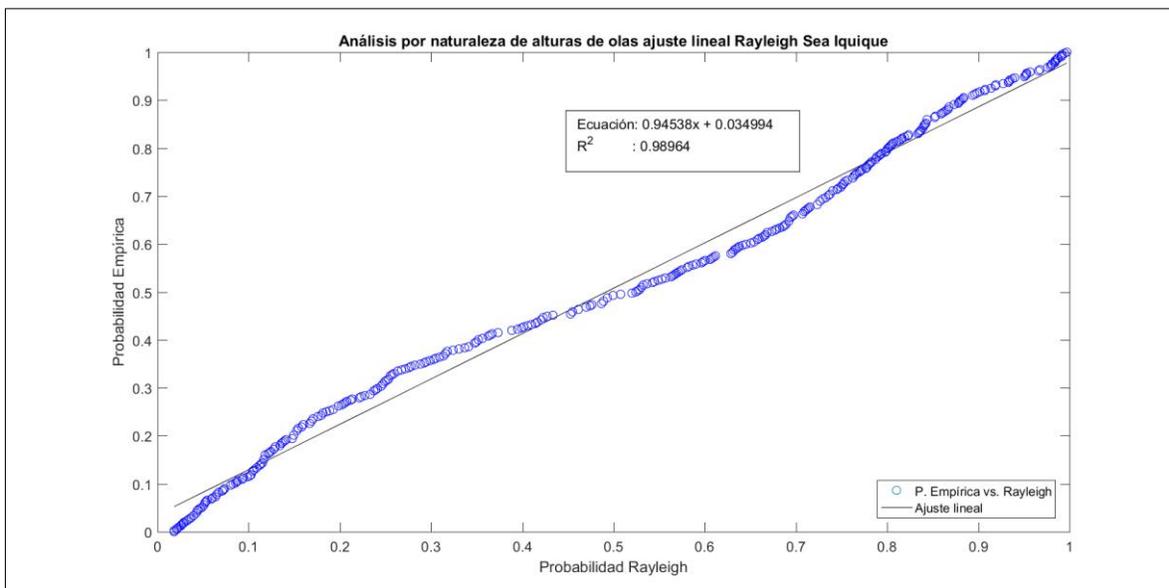


Figura 11-8: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

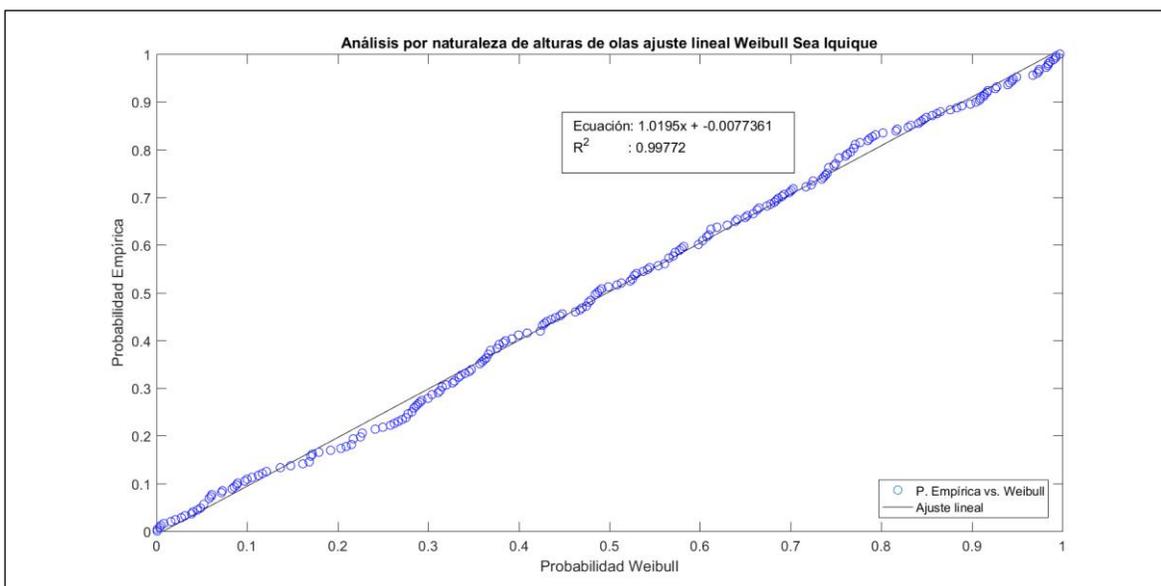


Figura 11-9: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

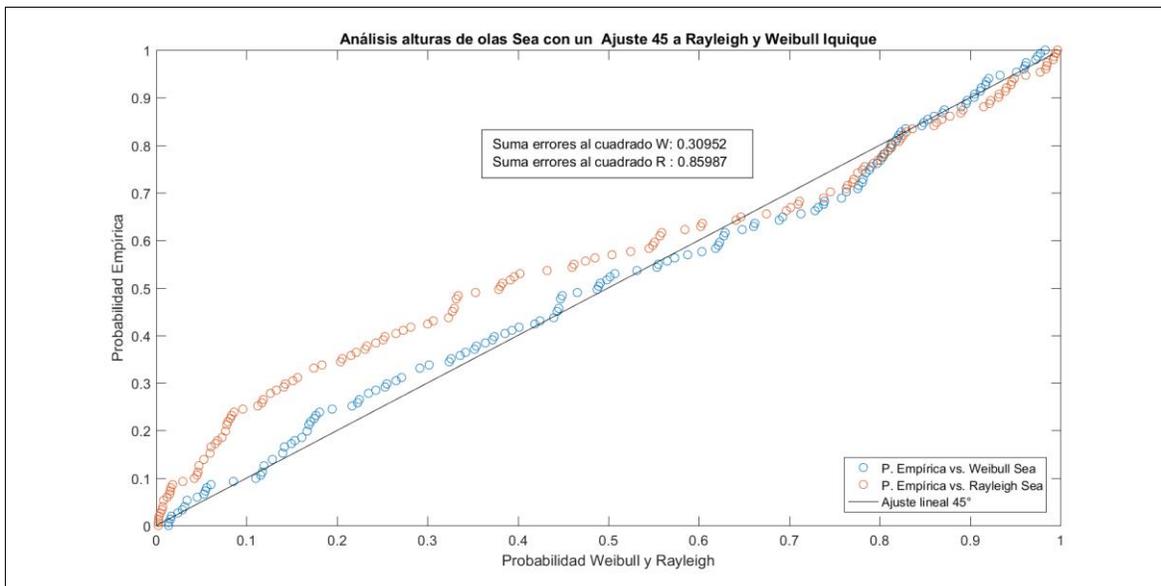


Figura 11-10: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

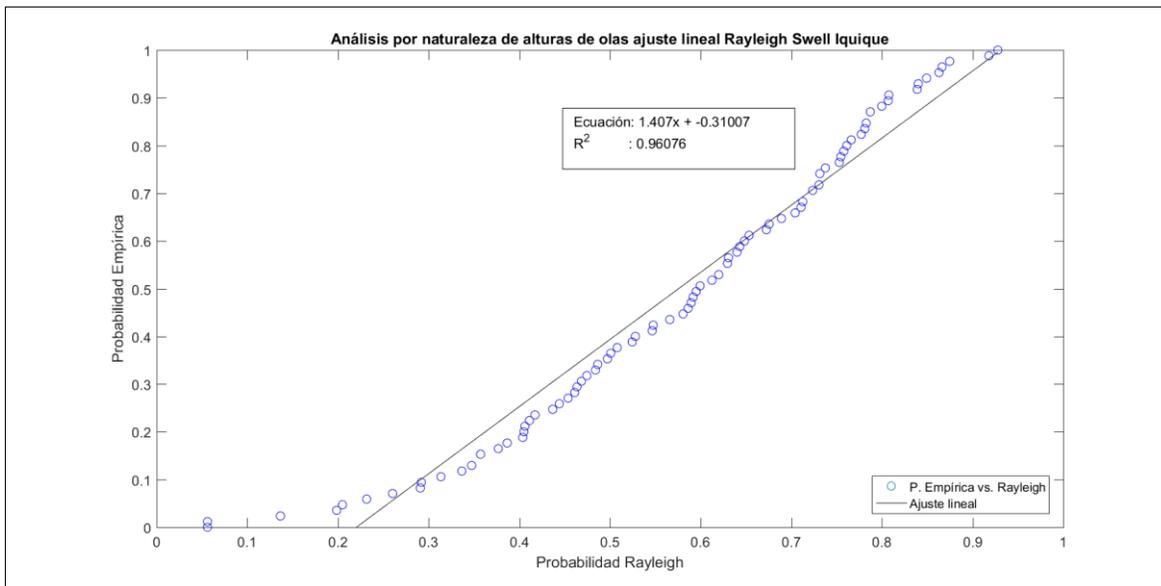


Figura 11-11: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

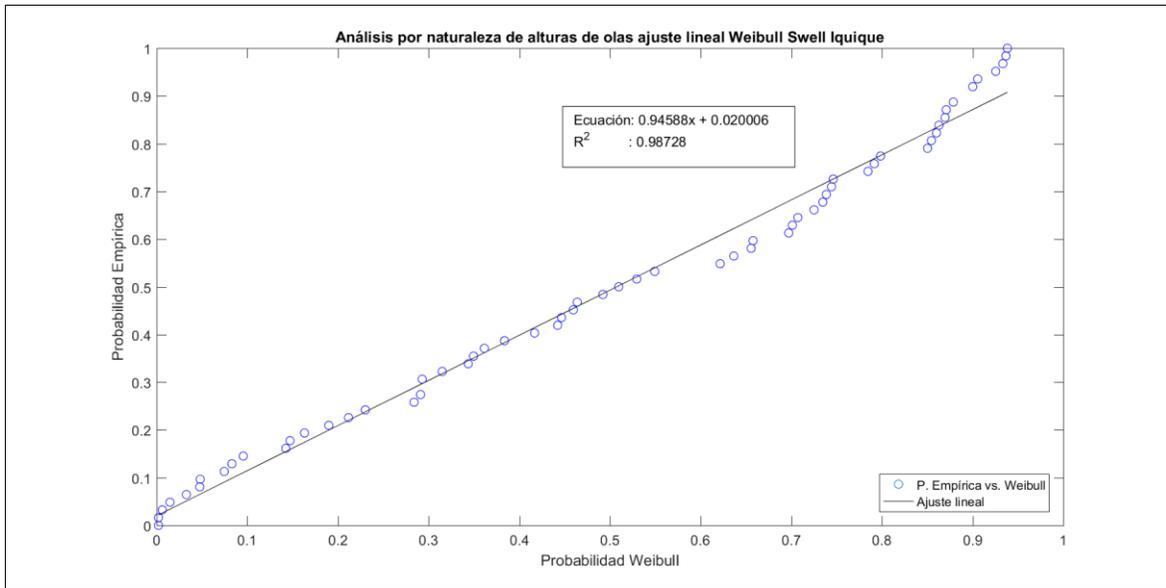


Figura 11-12: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
 (Fuente: Elaboración propia)

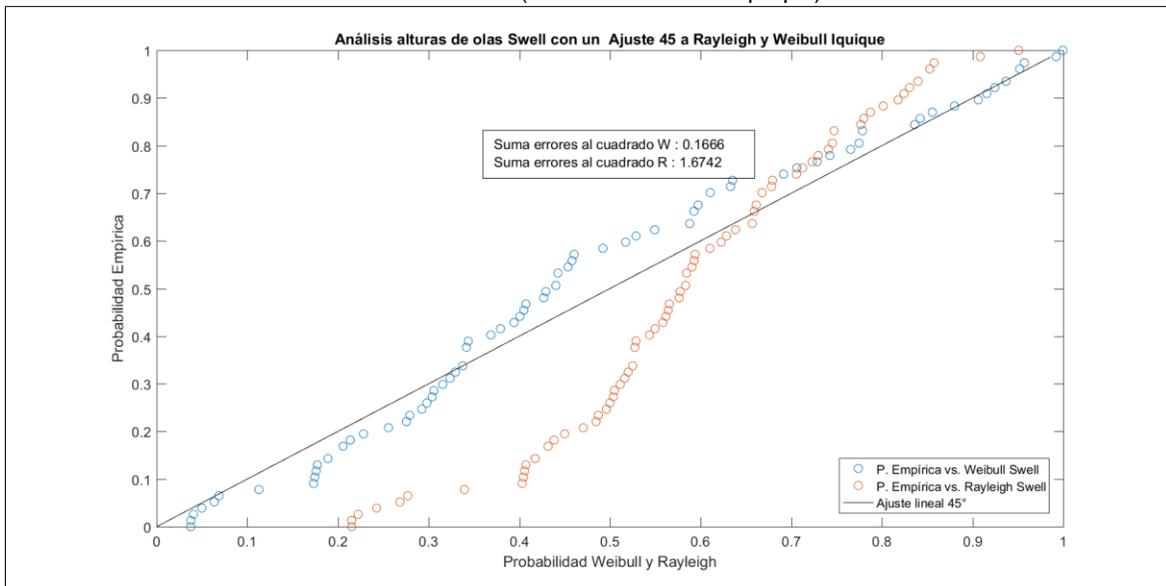


Figura 11-13: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
 (Fuente: Elaboración propia)

11.1.2 OBISPO

Control de calidad

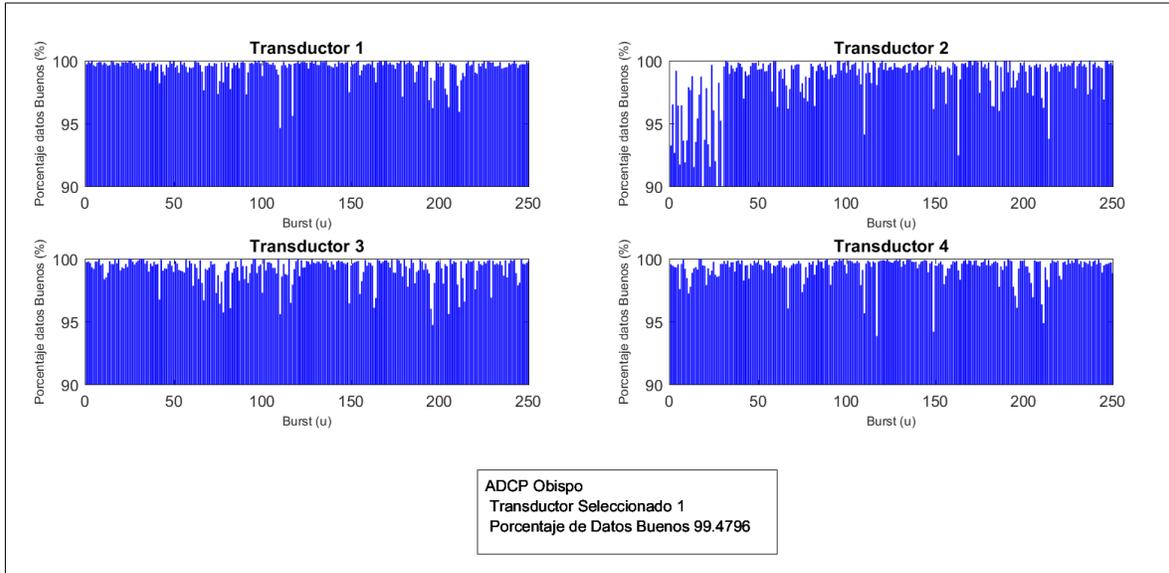


Figura 11-14: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

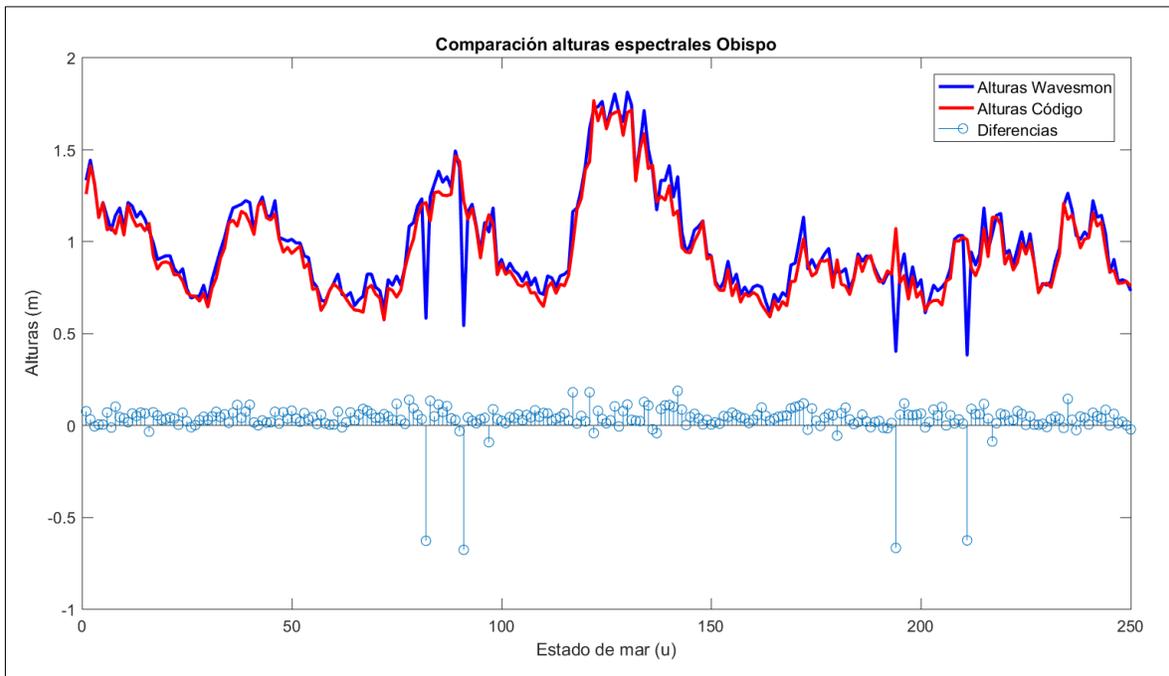


Figura 11-15: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB Obispo

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

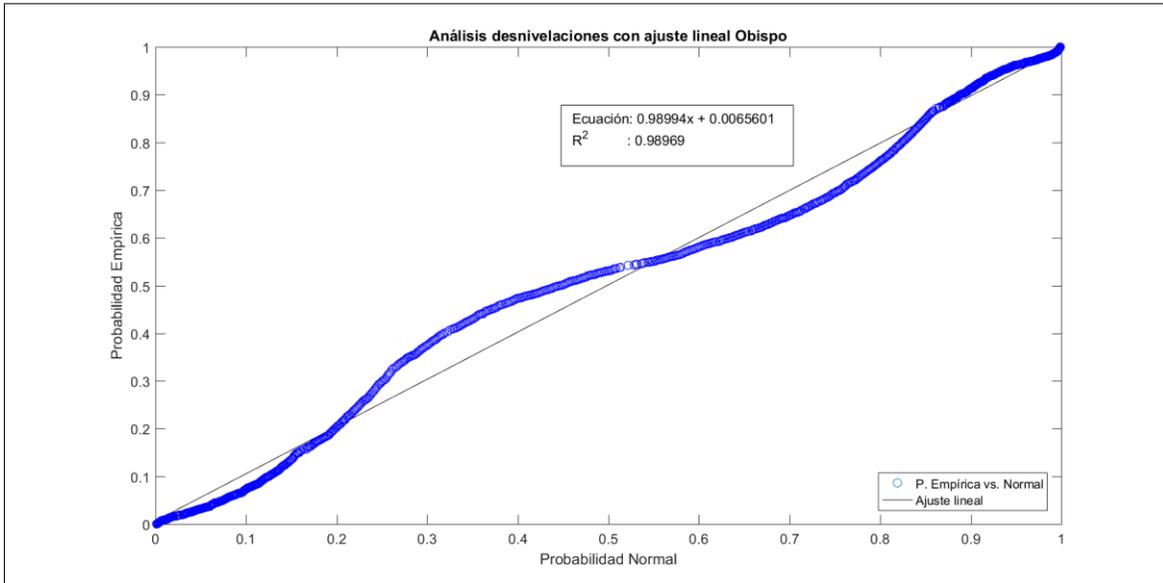


Figura 11-16: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

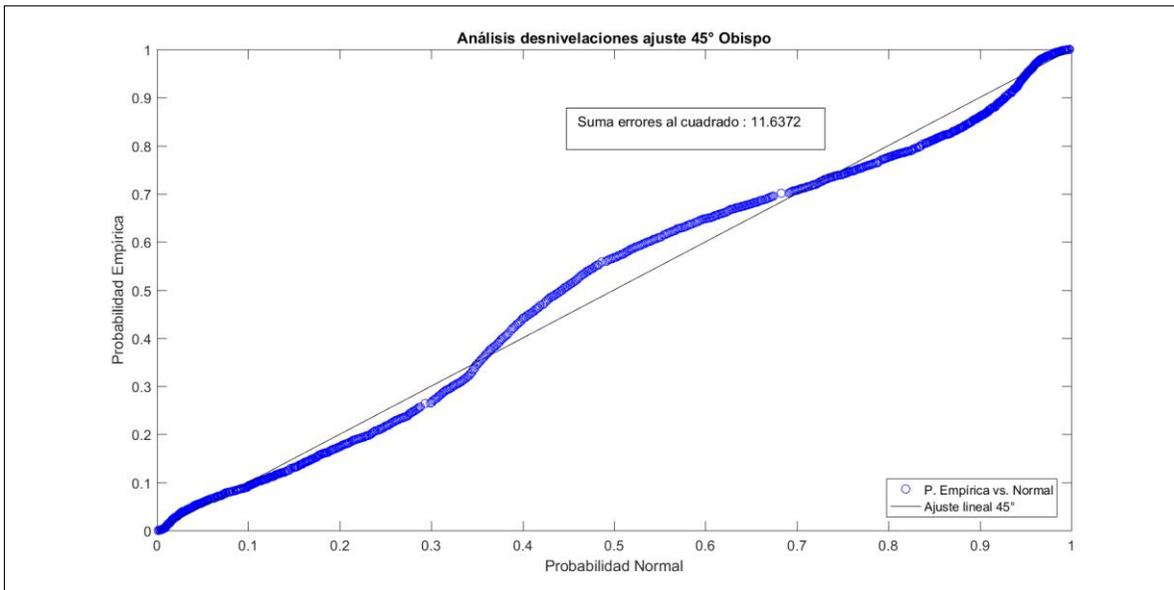


Figura 11-17: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

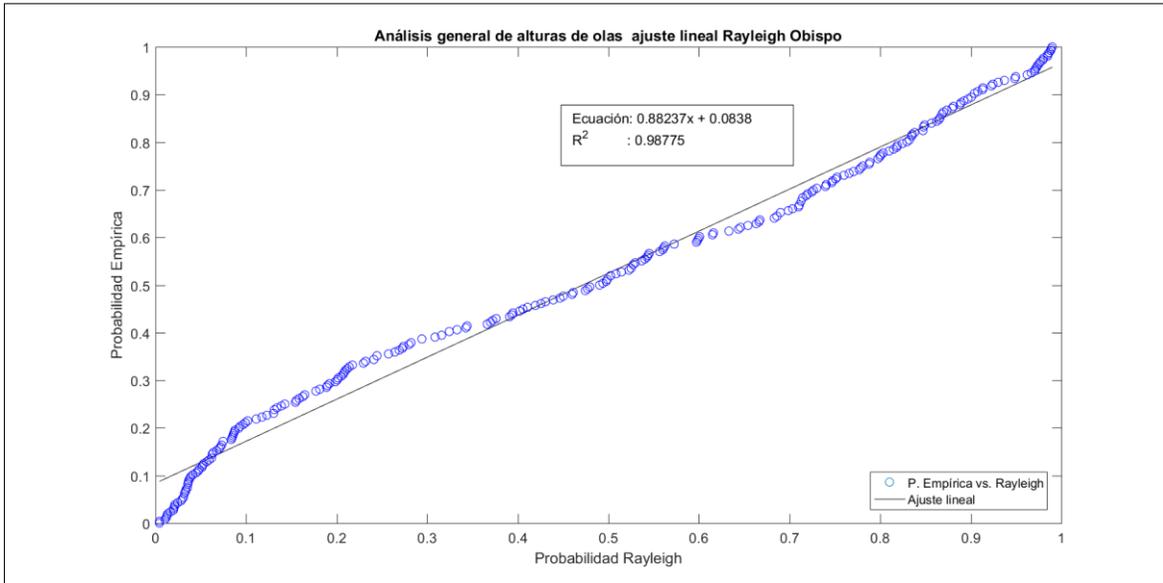


Figura 11-18: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

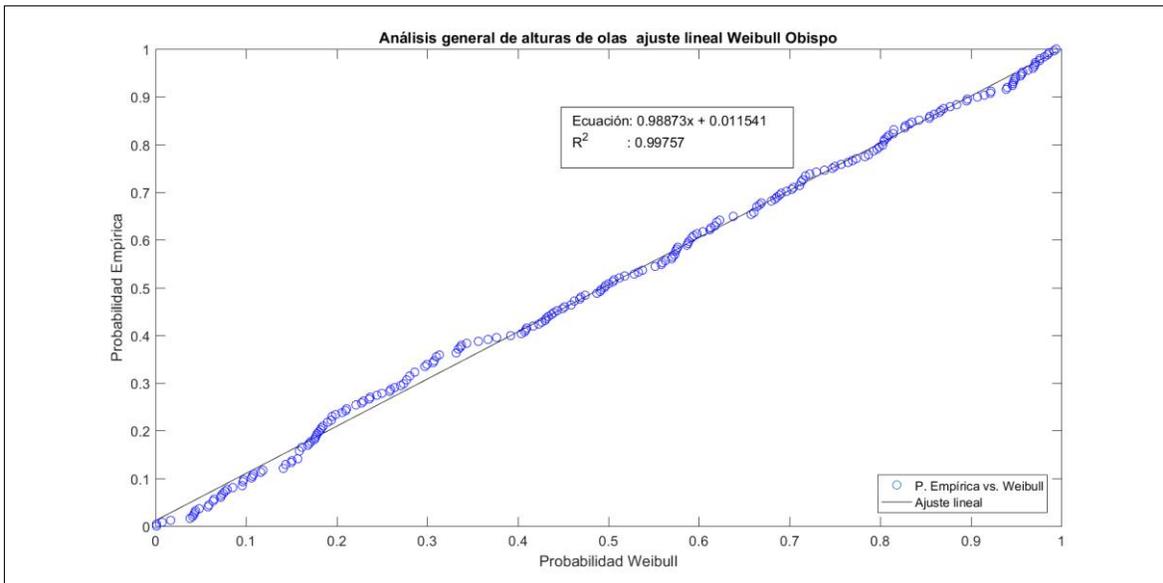


Figura 11-19: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

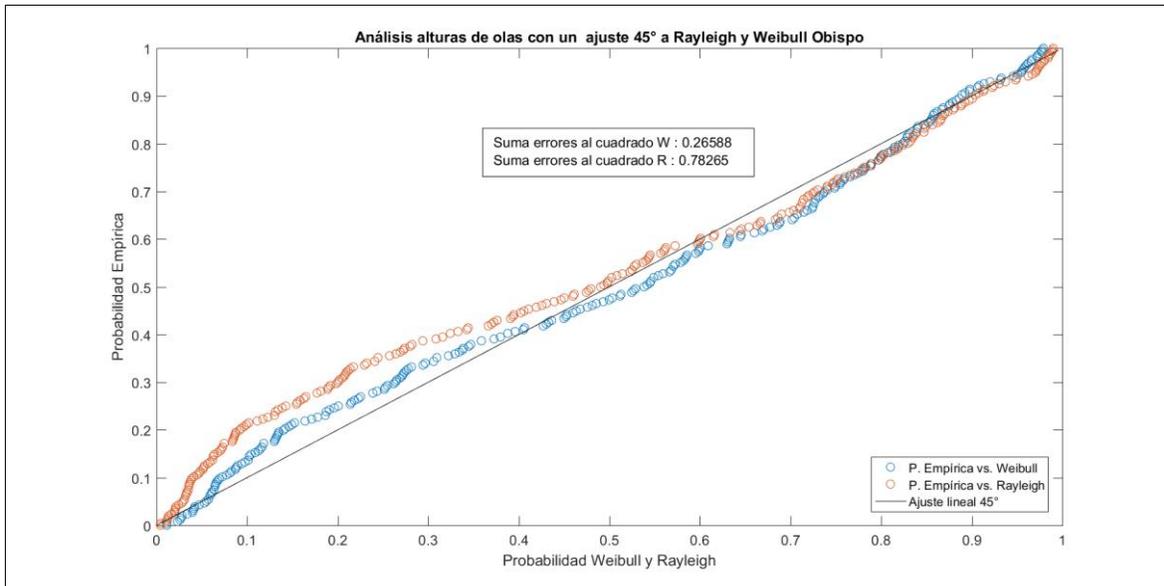


Figura 11-20: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

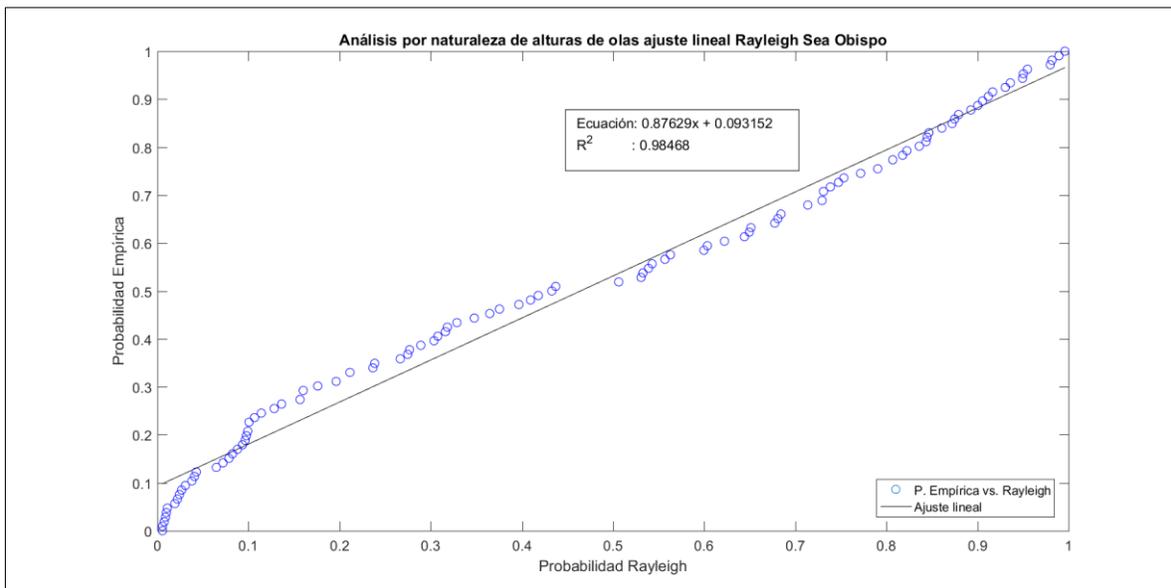


Figura 11-21: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

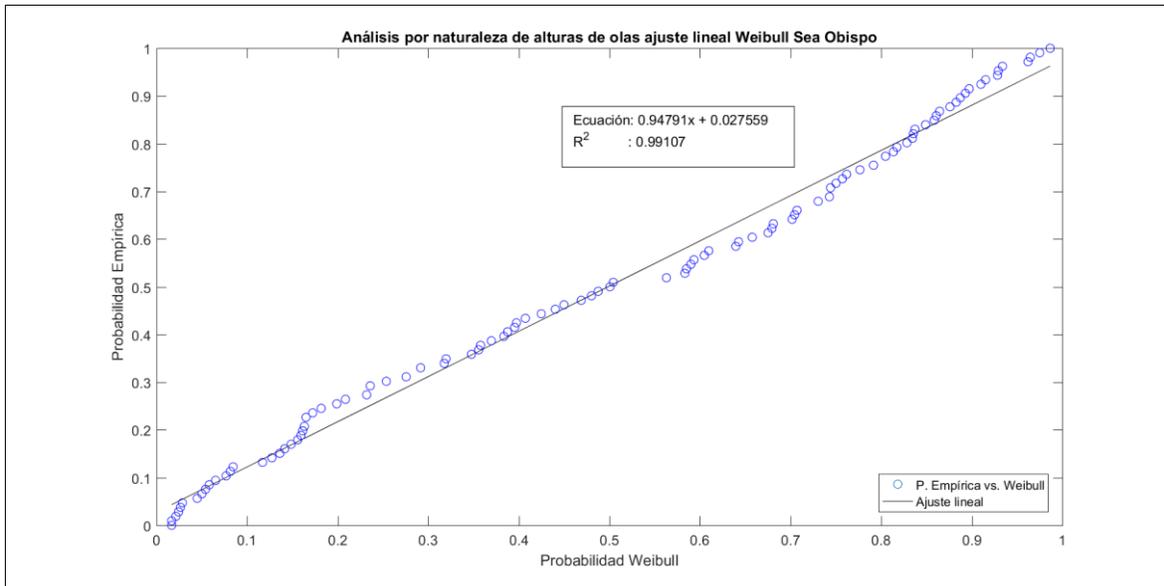


Figura 11-22: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

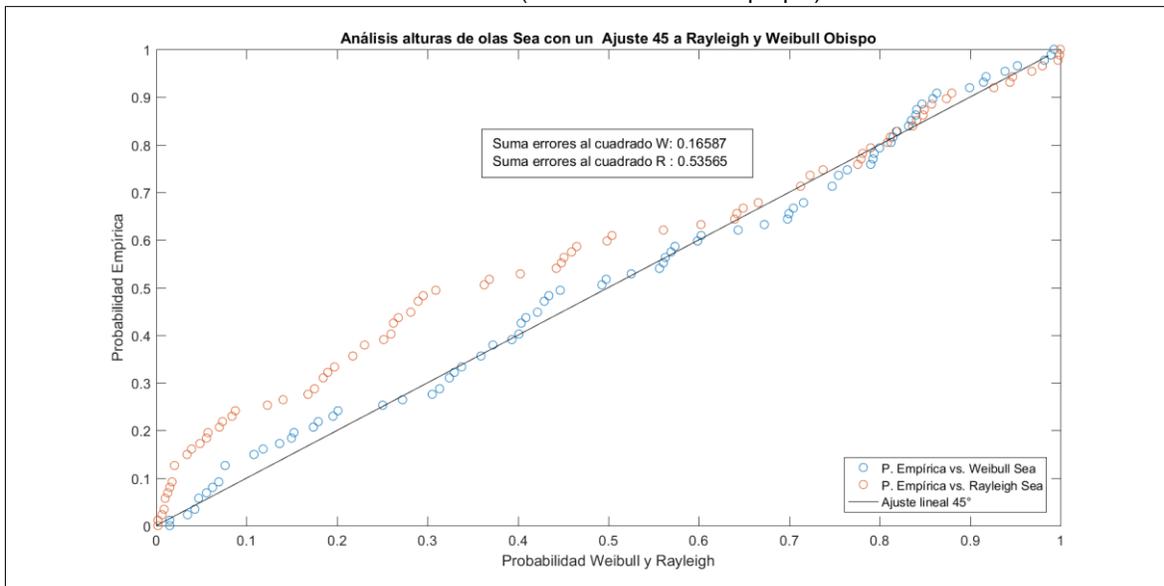


Figura 11-23: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

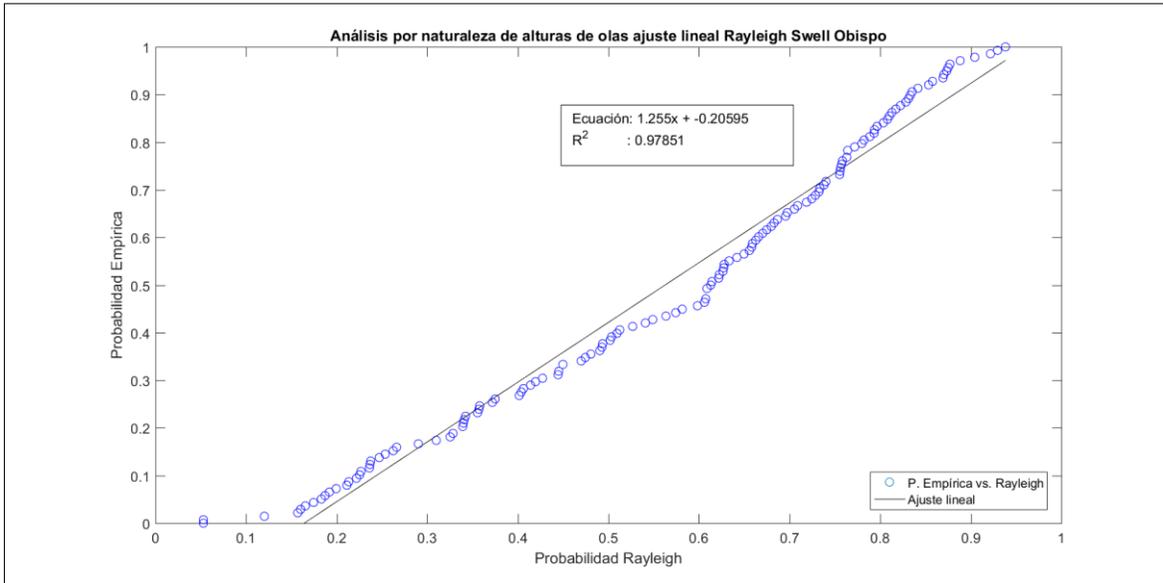


Figura 11-24: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

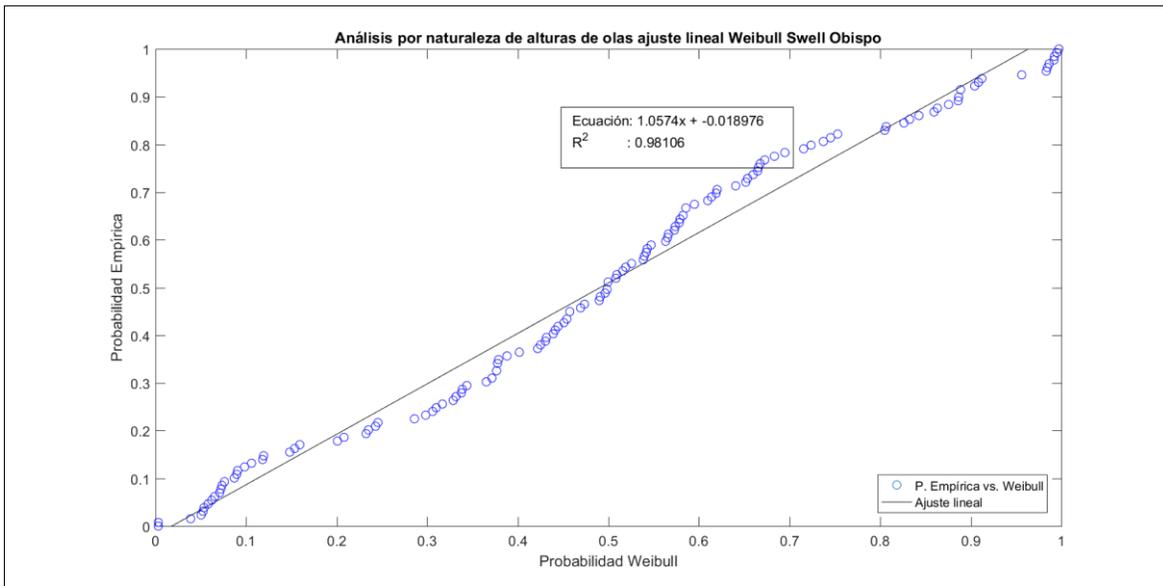


Figura 11-25: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

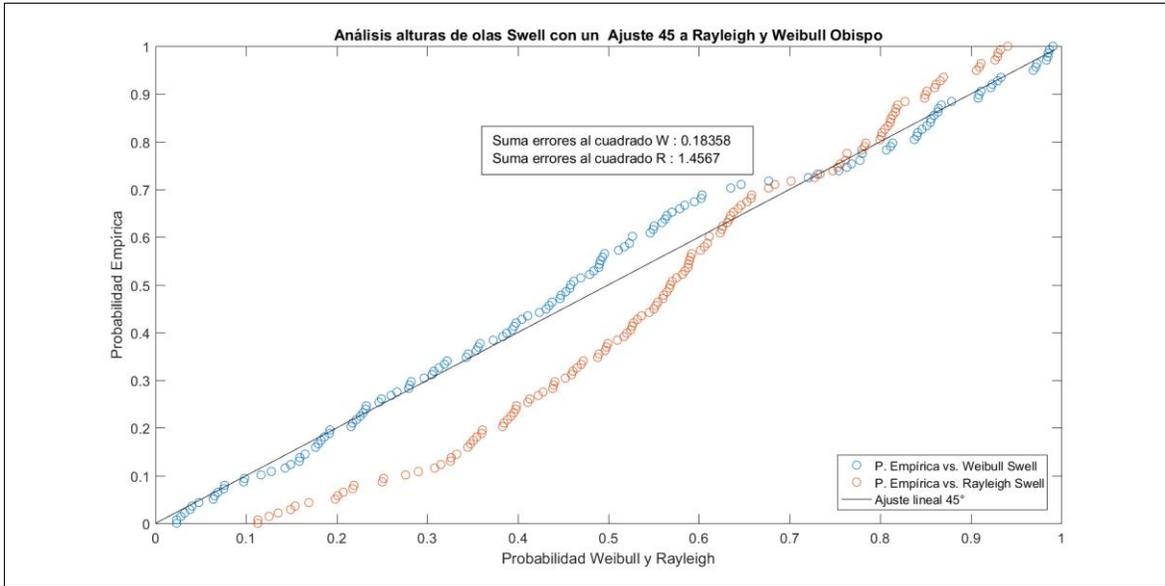


Figura 11-26: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.1.3 LA SERENA

Control de calidad

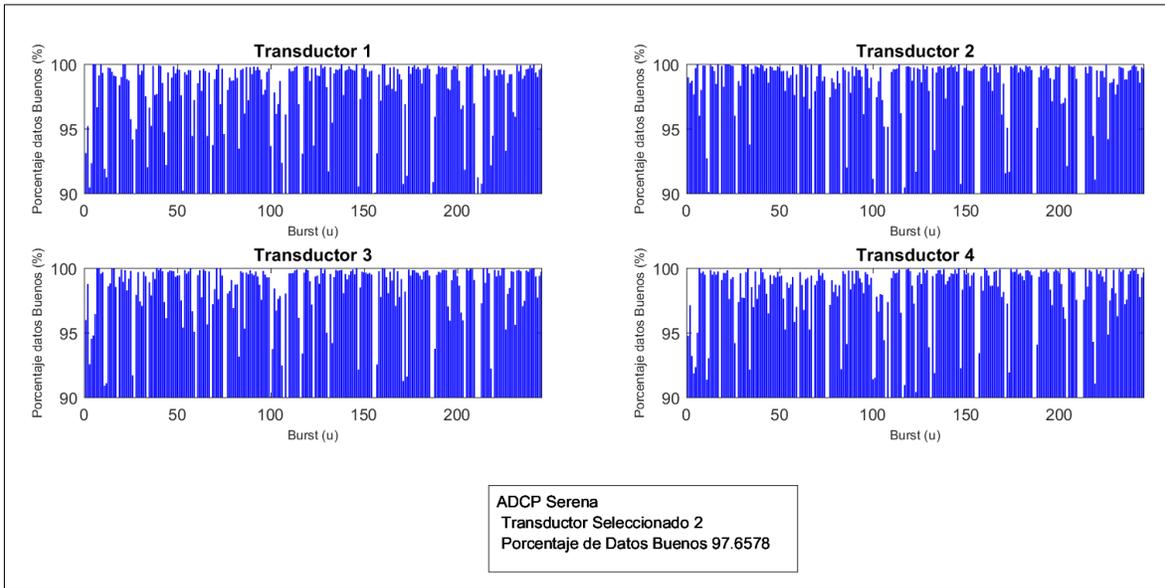


Figura 11-27: Selección de transductor
(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

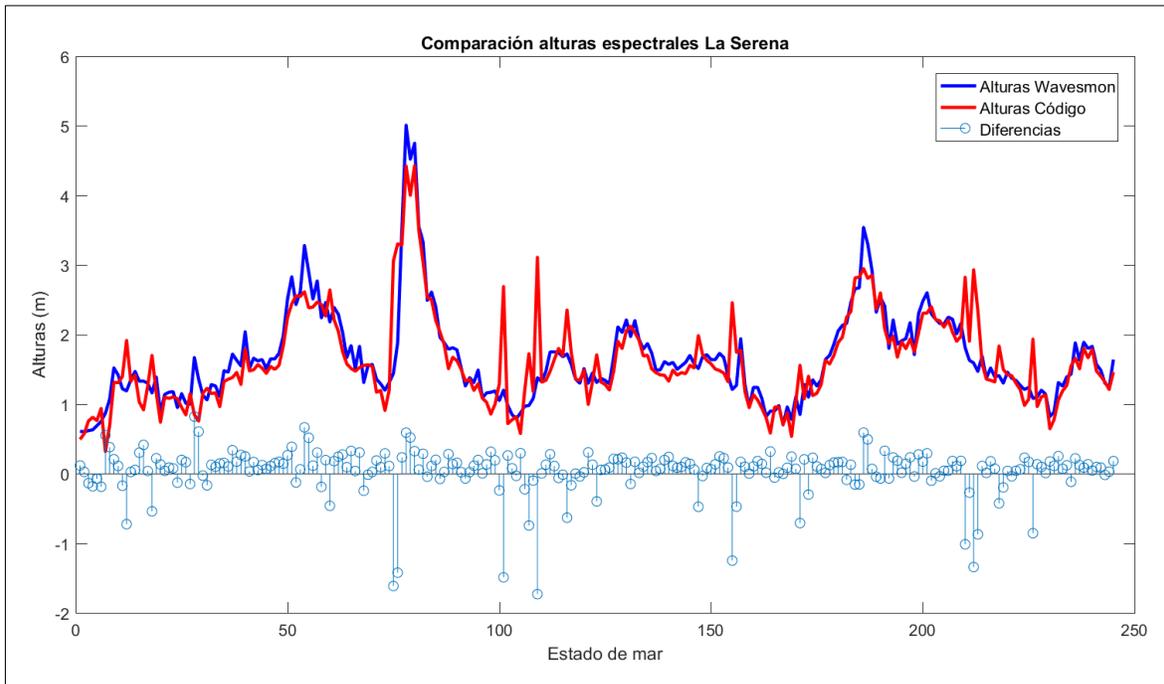


Figura 11-28: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

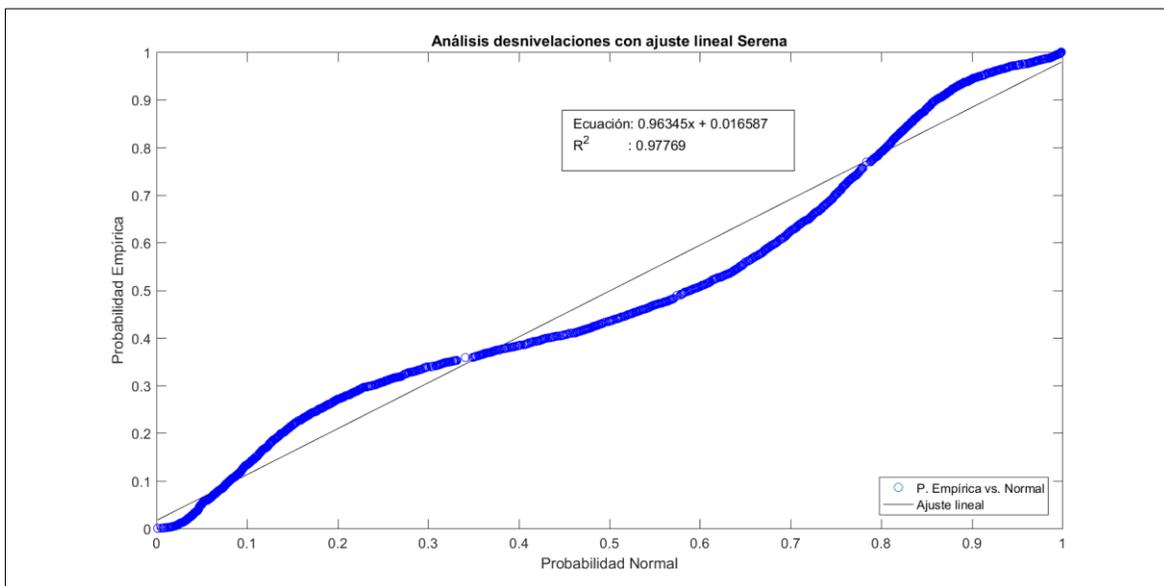


Figura 11-29: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal

(Fuente: Elaboración propia)

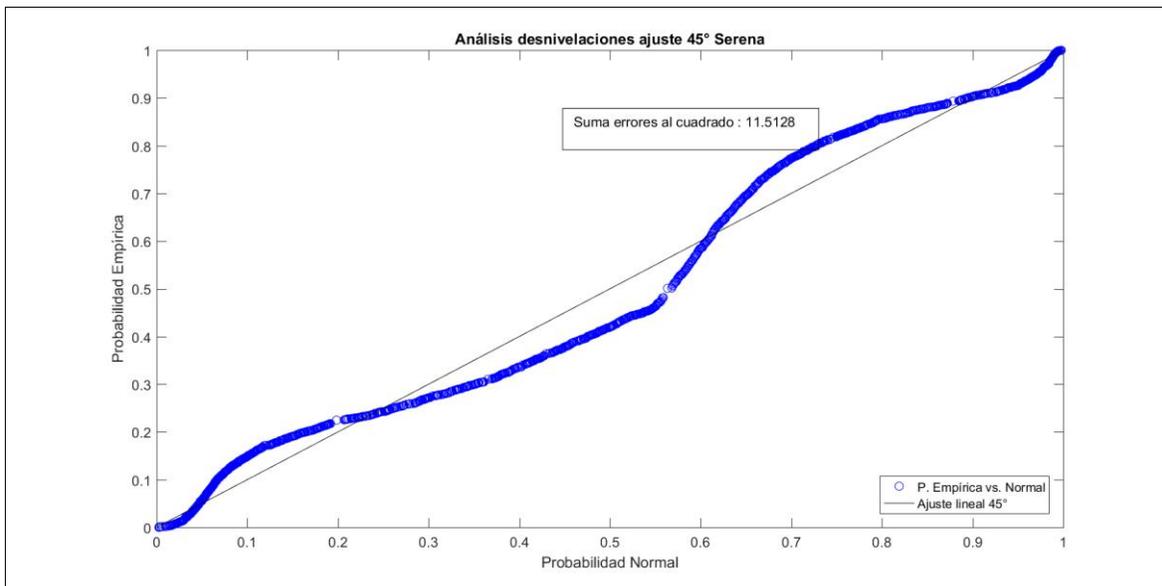


Figura 11-30: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

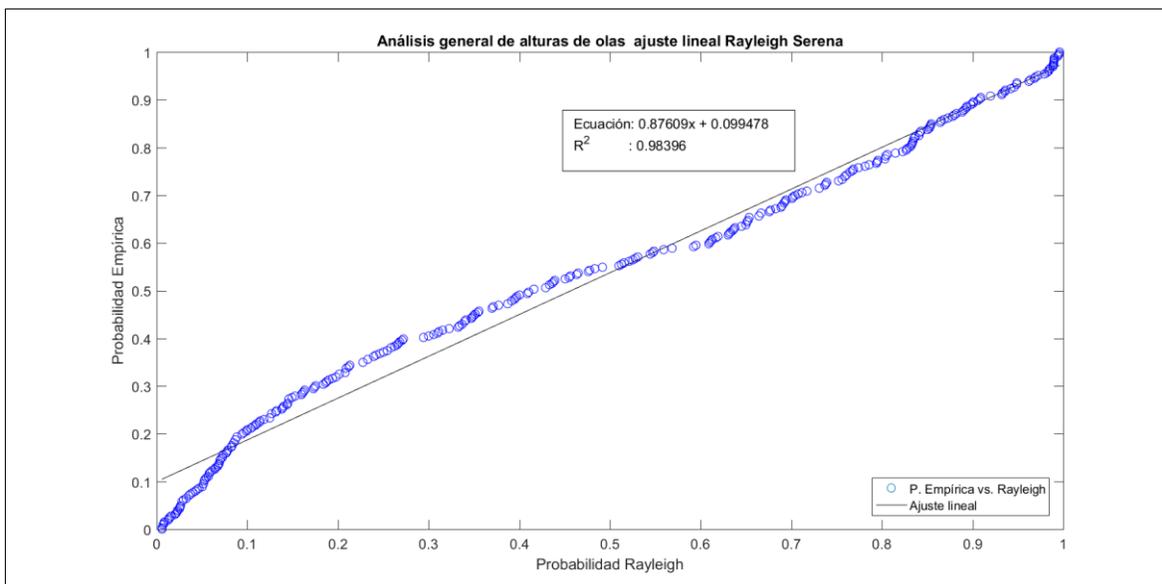


Figura 11-31: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

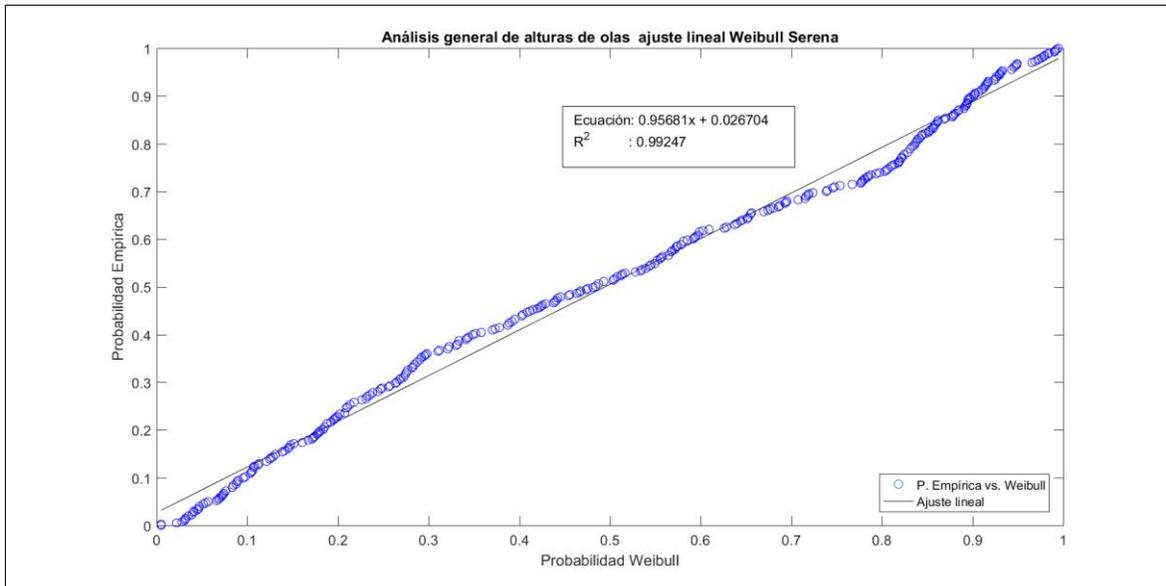


Figura 11-32: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
 (Fuente: Elaboración propia)

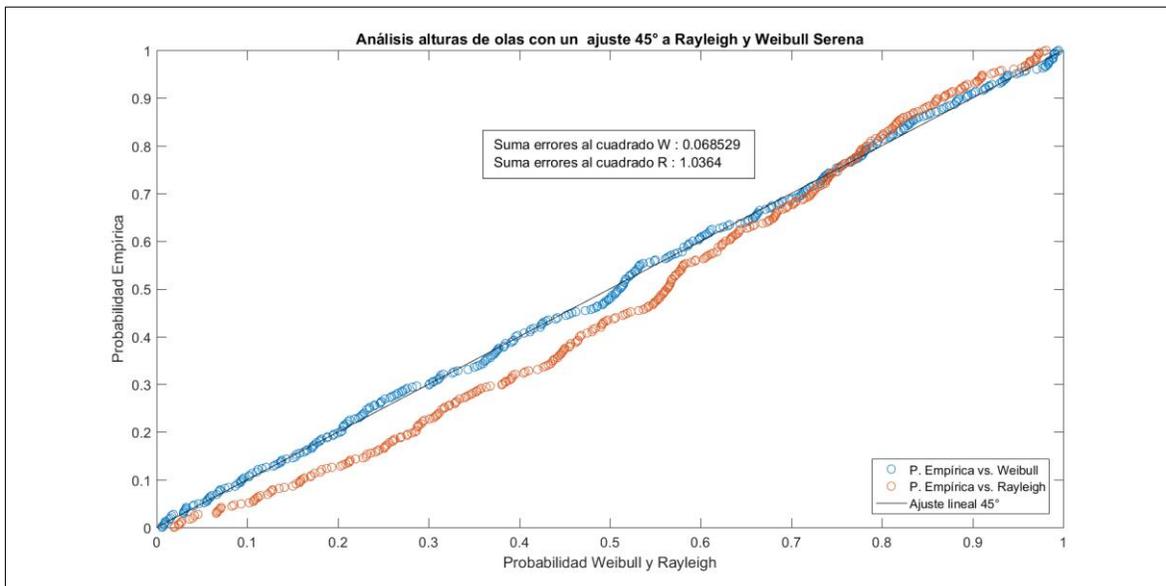


Figura 11-33: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
 (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

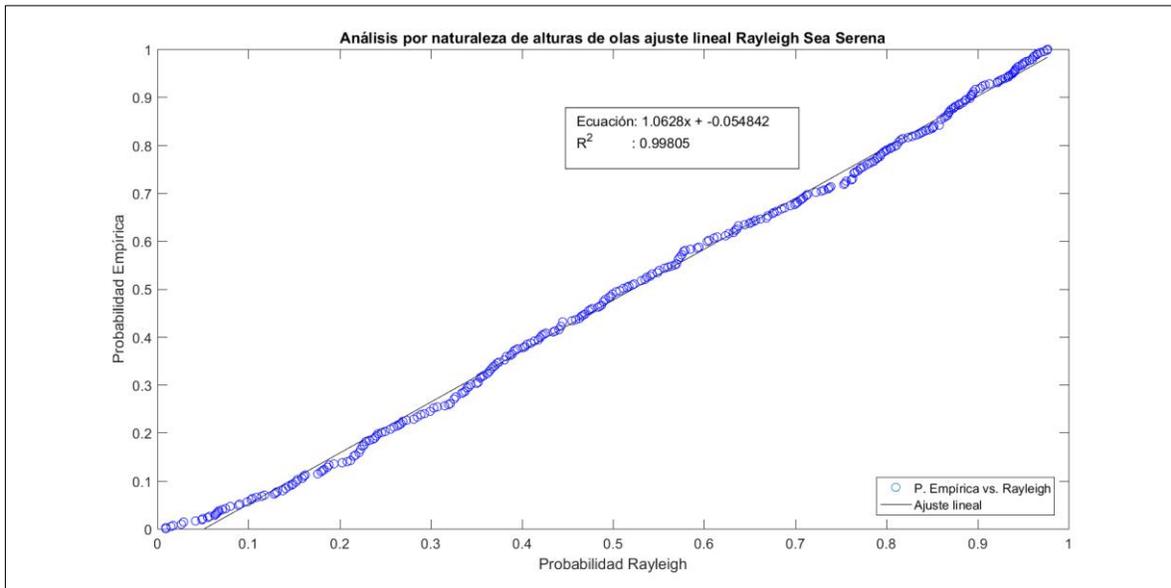


Figura 11-34: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

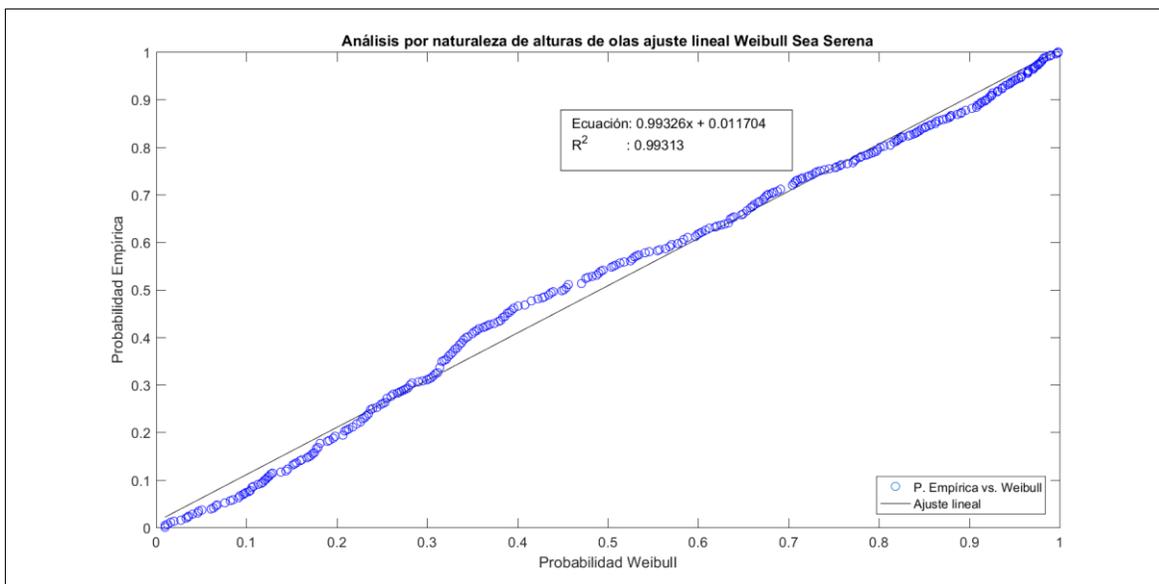


Figura 11-35: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

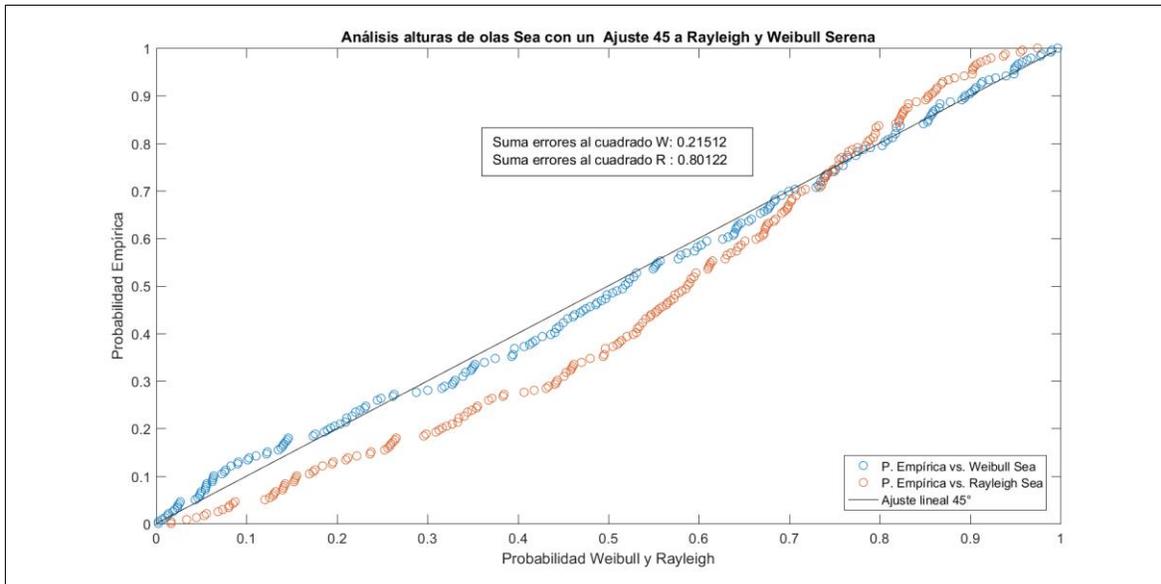


Figura 11-36: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

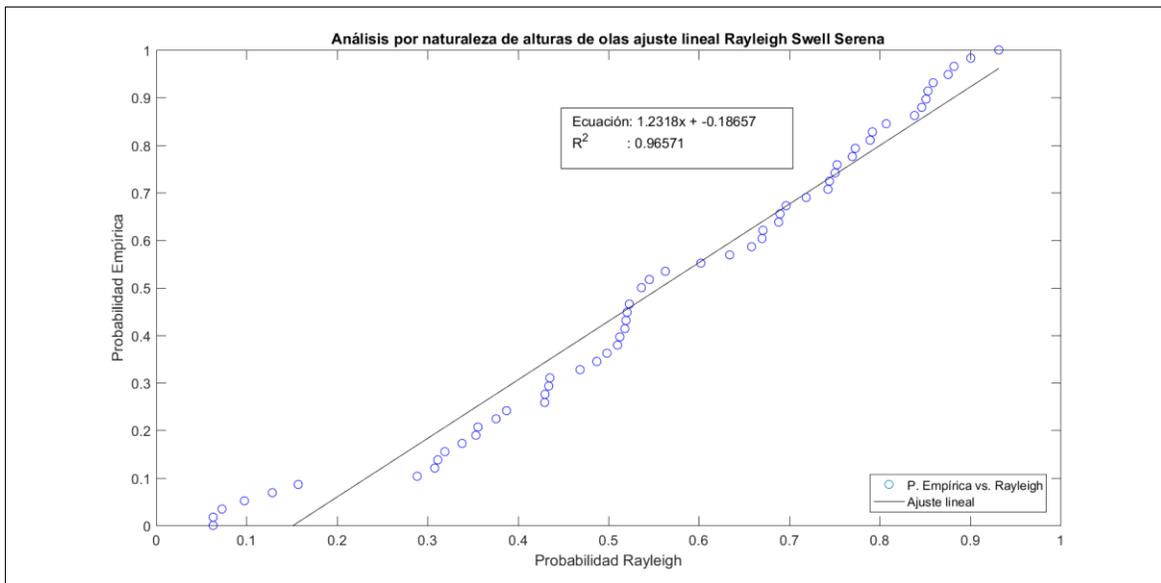


Figura 11-37: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

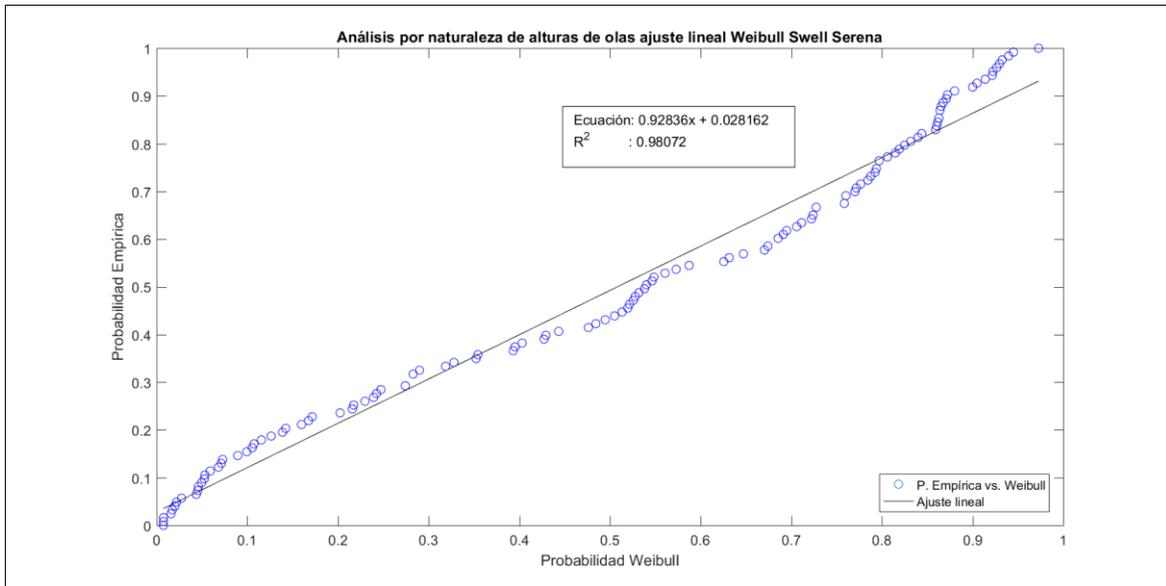


Figura 11-38: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

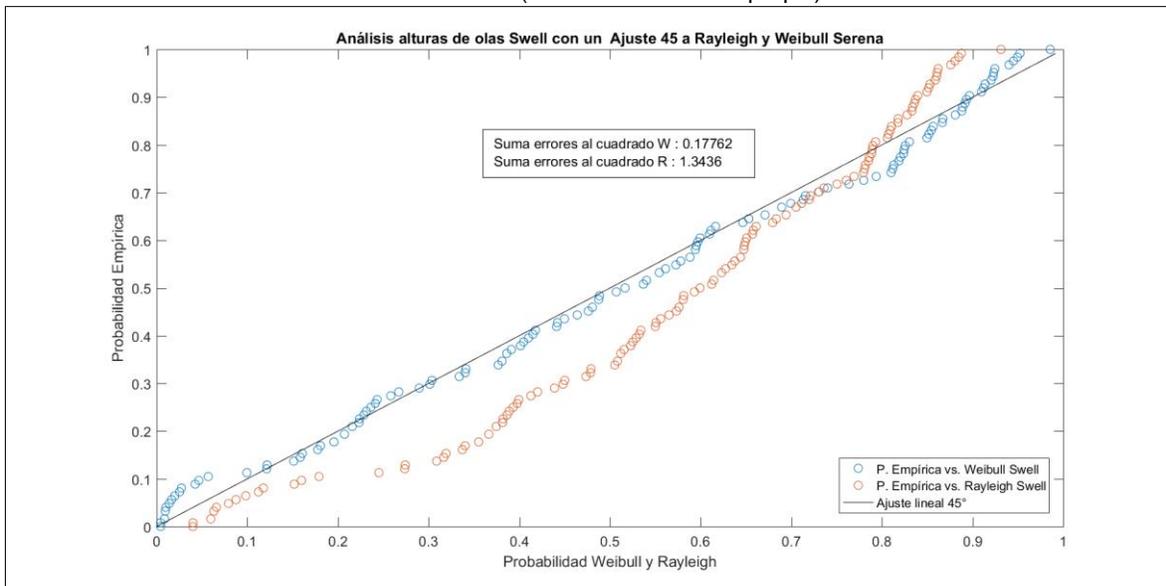


Figura 11-39: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

11.1.4 QUINTERO

Control de calidad

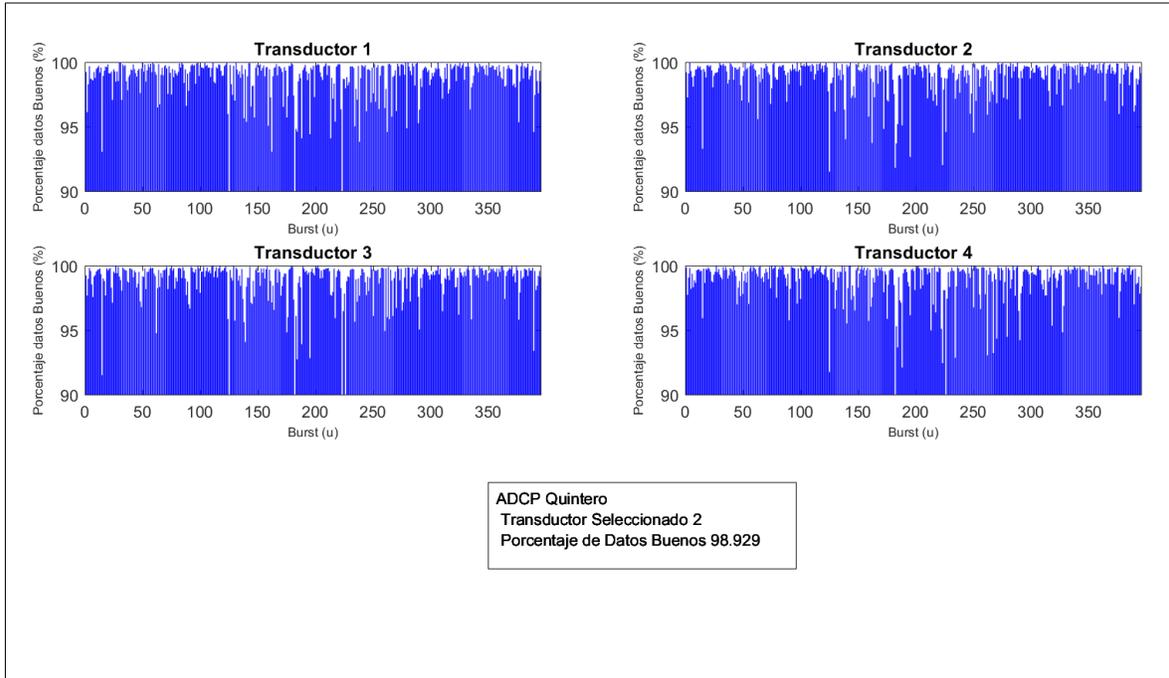


Figura 11-40: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

Presentado en los resultados en la comparación de alturas de ola.

Análisis desnivelaciones instantáneas

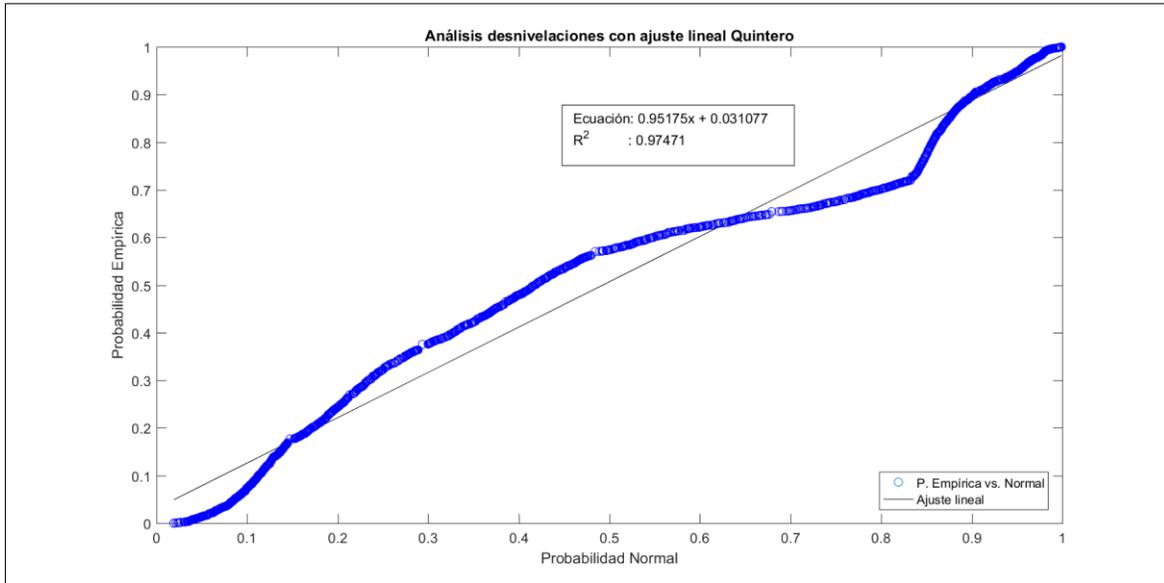


Figura 11-41: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal

(Fuente: Elaboración propia)

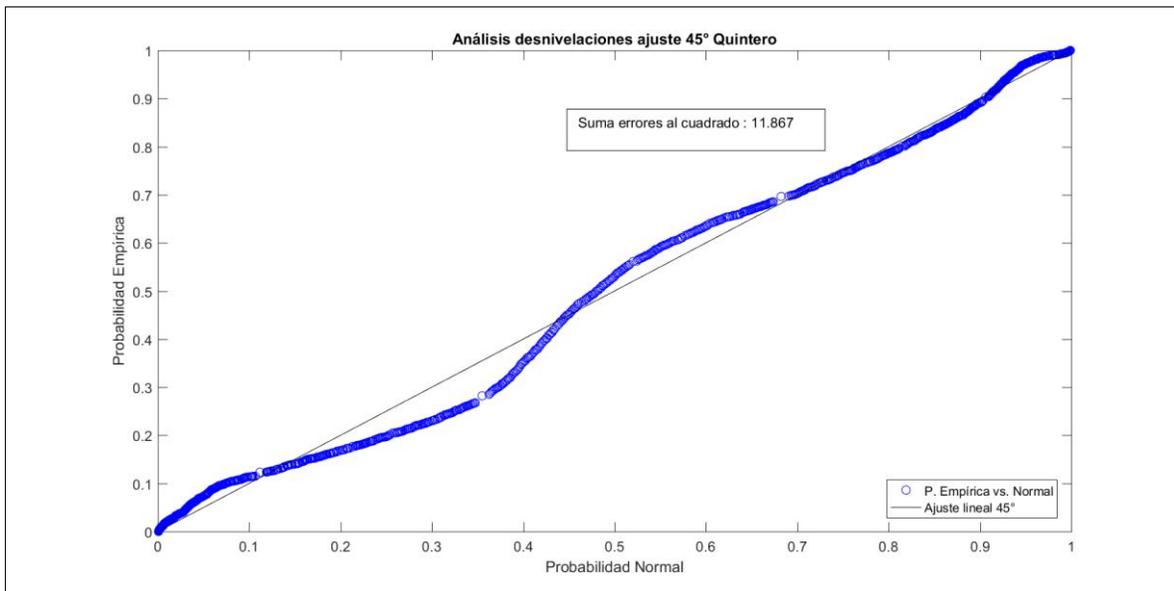


Figura 11-42: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

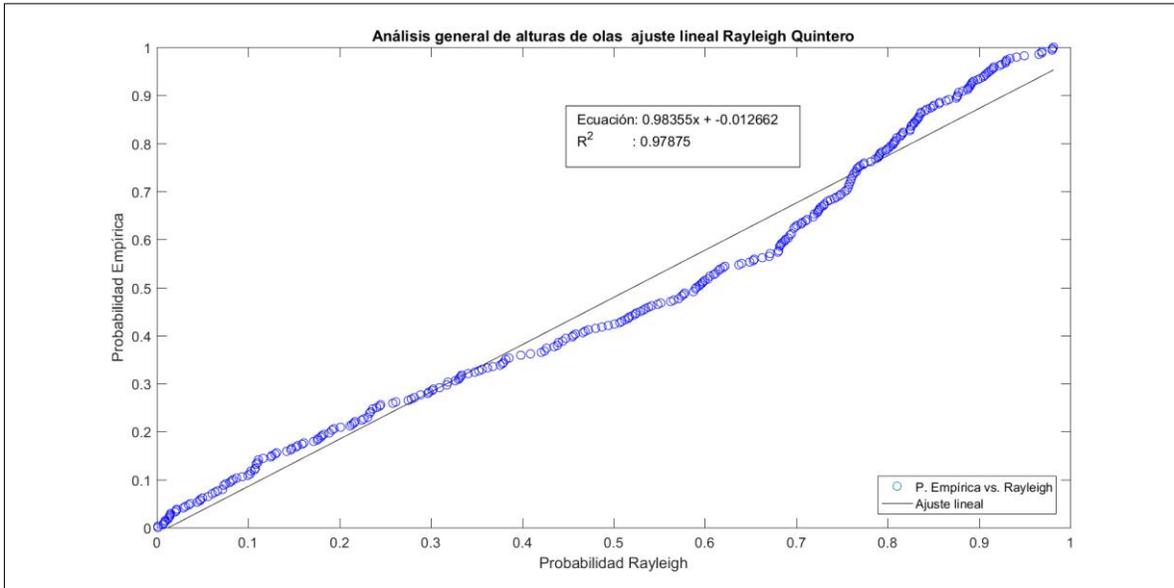


Figura 11-43: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

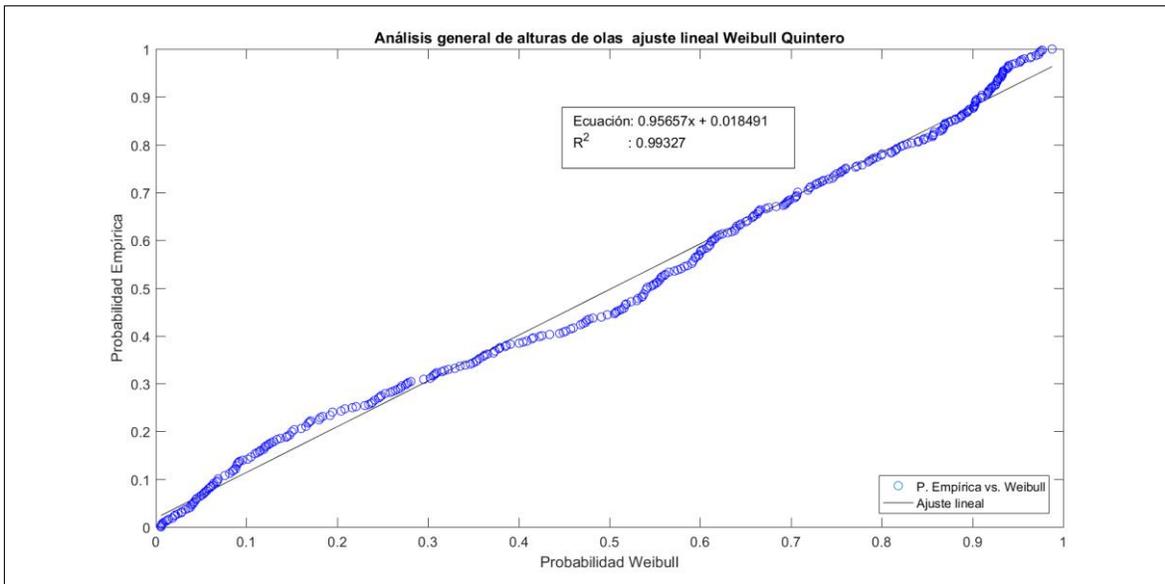


Figura 11-44: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

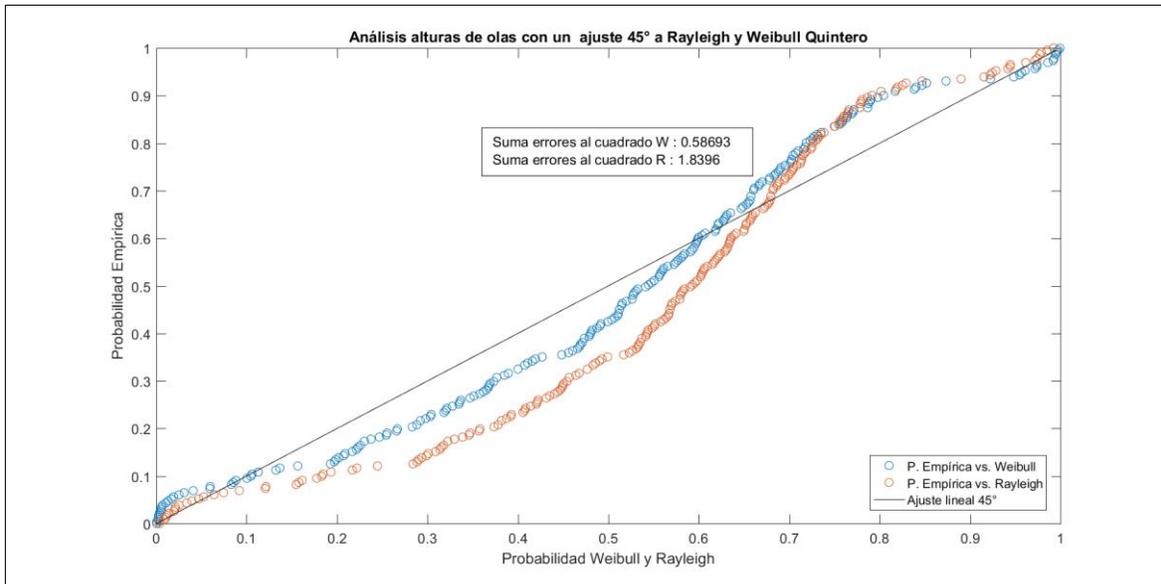


Figura 11-45: Análisis alturas de ola (ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado)
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

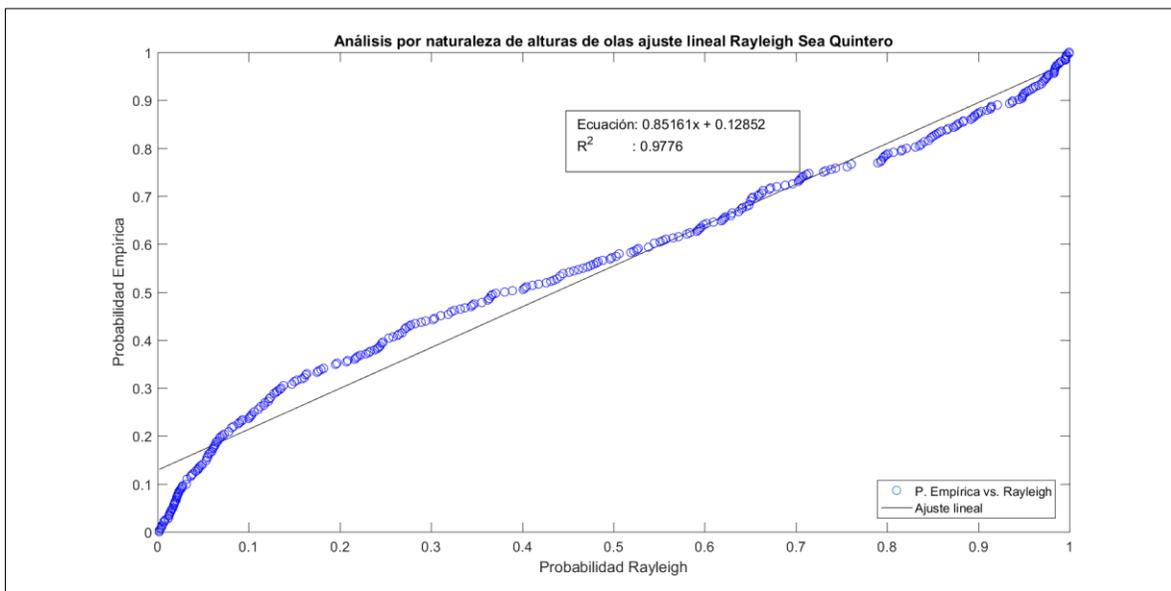


Figura 11-46: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

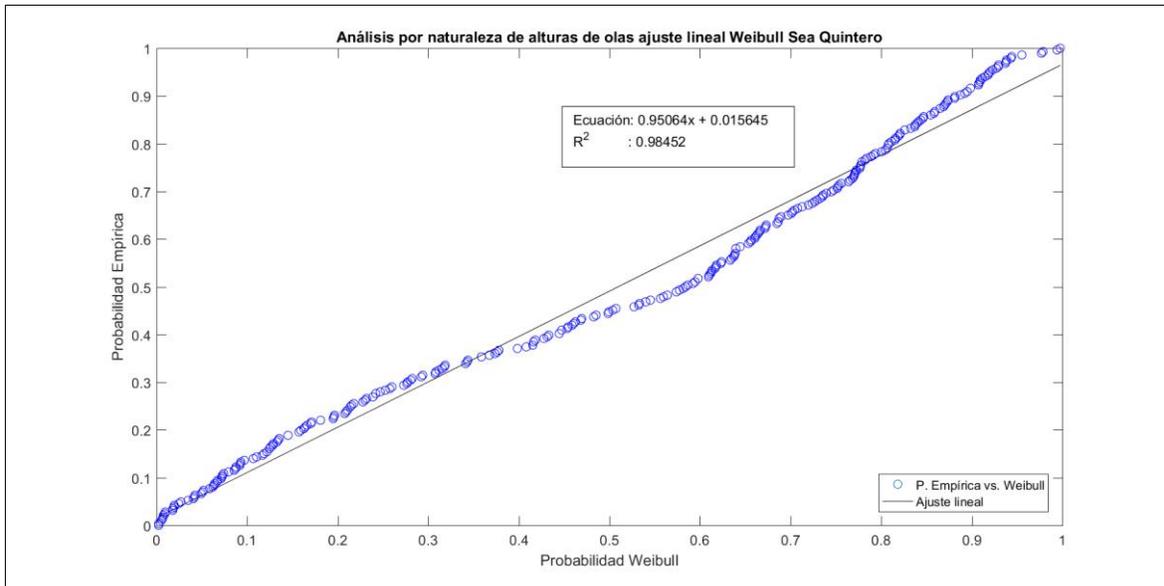


Figura 11-47: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

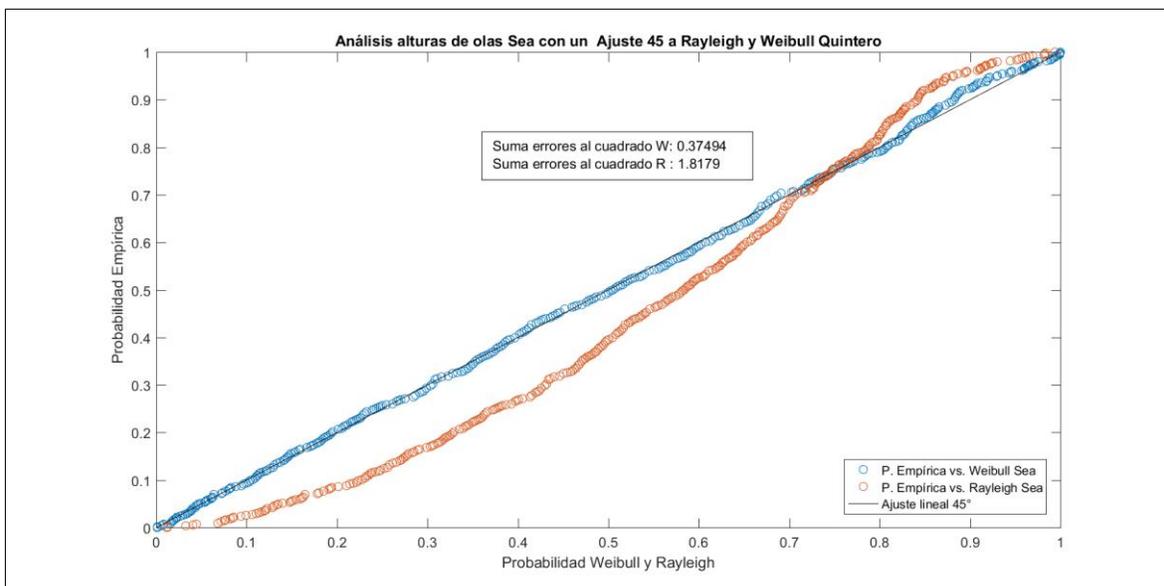


Figura 11-48: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

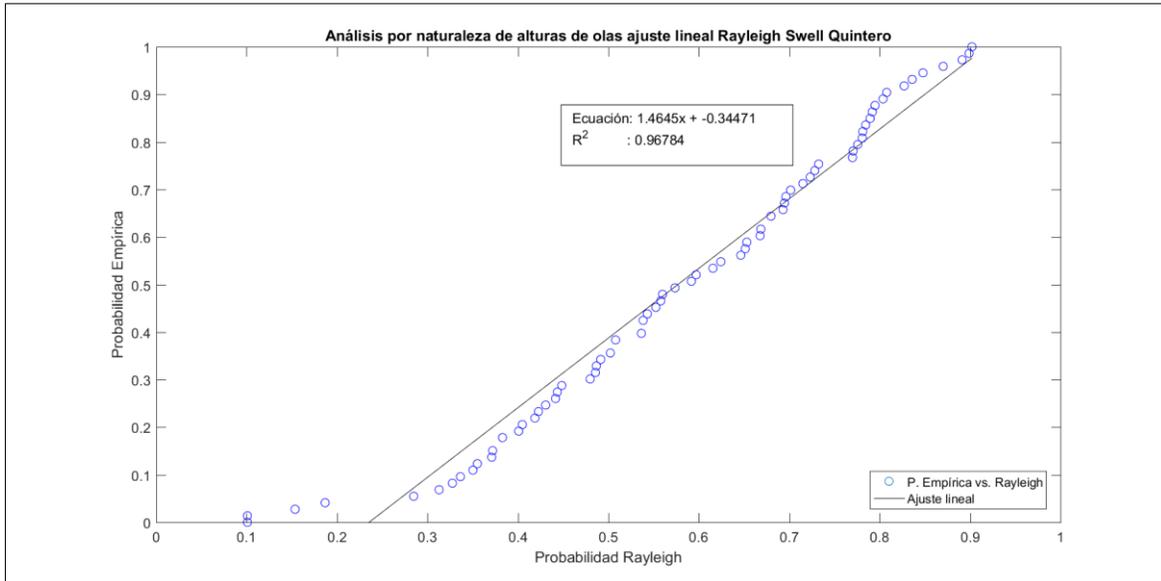


Figura 11-49: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

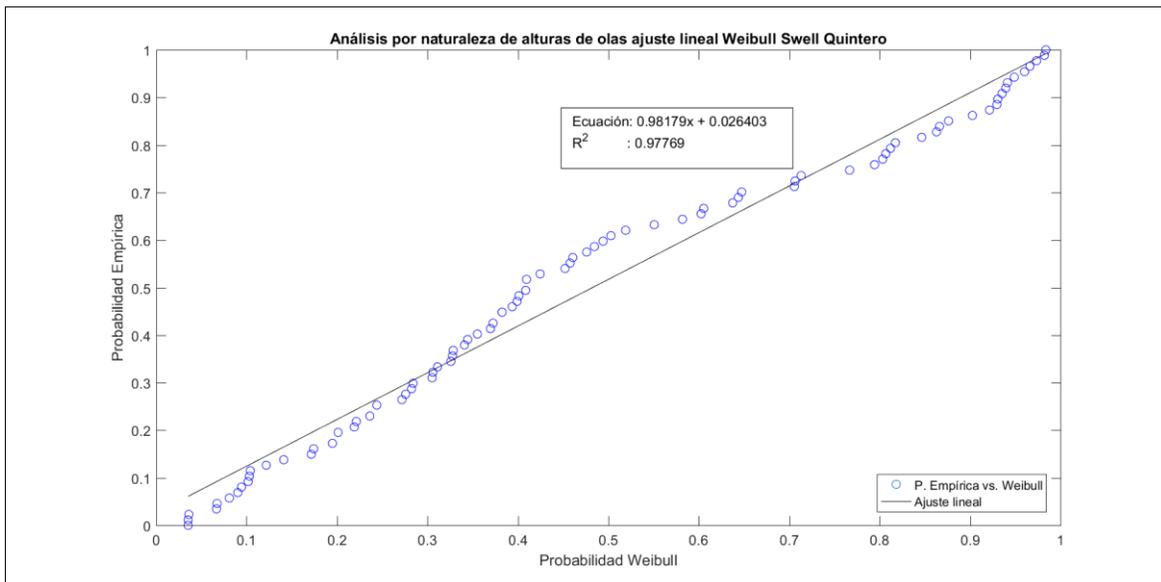


Figura 11-50: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

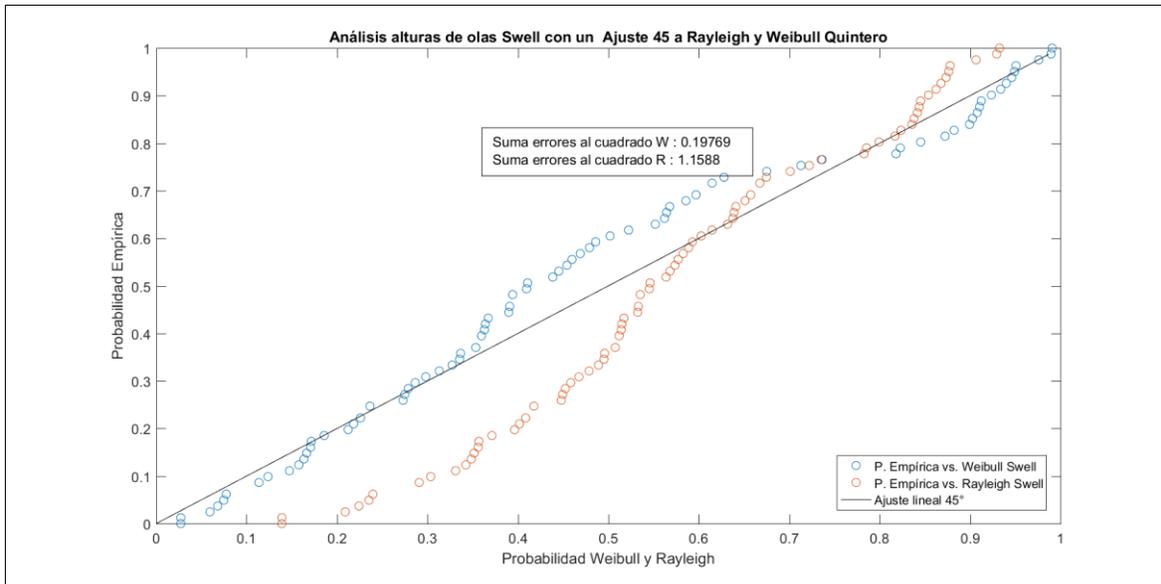


Figura 11-51: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.1.5 PUNTA LOROS

Control de calidad

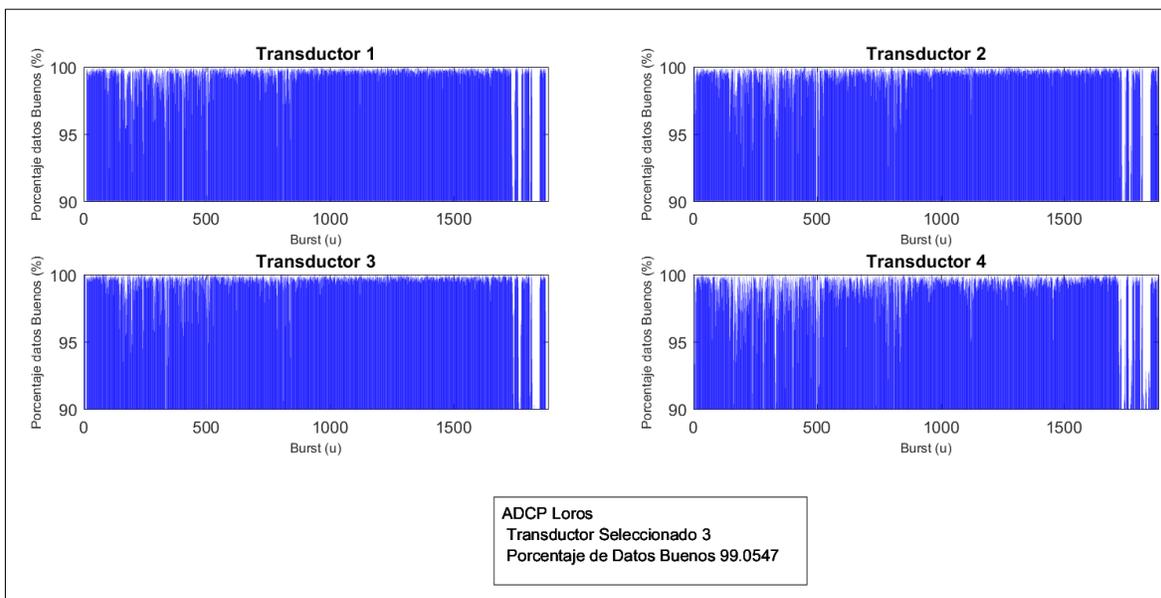


Figura 11-52: Selección de transductor
(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

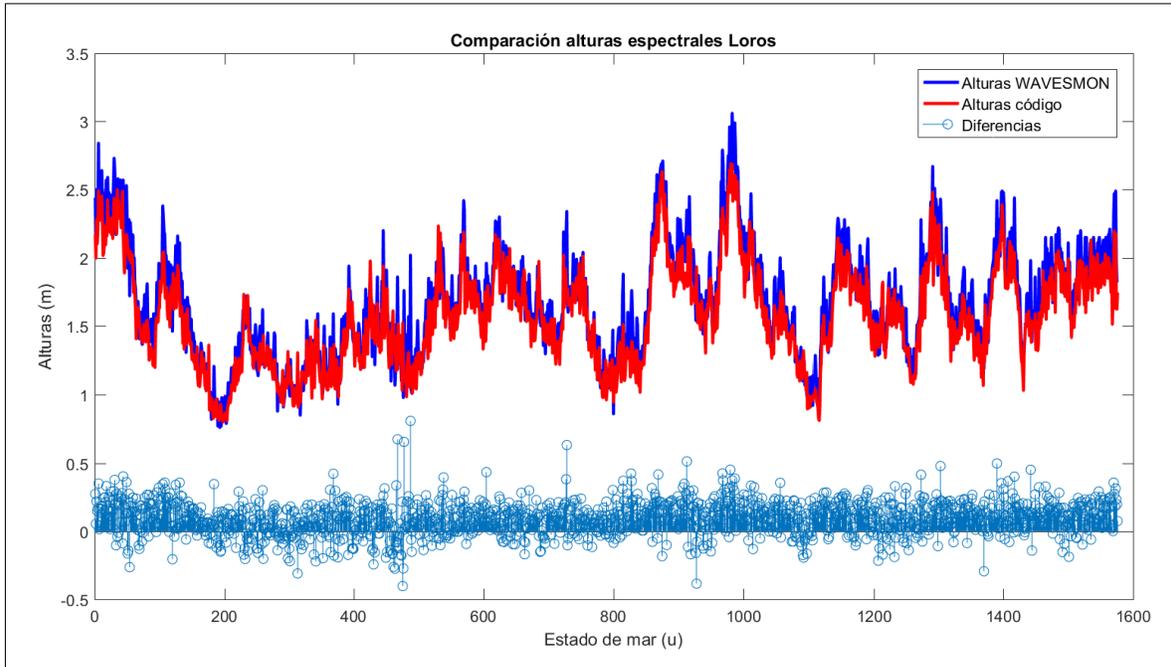


Figura 11-53: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

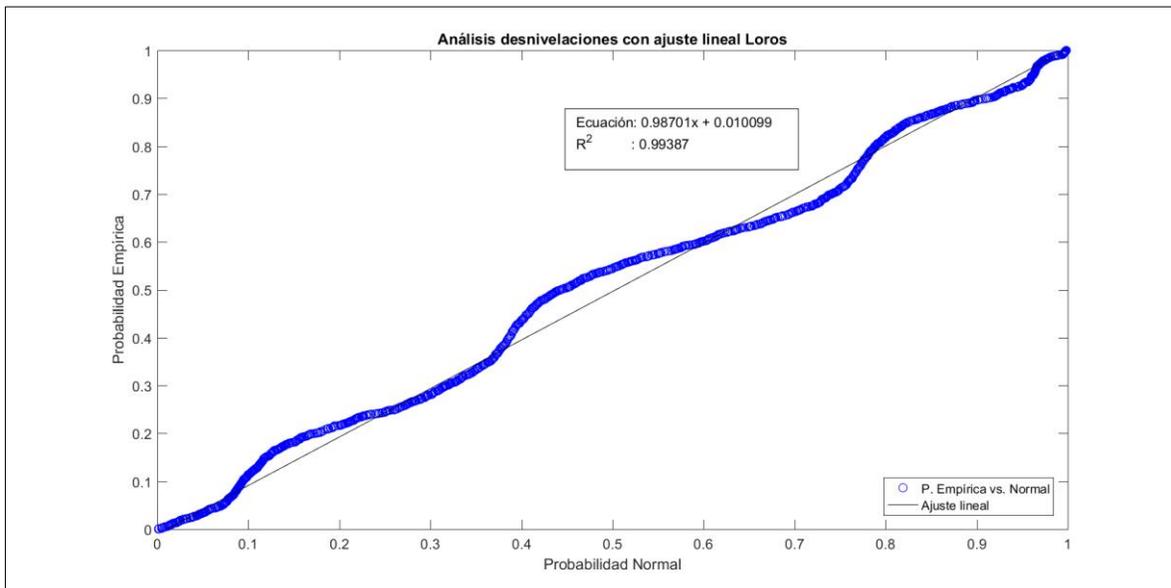


Figura 11-54: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

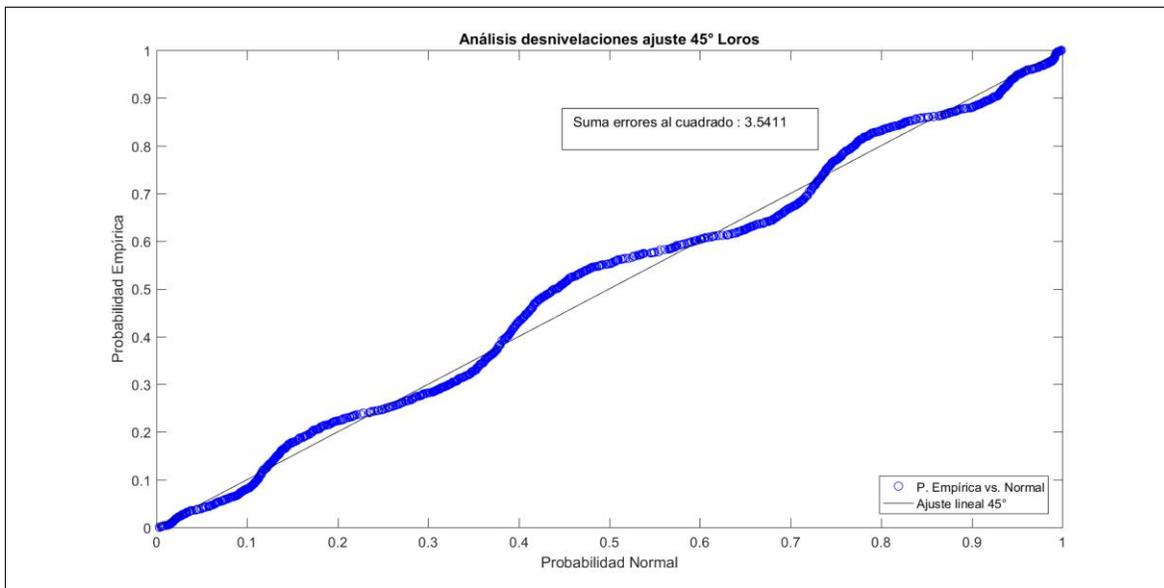


Figura 11-55: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

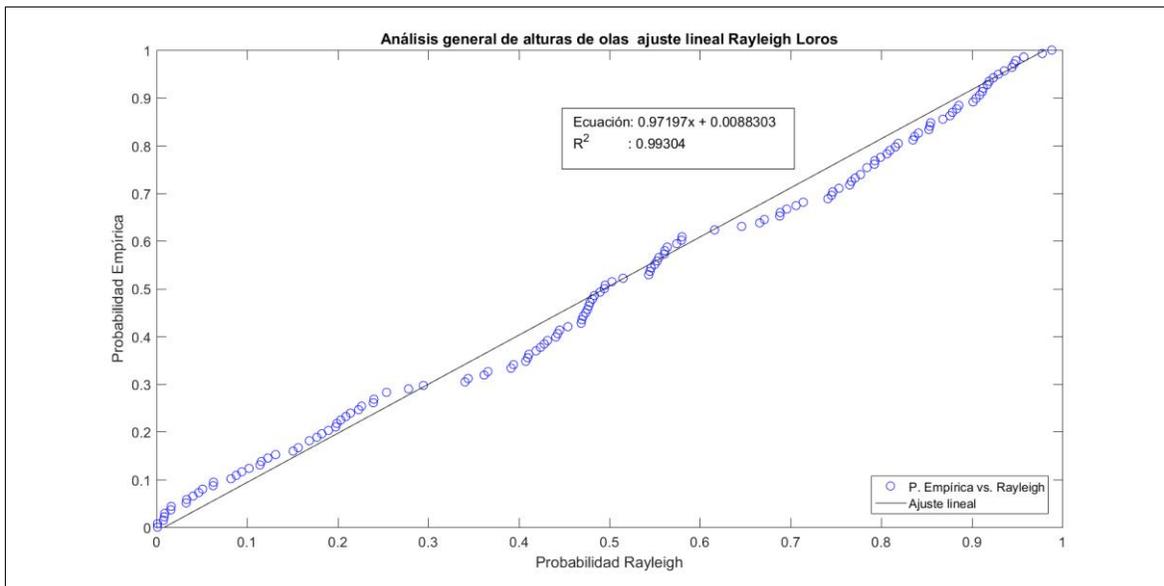


Figura 11-56: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

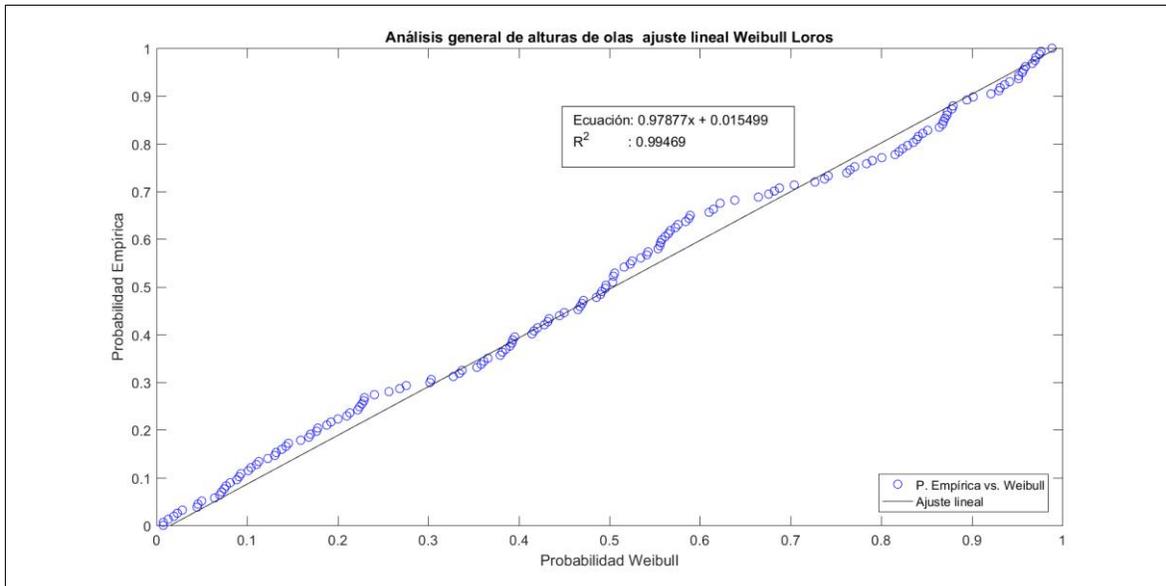


Figura 11-57: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

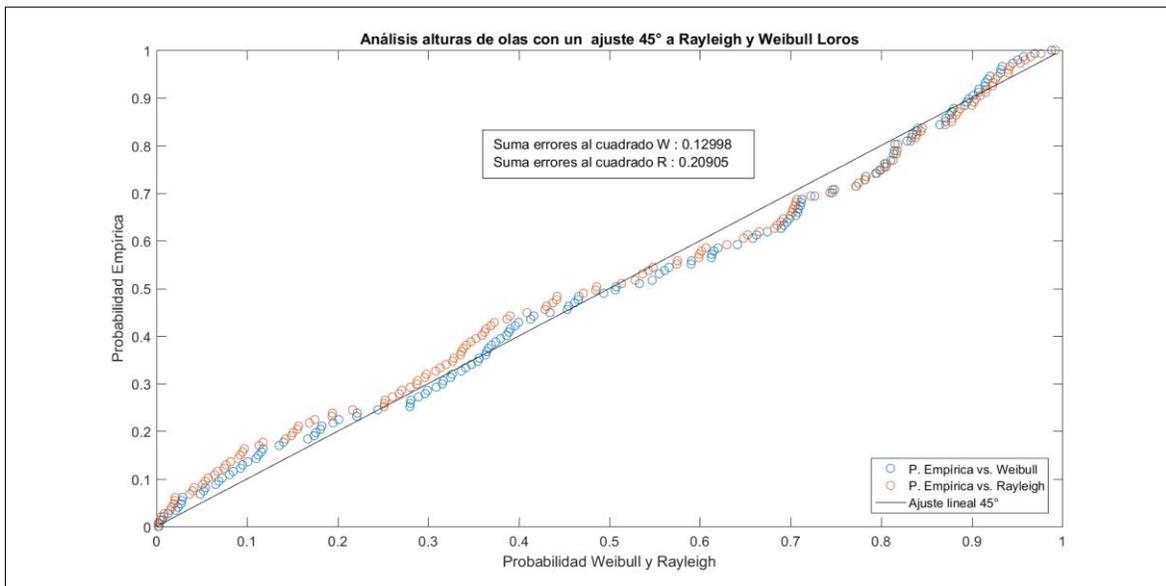


Figura 11-58: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

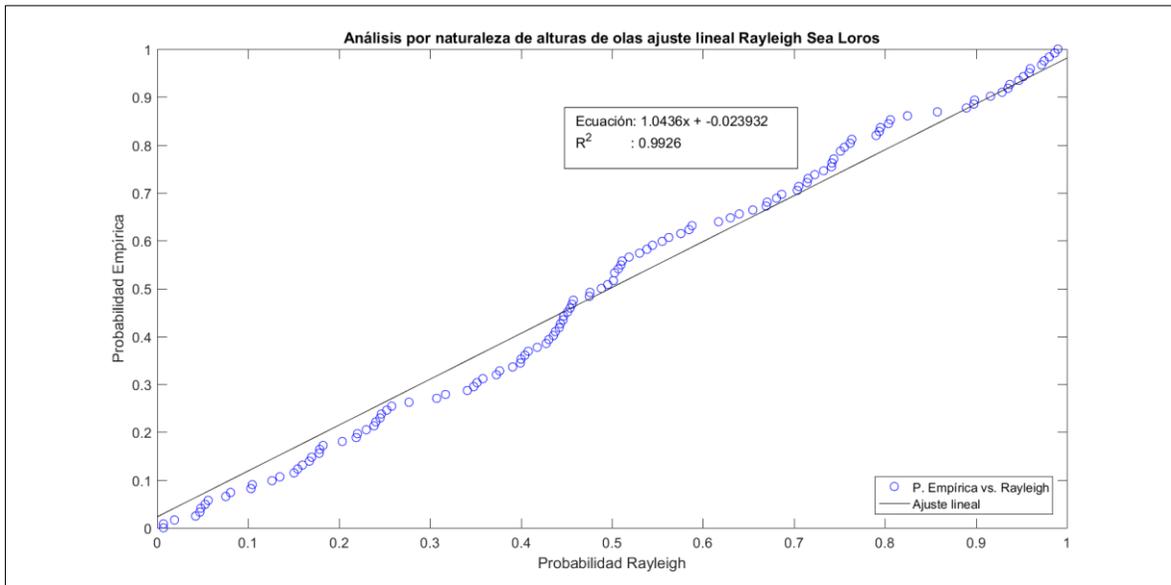


Figura 11-59: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

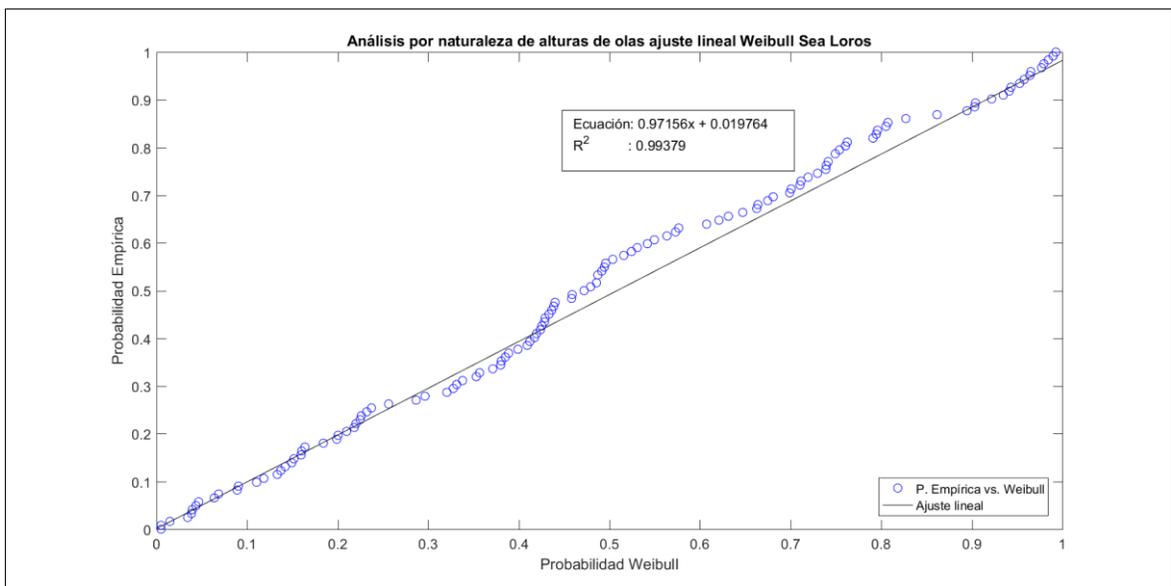


Figura 11-60: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

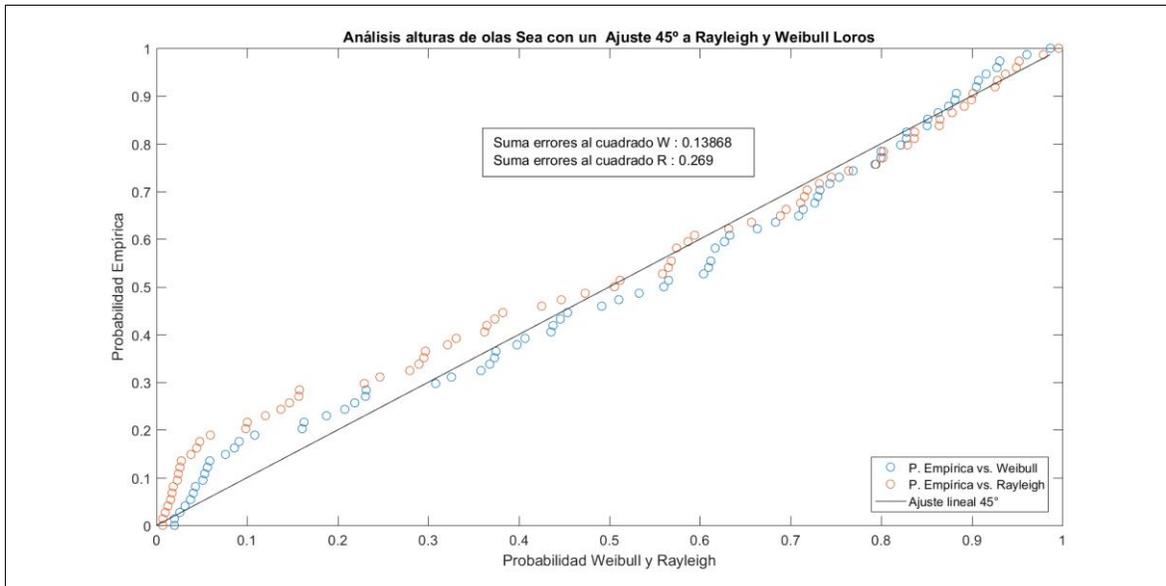


Figura 11-61: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

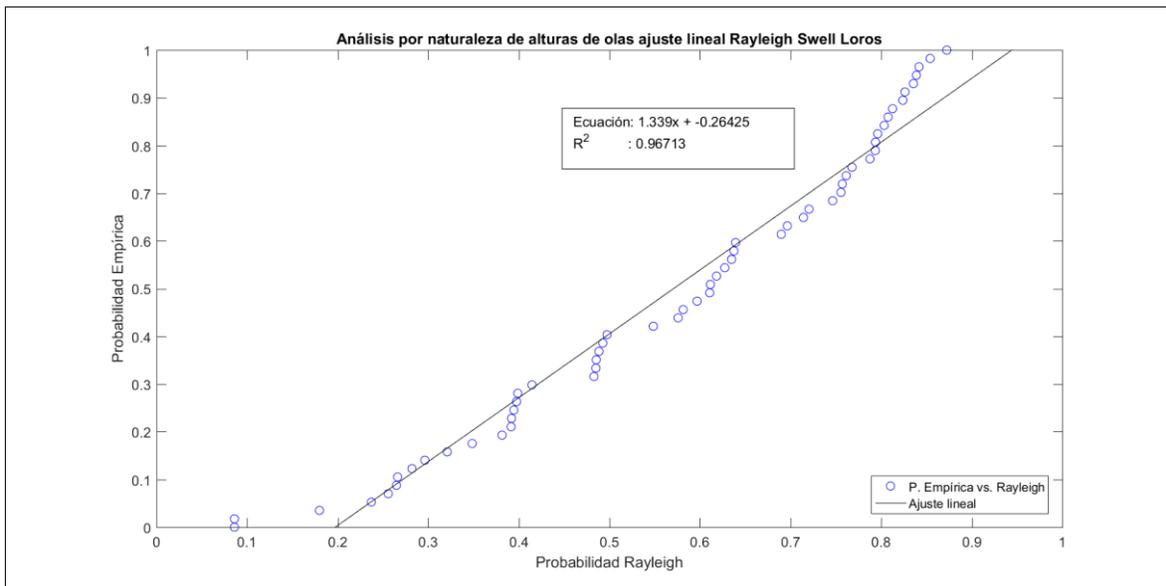


Figura 11-62: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

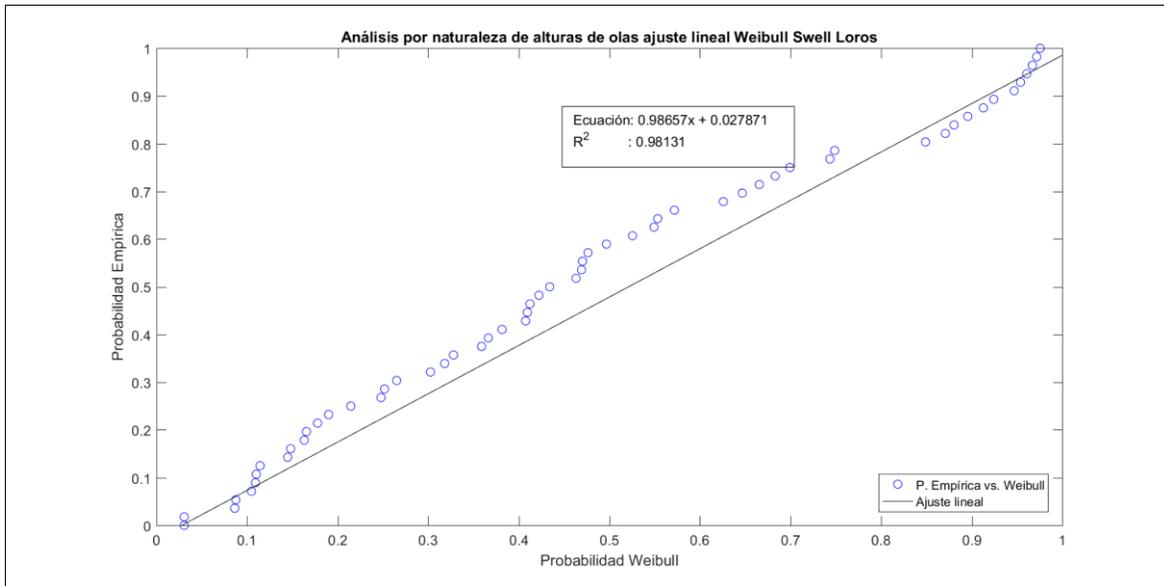


Figura 11-63: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

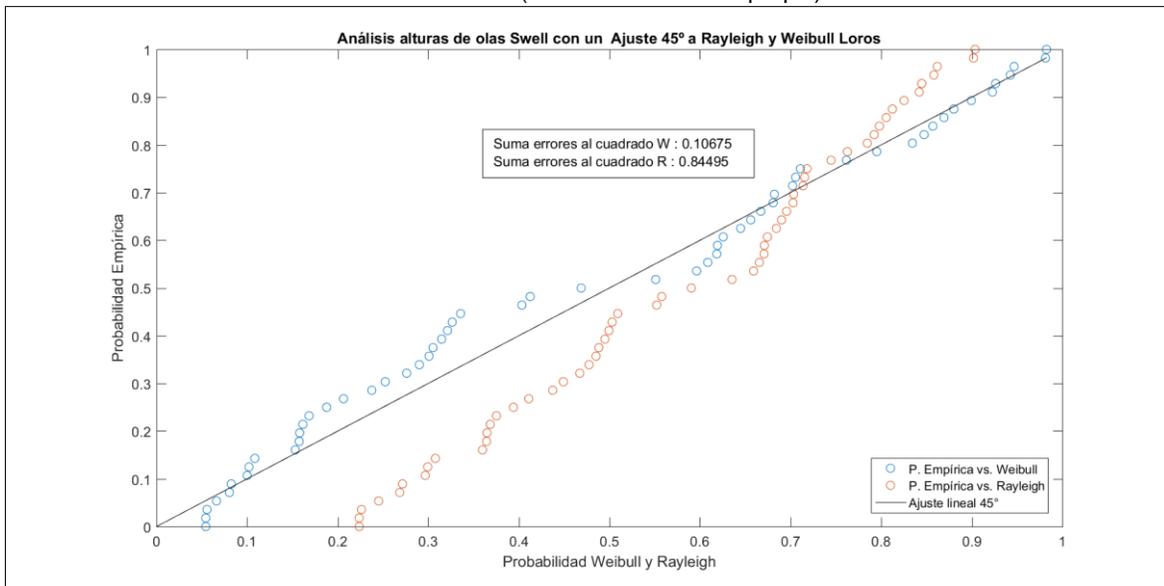


Figura 11-64: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

11.1.6 TOPOCALMA

Control de calidad

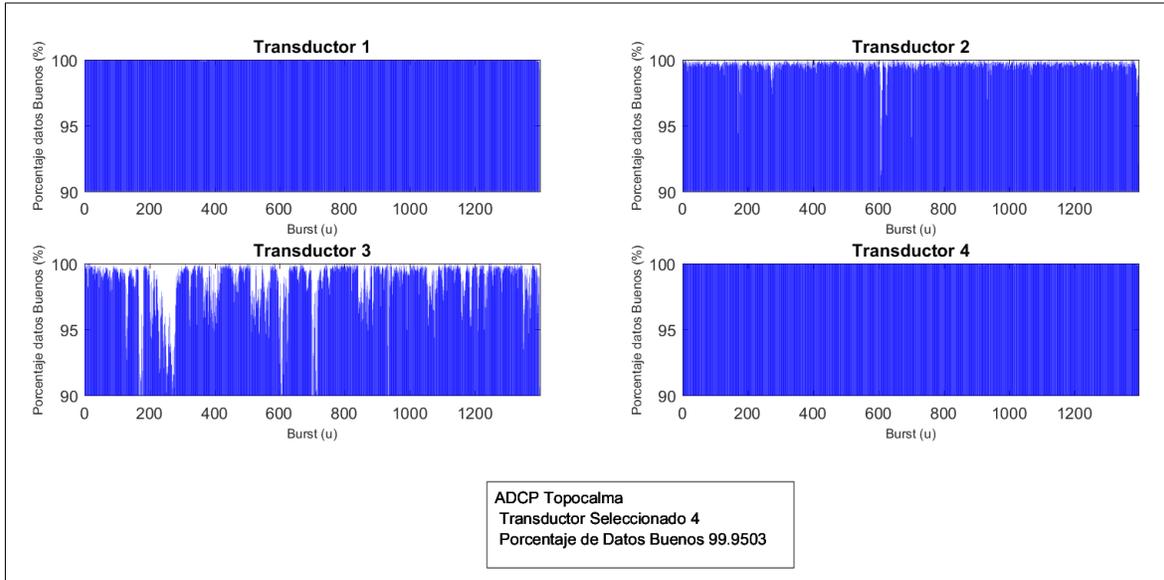


Figura 11-65: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

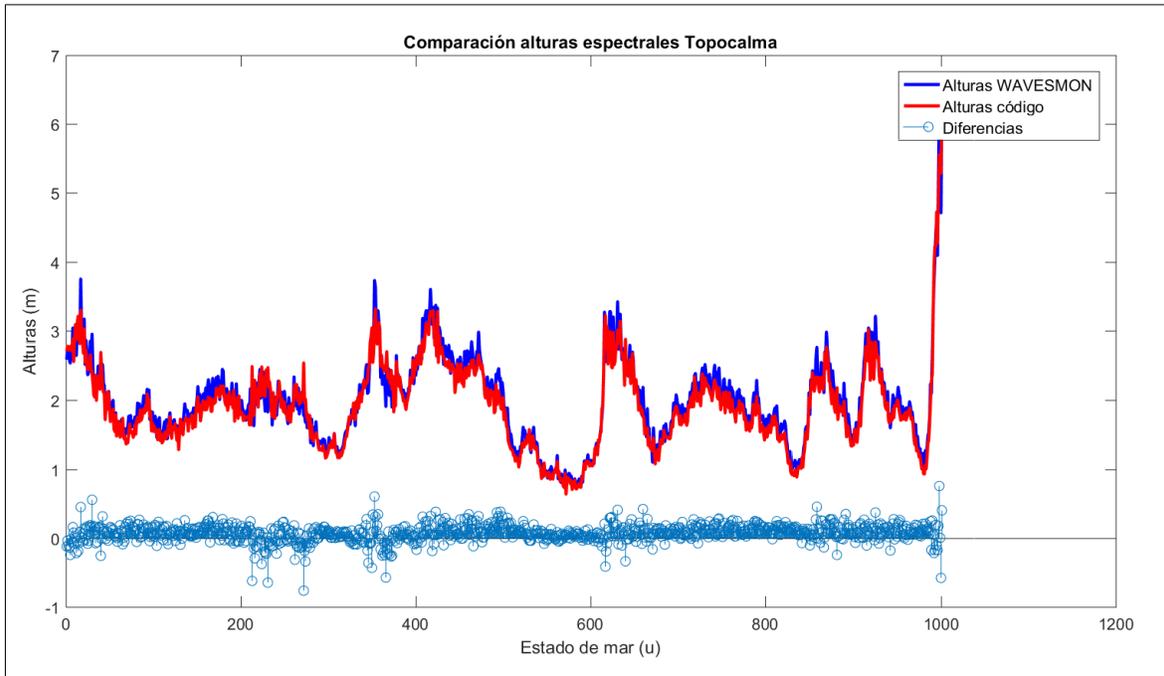


Figura 11-66: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

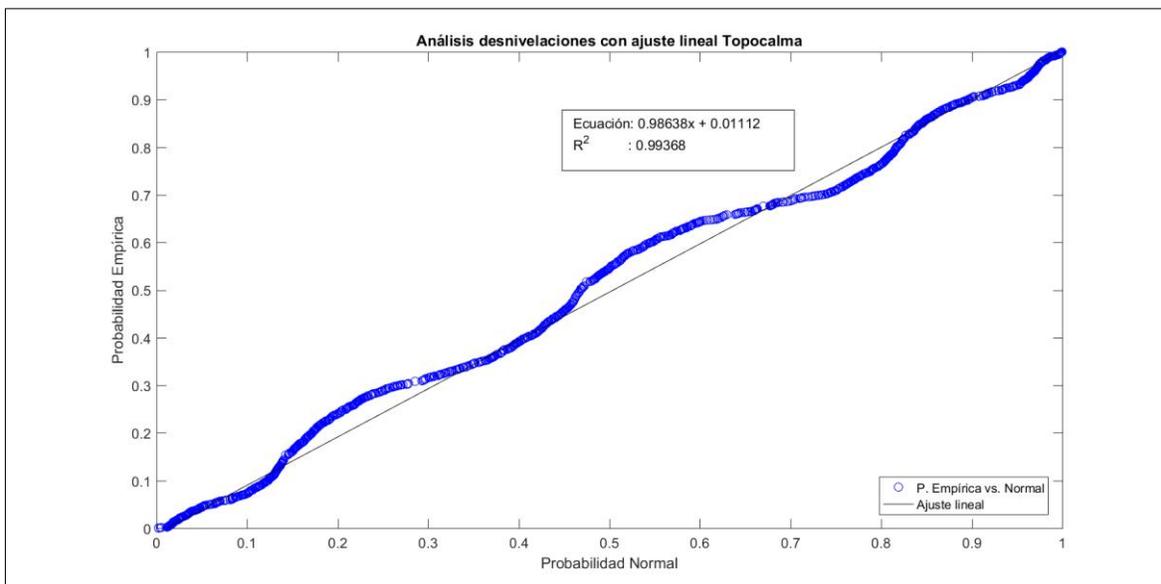


Figura 11-67: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

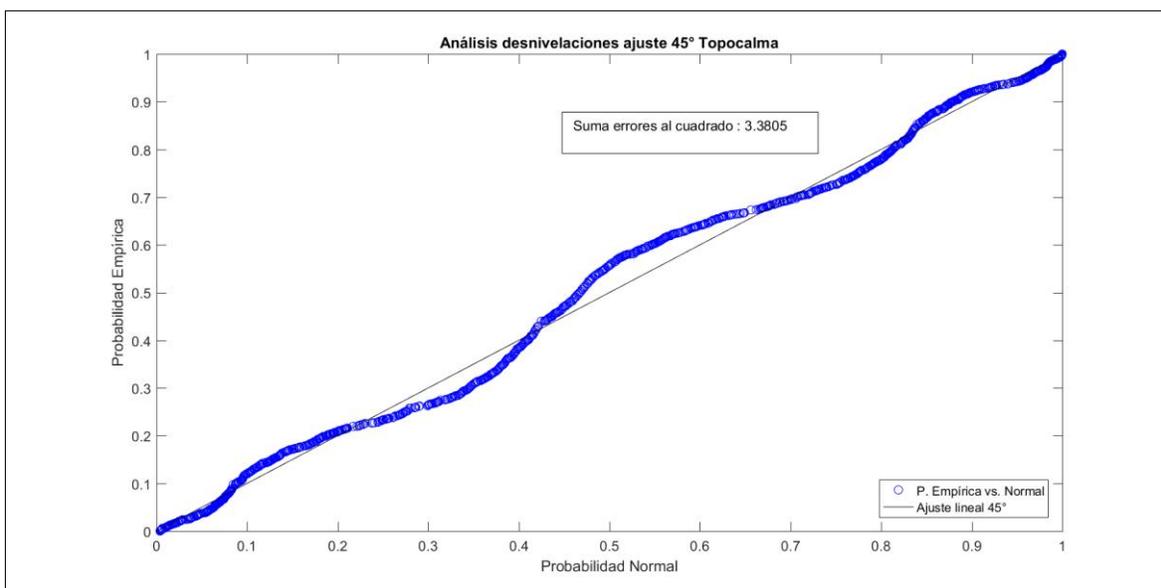


Figura 11-68: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

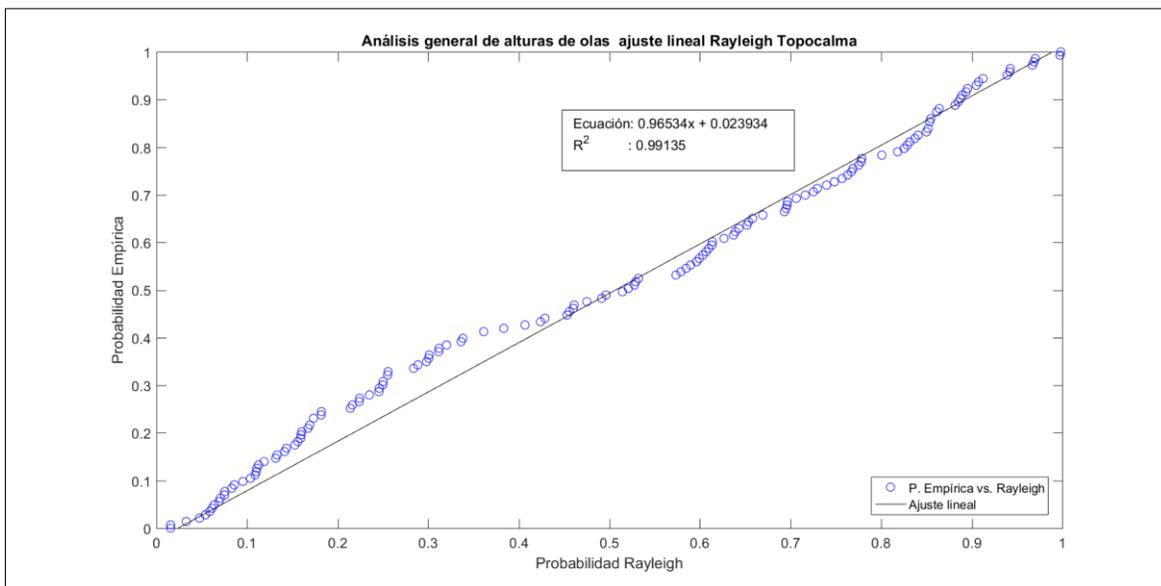


Figura 11-69: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

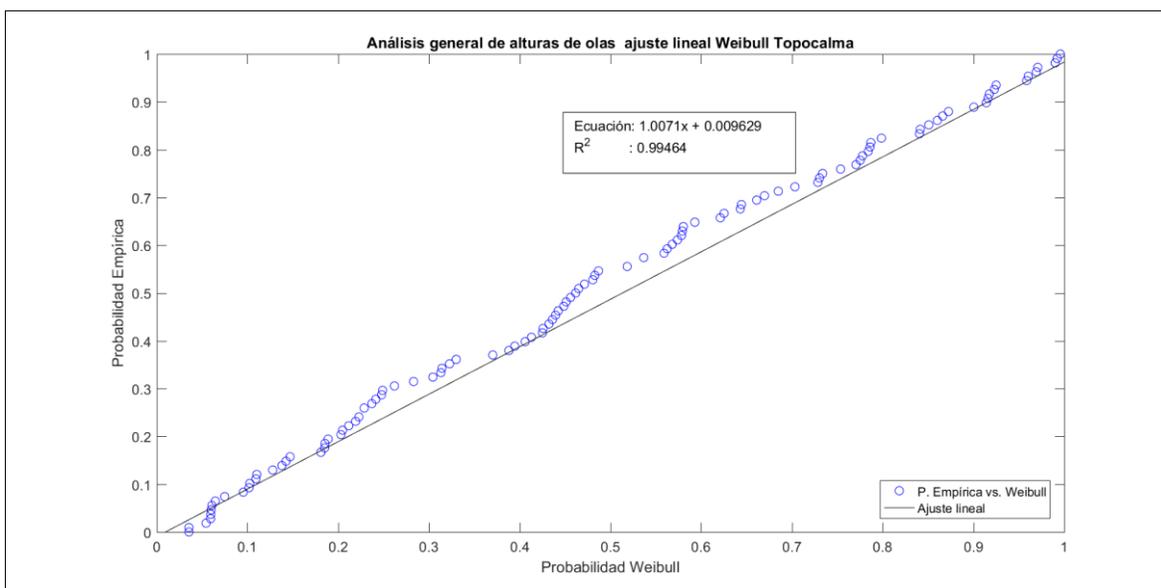


Figura 11-70: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

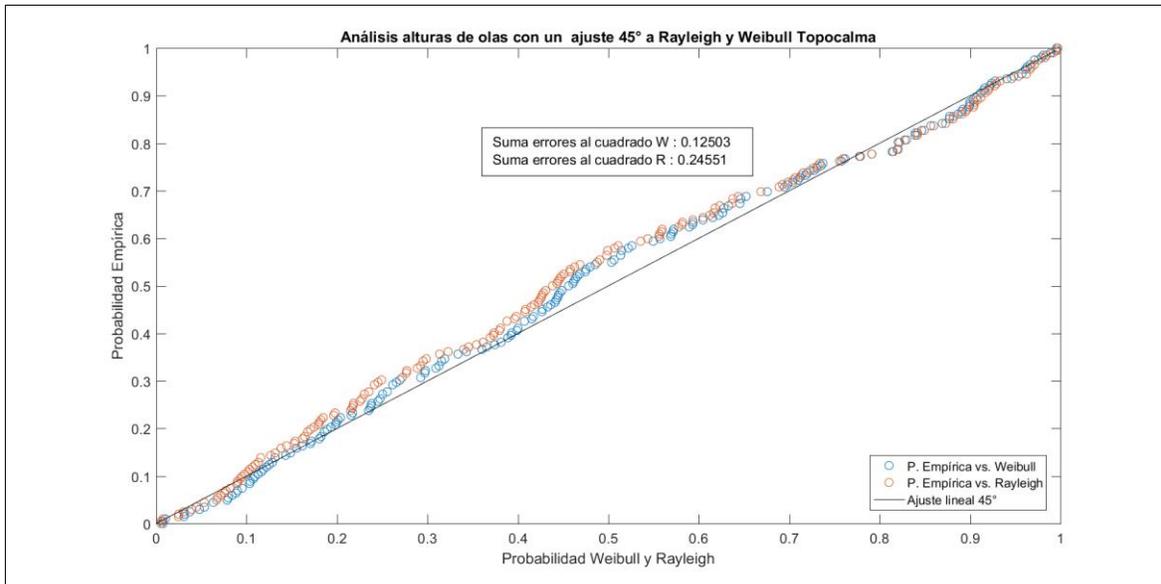


Figura 11-71: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

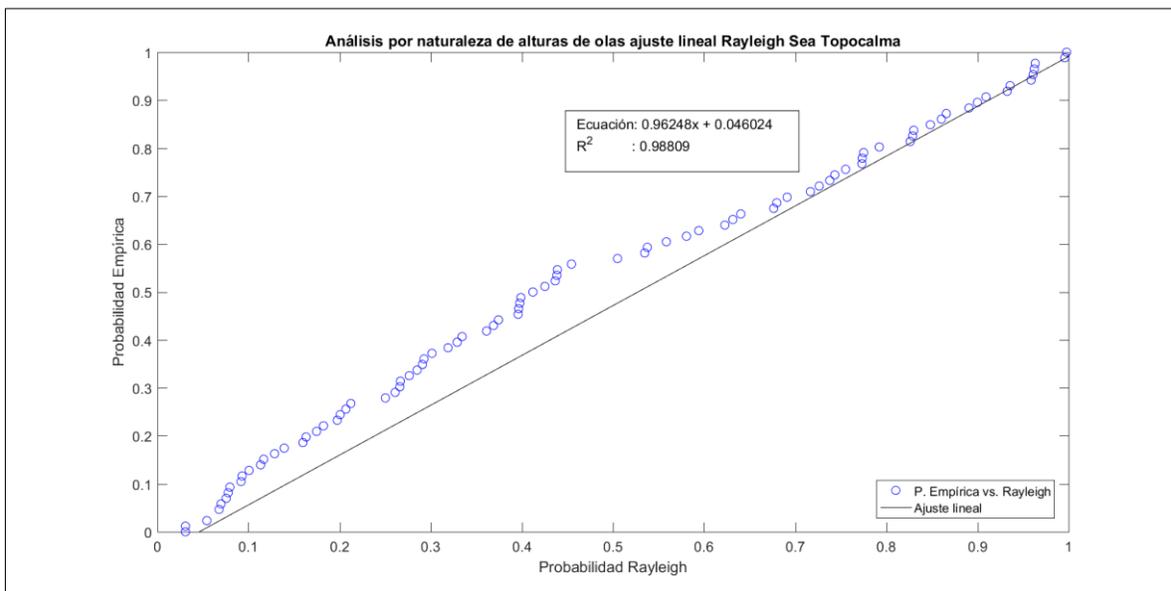


Figura 11-72: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

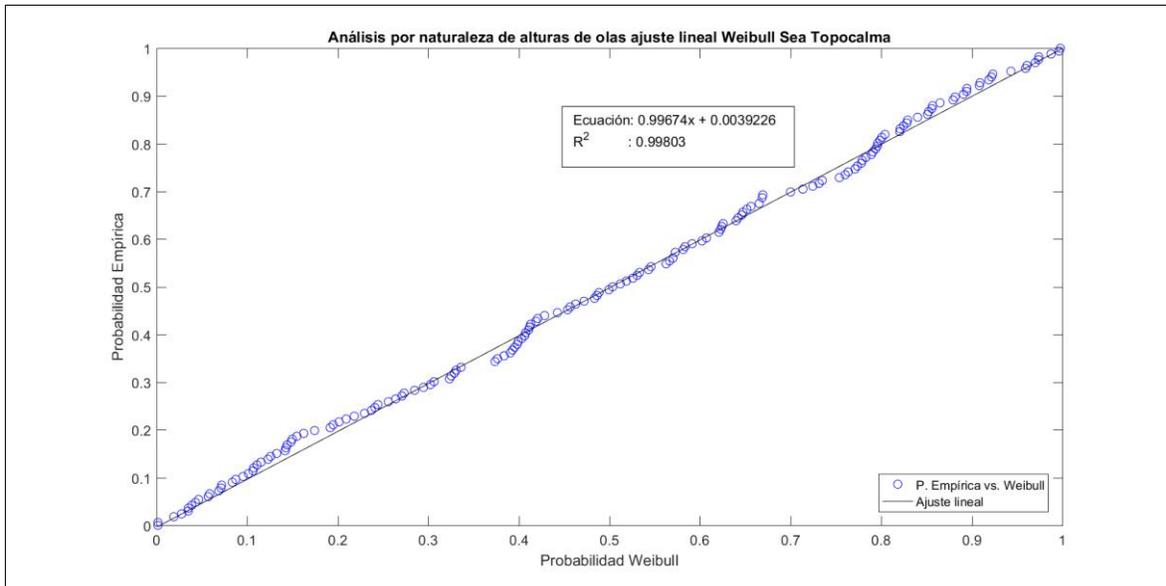


Figura 11-73: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

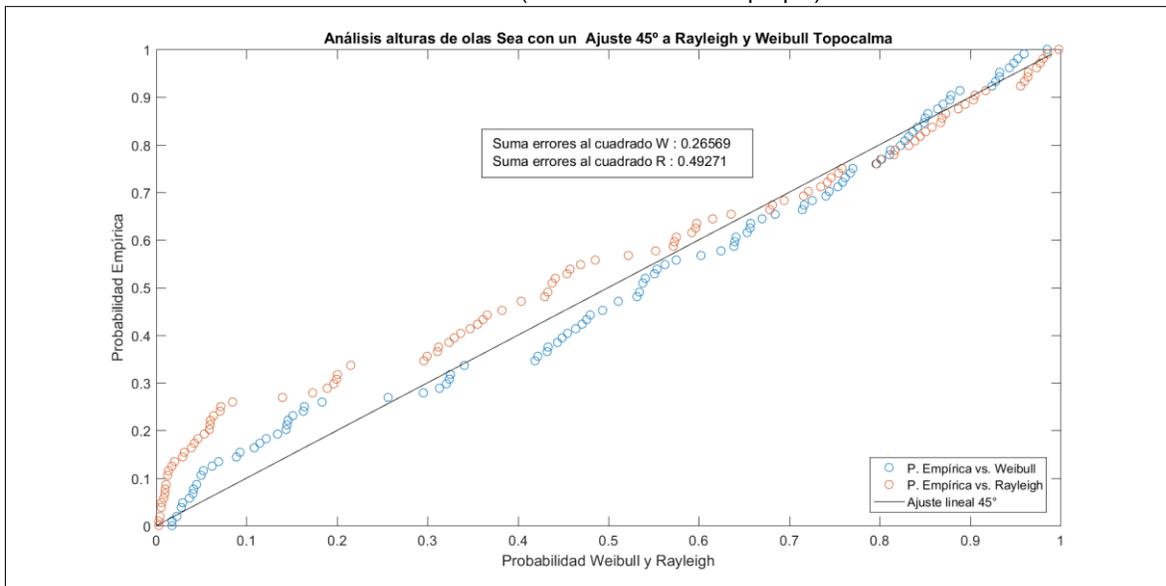


Figura 11-74: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

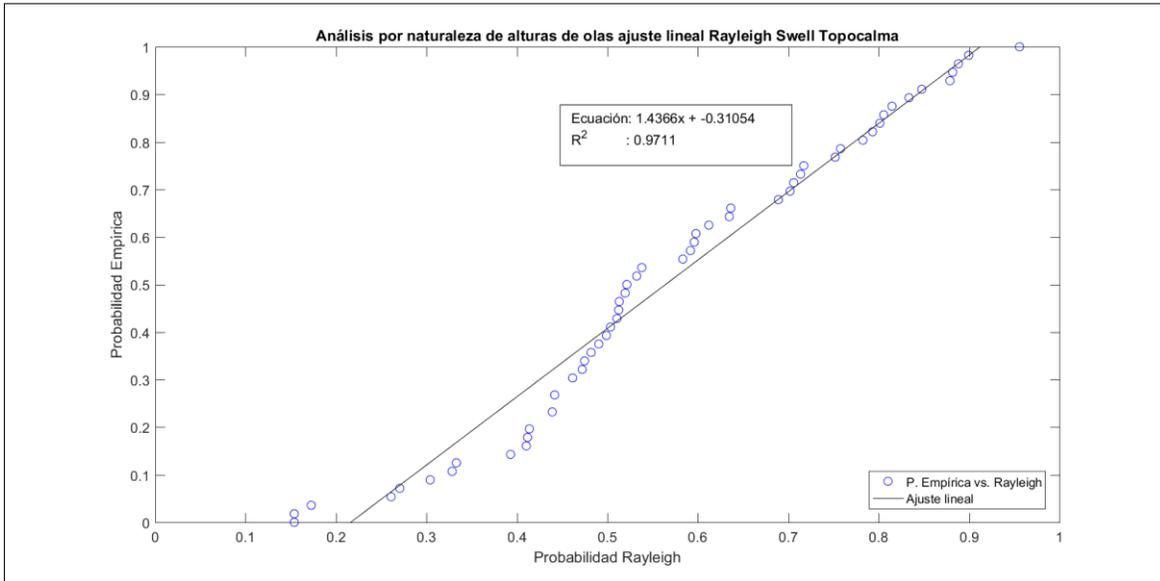


Figura 11-75: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

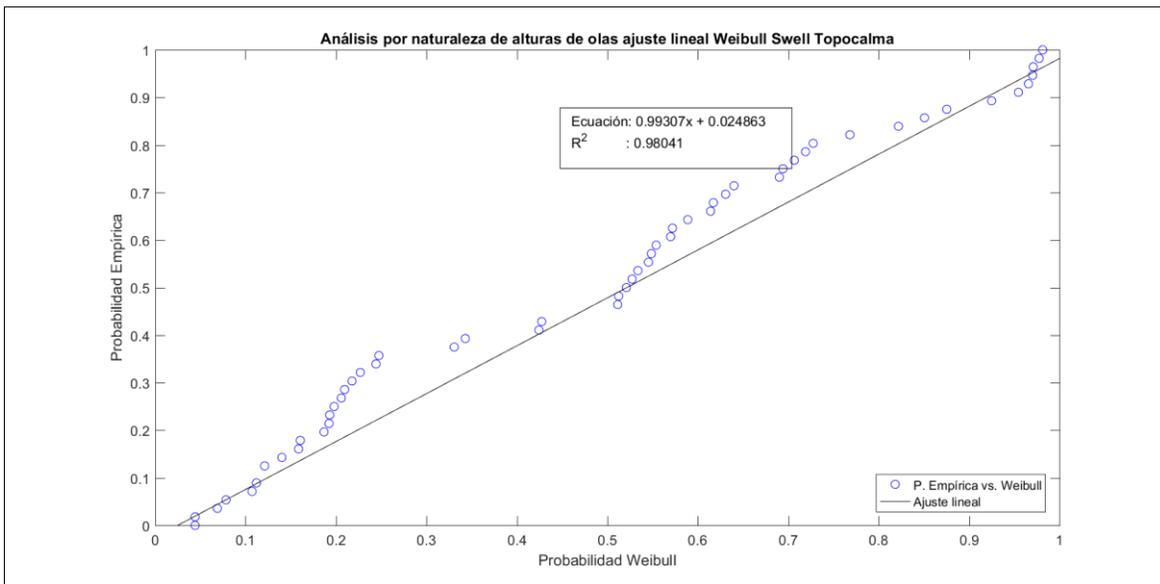


Figura 11-76: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

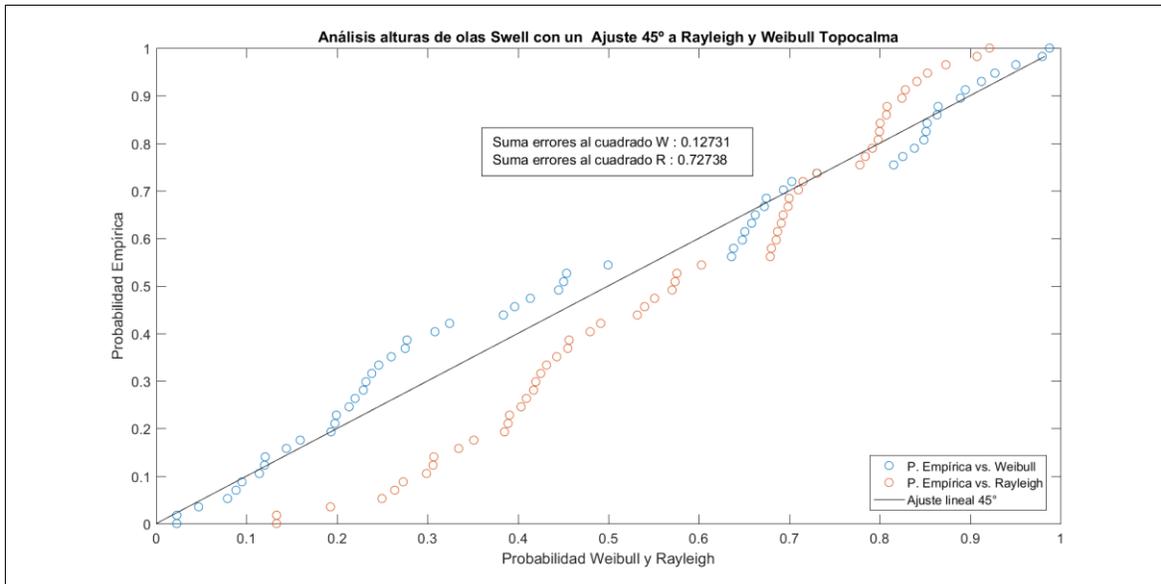


Figura 11-77: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.1.7 CONSTITUCIÓN

Control de calidad

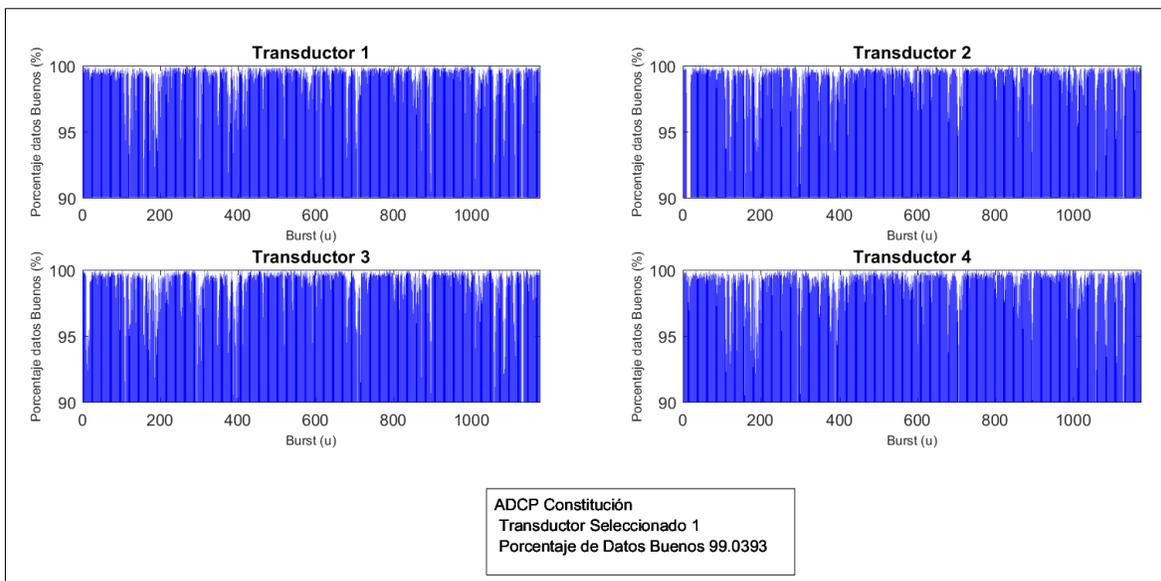


Figura 11-78: Selección de transductor
(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

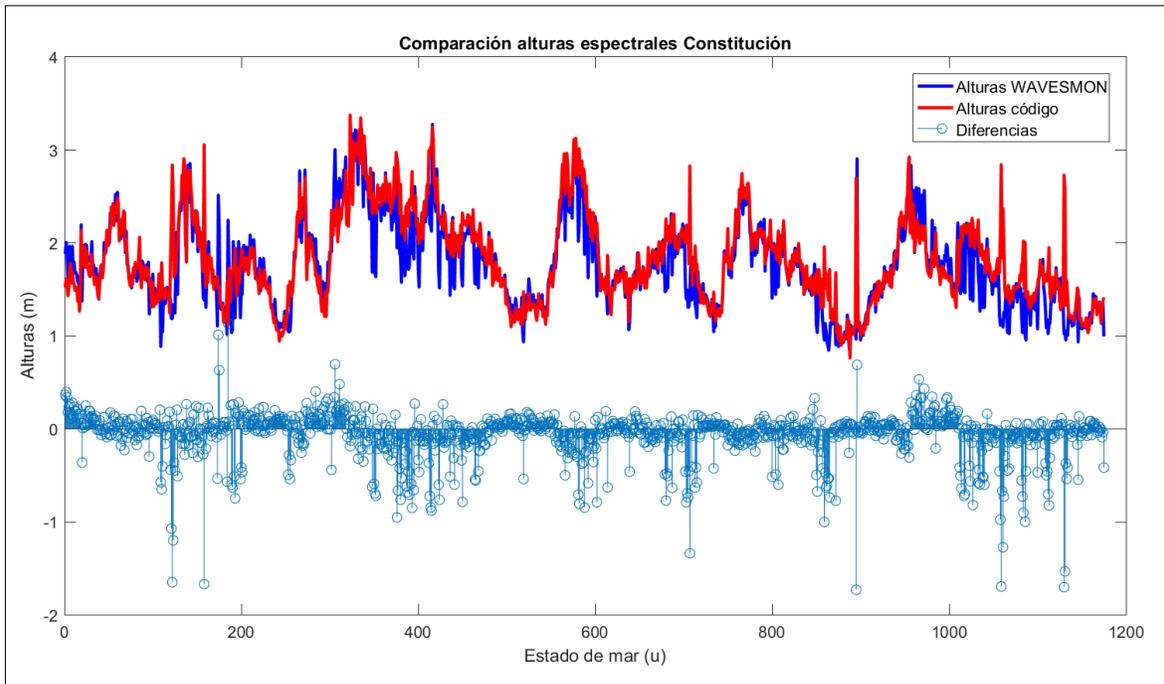


Figura 11-79: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

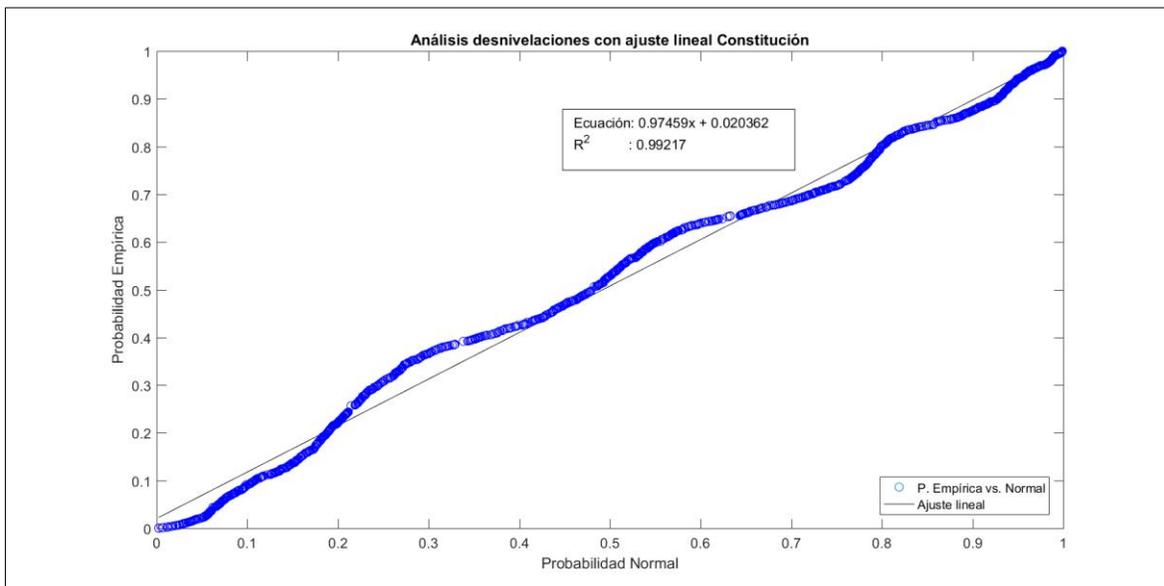


Figura 11-80: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

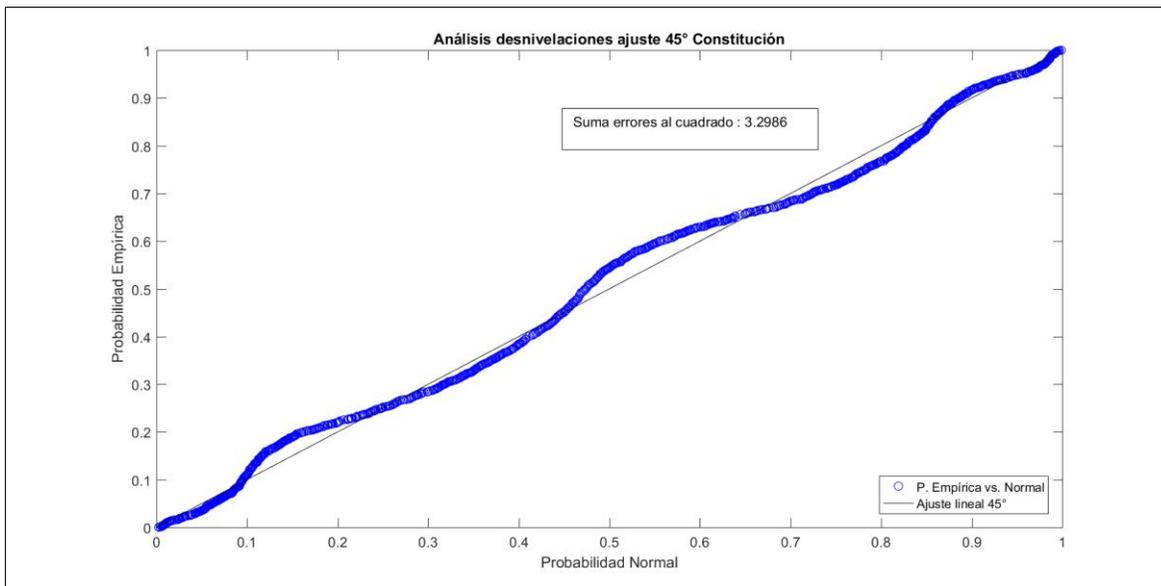


Figura 11-81: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

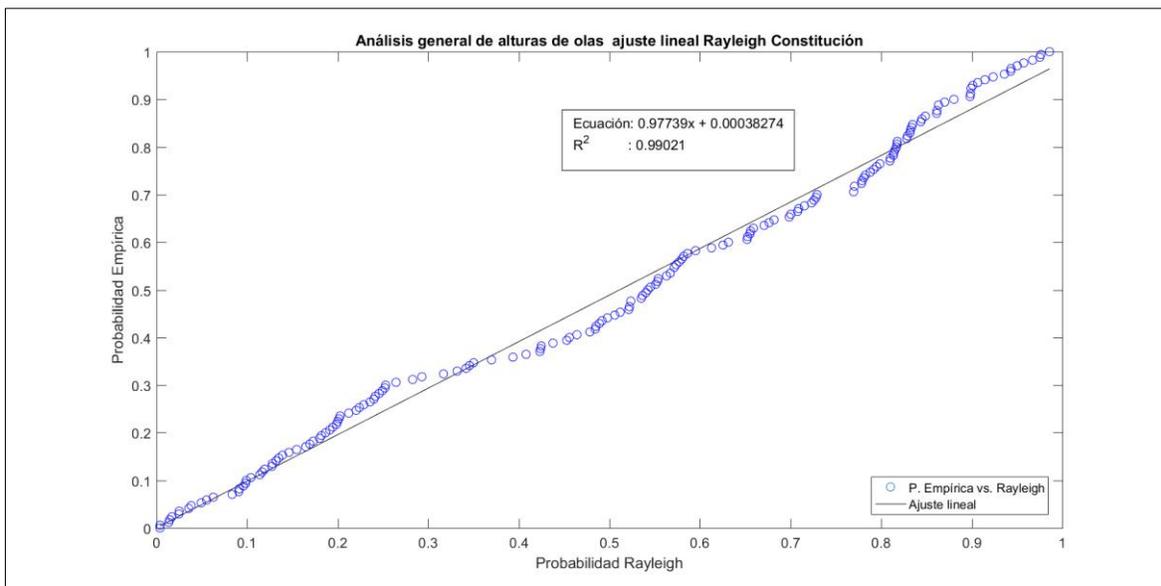


Figura 11-82: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

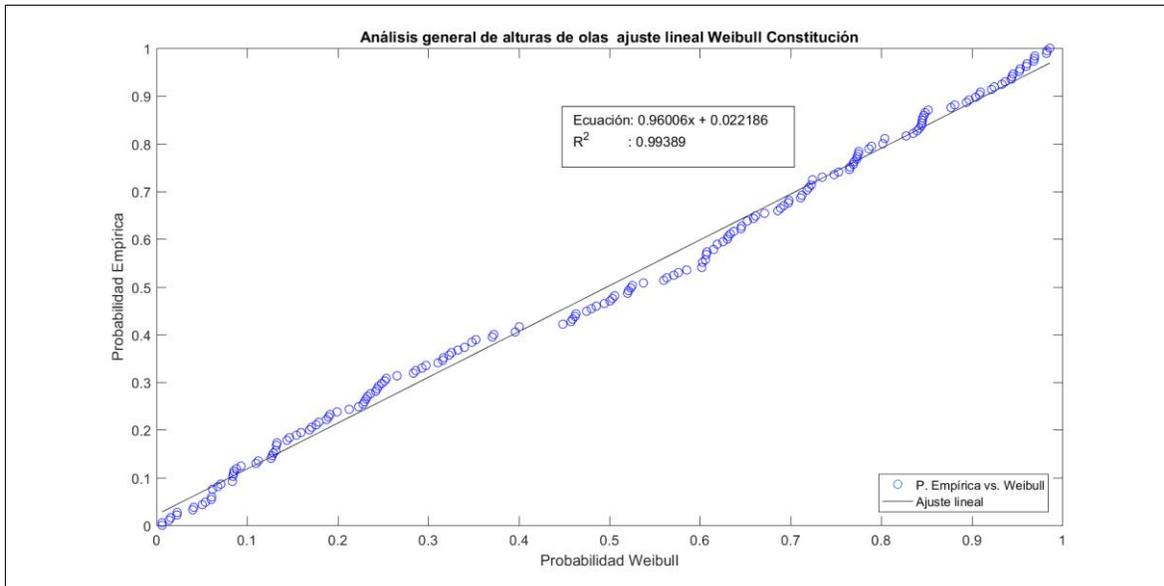


Figura 11-83: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

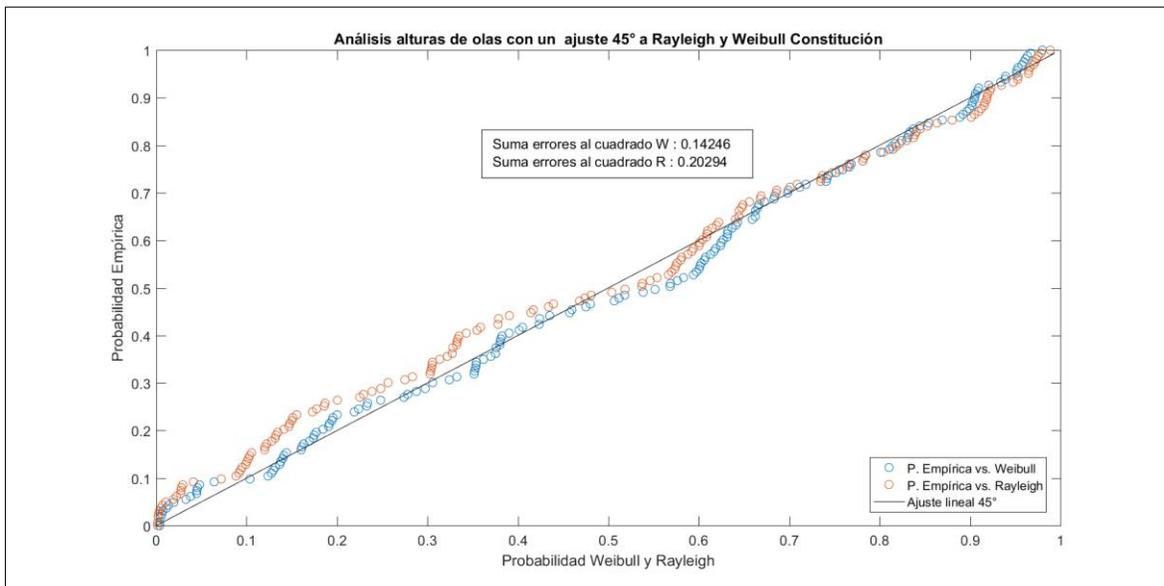


Figura 11-84: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

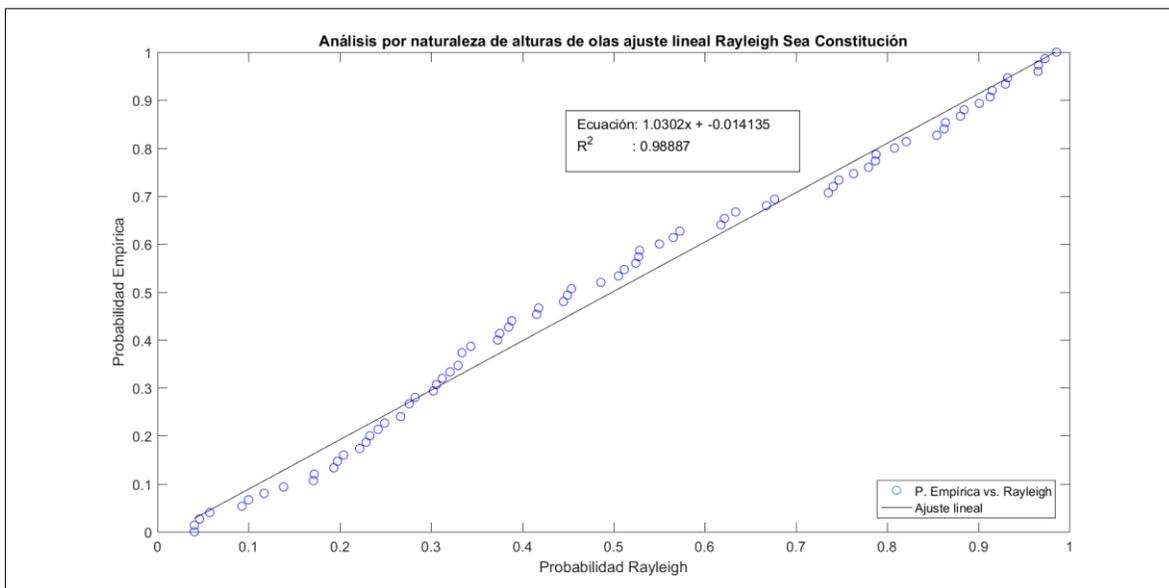


Figura 11-85: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

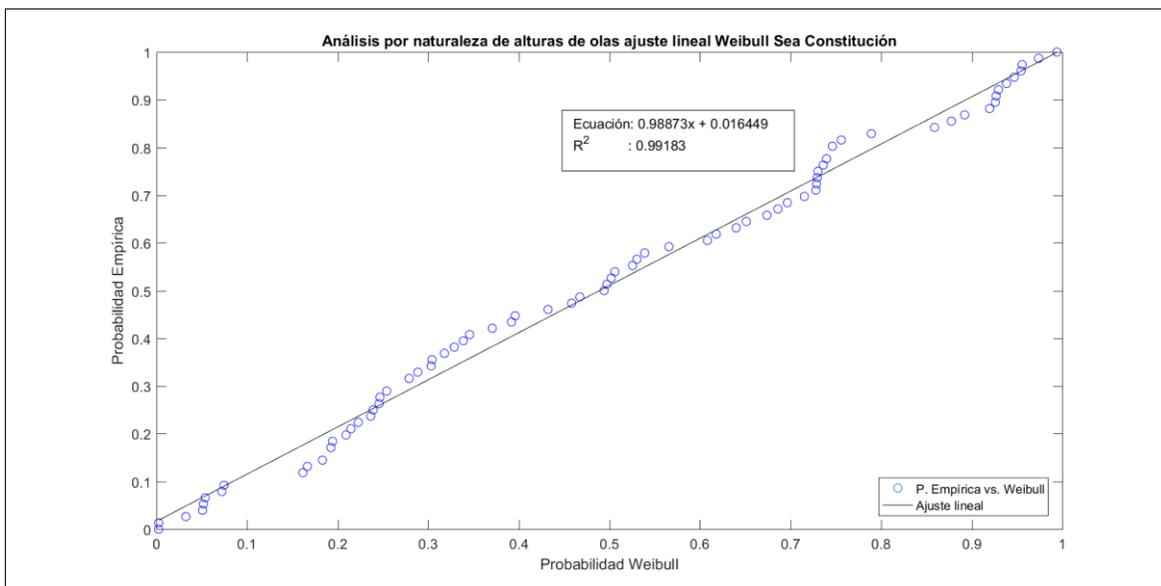


Figura 11-86: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

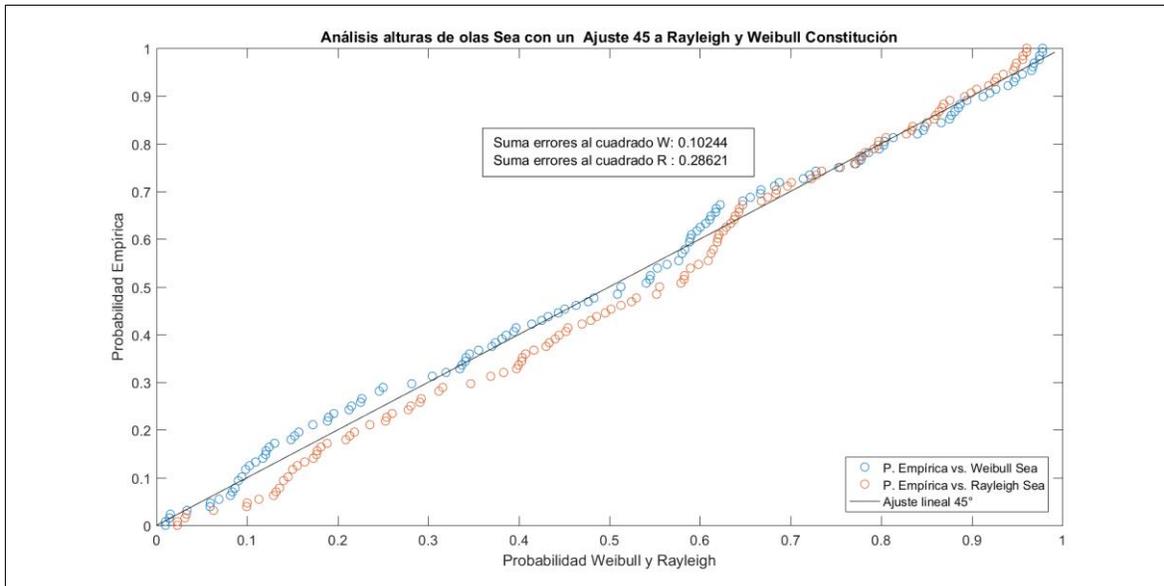


Figura 11-87: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

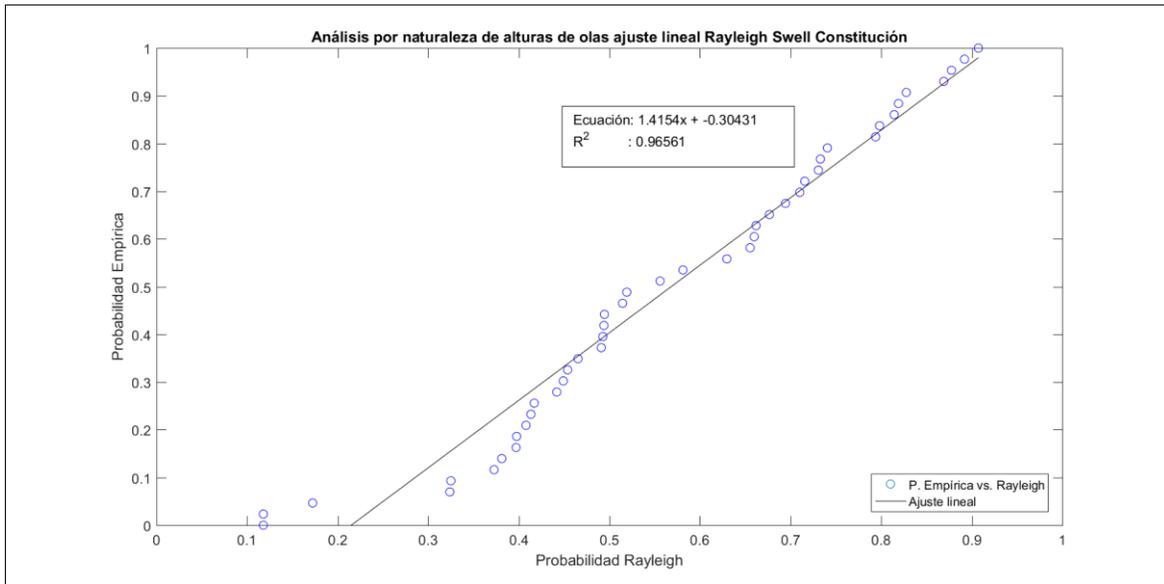


Figura 11-88: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

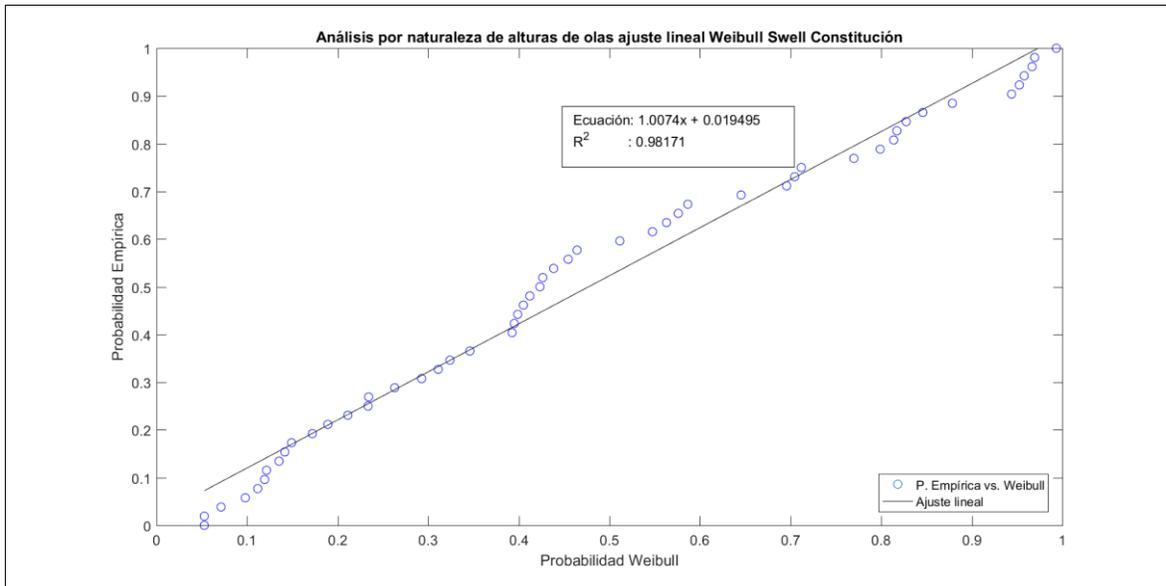


Figura 11-89: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

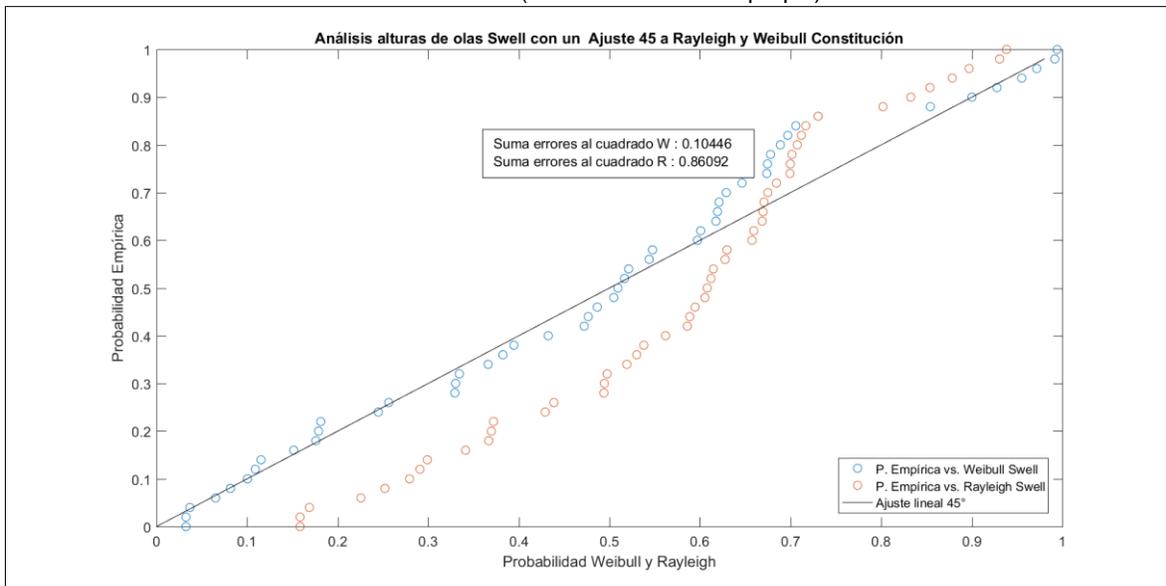


Figura 11-90: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

11.1.8 PUNTA LAVAPIÉ

Control de calidad

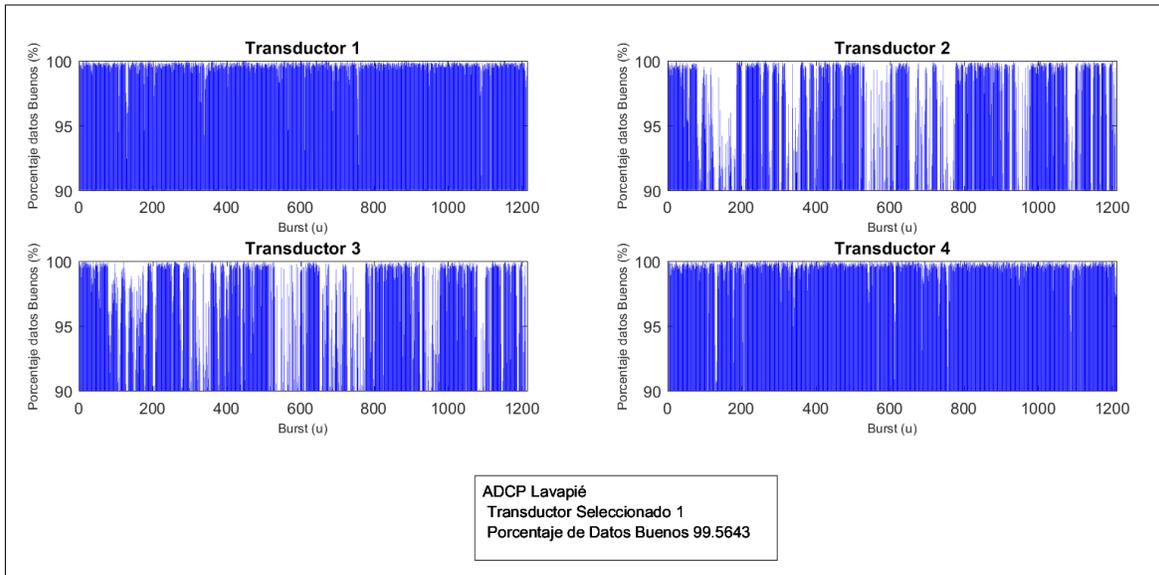


Figura 11-91: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

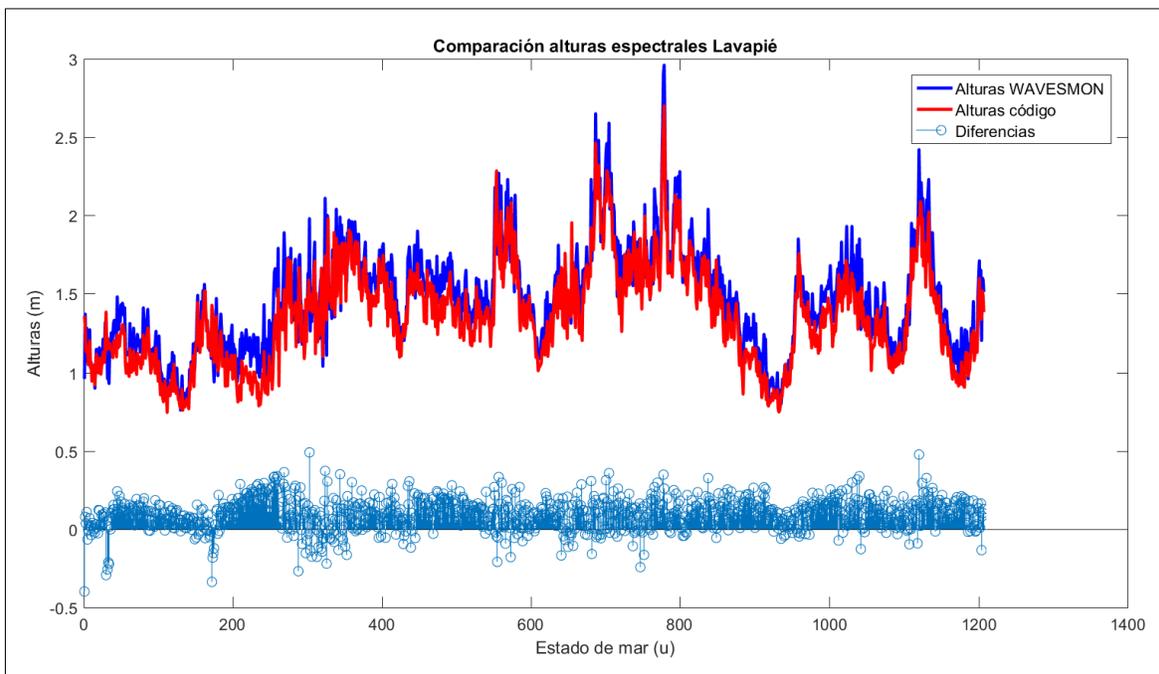


Figura 11-92: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

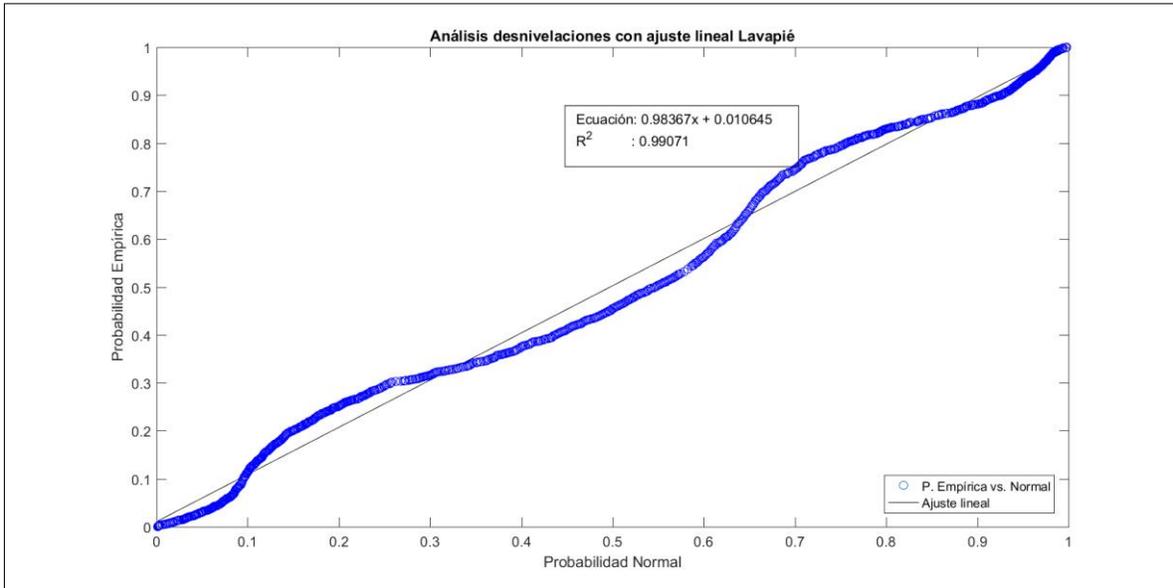


Figura 11-93: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

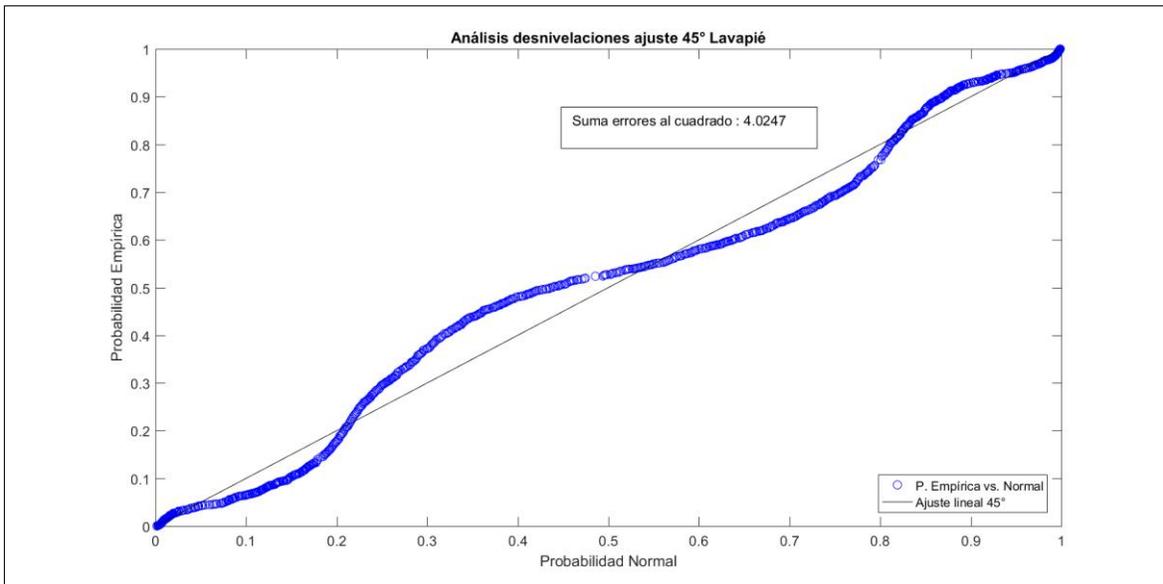


Figura 11-94: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

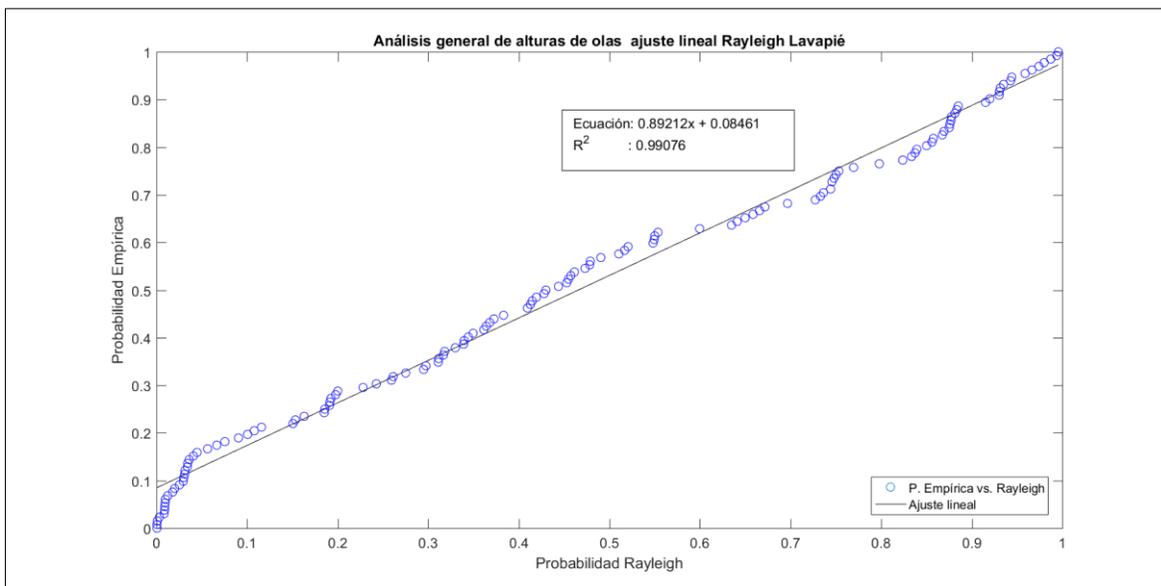


Figura 11-95: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

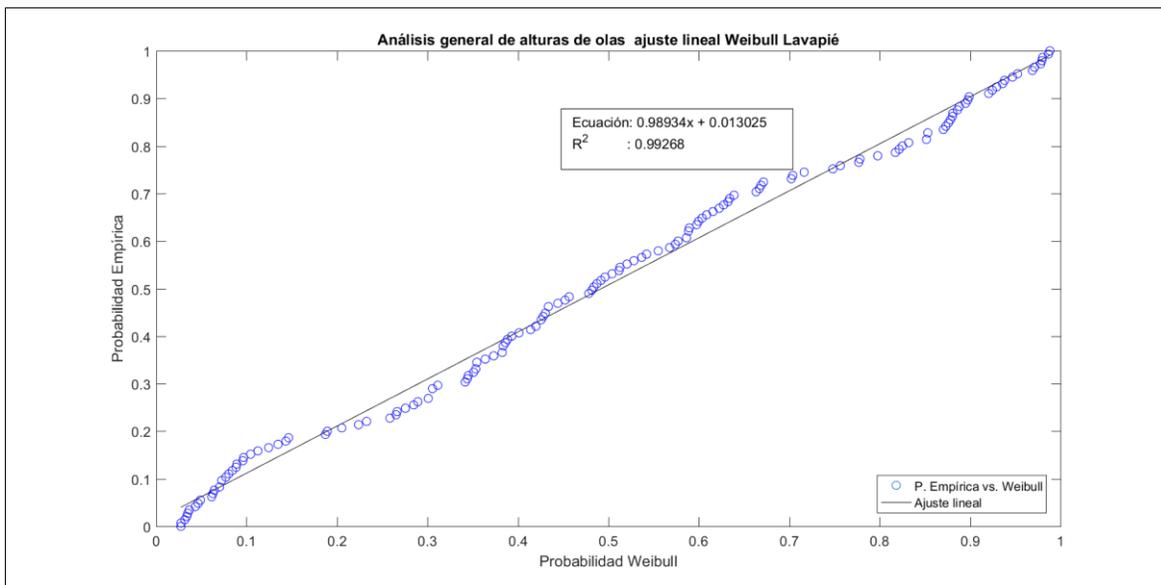


Figura 11-96: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

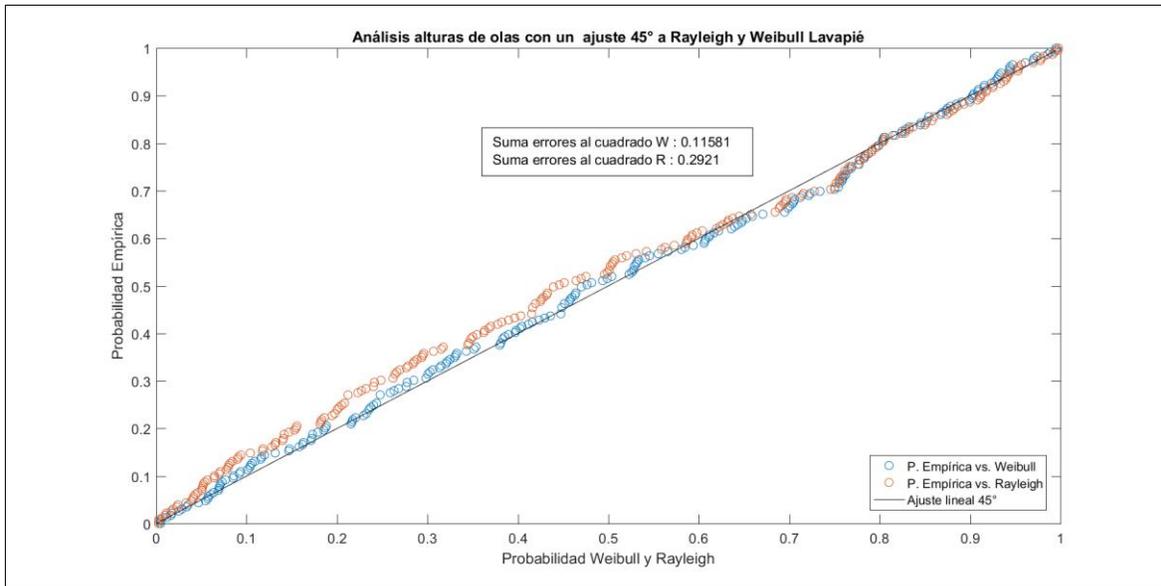


Figura 11-97: Análisis alturas de ola (ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado)
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

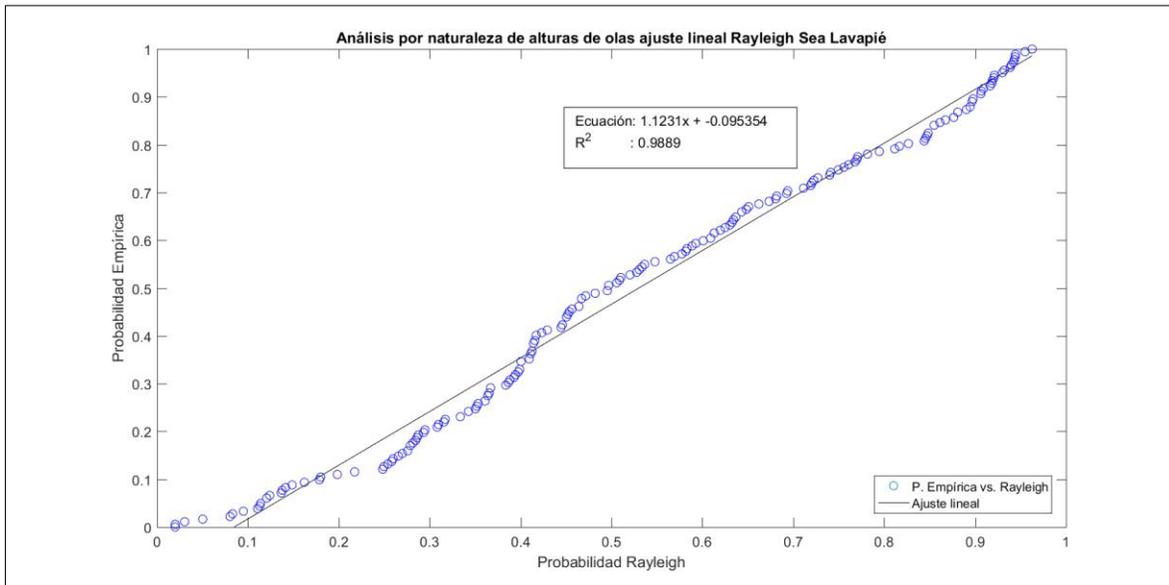


Figura 11-98: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

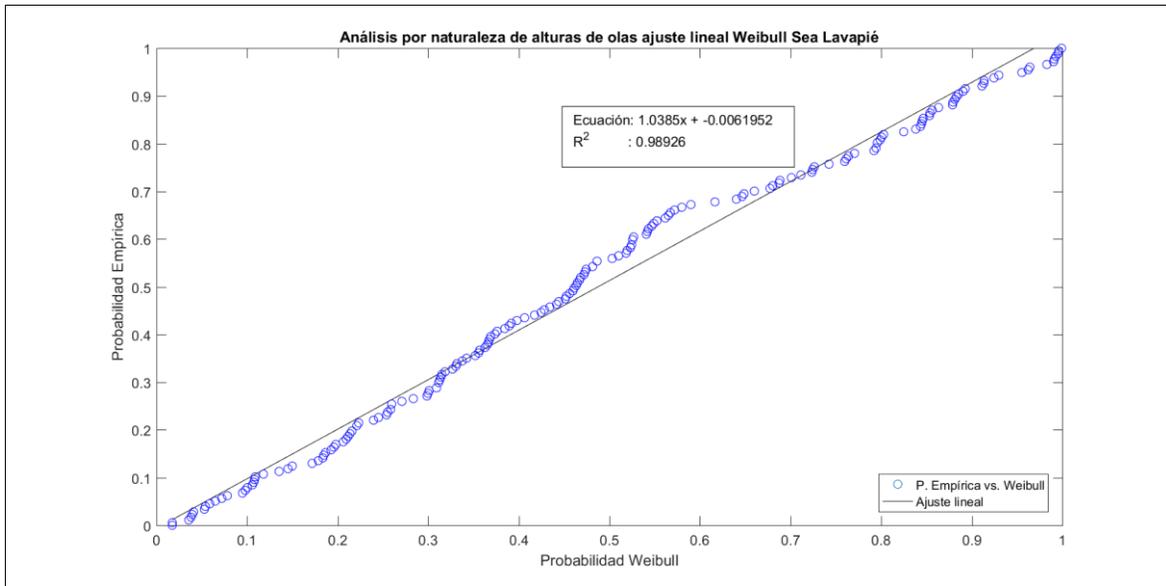


Figura 11-99: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

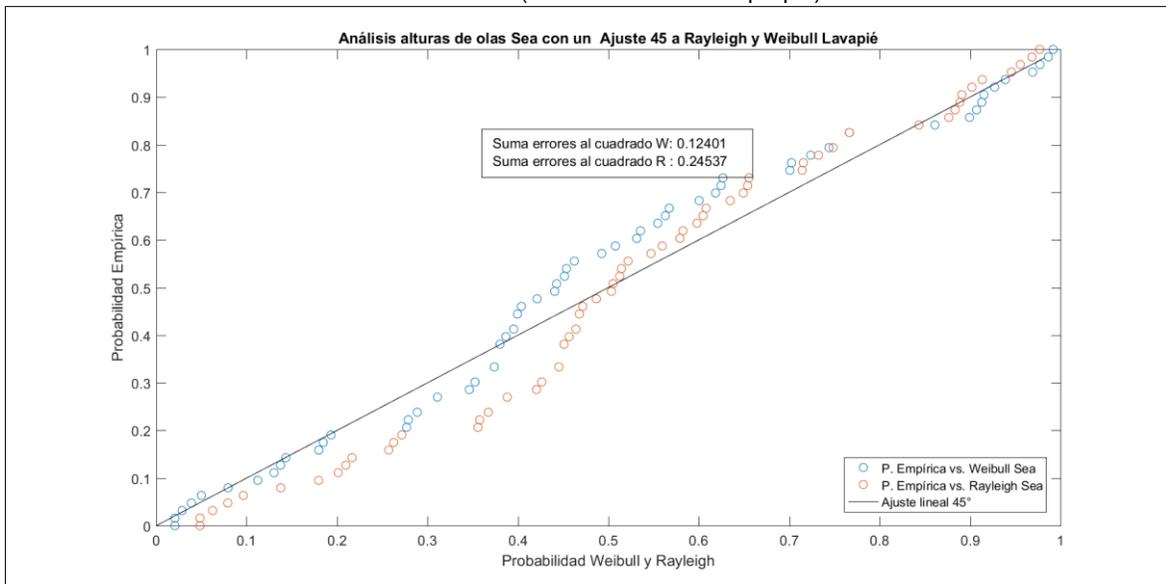


Figura 11-100: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

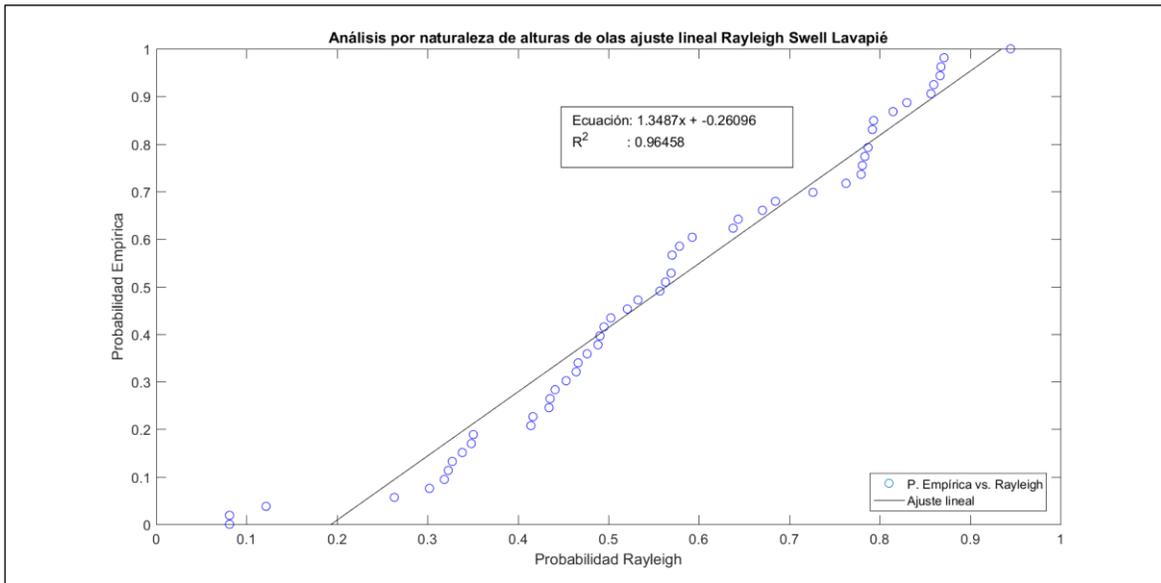


Figura 11-101: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

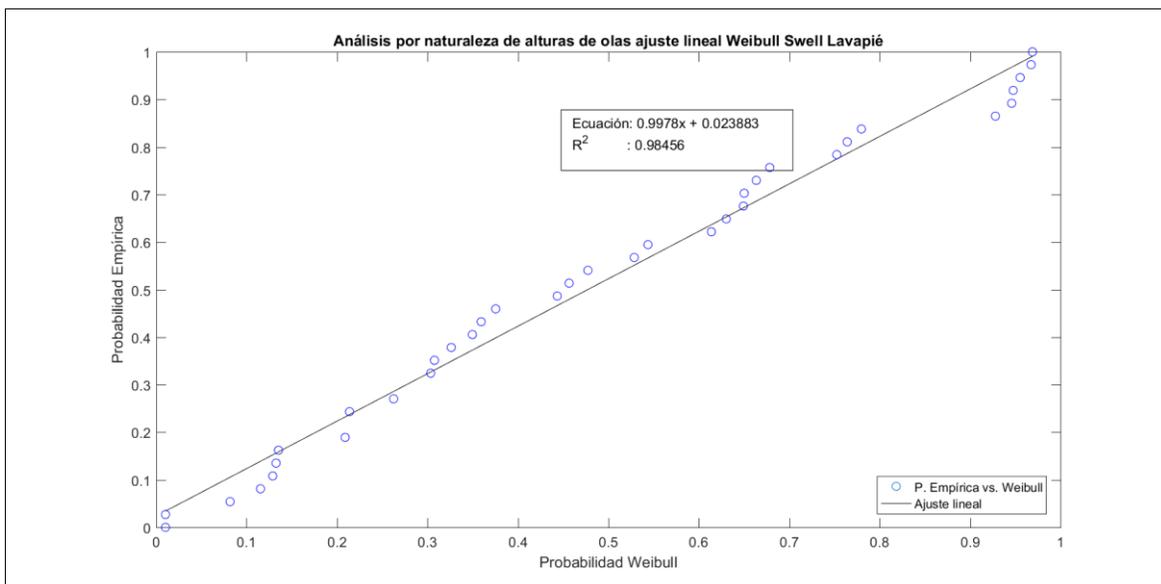


Figura 11-102: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

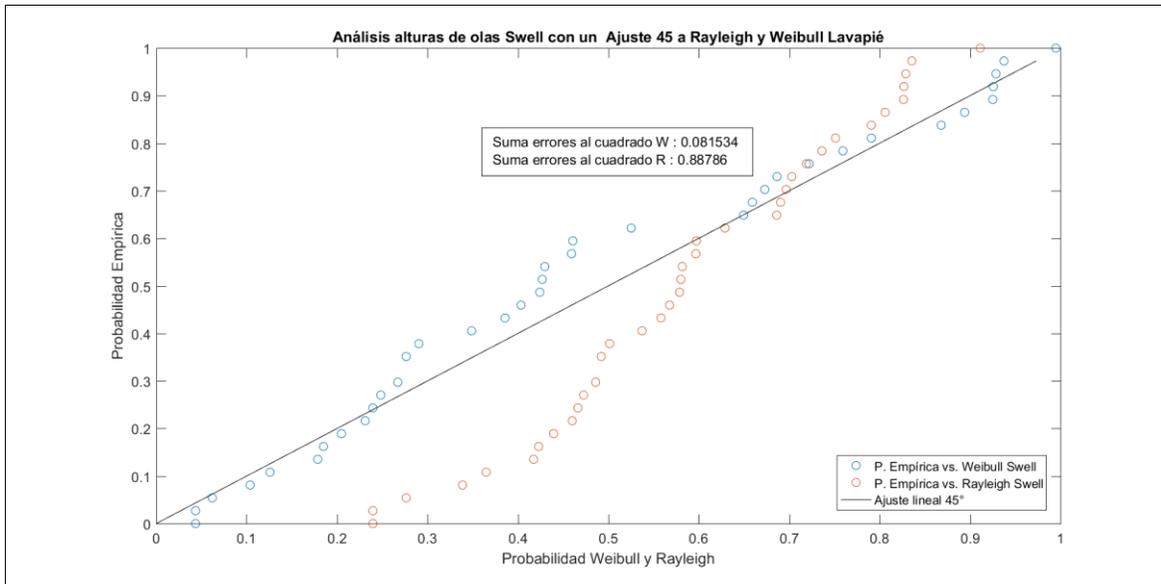


Figura 11-103: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.1.9 TUCAPEL

Control de calidad

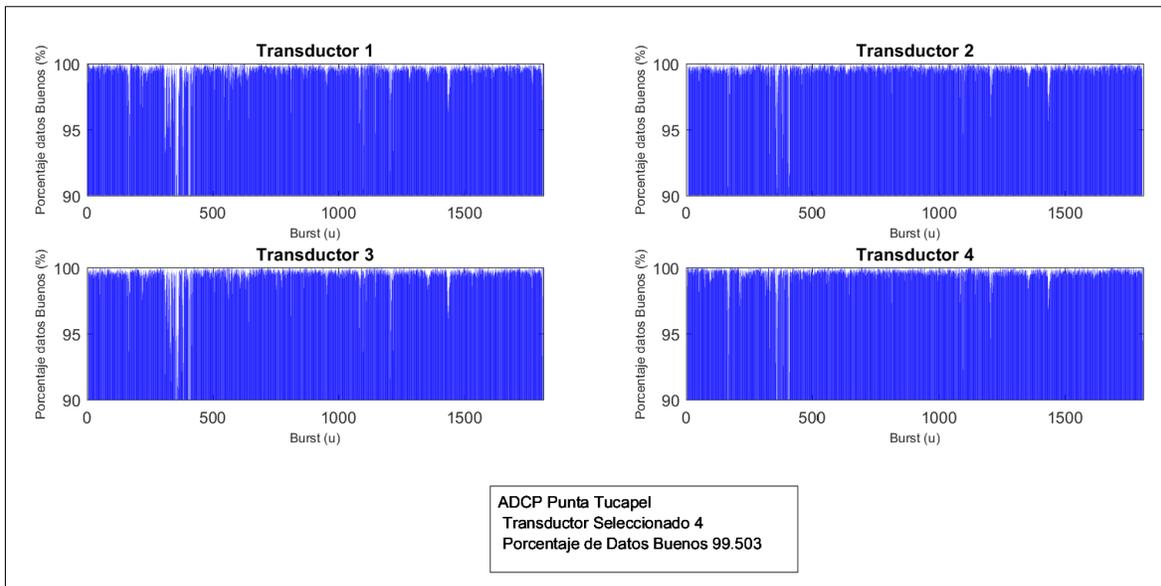


Figura 11-104: Selección de transductor
(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

Presentado en los resultados en la comparación de alturas de ola.

Análisis desnivelaciones instantáneas

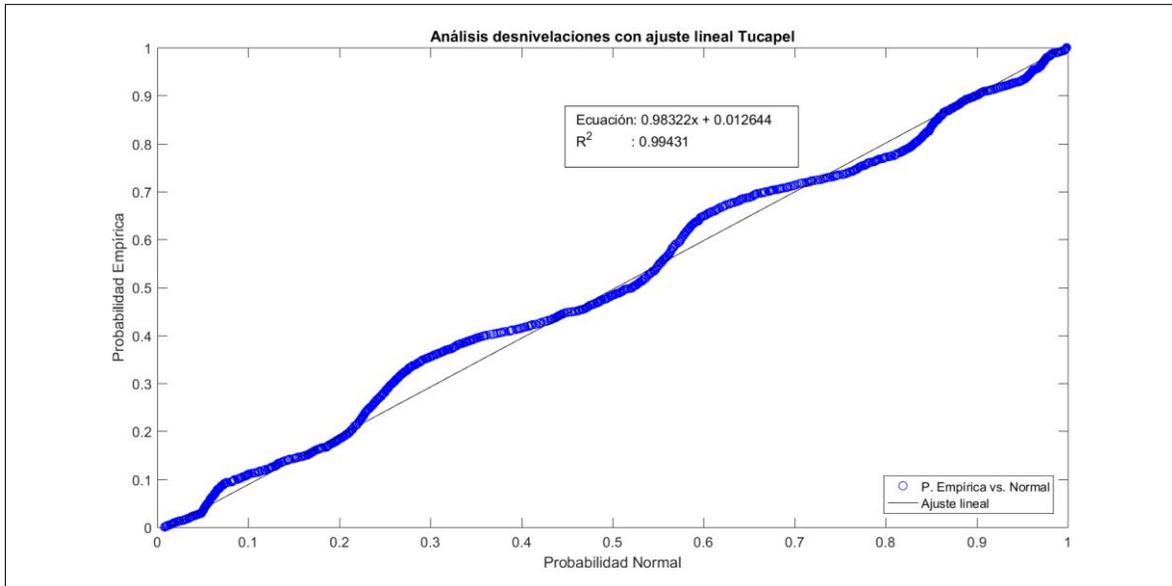


Figura 11-105: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

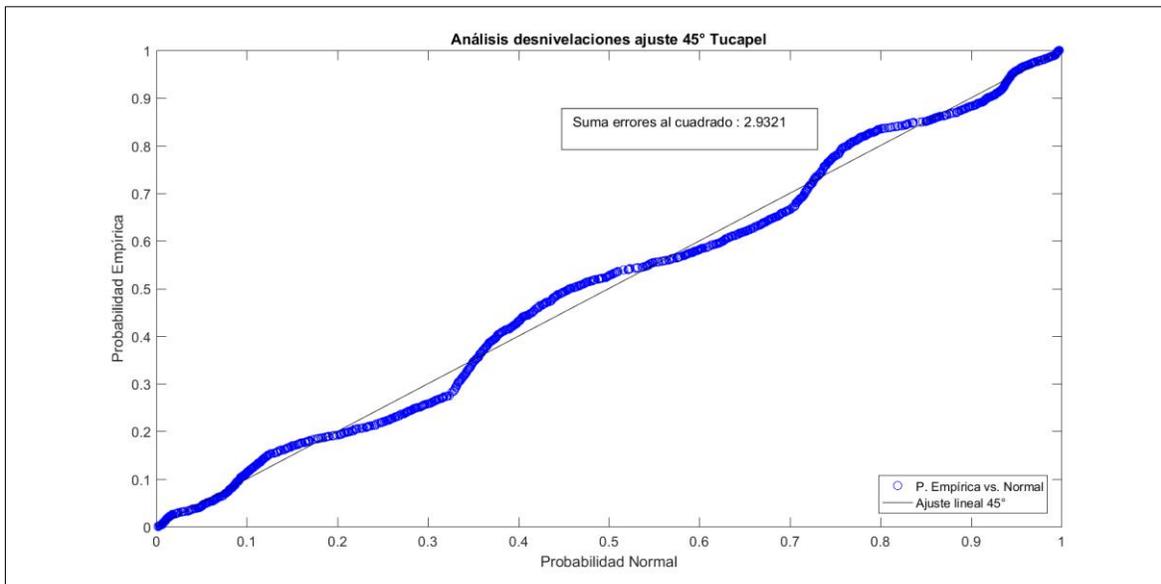


Figura 11-106: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

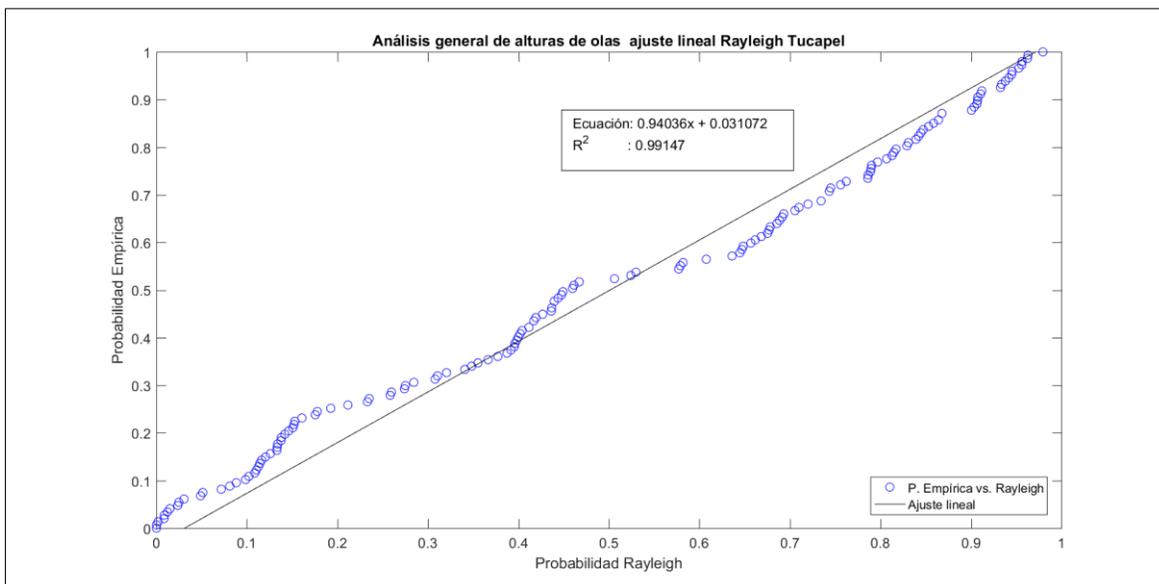


Figura 11-107: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

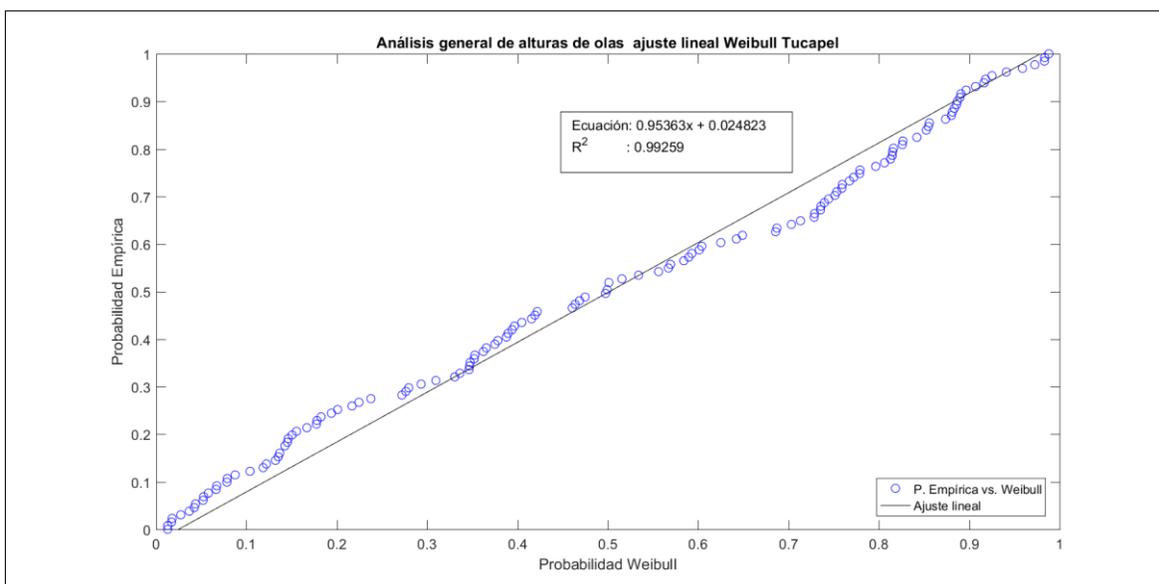


Figura 11-108: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

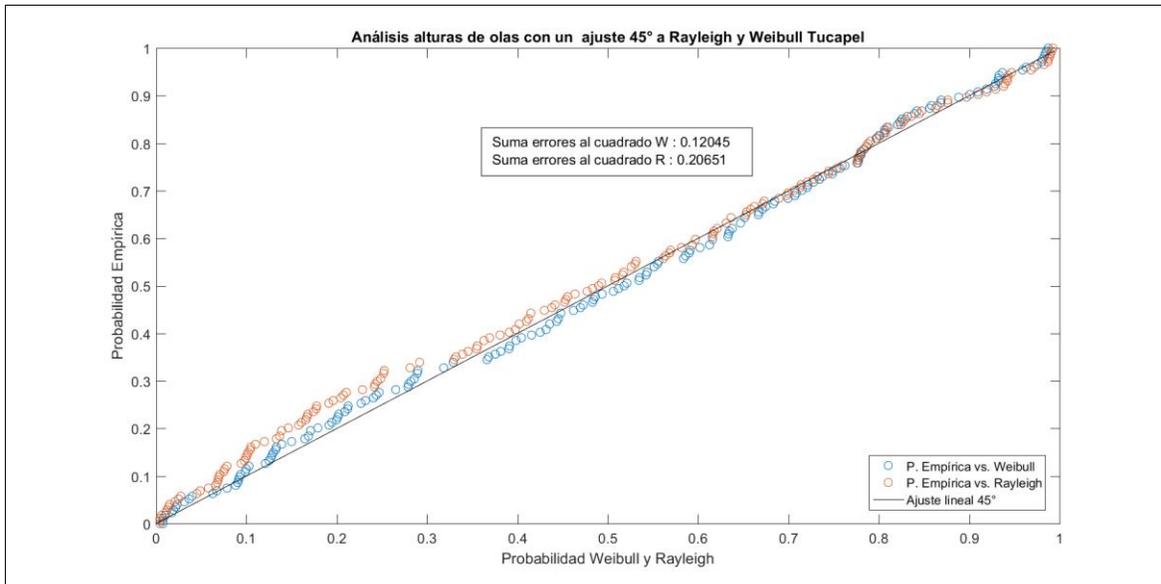


Figura 11-109: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

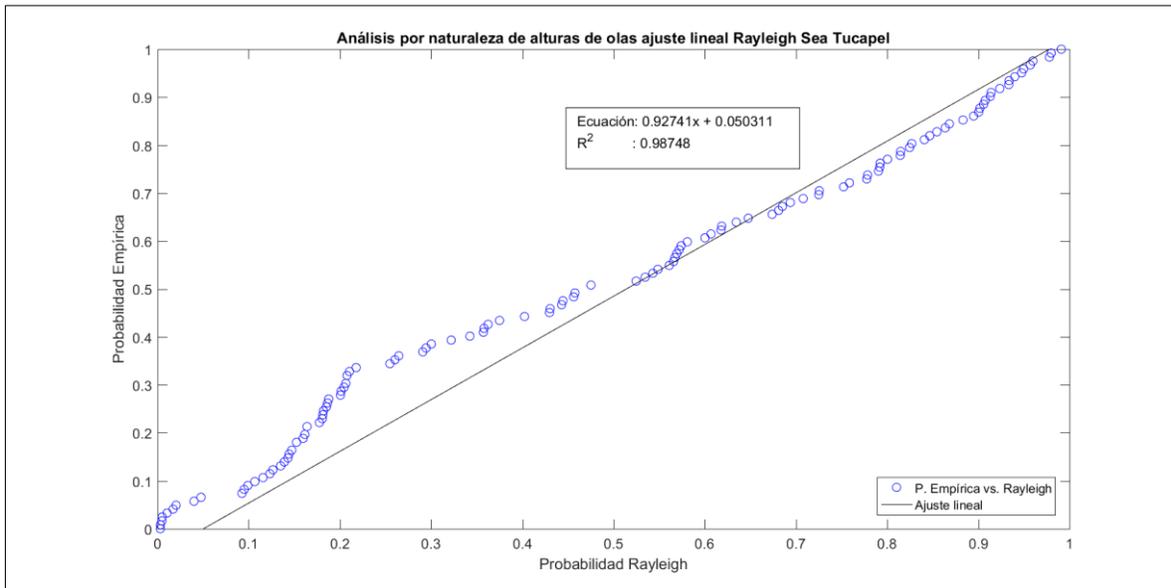


Figura 11-110: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

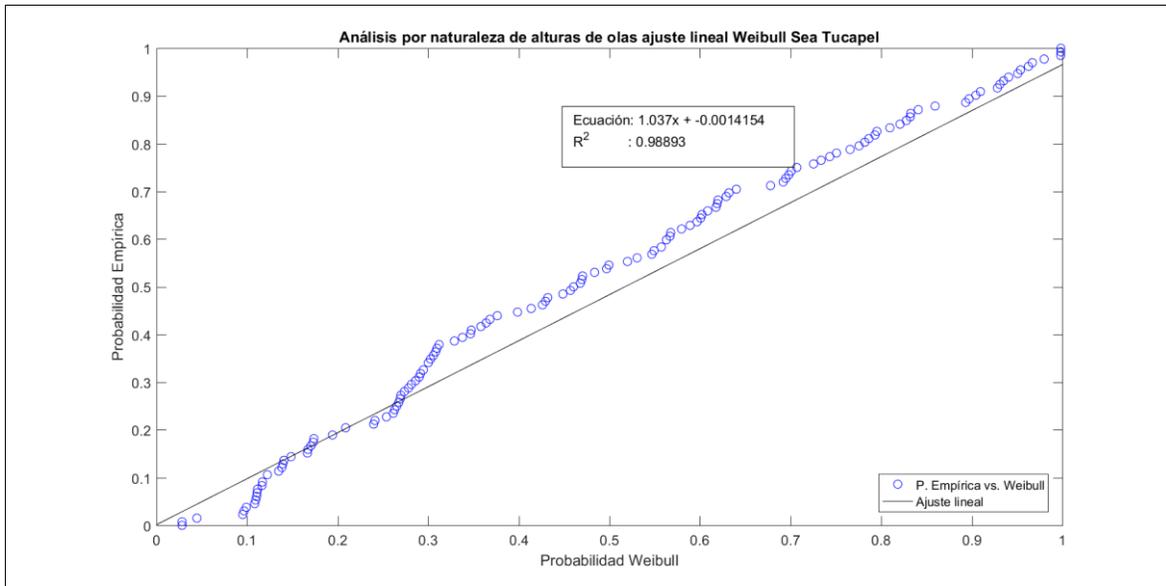


Figura 11-111: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

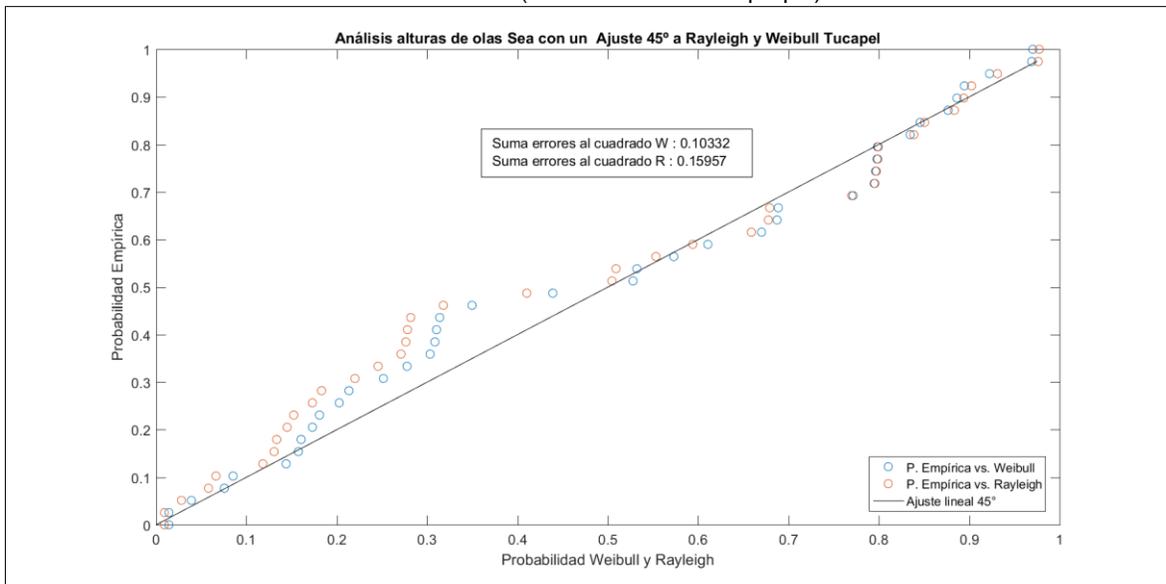


Figura 11-112: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

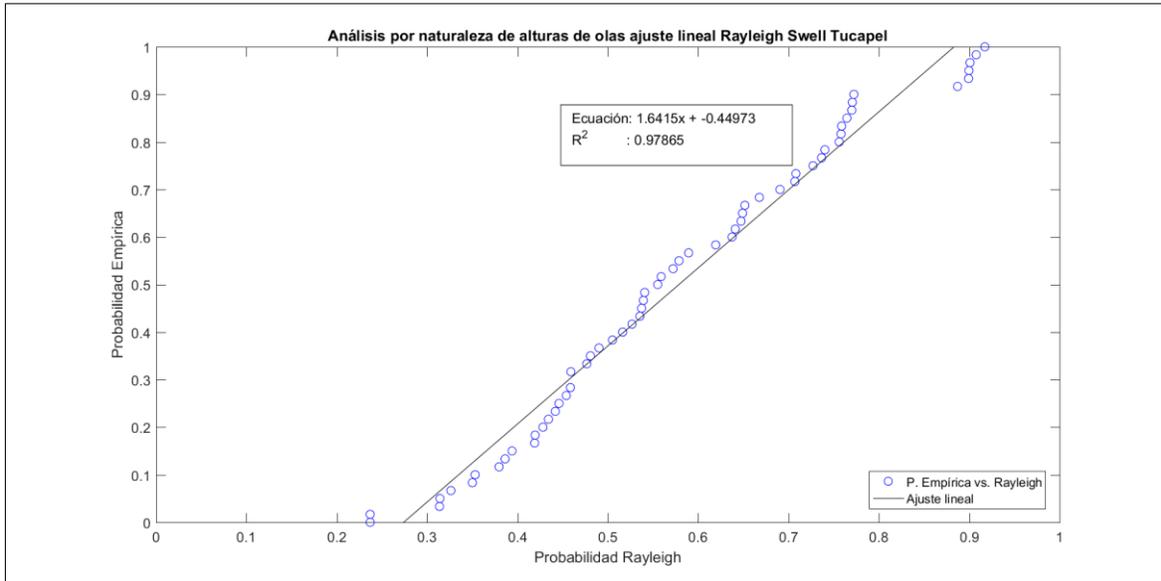


Figura 11-113: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

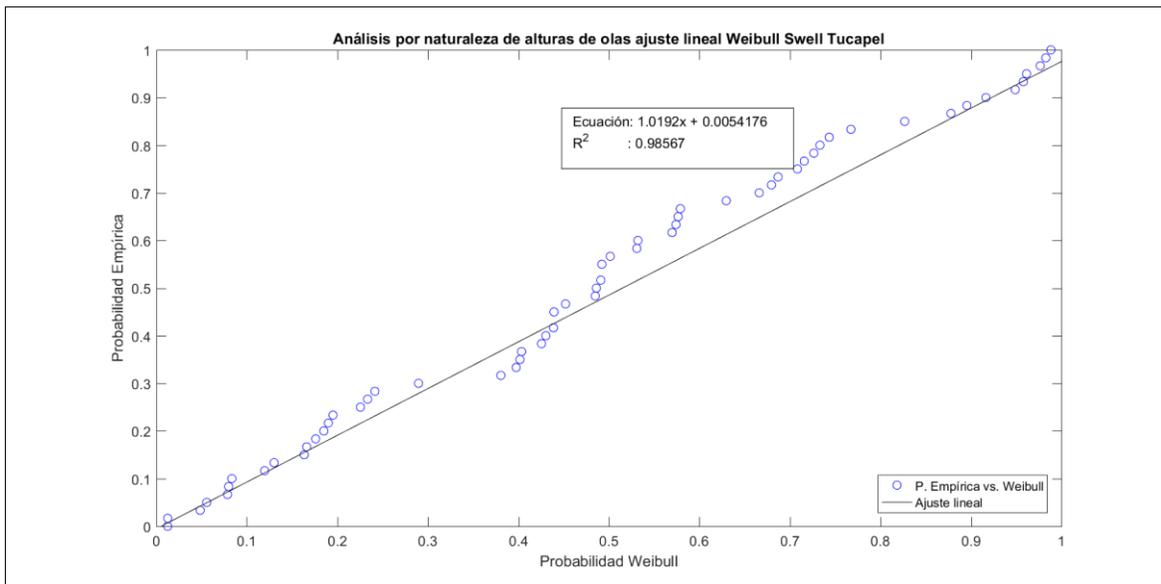


Figura 11-114: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

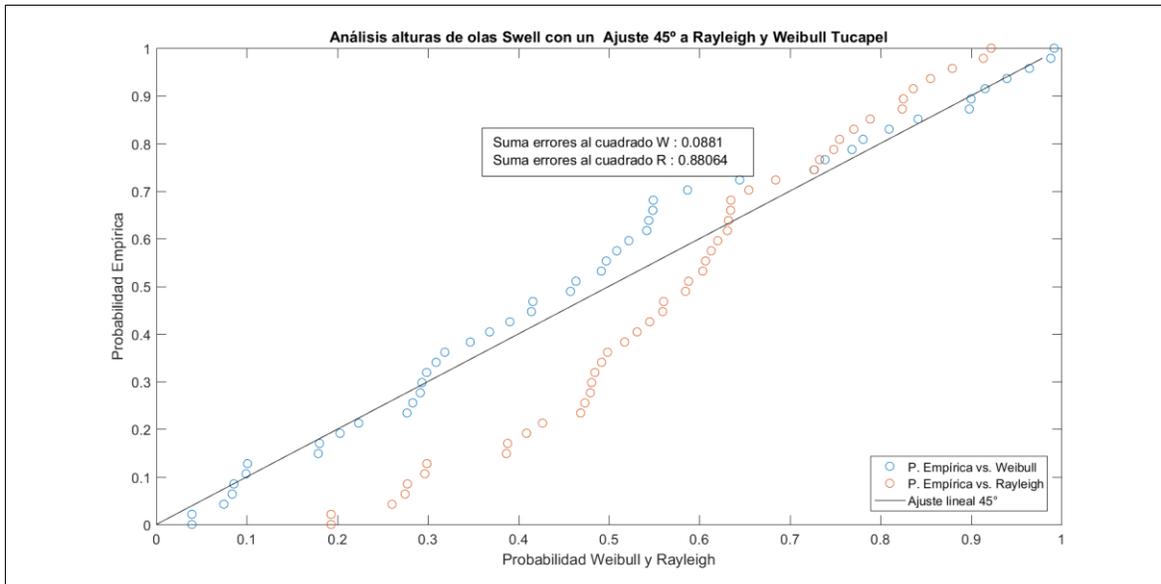


Figura 11-115: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.1.10 PUNTA MORHUILLA

Control de calidad

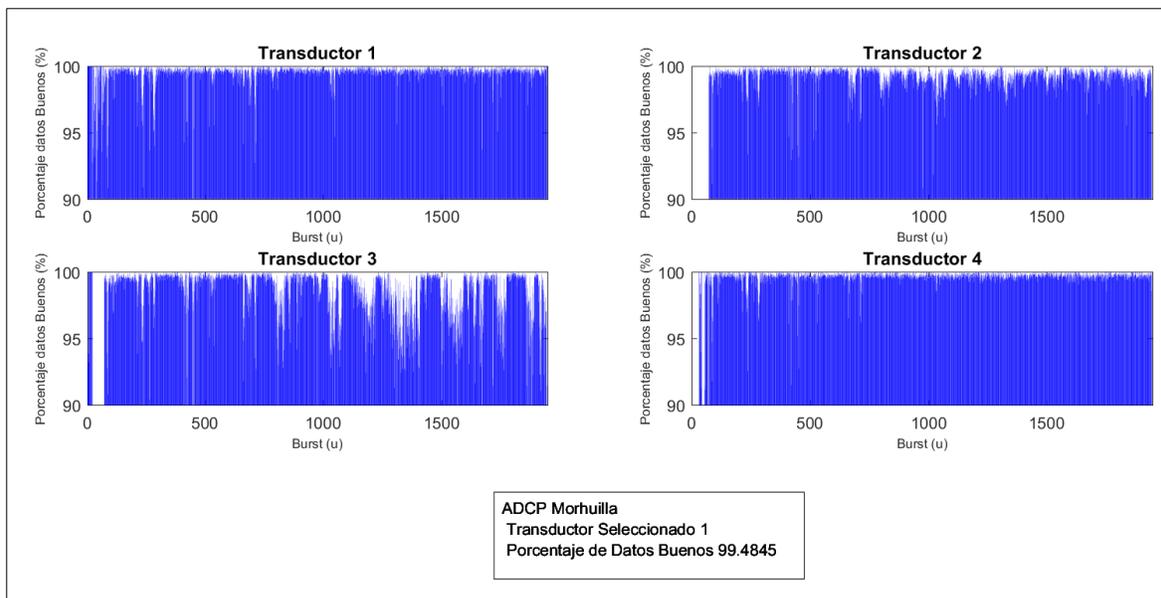


Figura 11-116: Selección de transductor
(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

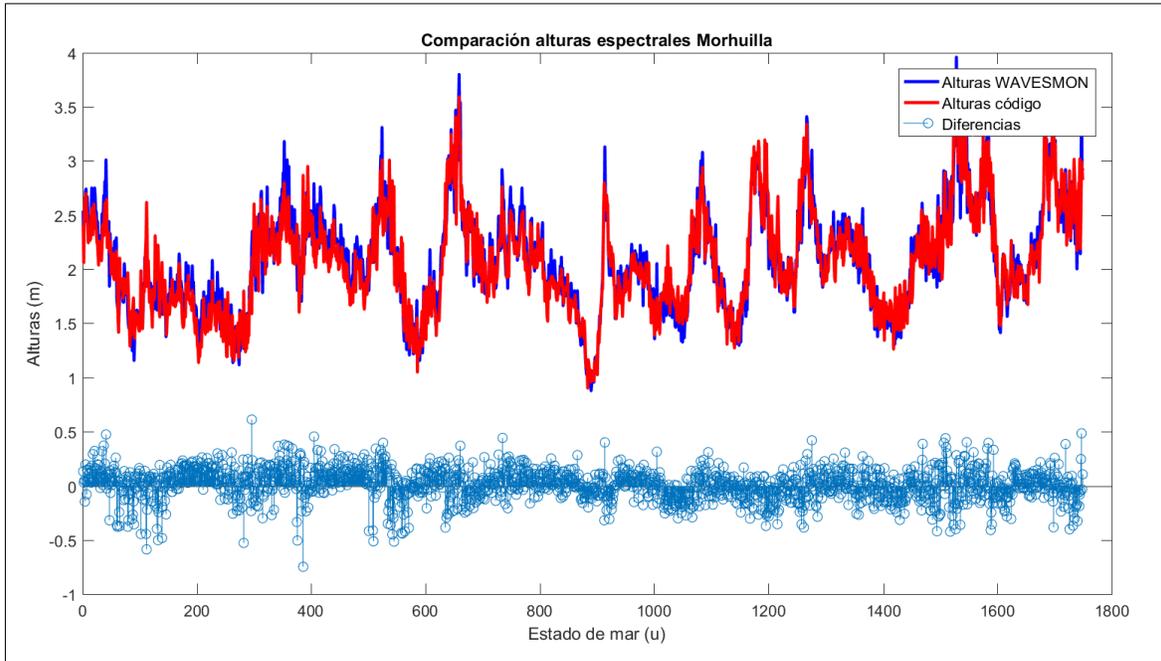


Figura 11-117: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

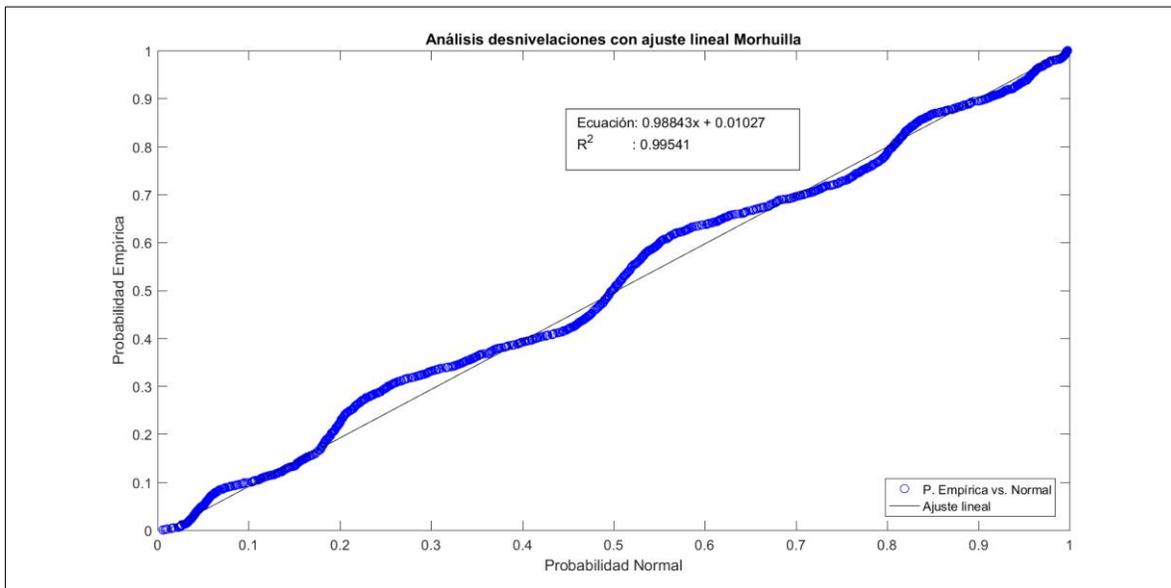


Figura 11-118: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

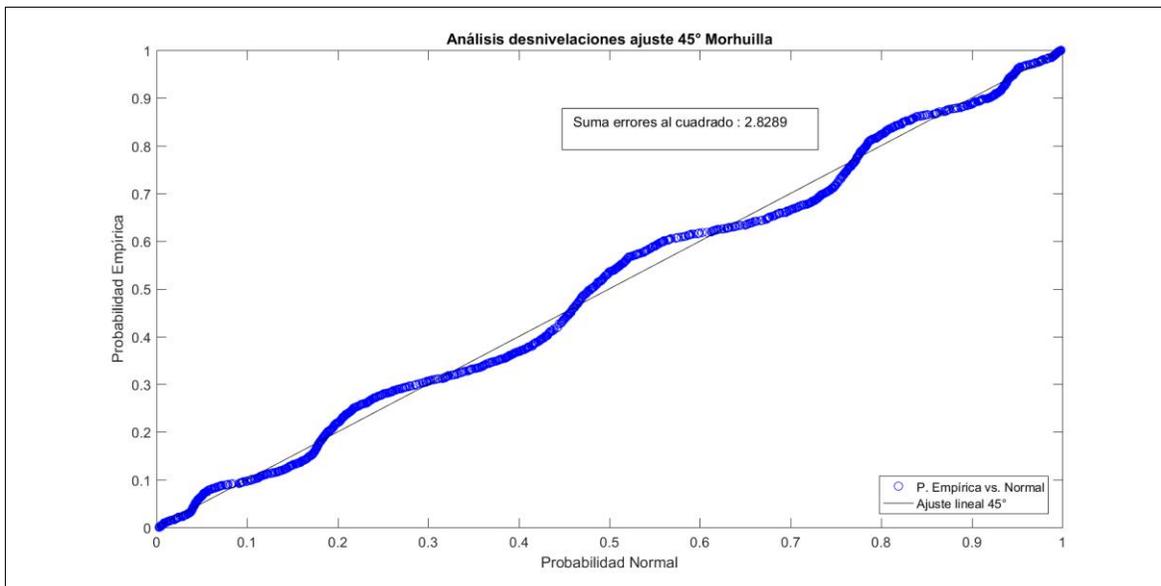


Figura 11-119: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

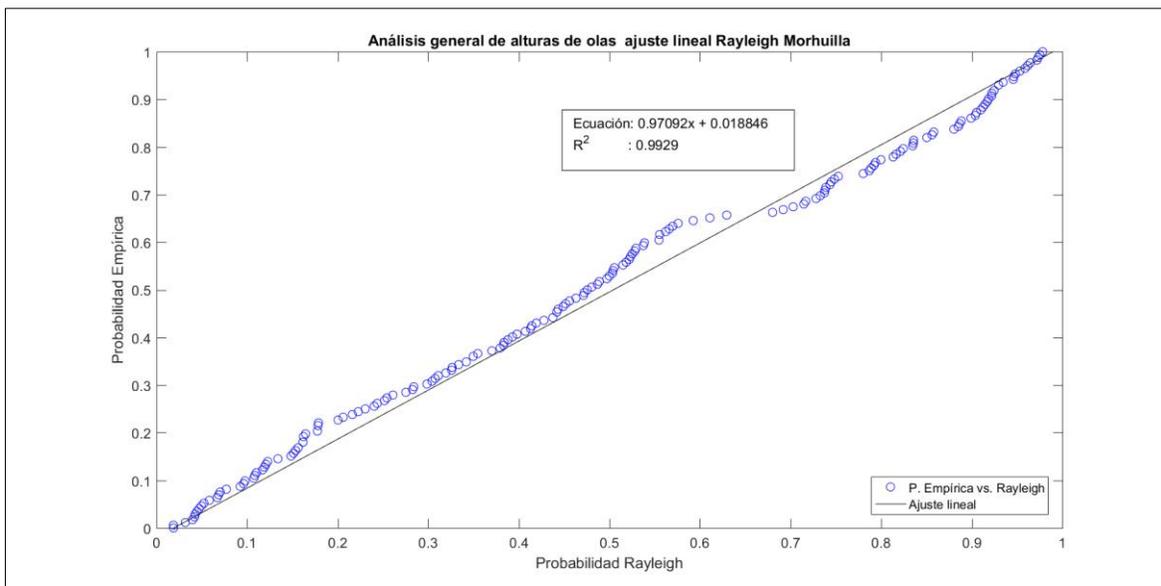


Figura 11-120: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

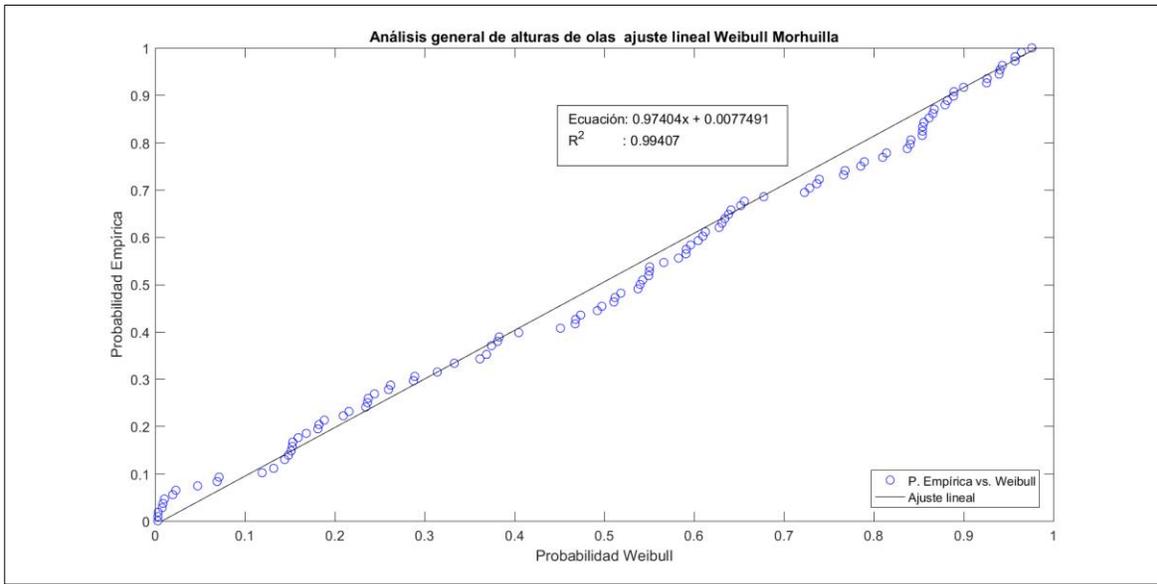


Figura 11-121: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
 (Fuente: Elaboración propia)

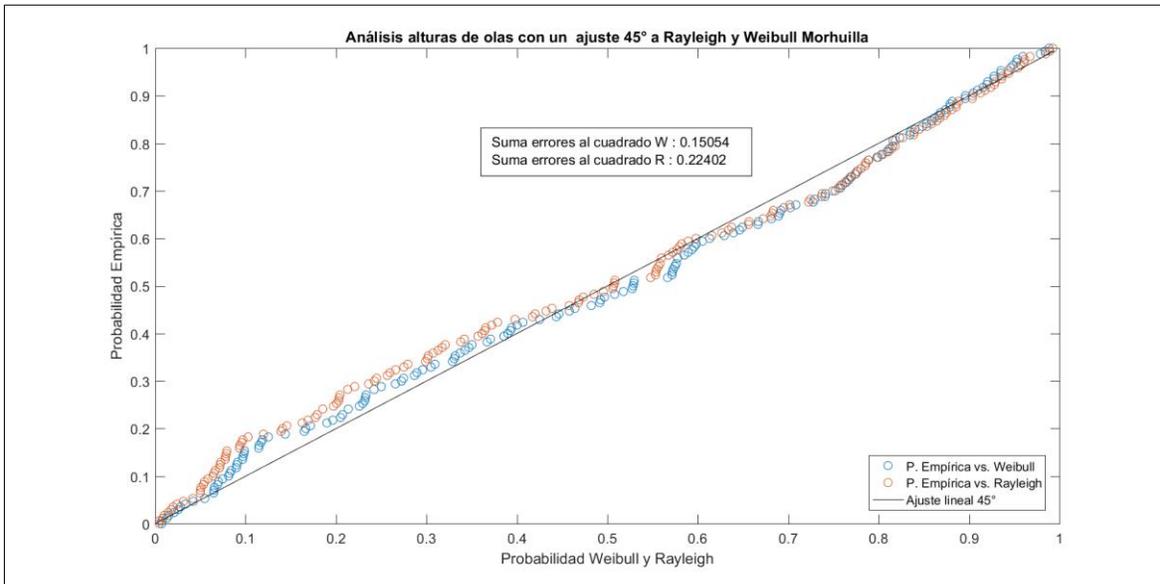


Figura 11-122: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
 (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

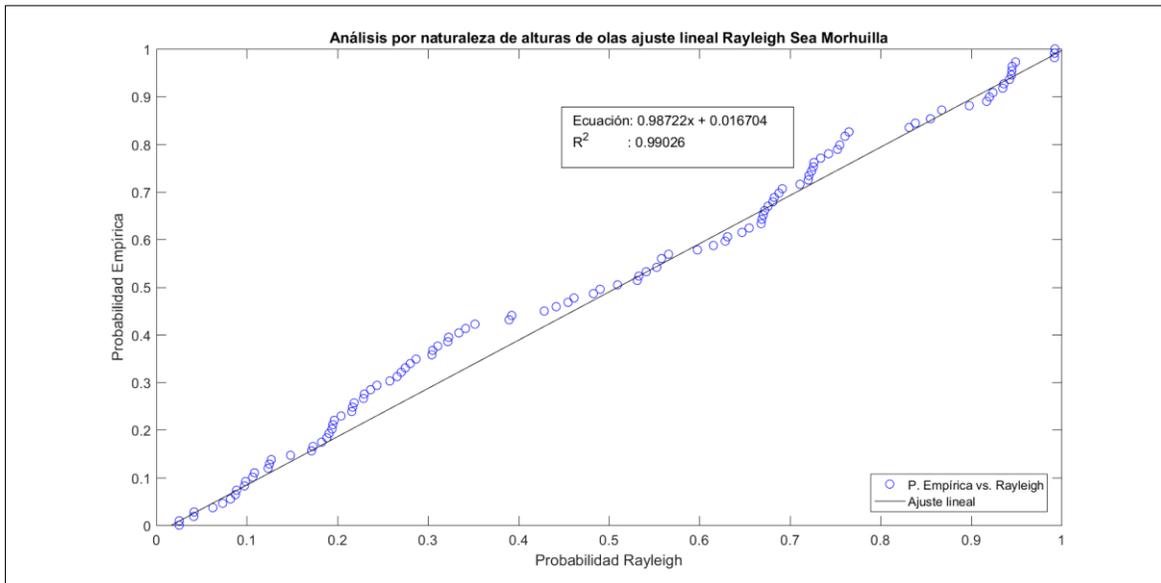


Figura 11-123: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

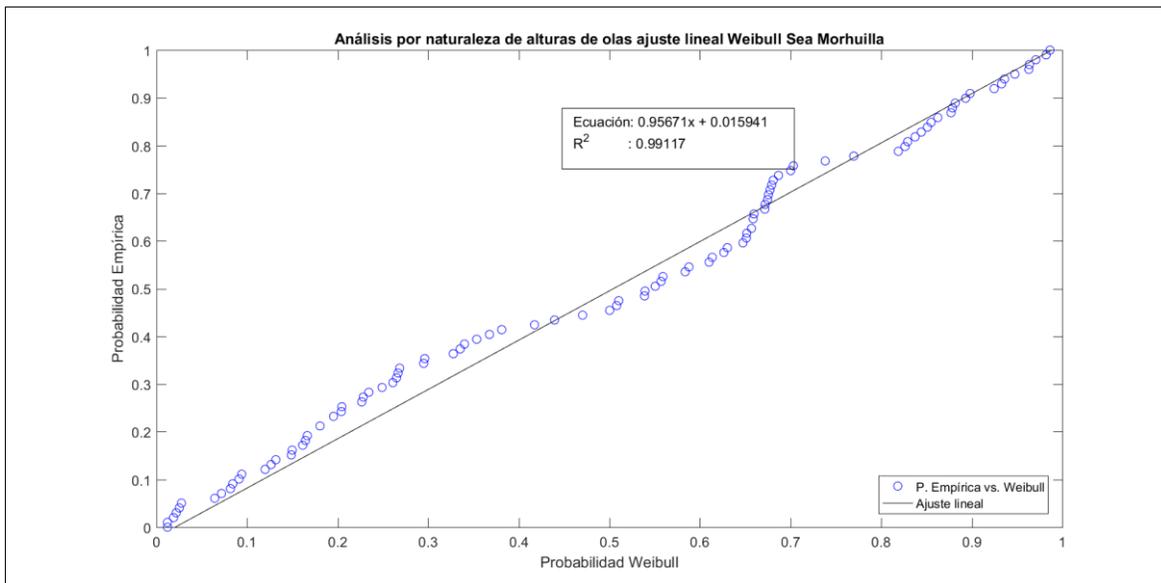


Figura 11-124: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

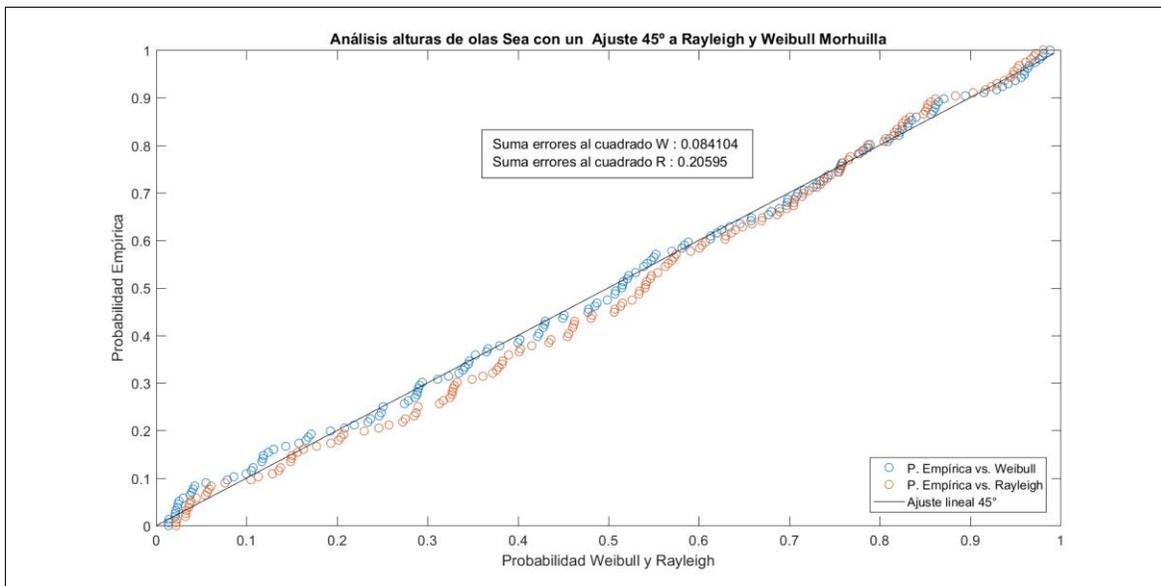


Figura 11-125: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

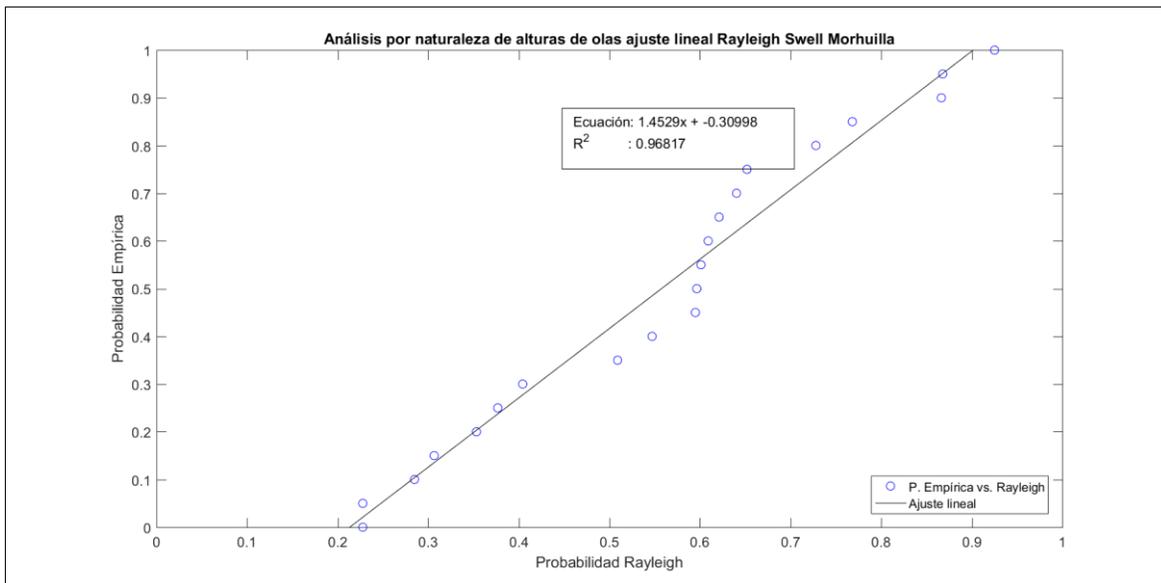


Figura 11-126: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

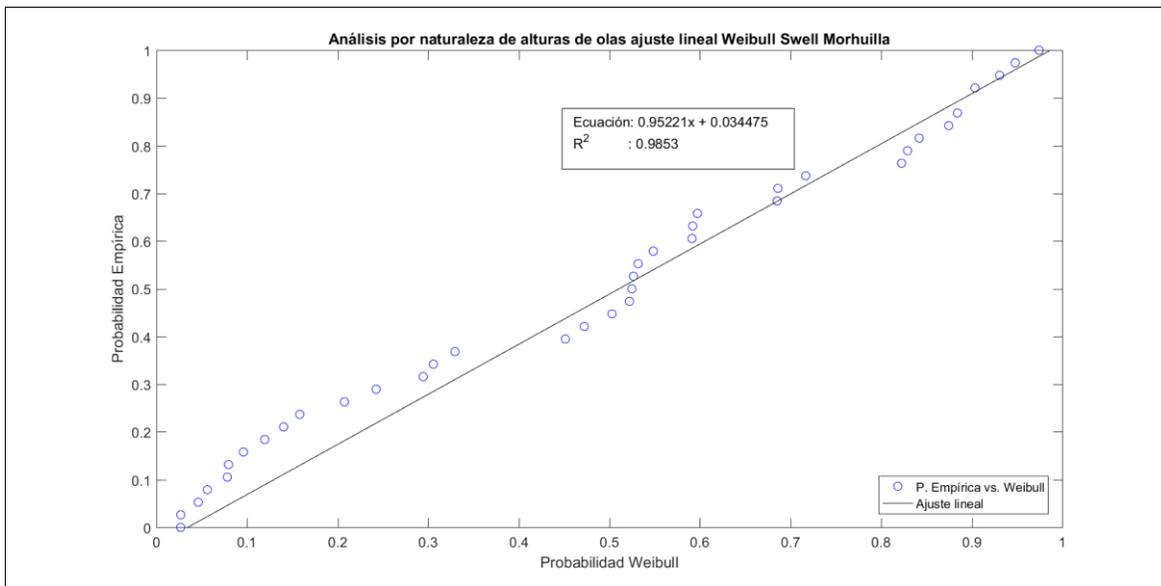


Figura 11-127: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

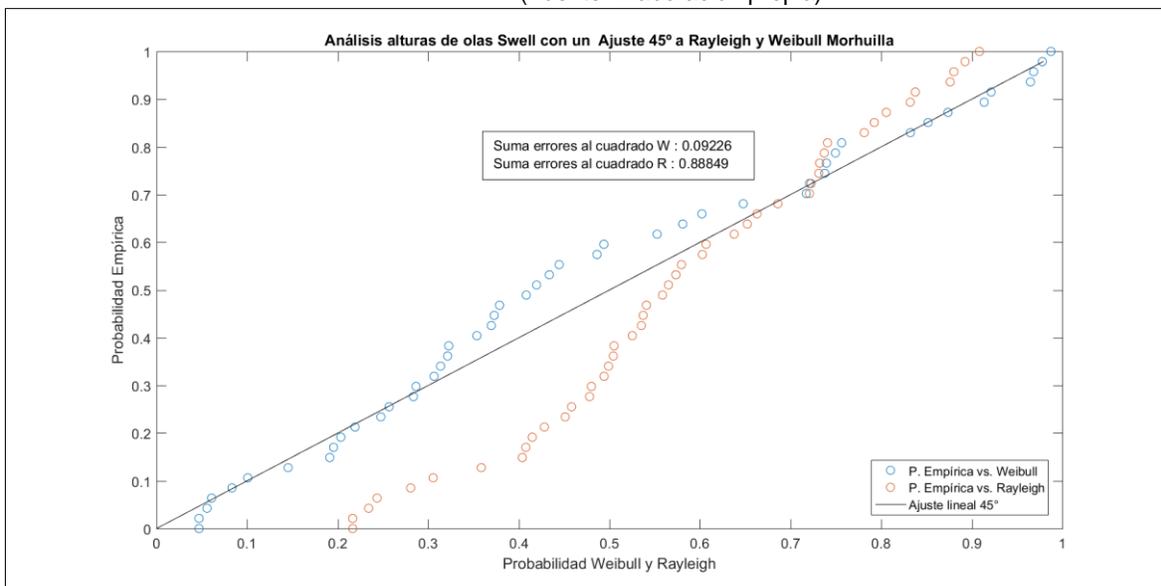


Figura 11-128: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

11.1.11 GALERA

Control de calidad

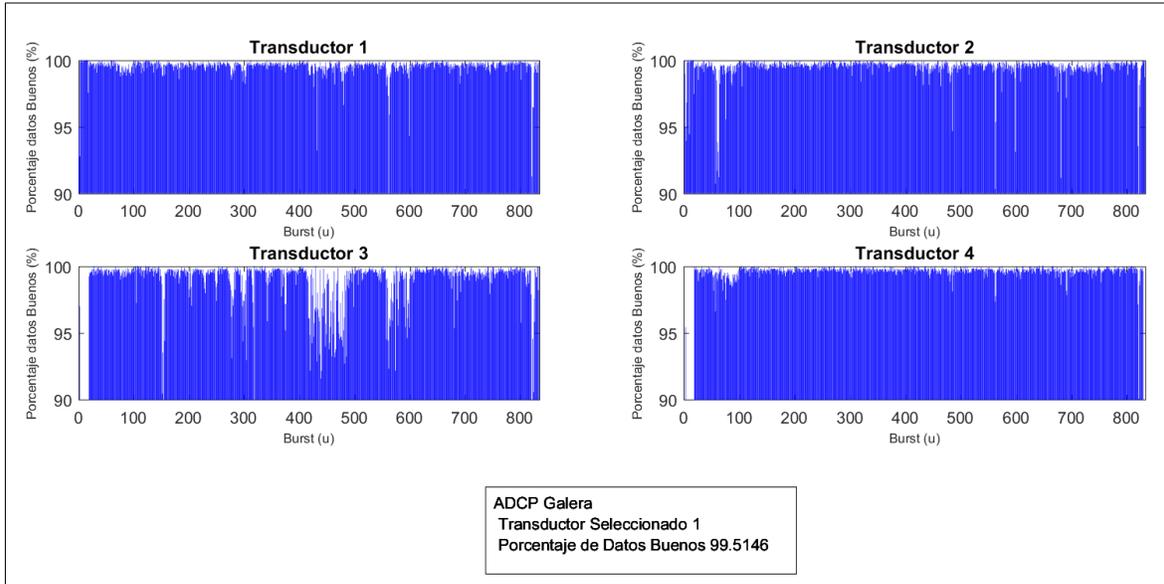


Figura 11-129: Selección de transductor

(Fuente: Elaboración propia)

Comparación de parámetros

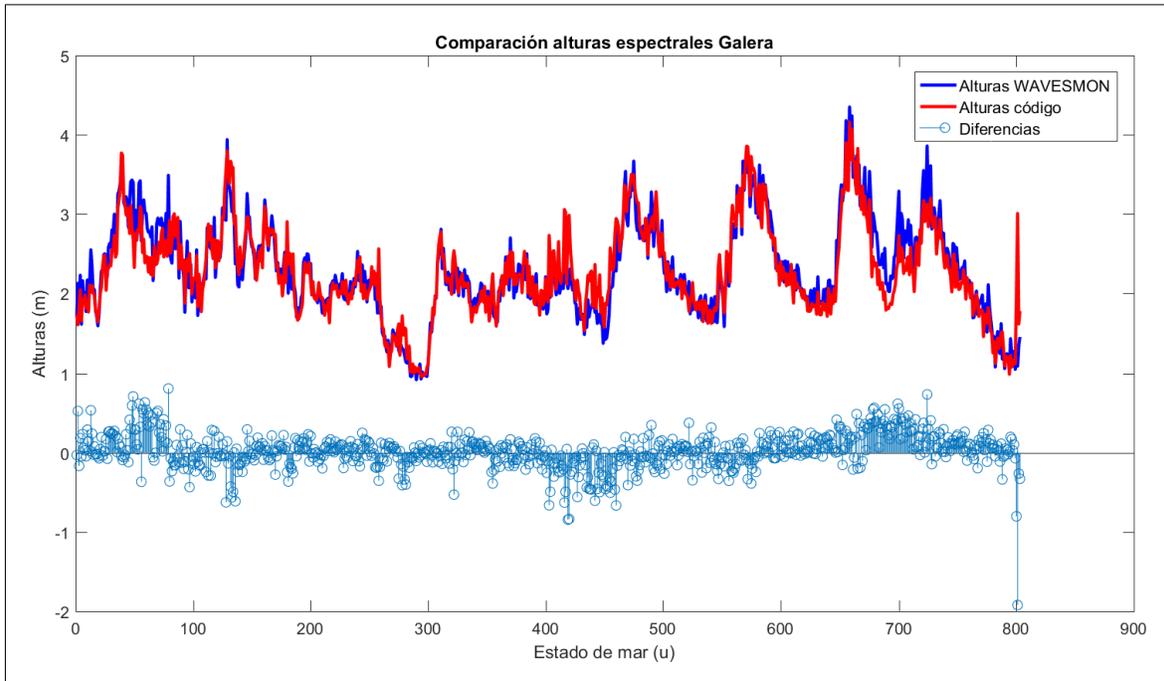


Figura 11-130: Comparación de alturas espectrales Wavesmon versus generación de código MATLAB

(Fuente: Elaboración propia)

Análisis desnivelaciones instantáneas

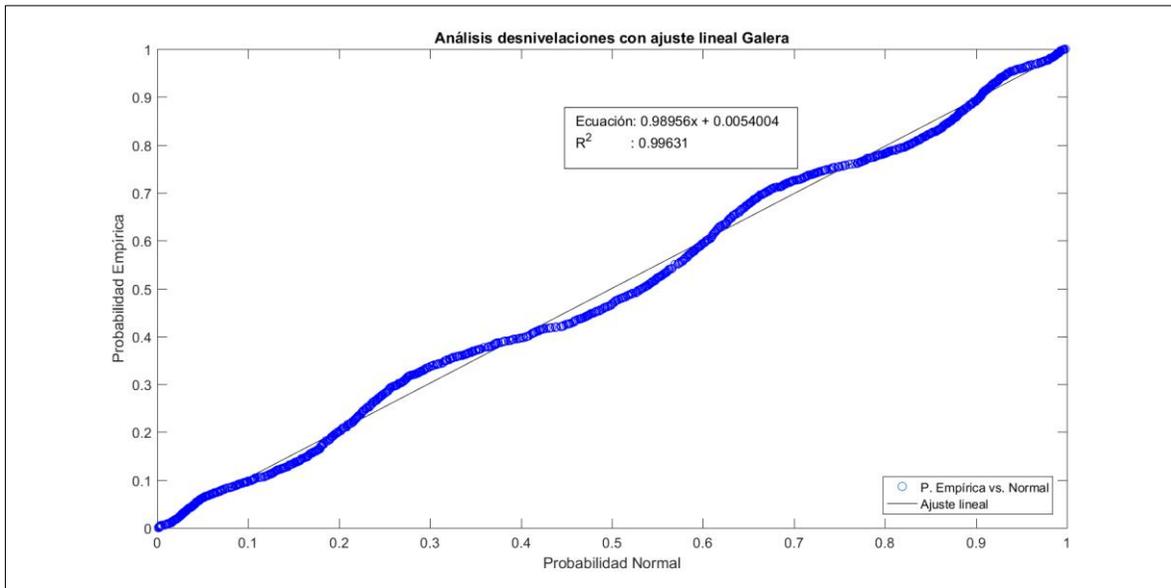


Figura 11-131: Análisis desnivelaciones ajuste lineal promedio probabilidad Normal
(Fuente: Elaboración propia)

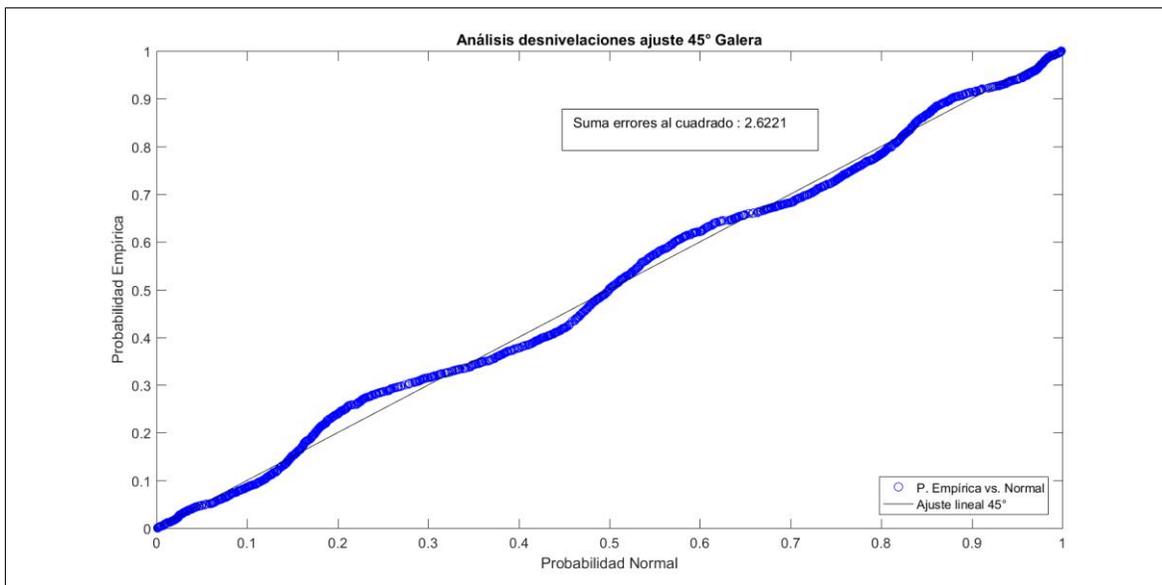


Figura 11-132: Análisis desnivelaciones ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de forma general

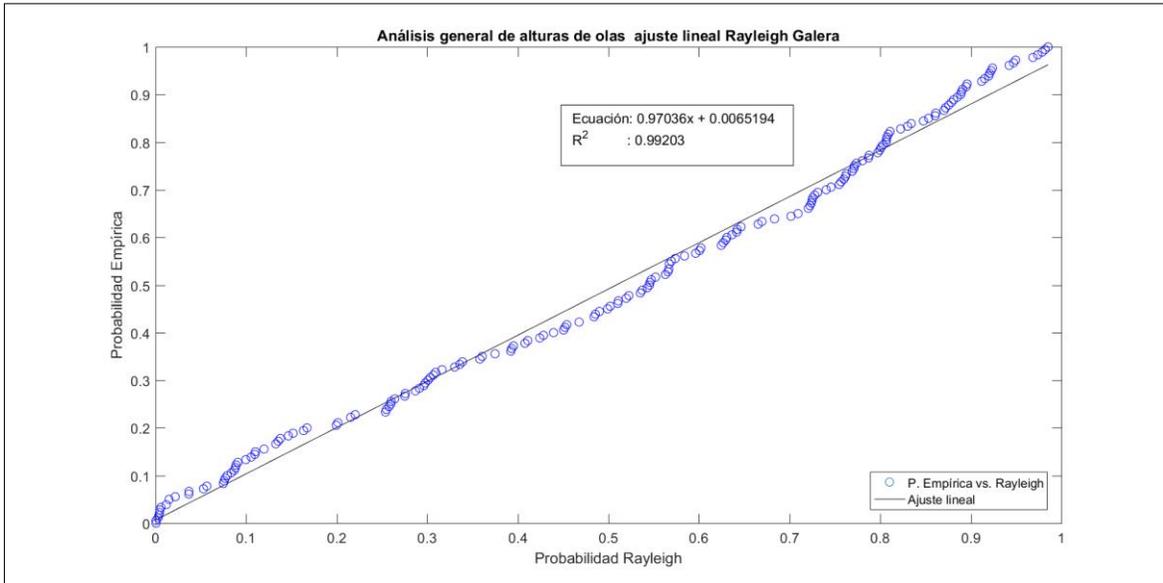


Figura 11-133: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

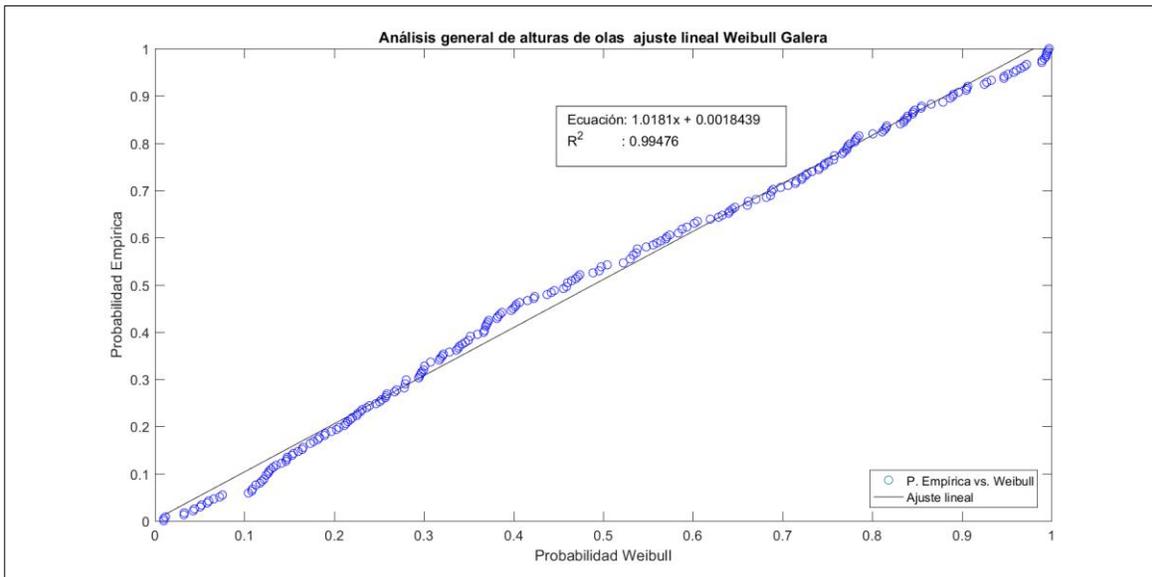


Figura 11-134: Análisis alturas de ola ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

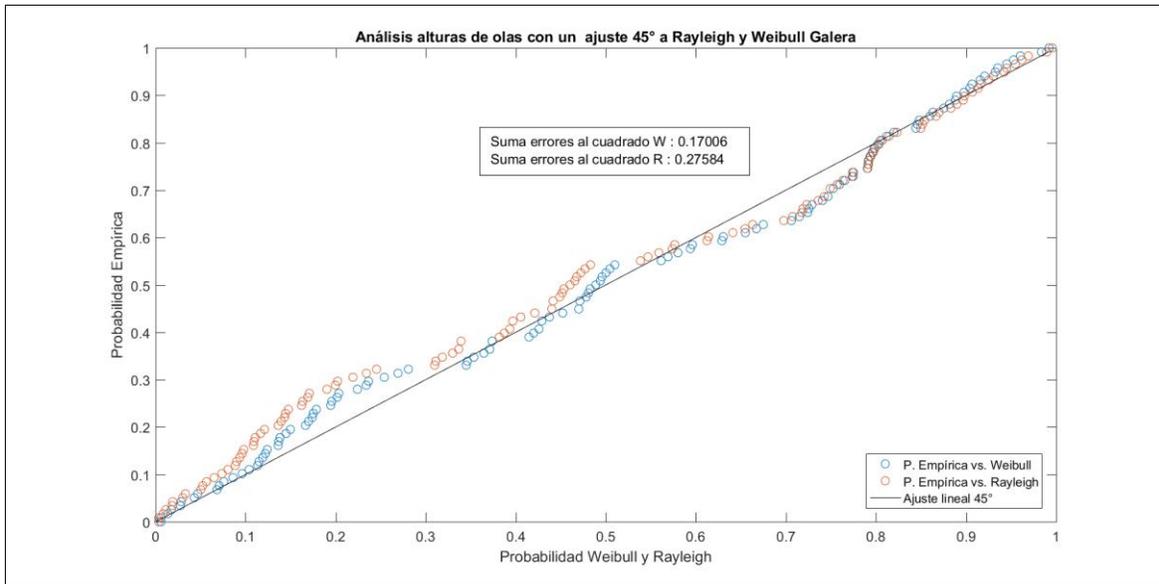


Figura 11-135: Análisis alturas de ola ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Sea

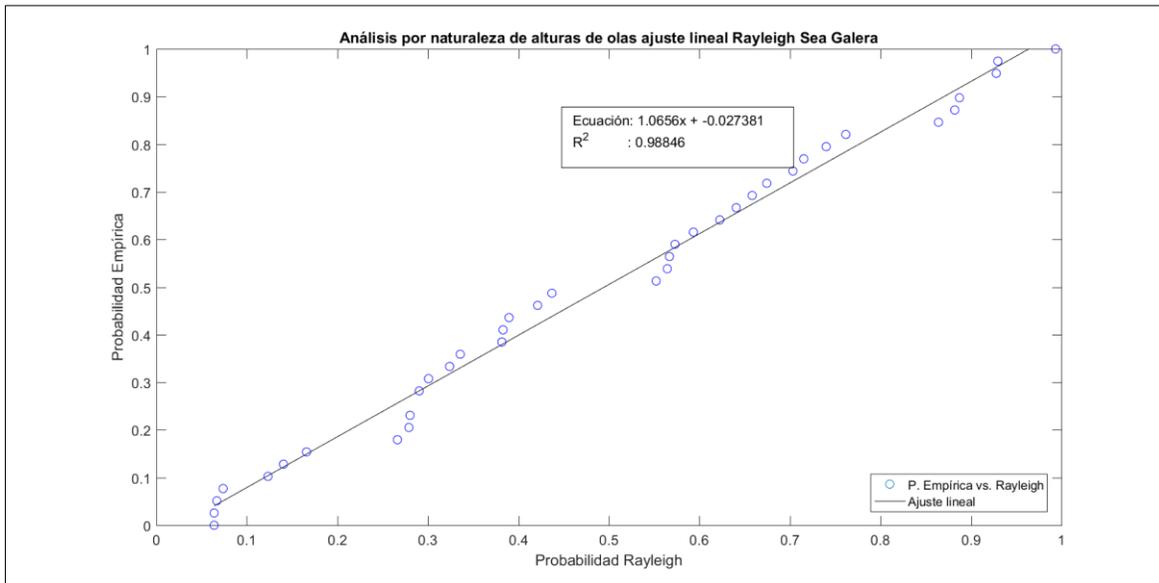


Figura 11-136: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh (Fuente: Elaboración propia)

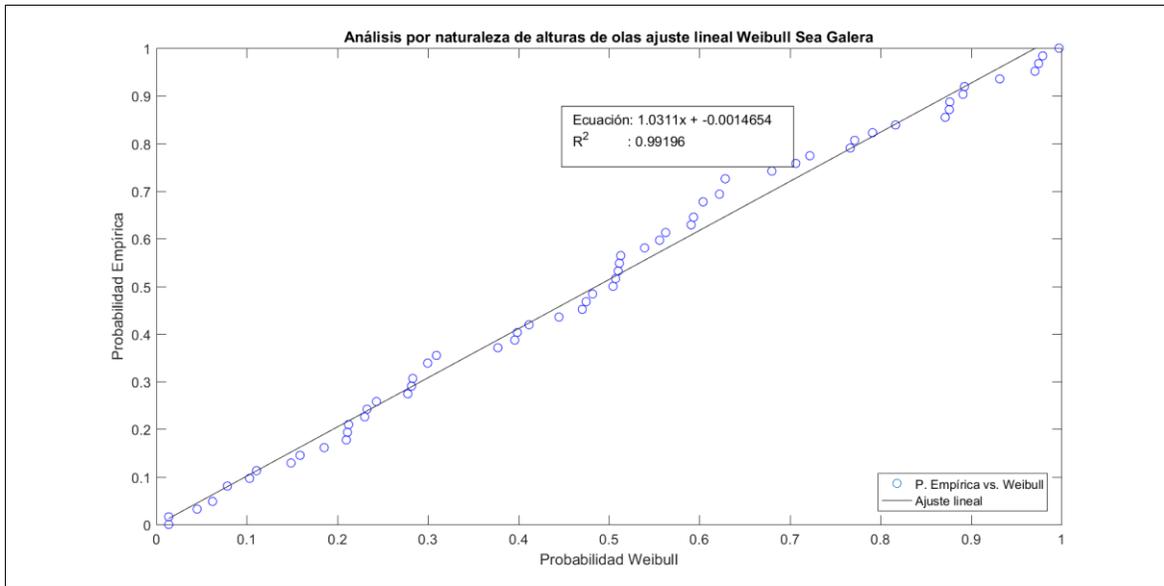


Figura 11-137: Análisis alturas de ola Sea ajuste lineal promedio probabilidad Weibull (Fuente: Elaboración propia)

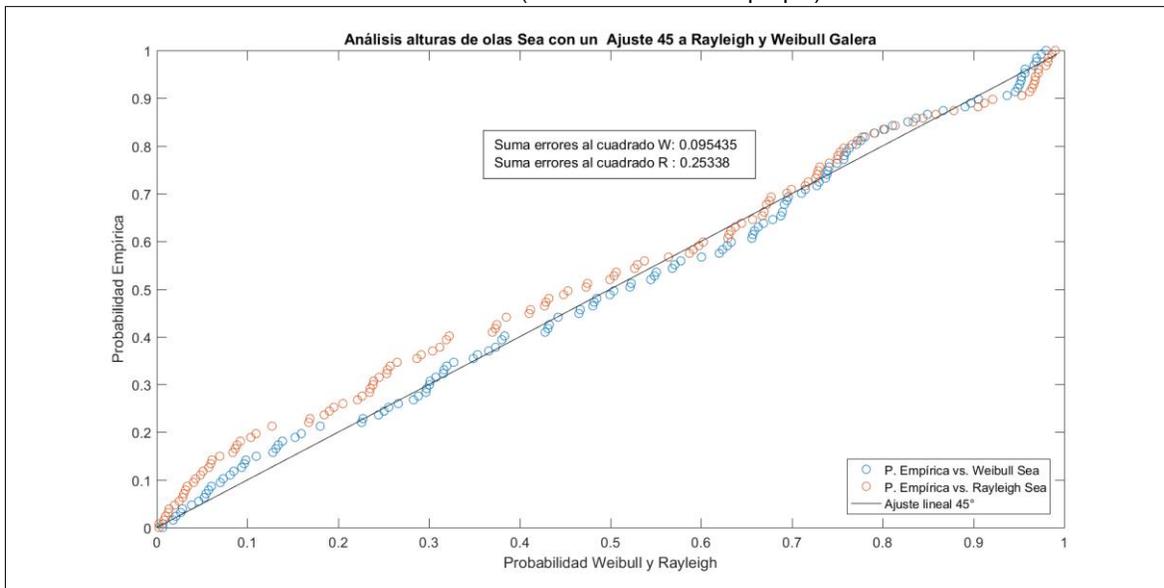


Figura 11-138: Análisis alturas de ola Sea ajuste perfecto promedio la suma de los errores al cuadrado (Fuente: Elaboración propia)

Análisis alturas de ola de por naturaleza Swell

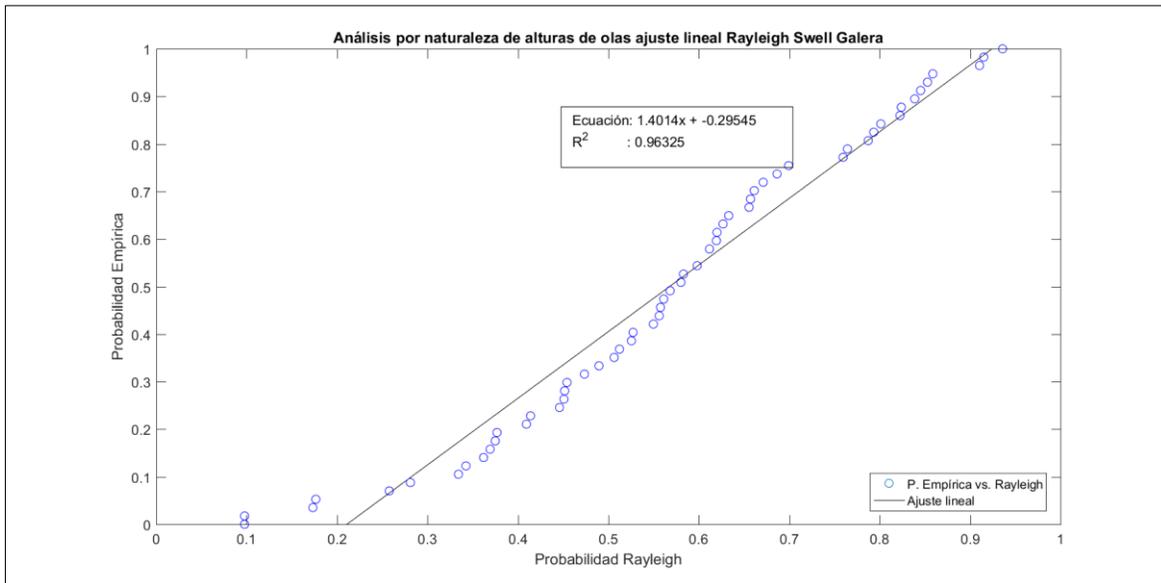


Figura 11-139: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Rayleigh
(Fuente: Elaboración propia)

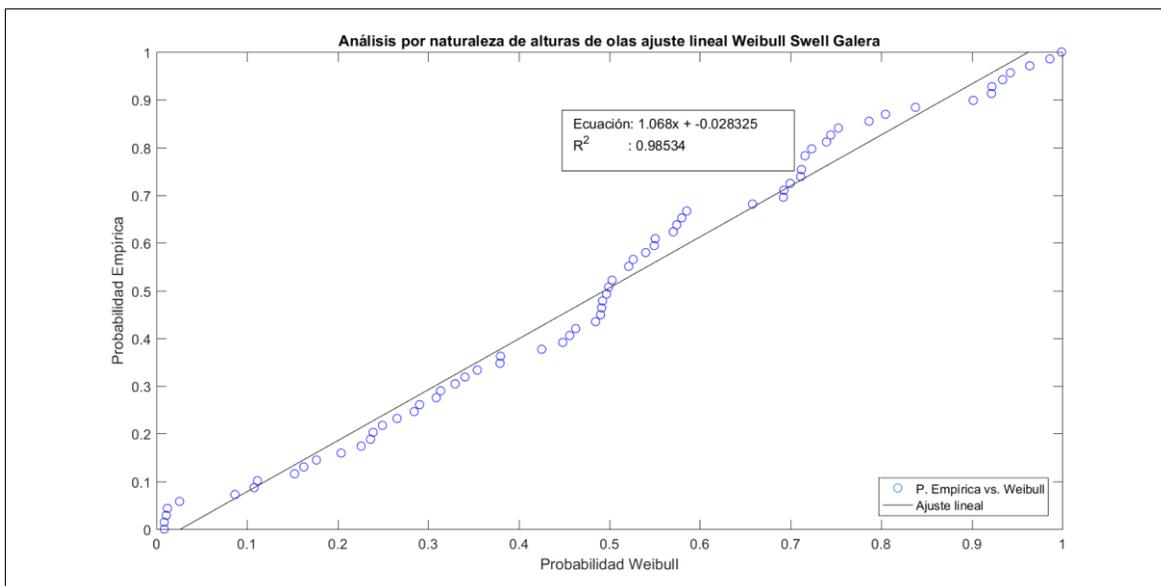


Figura 11-140: Análisis alturas de ola Swell ajuste lineal promedio probabilidad Weibull
(Fuente: Elaboración propia)

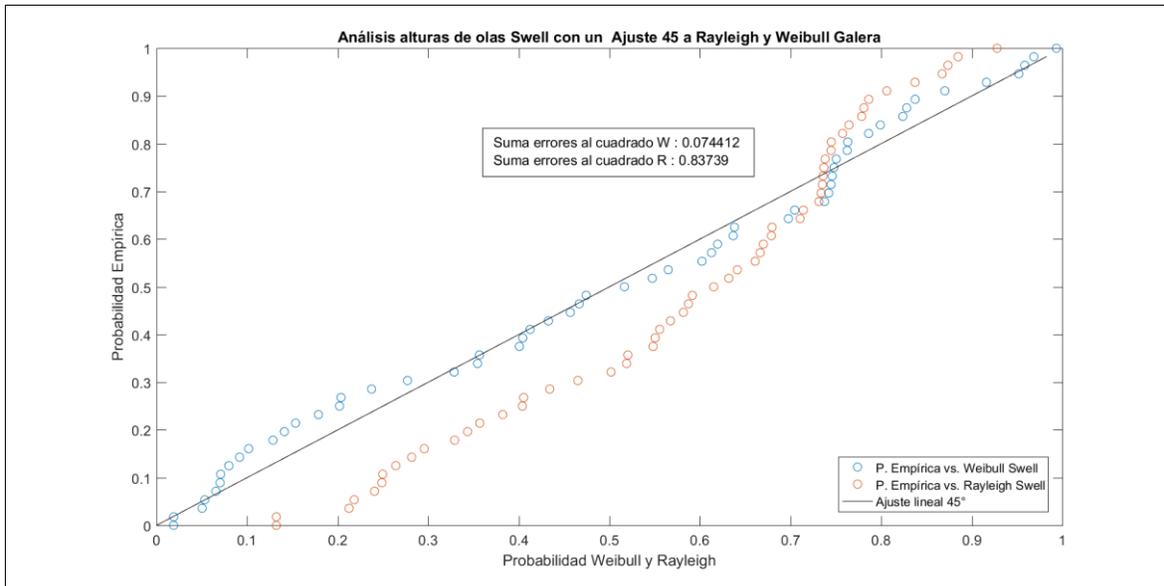


Figura 11-141: Análisis alturas de ola Swell ajuste perfecto para promedio la suma de errores al cuadrado
(Fuente: Elaboración propia)

11.2 ANÁLISIS DE PERÍODOS

Análisis de períodos distribución de Bretschneider 1959

Presentado en los resultados en análisis de períodos.

Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975

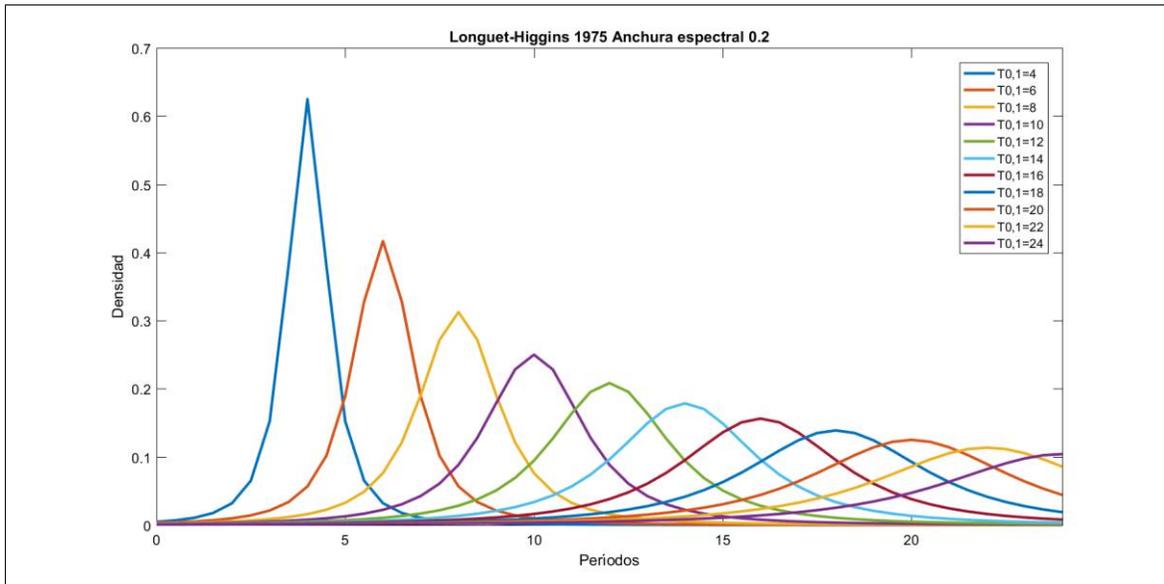


Figura 11-142: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,2
(Fuente: Elaboración propia)

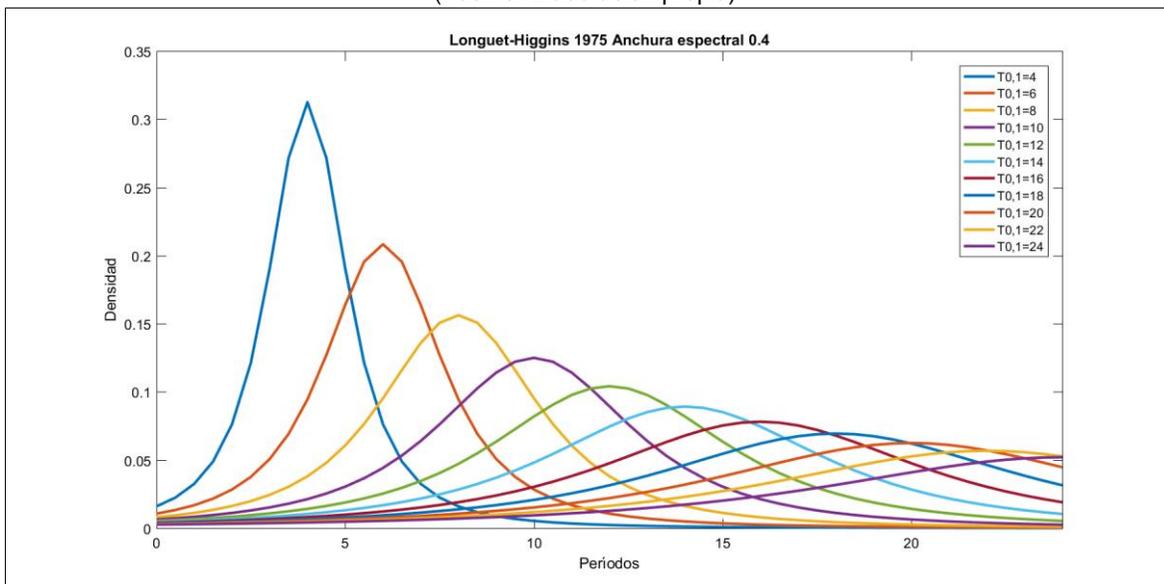


Figura 11-143: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,4
(Fuente: Elaboración propia)

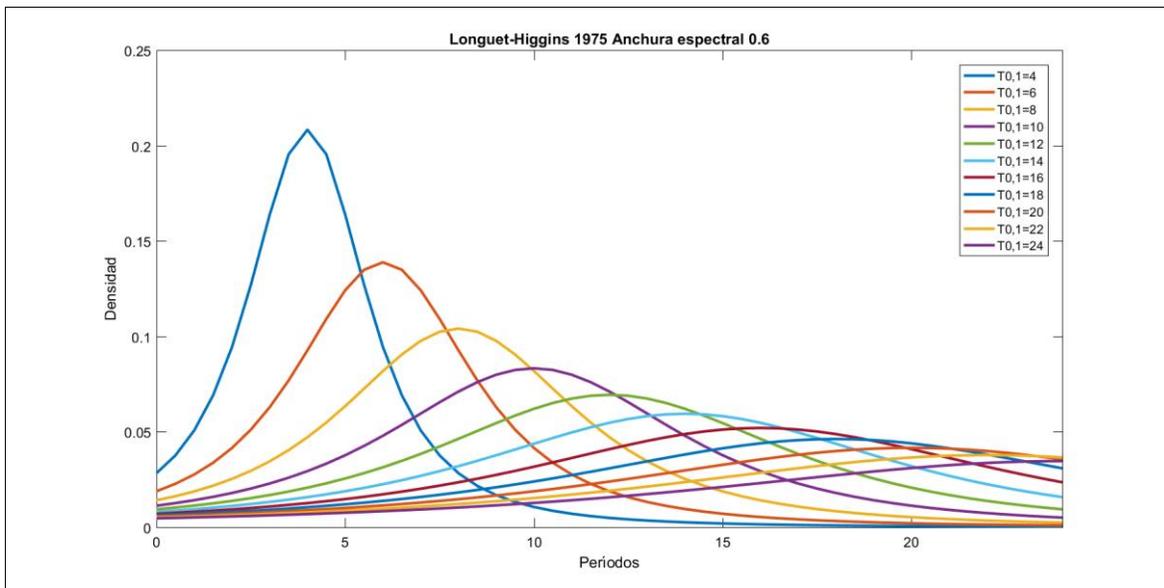


Figura 11-144: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,6
(Fuente: Elaboración propia)

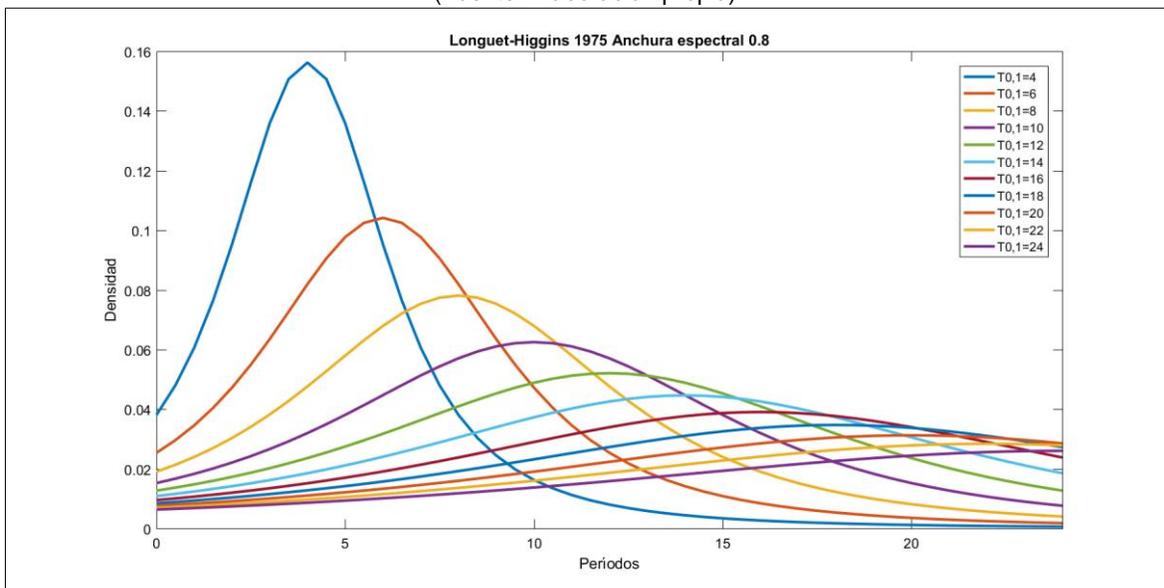


Figura 11-145: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 0,8
(Fuente: Elaboración propia)

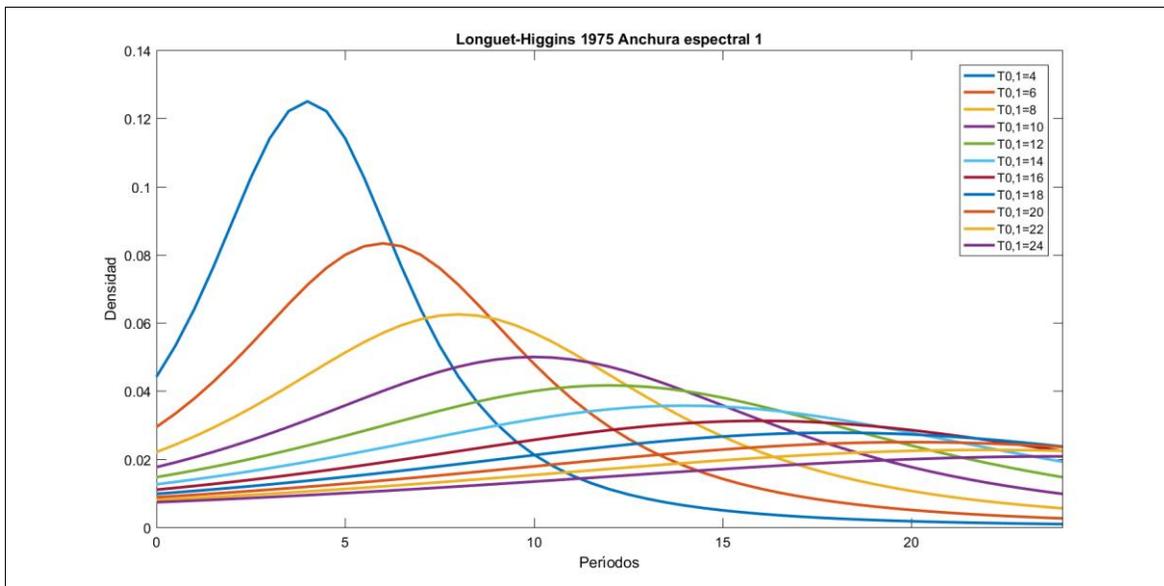


Figura 11-146: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1975, período variable y anchura espectral 1
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983

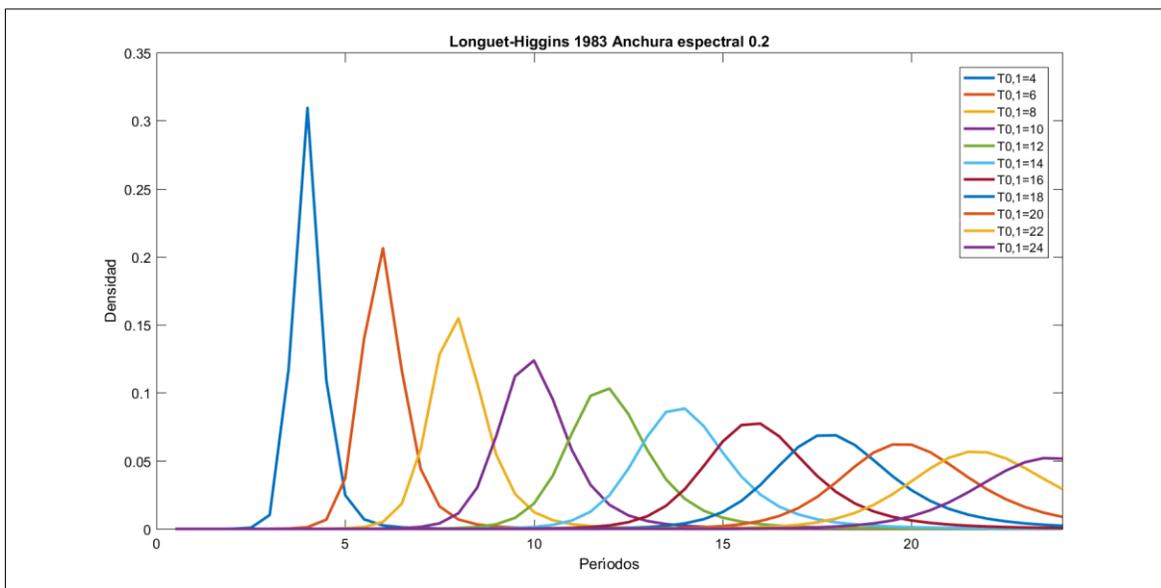


Figura 11-147: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,2

(Fuente: Elaboración propia)

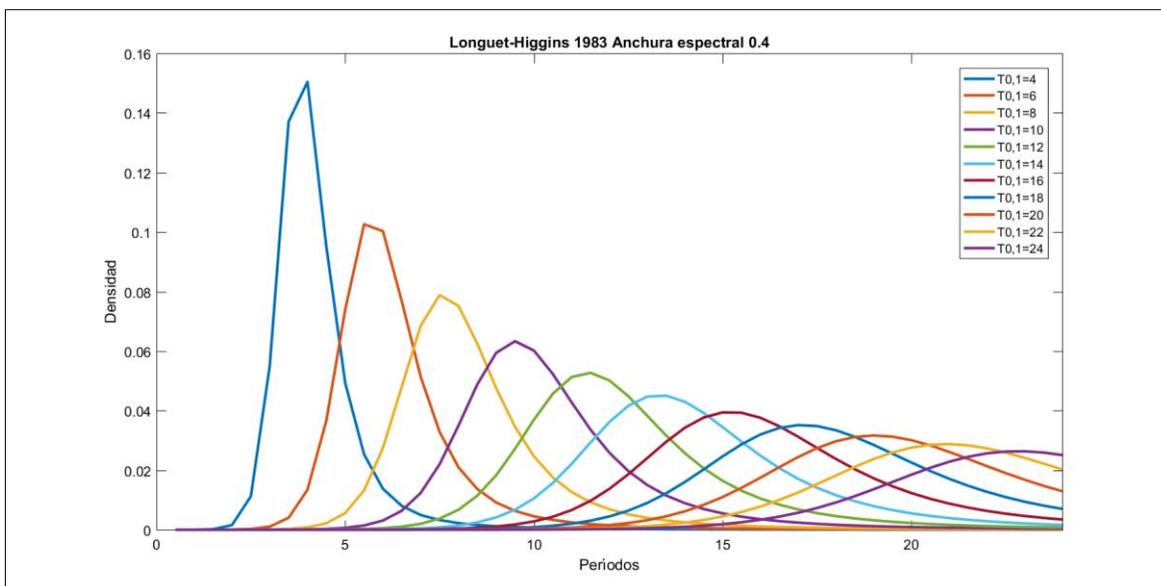


Figura 11-148: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,4.

(Fuente: Elaboración propia)

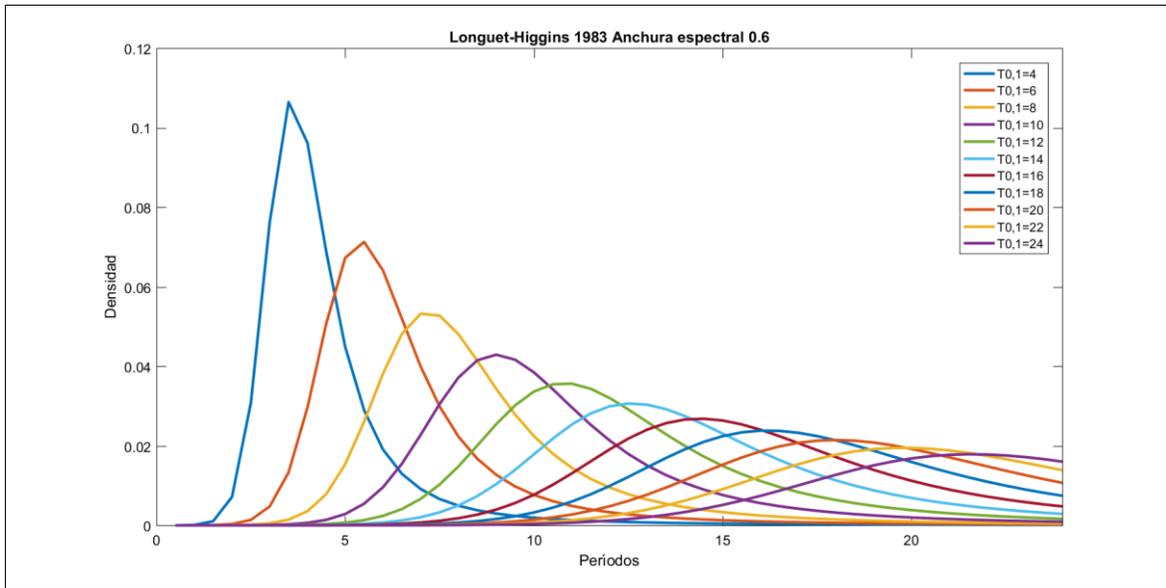


Figura 11-149: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,6

(Fuente: Elaboración propia)

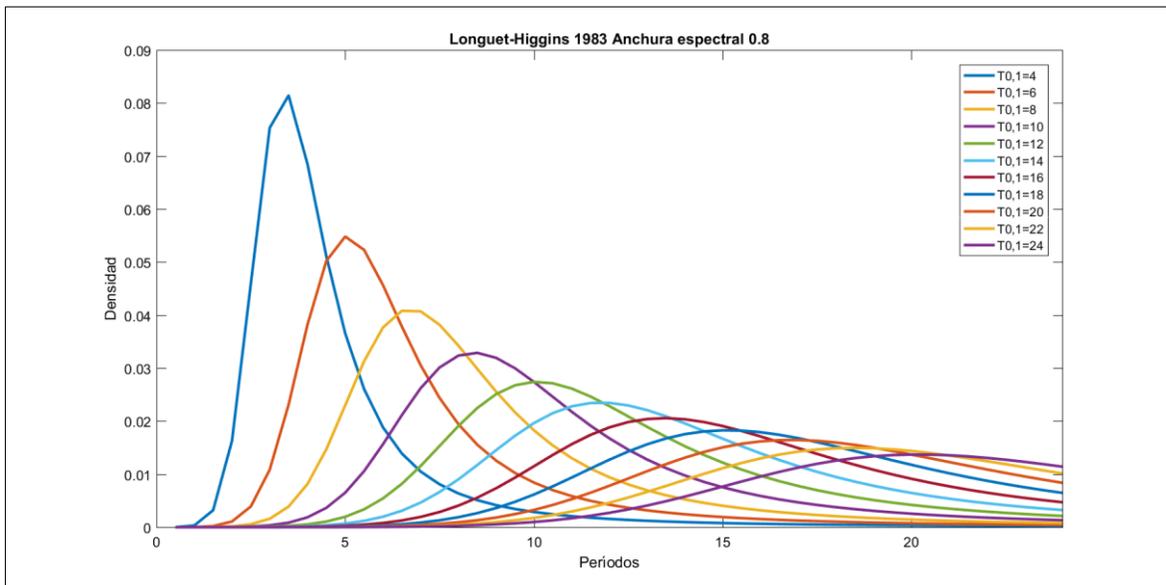


Figura 11-150: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 0,8.

(Fuente: Elaboración propia)

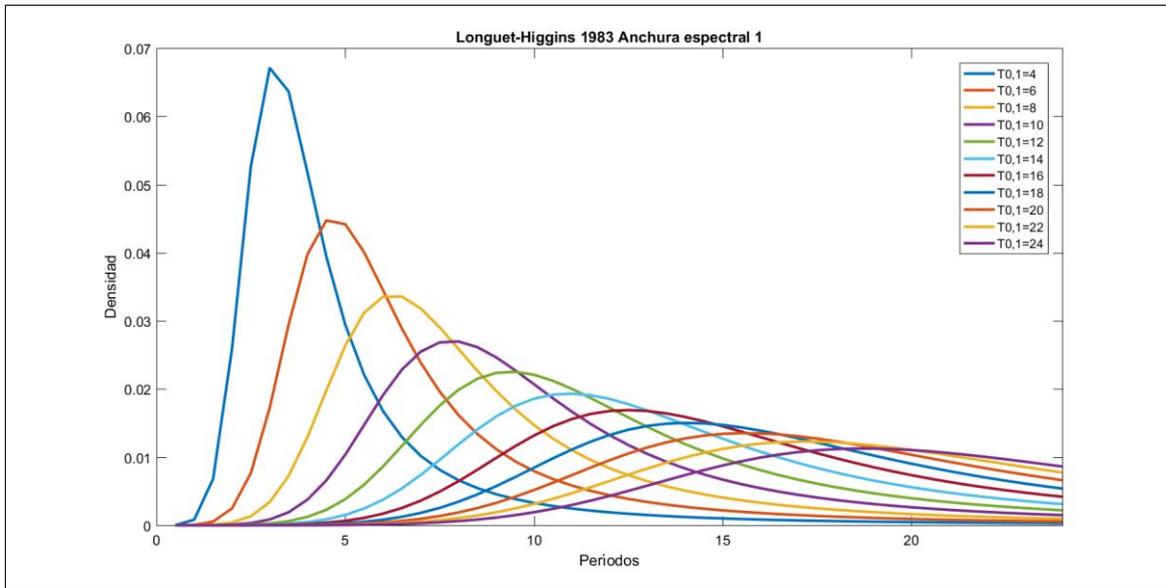


Figura 11-151: Análisis de períodos distribución de Longuet-Higgins 1983, período variable y anchura espectral 1.

(Fuente: Elaboración propia)

11.3 ANÁLISIS RELACIÓN ALTURA SIGNIFICATIVA ESTADÍSTICA VERSUS ALTURA ESPECTRAL

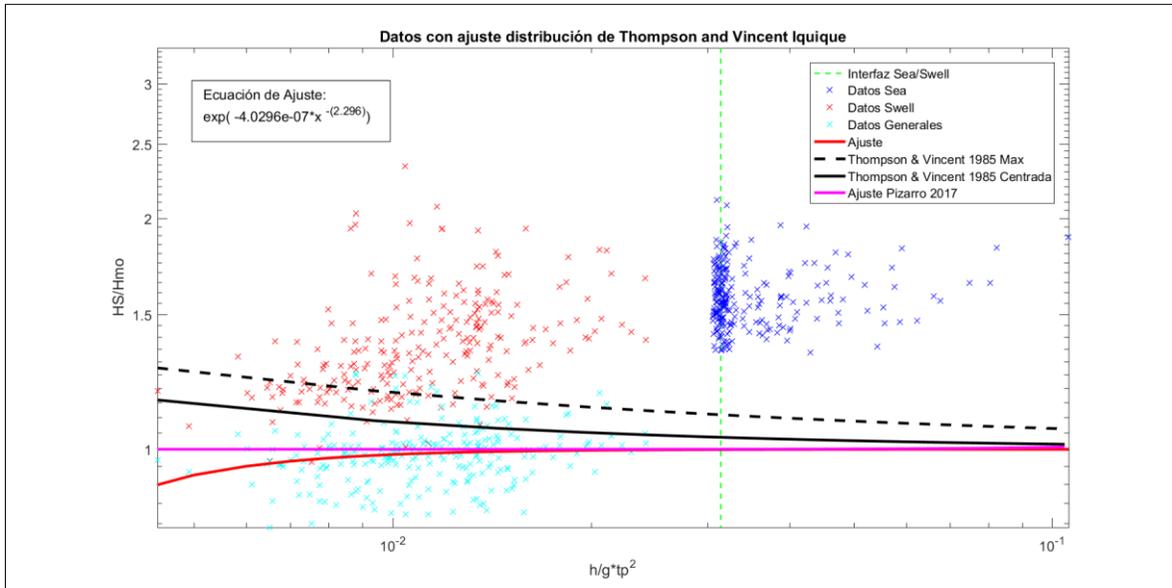


Figura 11-152: Ecuación de Thompson y Vincent Iquique
(Fuente: Elaboración propia)

La localidad de Obispo fue presentada en el capítulo de resultados

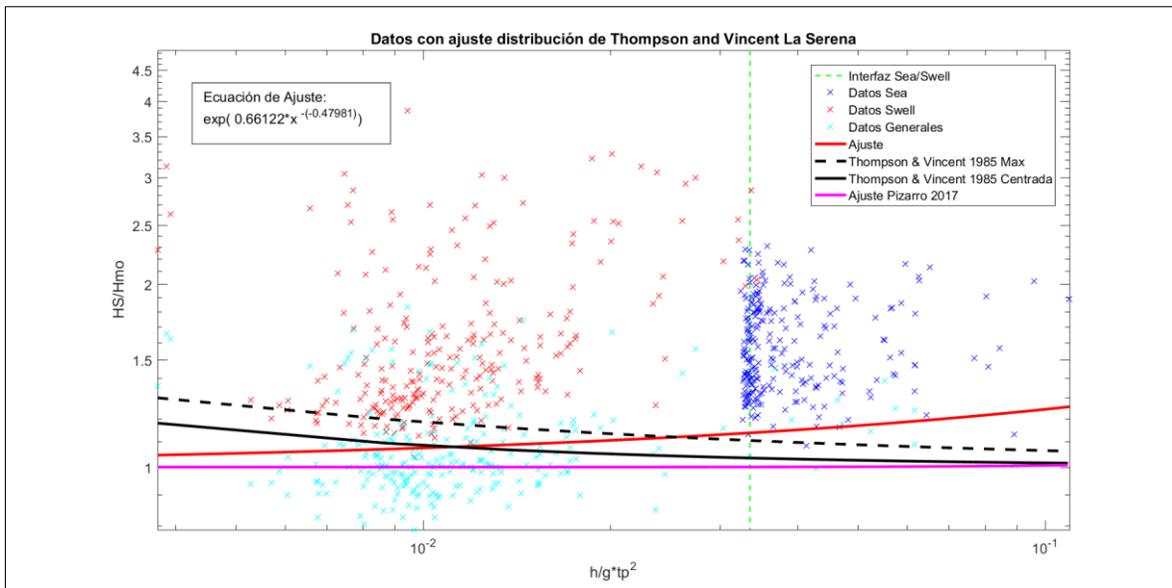


Figura 11-153: Ecuación de Thompson y Vincent La Serena
(Fuente: Elaboración propia)

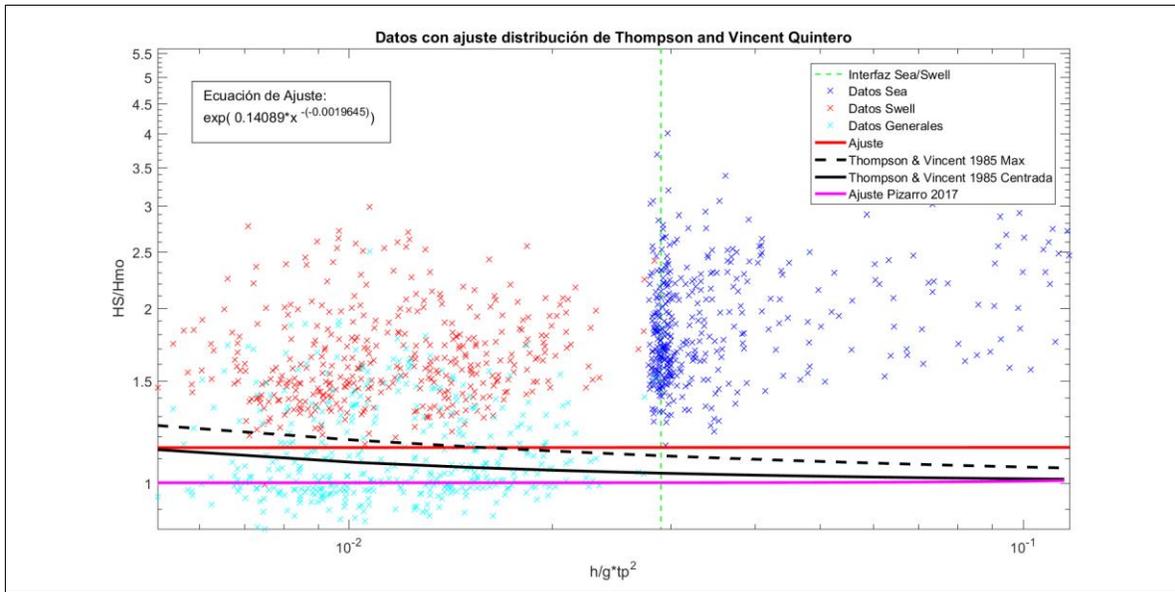


Figura 11-154: Ecuación de Thompson y Vincent Quintero
(Fuente: Elaboración propia)

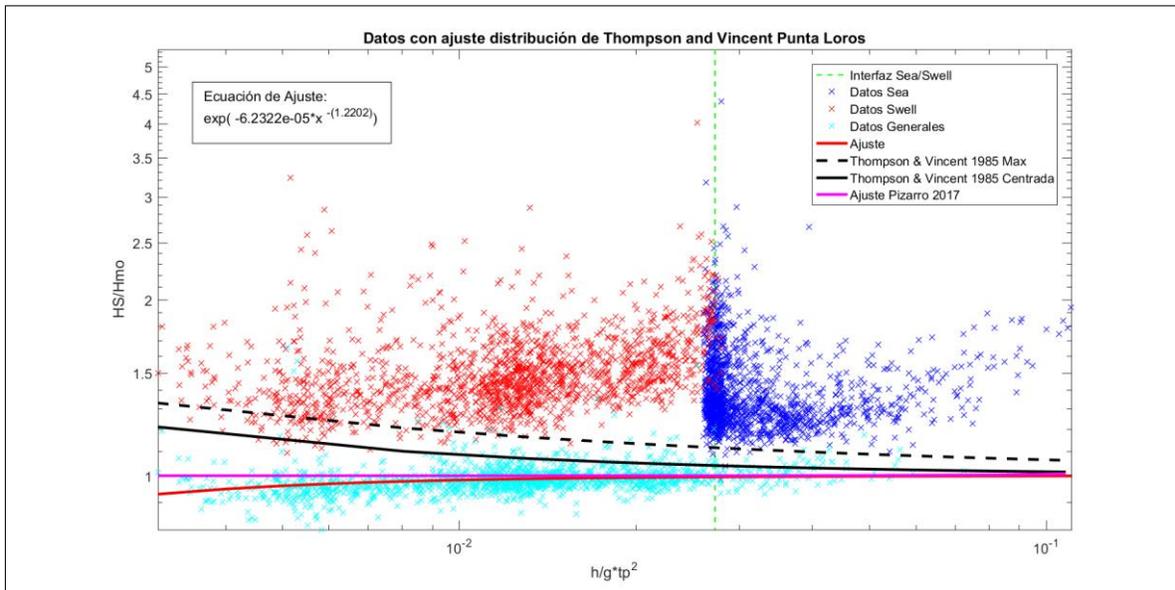


Figura 11-155: Ecuación de Thompson y Vincent Punta Loros
(Fuente: Elaboración propia)

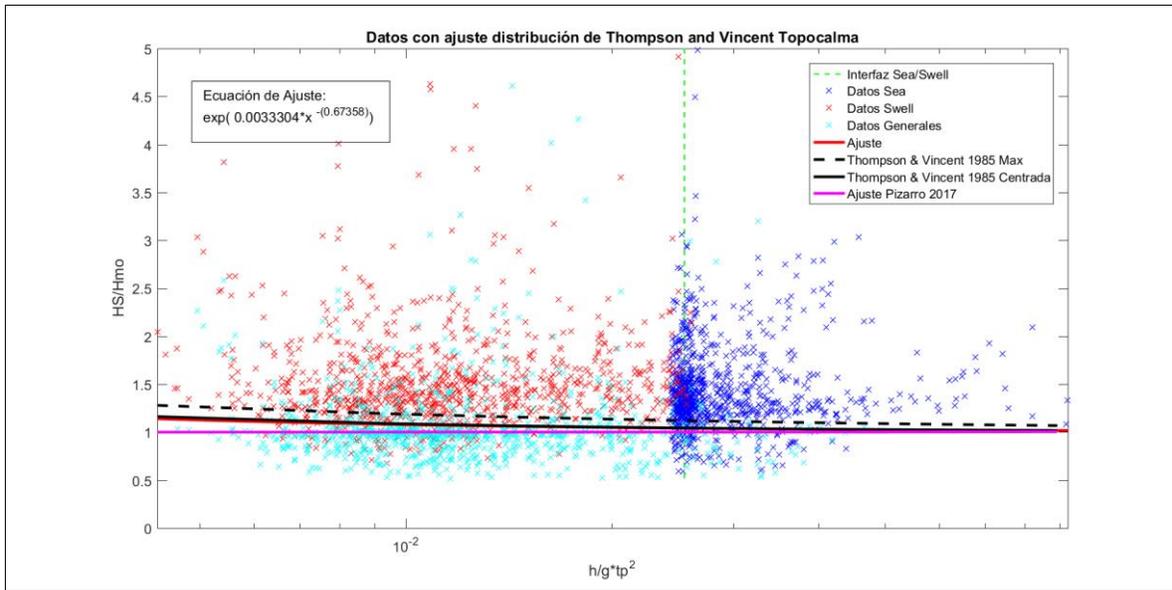


Figura 11-156: Ecuación de Thompson y Vincent Topocalma
(Fuente: Elaboración propia)

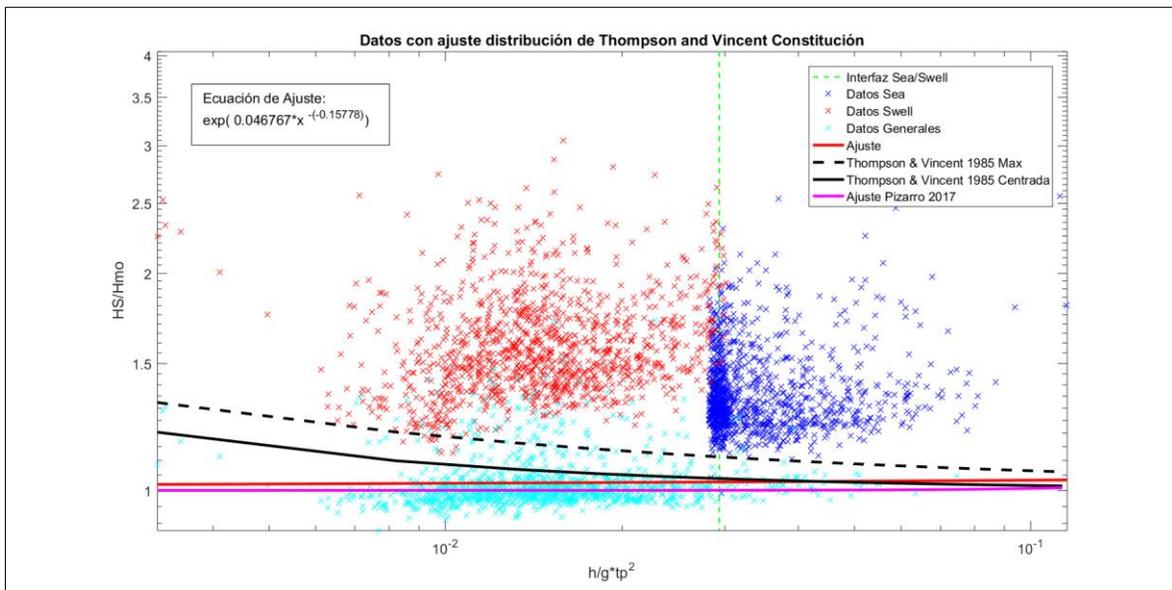


Figura 11-157: Ecuación de Thompson y Vincent Constitución
(Fuente: Elaboración propia)

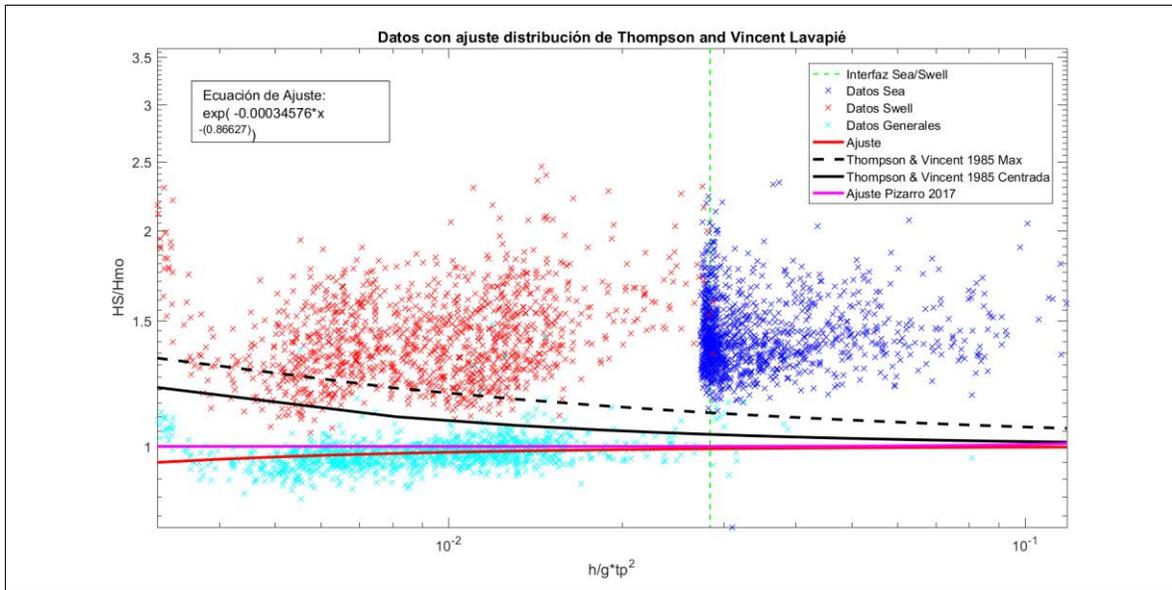


Figura 11-158: Ecuación de Thompson y Vincent Lavapié
(Fuente: Elaboración propia)

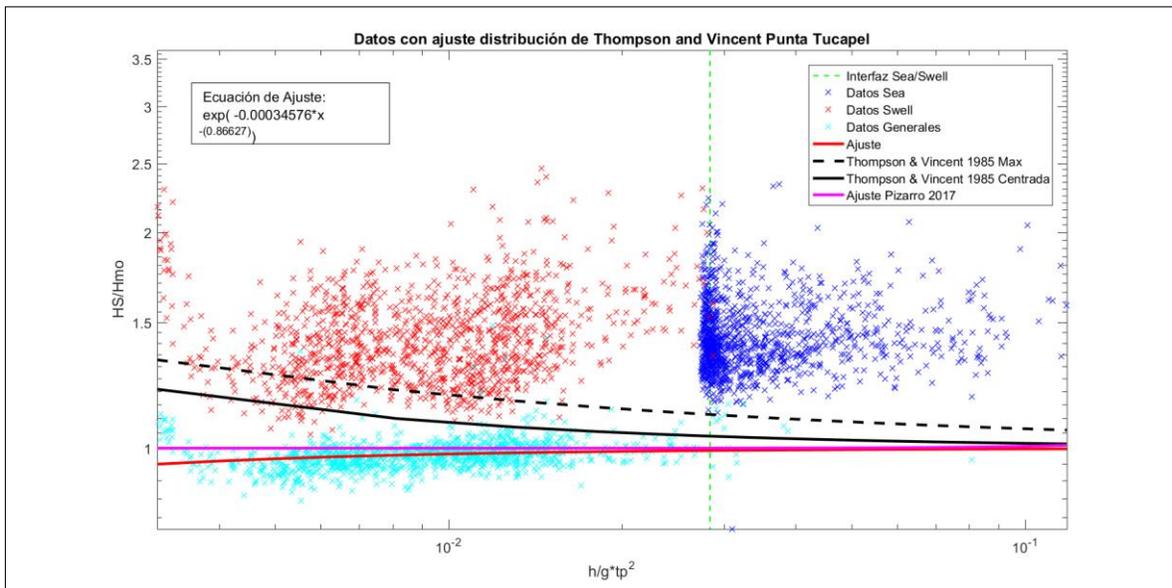


Figura 11-159: Ecuación de Thompson y Vincent Tucapel
(Fuente: Elaboración propia)

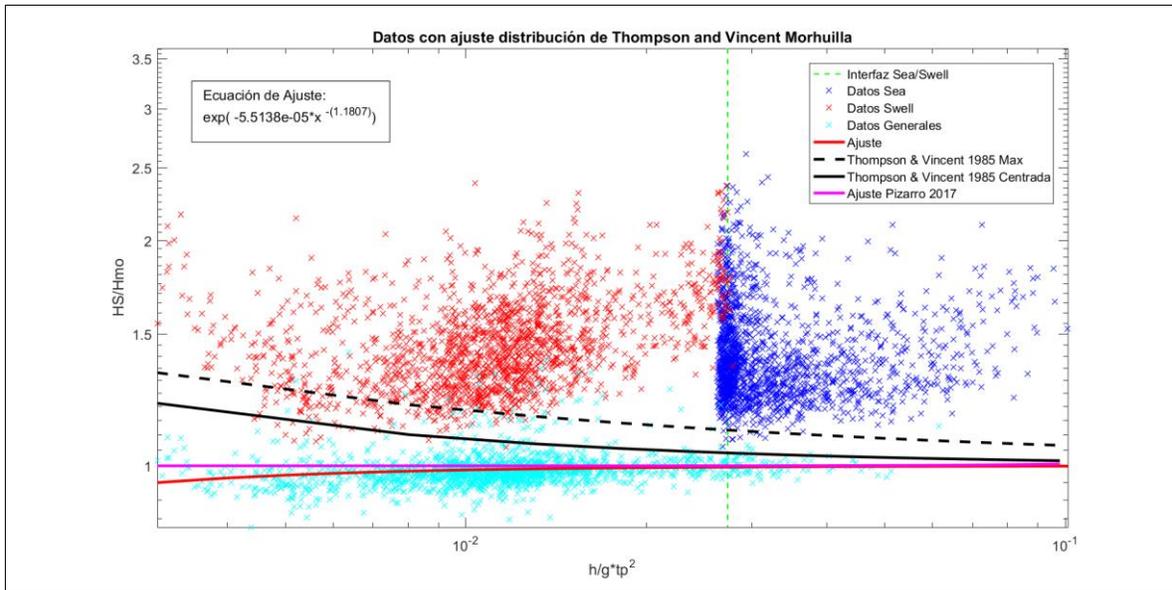


Figura 11-160: Ecuación de Thompson y Vincent Morhuilla
(Fuente: Elaboración propia)

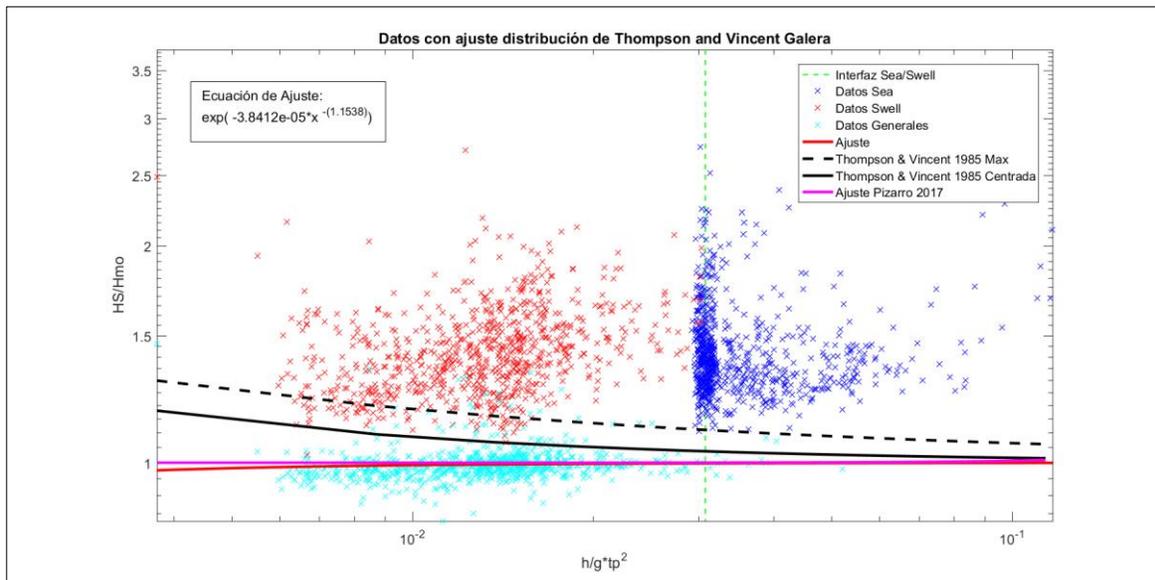


Figura 11-161: Ecuación de Thompson y Vincent Galera
(Fuente: Elaboración propia)